

# 8.WPGI2024

## Ocena zmian przepuszczalności gruntów drobnoziarnistych na podstawie modelu dystrybucji ciśnienia porowego w badaniach CRL

Paweł Dobak

**Paweł Dobak**

Uniwersytet Warszawski – Wydział Geologii

**Piotr Stajszczak**

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



**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

# 1. Wybrane aspekty przepuszczalności gruntów drobnoziarnistych

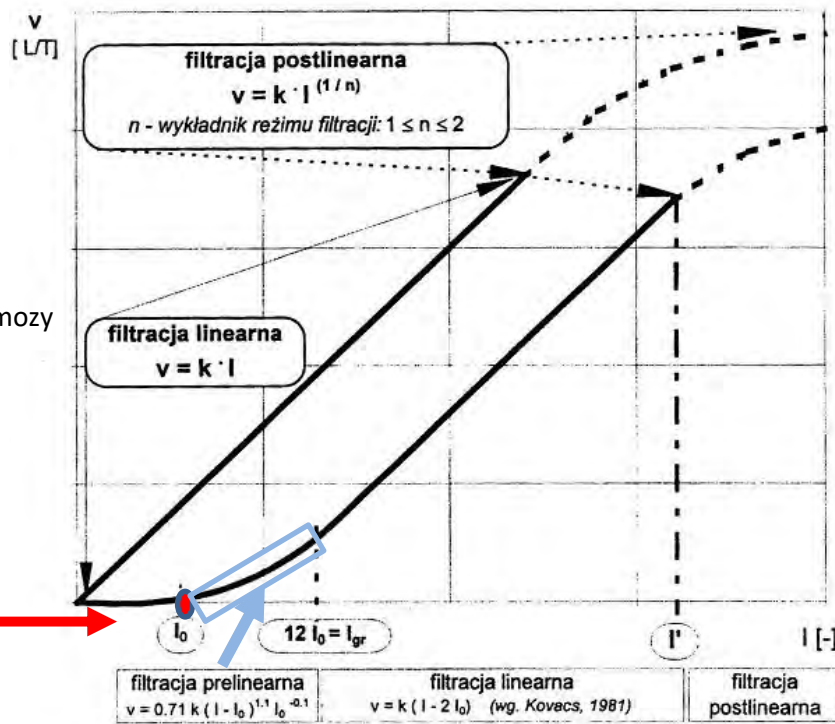
## Prelinearność

Fenomenologiczne równanie strumienia przepływu

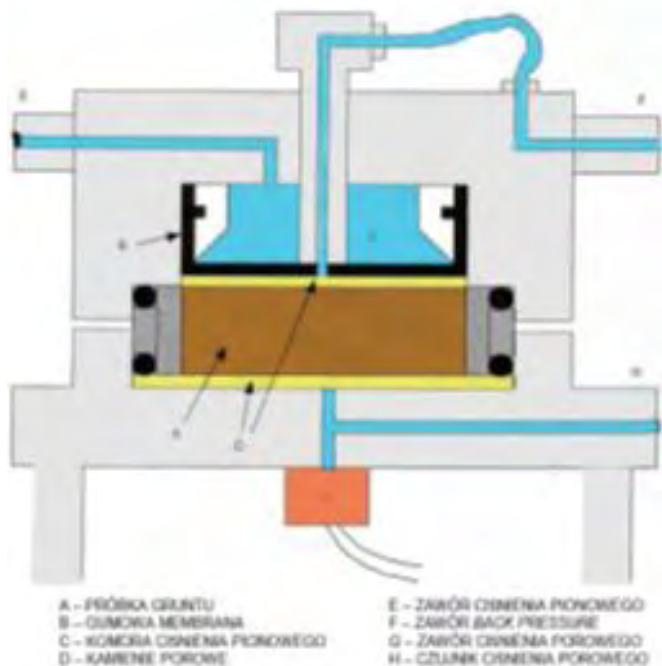
$$\vec{J} = [L] \vec{X}$$

- $\vec{J}$  Wektor strumienia pól fizycznych ( np. filtracji, dyfuzji, osmozy)
- $[L]$  Macierz sprzężenia współczynników: filtracji hydraulicznej dyfuzji, osmozy
- $\vec{X}$  Wektor sił wywołujących przepływy (gradienty pól)

MINIMALNE WARTOŚCI GRADIENTU HYDRAULICZNEGO $i_0$ , niezbędne dla zainicjowania procesu filtracji w utworach spoistych		
wartości $i_0$	charakterystyka ośrodka	wg. badań :
10	grunty spoiste twardoplastyczne i półzwarte	Roza (1950)
< 5	skonsolidowane gliny pylaste zwięzłe	Wilun (1987)
$i_0 = b / k^{0.5}$ $b = 0.044$ $b = 0.089$ $k: [m^2/24h]$		Bondarenko (1973) Kovacs (1981)
$\leq 0.01$	pasty kaolinowe	Cissowski (1985)



## 2. Aparatura i pomiary



Schemat stanowiska do badań konsolidometrycznych (wg. T.Szczepańskiego)

W badaniach CL rejestrujemy w funkcji czasu  $t$  lub  $t_{CL}$

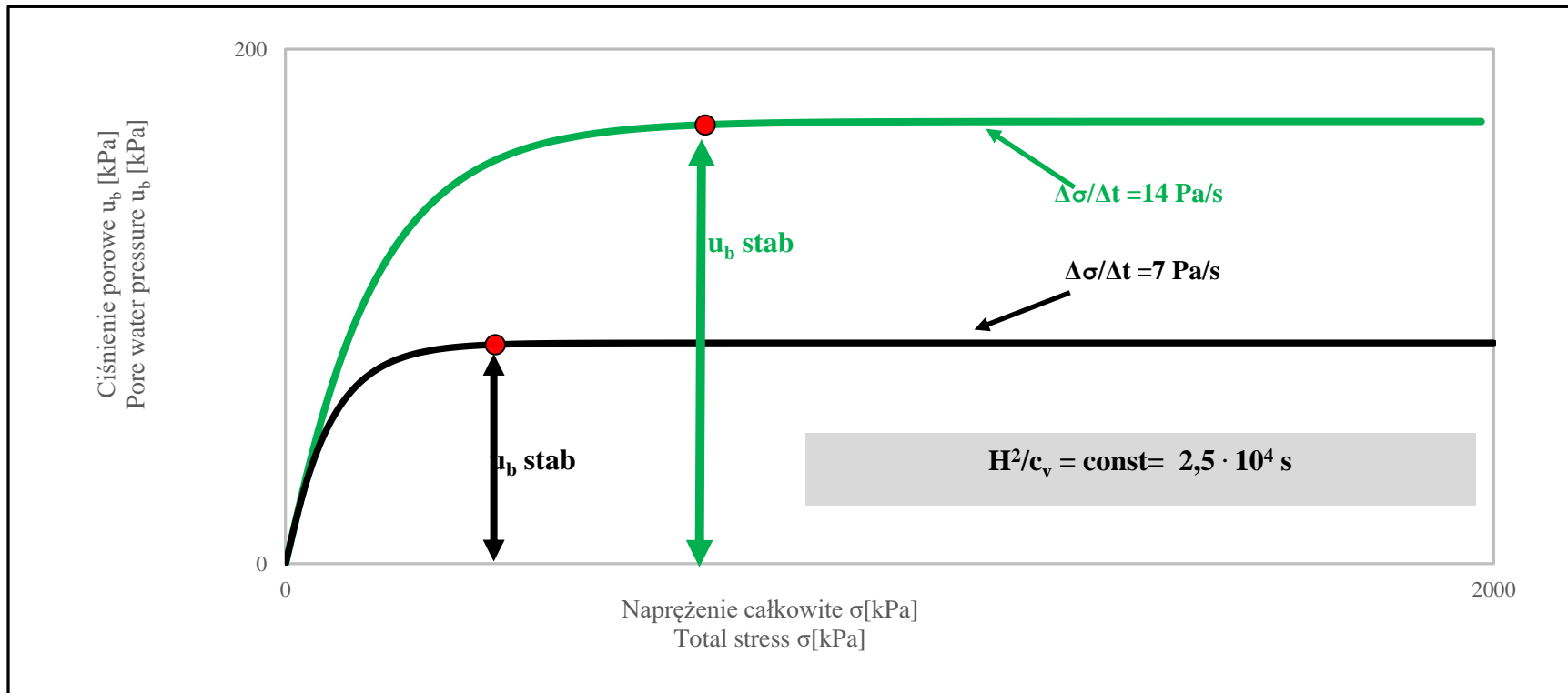
$\sigma$  - naprężenie przekazywane na grunt

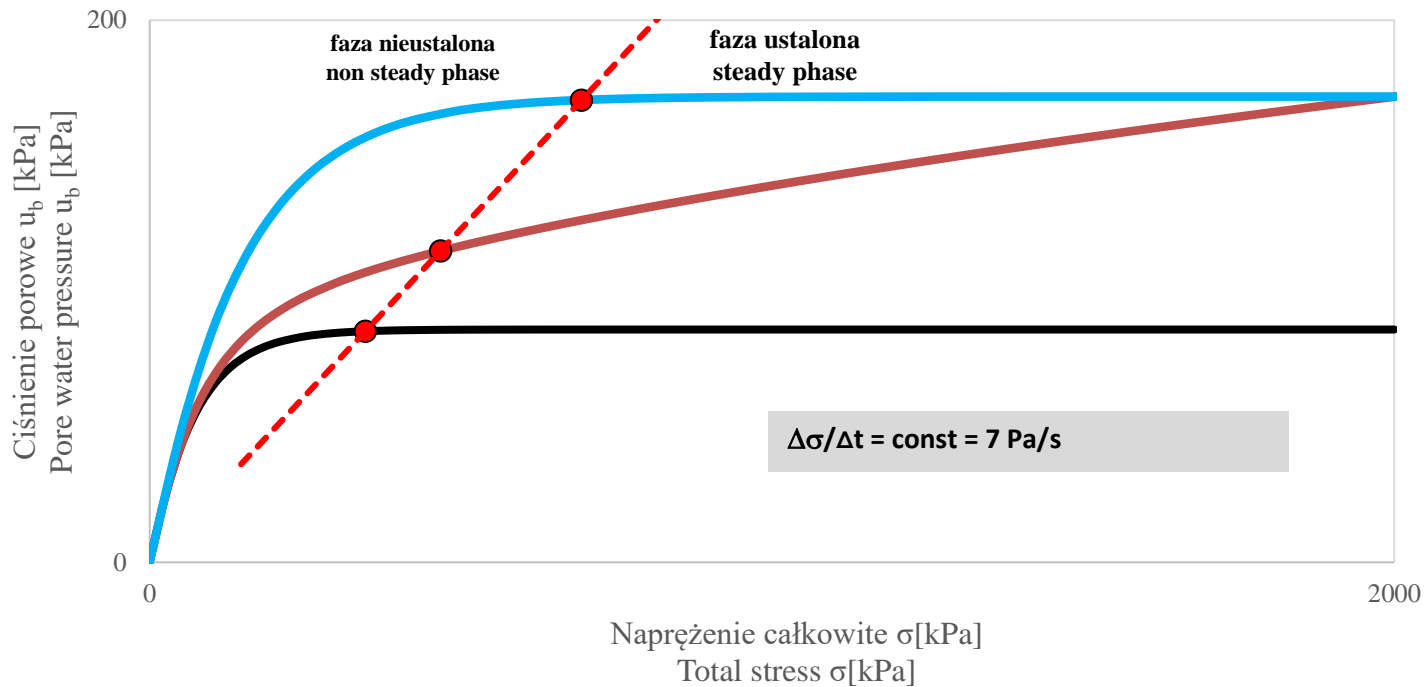
$H$  - aktualne wysokości próbki (długości drogi drenażu)

$u_b$  - ciśnienie wody w porach gruntu mierzone przy nieprzepuszczalnej podstawie konsolidometru



### 3. Teoria





# Ujednolicenie rozwiązań poprzez zastosowanie parametrów bezwymiarowych

## PARAMETRY STANDARYZACJI MODELU

bezwymiarowy parametr  
ciśnienia wody w porach

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

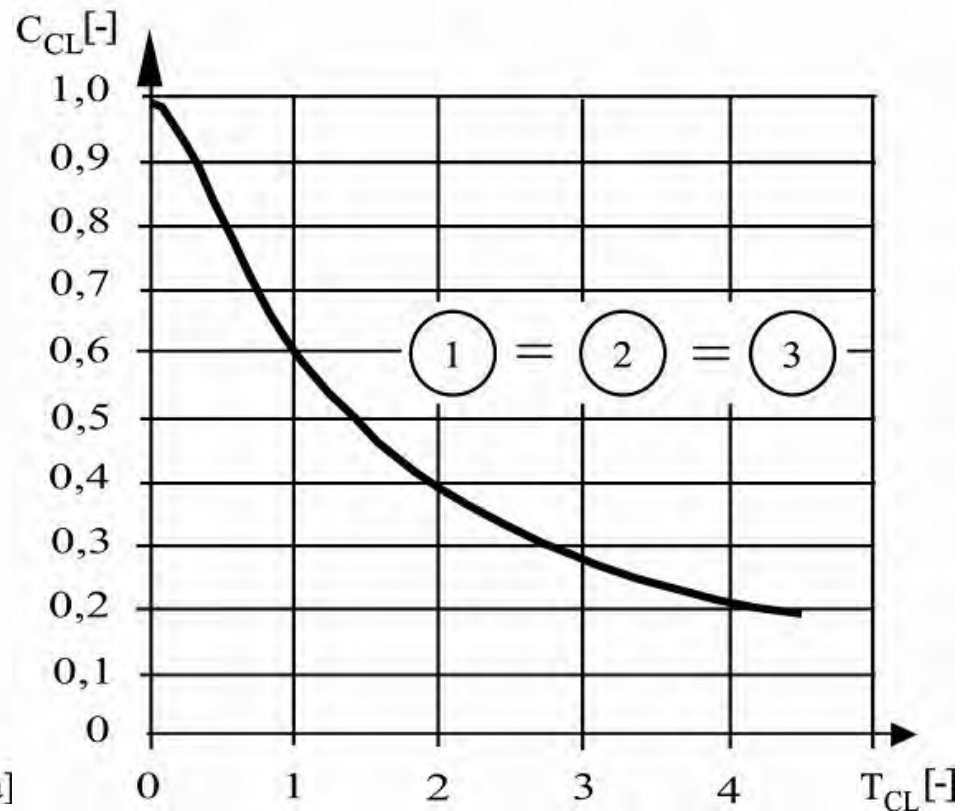
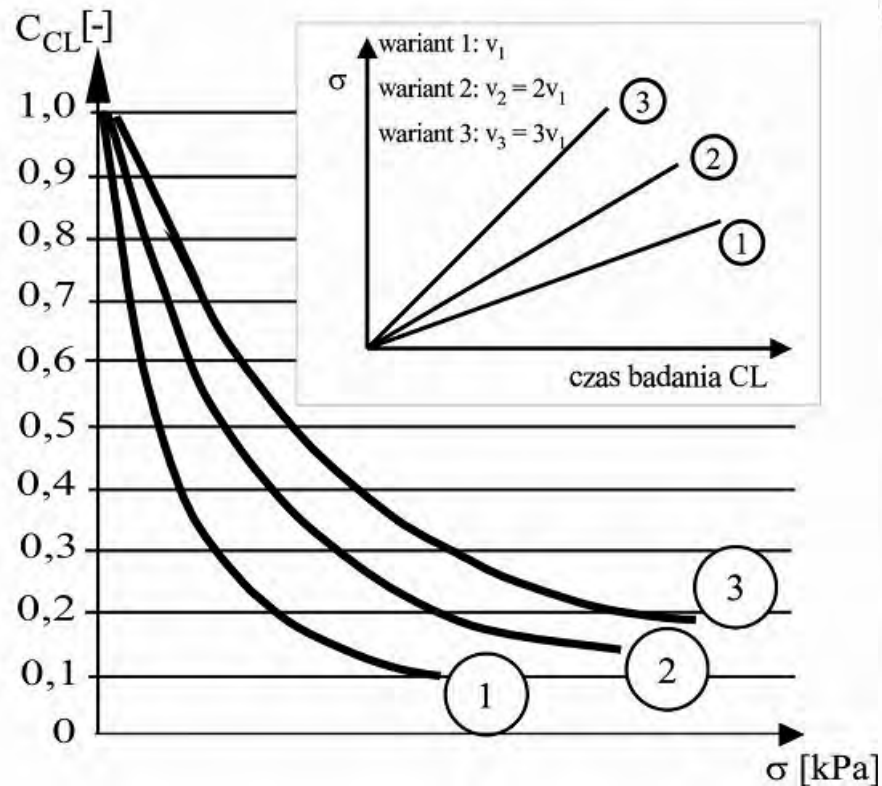
umowny czas konsolidacji

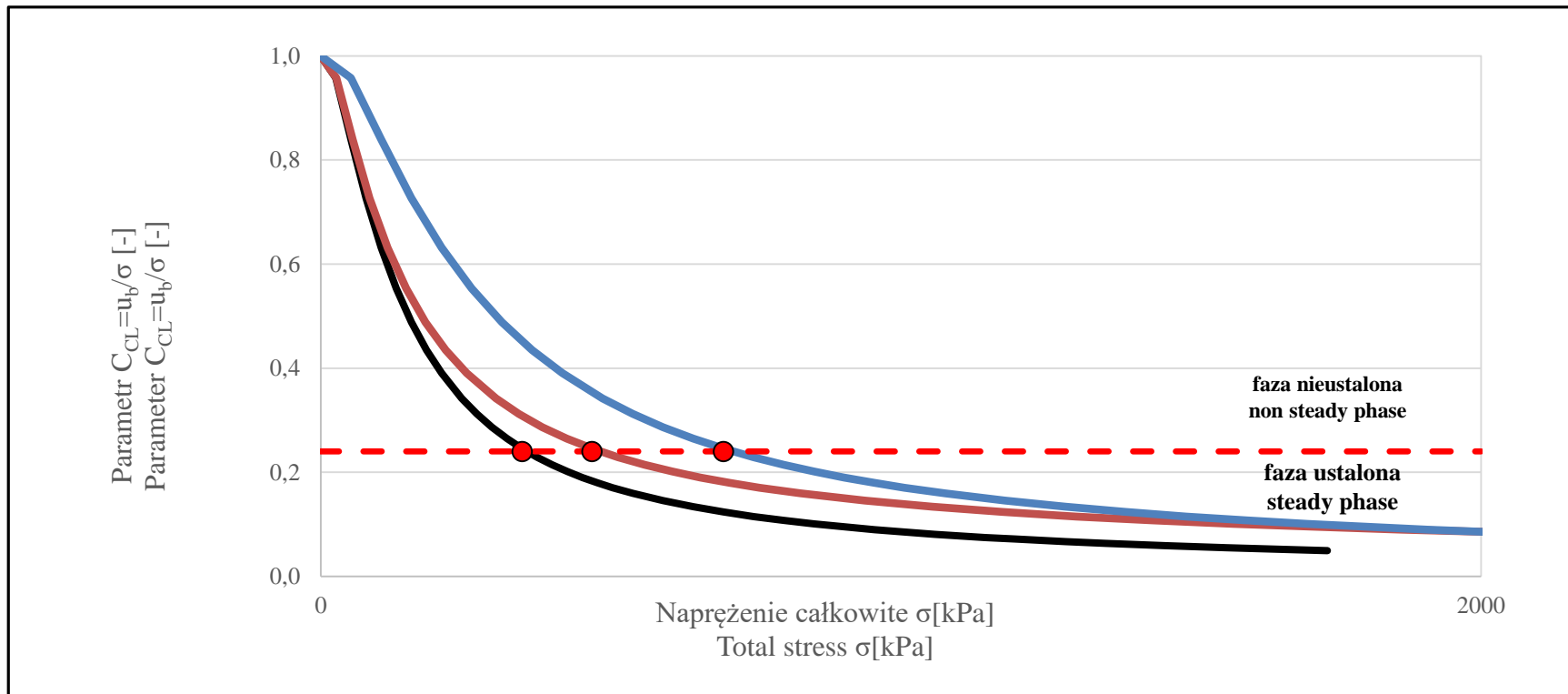
$$t_{(T=1)} = \frac{H^2}{c_v} = \frac{H^2 \cdot \gamma_w}{k \cdot M_0}$$

bezwymiarowy parametr  
względnego czasu  
konsolidacji

$$T_{CL} = \frac{t}{t_{(T=1)}} = \frac{t \cdot c_v}{H^2}$$







# Parametry

Obliczanie wartości modułu ścisłości pierwotnej

$$\sigma' = \sigma - \frac{2}{3} \cdot u_b$$

$$M_0 = \frac{\Delta \sigma' \cdot H_0}{\Delta h} = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta \varepsilon}$$

Obliczanie wartości współczynnika konsolidacji  
*wzór podstawowy*

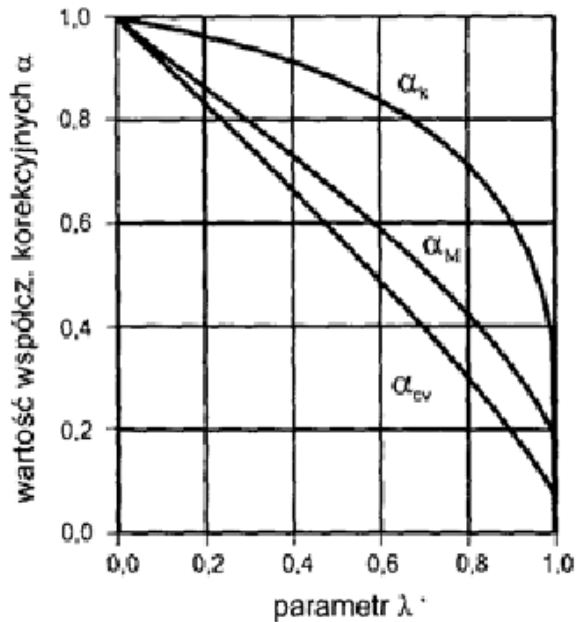
$$c_v = \frac{\Delta \sigma \cdot H^2}{\Delta t \cdot 2u_b}$$

Obliczanie wartości współczynnika filtracji

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



## Opcje obliczeniowe $c_v$

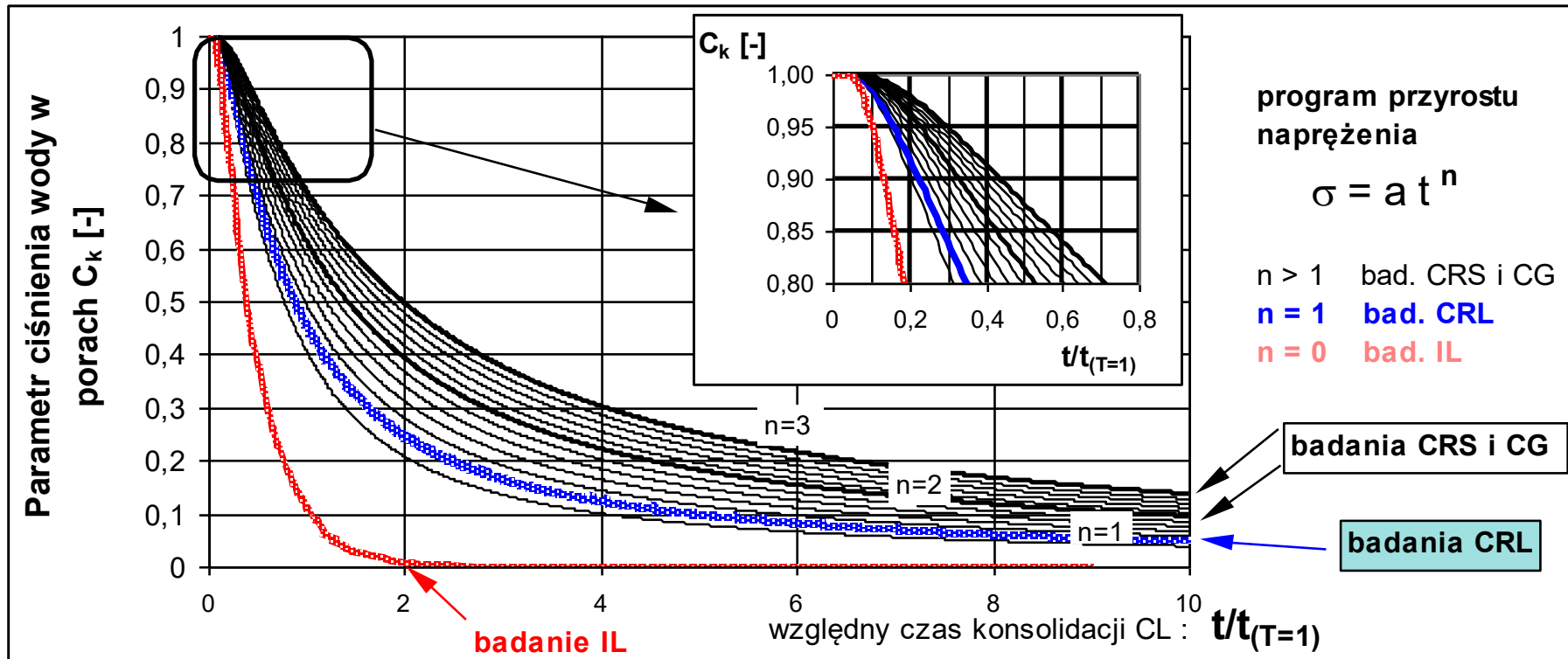


Źródło	Formuła	Objaśnienia
Smith i in. (1969) (wzór podstawowy)	$c_v = \frac{\Delta\sigma \cdot H_i^2}{\Delta t \cdot 2 \cdot u_b}$	$\sigma$ – naprężenie osiowe przyrost naprężeń: $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$
ASTM 4186 – 89	$c_v = - \frac{H^2 \log \left[ \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right]}{2\Delta t \cdot \log \left[ 1 - \frac{u_b}{\sigma} \right]}$	t – czas przyrost czasu $\Delta t = t_2 - t_1$ $H_i$ – długość drogi drenażu (wysokość próbki)
Janbu (1980)	$c_{vJ} = \alpha_c \cdot c_v$ gdzie : $\alpha_c = f(\lambda)$ $\lambda = \frac{\Delta u_b}{\Delta\sigma}$	$u_b$ - maksymalne ciśnienie porowe w osi drenażu współczynnik korekcyjny wg Janbu $\alpha_c \in < 0, 1 >$



Faza  
nieustalona

Faza ustalona



zależność wynikająca z klasycznej teorii Terzagie'ego

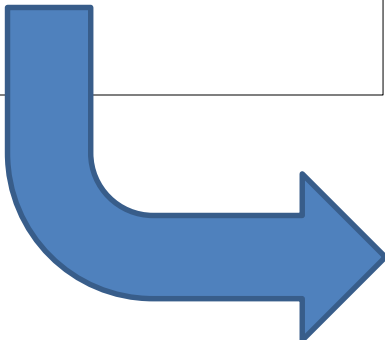
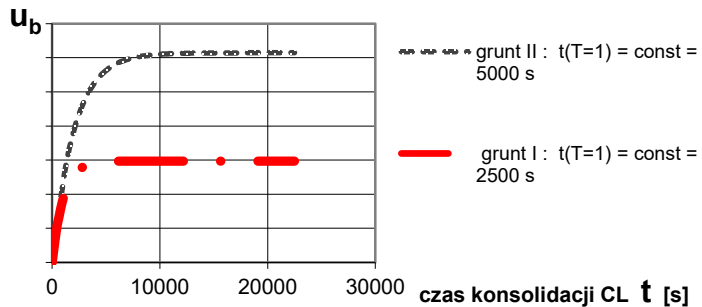


8.WPGI 2024

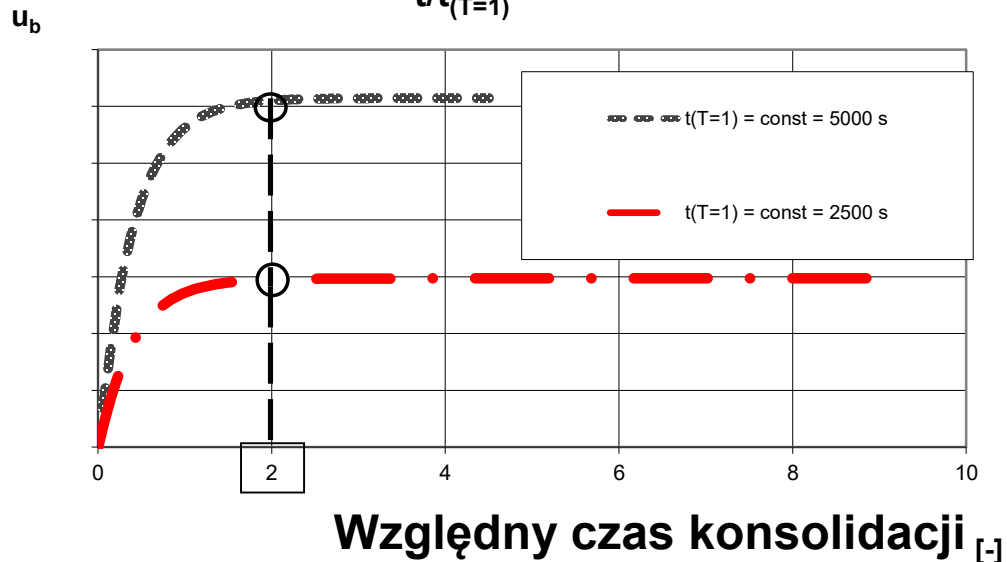
wpgi.pgi.gov.pl

pgi.gov.pl

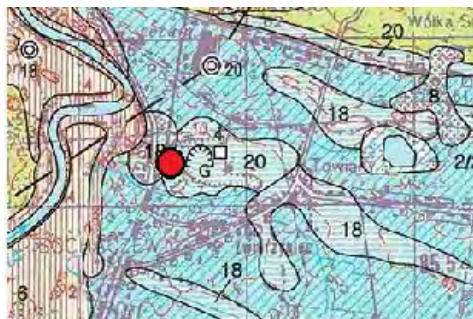
**Zmiany ciśnienia porowego  $u_b$   
w przebiegu konsolidacji CL**  
[  $\Delta\sigma/\Delta t = \text{const}$  ]



**Zmiany ciśnienia porowego  $u_b$  na tle  
względny czasu konsolidacji CL  $T_{CL} =$   
 $t/t_{(T=1)}$**



## 4. Materiał gruntowy



500 m



100 km



500 m



500 m

**Objaśnienia:** SMGP w skali 1:50 000

- Arkusz Kampinos (521)
- Arkusz Warszawa Wschód (524)
- Arkusz Żyrardów (557)

 Miejsce poboru próbek

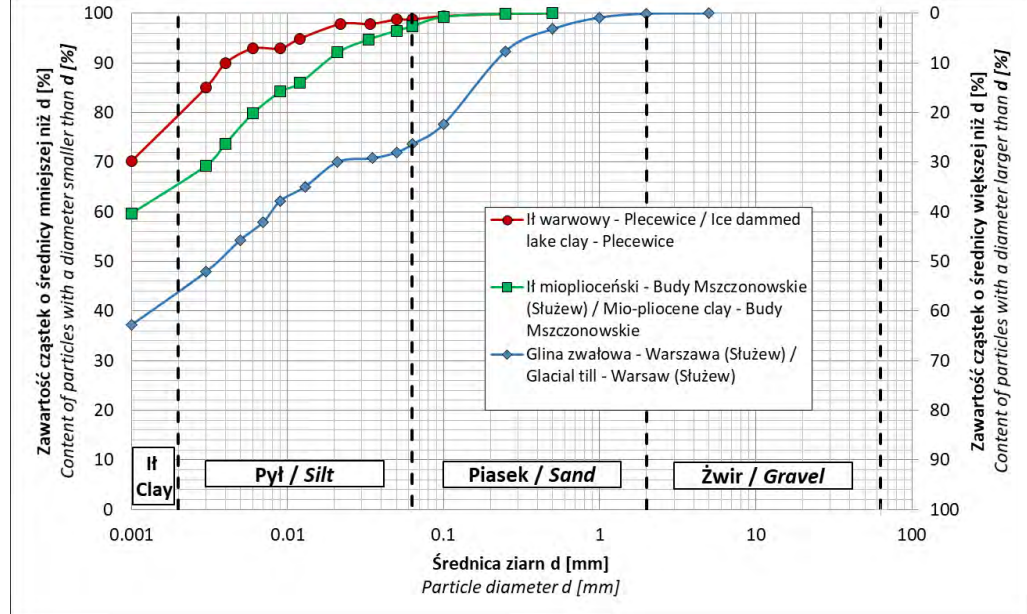


**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

# Parametry fizyczne badanych gruntów



Dane / Data	Wilgotność / Water content		Gęstość objętościowa / Bulk density		Stopień plastyczności / Liquidity index		Wskaźnik konsystencji / Consistency index		Stopień wilgotności / Degree of saturation	
	w [%]		$\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]		I <sub>L</sub> [-]		I <sub>c</sub> [-]		Sr [-]	
Struktura gruntu	Nienaruszona / Undisturbed	Pasta gruntowa / Soil paste	Nienaruszona / Undisturbed	Pasta gruntowa / Soil paste	Nienaruszona / Undisturbed	Pasta gruntowa / Soil paste	Nienaruszona / Undisturbed	Pasta gruntowa / Soil paste	Nienaruszona / Undisturbed	Pasta gruntowa / Soil paste
Il mio-plioceński (Budy Mszczonowskie) / Mio-pliocene clay (Budy Mszczonowskie)	26.8 - 34.1	54.3 - 55.4	1.92 - 2.06	1.68 - 1.69	0.01 - 0.11	0.49 - 0.53	0.82 - 0.99	0.47 - 0.51	0.95 - 1.00	1.00
Il zastoiskowy (Plecewice) / Ice dammed lake clay (Plecewice)	27.7 - 32.4	65.8 - 72.6	1.88 - 1.92	1.60 - 1.64	0.01 - 0.13	0.81 - 0.95	0.89 - 0.99	0.05 - 0.19	0.94 - 1.00	1.00
Głina zwałowa (Warszawa, Fort Służew) / Glacial till (Warsaw, Fort Służew)	15.3 - 18.9	36.8 - 39.7	2.10 - 2.16	1.83 - 1.86	-0.06 - 0.11	0.74 - 0.85	0.89 - 1.06	0.15 - 0.26	0.97 - 1.00	1.00



8.WPGI 2024

wpgi.pgi.gov.pl

pgi.gov.pl

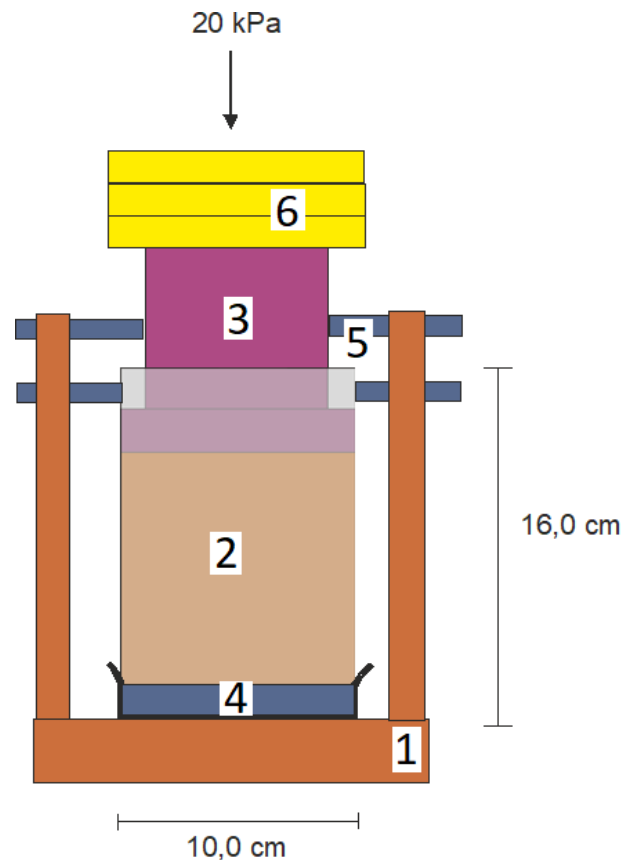
# Preparatyka past gruntowych



Wstępna konsolidacja past gruntowych (fot. P. Stajszczak)

## Objaśnienia:

- 1-Stelaż unieruchamiający cylinder z gruntem.
- 2-Cylinder z pastą gruntową
- 3-Tłok przekazujący obciążenie na badaną próbkę z perforowaną podstawą
- 4-Opaska zaciskowa uszczelniająca podstawę cylindra.
- 5-Śruby stabilizujące tłok.
- 6-Odważniki generujące obciążenie konsolidacyjne próbki.



Schemat stanowiska wstępnej konsolidacji

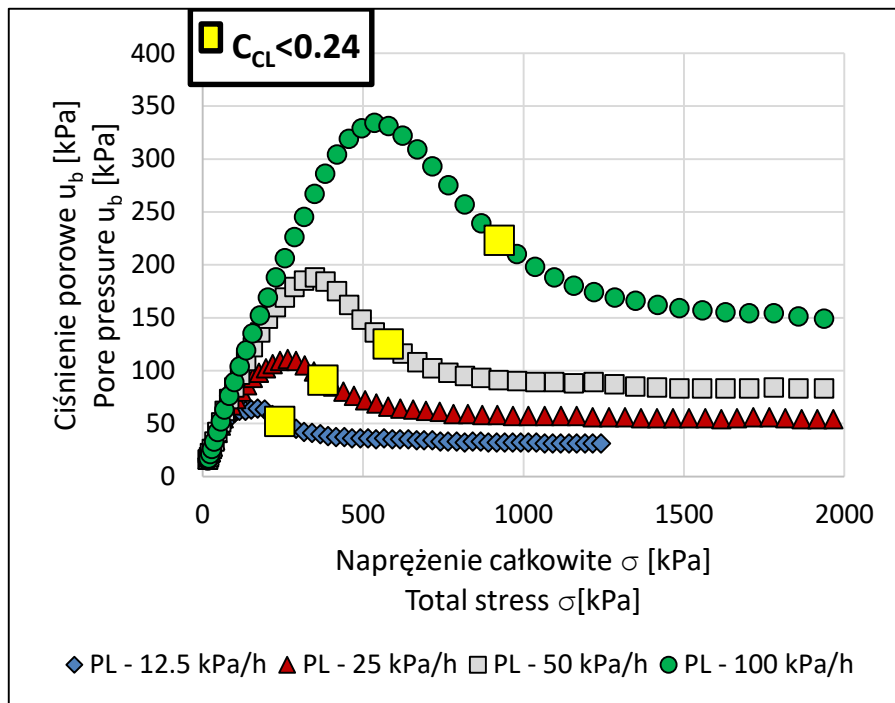


**8.WPGI 2024**

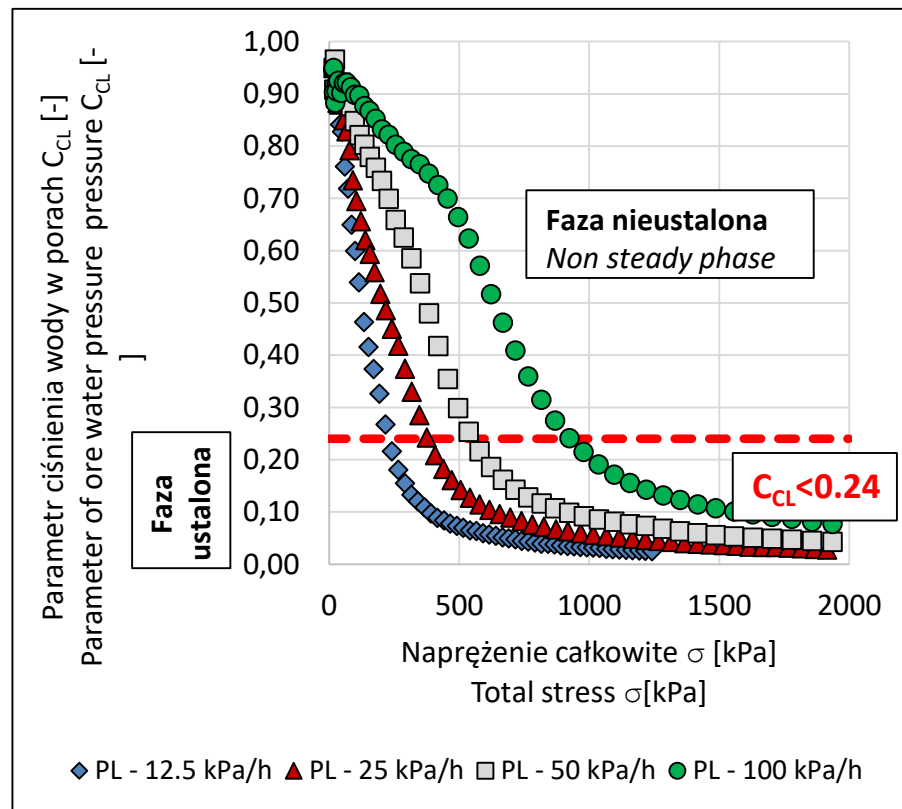
wpgi.pgi.gov.pl

pgi.gov.pl

## 5. Wyniki i interpretacje badań

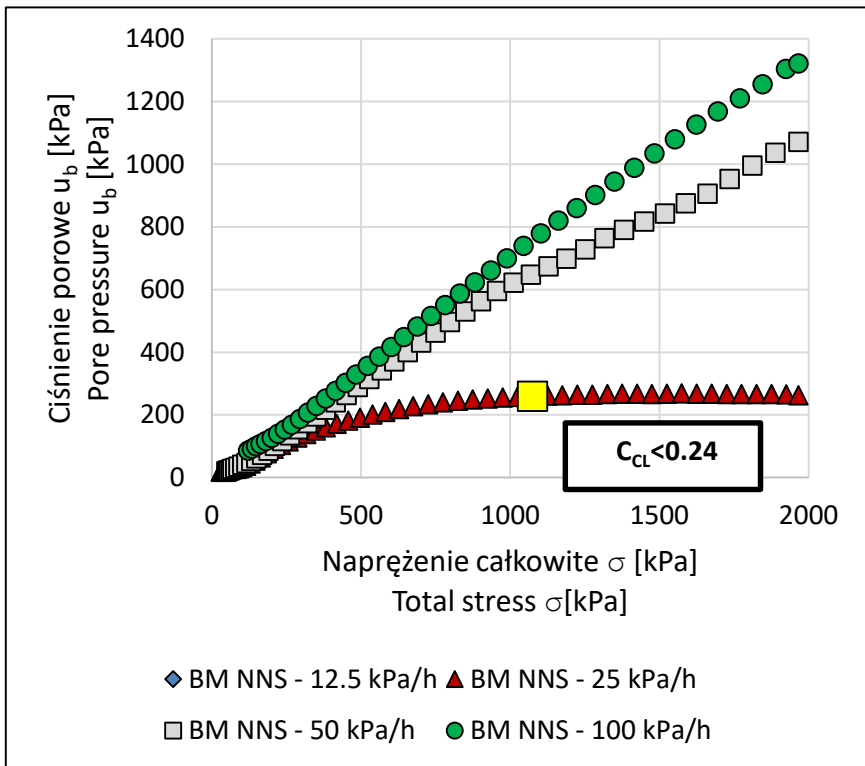


## PLECEWICE ił warwowy

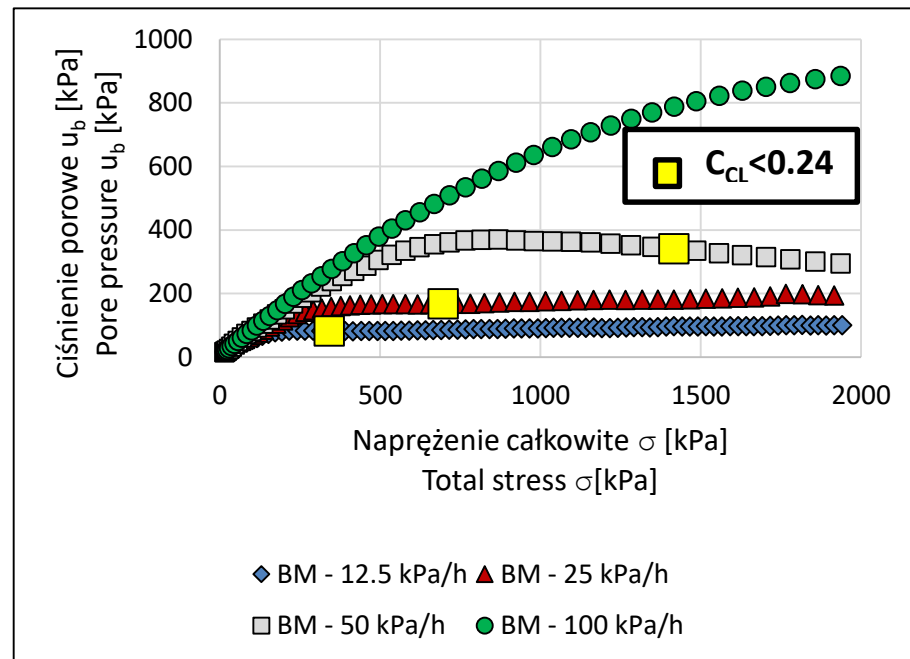


# IŁY MIOCEŃSKIE – Budy Mszczonowskie

NNS



pasta

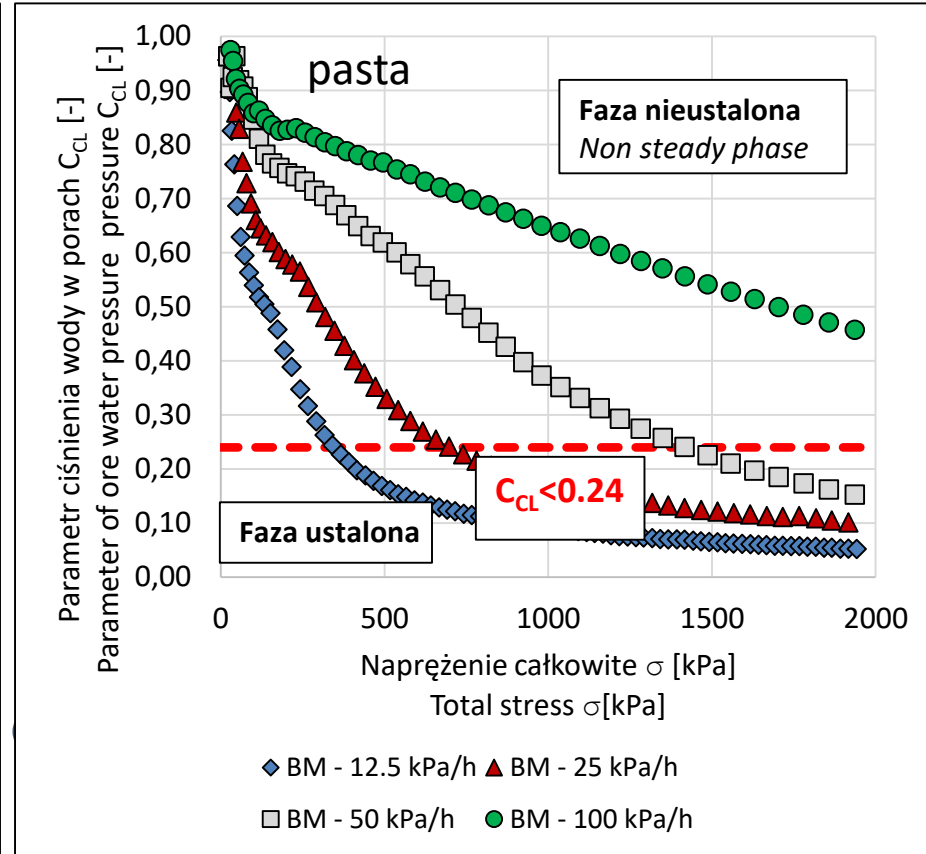
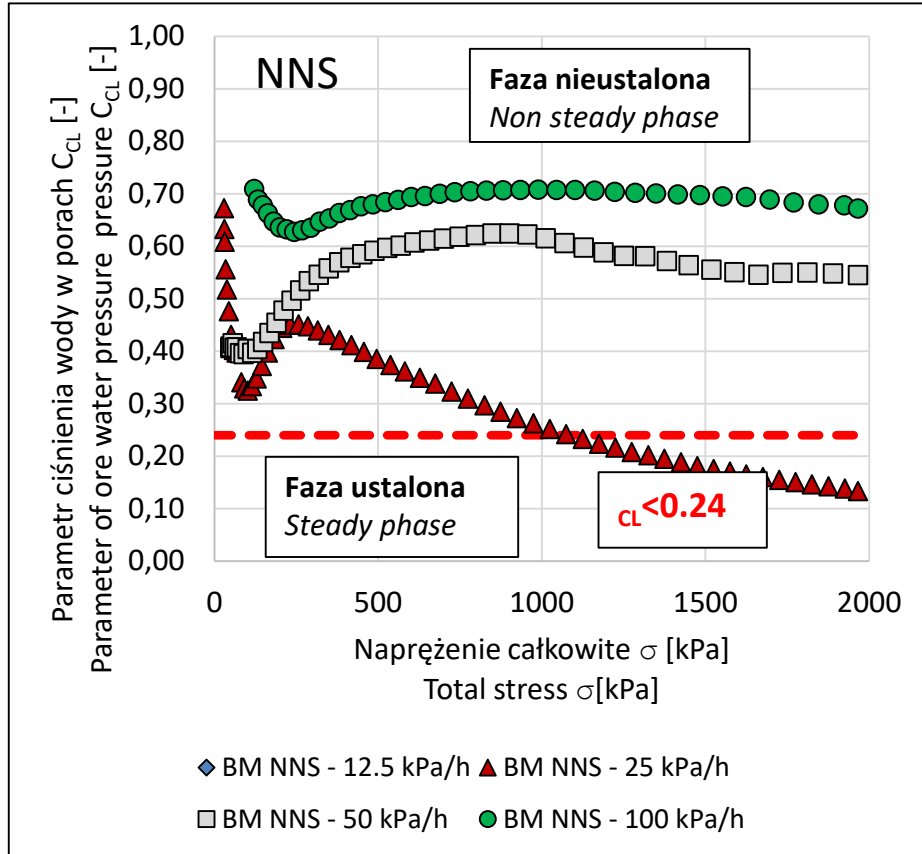


8. WPGI 2024

wpgi.pgi.gov.pl

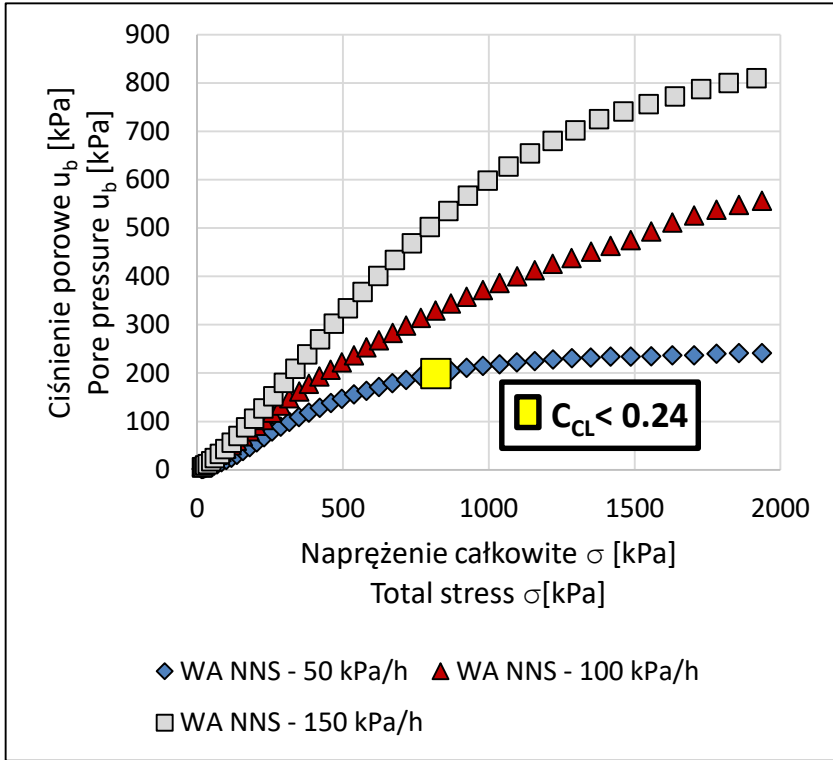
pgi.gov.pl

# Budy Mszczonowski

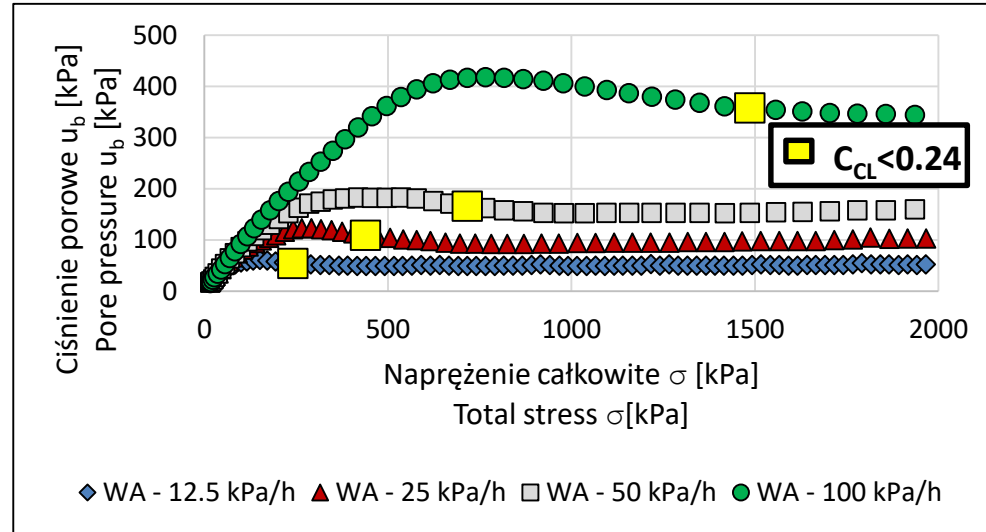


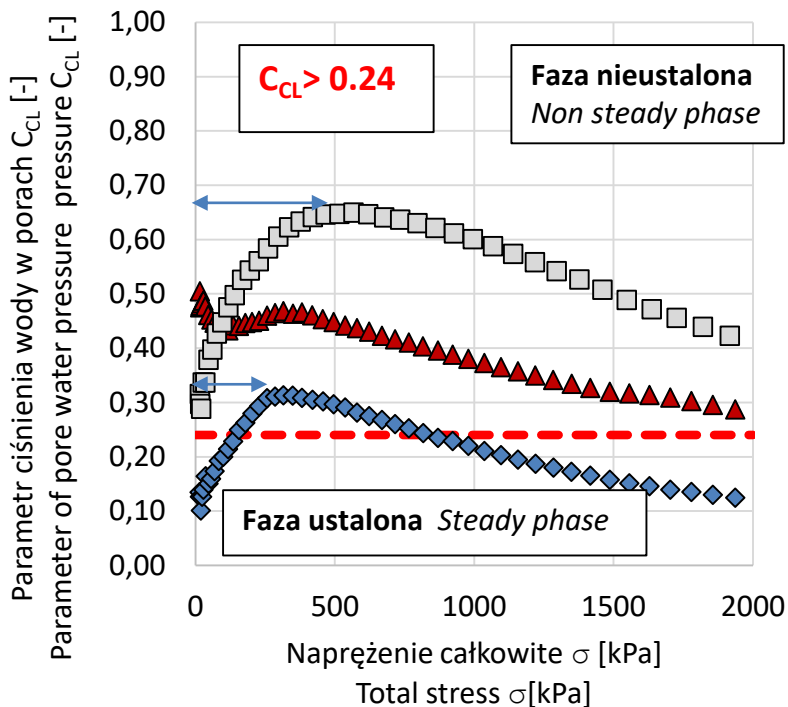
# GLINA ZWAŁOWA – fort Służew

NNS  $w_0 = 17,2 - 17,5\%$      $\rho_0 = 2,11 - 2,66 \text{ g/cm}^3$

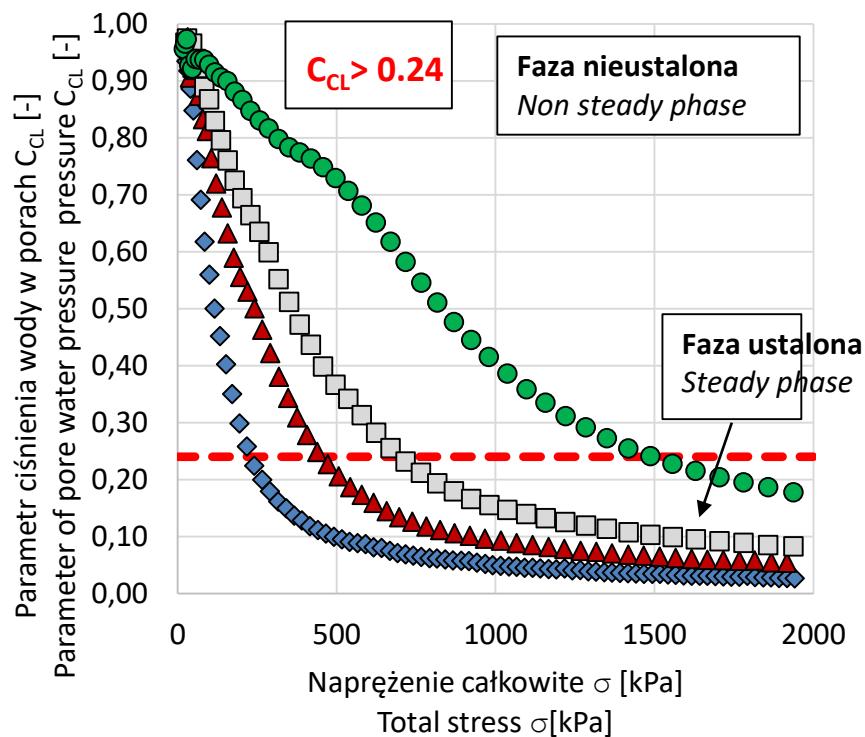


pasta  $w_0 = 36,8 - 39,7\%$      $\rho_0 = 1,83 - 1,86 \text{ g/cm}^3$





- ◆ WA NNS - 50 kPa/h
- ▲ WA NNS - 100 kPa/h
- WA NNS - 150 kPa/h



- ◆ WA - 12.5 kPa/h ▲ WA - 25 kPa/h
- WA - 50 kPa/h ● WA - 100 kPa/h

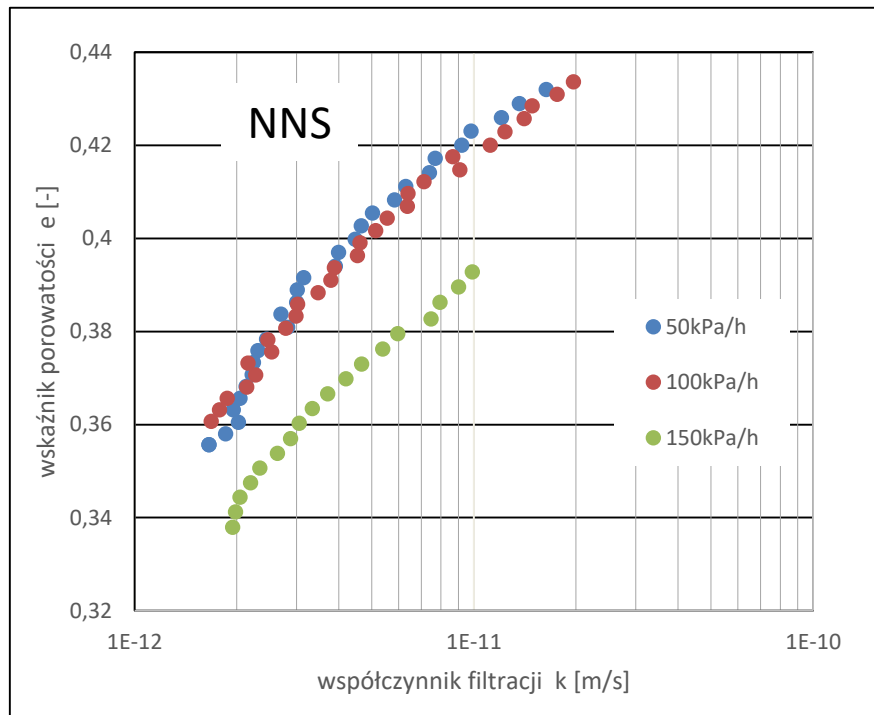


## Wybór metody interpretacji:

- Janbu (z uwagi na stały wzrost ciśnienia porowego)

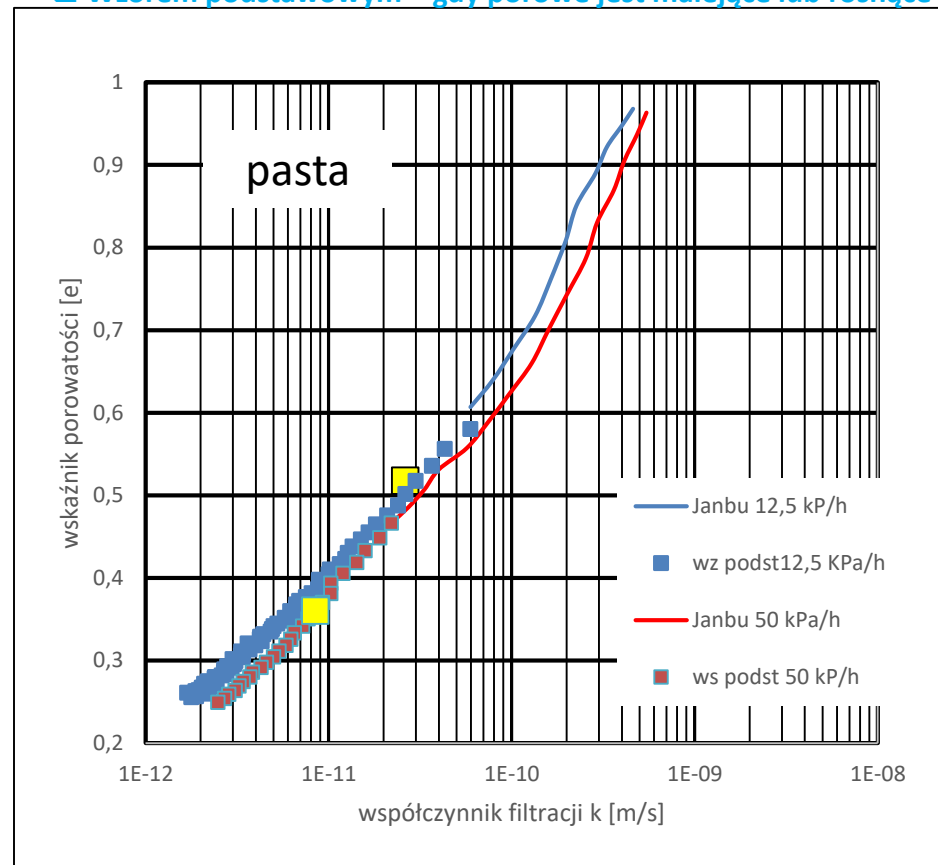
## Zakres miarodajnych (?) oznaczeń

- Gdy  $C_{CL}$  osiąga maksimum,, po którym jego wartość zaczyna zmniejszać się



## Interpretacja metodą

- Janbu (przy wzrastającym ciśnieniu porowym)
- Wzorem podstawowym – gdy porowe jest malejące lub rosnące



## 6. Wnioski

1. Ocena zmian przepuszczalności gruntów drobnoziarnistych (spoiistych) wymaga uwzględnienia odmiennego niż w ośrodku piaszczystym prelinearnego charakteru procesu filtracji. Skutkuje to znaczną zmiennością parametrów filtracji. Warunkowana jest ona charakterem porowatości, wpływem prekonsolidacji oraz zależnością od generowanych w naturze i w badaniach laboratoryjnych ciśnień spadków hydraulicznych.

2. Zastosowanie pośrednich metod wnioskowania o cechach filtracyjnych gruntów słabo przepuszczalnych wiąże się m.in. z badaniami konsolidacji podejmowanymi w celu określania ściśliwości i czasu przebiegu konsolidacji a także szczelności gruntowych barier izolacyjnych.



3. Badania w konsolidometrze ze stałym wzrostem obciążenia (CRL) umożliwiają szybkie i dość precyzyjne określenie parametrów gruntowych szczególnie w gruntach ściśliwych o wysokim stopniu wilgotności. Wymagana jest jednak krytyczna ocena przebiegu zachowania gruntu na tle charakterystyk modelowych wyprowadzonych z teorii konsolidacji filtracyjnej Terzaghi'go. Porównania takie i obserwowane rozbieżności pozwalają na wskazanie wpływu struktury gruntu i warunków brzegowych obciążania na charakter filtracji w mikroprzestrzeniach porowych łąć i pyłóć.

4. Kluczowymi narzędziami oceny miarodajności wyników badań jest analiza zmian ciśnienia porowego w funkcji rosnącego obciążenia gruntu oraz nowo wprowadzanego parametru  $T_{CL}$ : względnego czasu konsolidacji CL



Umożliwia to wydzielenie w przestrzeni fizycznej zależności:

- współczynnika filtracji od wskaźnika porowatości i ciśnienia wody w porach
- przedziałów miarodajnych i quasi - miarodajnych wymagających zastosowania poprawek.

Wykresy zmian ciśnienia porowego wskazują także (szczególnie w gruntach przekonsolidowanych) początkowej fazy mobilizacji przepływu wody w porach która nie pozwala na prawidłową oceny przepuszczalności zgodnie z założeniami modelowymi.

5. W interpretacji badań konsolidacyjno – filtracyjnych należy dobrać zindywidualizowane metody obliczeniowe dostosowywane do zmiennego charakteru fizycznego przebiegu konsolidacji filtracyjnej.



## 7. Wybrana BIBLIOGRAFIA

- ABOSHI H., YOSHIKUMI H., MAURYAMA S. 1970 – Constant Loading Rate Consolidation Test. *Soils and Foundations*, 10 (1): 43–56.
- BAŁKOWSKA A., DOBAK P., GAWRIUCZENKOW I., KIEŁBASIŃSKI K., SZCZEPAŃSKI T., TRZCIŃSKI J., WÓJCIK E., ZAWRZYKRAJ P. 2016 – Stress-strain behaviour analysis of Middle Polish glacial tills from Warsaw (Poland) based on the interpretation of advanced field and laboratory tests. *Acta Geol. Pol.*, 66 (3), 561–585.
- DOBAK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- DOBAK P. 2008 – Evaluation of consolidation parameters in CL tests; theoretical and practical aspects. *Geol. Quart.*, 52 (4): 397–410.
- DOBAK P., GASZYŃSKI J. 2015 – Evaluation of soil permeability from consolidation analysis based on Terzaghi's and Biot's theories. *Geol. Quart.*, 59 (2): 373–381.



- DOBAK P., KOWALCZYK S. 2008 – Consolidation parameters of Neogene green clays from Bełchatów – a study on CL test interpretation. *Geologija*, 50: 20–25.
- DOBAK P., SZCZEPAŃSKI T., KOWALCZYK S. 2015 – Load velocity influence on changes of soil consolidation and permeability parameters in CL-type tests. *Geol. Quart.*, 59 (2): 382–390.
- HEAD K.H. 1986 – *Manual of Soil Laboratory Testing*. Pentch Press, London.
- JANBU N., TOKHEIM O., SENNESET K. 1980 – Consolidation tests with continuous loading. Norwegian Geotechnical Institute, publ. No. 9, Oslo.
- KOWALCZYK S., SZCZEPAŃSKI T., DOBAK P. 2013 – Charakterystyka rozkładu ciśnienia porowego w badaniach konsolidacji past gruntowych z północnopolskich glin zwałowych. *Budow. i Inżynieria Środ.*, 4(2): 127–134.
- PAJAŁ R., DOBAK P. 2008 – Określenie parametrów filtracyjnych iltów krakowieckich z badań w konsolidometrze Rowe'a. *Kwart. AGH – Geologia*, 34 (4).



- SINHA U.N., BHARGAVA S.N. 1991 – Variation in differential pore water pressure and particle size at different constant rate of loading in an automated consolidation testing system. *Geotech. Engineering*, 22: 247–256.
- STAJSZCZAK P. 2018 – Filtracyjno-konsolidacyjne właściwości iłówo-mio-pliedeńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia. *Prz. Geol.*, 66: 558–568.
- STAJSZCZAK P. 2019 – Wpływ zanieczyszczenia paliwami ropopochodnymi na zmiany parametrów filtracyjno-konsolidacyjnych i strukturalnych w gruntach spoistych. *Arch. Wydz. Geol. UW – pr. doktorska*.
- SZCZEPAŃSKI T. 2007 – Przykłady zastosowań parametrów inherentnych w badaniach gruntów spoistych. *Geologos*, 11: 405–410.
- VU CAO MINH 1976 – Nowa metoda badań konsolidacji gruntów. *Arch. Hydrotech.*, 23 (2): 000–000.



# 8. WPGI 2024

Dziękujemy za uwagę i cierpliwość.

Autorzy będą wdzięczni za aplikacje i dyskusje w  
nawiązaniu do Swoich wyników badań.



**8. WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

