



Zastosowanie modelowania numerycznego w projektowaniu wzmocnień podłoża słabonośnego - sprawozdanie z prac w ramach projektu RID2 (NCBR & GDDKiA)

Marcin Cudny

Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej,
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska,
Politechnika Gdańska



WYDZIAŁ INŻYNIERII
LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA



Korbielów, 05/03/2025

Główne i szczegółowe cele prac w projekcie RID2

- Opracowanie wytycznych przyjmowania, projektowania i oceny wzmocnień podłoża słabonośnego
- podział gruntów słabonośnych, katalog sytuacji geotechnicznych w różnych rodzajach gruntów, katalog technologii (grupy i należące do nich technologie), karty technologii, algorytm przyjmowania i projektowania wzmocnień na różnych etapach inwestycji.

Odbiorcy ostatecznych wytycznych i różne klucze ich użycia:



Nadzór nad inwestycją, projektowaniem, badaniami gruntu:

sytuacja geotechniczna → grupy technologii, ostateczna technologia
technologia → wymagania projektowe, parametry, ograniczenia



Projektanci:

technologia → metody projektowania, badania dodatkowe, parametry



Laboratoria, wykonawcy badań polowych:

rodzaj gruntu → technologia → metody badań → parametry

Wydzielone rodzaje gruntów słabonośnych

Grunty grupy A – ściśliwe **grunty organiczne** charakteryzujące się warunkami bez odpływu, np. namuły, namuły z frakcjami pylastymi, ilastymi, piaszczystymi, torfy, gytie. W zależności od głębokości zalegania:

A' – grunty występujące powierzchniowo (bezpośrednio po sedimentacji)

A'' – grunty zalegające pod innymi utworami (najczęściej piaszczystymi), które mogły ulec częściowej diagenecie i charakteryzują się lekką prekonsolidacją.

Grunty grupy B – luźne **grunty gruboziarniste/niespoiste** ($I_D \leq 0,35$) o różnym uziarnieniu i pochodzeniu (np. grunty naturalne lub nasypy).

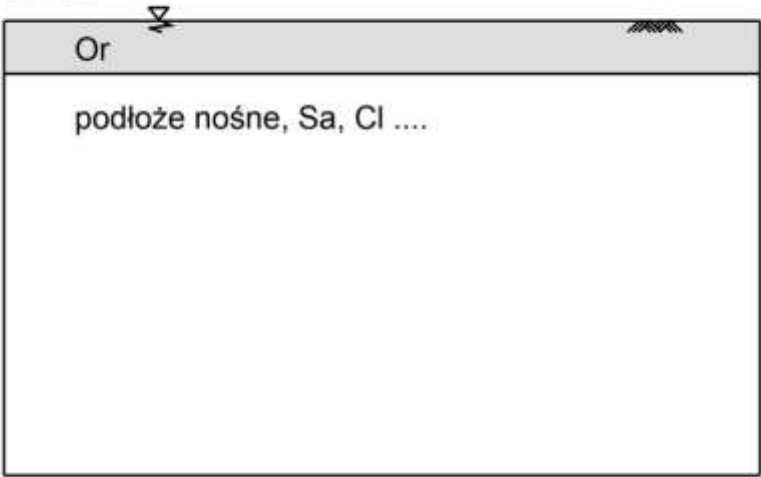
Grunty grupy C – **grunty drobnoziarniste/spoiste** w stanie plastycznym i gorszym ($I_c \leq 0,75$), np. naruszone lub odciążone gliny o pochodzeniu starszym niż holocen, których stopień plastyczności nie wskazuje na prekonsolidację lub diagenetę wynikającą z geologii.



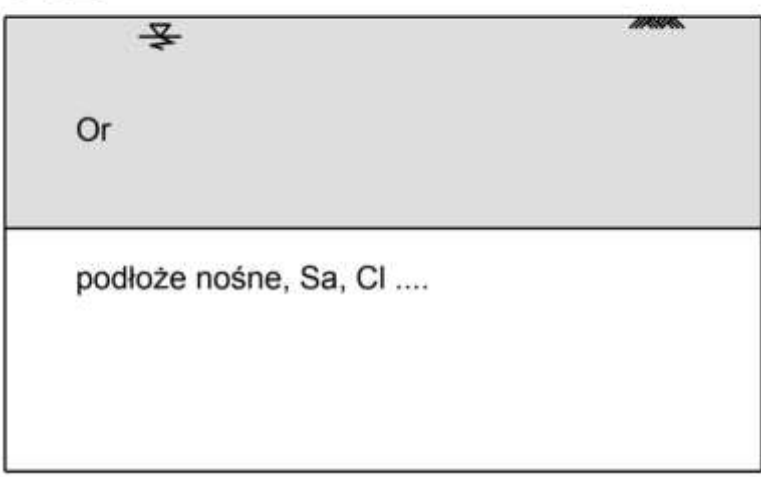
Katalog sytuacji geotechnicznych

Grunty grupy A

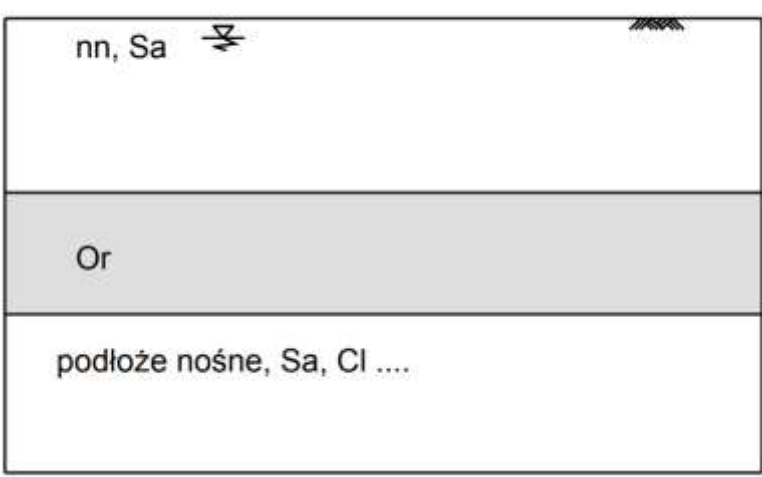
A1



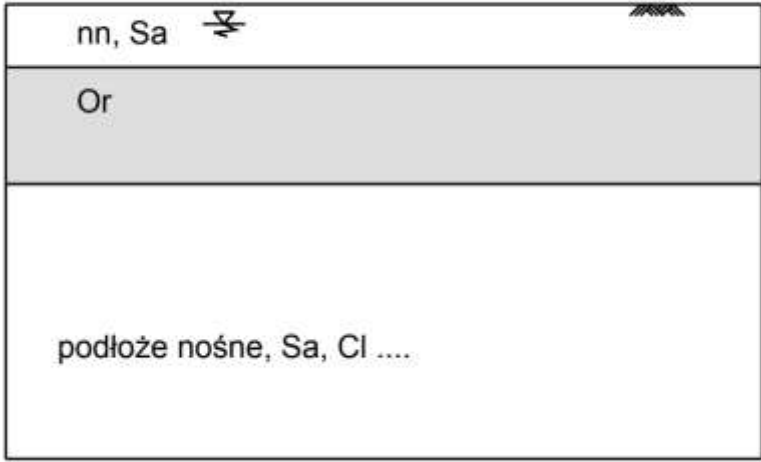
A2



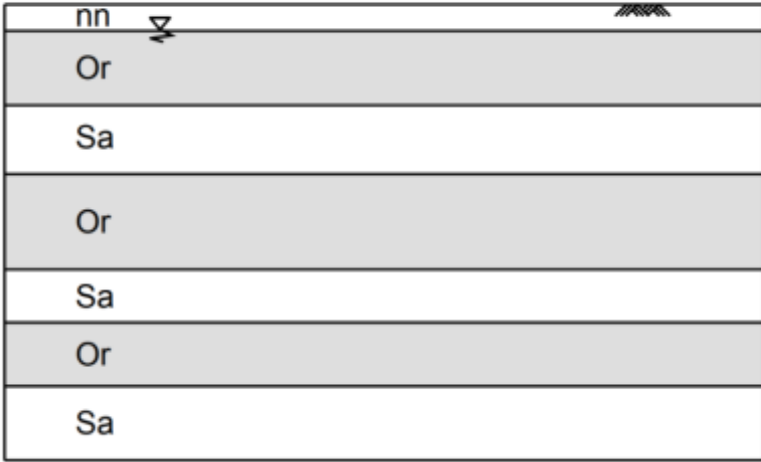
A3



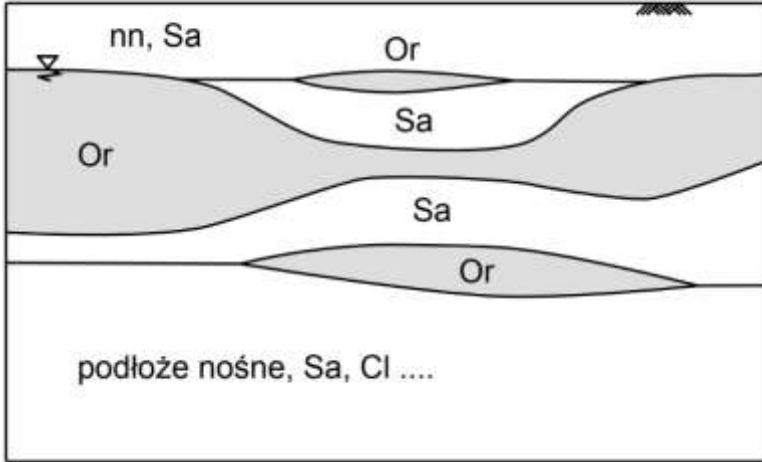
A4



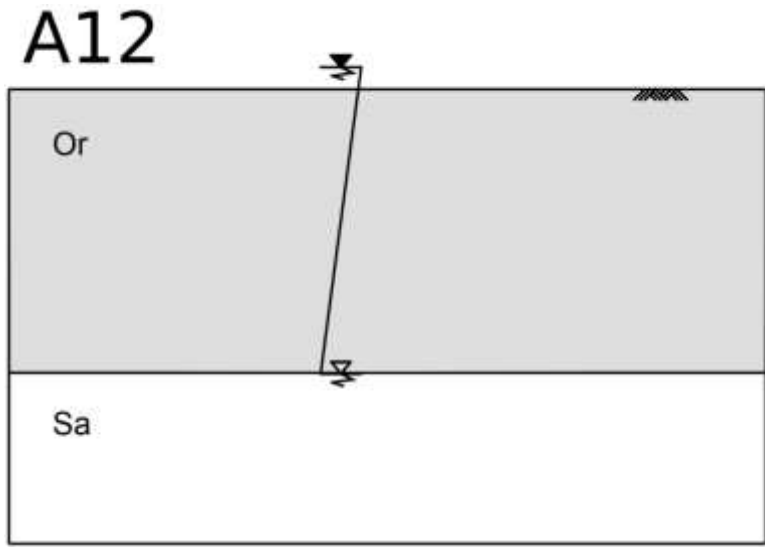
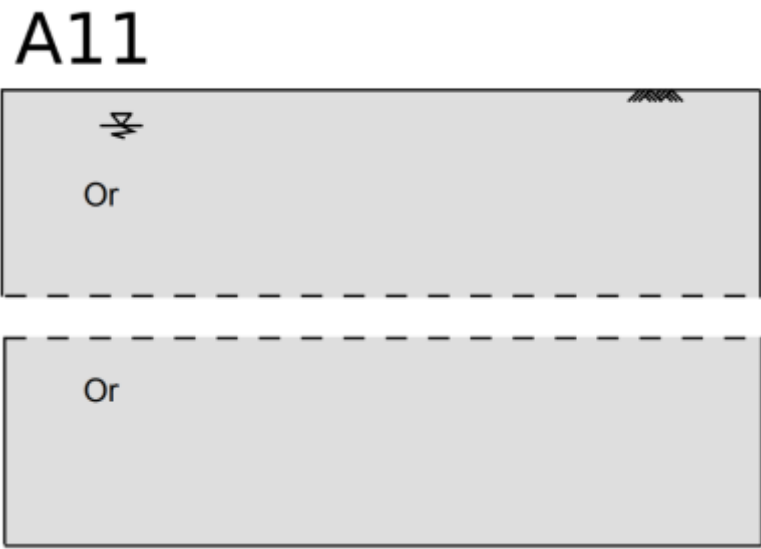
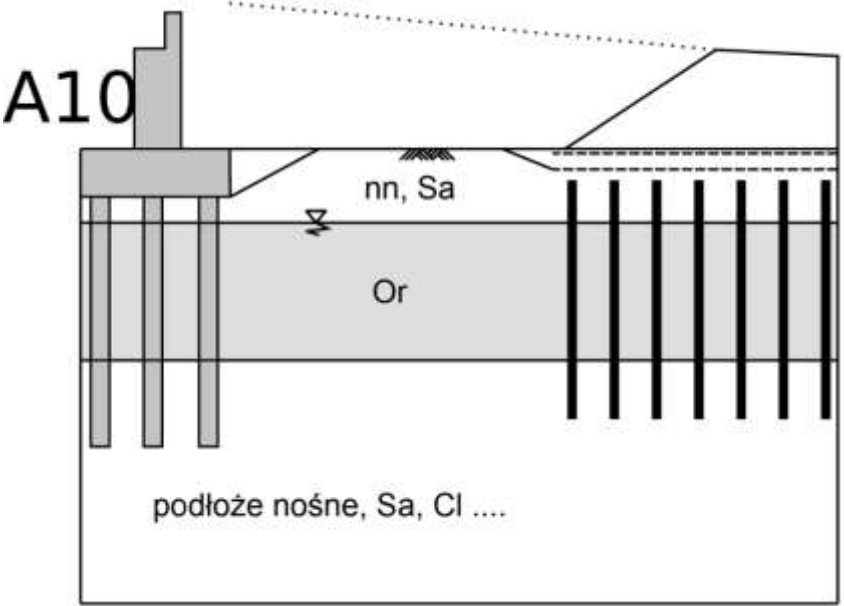
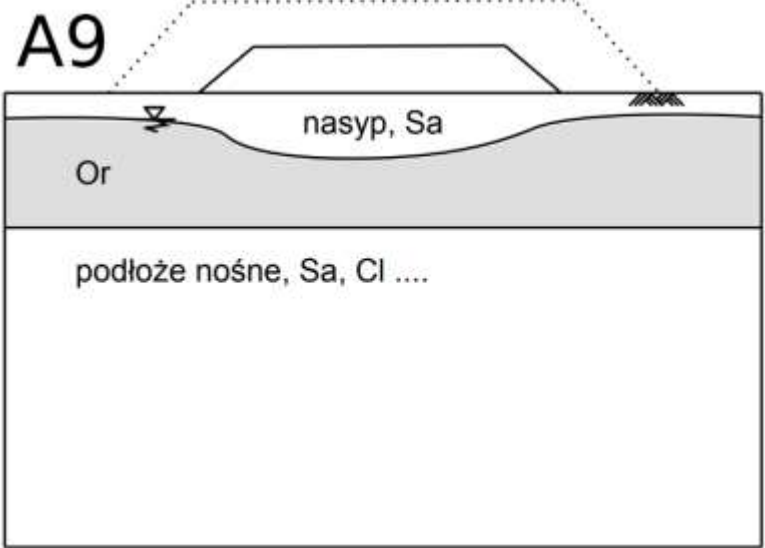
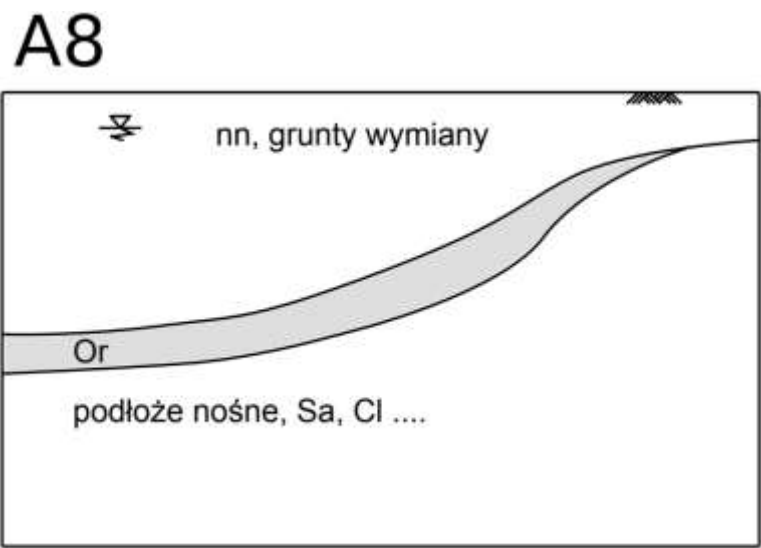
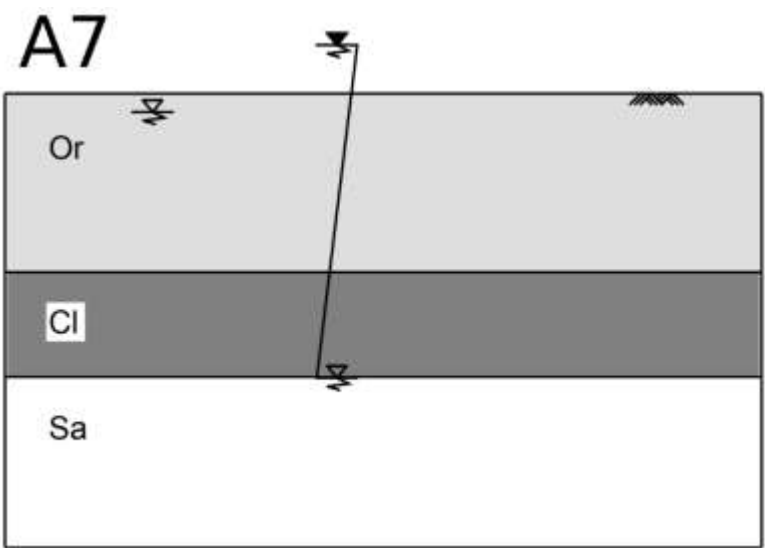
A5



A6



Grunty grupy A, ...

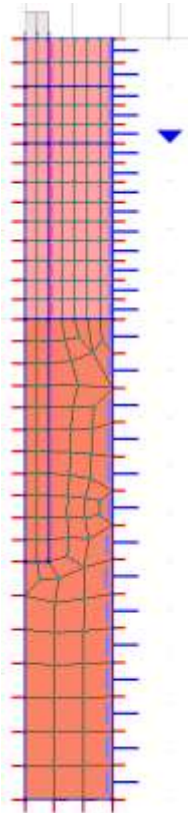


Grupy technologii wzmocnienia w grupie A, w których modelowanie numeryczne stosuje się w projektowaniu

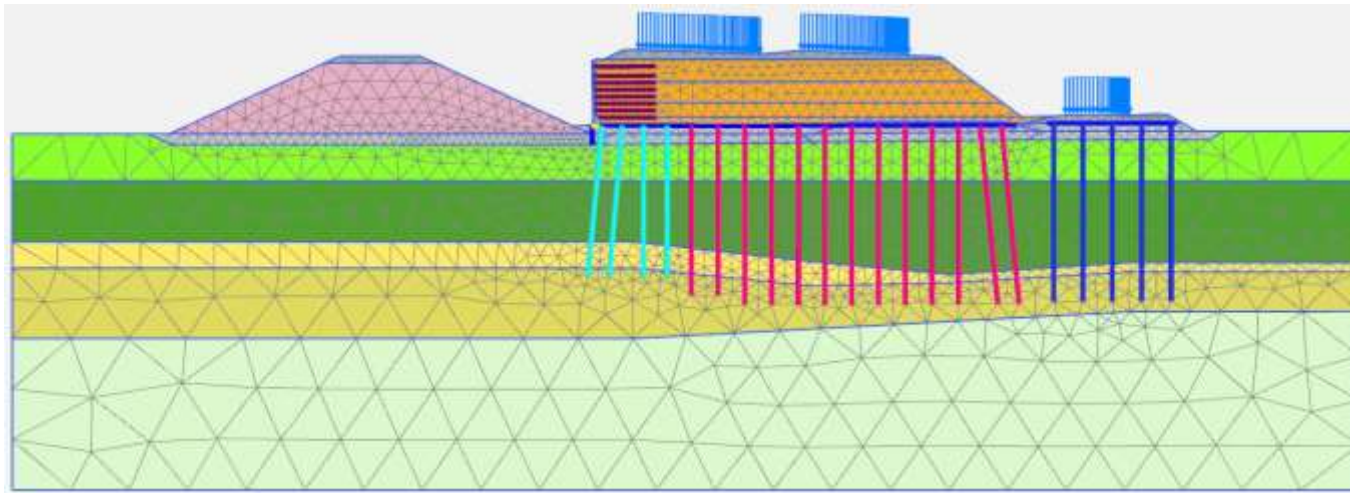
- wymiany częściowe gruntu
- kompensacja obciążenia (kruszywa lekkie)
- metody konsolidacyjne (przeciążenia, dreny prefabrykowane)
- metody konsolidacyjne (ze wzmocnieniem wgłębnym z materiałów sypkich)
- wzmacnianie wgłębne elementami sztywnymi, warstwa transmisyjna, czapki...
- wzmacnianie wgłębne kolumnami sztywnymi z elementami podatnymi

Schematy analizowane w systemach MES

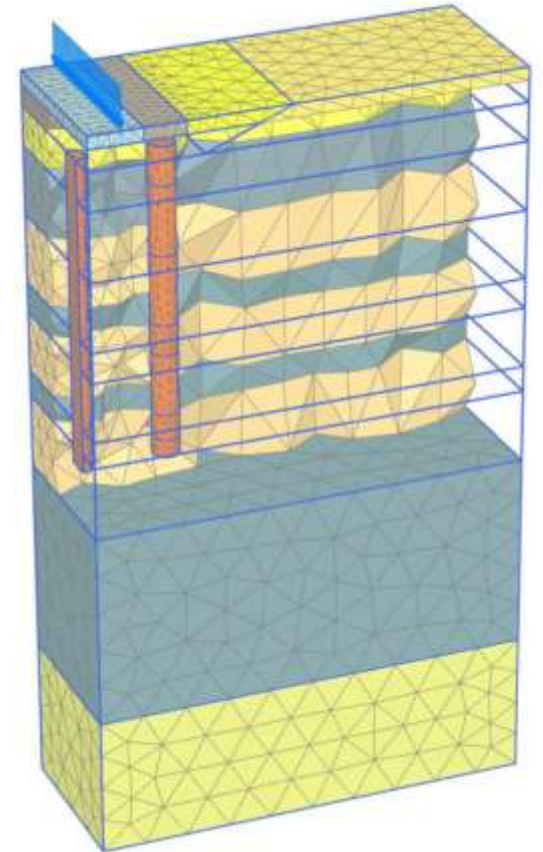
komórki w układzie
osiowo-symetrycznym



przekroje w płaskim stanie odkształcenia



schematy
przestrzenne



!!! w przypadku analiz z gruntami grupy A system obliczeniowy powinien zapewniać możliwość przyjęcia warunków **braku odpływu**, najlepiej jednak jeżeli dostępny będzie również moduł **konsolidacyjny**. **Nie należy** modelować obciążenia podłoża organicznego w warunkach odpływu (drenażu).

Uwagi dotyczące dodatkowych badań gruntów organicznych:

Standardowa charakterystyka materiałowa, Polska

- bardzo niska sztywność ($E_{oed}=500-5000$ kPa)
- bardzo niskie parametry wytrzymałościowe – wciąż niejasne oznaczenia
- niski ciężar w stosunku do gruntów mineralnych
- wysoka wilgotność
- standardowo przyjmowana jest normalna konsolidacja ($OCR=1$)

UOGÓLNIONE WARTOŚCI CECH FIZYCZNO-MECHANICZNYCH										
Nr warstw	wilgotność naturalna Wn %	gęstość objętościowa	spójność $Cu^{(n)}$ kPa	kąt tarcia wewnet. $\phi^{(n)}$	moduł odkształcen. $Eo^{(n)}$ kPa	edomet. moduł. $Mo^{(n)}$ kPa	stan gruntu	stan gruntu	typ gruntu	rodzaj gruntu
							I_D	I_L		
Ia	*16,5	*1,74	–	30°00'	38 000	52 000	0,40	–	–	nB(Pd//Pg)
	24,8	1,89								
Ib	*14,6	*1,84	–	32°30'	67 000	81 000	0,40	–	–	nB(Ps//Pg)
	22,5	1,99								
Ic	23,5	2,0	13	13°00'	16 000	24 000	–	0,30	C	nB(G//Pg)
Id	25,80	1,99	11,0	11°30'	13 000	19 000	–	0,40	C	nB(Gp)
Ila	119-361	0,99-1,43	3	3°	750	1 200	–	0,85		Nmg
IIla	*14,20	*1,84	–	31°45'	77 000	100 000	0,80	–	–	Pd, Pd/Ps
	22,20	1,99								
IIlb	*12,20	*1,89	–	34°45'	129 000	150 000	0,80	–	–	Ps, Ps+Ż
	18,50	2,03								

Grunty organiczne, badania laboratoryjne

wyniki dokładnych badań laboratoryjnych wskazują na zaskakująco wysokie wartości parametrów wytrzymałościowych – szczególnie efektywnych

nie należy jednak interpretować tego faktu jako dobrej nośności podłoża organicznego – problem dużej odkształcalności jest kluczowy.

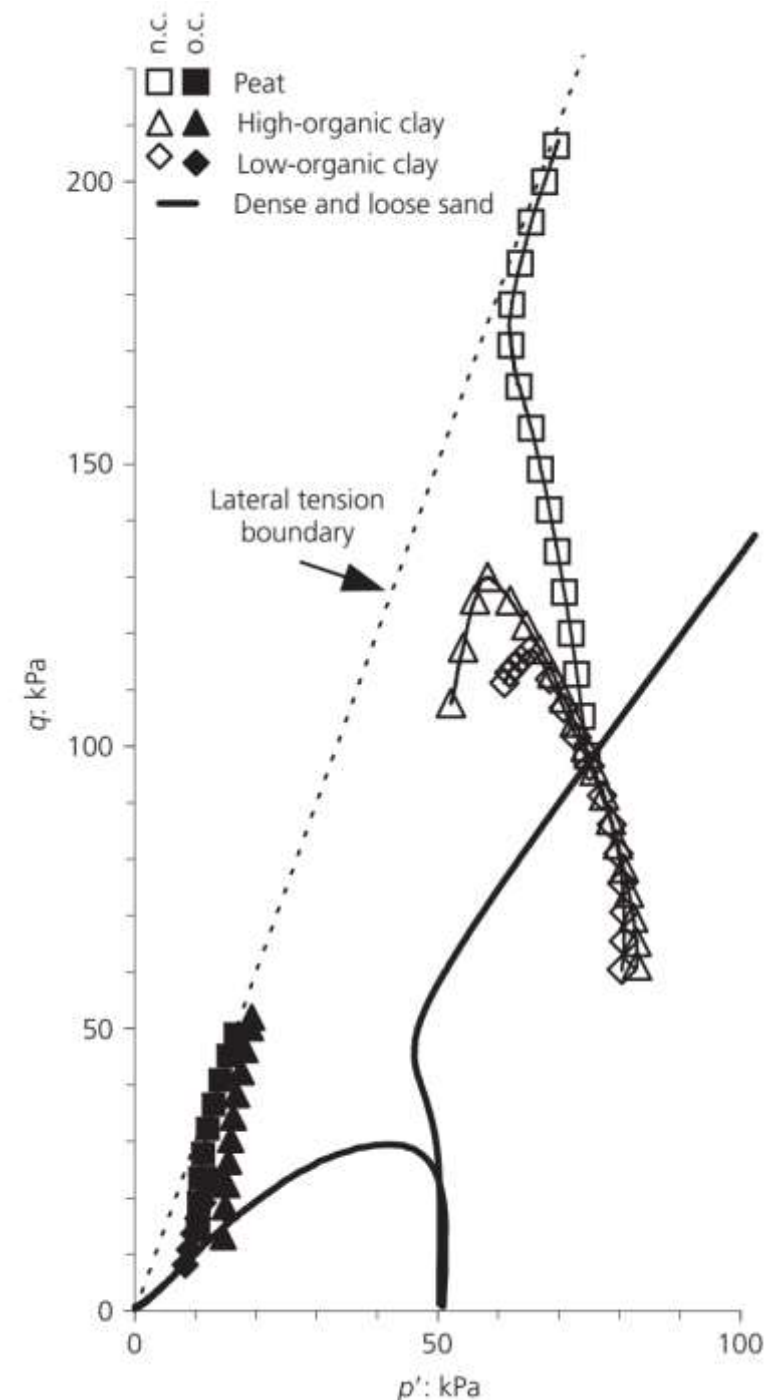
!!!

	Bulk density: kN/m ³	Water content: %	ϕ' : degrees	s_u/σ'_{v0}	s_u/σ'_p
Peat	10.4	309	83	0.74	0.62 ^a
High-organic clay	12.8	170	54	0.53	0.44 ^a
Low-organic clay	14.7	76	44	0.49	0.40 ^a
Queenborough clay	14.6	85	35–38	0.53	0.30–0.33

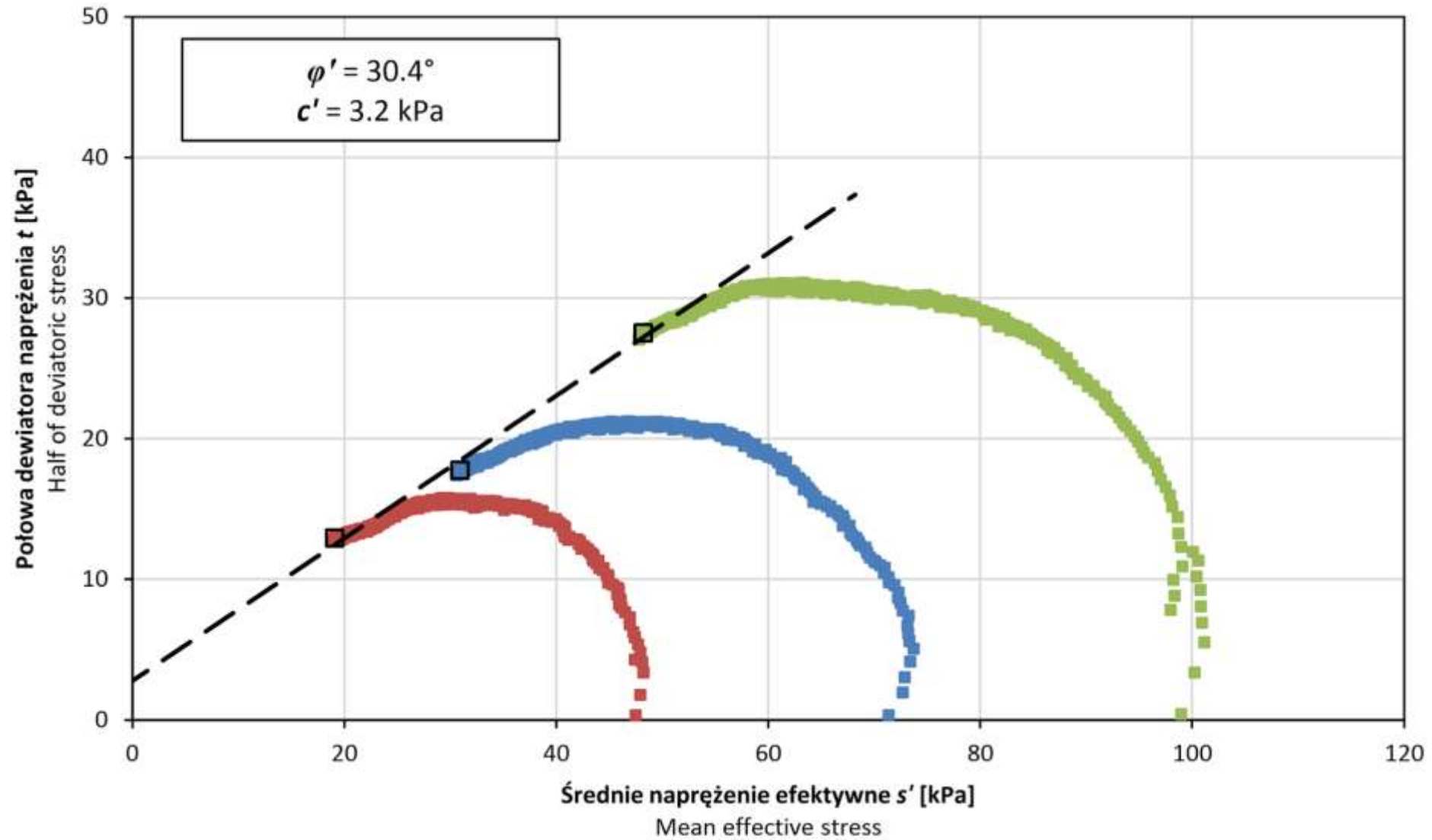
^a Assuming OCR = 1.2.

*) den Haan E., Feddema A.: Deformation and strength of embankments on soft Dutch soil, ICE Geotechnical Engineering 166, GE3, 2013;

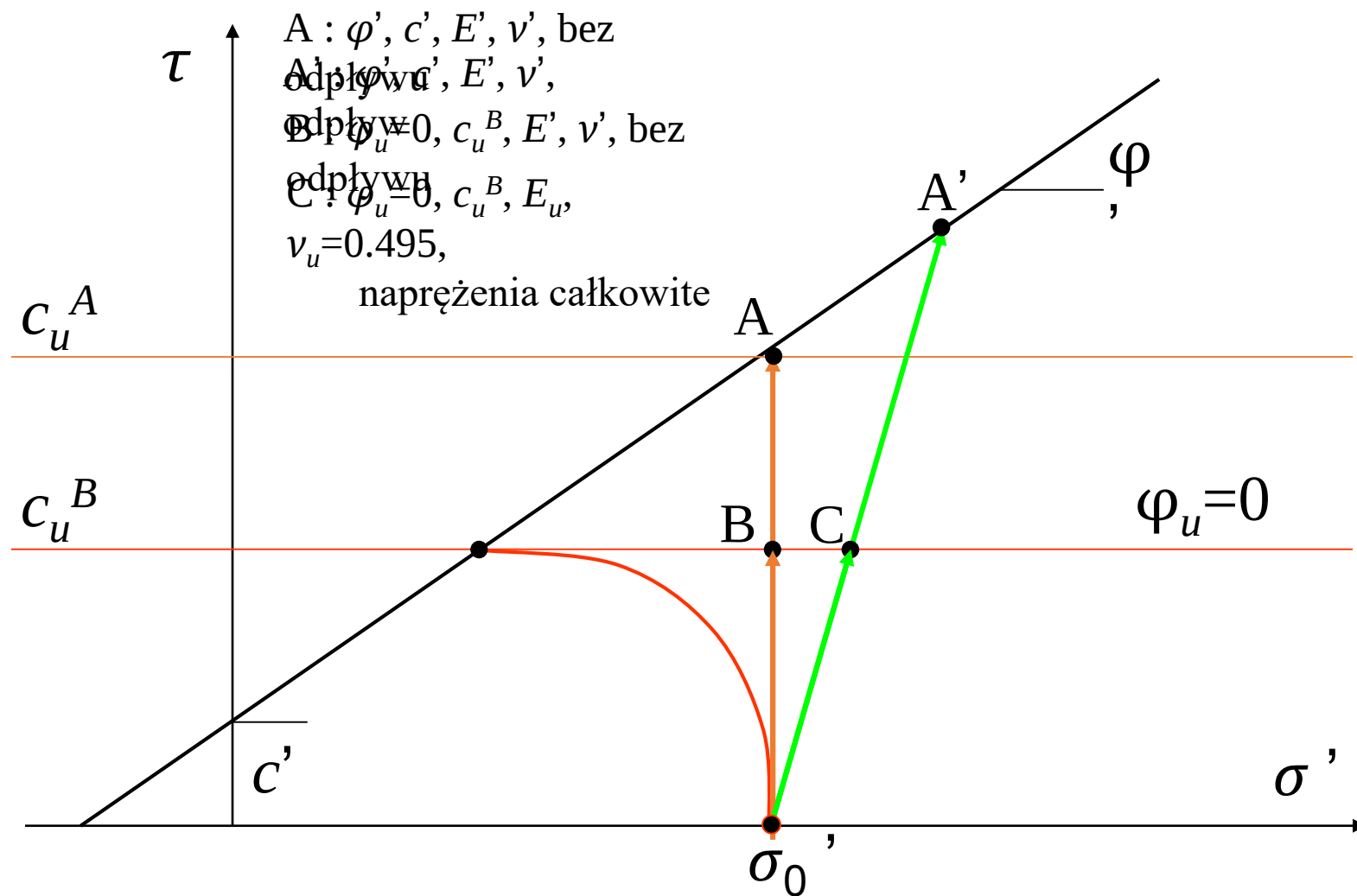
*) Jardine RJ, Smith PR, Nicholson DP: Properties of the soft Holocene Thames Estuary Clay from Queenborough, Kent, In *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 2003.



Przykładowe wyniki badań CIU namułów z dna Zalewu wiślanego na próbkach NNS (wysokie ϕ' , c' ; niskie c_u)



Model materiałowy, pierwsze podejście – model sprężysto idealnie plastyczny:



ścieżki naprężenia w ściskaniu trójosiowym, model Mohra-Coulomba oraz rzeczywiste zachowanie się gruntu normalnie skonsolidowanego w różnych warunkach odpływu

Zaawansowane modele materiałowe, co powinny uwzględniać?

aspekty modelowania gruntów ściśliwych (reprezentowanych głównie przez grunty organiczne), których brak w standardowych modelach sprężysto-idealnie plastycznych:

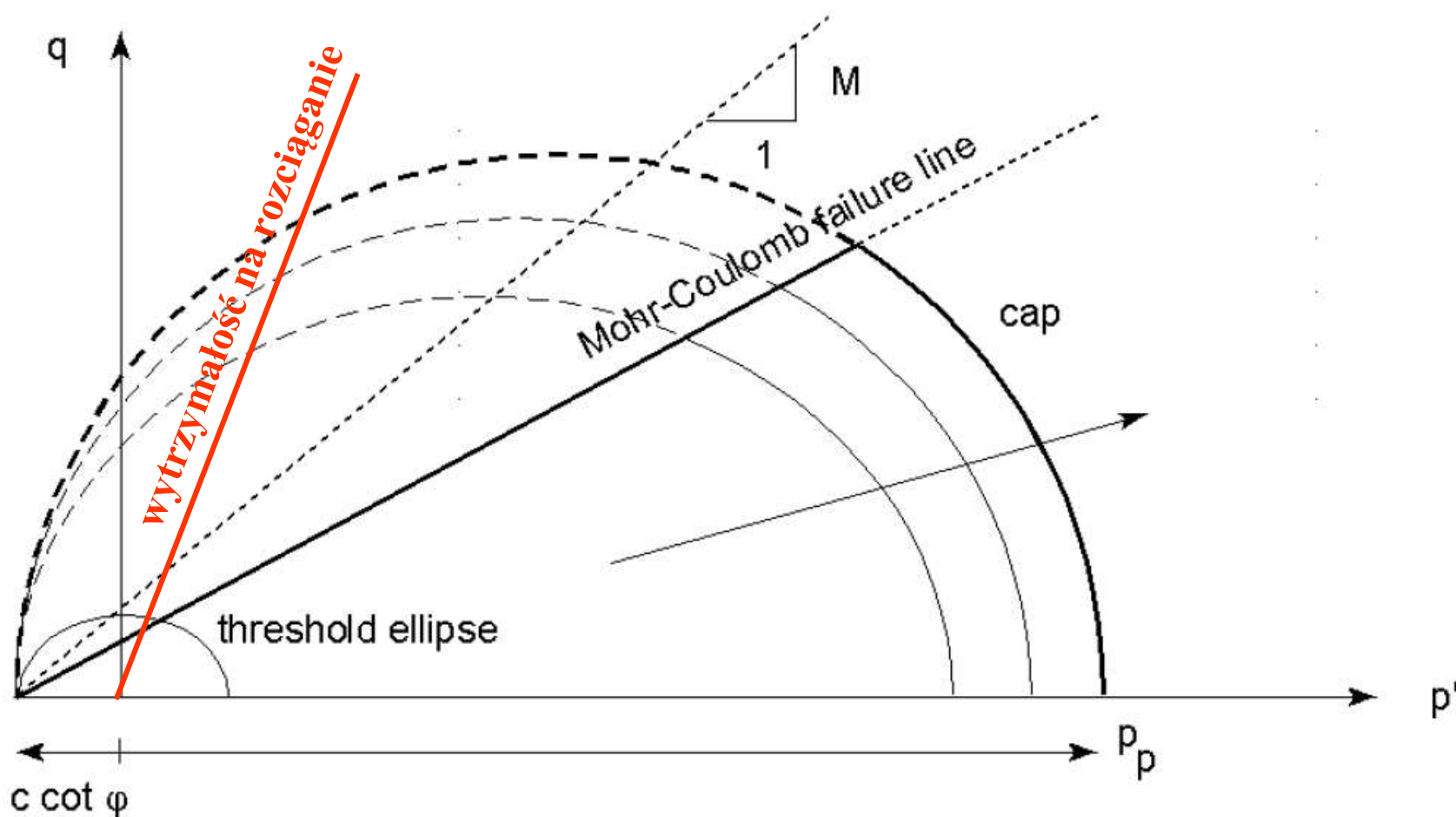
- barotropia – zależności sztywności od poziomu naprężenia (głębokości). w gruntach organicznych zależność ta jest liniowa.
- znaczna różnica pomiędzy sztywnością pierwotną (obciążenie) i wtórną (odciążenie, obciążenie wtórne).
- realistyczna ścieżka naprężenia efektywnego w warunkach bez odpływu przy normalnej konsolidacji.
- odtworzenie realistycznej ścieżki naprężenia efektywnego w ściskaniu edometrycznym, tj. takiej której nachylenie stabilizuje się na wartości K_0^{NC} .
- uwzględnienie pełzania/konsolidacji wtórnej

Dlaczego w projektowaniu geotechnicznym nie należy używać modelu *Modified Cam-Clay* (MCC) ?

- kryterium wytrzymałości na ścinanie (CSL) bazuje na kryterium Druckera-Pragera, które nie odpowiada rzeczywistej charakterystyce wytrzymałości gruntów na ścinanie.
- kształt powierzchni plastyczności w obszarze *dry side* (stany prekonsolidacji) prowadzi do znacznego zawyżenia wytrzymałości pikowej.
- kontynuacja obciążenia na części *dry* powierzchni plastyczności jest związana z osłabieniem wytrzymałości na ścinanie (softening), które powoduje silną zależność odpowiedzi modelu MES od dyskretyzacji (*mesh dependency*).
- kształt powierzchni plastyczności w obszarze *wet side* nie pozwala na odtworzenie rzeczywistej wartości K_0^{NC} w warunkach ściskania edometrycznego.

Modele z jednym mechanizmem wzmocnienia objętościowego, np. *Soft Soil* lub *Cap model*

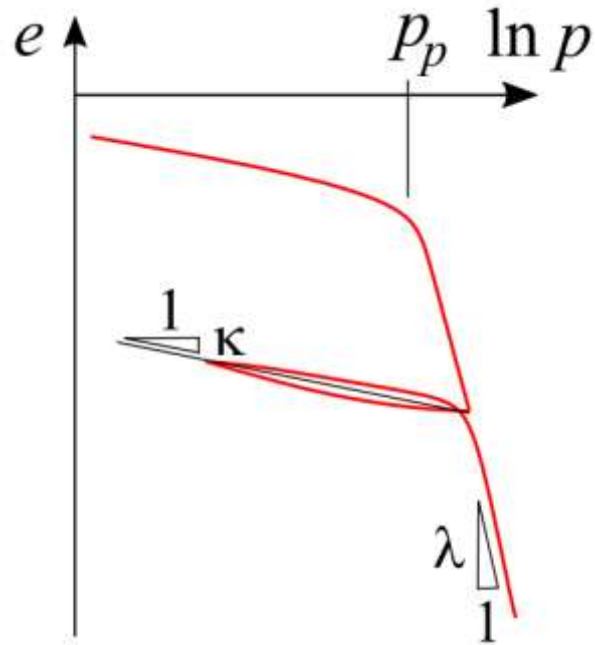
- linia statnu krytycznego jest wprowadzona tylko w celu zmiany kształtu (nachylenia) powierzchni *cap*.
- obszar *dry* oraz wytrzymałość na ścinanie są kontrolowane poprzez kryterium Mohra-Coulomba
- wprowadzono parametr spójności efektywnej.



Sztywność – stosowanie wskaźników ścisłości (klasycznie C_c oraz C_s) jest znacznie lepsze od stosowania modułów sztywności.

wskaźnik ścisłości i odprężenia
w modelu Cam-clay:

$$\lambda = \frac{C_c}{2.3} \quad \kappa \approx \frac{2 C_s}{2.3}$$

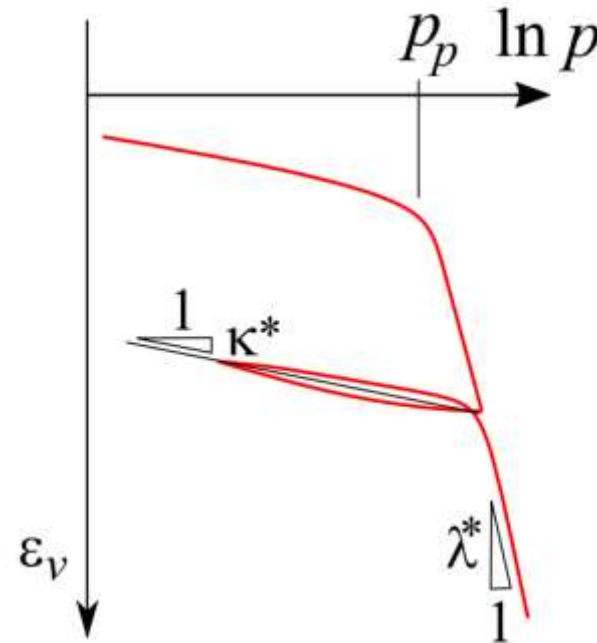


w przypadku linii normalnej konsolidacji zachodzi:

$$\Delta \ln p = \Delta \ln \sigma_v$$

zmodyfikowany wskaźnik ścisłości i odprężenia,
Plaxis (Butterfield,1979):

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2.3(1 + e_0)} \quad \kappa^* \approx \frac{2 C_s}{2.3(1 + e_0)}$$



*** jeżeli potrzebujesz dokładnie szacować
osiadanie / przebieg konsolidacji:
zamów edometr**

Konsolidacja wtórna (pełzanie) gruntów organicznych

krzywa czas-osiadanie po zadaniu kroku obciążenia w badaniu edometrycznym

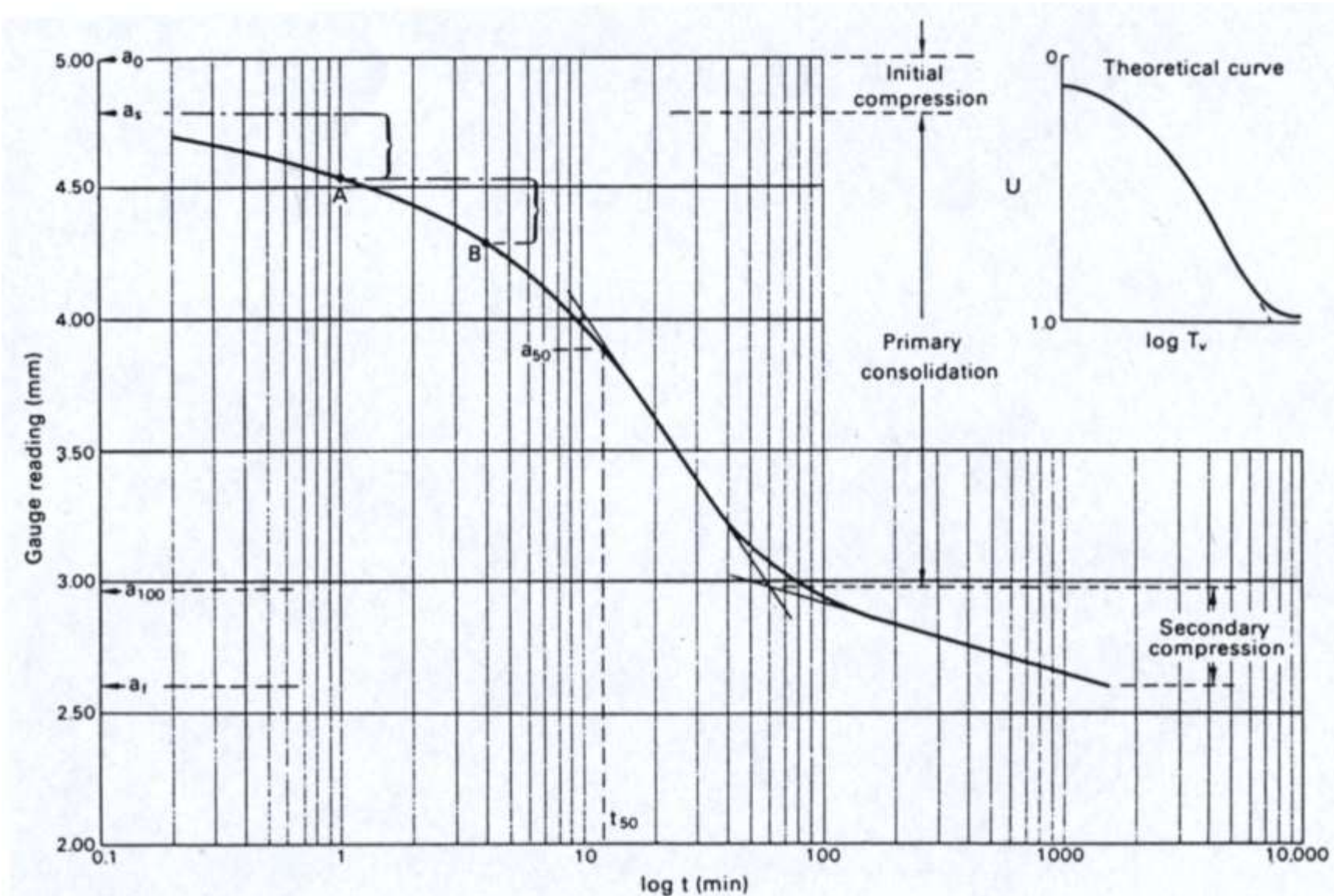
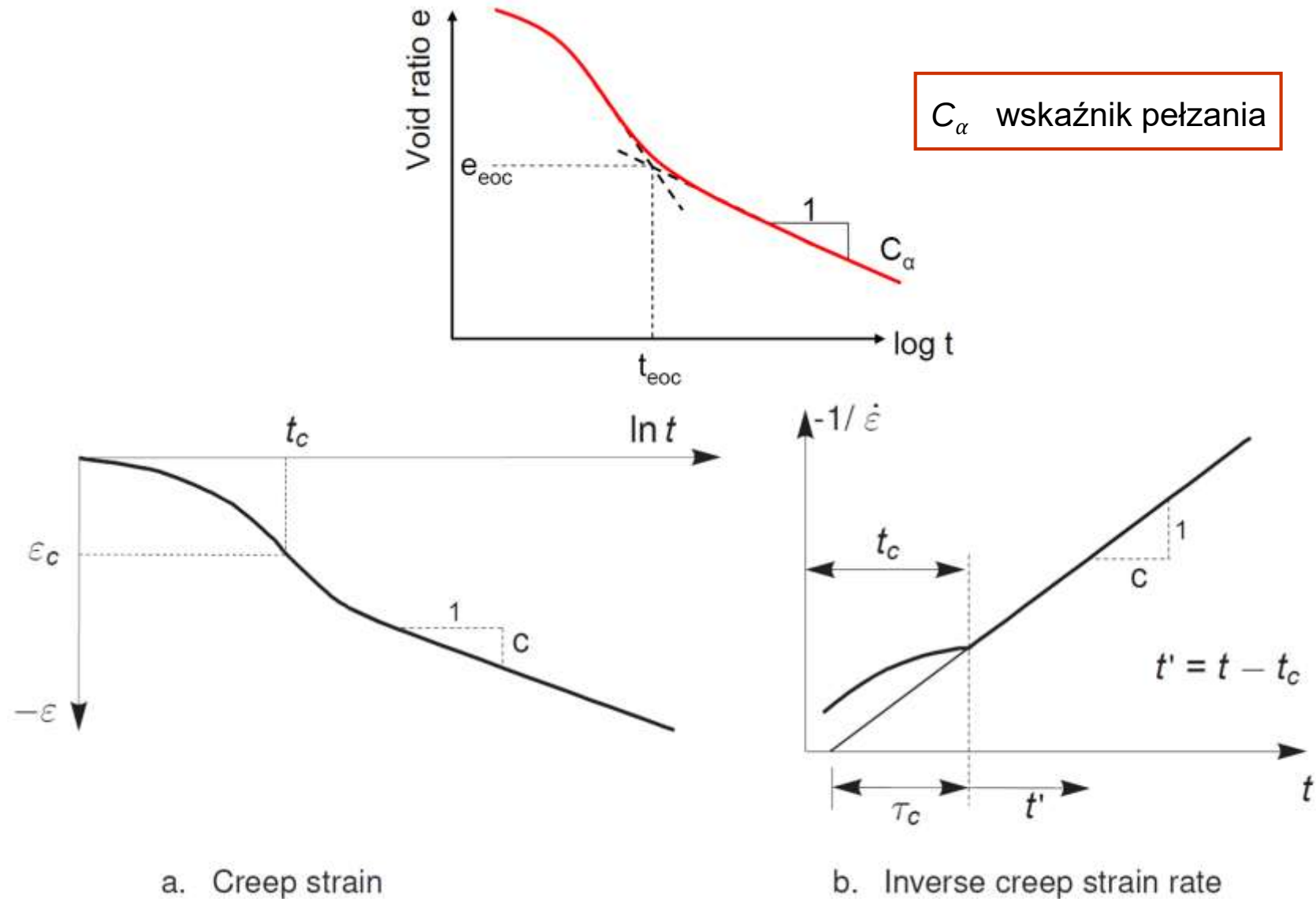


Fig. 7.20 The log time method.

Dodatkowy ważny parametr do analiz: wskaźnik pełzania, badanie edometryczne

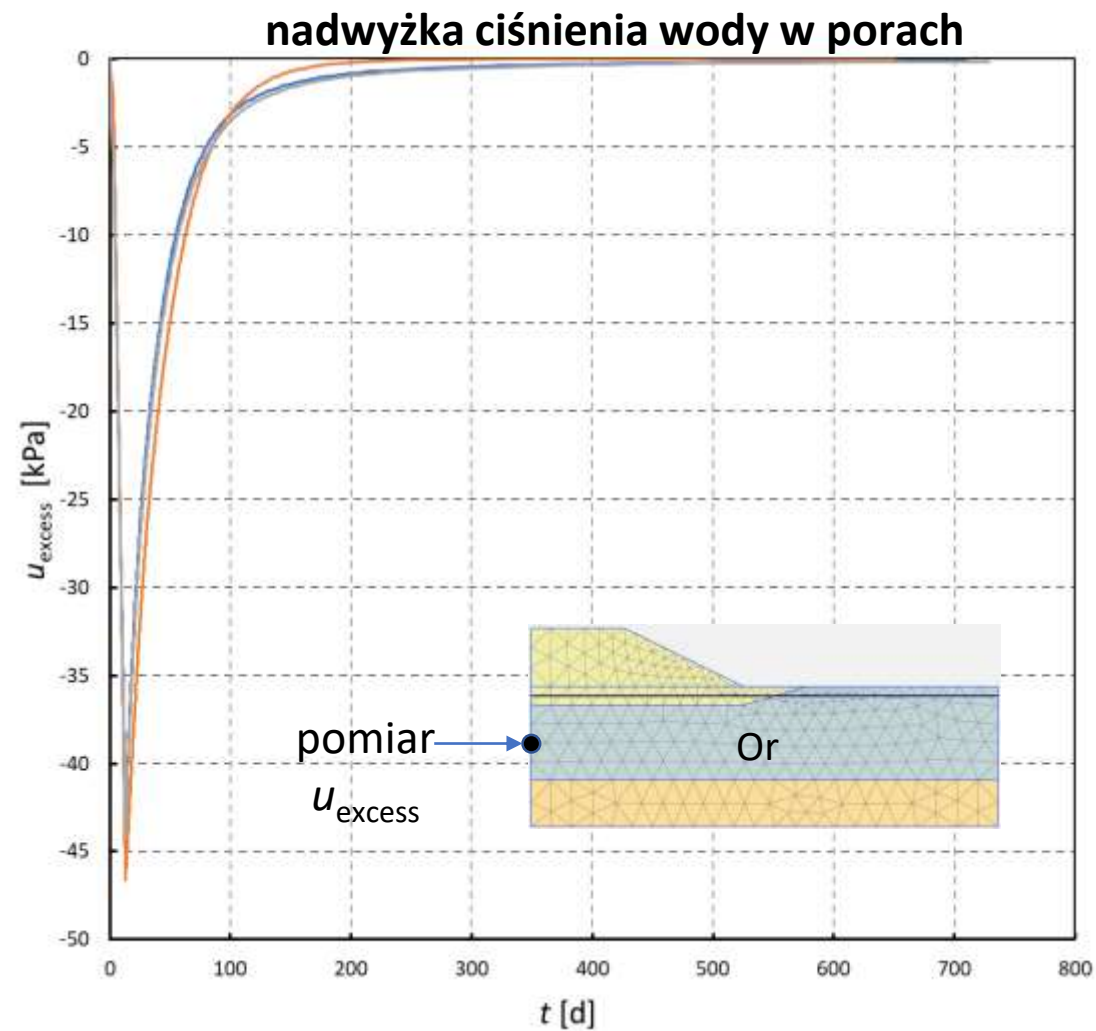
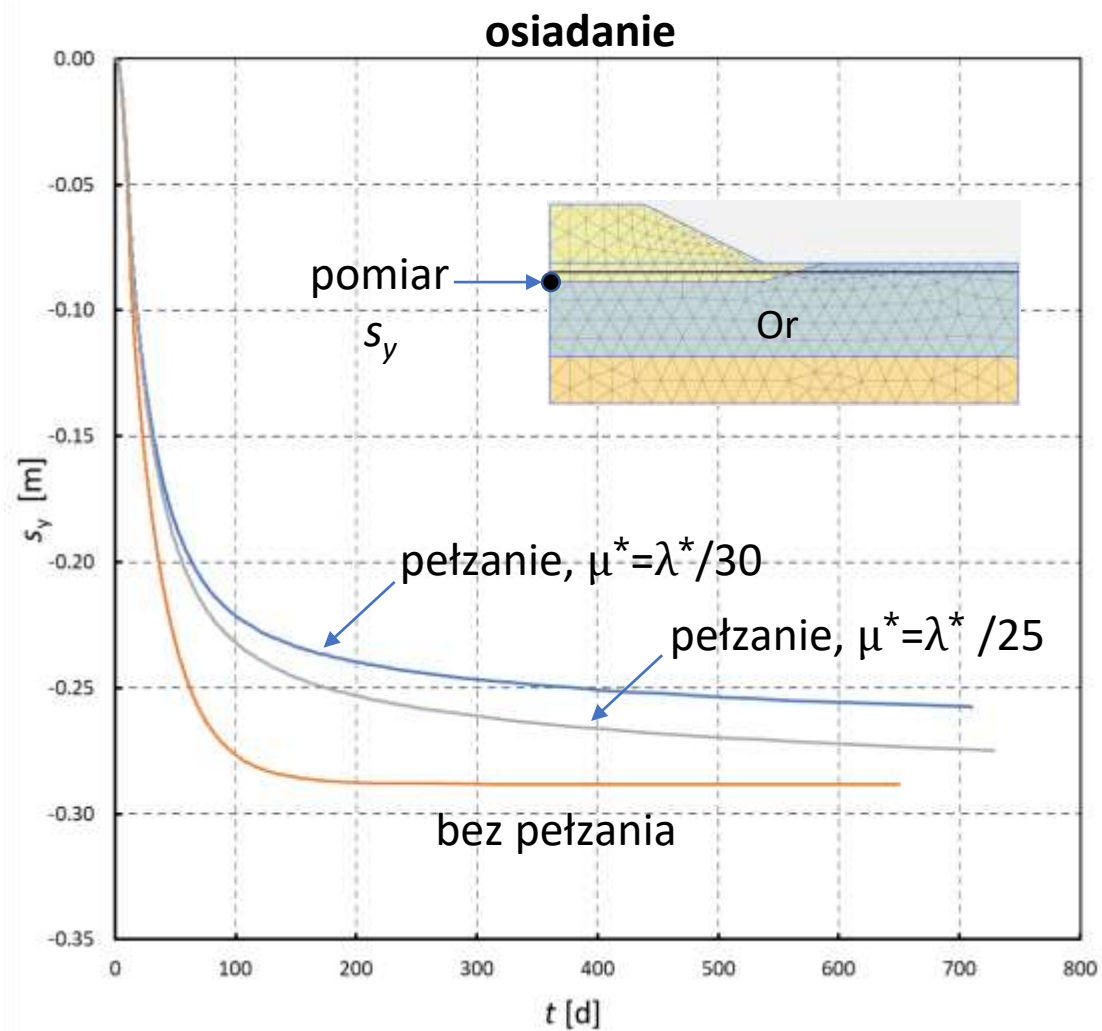


a. Creep strain

b. Inverse creep strain rate

$C = \mu^*$ parametr modelu ABC (Holandia) – w aplikacjach inżynierskich μ^* (creep index)

Uwzględnienie pełzania w obliczeniach konsolidacji pod nasypem (*delayed compression*)



Dziękuję za uwagę

Kontakt:

Marcin Cudny mcud@pg.edu.pl

Krzysztof Szarf krzszarf@pg.edu.pl

Angelika Duszyńska adusz@pg.edu.pl

Grzegorz Horodecki ghor@pg.edu.pl