



Kwerenda metod projektowania i technologii wzmocnień podłoża na potrzeby budownictwa drogowego, na terenach występowania gruntów słabonośnych (projekt RID2)

Marcin Cudny, Angelika Duszyńska, Grzegorz Horodecki, Krzysztof Szarf

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



WYDZIAŁ INŻYNIERII
LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA

WPGI Łódź, 15/10/2024

Główny i szczegółowe cele prac związanych z kwerendą

- 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 klucz 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 sedymentacji)

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).

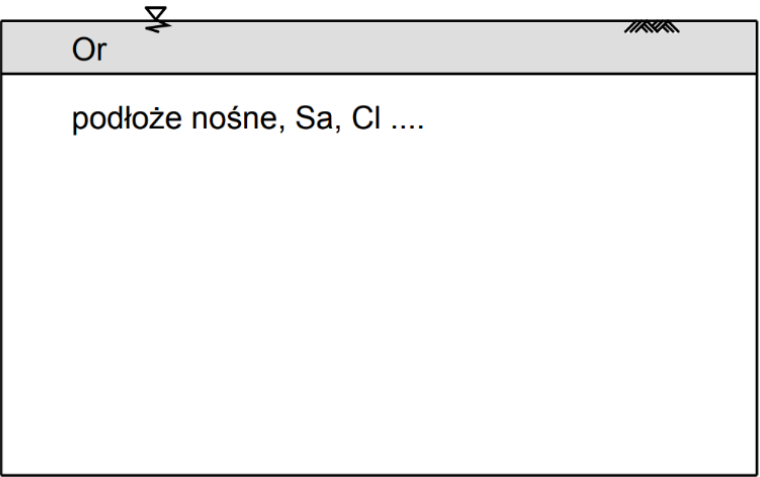
Grunty grupy C – **grunty drobnoziarniste/spoiste** w stanie plastycznym i gorszym ($I_c \leq 0,75$), np. naruszone lub odciążone gliny o pochodzeniu starszym niż holocen, których stopień plastyczności nie wskazuje na prekonsolidację lub diagenetę wynikającą z geologii.



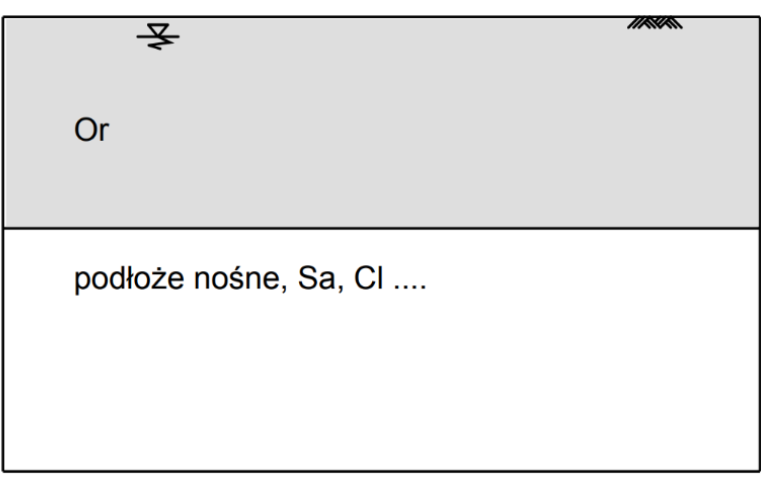
Katalog sytuacji geotechnicznych

Grunty grupy A

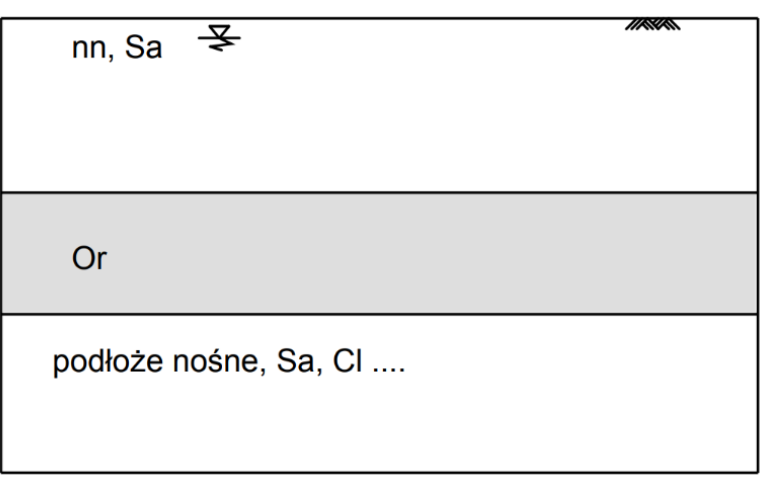
A1



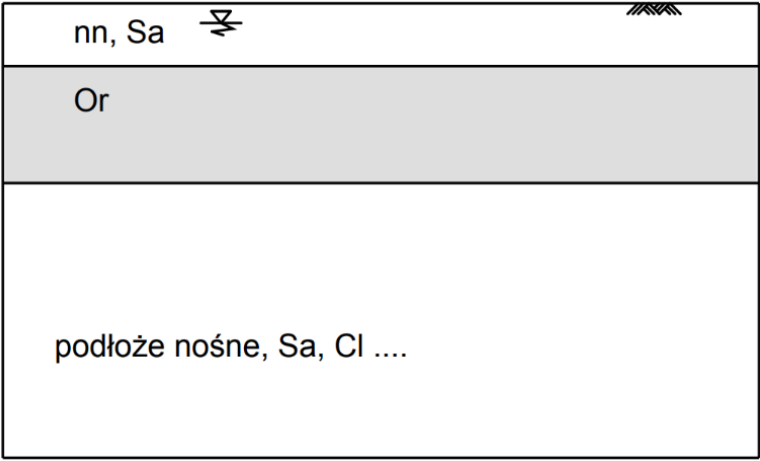
A2



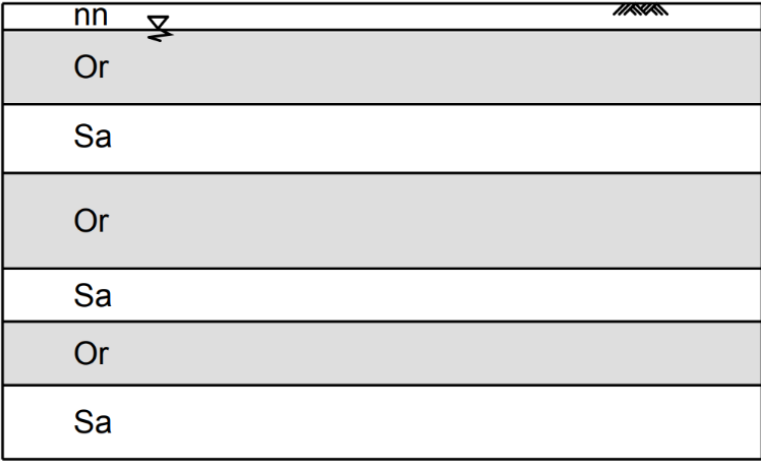
A3



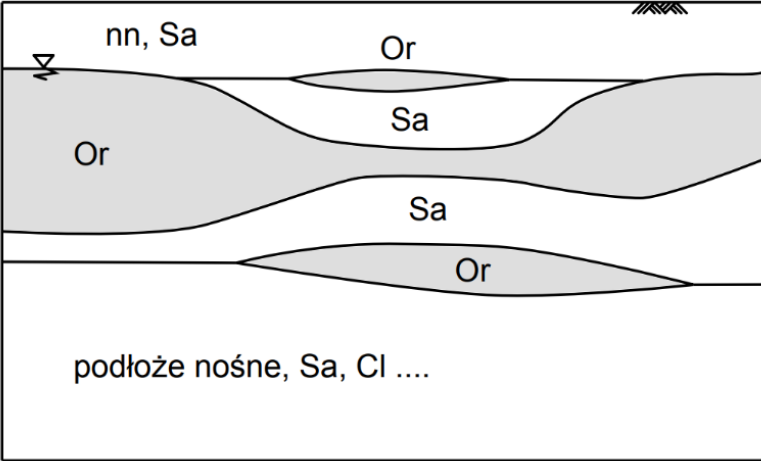
A4



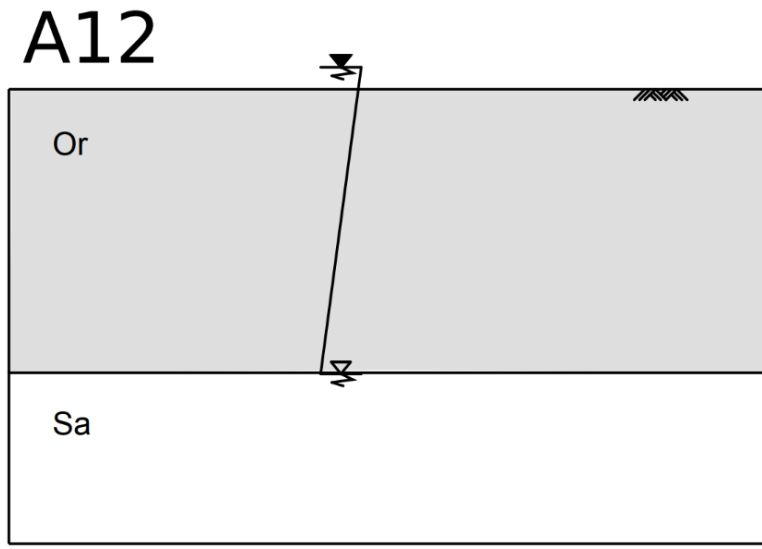
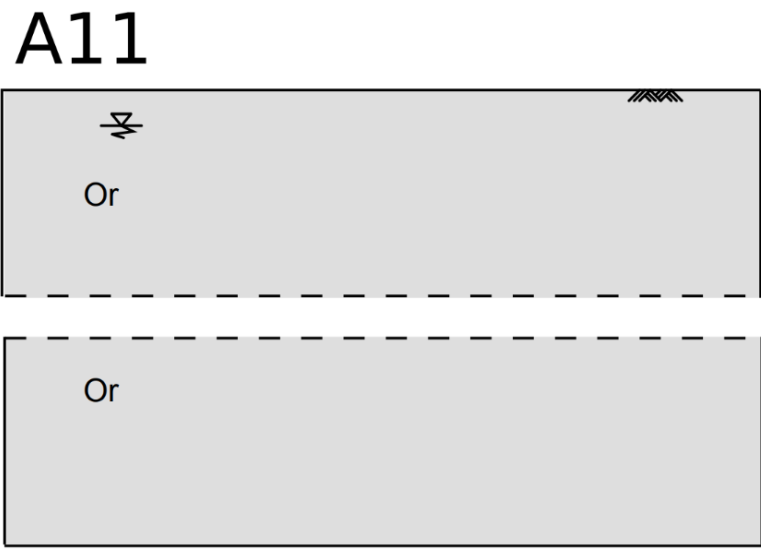
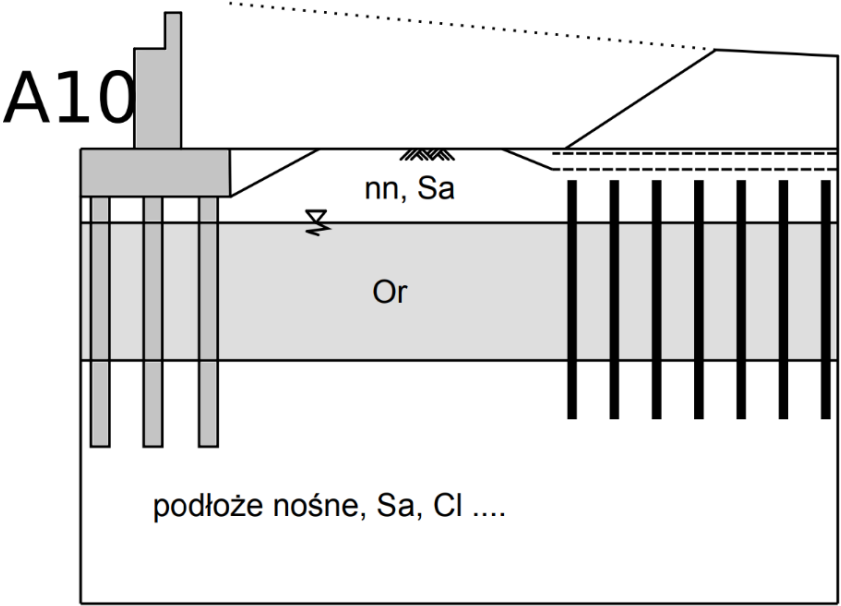
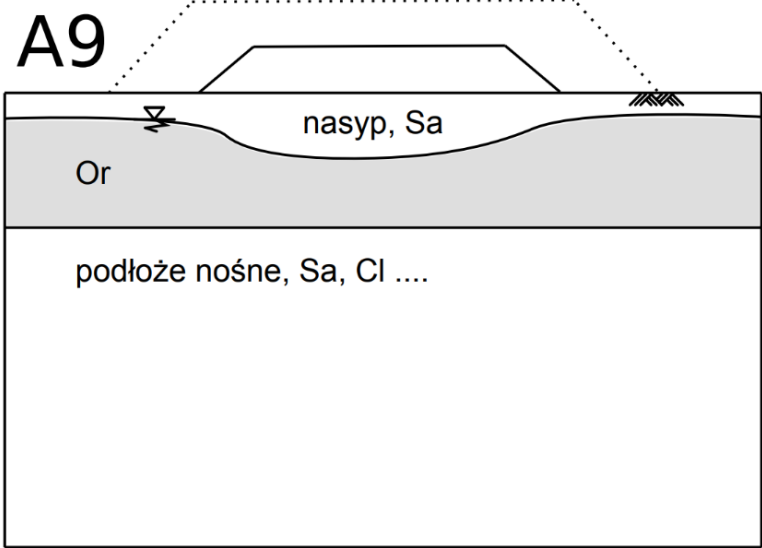
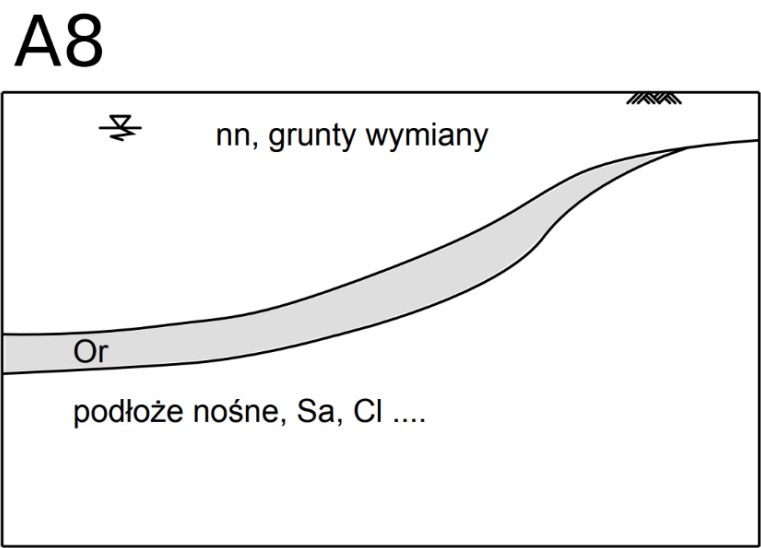
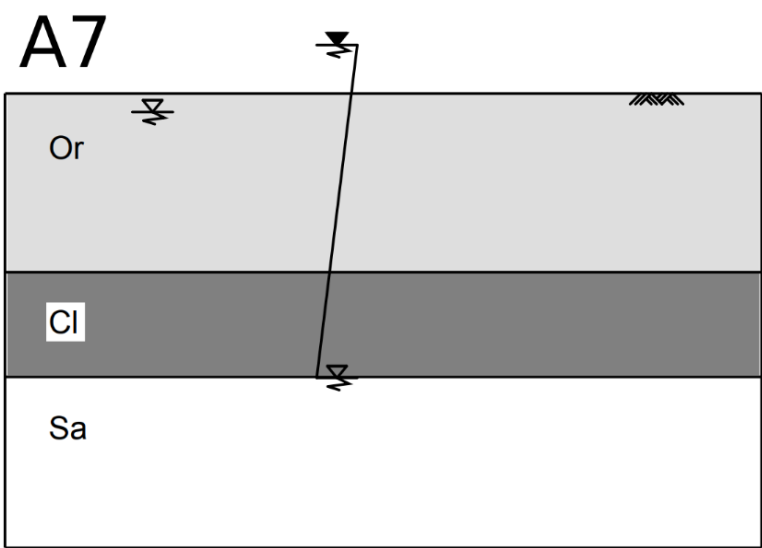
A5



A6

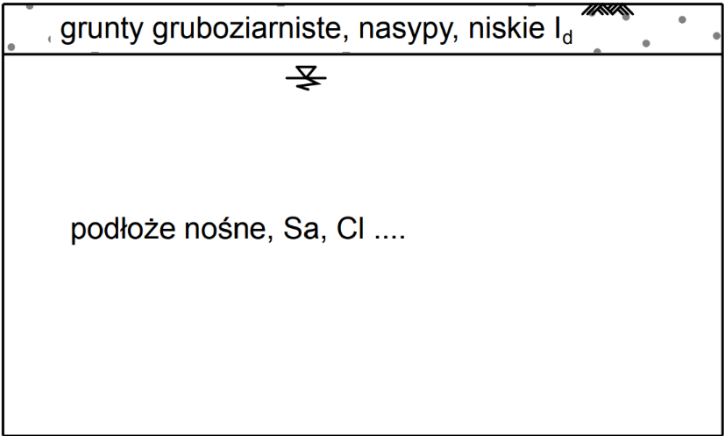


Grunty grupy A, ...

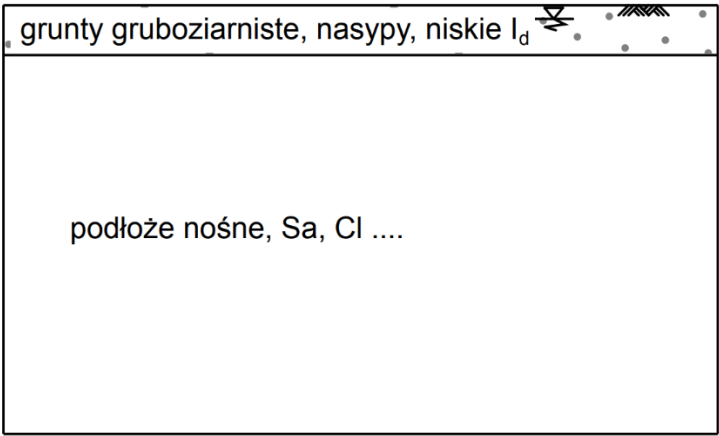


Grunty grupy B

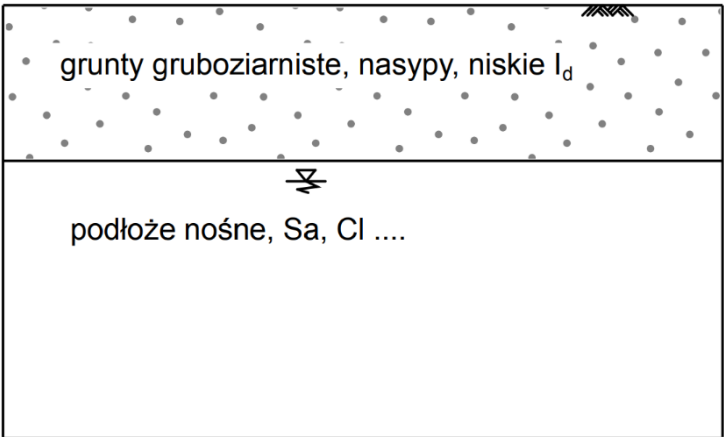
B1



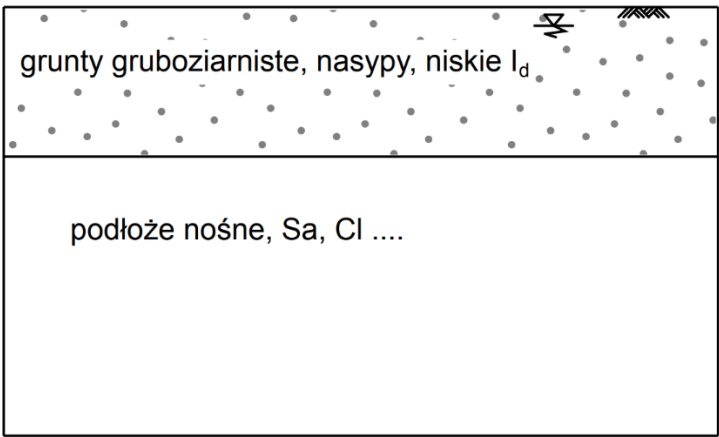
B2



B3

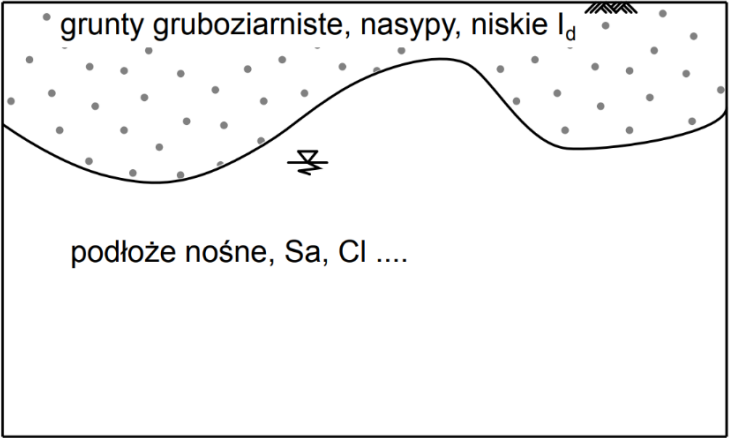


B4

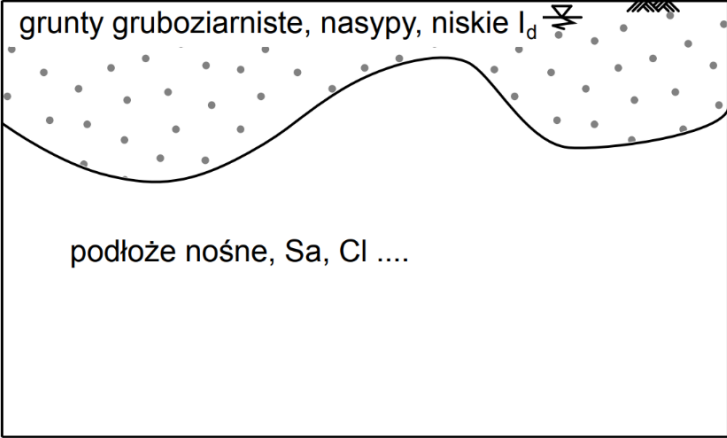


Grunty grupy B, ...

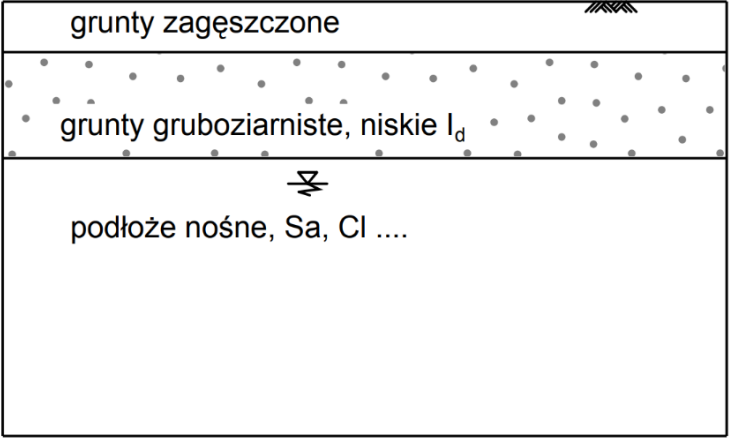
B5



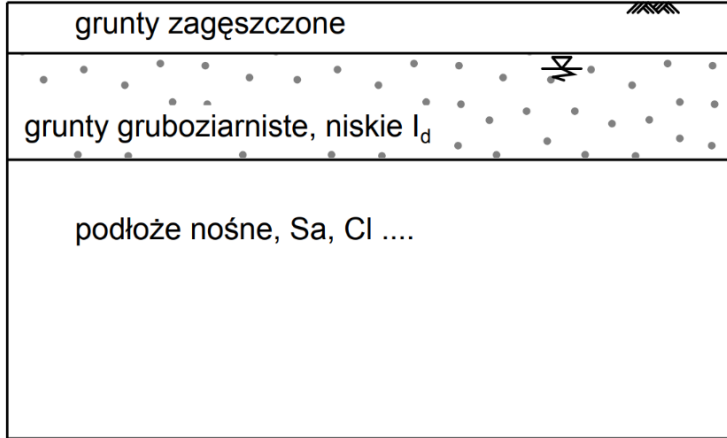
B6



B7

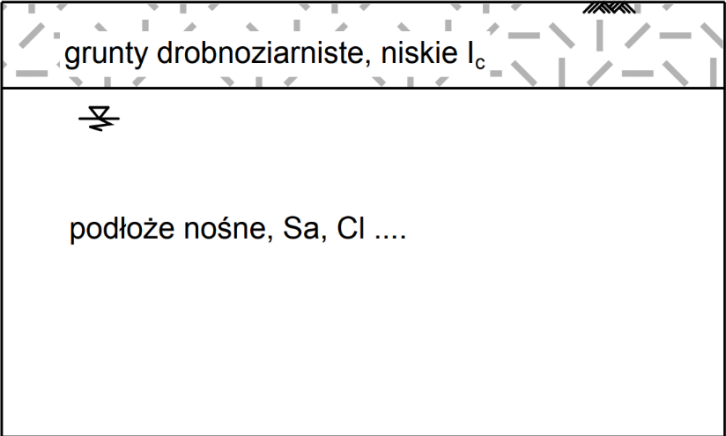


B8

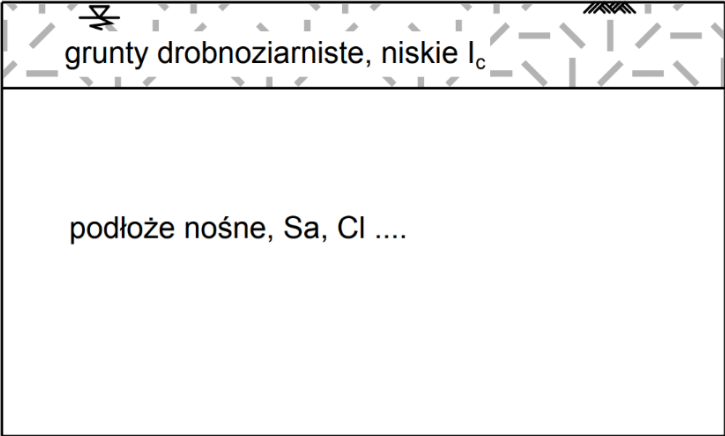


Grunty grupy C

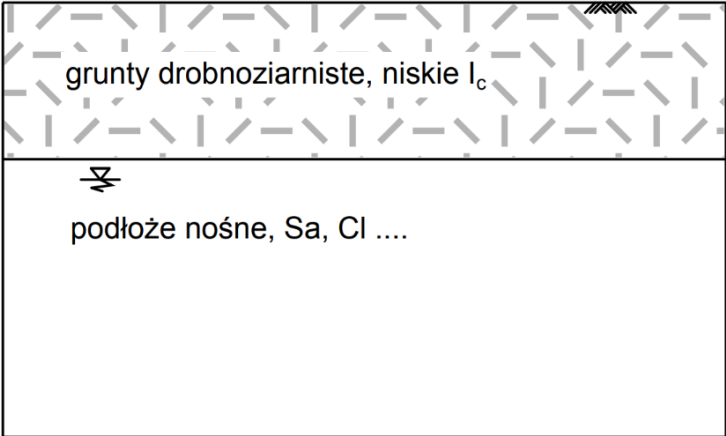
C1



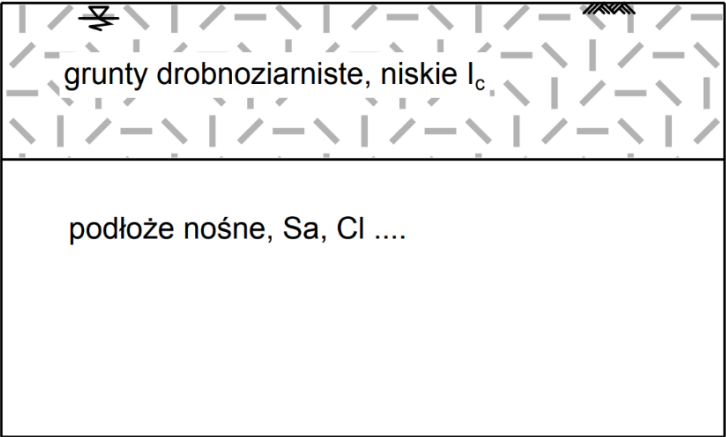
C2



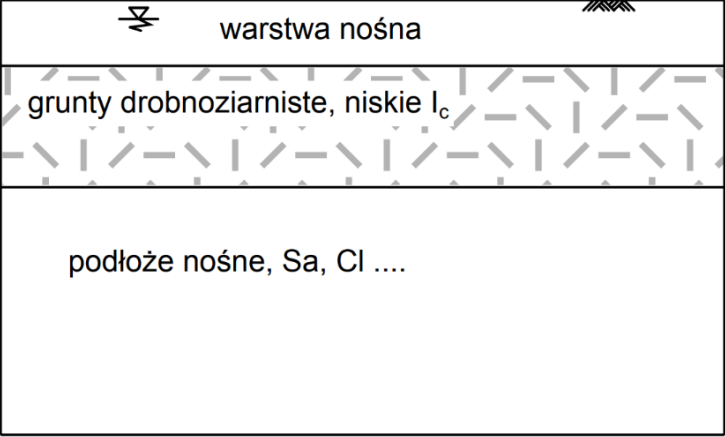
C3



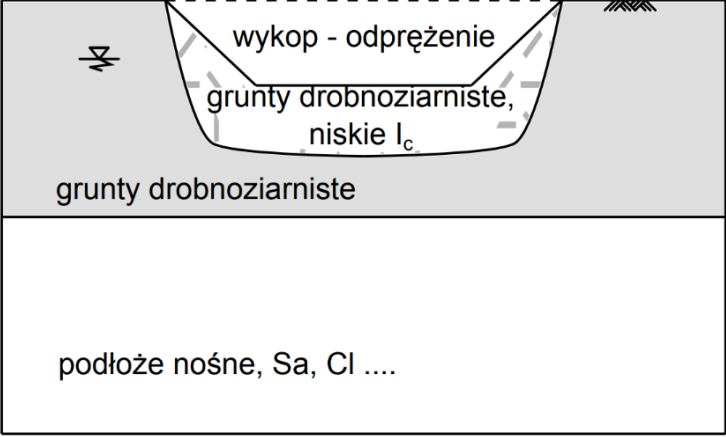
C4



C5

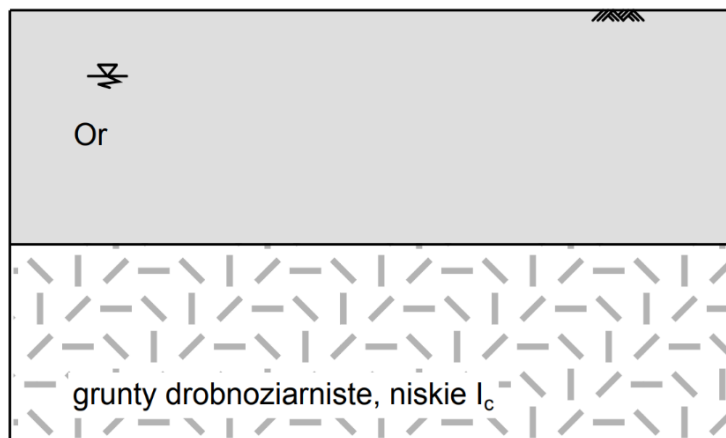


C6

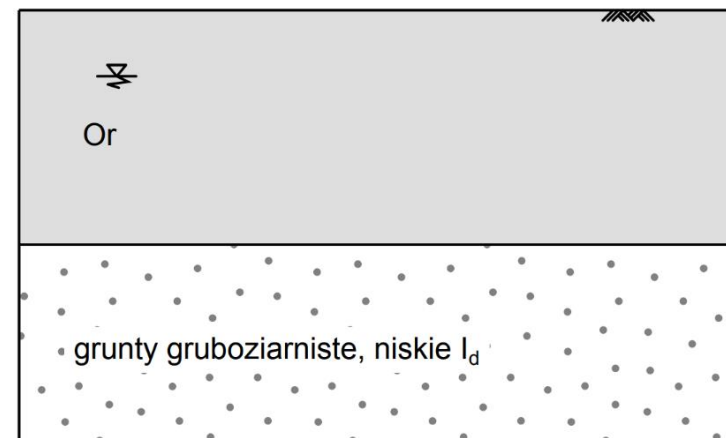


Sytuacje mieszane D, grunty grup A, B, C

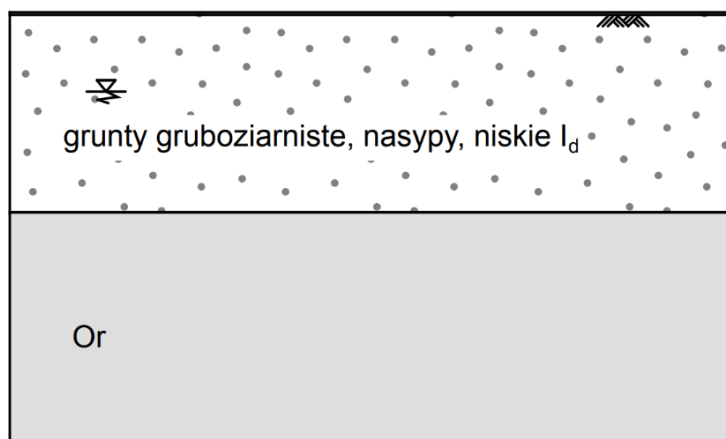
D1



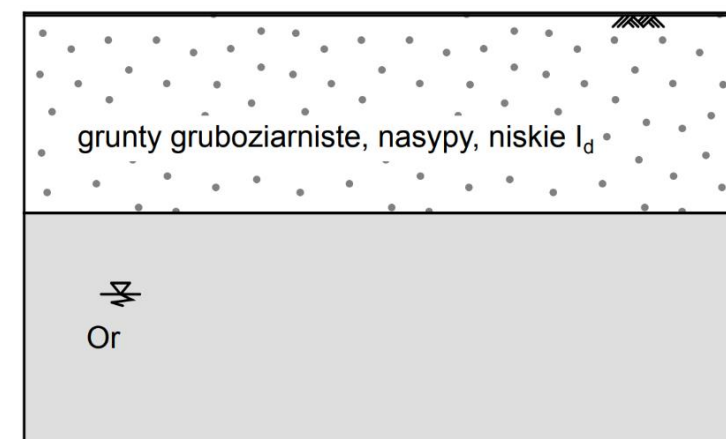
D2



D3



D4



Katalog technologii (grupy i należące do nich technologie)

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Wymiana gruntu	pełna standardowa
	częściowa standardowa
	pełna lub częściowa wymiana gruntu poprzez wyparcie nasypem
	pełna wymiana gruntu ze wspomaganiami wybuchami

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Kompensacja obciążenia działającego na podłożu z zastosowaniem materiałów lekkich	keramzyt
	kruszywo lekkie na bazie popiołu (popiołoporyt, Lytag, Pollytag)
	mieszanki popiołów z gruntami mineralnymi
	pianobeton
	styropian

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Zbrojenie podstawy nasypu/nasypy z materacami lub warstwami geosyntetycznymi bez wzmocnienia wgłębnego	geotkaniny
	geosiatki (georuszty)
	geosyntetyczne materace przestrzenne (np. stratum)

Katalog technologii

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Dogęszczanie dynamiczne	zagęszczanie impulsowe RIC (rapid impact compaction)
	DC (dynamic compaction)
	walce dynamiczne (np. pięciokątne, trójkątne...)

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Dogęszczanie wgłębne (zwiększające stopień zagęszczenia)	wibroflotacja
	obniżanie ZWG
	kolumny kruszywowe zagęszczające
	dogęszczenie podłoża mineralnego metodą mikrowybuchów (Explosive Compaction)

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Stabilizacja powierzchniowa z wprowadzaniem dodatkowych materiałów	doziarnianie, stabilizacja mechaniczna
	zastosowaniem kruszywa i georusztów lub geosyntetyków komórkowych.
	stabilizacja cementem
	stabilizacja popiołami
	stabilizacja wapnem
	stabilizacja innymi mieszankami, w tym stabilizacja chemiczna
	osuszanie gruntu poprzez wprowadzenie spoiw (cement, wapno, inne)

Katalog technologii

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Konsolidacja	wzmocnienie podłoża organicznego metodą mikrowybuchów
	żadnych elementów dodatkowych w podłożu) - nadkład, nadkład i odwodnienie
	geodreny prefabrykowane (VD) z przeciążeniem, sączki piaskowe z przeciążeniem
	geodreny prefabrykowane (VD) z systemem konsolidacji próżniowej (także z przeciążeniem)
	przyspieszanie konsolidacji przy użyciu elektroosmozy i przeciążenia

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Wzmocnienie wgłębne z materiałów sypkich z konsolidacją	kolumny tworzone wibrowymiany (piaskowe, żwirowe, kamienne)
	kolumny tworzone metodą DR (dynamic replacement)
	kolumny GEC (geosynthetic encased columns)
	kolumny kruszywowe wykonywane innymi metodami

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Wzmacnianie wgłębne kolumnami sztywnymi z elementami podatnymi	głowicą/stopą żwirową, betonowo-żwirowe wykonywane z betonu ubijalnego
	głowicą/stopą żwirową, betonowo-żwirowe wykonywane z mieszanki betonowej
Wzmocnienie wgłębne przestrzenne i masowe	iniekcja penetrująca
	iniekcja rozrywająca
	iniekcje (zastrzyki) cementowe
	iniekcje (zastrzyki) chemiczne (w tym zastrzyki polimerowe)
	CDMM (Continuous Deep Mixing Method) - gruntobeton, fibrogruntobeton

Katalog technologii

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża	
Wzmacnianie wgłębne elementami sztywnymi*) z zastosowaniem warstwy transmisyjnej, zbrojenia nadpalowego, poszerzonych głowic (lub "czapek" prefabrykowanych), płyt żelbetowych *) zbrojone lub nie, w zależności od generowanych sił wewnętrznych	displacement piles/full displacement columns/controlled modulus columns	kolumny W/CW (wapienne/cementowo-wapienne)
	pale prefabrykowane (w funkcji kolumn)	kolumny DSM (deep soil mixing) (na mokro i na sucho)
	pale prefabrykowane z płytą żelbetową	kolumny jet-grouting (iniekcja strumieniowa)
	kolumny betonowe wiercone (np. w technologii CFA)	iniekcja niskociśnieniowa
		iniekcja rozpychająca
	kolumny z betonu ubijalnego	panele CDMM (Continuous Deep Mixing Method)

Grupy technologii wzmocnienia podłoża	Technologia wzmocnienia podłoża
Inne metody (eksperymentalne)	zbrojenie rozproszone gruntu (np. włókna, guma, materiały recyklingowane)
	"edometr" ze ścianek szczelnych/szczelinowych
	Kompensacja obciążenia działającego na podłoże z zastosowaniem spienionego szkła
	inne

Parametry i badania podstawowe niezależne od technologii wzmocnienia wymagane wstępnie w celu wyboru technologii. Etapy STEŚ, KP:

Wszystkie grunty:

Do oceny miąższości i układu warstw: odwierty, sondowania CPTu (ewentualnie inne końcówki do sondowań statycznych, np. T-bar), sondowania dynamiczne.

Poziom/poziomy ZWG, wahania ZWG, rodzaj zwierciadła (swobodne/napięte).

Grunty grupy A:

- Wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu ($c_u = s_u$) na podstawie badań *in situ* sondą krzyżakową (*field vane test FVT*) z elektronicznym pomiarem siły na różnych głębokościach z uwzględnieniem współczynnika korekcyjnego (na podstawie korelacji z innymi badaniami i/lub danymi z literatury). Nie jest zalecane wyznaczanie c_u na podstawie sondowań CPTu.
- Ciężary objętościowe γ , γ_{sr} (do oceny stanu naprężenia).
- Odwiert: Określenie rodzaju gruntu (czy torf/namuł/gytia itd.), wilgotność, zawartość części organicznych (najlepiej metodą utleniania, metoda wyżarzania może zawyżać zawartość części organicznych w gruntach niskoorganicznych), agresywność wody w stosunku do stosowanych materiałów budowlanych, zawartość węgla wapnia.
- Wstępne badanie ściśliwości: pierwotny moduł edometryczny E_{oed} . Przybliżone oszacowanie poziomu osiadań.

Parametry i badania podstawowe niezależne od technologii wzmocnienia wymagane wstępnie w celu wyboru technologii. Etapy STEŚ, EKP:

Grunty grupy B:

- Stopień zagęszczenia (I_D) na podstawie badań *in situ*. Sondowanie dynamiczne, sondowanie CPTu.
- Skład granulometryczny – parametry uziarnienia: C_c , C_u (*curvature coefficient, uniformity coefficient*), f_{si+cl} (zawartość frakcji drobnych).
- Agresywność wody.

Grunty grupy C:

- Wskaźnik konsystencji (I_c) na podstawie badań *in situ*.
- Sondowania CPTu.
- Wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu ($c_u=s_u$) na podstawie badań *in situ* sondą krzyżakową (*field vane test FVT*) na różnych głębokościach z uwzględnieniem współczynnika korekcyjnego (na podstawie korelacji z innymi badaniami).
- Skład granulometryczny, głównie zawartość poszczególnych frakcji.

Uwagi dotyczące dodatkowych badań gruntów organicznych:

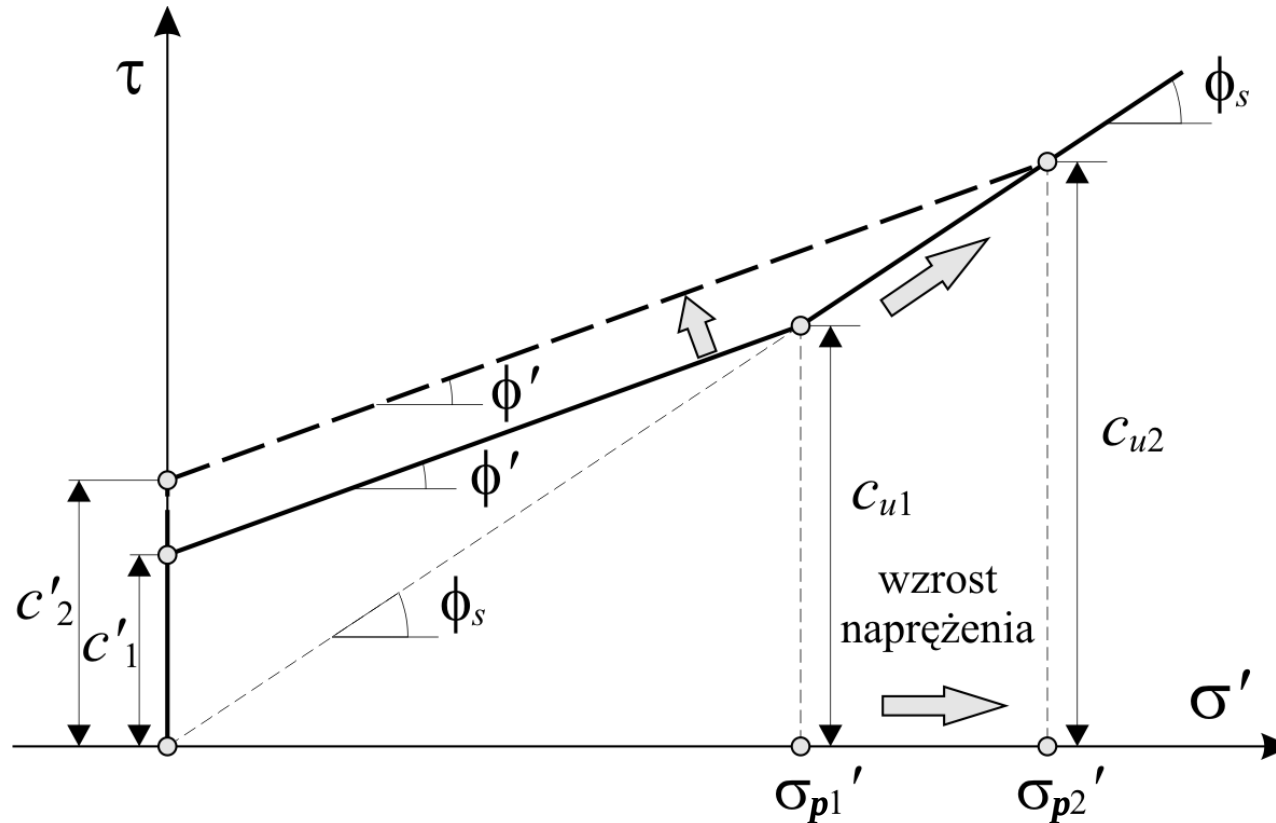
Standardowa charakterystyka materiałowa, Polska

- 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 wewnętr. $\phi^{(n)}$	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
IIIa	*14,20	*1,84	—	31°45'	77 000	100 000	0,80	—	—	Pd, Pd/Ps
	22,20	1,99								
IIIb	*12,20	*1,89	—	34°45'	129 000	150 000	0,80	—	—	Ps, Ps+Ż
	18,50	2,03								

Standardowa charakterystyka materiałowa, inne kraje

- bardzo niska sztywność – opisywana za pomocą wskaźników ścisłości
- wysokie wartości efektywnych parametrów wytrzymałościowych (szczególnie ϕ')
- wysokie współczynniki wytrzymałości na ścinanie bez odpływu (c_u/σ_{v0}' , c_u/σ_p')
- w gruntach nienaruszonych przyjmuje się lekką prekonsolidację



ϕ' , c' , c_u – efektywny kąt tarcia wewnętrznego, efektywna spójność oraz wytrzymałość bez odpływu
 ϕ'_s – całkowity kąt tarcia wewnętrznego, σ_p – naprężenie prekonsolidacji

Grunty organiczne, badania laboratoryjne

wyniki dokładnych badań laboratoryjnych wskazują na zaskakująco wysokie wartości parametrów wytrzymałościowych – zarówno efektywnych jak i całkowitych (bez odpływu)

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

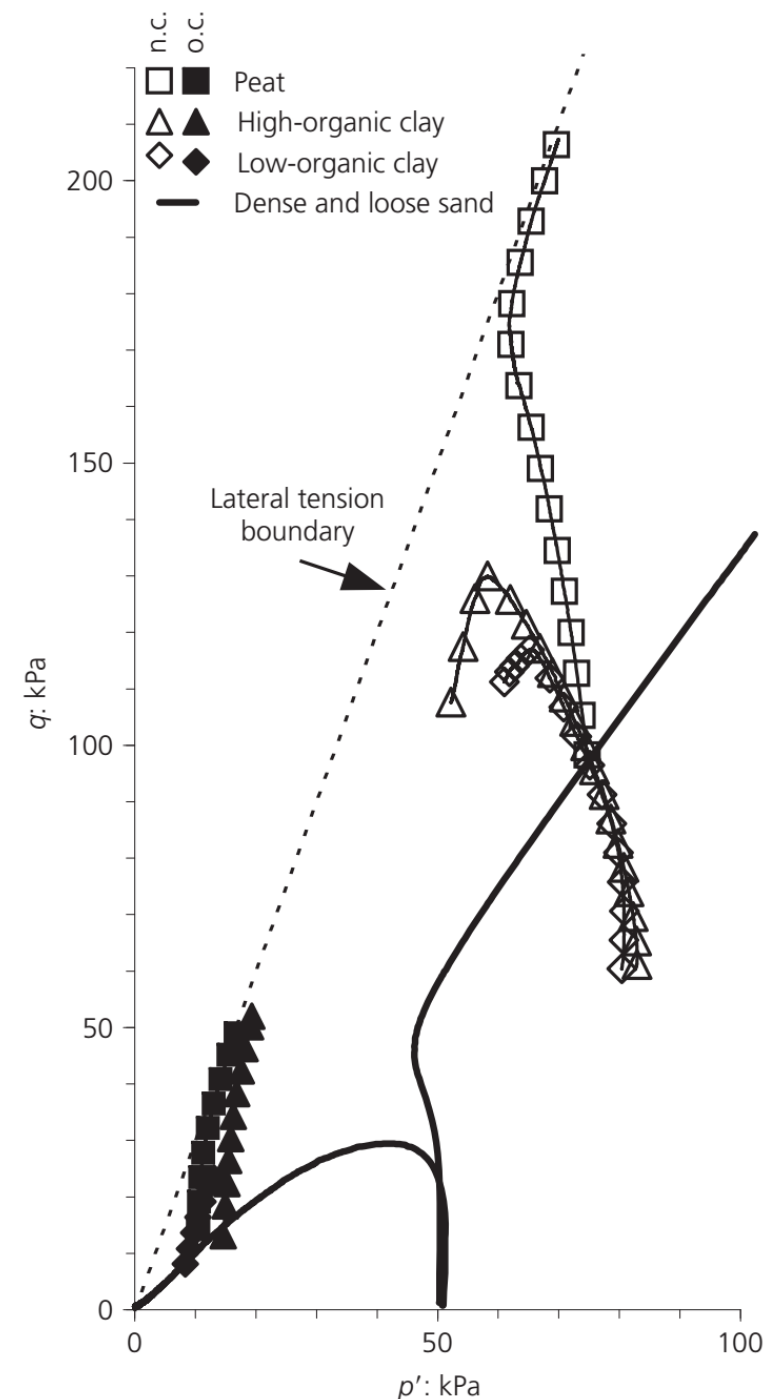
!!!

	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.

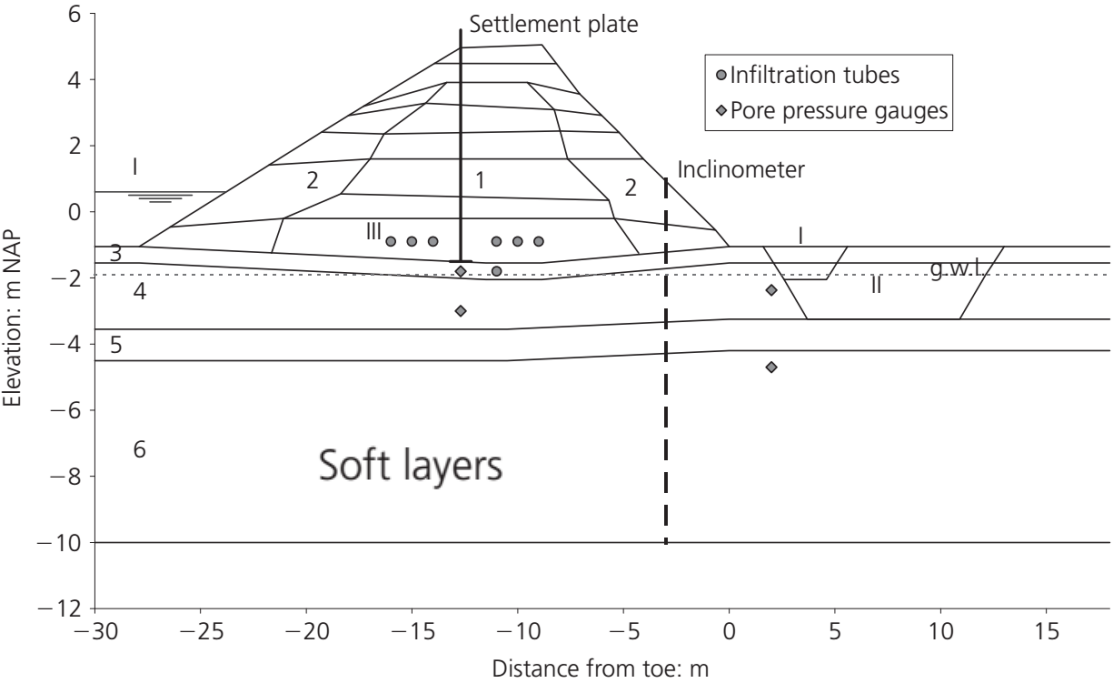
*) den Haan E., Feddema A.: Deformation and strength of embankments on soft Dutch soil, ICE Geotechnical Engineering 166, GE3, 2013;

*) 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.



Grunty organiczne, badania polowe z analizą numeryczną wstecz

próbné obciążenie nasypu na gruntach organicznych w Booneschans/Holandia

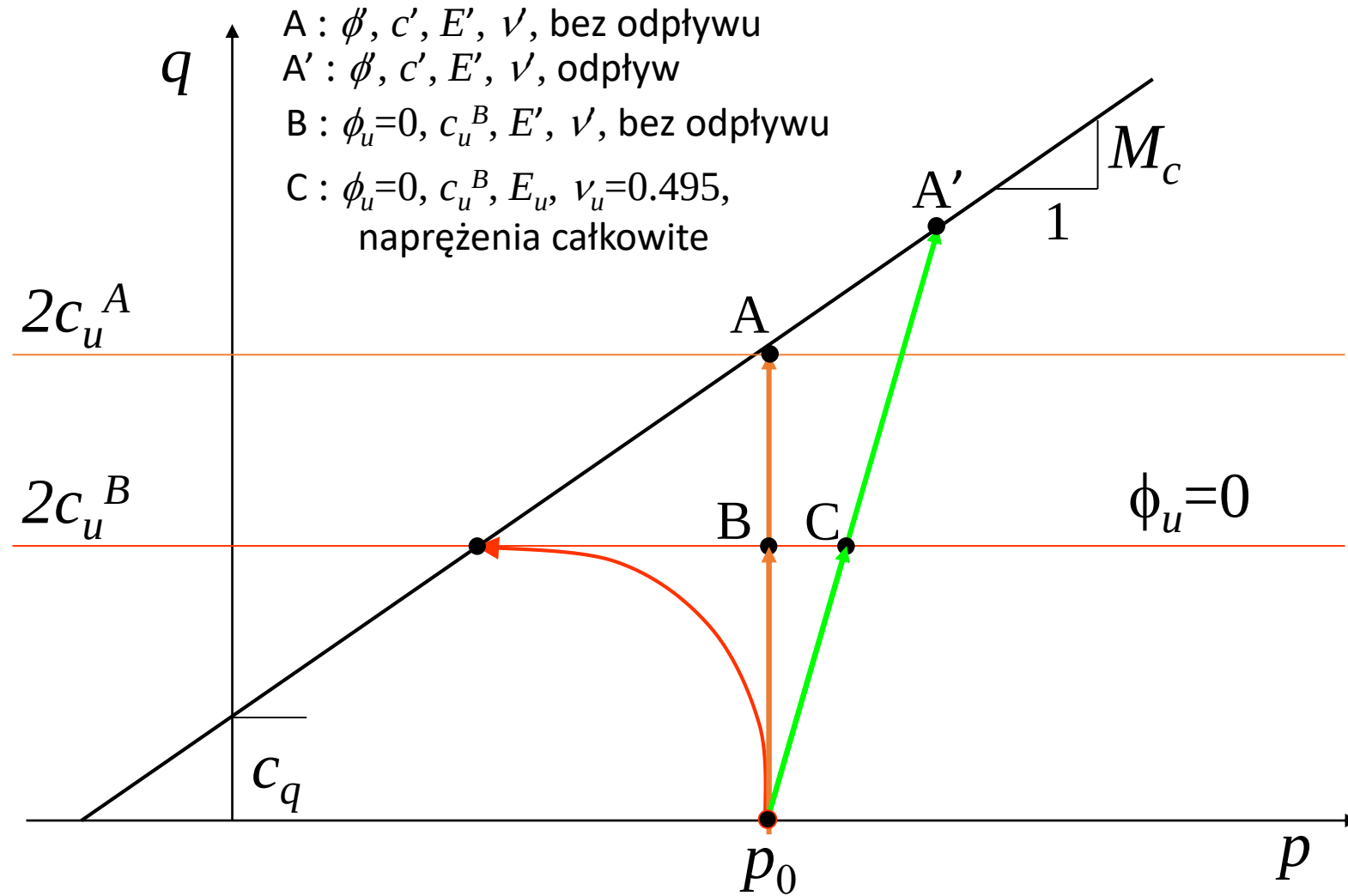


Characteristics of IJkdijk peat, Booneschans

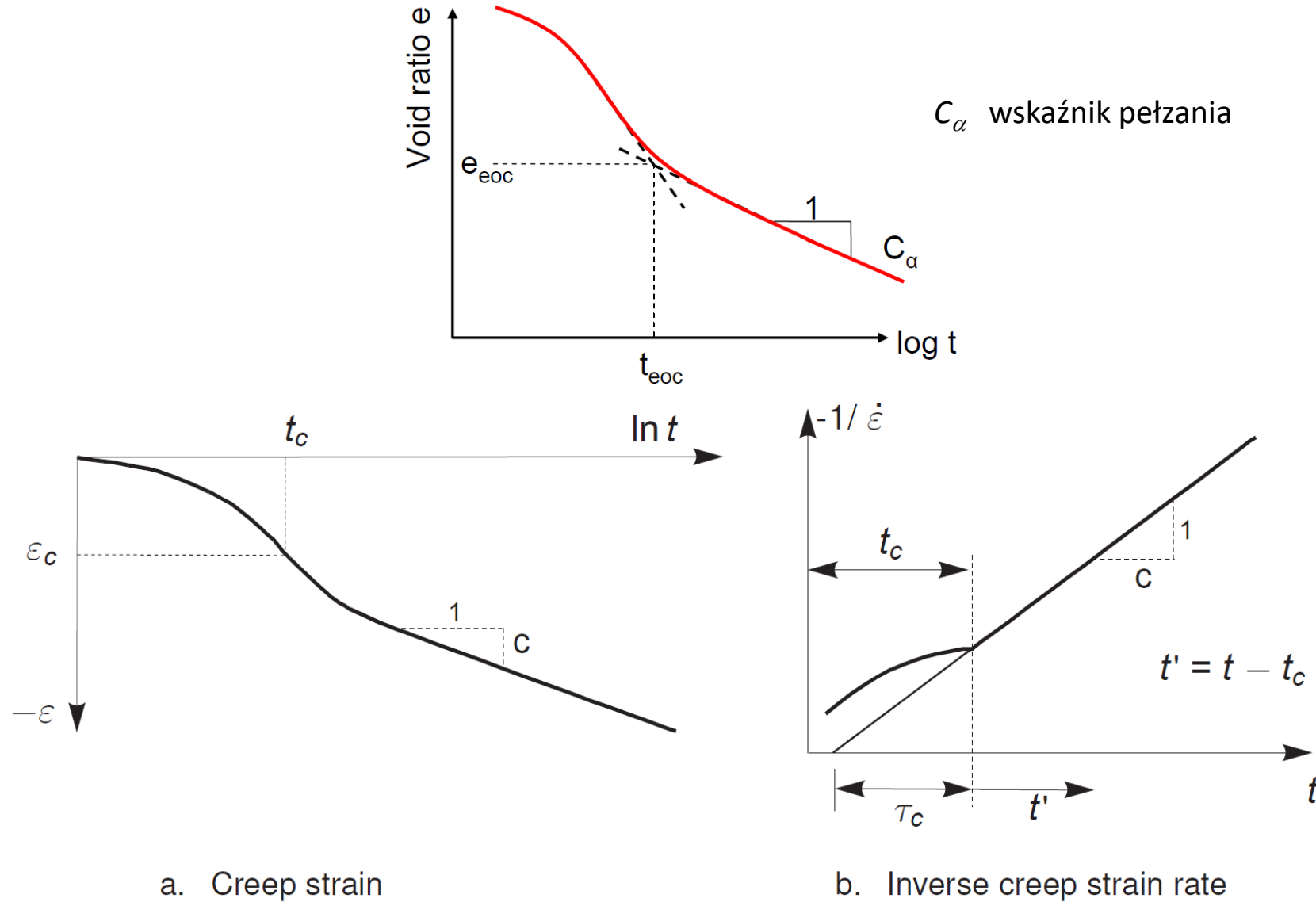
Bulk density: kN/m ³	κ^*	λ^*	μ^*	ν	M	ϕ' : degrees	$K_{0,nc}$	OCR	k_0 : m/s	C_k
10.5	0.02	0.22	0.02	0.21	2.6	65.1	0.25	3.3	1.15×10^{-8}	0.35

*) den Haan E., Feddema A., 2013;

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

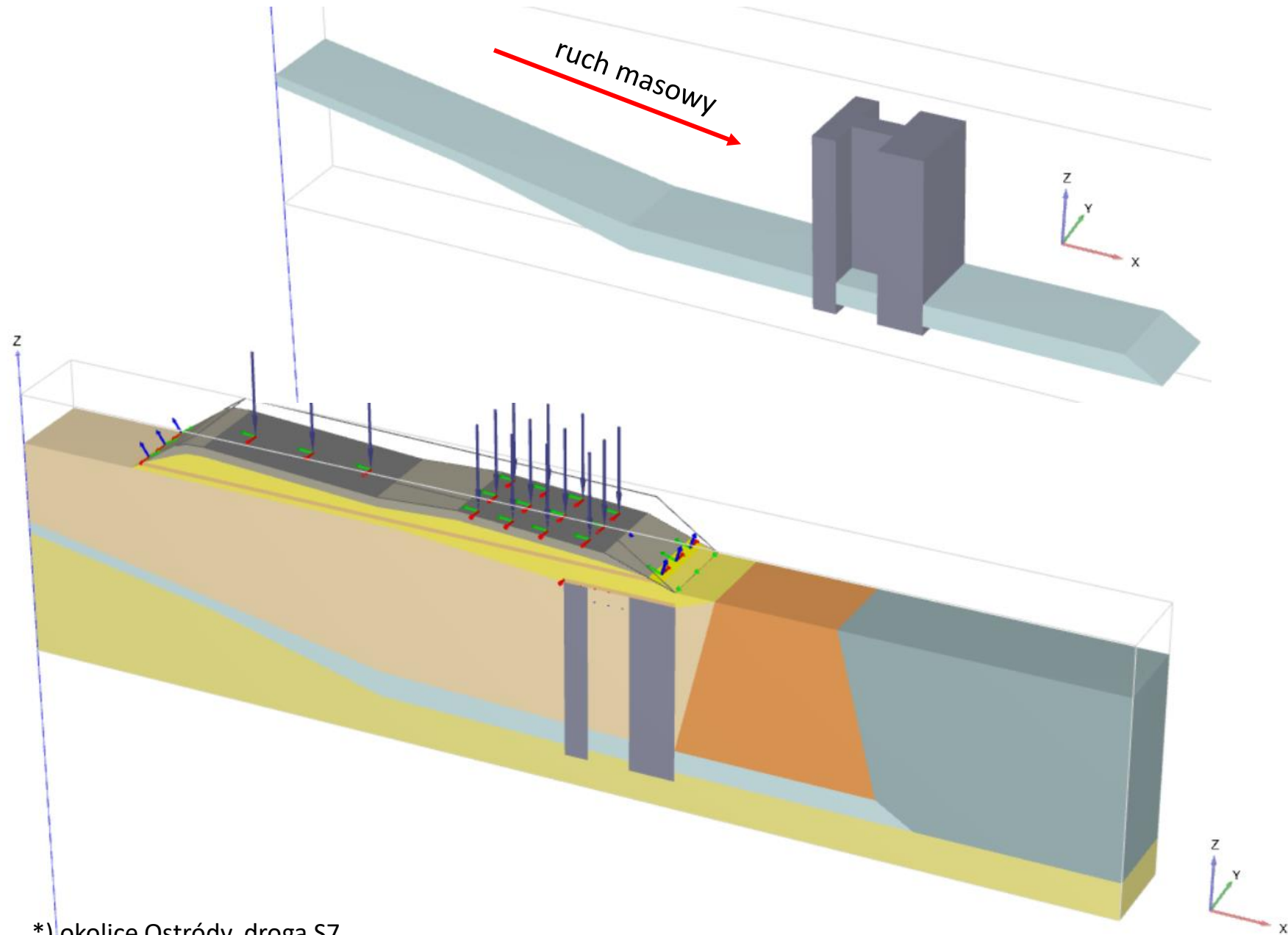


Grunty organiczne, wyznaczanie wskaźników pełzania w badaniu edometrycznym



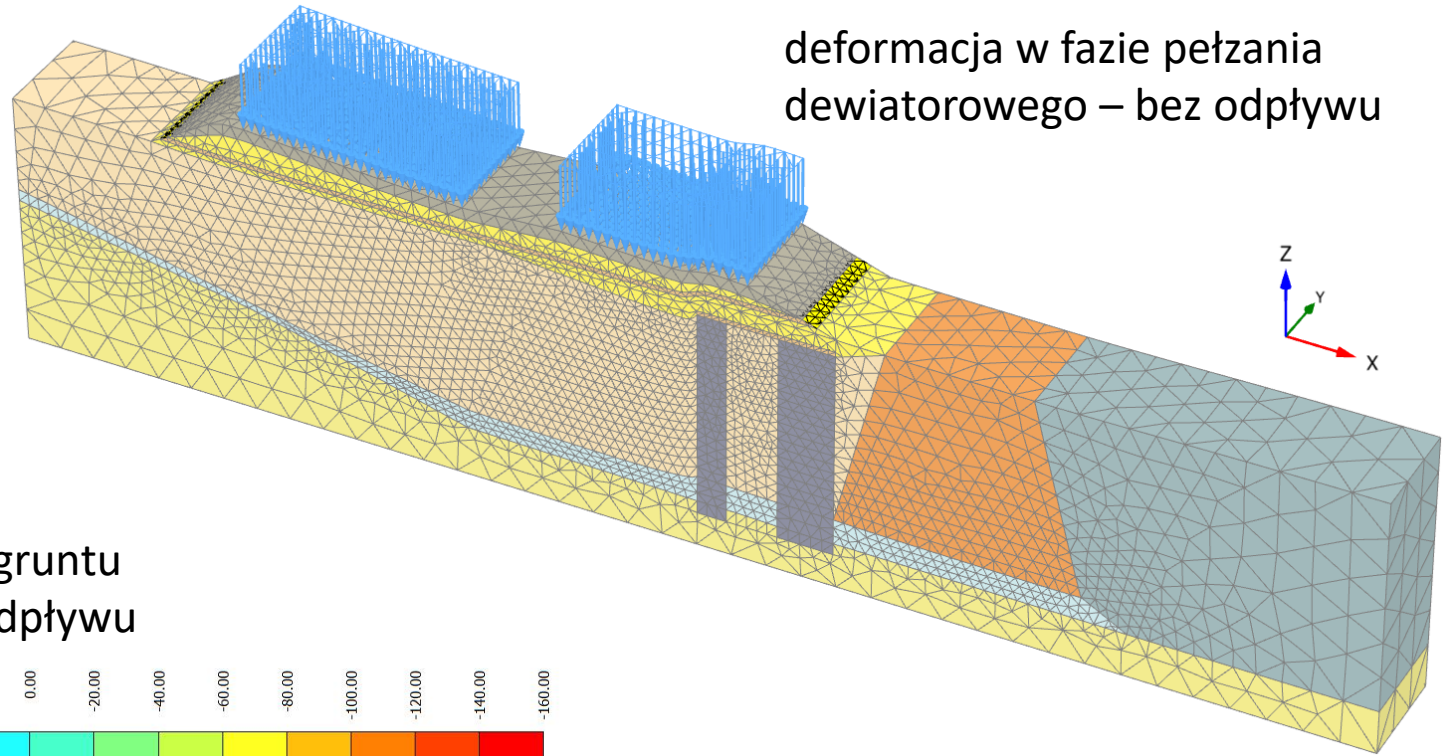
$C = \mu^*$ parametr modelu ABC (Holandia) – w aplikacjach inżynierskich μ^* (creep index)

Przykładowe sprawdzenie efektywności zaprojektowanej ściany oporowej w technologii DSM, sytuacja A8

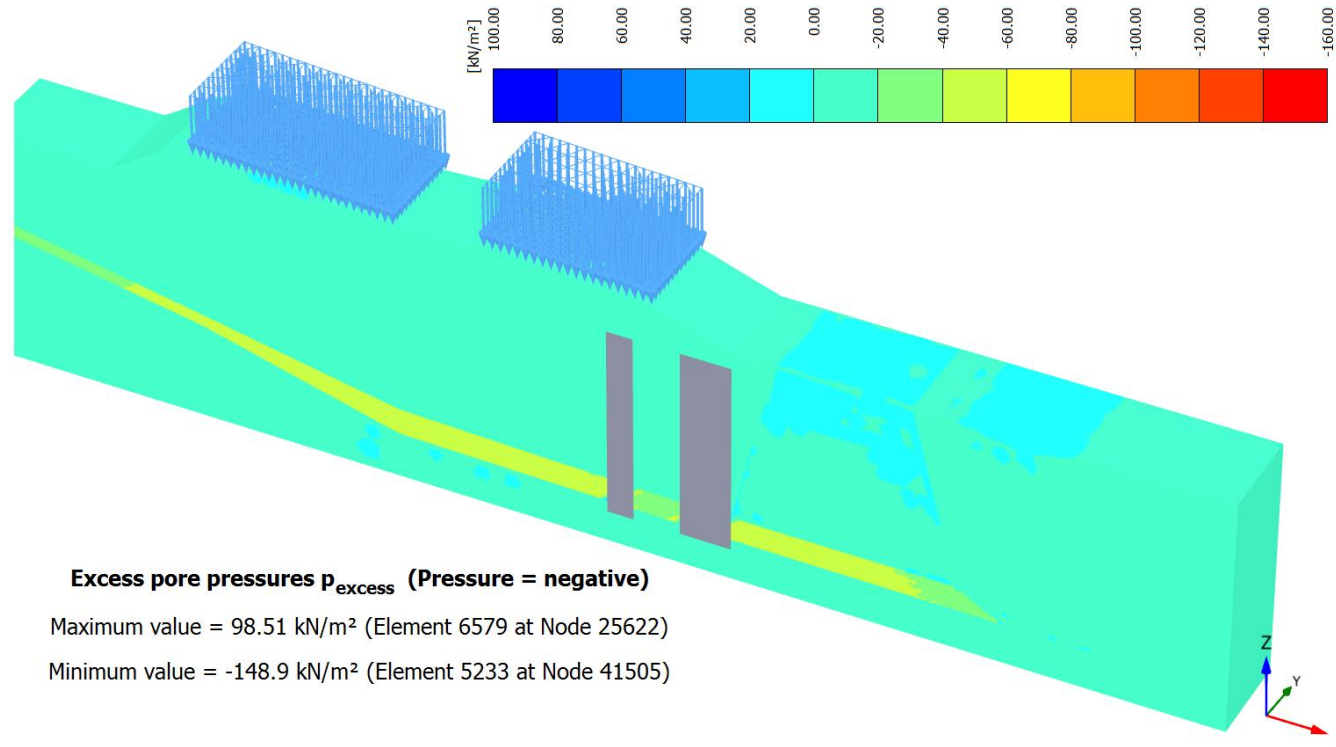


*) okolice Ostródy, droga S7

deformacja w fazie pełzania
dewiatorowego – bez odpływu



lokalizacja nadciśnienie wody w porach gruntu
w fazie pełzania dewiatorowego – bez odpływu



Dziękujemy 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