



Wydział Inżynierii Lądowej
i Gospodarki Zasobami



VII MIĘDZYNARODOWE FORUM TUNELOWE

Rzeszów, 20-22.10.2025

Wybrane aspekty projektowania tuneli

Prof. dr hab. inż. Marek Cała

Dr inż. Agnieszka Stopkowicz

Rzeszów, 20 września 2025

21-22 stycznia 2020 r., II Forum Tunelowe, Wrocław

Aktualne problemy projektowania obudowy tuneli w południowej Polsce – prof. Marek Cała, prof. Antoni Tajduś, dr Agnieszka Stopkowicz, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

6-8 lutego 2023, V Forum Tunelowe, Warszawa

Problematyka drażenia tuneli drogowych w warunkach fliszu karpackiego, prof. dr hab. inż. Marek Cała, prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś, dr inż. Agnieszka Stopkowicz, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

13-15 maja 2024, VI Forum Tunelowe, Bielsko-Biała

Znaczenie rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich na poszczególnych etapach realizacji inwestycji tunelowych, Marek Cała, Agnieszka Stopkowicz, Malwina Kolano, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami AGH

20-22 września 2025, VII Forum Tunelowe, Rzeszów

Wybrane aspekty projektowania tuneli, prof. dr hab. inż. Marek Cała, dr inż. Agnieszka Stopkowicz, AGH

Filary przygotowania i realizacji inwestycji tunelowych

1. Rozpoznanie warunków geologiczno-inżynierskich, hydrogeologicznych, zagrożeń naturalnych
2. Dobór metody drążenia oraz projekt technologii drążenia oraz obudowy
3. Zarządzanie ryzykiem
4. Realizacja inwestycji, monitoring, współpraca międzybranżowa, zastosowanie nowoczesnych technologii

Macierz ryzyka

ID	Kategoria ryzyka	Opis ryzyka	Prawdopodobieństwo	Skutki	Strategia zarządzania
R1	Geotechniczne	geotechniczne (np. luźne grunty, kawerny, uskoki)	Wysokie	Krytyczne	Odpowiedni zakres rozpoznania, modele 3D
R2	Geologiczne	Niezidentyfikowane formacje geologiczne lub anomalie skalne	Średnie	Poważne	Wykorzystanie danych archiwalnych, metod
R3	Hydrogeologiczne	Wysoki poziom wód gruntowych, artezyjskich, zmienność ciśnienia	Wysokie	Poważne	Monitoring wód gruntowych, iniekcje, uszczelnienia
R4	Techniczne	Awarie TBM, błędy w doborze metody drążenia	Średnie	Poważne	Konserwacja TBM, plany awaryjne, elastyczne podejście
R5	Projektowe	Błędy w modelach, projektach	Średnie	Umiarkowane	Weryfikacja modeli i założeń przez ekspertów, BIM
R6	Wykonawcze	Opóźnienia wykonawcze, niedostosowanie technologii do warunków	Wysokie	Poważne	Weryfikacja kompetencji wykonawców, plan B
R7	Finansowe	Wzrost kosztów materiałów lub energii, błędna wycena ryzyk	Średnie	Umiarkowane	odpowiedni typ kontraktów
R8	Środowiskowe	Zanieczyszczenie wód, hałas, wibracje, odpady urobku	Średnie	Poważne	Systemy oczyszczania, plan zarządzania
R9	Prawne/Regulacyjne	Zmienność przepisów, opóźnienia w decyzjach administracyjnych	Niskie	Umiarkowane	Stały monitoring regulacji, doradztwo prawne
R10	Zarządzanie projektem	Słaba koordynacja międzybranżowa, brak komunikacji	Średnie	Umiarkowane	Zintegrowane zarządzanie projektem
R11	Bezpieczeństwo	Wypadki przy pracy, zawały, awarie	Niskie	Krytyczne	Szkolenia BHP, kontrola ryzyk
R12	Społeczne i wizerunkowe	Protesty społeczne, konflikt z lokalną społecznością	Średnie	Umiarkowane	Kampanie informacyjne, udział społeczności

3) trzecia kategoria geotechniczna, która obejmuje:

- a) obiekty budowlane posadawiane w skomplikowanych warunkach gruntowych,
- b) nietypowe obiekty budowlane niezależnie od stopnia skomplikowania warunków gruntowych, których wykonanie lub użytkowanie może stwarzać poważne zagrożenie dla użytkowników, takie jak: obiekty energetyki, rafinerie, zakłady chemiczne, zapory wodne i inne budowle hydrotechniczne o wysokości piętrzenia powyżej 5,0 m, budowle stoczniowe, wyspy morskie i platformy wiertnicze oraz inne skomplikowane budowle morskie, lub których projekty budowlane zawierają nieznaną podstawę w przepisach nowe niesprawdzone w krajowej praktyce rozwiązania techniczne,
- c) obiekty budowlane zaliczane do inwestycji mogących zawsze znacząco oddziaływać na środowisko, określone w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz. U. Nr 213, poz. 1397),
- d) budynki wysokościowe projektowane w istniejącej zabudowie miejskiej,
- e) obiekty wysokie, których głębokość posadawiania bezpośredniego przekracza 5,0 m lub które zawierają więcej niż jedną kondygnację zagłębioną w gruncie,
- f) tunele w twardych i niespękanych skałach, w warunkach niewymagających specjalnej szczelności,
- g) obiekty infrastruktury krytycznej,
- h) obiekty zabytkowe i monumentalne.

Dz.U.2012.0.463 - Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych

3) **trzecia kategoria geotechniczna**, która obejmuje:

- a) obiekty budowlane posadawiane w skomplikowanych warunkach gruntowych,
- b) nietypowe obiekty budowlane niezależnie od stopnia skomplikowania warunków gruntowych, których wykonanie lub użytkowanie może stwarzać poważne zagrożenie dla użytkowników, takie jak: obiekty energetyki, rafinerie, zakłady chemiczne, zapory wodne i inne budowle hydrotechniczne o wysokości piętrzenia powyżej 5,0 m, budowle stoczniowe, wyspy morskie i platformy wiertnicze oraz inne skomplikowane budowle morskie, lub których projekty budowlane zawierają nieznaną podstawę w przepisach nowe niesprawdzone w krajowej praktyce rozwiązania techniczne,
- c) obiekty budowlane zaliczane do inwestycji mogących zawsze znacząco oddziaływać na środowisko, określone w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz. U. Nr 213, poz. 1397),
- d) budynki wysokościowe projektowane w istniejącej zabudowie miejskiej,
- e) obiekty wysokie, których głębokość posadawiania bezpośredniego przekracza 5,0 m lub które zawierają więcej niż jedną kondygnację zagłębioną w gruncie,
- f) tunele w twardych i niespękanych skałach, w warunkach niewymagających specjalnej szczelności,**
- g) obiekty infrastruktury krytycznej,
- h) obiekty zabytkowe i monumentalne.

Dz.U.2012.0.463 - Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych

Rozpoznanie

Wymogi norm i wytycznych branżowych

Eurokod 7 - PN-En 1997-2: 2007, Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego

Rodzaj obiektu budowlanego	Rozstaw wierceń
Budowle wysokie, przemysłowe	Siatka: 15 – 40 m
Budowle o dużej powierzchni	Siatka: Nie więcej niż 60 m
Budowle liniowe (mosty, drogi kolejowe, wały, tunele)	20 – 200 m
Budowle specjalne (mosty, kominy, fundamenty pod maszyny)	Od dwóch do sześciu punktów na fundament
Zapory	25 – 75 wzdłuż odpowiednich przekrojów

Zalecenia odnośnie rozstawu i głębokości rozpoznania – Eurokod 7

Głębokość rozpoznania z_a :

Dla dróg i lotnisk:

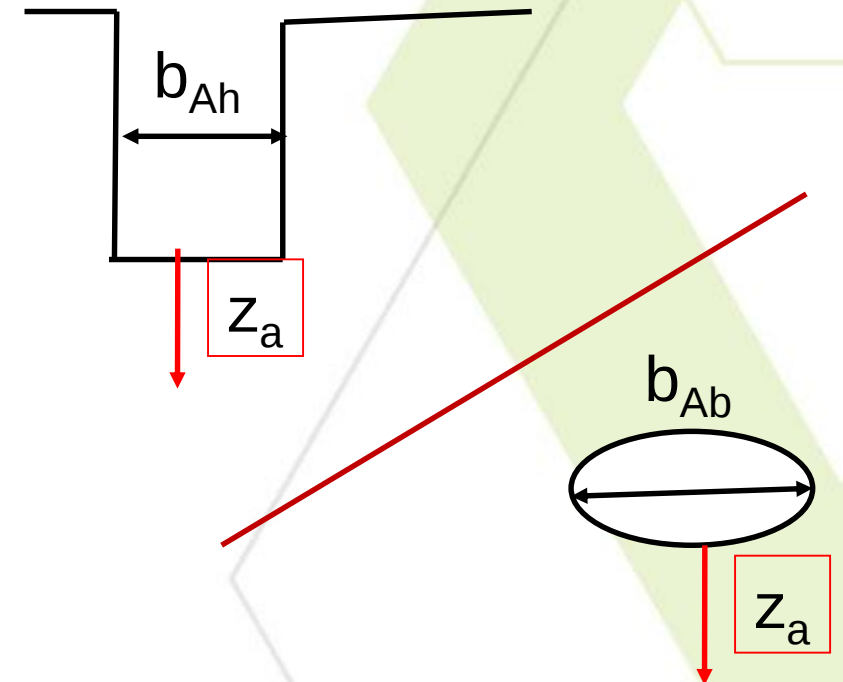
- $z_a \geq 2,0$ m poniżej projektowanej niwelety

Dla wykopów wąskoprzestrzennych, większa z wartości:

- $z_a \geq 2,0$ m
- $z_a \geq 1,5 b_{Ah}$

W przypadku małych tuneli
i komór podziemnych

- $b_{Ab} < z_a < 2,0 b_{Ab}$
gdzie b_{Ab} jest szerokością wykopu



Rozpoznanie

Wymogi norm i wytycznych branżowych

NOWE WYTYCZNE BADAŃ PODŁOŻA BUDOWALNEGO NA POTRZEBY BUDOWNICTWA DROGOWEGO WDROŻONE PRZEZ GDDKiA



27 czerwca 2019 r. Generalny Dyrektor Dróg Krajowych i Autostrad podpisał zarządzenie nr 22 w sprawie wprowadzenia do stosowania w GDDKiA „Wytycznych badań podłoża budowlanego na potrzeby budownictwa drogowego”.

KONSORCJUM:



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy



Akademia Górniczo Hutnicza
im. Stanisława Staszcza w
Krakowie



Politechnika Warszawska



Rozpoznanie warunków podłoża



Zakres prac dokumentacyjnych

Dokumentowanie badań podłoża budowlanego polega na wykonywaniu prac dokumentacyjnych obejmujących:

- ☐ zbieranie dostępnych informacji o terenie i danych archiwalnych o podłożu budowlanym,
- ☐ projektowanie i wykonywanie badań podłoża budowlanego w tym badań terenowych i laboratoryjnych,

DGI podlega zatwierdzeniu (w starostwach powiatowych i urzędach miast na prawach powiatu) wg ustawy Prawo geologiczne i górnicze:

- Pierwszy etap w przypadku DGI to **projekt robót geologicznych** oraz przeprowadzenie jego uzgodnienia i zatwierdzenia urzędowego.
- Drugi etap po zatwierdzeniu projektu i zgłoszeniu zamiaru wejścia w teren przeprowadza się wszystkie zaprojektowane roboty geologiczne (nie wcześniej niż 2 tygodnie od zatwierdzenia projektu).
- Trzeci etap - złożenie wniosku o zatwierdzenie DGI.

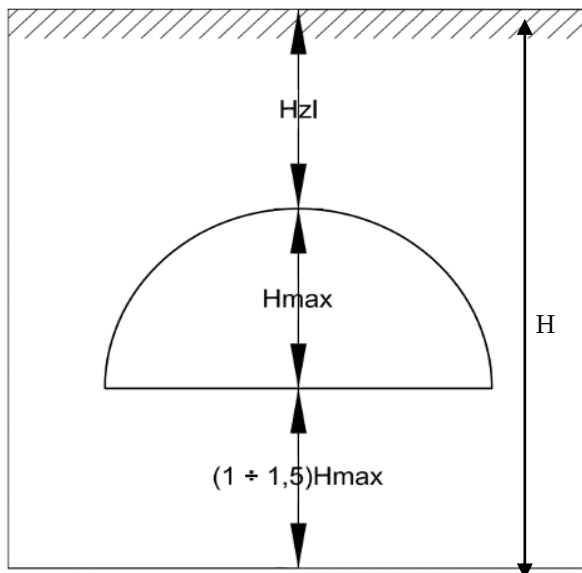
Rozpoznanie warunków podłoża – zakres badań podłoża

Etap procesu inwestycyjnego Rodzaj badań podłoża budowlanego	Etap przygotowania Projektuj i Buduj				Etap przygotowania Buduj			
	SK	STEŚ STEŚ-R Etap I	KP STEŚ-R Etap II	PB	SK	STEŚ STEŚ-R Etap I	KP STEŚ-R Etap II	PB
Kartowanie hydrogeologiczne	NW	W	Z	Z	NW	W	Z	Z
Kartowanie geologiczno-inżynierskie	NW	W	W	Z	NW	W	W	W
Pomiary geodezyjne	NW	W	W	Z	NW	W	W	W
Pomiary fotogrametryczne i teledetekcyjne	NW	Z	Z	Z	NW	Z	Z	Z
Badania geofizyczne	NW	W	W	Z	NW	W	W	W
Wiercenia w tym makroskopowe oznaczenie gruntów i skał oraz pobór prób gruntów, skał i wód podziemnych do badań laboratoryjnych	NW	W	W	Z	NW	W	W	W
Sondowania i badania polowe	NW	Z	W	Z	NW	Z ¹⁾	W	W
Badania laboratoryjne	NW	Z	W	Z	NW	Z ¹⁾	W	W
Badania hydrogeologiczne	NW	W	W	Z	NW	W	W	W
Badania środowiskowe	NW	W	W	W	NW	W	W	W

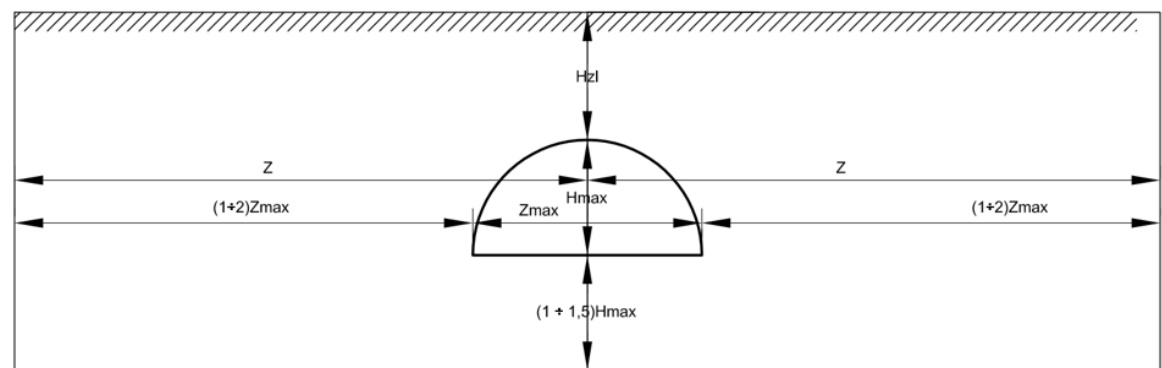
Wytyczne wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego. Część 1: Wytyczne badań podłoża budowlanego w drogownictwie. Praca zbiorowa PiG, AGH, PW, 2019

Rozpoznanie

Wymogi norm i wytycznych branżowych

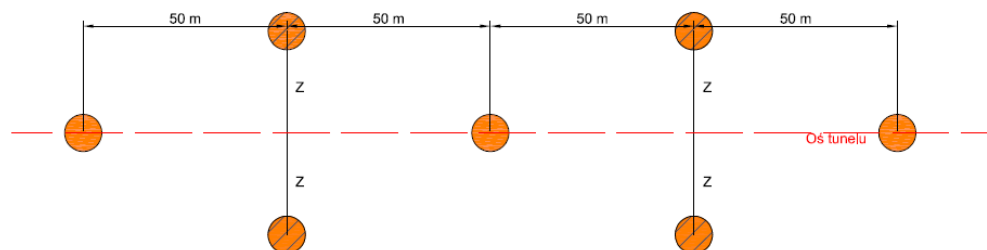


Zasięg rozpoznania masywu skalnego w otoczeniu tunelu - STEŚ i STEŚ-R Etap I



Zasięg rozpoznania masywu skalnego w otoczeniu tunelu - STEŚ i STEŚ-R Etap II

-  Otwór w osi tunelu
-  Otwór w warstwach ociosowych



Rozpoznanie

Wymogi norm i wytycznych branżowych

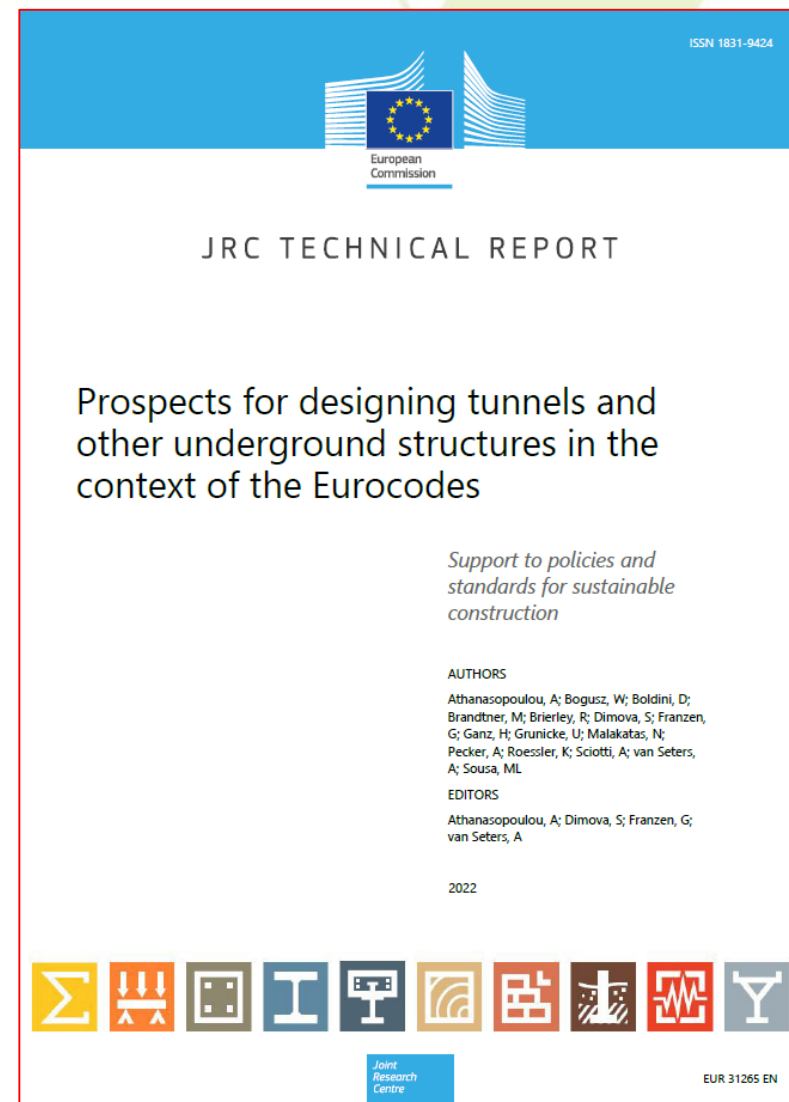
Rodzaj drogowego obiektu inżynierskiego	Warunki gruntowe			
	proste		złożone/skomplikowane	
	Rozstaw wierceń w warstwach ociosowych (odległość liczona od osi tunelu)	Rozstaw wierceń wzdłuż osi tunelu (plus ociosy)	Rozstaw wierceń w warstwach ociosowych (odległość liczona od osi tunelu)	Rozstaw wierceń wzdłuż osi tunelu (plus ociosy)
tunel w gruntach	1 na każde ≤ 100 m długości tunelu w osi tunelu, 2 na każde ≤ 100 m długości tunelu w warstwach ociosowych (rozstaw wierceń w warstwach ociosowych od osi tunelu: $(1,5 \div 2,5)Z_{\max}$), projektowane naprzemiennie	≥ 2 (jedno na początku i jedno na końcu, lecz nie rzadziej niż co 50 m, przy wykorzystaniu 2 metod)	1 na każde ≤ 50 m długości tunelu w osi tunelu, 2 na każde ≤ 100 m długości tunelu w warstwach ociosowych (rozstaw wierceń w warstwach ociosowych od osi tunelu: $(1,5 \div 2,5)Z_{\max}$)	≥ 2 (jedno na początku i jedno na końcu, lecz nie rzadziej niż co 50 m, przy wykorzystaniu 2 metod)
tunel w skałach	$(1,5 \div 2,5)Z_{\max}$	1 na każde ≤ 200 m długości tunelu w osi tunelu, 2 na każde ≤ 200 m długości tunelu w warstwach ociosowych, projektowane naprzemiennie	$(1,5 \div 2,5)Z_{\max}$	1 na każde ≤ 100 m długości tunelu w osi tunelu, 2 na każde ≤ 100 m długości tunelu w warstwach ociosowych, projektowane naprzemiennie
Gdzie: $Z_{\max}$ - największa szerokość budowli podziemnej				

Rozpoznanie

Wymogi norm i wytycznych branżowych

Wymogi w zakresie rozpoznania warunków gruntowych

- Etapowanie rozpoznania:
 - Etap planistyczny: ogólne rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych.
 - Etap projektowy: szczegółowe badania geotechniczne i geofizyczne.
 - Etap realizacji: monitoring i badania uzupełniające.
- Kluczowe wymagania:
 - Odwierty, sondowania CPT, badania laboratoryjne i polowe.
 - Badania geofizyczne (np. sejsmika, georadar) dla detekcji struktur i nieciągłości.
 - Opracowanie trójwymiarowego modelu geologiczno-geotechnicznego.
 - Identyfikacja stref ryzyka: uskoki, kawerny, grunty ekspansywne, osuwiska.
 - Aktualizacja dokumentacji na podstawie wyników z etapu budowy.
- Cel: Redukcja niepewności i zapewnienie podstaw do bezpiecznego projektowania obudowy.



Rozpoznanie

Wymogi norm i wytycznych branżowych

<i>numer EN</i>	<i>tytuł EN/tytuł PN-EN</i>	<i>Ostatni zrealizowany etap</i>	<i>Kolejny etap</i>
Eurokod 7			
EN 1997-1:2024	Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 1: General rules	Publikacja w CEN	Publikacja krajowa
EN 1997-2:2024	Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground properties	Publikacja w CEN	Publikacja krajowa
EN 1997-3:2025	Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 3: Geotechnical structures	Publikacja w CEN	Publikacja krajowa

Zestawienie na dzień 30 czerwca 2025 r.

Dokumenty opublikowane w CEN (Publikacja krajowa dla 2. edycji Eurokodów musi nastąpić najpóźniej do 30 września 2027)

Dokumenty wprowadzone do zbioru PN/PDN (Publikacja krajowa)

PN-EN 1997-1:2025-10 - wersja angielska

Eurokod 7 -- Projektowanie geotechniczne -- Część 1: Zasady ogólne

PN-EN 1997-2:2025-10 - wersja angielska

Eurokod 7 -- Projektowanie geotechniczne -- Część 2: Właściwości podłoża gruntowego

PN-EN 1997-3:2025-10 - wersja angielska

Eurokod 7 -- Projektowanie geotechniczne -- Część 3: Konstrukcje geotechniczne

Table B.1 — Guidance on appropriate methods of ground investigation

5.2.1 Desk Study - history and past uses of site	2	Table B.1 — Guidance on appropriate methods of ground investigation																			
5.2.2 Site Inspection - ground features and geomorphology																					
5.2.3 Disposition and nature of geotechnical units																					
5.2.4 Groundwater conditions																					
5.2.4 Geohydraulic properties																					
5.2.5 Geotechnical monitoring																					
6 Description and classification of ground																					
7.1 and 7.2 Physical properties																					
7.3 Chemical properties																					
8 Strength properties																					
9 Stiffness properties																					
10 Cyclic response and seismic properties																					
11 Groundwater and geohydraulic properties																					
12 Geothermal properties																					
Presence of voids (natural or man-made)																					
Properties of material for reuse																					
Contaminated ground																					
Aggressive ground																					

Ground information needed (EN 1997-2 clauses) H = High relevance M = Medium relevance L = Low relevance C= compulsory				5.2.1 Desk Study - history and past uses of site	5.2.2 Site Inspection - ground features and geomorphology	5.2.3 Disposition and nature of geotechnical units	5.2.4 Groundwater conditions	5.2.4 Geohydraulic properties	5.2.5 Geotechnical monitoring	6 Description and classification of ground	7.1 and 7.2 Physical properties	7.3 Chemical properties	8 Strength properties	9 Stiffness properties	10 Cyclic response and seismic properties	11 Groundwater and geohydraulic properties	12 Geothermal properties	Presence of voids (natural or man-made)	Properties of material for reuse	Contaminated ground	Aggressive ground
Proposed structures and engineering works	Structures (EN 1997-3)	4 Excavations, cuttings	C	C	H	H	H	H	H	H	M	H	M	M	H	L	M	M	L	L	
		4 Embankments	C	C	H	H	M	H	H	M	H	H	M	H	L	M	M	M	L		
		5 Spread foundations ->	C	C	H	H	H	M	H	M	H	H	M	H	L	H	L	H	H		
		6 Piled foundations	C	C	H	H	H	M	H	H	H	H	M	H	M	H	L	H	H		
		7 Retaining structures	C	C	H	H	H	H	H	H	H	H	M	H	L	M	H	M	M		
		8 Anchors	C	C	H	H	M	M	H	H	H	H	M	H	L	M	L	M	H		
		9 Reinforced fill structures	C	C	H	H	H	M	M	H	H	H	M	H	L	M	M	M	H		
		10 Ground reinforcing elements	C	C		H	M	M	H	H	H	H	M	H		M	L	M	H		
		11Ground improvement	C	C	H	H	M	M	M	H	M	H	M	M	M	L	L	L	M	H	
		12 Groundwater control	C	C	H	H	H	H	H	H	M	M	M	M	H	L	H	L	H	M	
		Miscellaneous works	Linear - roads	C	C	H	H	M	M	H	H	M	H	H	M	H	L	H	H	H	H
			Linear - pipelines	C	C	H	H	H	M	H	H	H	H	H	M	H	L	M	H	H	H
	Linear - tunnels		C	C	H	H	H	H	H	H	L	H	H	M	H	L	H	H	M	M	
	Underground openings		C	C	H	H	H	M	H	H	L	H	H	M	H	L	H	M	M	M	
	Dams and barriers		C	C	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	L	M	
	Construction materials		C	C	H	H	L	M	H	H	H	H	H	L	H	L	L	H	H	H	
	Ground source heat installations		C	C	H	H	H	L	H	H	H	L	L	L	H	H	L	L	M	H	

Metody projektowania

- Metody empiryczne:
 - Bazują na klasyfikacjach masywu skalnego i doświadczeniu z wcześniejszych realizacji.
 - Szybka i użyteczna w typowych warunkach, ograniczona stosowalność w złożonych warunkach gruntowych.
- Metody analityczne:
 - Metoda sterowania konwergencją CCM
 - Metody oparte na klasycznych obliczeniach konstrukcyjnych (naprężenia, parcie gruntu) stosowane przy projektowaniu obudowy ostatecznej.
- Metody numeryczne:
 - Zaawansowane modelowanie (MES, MRS).
 - Umożliwia analizę konwergencji, interakcji obudowa - ośrodek, wpływów dynamicznych.
- Metoda obserwacyjna (Observational Method):
 - Projekt adaptowany na podstawie danych z monitoringu w czasie rzeczywistym.
 - Wymaga scenariuszy reakcji, planów pomiarowych i współpracy międzybranżowej

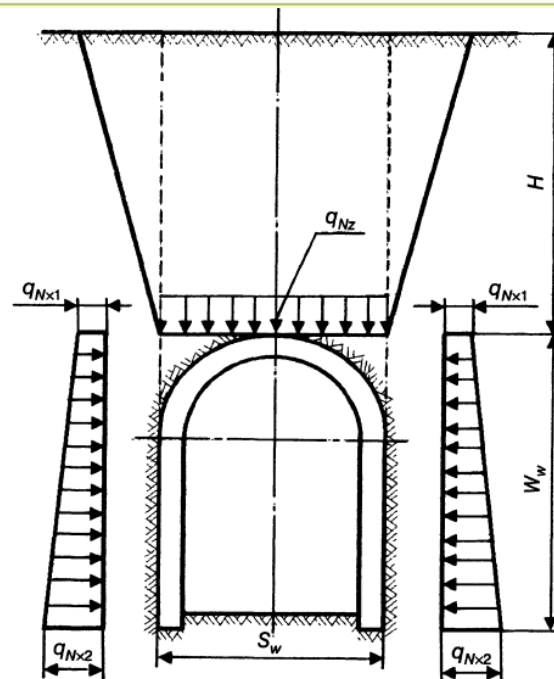
grudzień 1997

POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY	POLSKA NORMA	PN-G-05020
	Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe	Zamiast: BN-79/0434-04 BN-75/0434-05
	Obudowa sklepienia Zasady projektowania i obliczeń statycznych	Grupa katalogowa SKN 0102 ICS 73.020

3.2.2.1 Ogólne zasady określania parametrów geotechnicznych górotworu

Ciężar objętościowy górotworu zaleca się przyjmować na podstawie wartości obliczeniowej gęstości objętościowej zgodnie z 3.2.1.5. Pozostałe parametry geotechniczne górotworu zaleca się określać na podstawie badań laboratoryjnych próbek skał, przyjmując do projektowania wartości obliczeniowe zgodnie z 3.2.1 zmienne współczynnikami k_o i k_1 uzależnionymi od podzielności i liczby rozmakalności skał według tablicy 3. W przypadku braku danych z badań dopuszcza się przyjęcie parametrów geotechnicznych skał z materiałów archiwalnych, dotyczących badań w obszarach sąsiadujących lub dotyczących skał występujących w profilu projektowanego obszaru, stosując najbardziej niekorzystne wartości współczynników zmieniających.

Wartości współczynników k_o i k_1 w zależności od podzielności i rozmakalności skał przedstawiono w tablicy 2.



Rysunek 4 – Schemat dla modelu II obciążenia obudowy

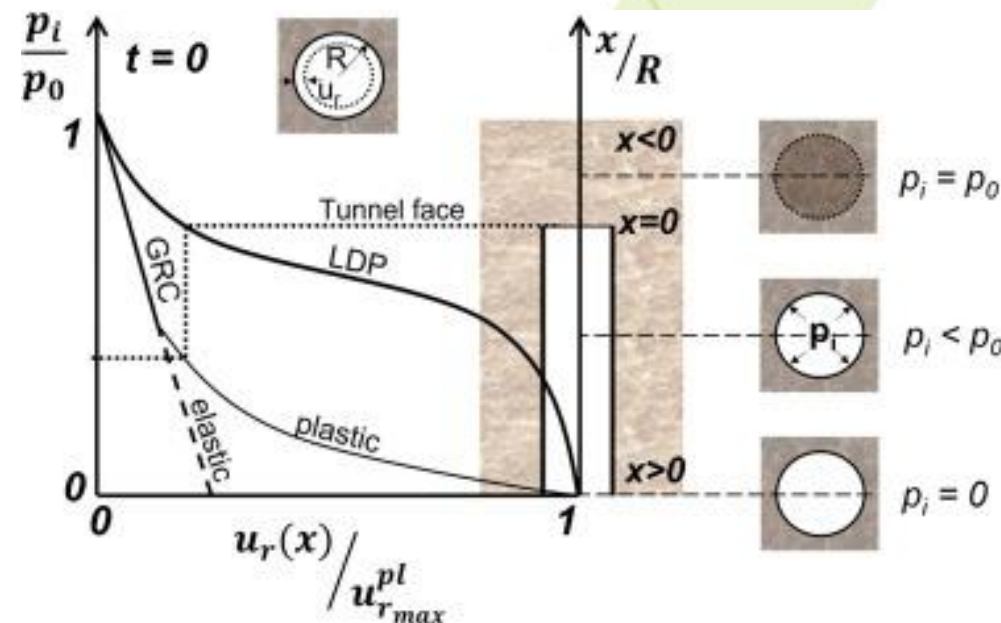
3.3.3 Model II (według Bierbaumera)

Model II (według Bierbaumera) należy przyjmować dla wyrobisk zlokalizowanych w skałach luźnych (gruntach nieskalistych) na głębokości

$$2 \times h_o < H \leq \frac{s_w}{2 \times \lambda \times \tan \phi_g} \quad (18)$$

w którym:

s_w – szerokość wyrobiska w świetle wyłomu, w metrach.



Metody projektowania

Metody analityczne

Wyniki obliczeń metodami analitycznymi wg PN-G-05020 z 1997

Pionowe ciśnienie masywu [kPa]							
		Przekrój					
Metoda	Podstawa	1		2		3	
Model I	PN-G-05020	b.d.	-	450		b.d.	-
Model II Bierbaumera	PN-G-05020	473		b.d.	-	871	
	<i>Geomechanika</i>	595		390		877	
Model III Cymbarewicza	PN-G-05020	459		b.d.	-	b.d.	-
	<i>Geomechanika</i>	66		128		142	
Teoria Aireya	<i>Geomechanika</i>	136		b.d.	-	247	
Z wykorzystaniem RMR	<i>Geomechanika</i>	171		261		247	
ciśnienie spągowe	PN-G-05020	25		b.d.	-	b.d.	-

Praca dyplomowa Szczepanik F., Analiza możliwości zastosowania wybranych metod obliczenia obciążenia na obudowę tunelu drogowego, promotor Stopkowicz A.

PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7 - Projektowanie geotechniczne - Część 1: Zasady ogólne (plus poprawki i erraty).

Zgodnie z zapisami PN-EN 1997-1, rozpatrując stan graniczny zniszczenia bądź nadmiernego odkształcenia elementu konstrukcyjnego lub części podłoża (STR i GEO), należy wykazać, że:

$$E_d \leq R_d \text{ lub } \frac{R_d}{E_d} \geq 1$$

gdzie:

- E_d - wartość obliczeniowa efektu oddziaływań,
- R_d - wartość obliczeniowa oporu granicznego podłoża.

Metody projektowania

Tablica NA.2 – Zestawienie wartości współczynników częściowych przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności (GEO)

			stany graniczne nośności – podejście 2			stateczność ogólna – podejście 3		
			A ₁	M ₁	R ₂	A ₂	M ₂	R ₃
do oddziaływań	stałe	niekorzystne	1,35			1,0		
		korzystne	1,0			1,0		
	zmiennie	niekorzystne	1,5			1,3		
do właściwości gruntu	tan φ			1,0			1,25	
	efektywna spójność			1,0			1,25	
	wytrzymałość bez odpływu			1,0			1,4	
	wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie			1,0			1,4	
	ciężar objętościowy			1,0			1,0	
do oporu gruntu	fundamenty bezpośrednie	wyparcie			1,4			
		poślizg			1,1			
	pale	podstawa			1,1			
		pobocznicą			1,1			
		całkowity opór			1,1			
		wyciąganie			1,15			
	kotwy	tymczasowe			1,1			
		trwale			1,1			
	ściany oporowe	wyparcie			1,4			
		opór ze względu na poślizg			1,1			
		opór graniczny			1,4			
	skarpy	opór graniczny						1,0

6

PN-EN 1997-1:2008/A2:2010

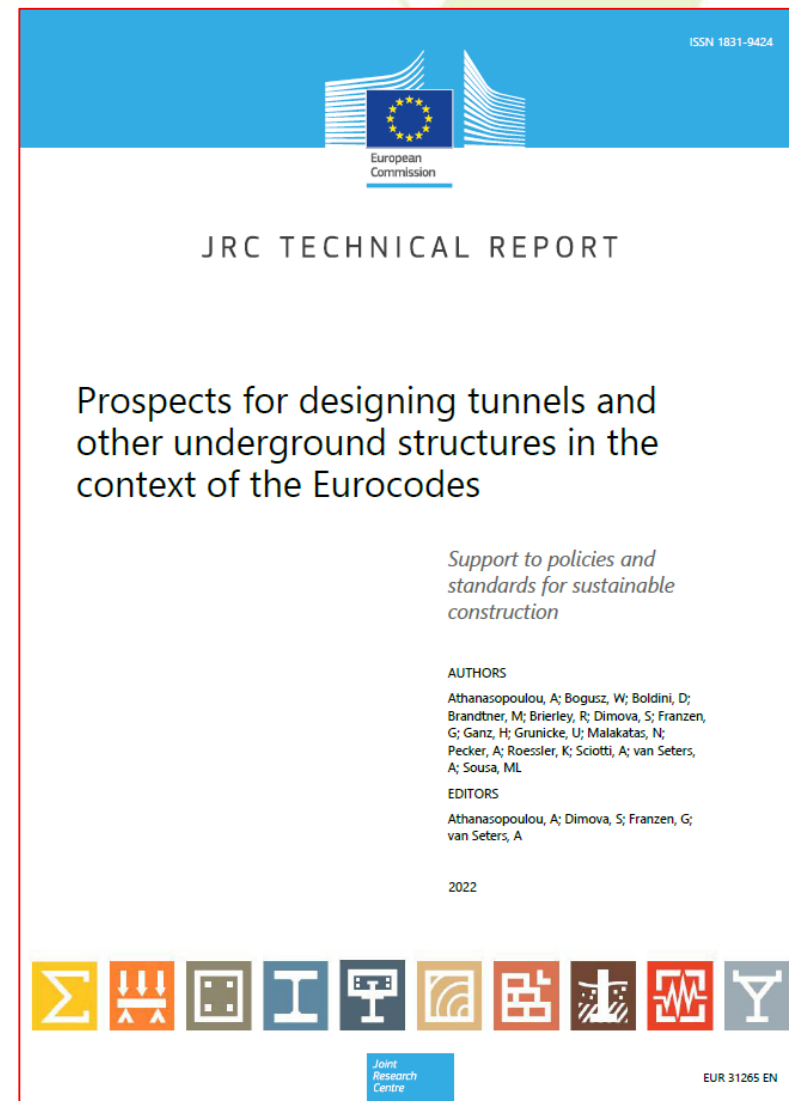
W 2.4.6.2 normy PN-EN 1997 – 1 stwierdza się:
 Uwaga 2 Wartości zalecane w Załączniku A określają poziom bezpieczeństwa odpowiednie dla konwencjonalnych sposobów projektowania.

Rozpoznanie

Wymogi norm i wytycznych branżowych

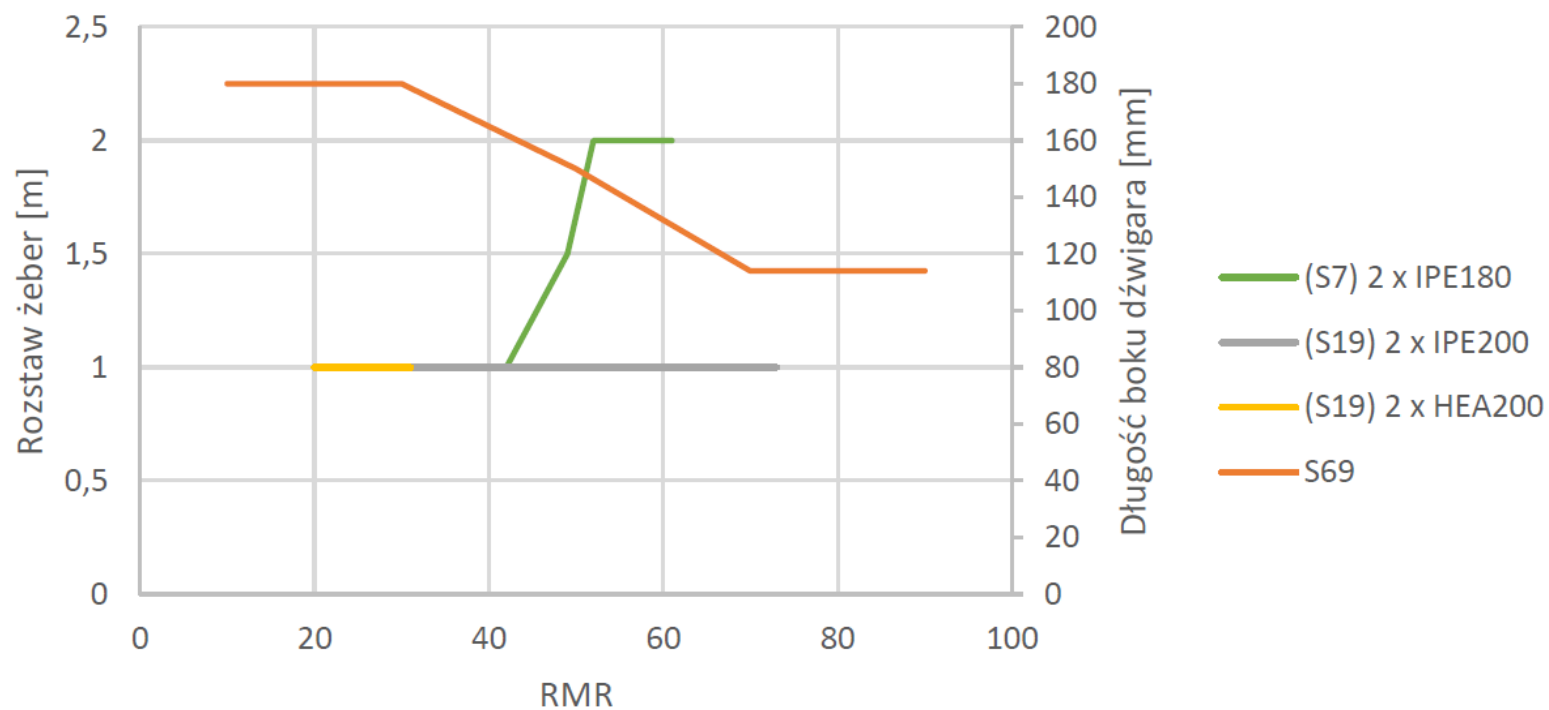
Rekomendacja:

– Stosowanie podejścia hybrydowego:
empirycznego + analitycznego + numerycznego,



Podejścia projektowe

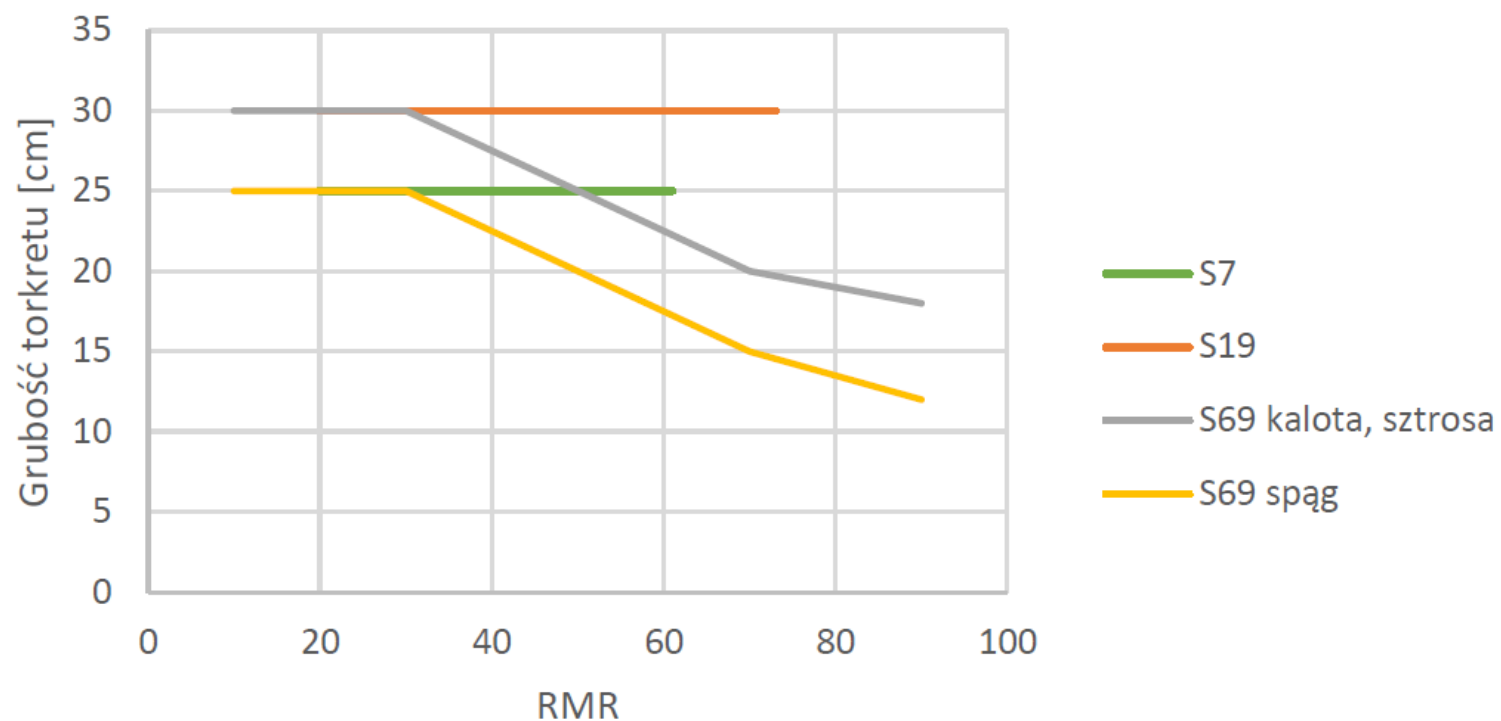
Obudowa wstępna - STAL



Pałka M., 2019, Dobór obudowy tunelu drogowego a jakość fliszowego masywu skalnego na przykładzie wybranych obiektów w Polsce, praca dyplomowa pod kierunkiem dr inż. A. Stopkowicz

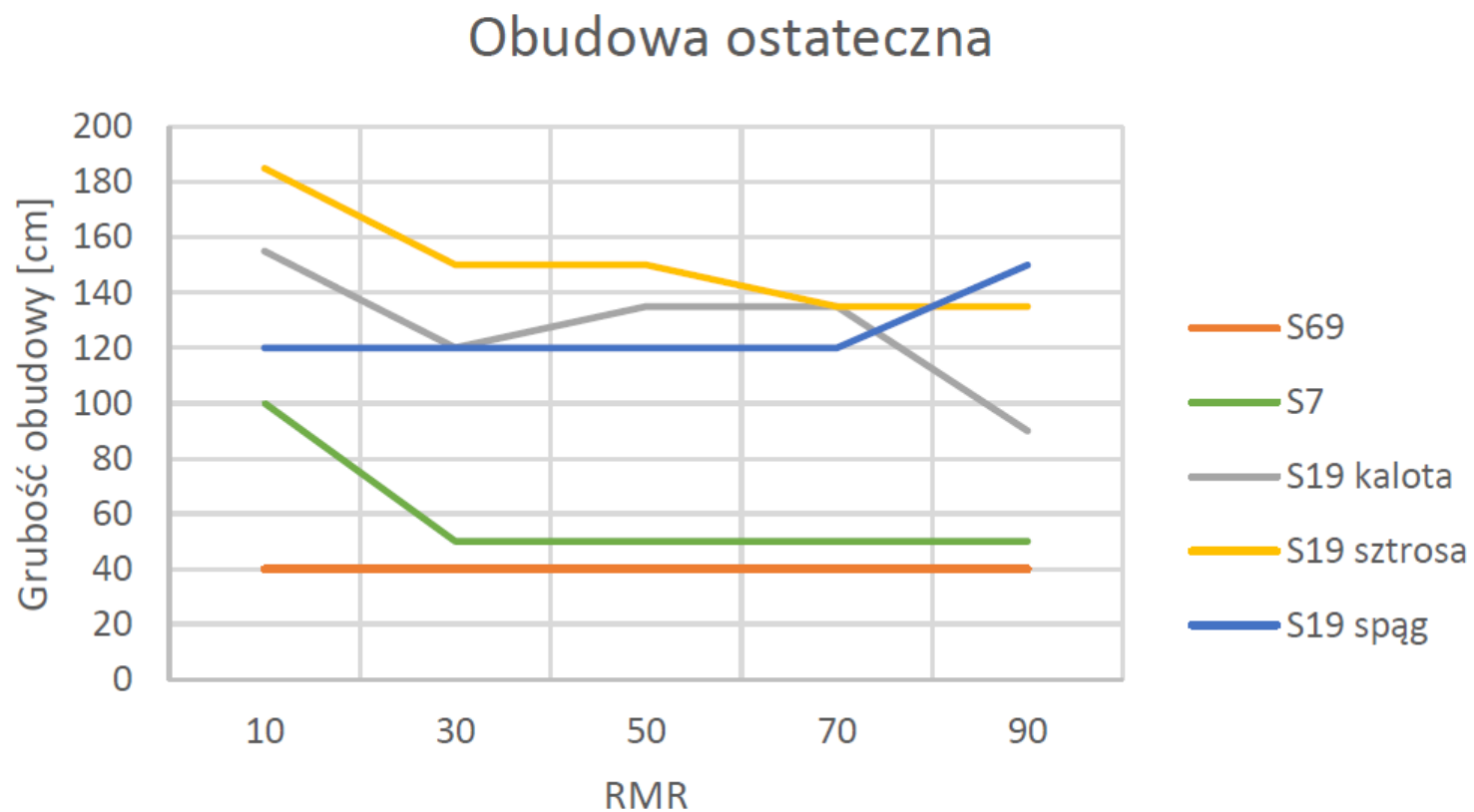
Podejścia projektowe

Obudowa wstępna - TORKRET



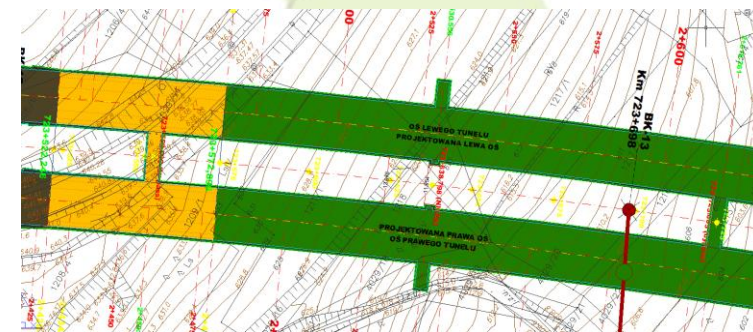
Pałka M., 2019, Dobór obudowy tunelu drogowego a jakość fliszowego masywu skalnego na przykładzie wybranych obiektów w Polsce, praca dyplomowa pod kierunkiem dr inż. A. Stopkowicz

Podejścia projektowe

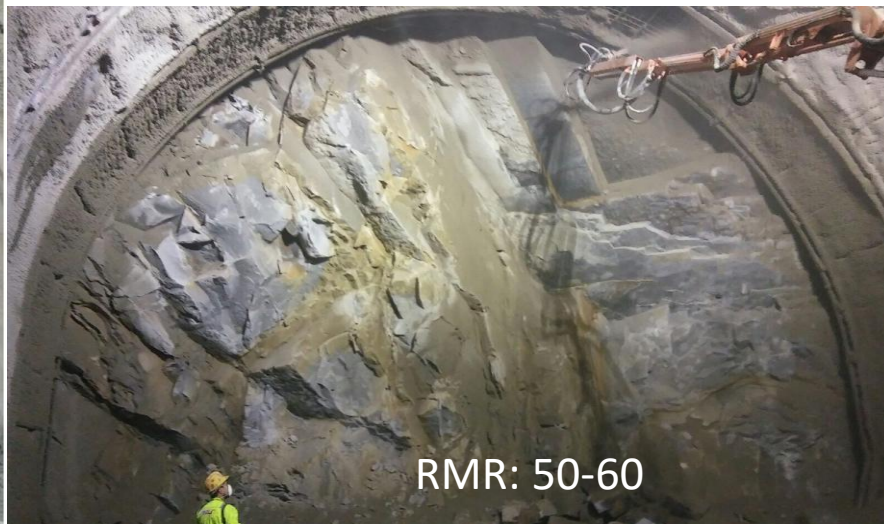


Pałka M., 2019, Dobór obudowy tunelu drogowego a jakość fliszowego masywu skalnego na przykładzie wybranych obiektów w Polsce, praca dyplomowa pod kierunkiem dr inż. A. Stopkowicz

- Sterowania konwergencją (CCM) dla masywu dobrej jakości
- Sterowanie konwergencją + metody numeryczne dla masywu skalnego najslabszego
- Analiza naprężeń dla obudowy ostatecznej



S7 Rabka Lubień



S3 Bolków - Kamienna Góra

Drażenie: NATM

Wymiar wyrobiska: 14.9 x 10.4 m

Filar między nawami: 24 - 32 m

GSI: 25 - 40 (zakres zmienności 0, 5 – 70),

RMRb: 30 - 45, (5, 10 – 75)

Metody projektowania:

- Sterowanie konwergencją + metody numeryczne
- Analiza naprężeń dla obudowy ostatecznej



Rysunek 1. Fig. 1: overview face, serizitic and graphitic schists. Ground types O2 (-O3).



Rysunek 1. Fig. 1: overview face, serizitic and graphitic schists. Ground type O2 and O3. / Przegląd czola przodka, lupek serycytowy i grafitowy. Klasa górotworu O2 / O3.



Rysunek 1. Fig. 1: Overview tunnel face. Alternating layers of conglomerate, sandstone and mudstone. Rock mass faulted and fractured. Ground types predominantly C2, subordinate C3. / Przegląd czola przodka. Naprężenie warstwy zlepieńca, piaskowca i mulowca. Górotwór zaburzony i spękany. Przeważa typ gruntu C2, podrzędnie C3.

Lunchtime lecture series - #49

14 October 2025

Introduction to the new Guideline
«Conventional Tunnelling in Urban Settings»

Working Group 19 **Conventional Tunnelling**

**Guidelines for the Design and
Construction of Conventional
Tunnelling in Urban Setting
(Final – Pre-Print)**

April 2025



Proposed alignment of the new Hudson River Tunnel and approach structures as well as the location of the existing tunnel. (Courtesy of GDC)

The Gateway Program: The Hudson Tunnel Project

- Głównie cele:
 - Budowa dwóch nowych tuneli pod rzeką Hudson (New Jersey ⇌ Manhattan)
 - Modernizacja i naprawa istniejących tuneli Amtrak (North River Tunnels)
- **Długość nowych tuneli:** ok. **2,4 mile (3,9 km)** każdy
- Tunele będą przeznaczone dla **kolei pasażerskiej** – głównie Amtrak i NJ Transit.
- Projekt składa się z kilku kontraktów, m.in.:
 - **Package 1A** – prace w New Jersey (Portale, TBM)
 - **Package 1B – Manhattan Tunnel** (z odcinkami SEM)
 - **Package 1C** – wyjście tunelu na stacji Penn Station New York

Location: New Jersey – New York

Date: Ongoing

Structure: Railway Tunnels, Shafts, Bridges, Viaduct, Service Buildings

Length: Total: 4.5 mi (7.2 km);
Tunnels: 2.5 mi (4 km)

Cross-Section: 25 ft (7.6 m) finished ID

Geology: Palisades Diabase, Soft Soil, Manhattan Schist

Cost: \$10 Billion (estimate)

Client: Hill International

Owner: AMTRAK

Lokalizacja tuneli drążonych metodami górniczymi (Sekwencyjne drążenie SEM)

Tunele drążone po stronie Manhattanu, w ramach Package 1B (Manhattan Tunnel)

- Dotyczy fragmentów tunelu przebiegających:

- pod West 30th Street
- w rejonie 12th Avenue
- oraz przez strukturę tzw. **Bulkhead** (nadbrzeżna konstrukcja Manhattan Waterfront)

- **Długość odcinków SEM:** ok. ~800 feet (ok. 240 m) na każdy z dwóch tuneli (łącznie ok. 480 m)

- Tunel drążony w układzie **bliźniaczym** (twin tunnels), każdy o średnicy wewnętrznej ok. ~23 ft (7 m)

- **Wyprzedzająco mrożenie poziome gruntu, wyprzedzająco jet grouting**

- Obudowa tuneli: wstępna z torkretu + kotwy + łuki stalowe (zgodnie z zasadami SEM/NATM)

- Warstwy geologiczne:

- **Historic Fill** (nasypy),
- **gliny rzeczne i morskie** (marine silts),
- fragmenty litej skały metamorficznej – **Manhattan Schist**

- Obszar SEM znajduje się na granicy strefy gruntowej i skalnej – wymaga etapowego, starannie monitorowanego drążenia.

Bliskość infrastruktury miejskiej i historycznej (np. linie kanalizacyjne NYCDEP, fundamenty Bulkhead)

Ograniczona głębokość przykrycia → brak możliwości użycia TBM

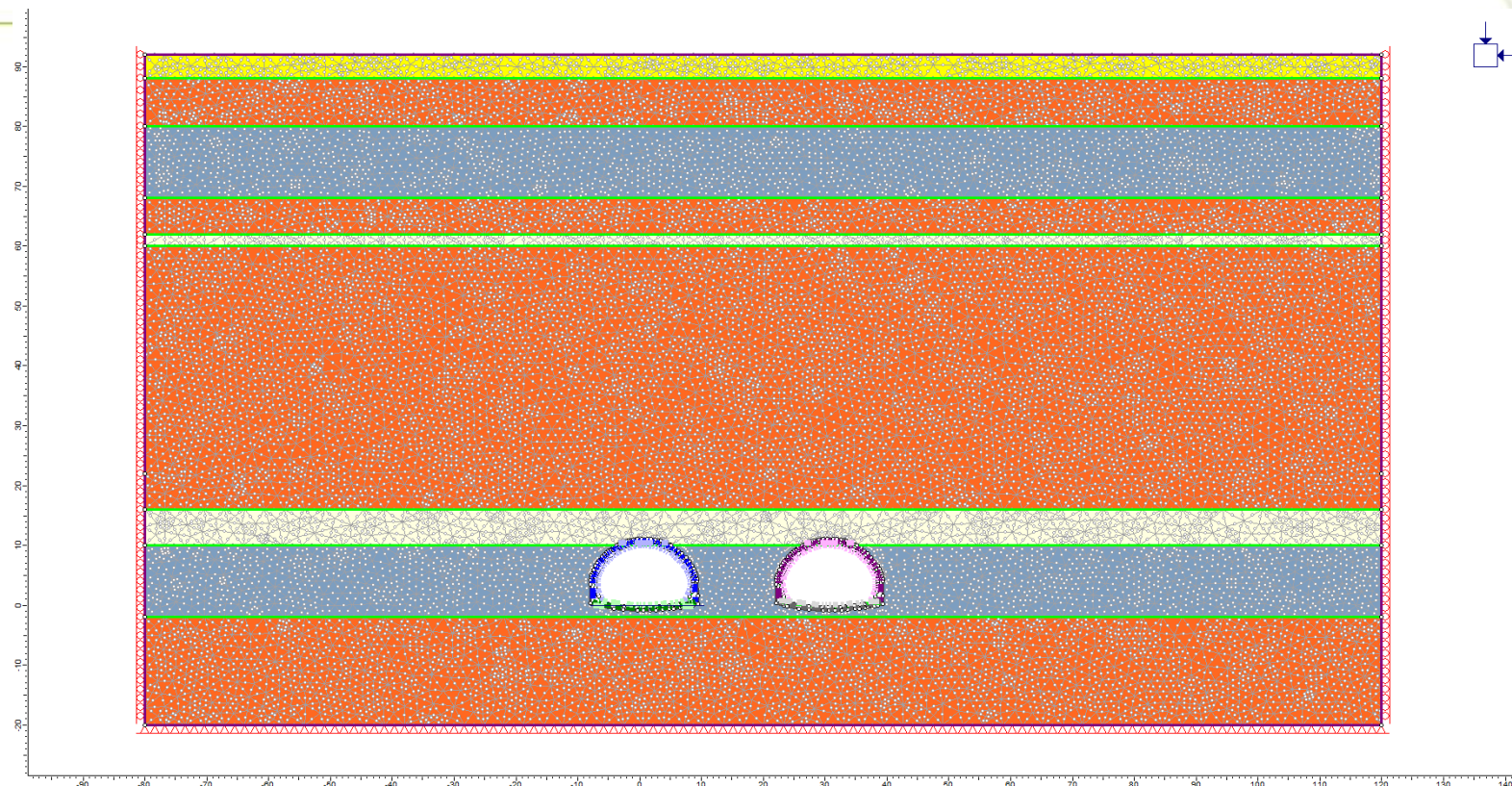
Wysoki poziom wód gruntowych i nasypów – SEM umożliwia kontrolę deformacji i ciśnienia gruntu

Monitoring i bezpieczeństwo

Zastosowano pełny system monitoringu przemieszczeń powierzchniowych, deformacji obudowy, ciśnienia porowego.

Podejście obserwacyjne (observational method) – na bieżąco dopasowywane parametry drążenia i stabilizacji.

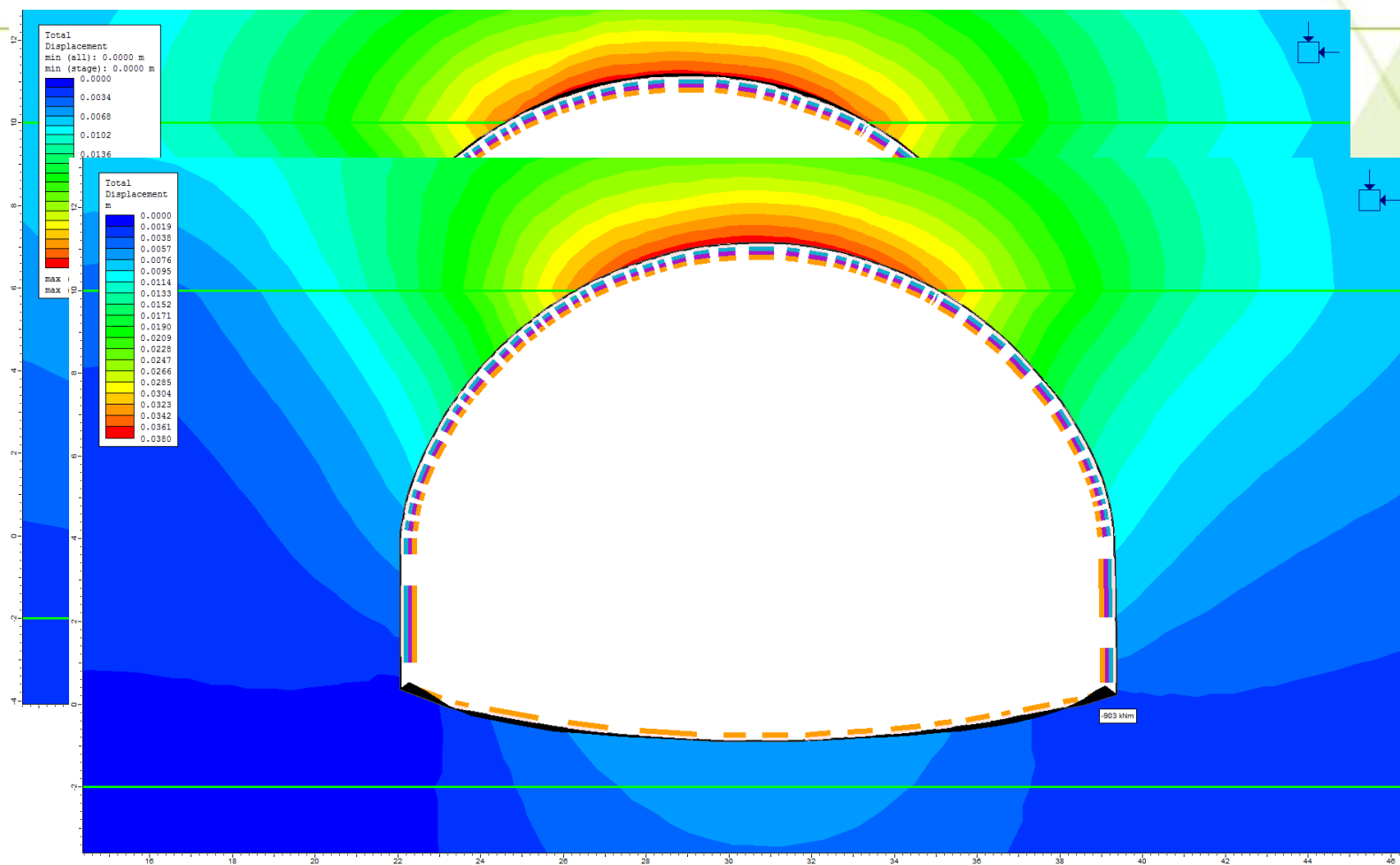
OBLICZENIE OBUDOWY OSTATECZNEJ TUNELU MAŁY LUBIEŃ DLA ODCINKÓW TYPU 3



Material Name	Color	Initial Element Loading	Unit Weight (kN/m ³)	Elastic Type	Young's Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Tensile Strength (kPa)	Tensile Strength (res) (kPa)	Dilation Angle (deg)	Friction Angle (peak) (deg)	Friction Angle (res) (deg)	Cohesion (peak) (kPa)	Cohesion (res) (kPa)	Jointed?	Piezo Line	Ru
Koluwium	Yellow	Field Stress and Body Force	19	Isotropic	20000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	0	23	23	15	15	No	None	0
Piaskowiec 3B	Blue	Field Stress and Body Force	24	Isotropic	3e+006	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	0	52	52	430	430	No	None	0
Kompleks piaskowcowo-lupkowy 4C	Orange	Field Stress and Body Force	24	Isotropic	3e+006	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	0	44	44	300	300	No	None	0
Lupki 5D	Light Green	Field Stress and Body Force	23	Isotropic	300000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	0	30	30	120	120	No	None	0

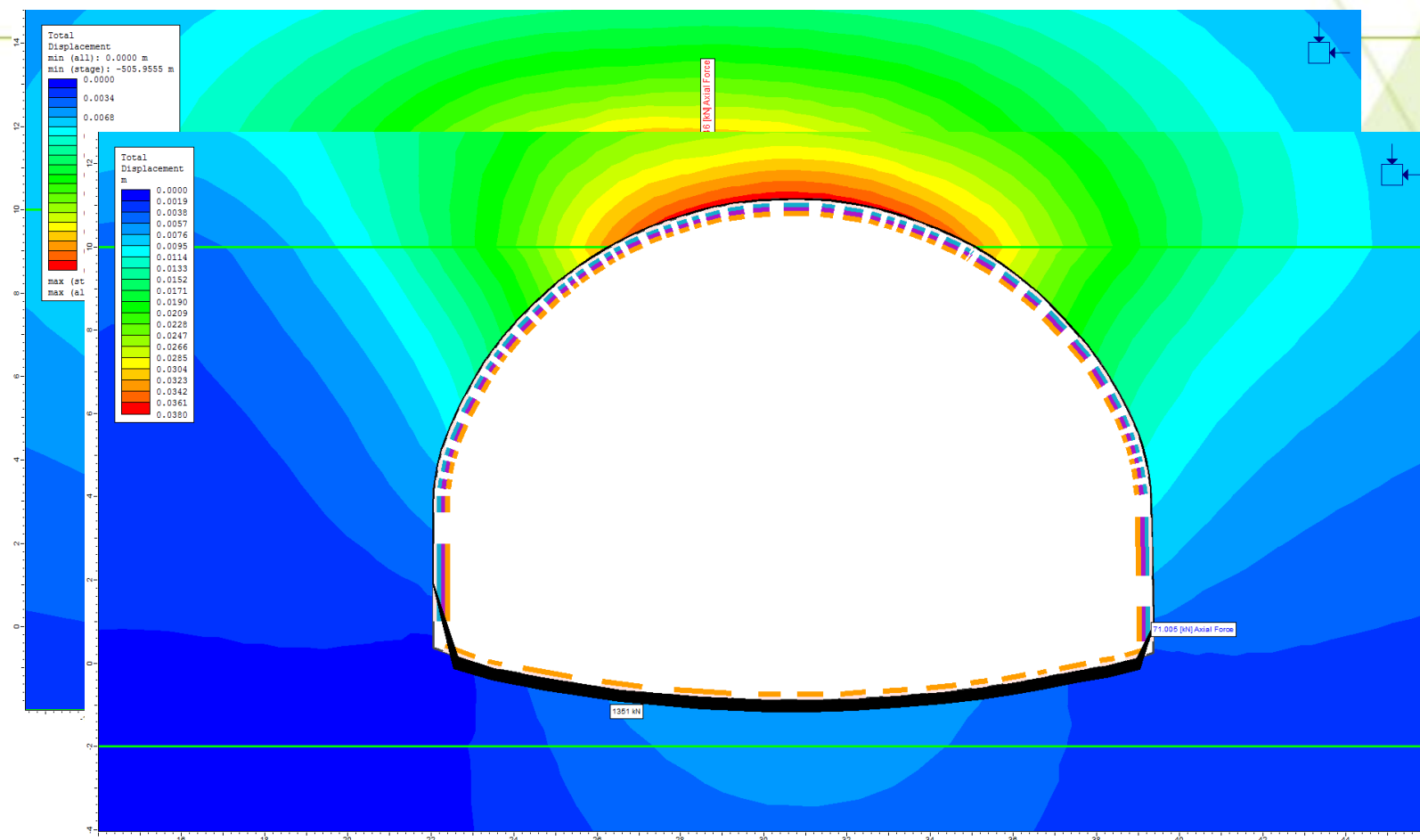
Przyjęty model numeryczny do obliczeń obudowy typu 3

OBLICZENIE OBUDOWY OSTATECZNEJ TUNELU MAŁY LUBIEŃ DLA ODCINKÓW TYPU 3



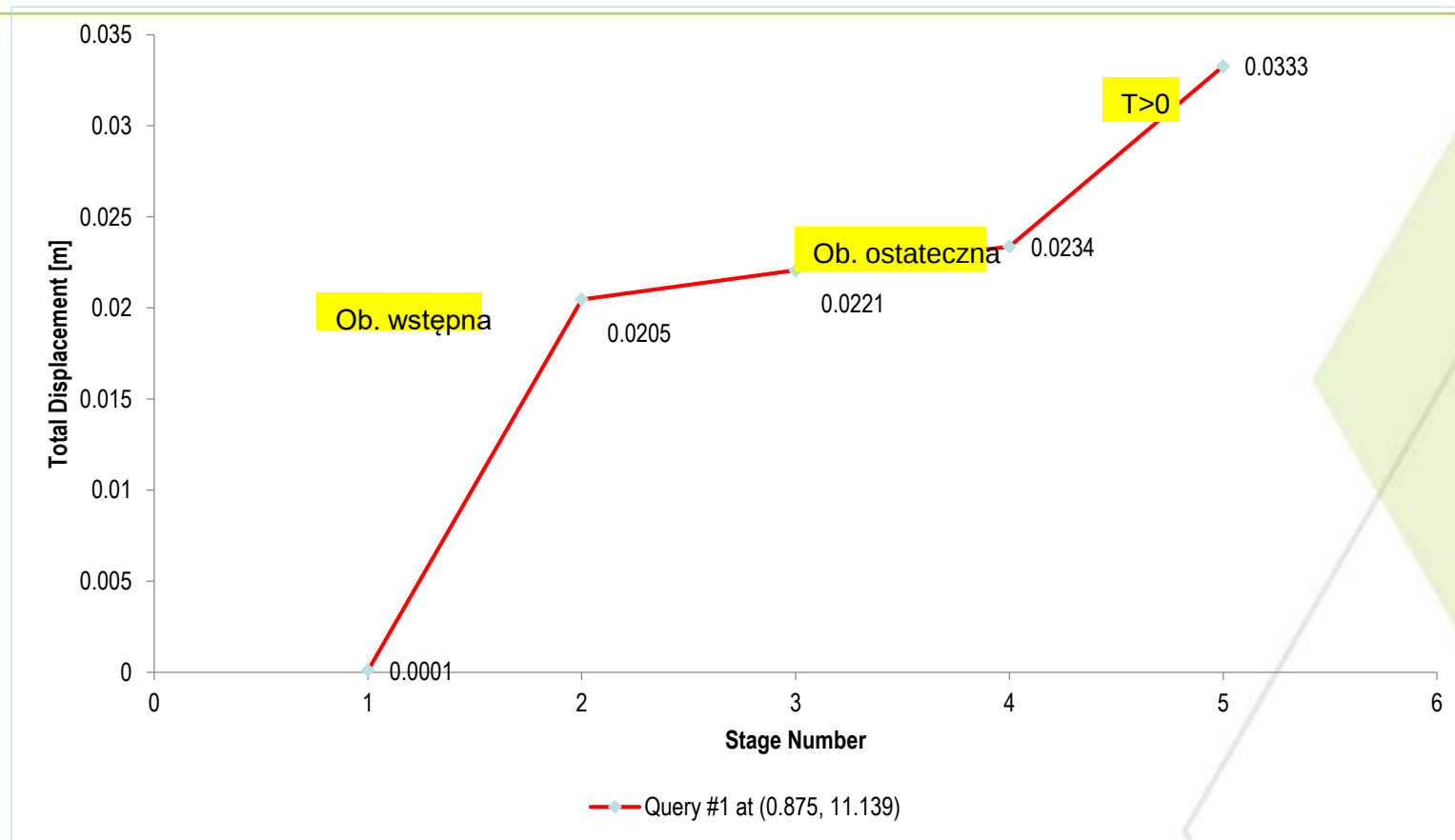
*Momenty gnące w obudowie ostatecznej dla
odcinka typu 3 – wykonane dwie nitki tunelu*

OBLICZENIE OBUDOWY OSTATECZNEJ TUNELU MAŁY LUBIEŃ DLA ODCINKÓW TYPU 3



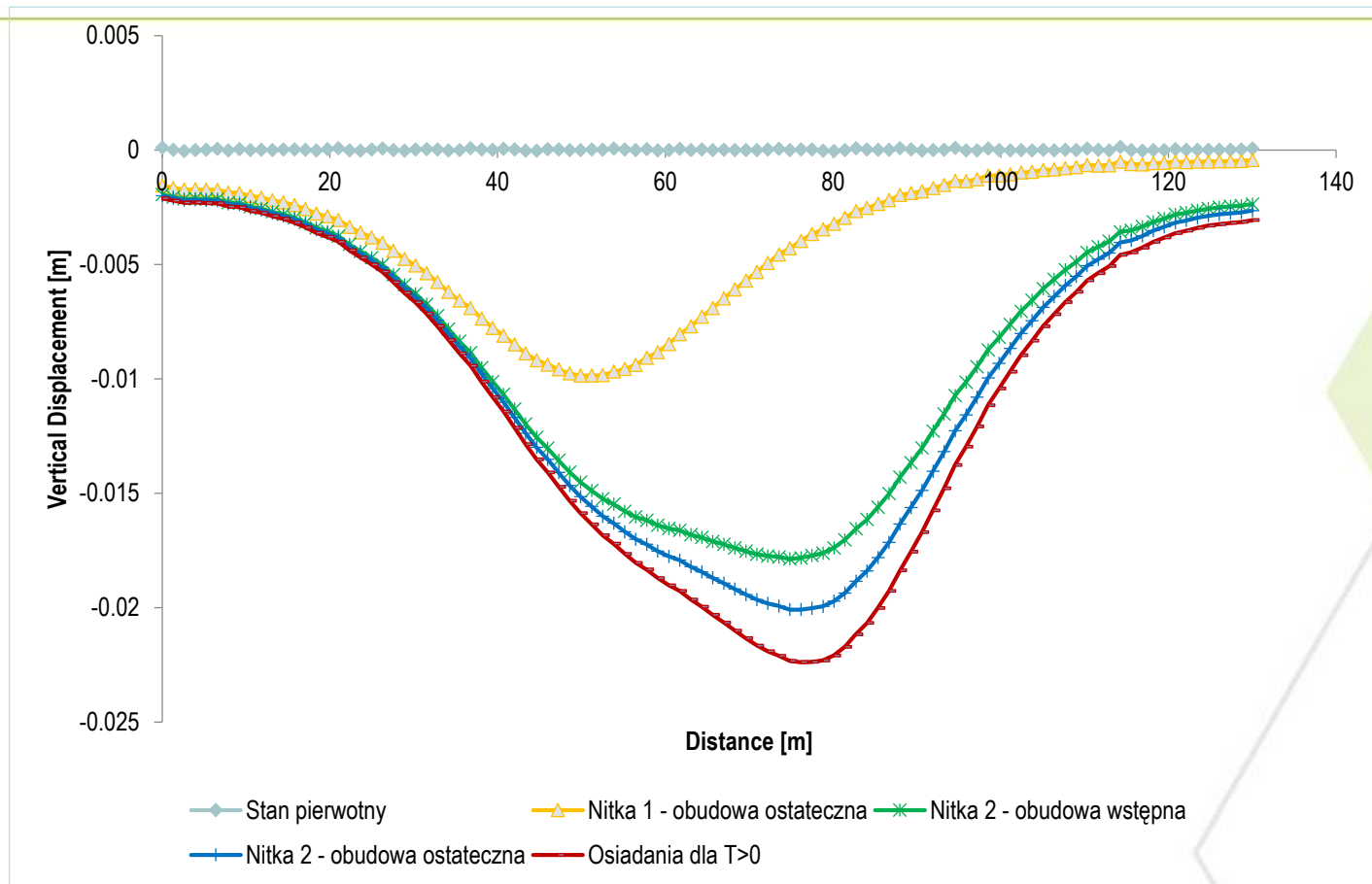
*Siły osiowe w obudowie ostatecznej dla odcinka typu 3
wykonane dwie nitki tunelu*

OBLICZENIE OBUDOWY OSTATECZNEJ TUNELU MAŁY LUBIEŃ DLA ODCINKÓW TYPU 3

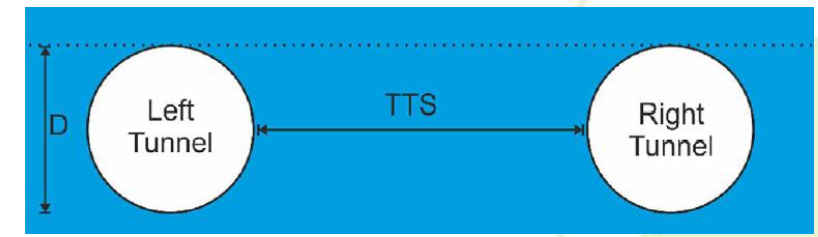


*Przemieszczenia odwzorowane dla
poszczególnych etapów instalacji obudowy*

OBLICZENIE OBUDOWY OSTATECZNEJ TUNELU MAŁY LUBIEŃ DLA ODCINKÓW TYPU 3



Osiadania na powierzchni terenu dla modelu uwzględniającego dwie nitki tunelu (odcinek typu SP, nadkład 20 m)

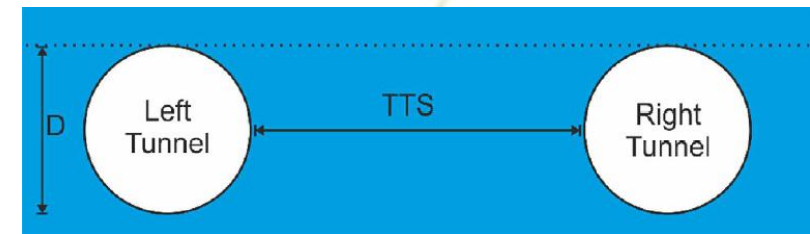


1. Zakres strefy oddziaływania (ground disturbance zone)

- Tunele drążony TBM powoduje redystrybucję naprężeń i powstanie strefy osiadań o szerokości ok. $2-3D$.
- Jeżeli dwa tunele są zlokalizowane w odległości $< 1D$, ich strefy oddziaływania nakładają się w pełni, co skutkuje:
 - zwiększonymi przemieszczeniami pionowymi (osiadanie gruntu),
 - niestatecznością ośrodka gruntu / masywu skalnego między tunelami,
 - ryzykiem nadmiernych sił na obudowie tunelu drugiego drążonego.

2. Zjawisko „tunnel-tunnel interaction” - Interakcja między tunelami prowadzi do:

- zmniejszenia nośności gruntu pomiędzy nimi (wąski filar geotechniczny ulega zmiękczeniu),
- wzrostu deformacji obudowy drugiego tunelu (drążonego później),
- potencjalnego efektu "ground heaving" (wyparcie gruntu do góry) w tunelu pierwszym.
- Modele numeryczne (np. FLAC3D, PLAXIS 3D) pokazują, że bezpieczna odległość to min. $1.5D-2.0D$ przy gruntach słabych (piaski, iły).



3. Doświadczenia praktyczne

- Metro Dubaj: min. $1.5D$ między tunelami TBM.
- Metro Londyn (Crossrail): zachowano $>2D$, mimo bardzo dobrych gruntów (London Clay).
- Chiny – Normy GB 50021-2009: przy tunelach w układzie równoległym zaleca się $>1.5D$ – $2D$ w zależności od typu gruntu i głębokości.
- Rekomendacje ITA-AITES: jeśli $D < 2.5$ m, minimalna odległość to $1.5D$; dla $D > 6$ m — minimum $2.0D$.

4. Bezpieczeństwo obudowy (lining integrity), zbyt mała odległość może prowadzić do:

- przekroczenia dopuszczalnych odkształceń segmentów obudowy,
- pęknięcia segmentów,
- nieszczelności na styku i utraty szczelności wodnej.

5. Doświadczenia górnicze:

- Górnictwo węgla kamiennego – min $1W$,
- Górnictwo rudne – min $1-1.5 W$, wyrobiska kapitalne - ponad $2W$.

The Investigation of Twin Tunnel Stability: Effect of Spacing and Diameter

Rajesh Singh^{1*}, T. N. Singh² and R. K. Bajpai³

Modele 3D FEM w litej skale granitowej (ABAQUS)

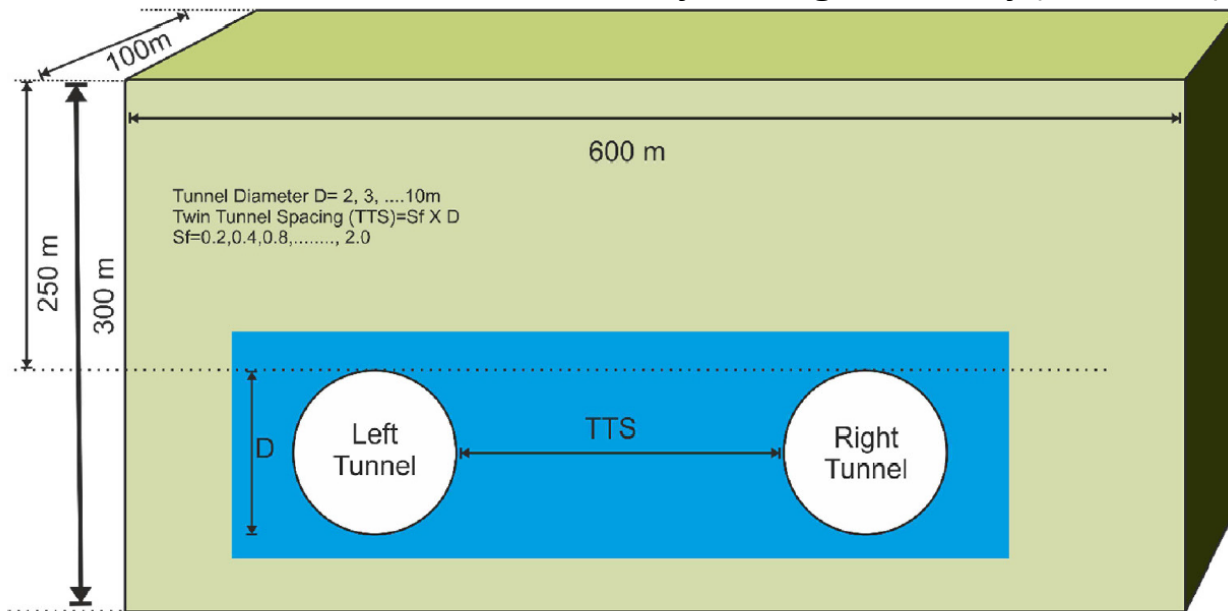


Fig.1. Geometry used in twin tunnel simulation (Not to scale)

- Optymalna szerokość filara: $S_f \geq 0.8$
- Mniejsze S_f powoduje łączenie się stref plastycznych i wzrost przemieszczeń

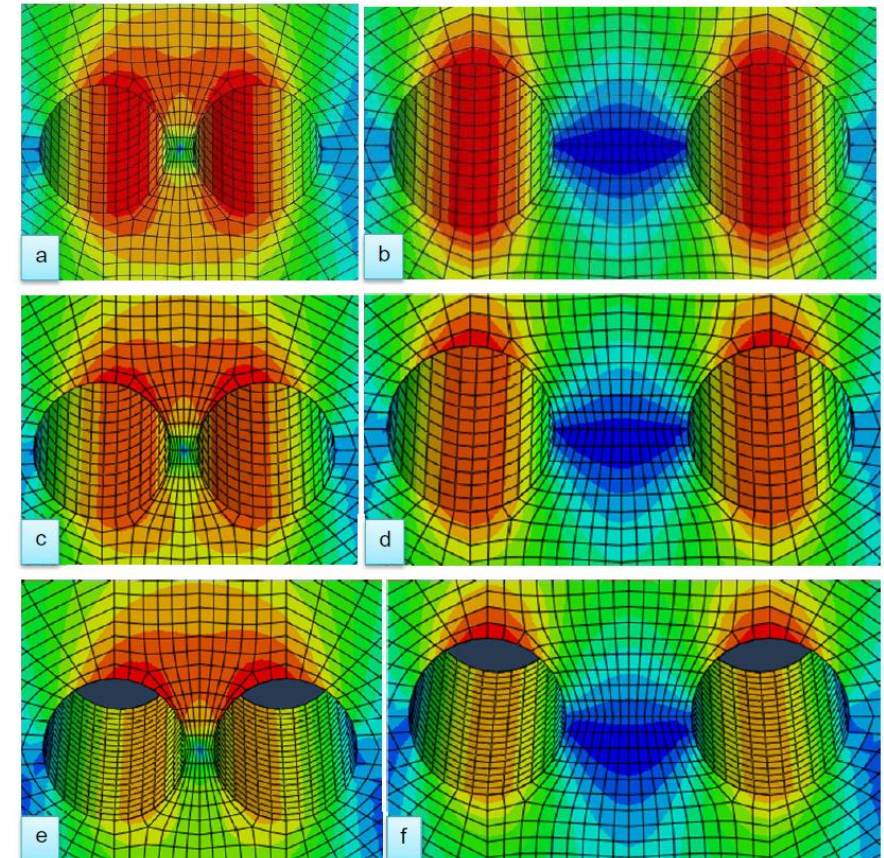
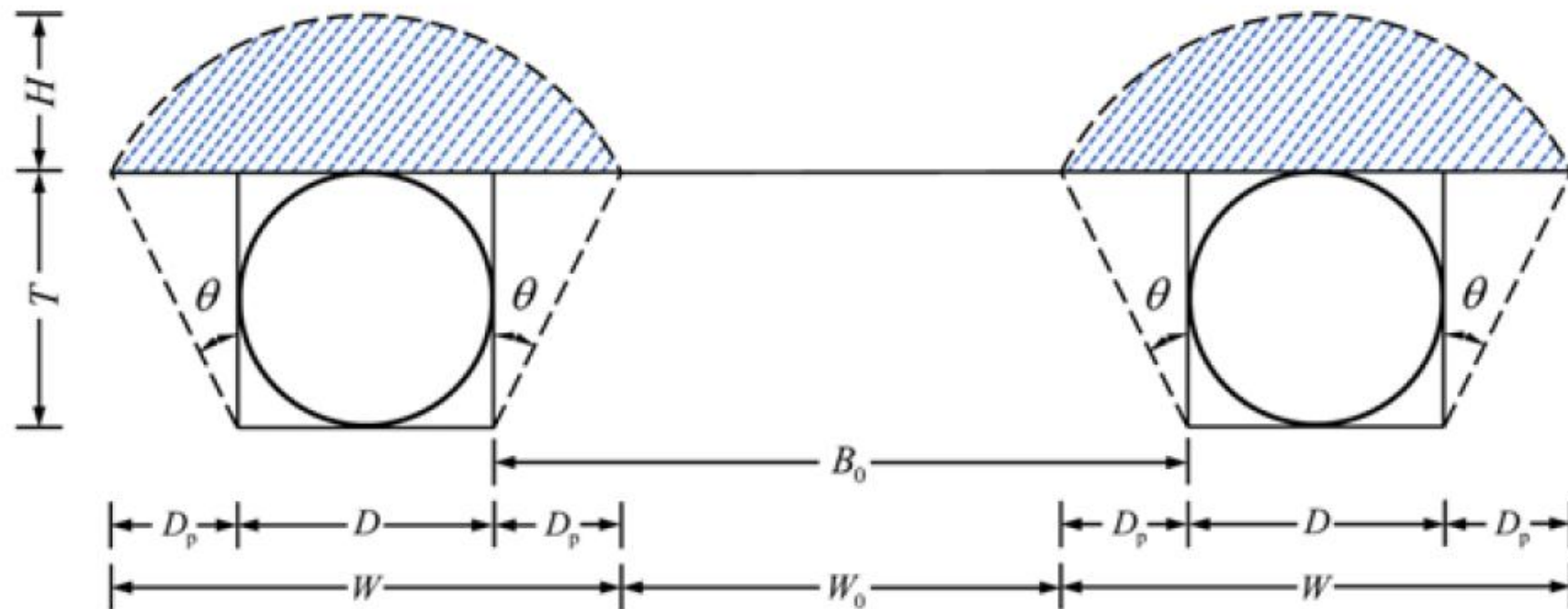


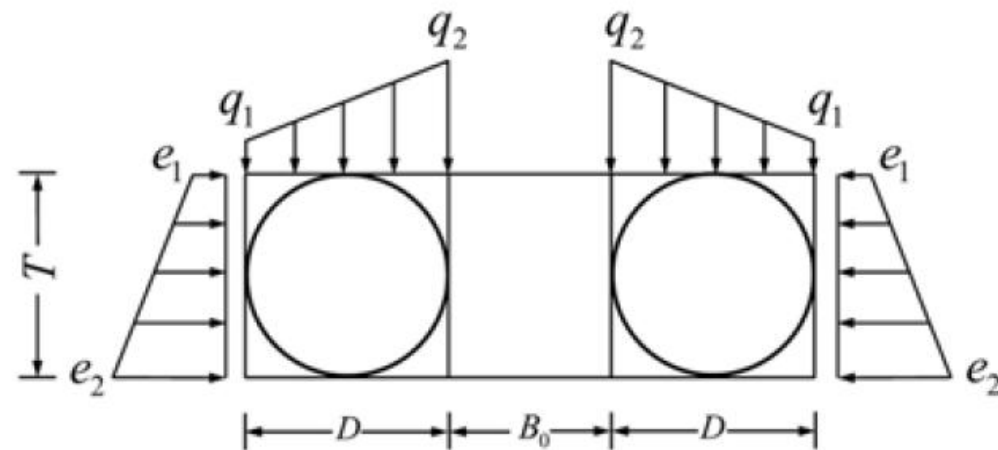
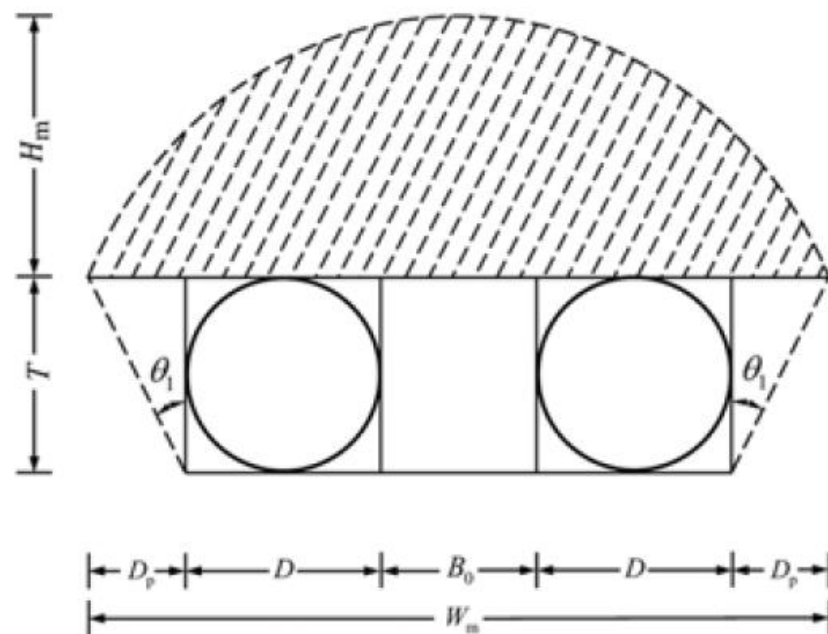
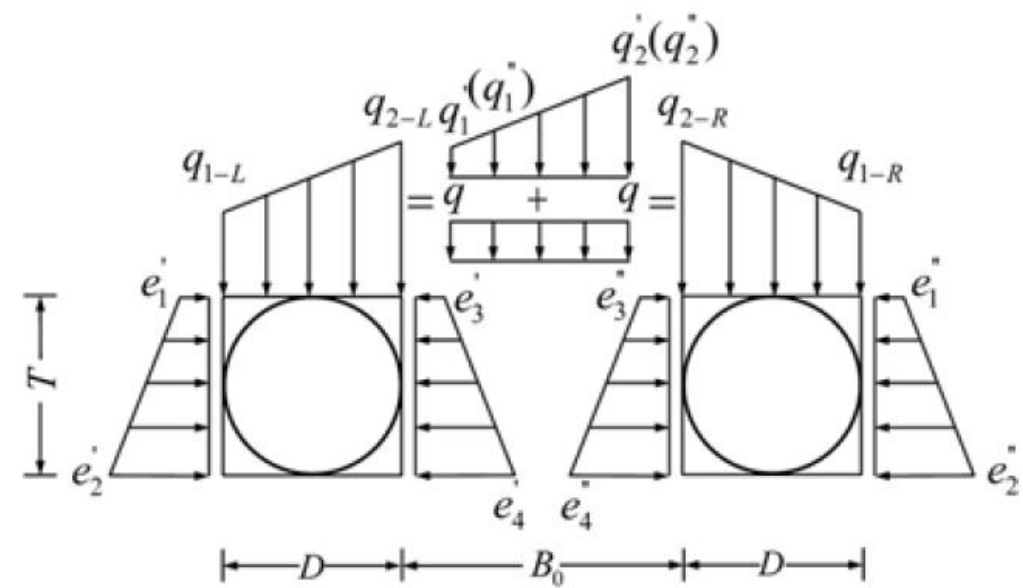
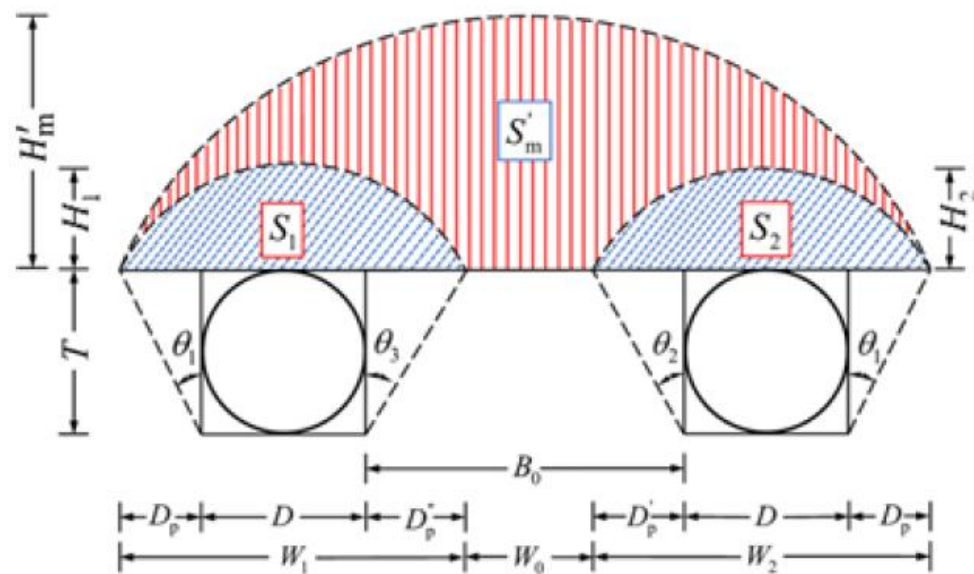
Fig.6. The effect of spacing on the deformation (a) Total displacement $d=2m$, $S_f=0.2$ (b) Total displacement $d=2m$, $S_f=0.8$ (c) Total displacement $d=5m$, $S_f=0.2$ (d) Total displacement $d=5m$, $S_f=0.8$ (e) Total displacement $d=10m$, $S_f=0.2$ (f) Total displacement $d=10m$, $S_f=0.8$



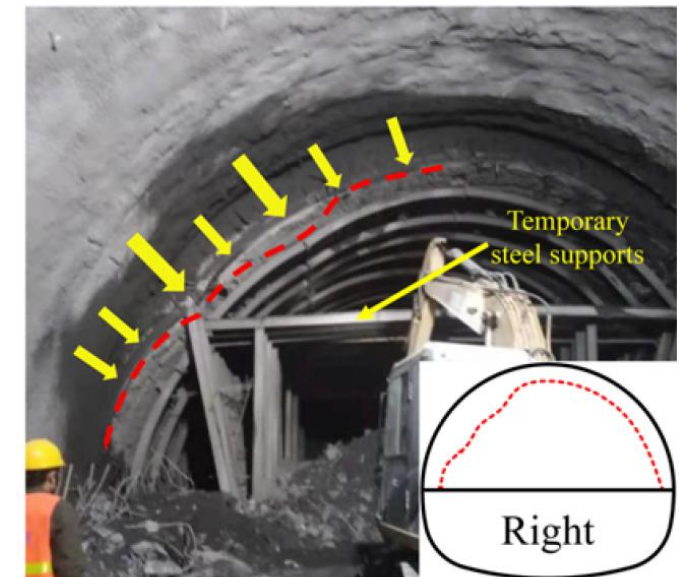
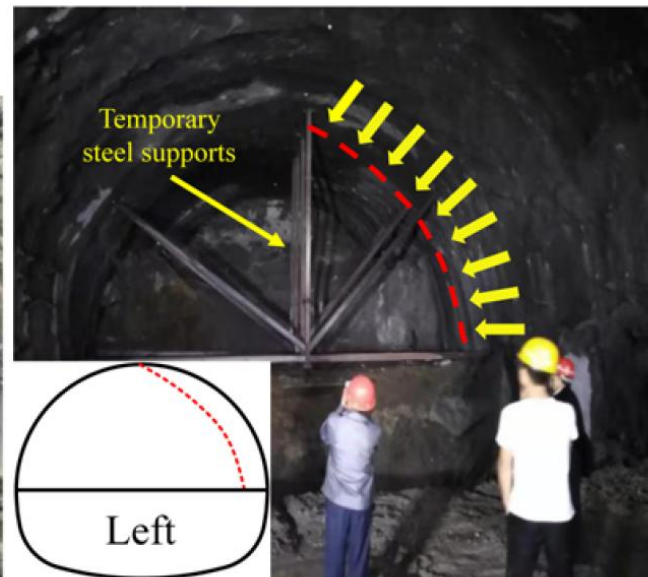
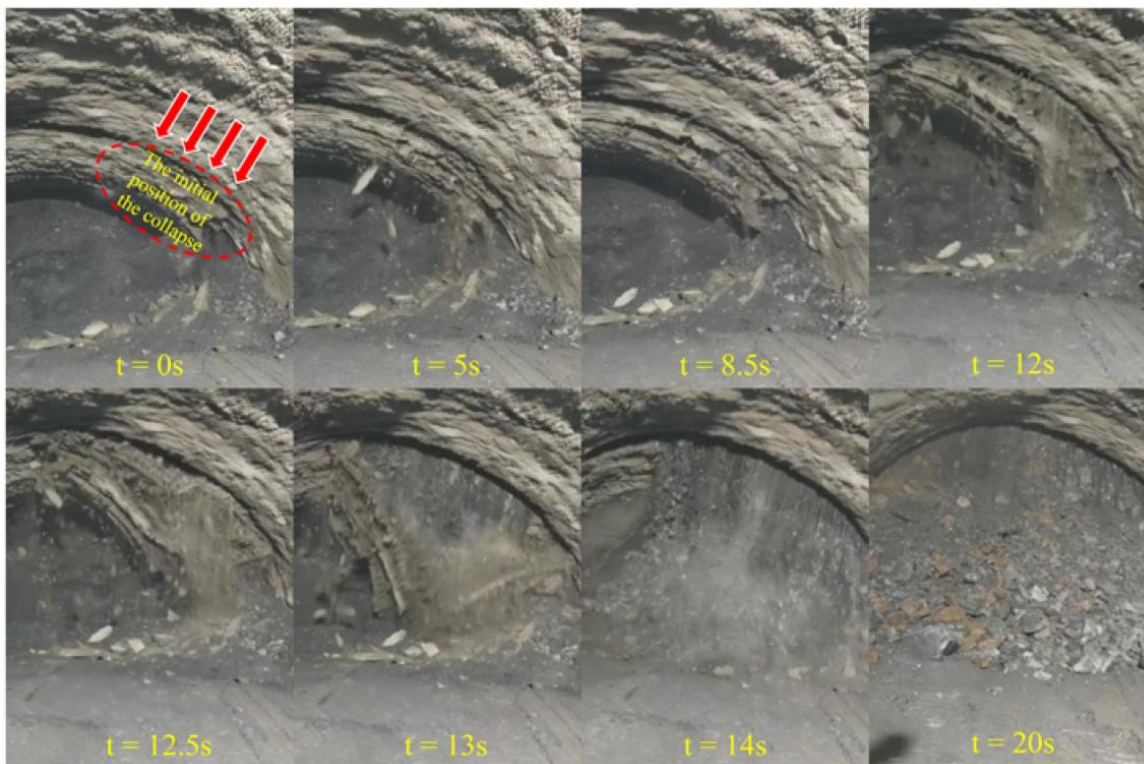
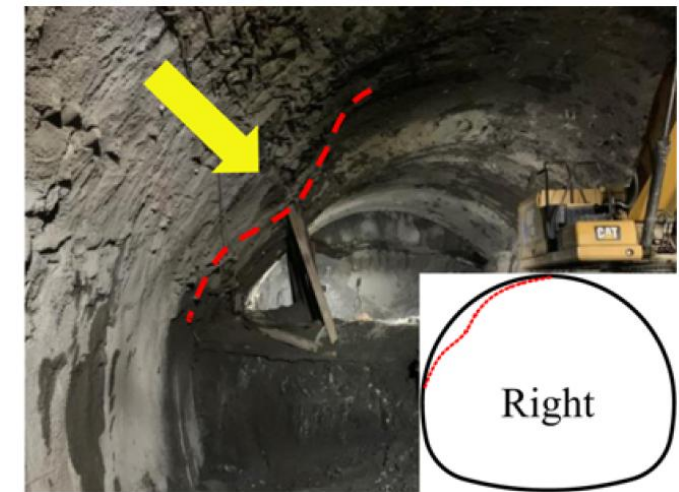
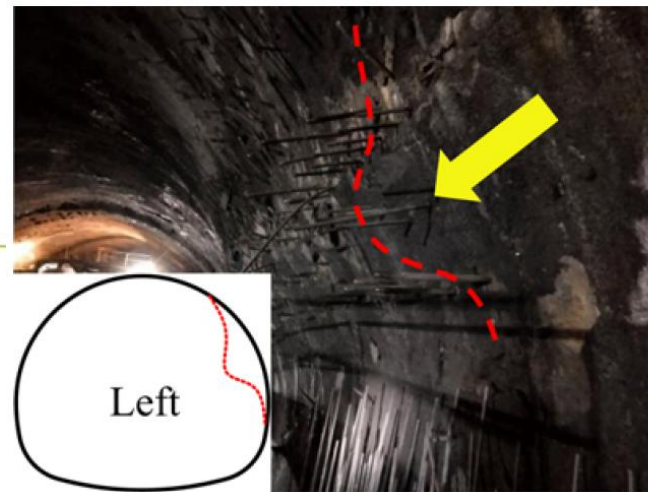
Discussion on Reasonable Clear Spacing of Twin-Tunnels in Weak Surrounding Rock: Analytical Solution and Numerical Analysis

Fangyin Wu^{1a}, Chuan He^a, Hao Kou^{1a}, Bo Wang^{1a}, Wei Meng^{1a}, Hailong Meng^b, and Deping Guo^{1c}



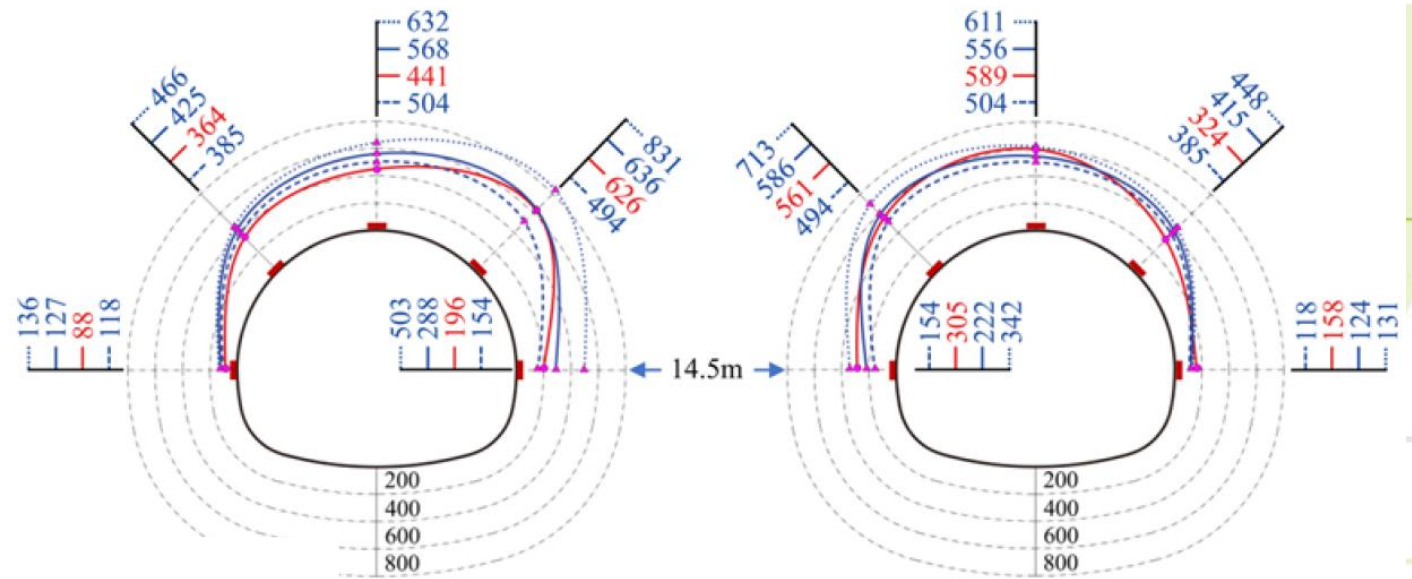
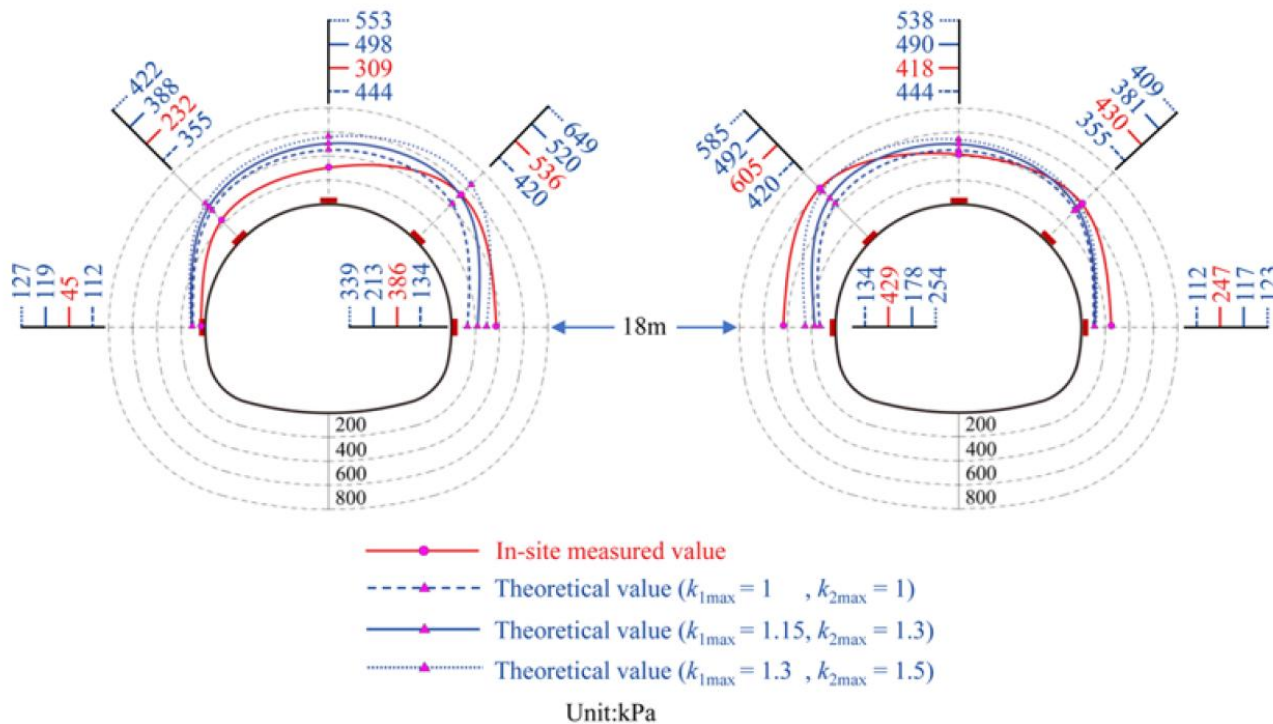


Discussion on Reasonable Clear Spacing of Twin-Tunnels in Weak Surrounding Rock: Analytical Solution and Numerical Analysis



Discussion on Reasonable Clear Spacing of Twin-Tunnels in Weak Surrounding Rock: Analytical Solution and Numerical Analysis

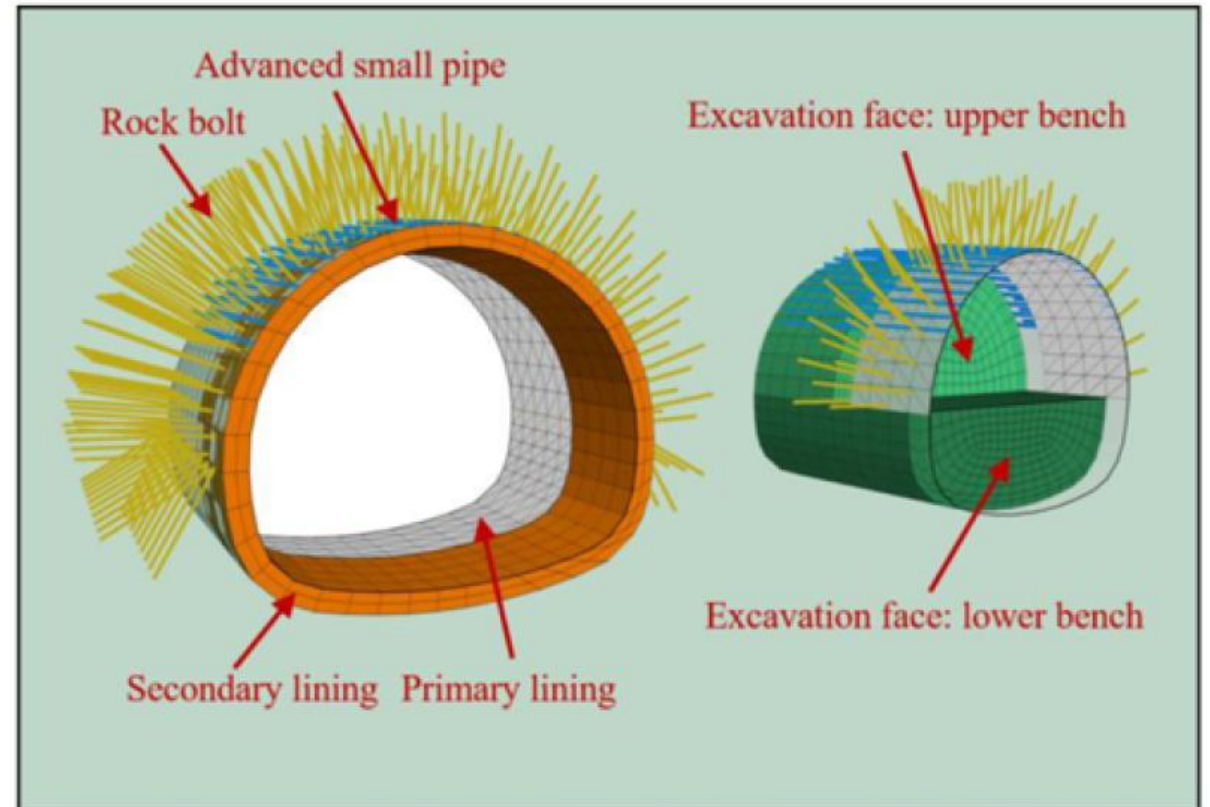
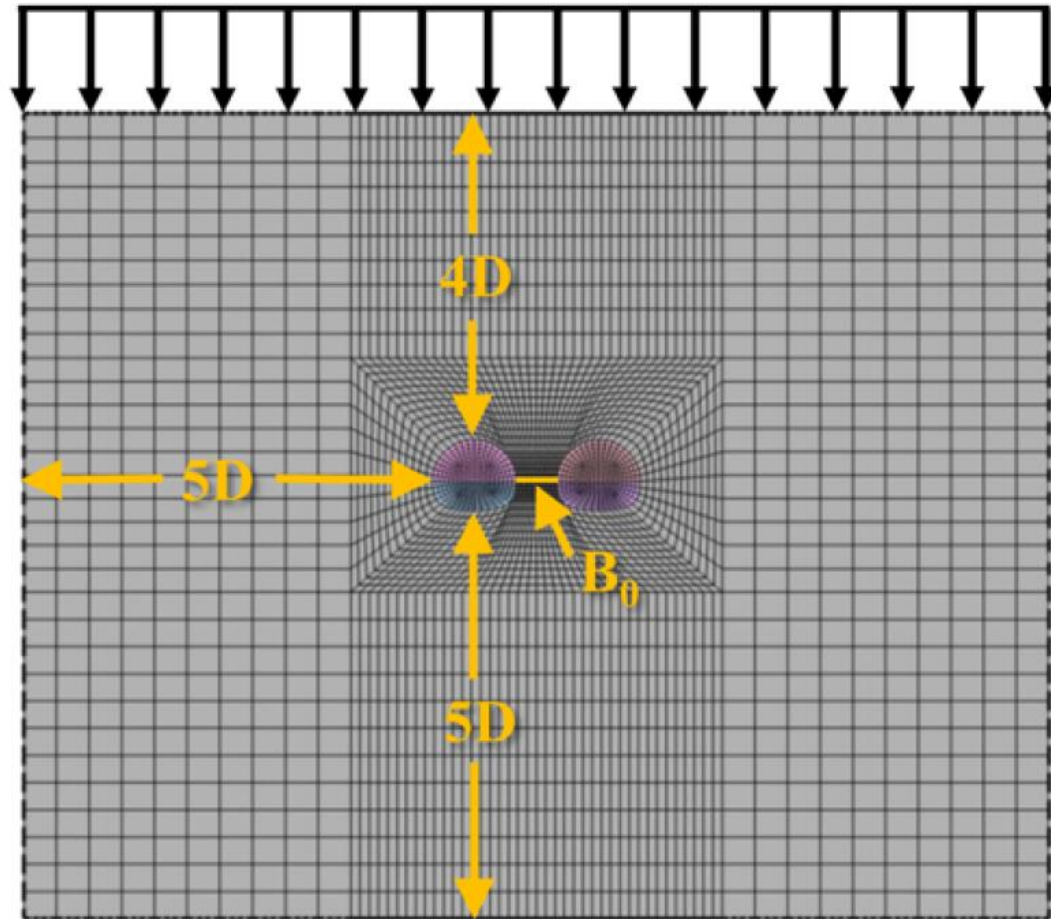
(a)



- In-site measured value
- - -▲- Theoretical value ($k_{1max} = 1$, $k_{2max} = 1$)
- ▲— Theoretical value ($k_{1max} = 1.15$, $k_{2max} = 1.3$)
- ...▲... Theoretical value ($k_{1max} = 1.3$, $k_{2max} = 1.5$)

Unit:kPa

Discussion on Reasonable Clear Spacing of Twin-Tunnels in Weak Surrounding Rock: Analytical Solution and Numerical Analysis



Discussion on Reasonable Clear Spacing of Twin-Tunnels in Weak Surrounding Rock: Analytical Solution and Numerical Analysis

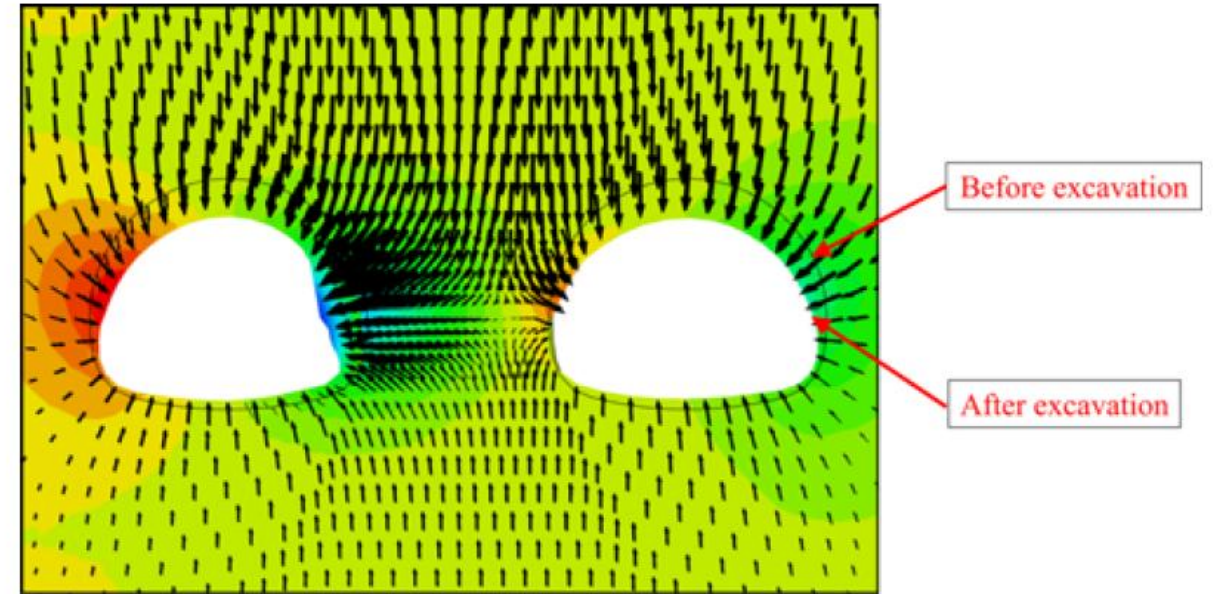
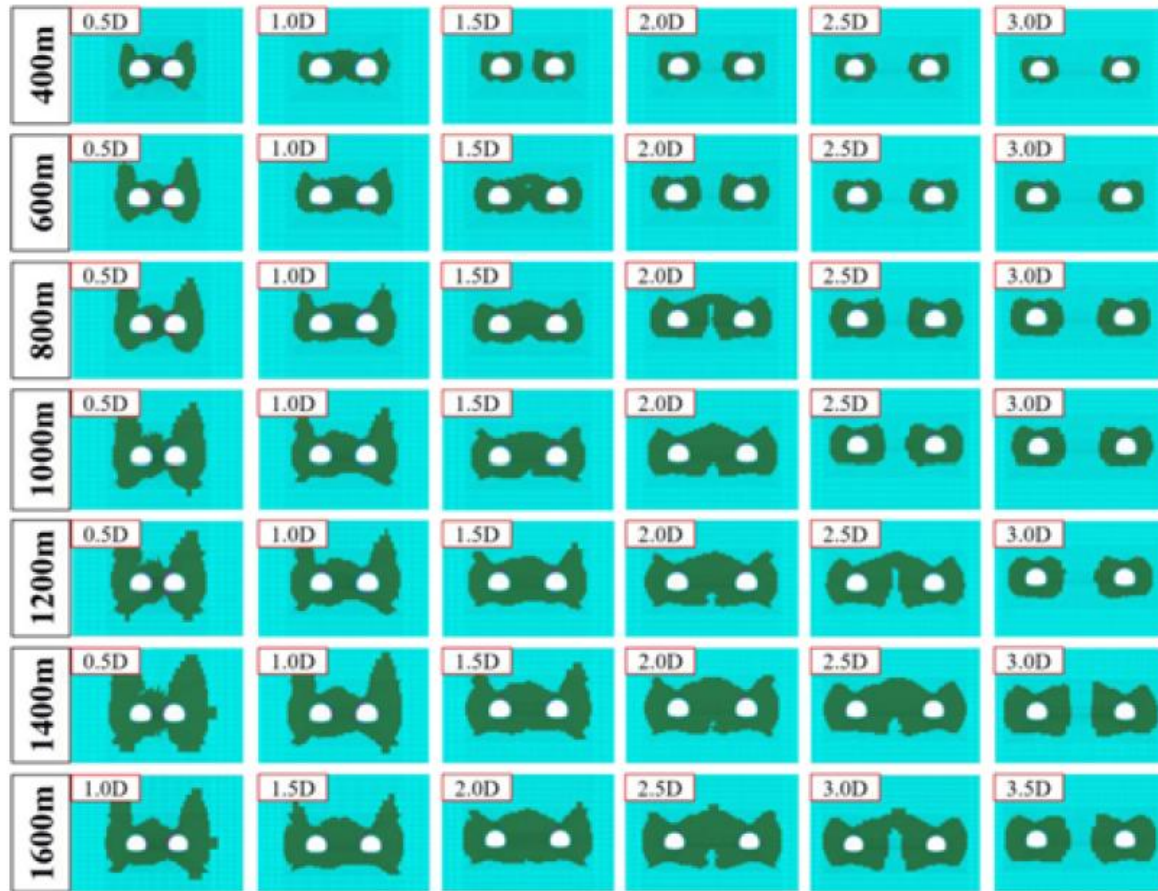


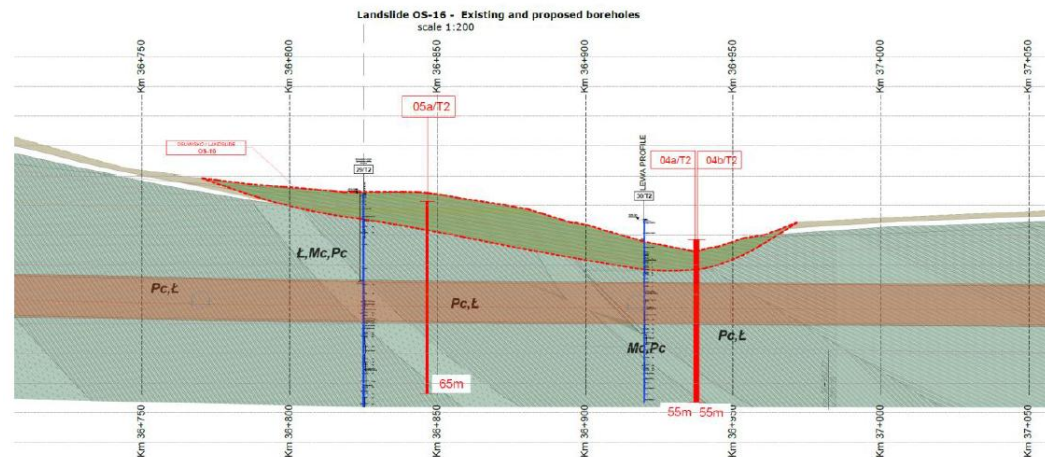
Fig. 11. Deformation Trend of Surrounding Rock when the Clear Spacings Are Too Small

Szerokość filara powinna zależeć od:

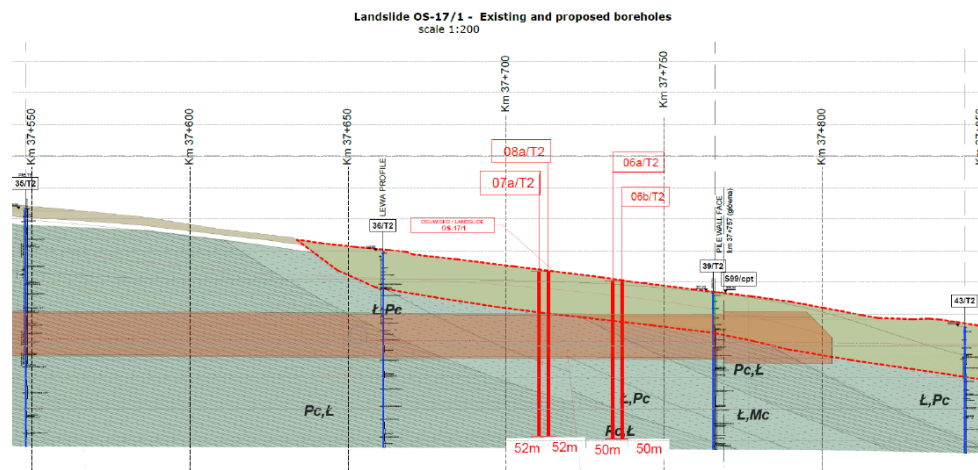
- typu gruntu/skały,
- głębokości posadowienia,
- średnicy tunelu,
- technologii drążenia.

Zagrożenia:

- Wodne
 - Metanowe
 - Pożarowe
 - Klimatyczne
 - Radiacyjne
 - Zawałowe
 - Skojarzone
-
- ✓ ...osuwiskowe
 - ✓ ...zapadliska



Rysunek 7



Rysunek 9

Dziękujemy za uwagę!