



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
AGH UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY

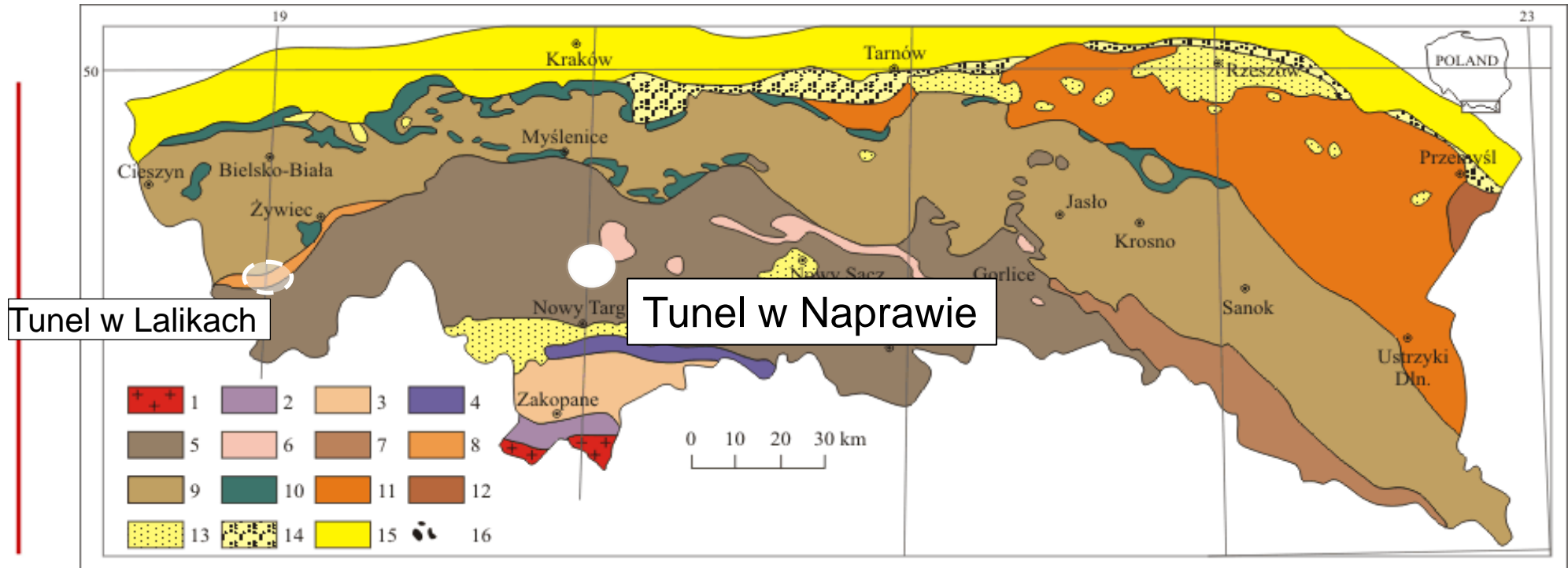


WYDZIAŁ GÓRNICZWA
I GEOINŻYNIERII

Budowa tuneli w warunkach fliszu karpackiego

Marek Cała, Antoni Tajduś
Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki

Poglądowa mapa geologiczna polskich Karpat



1-skały krystaliczne Tatr, 2-skały osadowe Tatr, 3-Flisz Podhalański, 4-Pieniński pas skałkowy, 5-Jednostka magurska, 6-Jednostka grybowska, 7-Jednostka dukielska, 8-Jednostka przedmagurska, 9-Jednostka śląska, 10-Jednostka podśląska, 11-Jednostka skolska, 12-Jednostka Stebnika-sfałdowane osady miocenu, 13-Miocen wewnątrzkarpacki, 14-Jednostka Zgłobiec-sfałdowane osady miocenu, 15-autochtoniczny miocen Przedgórze Karpat, 16-Andezyty mioceńskie

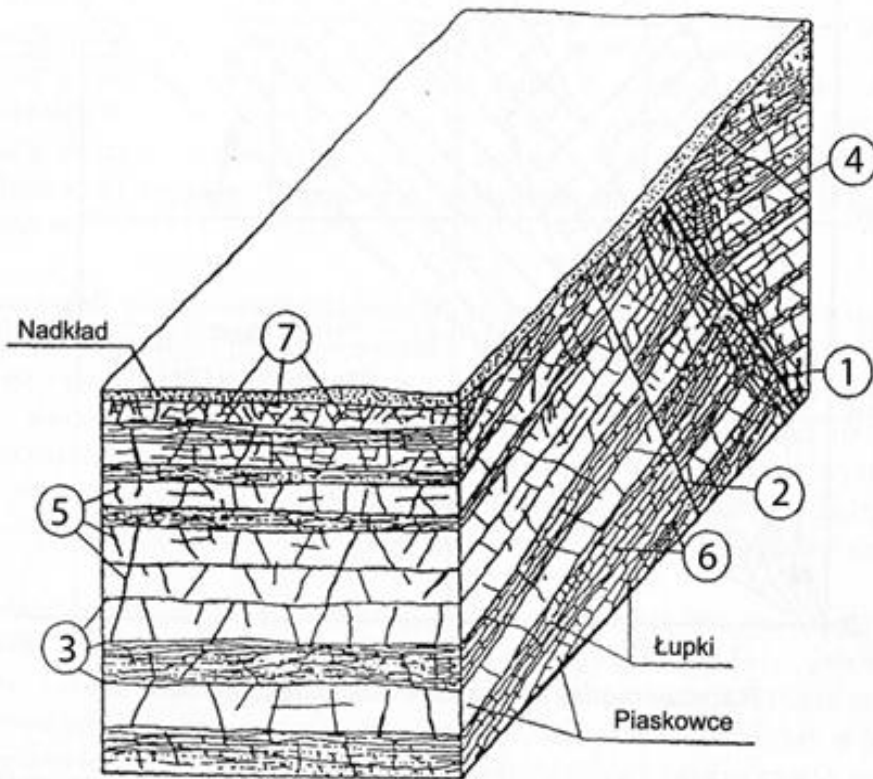
Problematyka budowy tuneli we fliszu karpackim

Flisz Karpacki budują naprzemianległe warstwy skał drobno i gruboziarniste. Głównymi skałami budującymi flisz karpacki są *piaskowce* i *zlepieńce* oraz *łupki* i *mułowce* o różnorodnej strukturze, teksturze, składzie petrograficznym co powoduje istotne zróżnicowanie ich parametrów fizyko-mechanicznych zwłaszcza łupku i anizotropię (dochodzącą do 10 razy).



Problematyka budowy tuneli we fliszu karpackim



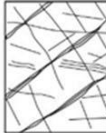

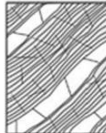
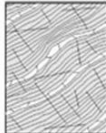




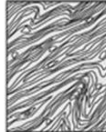
Flisz karpacki jest silnie spękany. Występuje pięć podstawowych rodzajów spękań: spękania uwarstwienia, spękania ciosowe, spękania złupkowacenia, spękania strefy przypowierzchniowej i uskoki.



Analiza jakości górotworu

Systemy RQD, RMR, GSI (for flysch)

GSI (Marinos 2017)

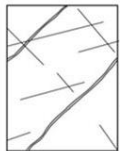
ROCKMASS TYPE	STRUCTURE	ROCKMASS TYPE	STRUCTURE	ROCKMASS TYPE	STRUCTURE
<p>TYPE I. Undisturbed, with thick to medium thickness sandstone beds with sporadic thin films of siltstone.</p>		<p>TYPE II. Undisturbed massive siltstone with sporadic thin interlayers of sandstones</p>		<p>TYPE III. Moderately disturbed sandstones with thin films of interlayers siltstone</p>	
<p>TYPE IV. Moderately disturbed rockmass with sandstone and siltstone similar amount</p>		<p>TYPE V. Moderately disturbed siltstones with sandstone interlayers</p>		<p>TYPE VI. Moderately disturbed siltstones with sparse sandstone interlayers</p>	
<p>TYPE VII. Strongly disturbed, folded rockmass that retains its structure, with sandstone and siltstone in similar extend</p>		<p>TYPE VIII. Strongly disturbed, folded rockmass, with siltstones and sandstone interlayers. The structure is retained and deformation - shearing is not strong</p>		<p>TYPE IX. Disintegrated rockmass</p>	
<p>TYPE X. Tectonically deformed intensively folded/ faulted siltstone or clay shale with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure</p>		<p>TYPE XI. Tectonically strongly sheared siltstone or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay.</p>			

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI) FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH

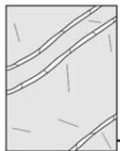
Chart modified and extended by V. Marinós from the P. Marinós & E. Hoek (2001) original one

Heterogeneous rockmasses are meant those with alternating layers of clearly different lithology types with significant differences in their strength properties. For flysch, a typical formation with heterogeneous rock masses, these alternations are consisting of sandstones and siltstones. Clay shales may be present. From a description of the lithology, structure and surface conditions of discontinuities (particularly of the bedding planes), choose a box in the chart. **The selection of the structure should be based on the tectonic disturbance (undisturbed, slightly disturbed, strongly disturbed - folded, desintegrated, sheared), the proportion of siltstones against sandstones and the expressed or not stratification inside the siltstone layers. In the type IV and V when the thickness of sandstone beds exceed 50cm an increase of the GSI value by 5 is suggested. From type IV and the following types, the stratification planes are perceptible inside the siltstone mass.** Locate the position in the box that corresponds to the conditions and estimate the average value GSI from the contours. The determination of the structure and the condition of discontinuities may range between two adjacent fields. Note that the Hoek - Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for fair, poor and very poor conditions. Water pressure does not change the value of GSI and it is dealt with by using effective stress analysis.

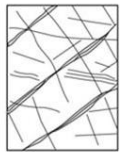
STRUCTURE AND COMPOSITION



TYPE I. Undisturbed, with thick to medium thickness sandstone beds with sporadic thin films of siltstone. In shallow tunnels or slopes where confinement is poor the mode of the failure has a kinematic character controlled by the bedding planes and GSI is meaningless



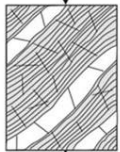
TYPE II. Undisturbed massive siltstone (stratification planes are imperceptible) with sporadic thin interlayers of sandstones



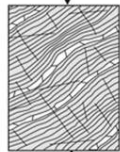
TYPE III. Moderately disturbed sandstones with thin films of interlayers of siltstone



TYPE IV. Moderately disturbed rockmass with sandstone and siltstone similar amounts



TYPE V. Moderately disturbed siltstones with sandstone interlayers



TYPE VI. Moderately disturbed siltstones with sparse sandstone interlayers



TYPE VII. Strongly disturbed, folded rockmass that retains its structure, with sandstone and siltstone in similar extend



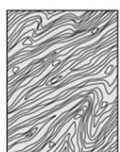
TYPE VIII. Strongly disturbed, folded rockmass, with siltstones and sandstone interlayers. The structure is retained and deformation - shearing is not strong



TYPE IX. Desintegrated rockmass that can be found in wide zones of faults or/and of high weathering. In this type mainly brittle material is present with some disturbed siltstones between rock pieces



TYPE X. Tectonically deformed intensively folded/ faulted siltstone or clay shale with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure



TYPE XI. Tectonically strongly sheared siltstone or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces. Ultimately the ground behavior is that of a soil

SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES
(Predominantly bedding planes)

VERY GOOD
Very rough, fresh unweathered surfaces

GOOD
Rough, slightly weathered or oxyllised surfaces

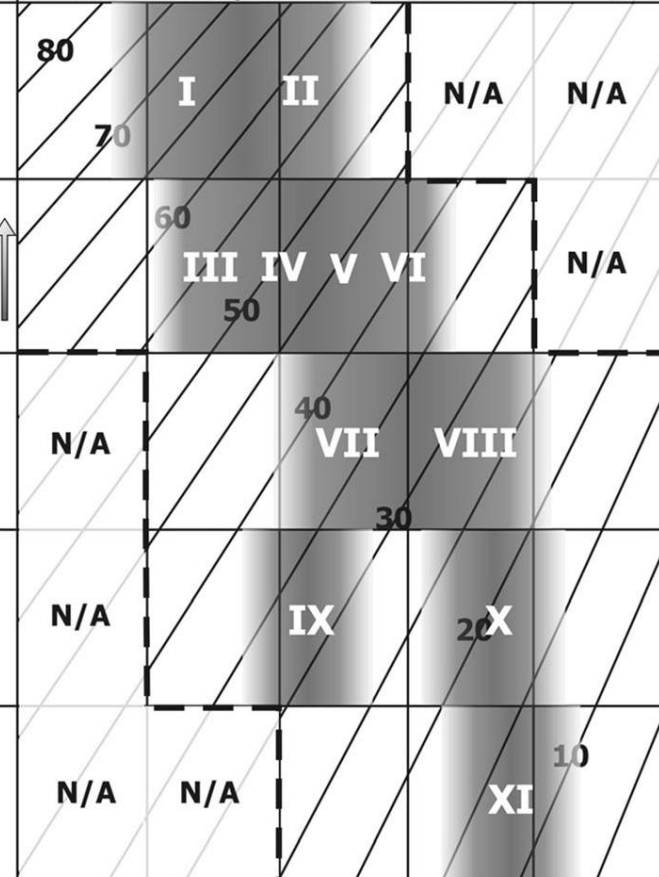
FAIR
Smooth, moderately weathered and altered surfaces

POOR
Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments

VERY POOR
Very smooth, slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coating or fillings

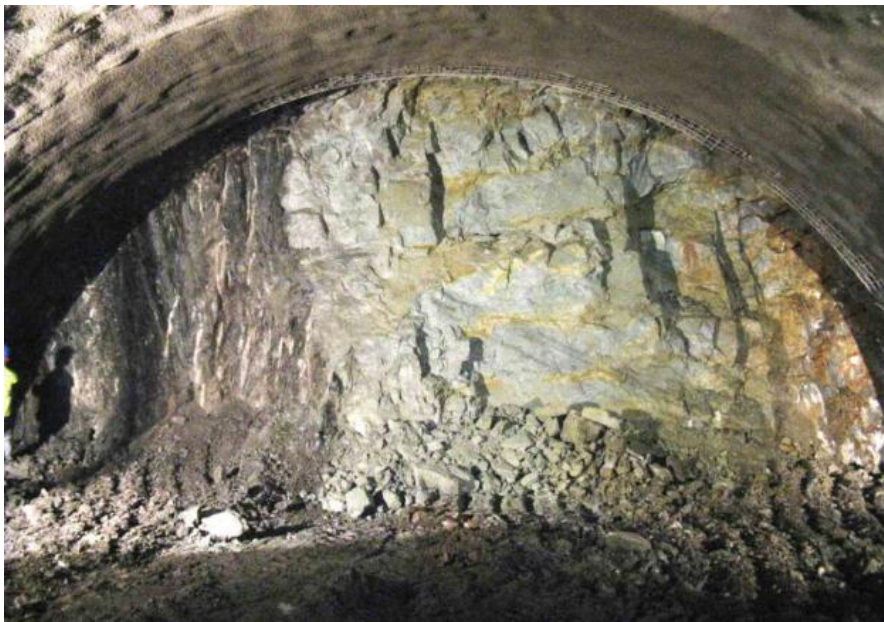
DECREASE OF THE QUALITY OF DISCONTINUITIES →

↑ WHEN THICKNESS OF SANDSTONE BEDS > 50cm



N/A Means geologically impossible combination. In the non - shadowed areas, such rockmasses are not impossible to find but it is very unusual

→ Means deformation after tectonic disturbance



Warstwy piaskowcowo - łupkowe,
średnio naruszone – Typ V



Sfałdowany uwarstwiony łupek, lokalnie z
łupkiem laminowanym i piaskowcem – Typ VI

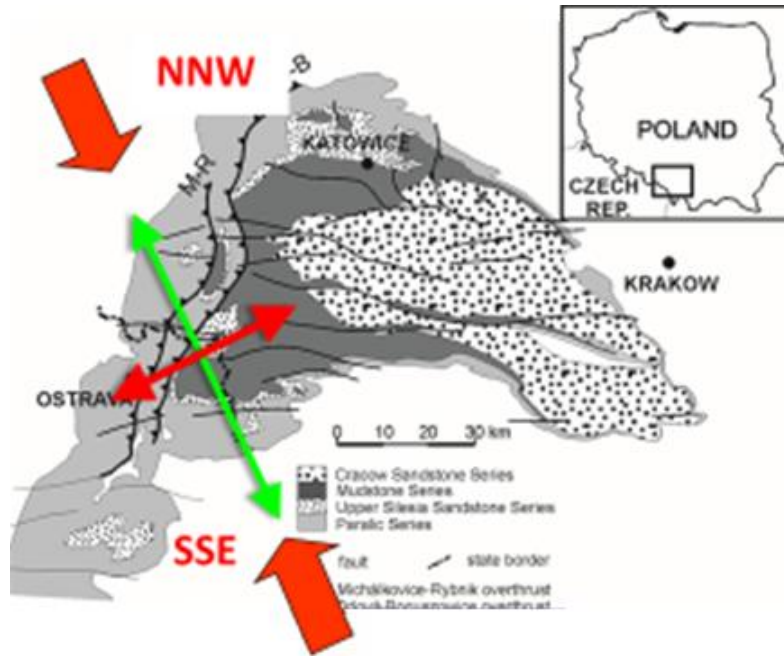


Sfałdowane rozdzielające się warstwy
łupkowe i piaskowcowe – TYP VIII



Intensywnie naruszony i skruszony łupek
z lokalnymi przewarstwieniami piaskowca –
TYP X

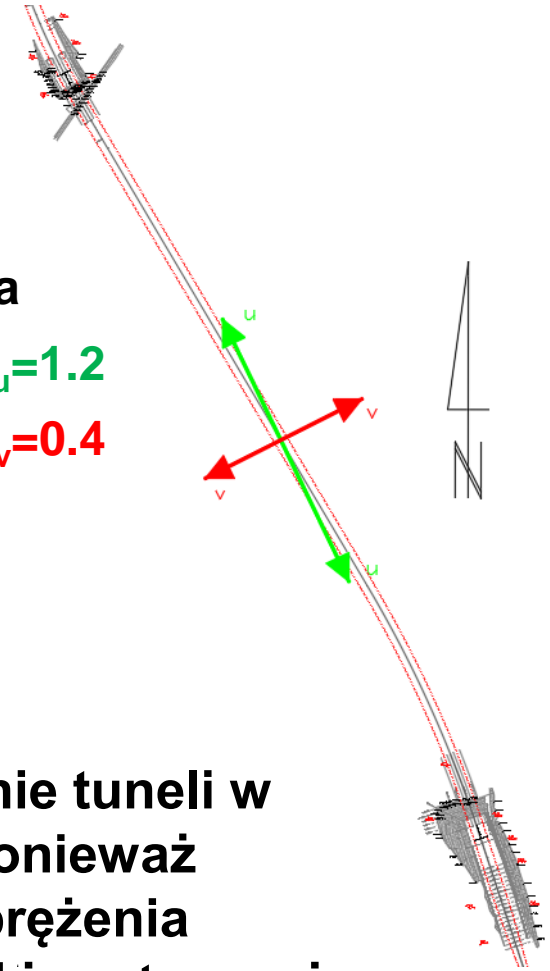
Pierwotny stan naprężenia w rejonie tunelu w Naprawie



$$p_z = 2.0 \text{ MPa}$$

$$p_u = 2.4 \text{ MPa} \quad \lambda_u = 1.2$$

$$p_v = 0.8 \text{ MPa} \quad \lambda_v = 0.4$$



Nie badano pierwotny stanu naprężenia w rejonie tuneli w Naprawie. A jest on korzystny dla drążenia, ponieważ drążymy w kierunku większego poziomego naprężenia pierwotnego co powoduje bardzo dobre warunki w otoczeniu czoła przodka tunelu. Jedynie uwarstwienie i spękania zaburzają ten stan.

Flisz karpacki – problemy z drażeniem

Klasa średnia wg RMR: IIIa RMR (51-60) IIIb RMR (40-51). Dla tych klas jest dobrana obudowa wstępna i ostateczna typu 1a i 1b.

Obudowa wstępna 1a

Podwójne łuki stalowe IPE180 co 2m, beton natryskowy o gr. 25cm z siatką stalową. W obudowie **1b** dodatkowo kilka kotew w stropie.

Obudowa ostateczna o gr. 0.5m, jednakowa na całym przekroju, całkowicie wodoszczelna.



Materiały Astaldi

Flisz karpacki – problemy z drażeniem

Klasa wg RMR IV słaba (zawartość piaskowca 50 - 85%). Dla tej klasy jest dobrana **obudowa wstępna i ostateczna typu 2.**

Obudowa wstępna

Podwójne łuki stalowe IPE180 co 1,5m, beton natryskowy o gr. 25 cm zbrojony siatką stalową, 15 kotwi stalowych, ustawionych w "wachlarzu" co 1,5m. . **Obudowa**

ostateczna

Na całym konturze beton o gr. 50cm. Obudowa wodoszczelna.



Flisz karpacki – problemy z drażeniem

RMR klasa V bardzo słaba (zawartość piaskowca 15% - 50% lub poniżej 15%) . Klasa ta powinna być podzielona na klasy Va i Vb (model łupkowy i strefy zaburzone uskokiem). Dla tej klasy dobrano **obudowę wstępną i ostateczną typu 3.**

Obudowa wstępna

Wzmocnienie stropu tunelu przed czołem przodka za pomocą rur o dł. 15 m, kotwienie czoła przodka za pomocą rur z włókna szklanego, podwójne łuki stalowe IPE180 co 1m, beton natryskowy z siatką stalową.

Obudowa ostateczna

Obudowa betonowa w w kalocie o zmiennej o gr. od 0.5 do 1m, spągu gr. 0.5m.



Flisz karpacki – problemy z drażeniem

Klasa Vb obejmuje masyw skalny całkowicie zbudowany z łupku ilastego lub strefy uskokowej złożonej z łupku z niewielką ilością piaskowca całkowicie pogruchotanego. Przykład obwał w przodku III - tunel 1 od strony Zakopanego.

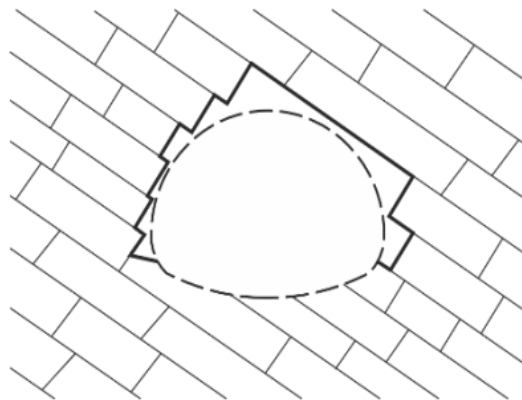


Flisz karpacki – problemy z drążeniem

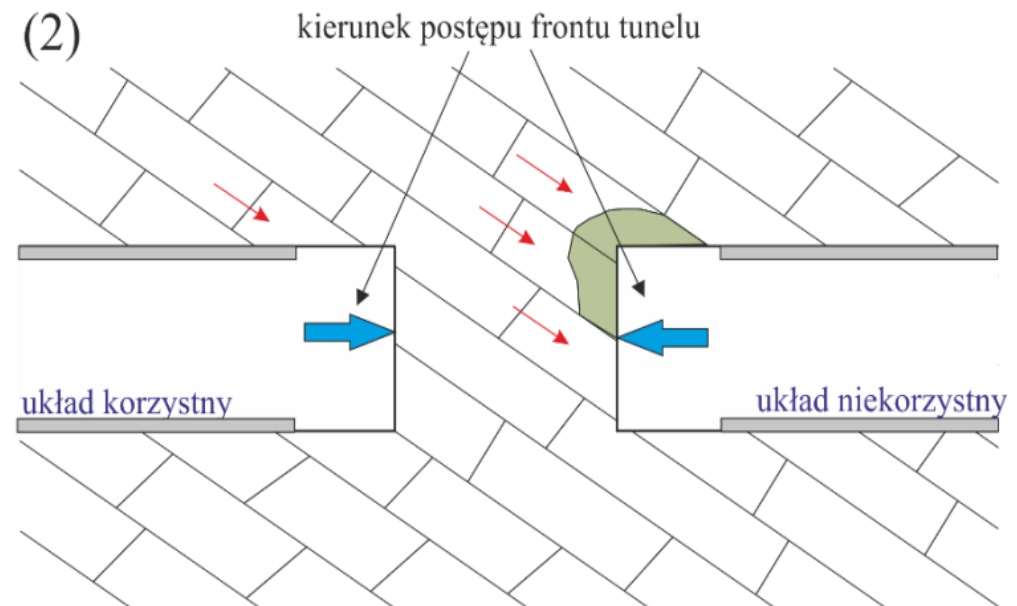
Układ warstw będzie miał duży wpływ na zachowanie się masywu skalnego podczas drążenia 4 przodków. W pł. czoła przodka warstwy skalne są nachylone pod kątem od 25 do 60%. W stosunku do kierunku drążenia warstwy te zapadają z północy w kierunku południowym.



(1)

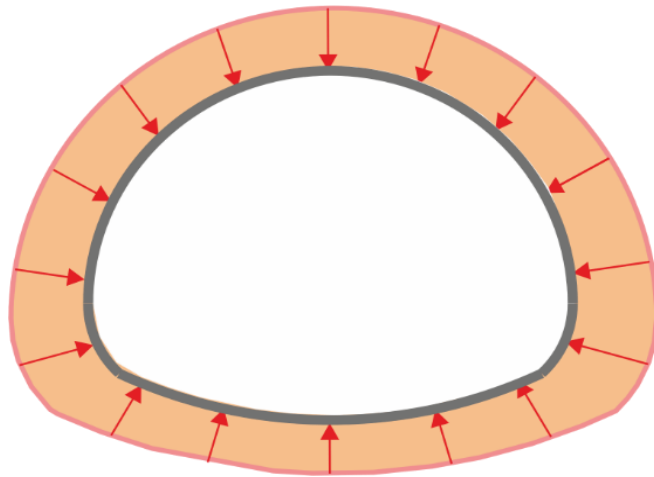


(2)

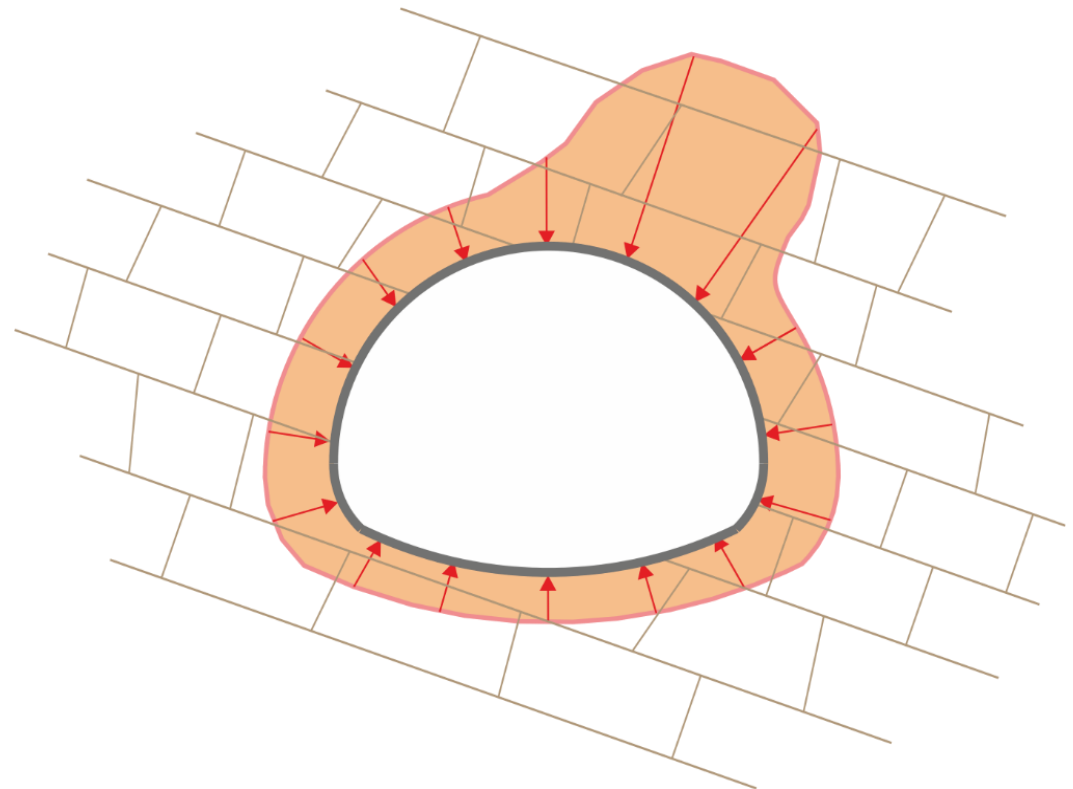


Wpływ uwarstwienia i spękania na obciążenie obudowy

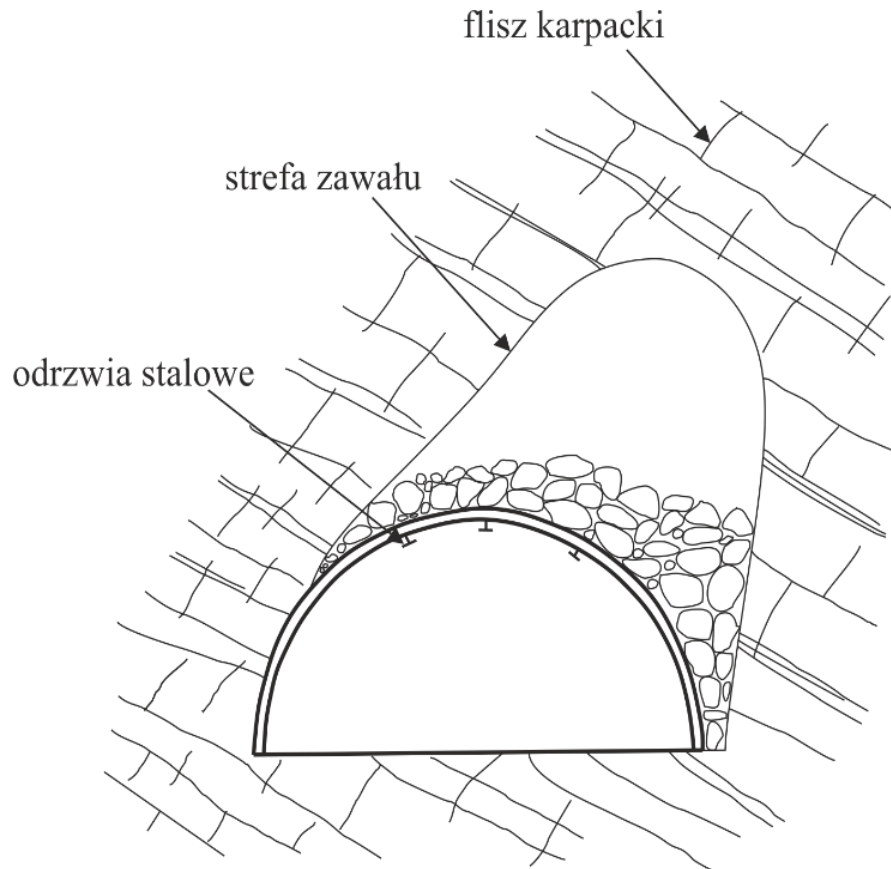
Masyw skalny
nieuwarstwiony
**Obciążenie
symetryczne**



Fliszowy maszyw skalny
spękania z warstwami
nachylonymi pod kątem
Obciążenie niesymetryczne



Obwał stropu podczas drążenia tuneli (sztolni) w Świnnej Porębie



Podczas drążenia kaloty o szerokości 8.5m w wyłomie wystąpił niesymetryczny obwał stropu prostopadle do nachylenia warstw o wysokości około

$$f = 7\text{m}$$

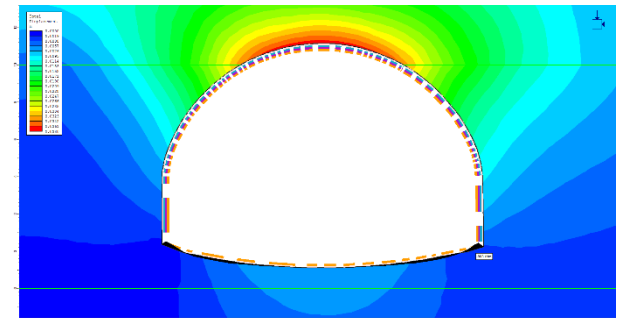
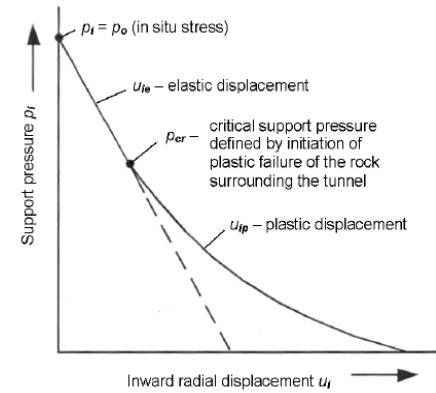
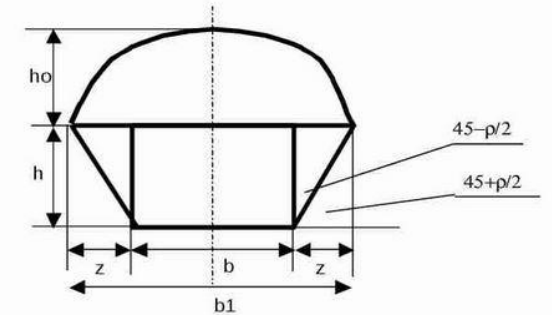
w odległości 97m od jego wylotu tunelu zrzutowego. Obwał nastąpił w strefie zaburzonej o dużej zawartości łupku ilastego w masywie skalnym klasy V_b .

SPOSOBY WYZNACZANIA OBCIĄŻENIA DZIAŁAJĄCEGO NA OBUDOWĘ

Metody oparte o teorie *Protodiakonowa*, *Cymbariewicza*, *Saułstowicza*, itp.

Metoda krzywej reakcji górotworu

Metody numeryczne



SPOSOBY WYZNACZANIA OBCIĄŻENIA DZIAŁAJĄCEGO NA OBUDOWĘ

Metoda krzywej reakcji
górotworu



Metoda krzywej reakcji
górotworu



Metody numeryczne



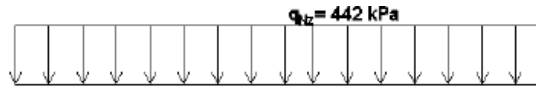
WARUNKI GEOMECHANICZNE PRZYJĘTE NA POTRZEBY WSTĘPNEGO PROJEKTU OBUDOWY TUNELU MAŁY LUBOŃ

Parametr	Sym	Wartość	Opis
Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe	R_{cs}	$R_{cs} := 30\text{MPa} = 30\cdot\text{MPa}$	Wytrzymałość skały na nacisk jednoosiowy wsp Tablica 2
Liczba Poissona górotworu	ν	$\nu := 0.3$	Wytrzymałość skały na nacisk jednoosiowy
Moduł E górotworu	E	$E := 5000\text{MPa}$	Liczba Poissona górotworu
Moduł odkształcenia górotworu	E_v	$E_v := 3500\text{MPa}$	Moduł E górotworu
Ciężar właściwy wilgotnego górotworu	γ	$\gamma := 26 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Moduł odkształcenia górotworu
Kąt tarcia górotworu	ϕ_s	$\phi_s := 30\text{deg}$	Ciężar właściwy wilgotnego górotworu
Spójność górotworu	c_s	$c_s := 3000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	Kąt tarcia górotworu
		$\phi'_s := \text{atan}\left(\frac{R_{cs}}{10\text{MPa}}\right) = 71.565\text{-deg}$	Spójność górotworu
		$k_1 := \frac{1.1375 + 1.05}{2} = 1.094$	Pozorny kąt tarcia wewnętrznego skały
		$\phi'_g := \frac{\phi'_s}{k_1} = 65.431\text{-deg}$	wsp zalezny od podzielności i rozmakalności skał
		$f := 0.1 \cdot R_{cs} = 3\text{-MPa}$	Pozorny kąt tarcia wewnętrznego górotworu
		$E_g := E_v = 3.5\text{-GPa}$	Wskaźnik zwięzłości wdtg. Protodiakonowa
			Wsp sprężystości górotworu

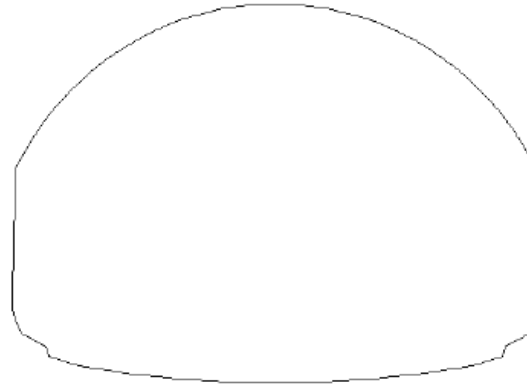
Przyjęte parametry wytrzymałościowe górotworu dla warunków średnich



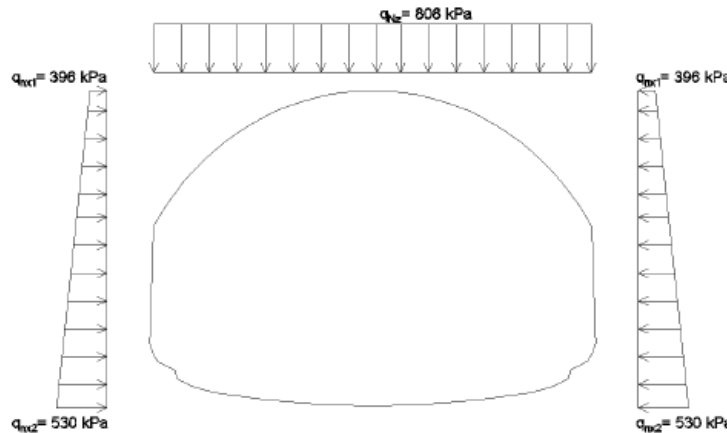
OBCIĄŻENIA DZIAŁAJĄCE NA OBUDOWĘ OSTATECZNĄ



← $q = 442 \text{ kPa}$



Model obliczeniowy dla warunków średnich – modele teoretyczne Protodiakonowa

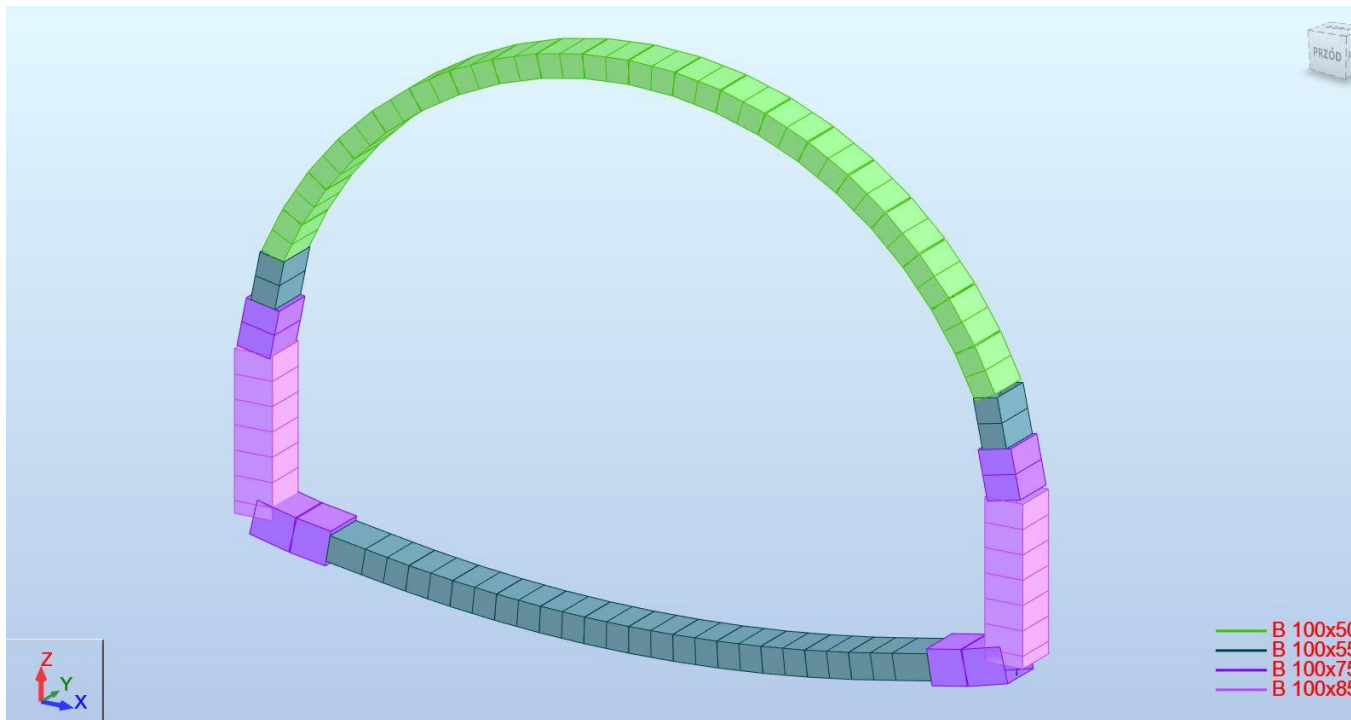


← $q = 806 \text{ kPa}$
← $q = 396 \text{ kPa}$

← $q = 530 \text{ kPa}$

Model obliczeniowy dla warunków złych – modele teoretyczne Protodiakonowa i Cymbariewiczza

PROJEKTOWANIE OBUDOWY TUNELU



Beton C50/60

Stal A-IIIN

Masa betonu (mb): 71,6 ton

Przekrój B 100x**50** (kalota):

Zbrojenie: 7 × Ø16 mm na 1 mb

Przekrój B 100x**85** (ocios):

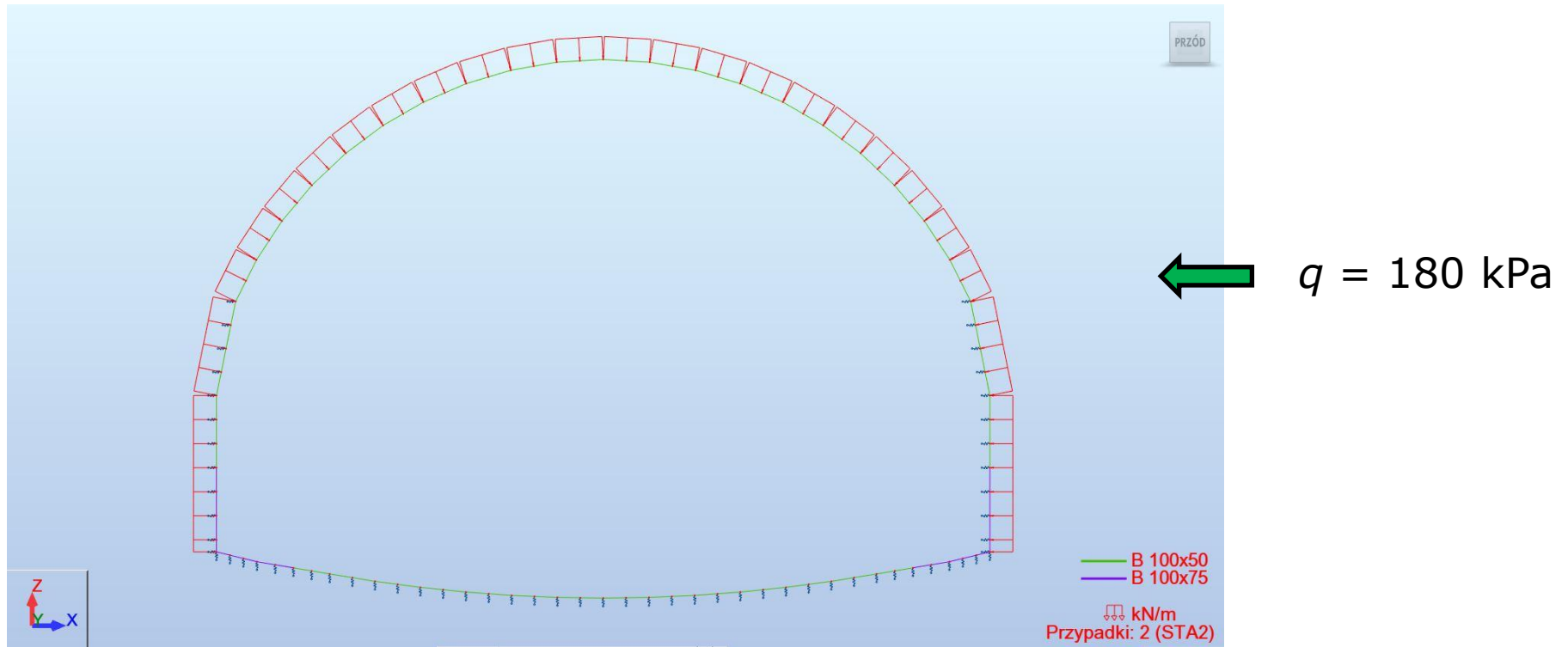
Zbrojenie: 7 × Ø20 mm na 1 mb

Przekrój B 100x**55** (spąg):

Zbrojenie: 7 × Ø16 mm na 1 mb

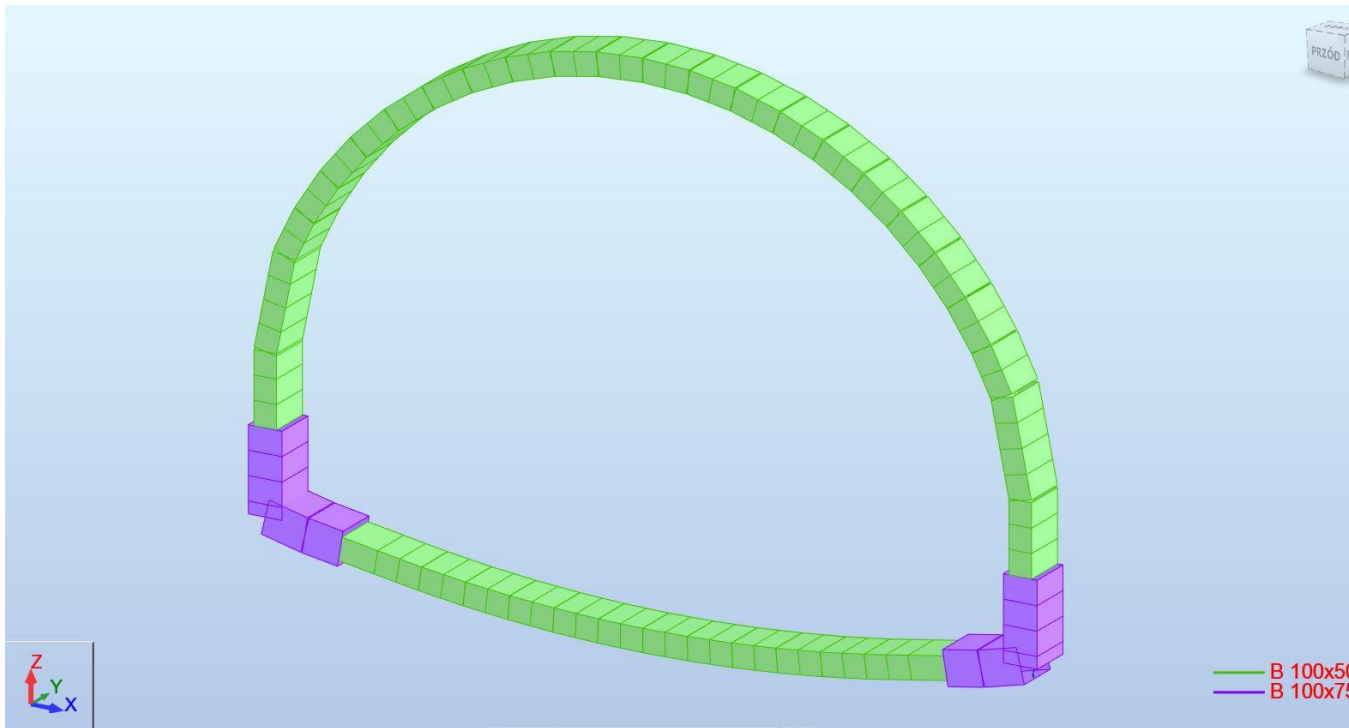
Wyniki obliczeń obudowy ostatecznej tunelu w wybranym przekroju – warunki średnie, teoria Protodiakonowa

OBCIĄŻENIA DZIAŁAJĄCE NA OBUDOWĘ TUNELI - GRC



Obciążenie działające na obudowę ostateczną na podstawie krzywej reakcji górotworu

PROJEKTOWANIE OBUDOWY TUNELU



Beton C30/37

Stal B500A

Masa betonu (mb): 64,6 ton

Przekrój B 100x**50** (kalota):

Zbrojenie: 5 × Ø16 mm na 1 mb

Przekrój B 100x**50** (ocios):

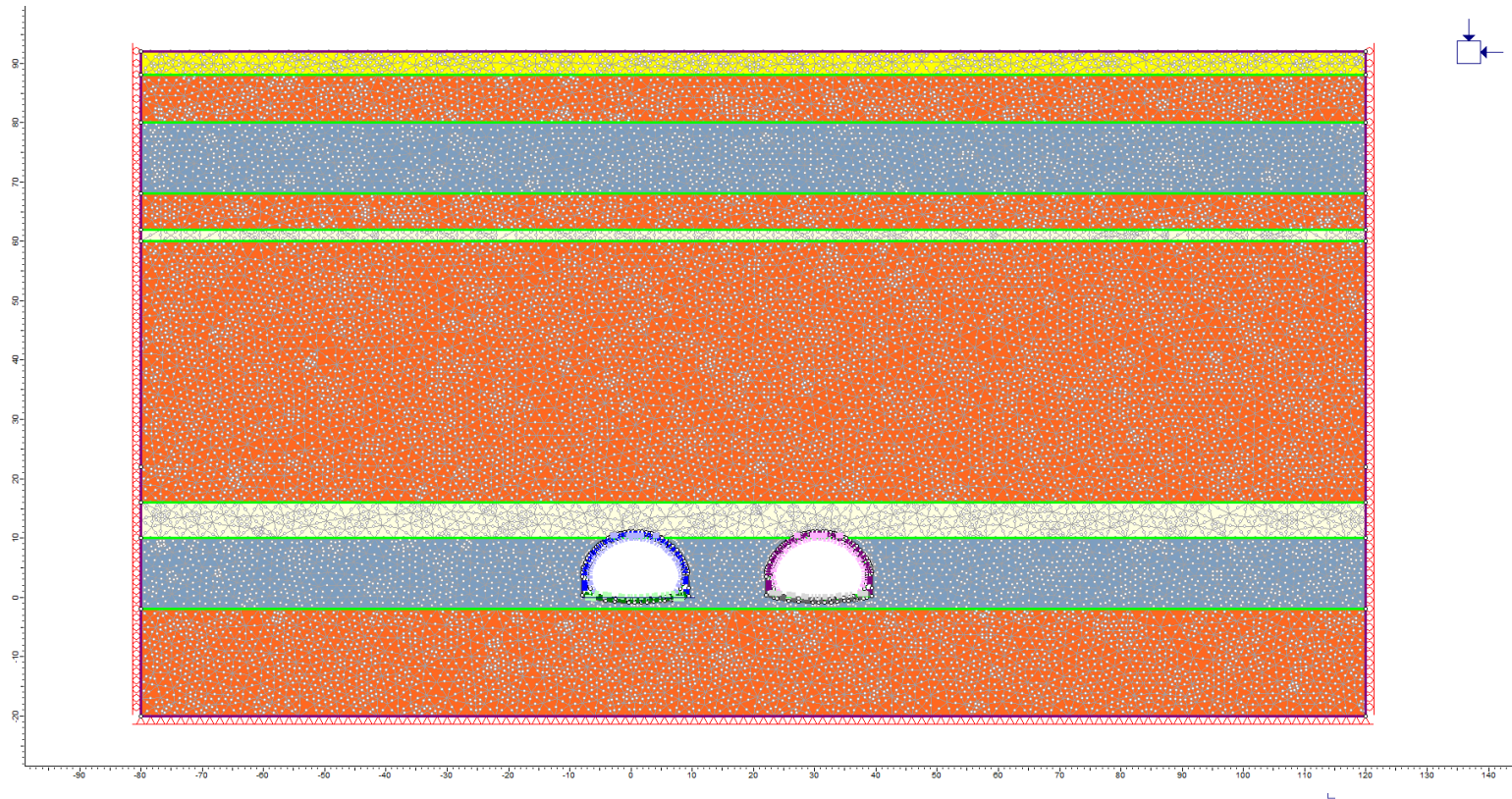
Zbrojenie: 5 × Ø16 mm na 1 mb

Przekrój B 100x**50** (spąg):

Zbrojenie: 5 × Ø16 mm na 1 mb

Wyniki obliczeń obudowy ostatecznej tunelu w wybranym przekroju – warunki średnie, krzywa reakcji górotworu

OBLICZENIE OBUDOWY OSTATECZCZNEJ TUNELU MAŁY LUBIEŃ DLA ODCINKÓW TYPU 3

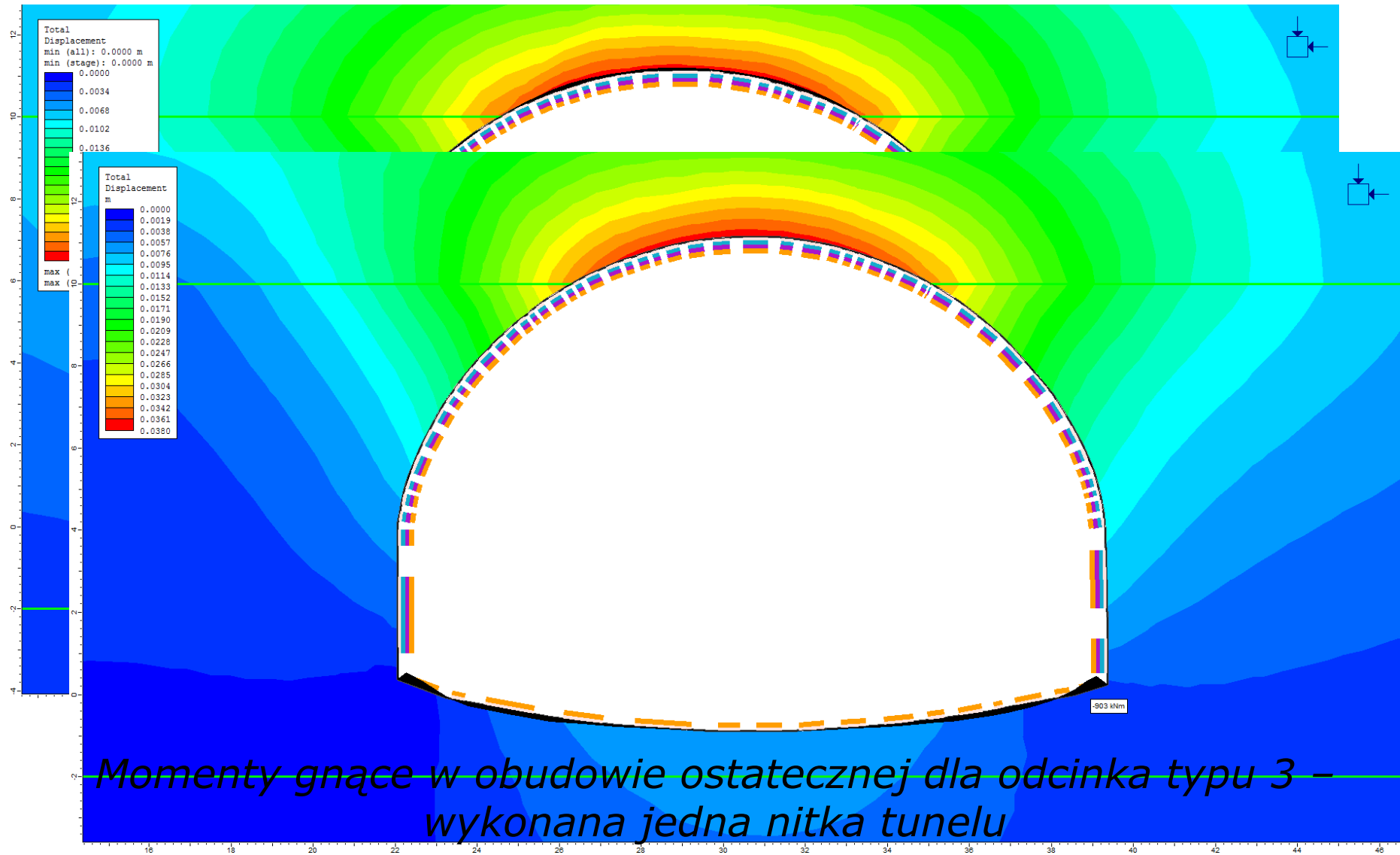


Material Name	Color	Initial Element Loading	Unit Weight (kN/m3)	Elastic Type	Young's Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Tensile Strength (kPa)	Tensile Strength (res) (kPa)	Dilation Angle (deg)	Friction Angle (peak) (deg)	Friction Angle (res) (deg)	Cohesion (peak) (kPa)	Cohesion (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
Plaskowiec 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 plaskowcowo-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

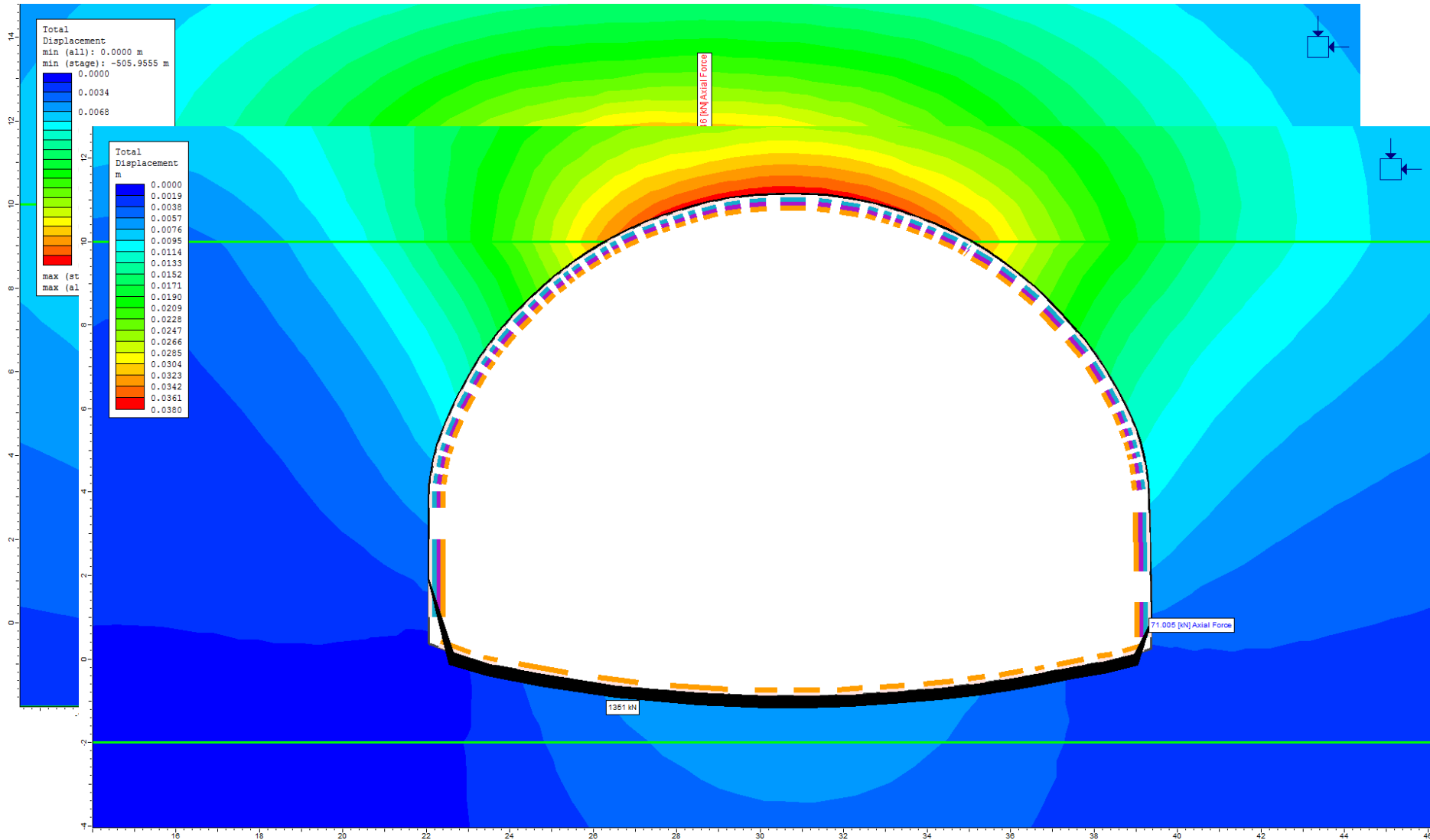
Przyjęty model numeryczny do obliczeń obudowy typu 3



OBLICZENIE OBUDOWY OSTATECZNEJ TUNELU MAŁY LUBIEŃ DLA ODCINKÓW TYPU 3

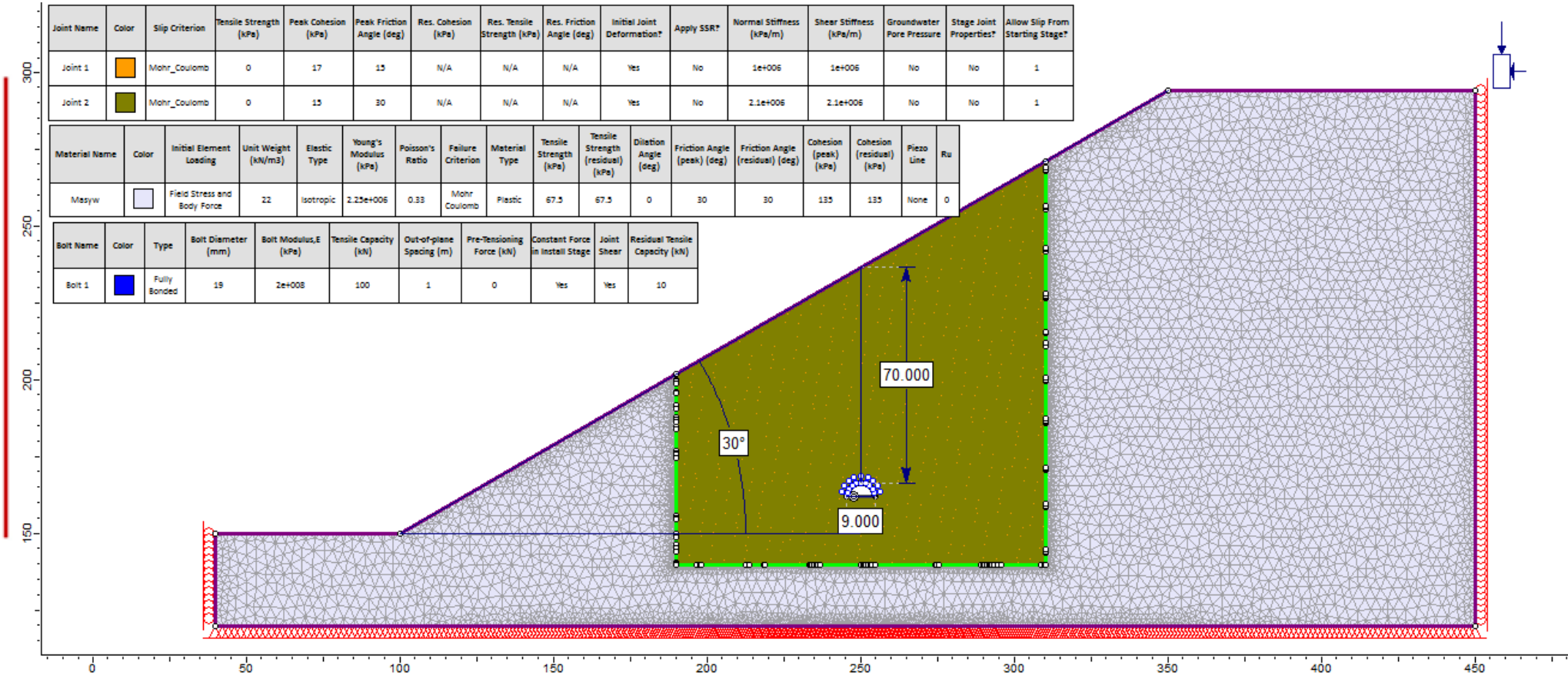


OBLICZENIE OBUDOWY OSTATECZNEJ TUNELU MAŁY LUBIEŃ DLA ODCINKÓW TYPU 3



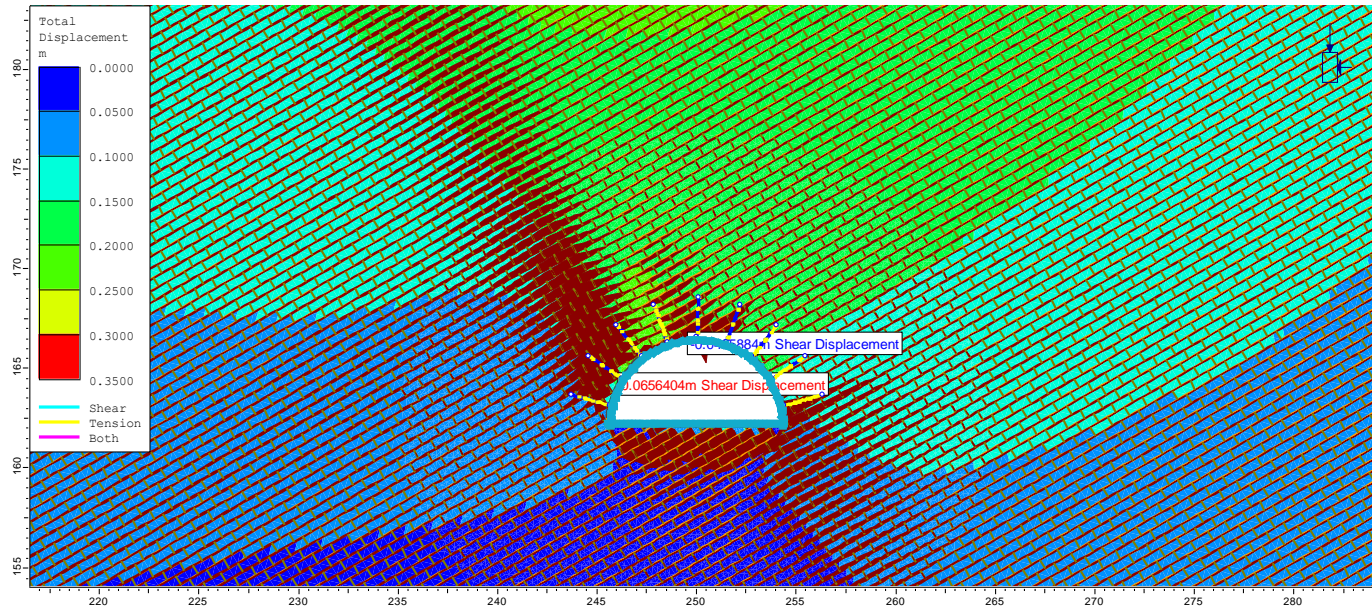
Siły osiowe w obudowie ostatecznej dla odcinka typu 3 wykonane dwie nitki tunelu

SPEKANY MASYW SKALNY

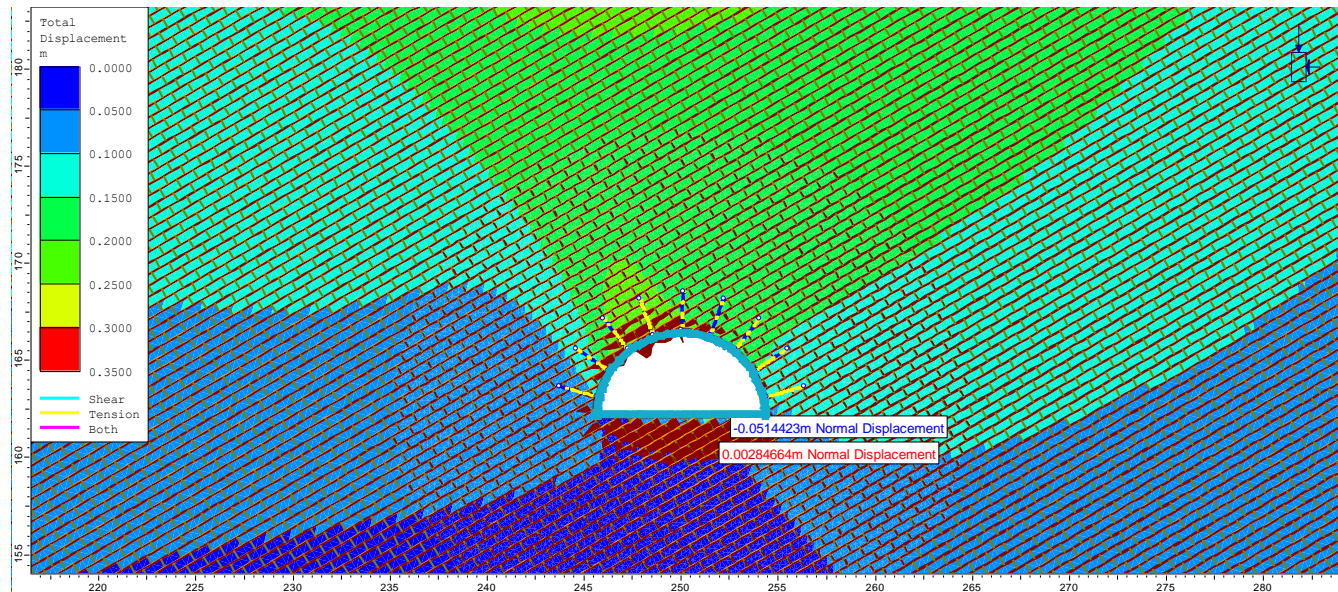


Przyjęty model numeryczny

SPEKANY MASYW SKALNY – KĄT NACHYLENIA SIECI SPEKAŃ 30°

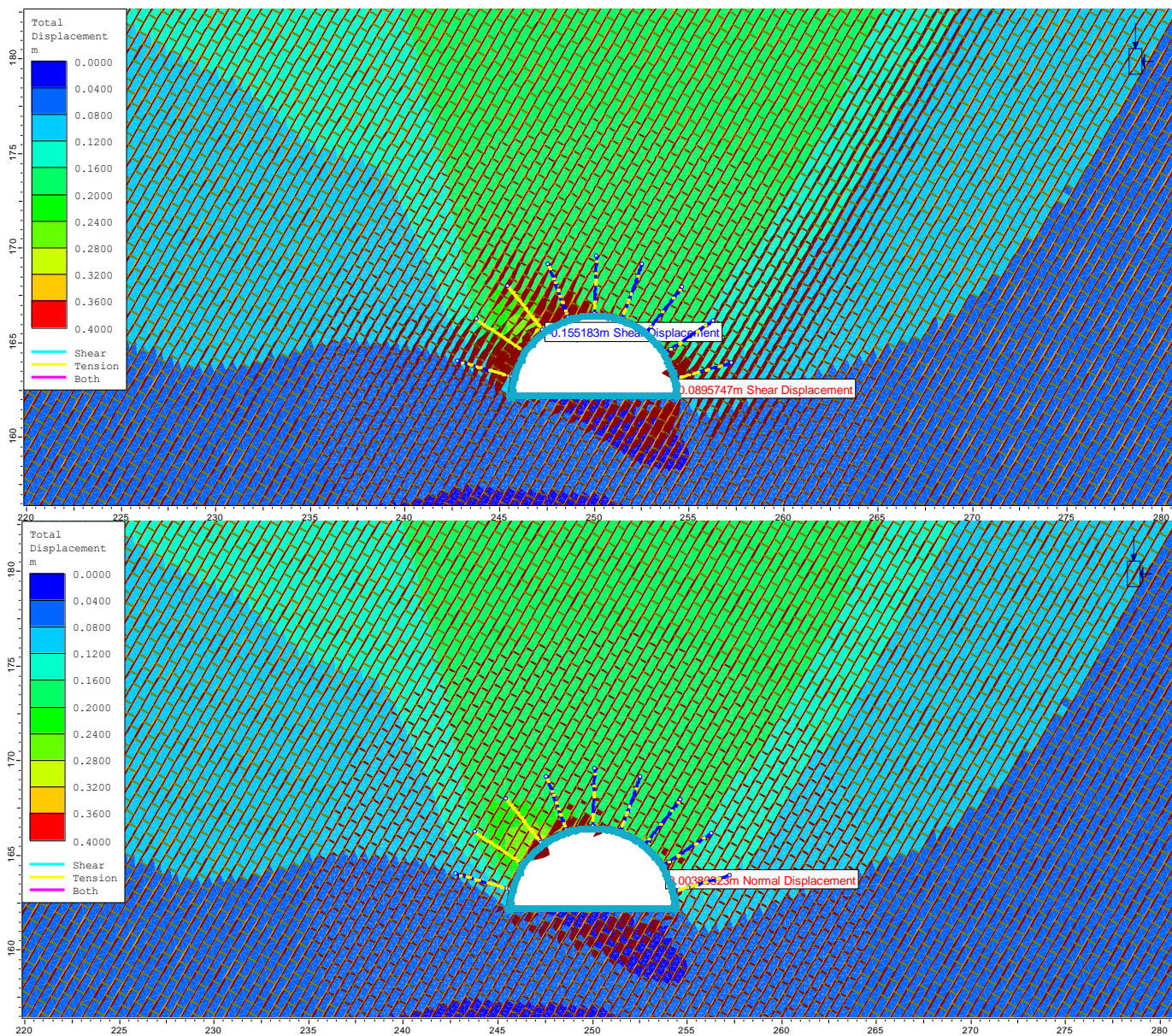


*Przemieszczenia
styczne na
spękaniach
0.0656 m*



*Przemieszczenia
normalne na
spękaniach
0.0514 m*

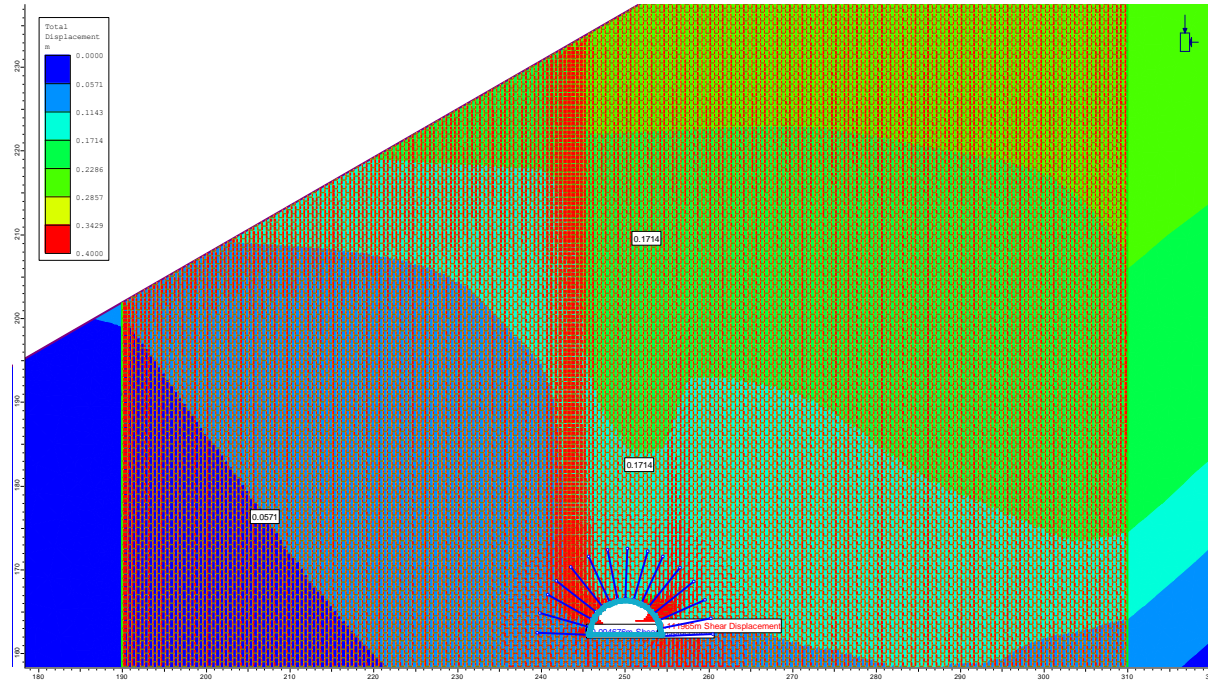
SPEKANY MASYW SKALNY – KĄT NACHYLENIA SIECI SPEKAŃ 60°



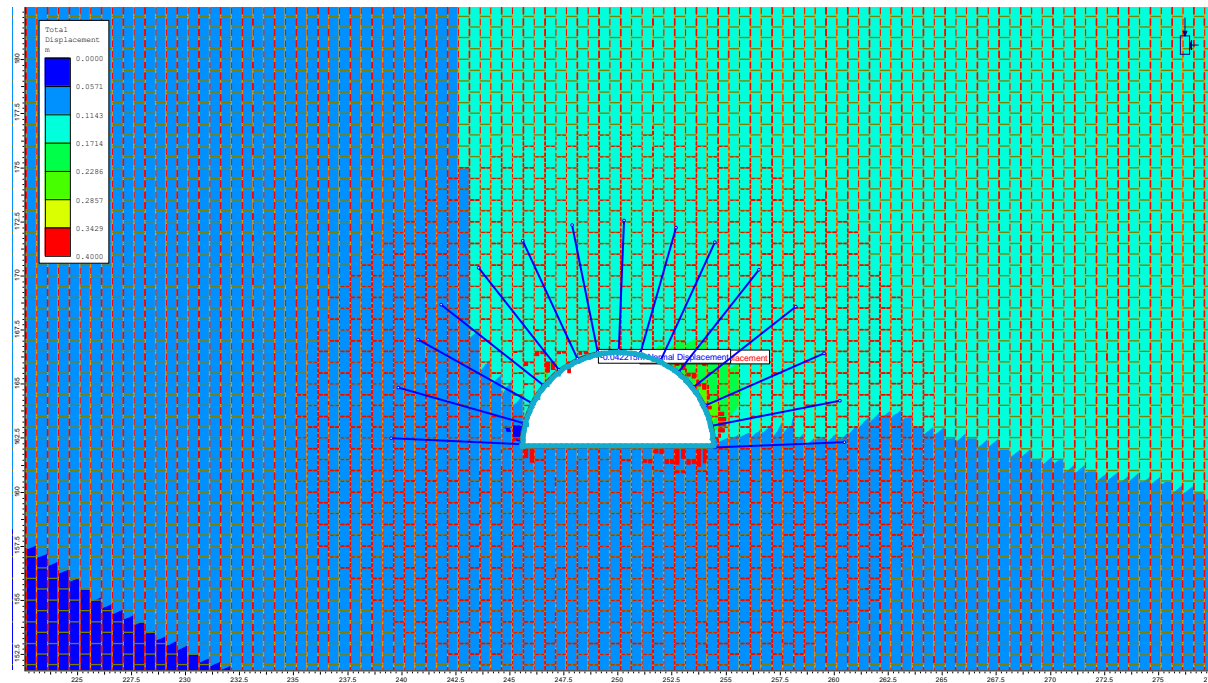
*Przemieszczenia
styczne na
spękaniach
0.1552 m*

*Przemieszczenia
normalne na
spękaniach
0.0038 m*



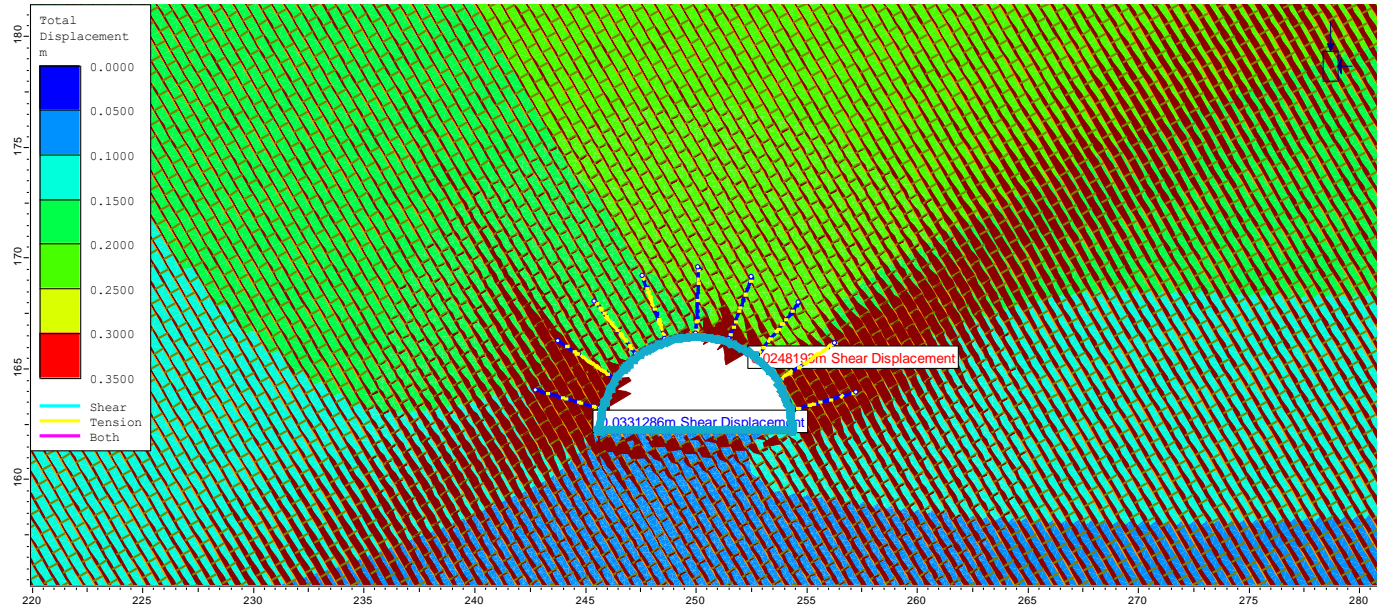


*Przemieszczenia
styczne na
spękaniach
0.1119 m*

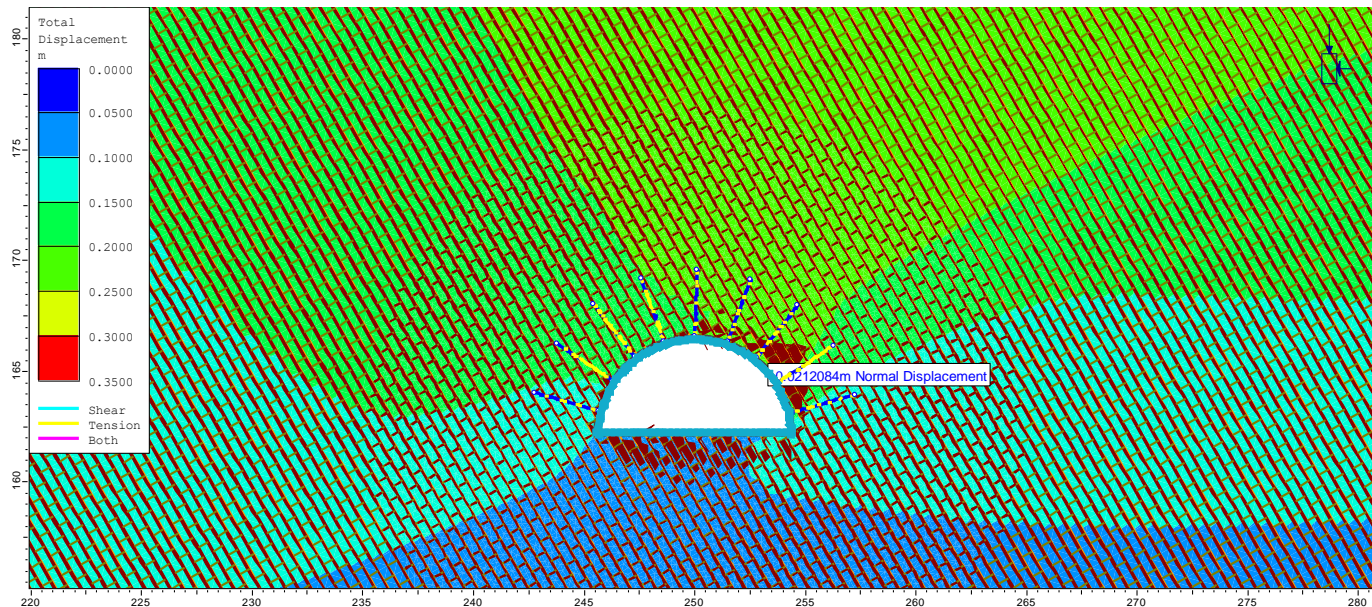


*Przemieszczenia
normalne na
spękaniach
0.0422 m*

SPEKANY MASYW SKALNY – KĄT NACHYLENIA SIECI SPEKAŃ 120°

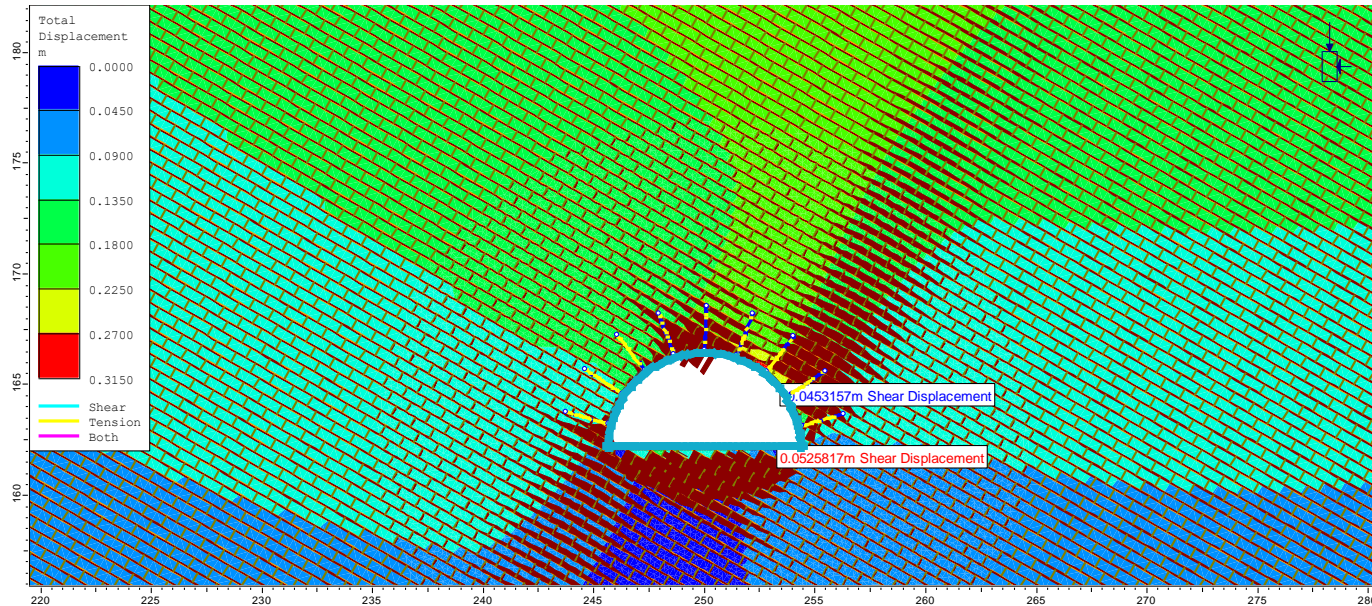


*Przemieszczenia
styczne na
spękaniach
0.0331 m*

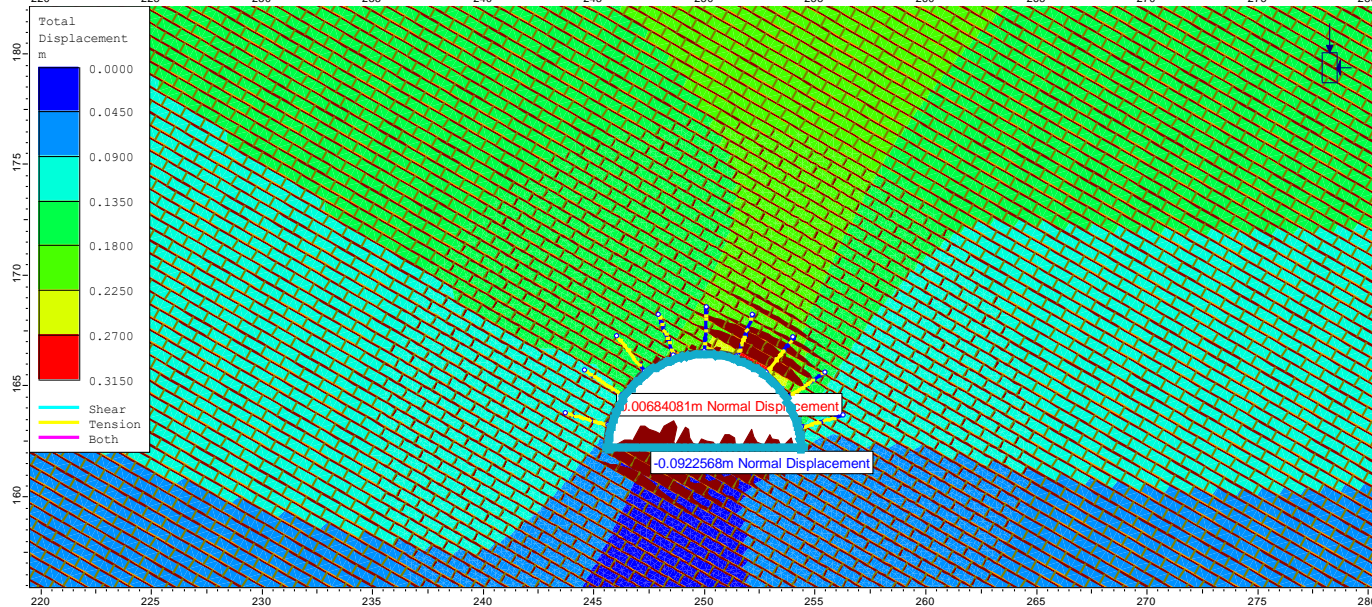


*Przemieszczenia
normalne na
spękaniach
0.3212 m*

SPEKANY MASYW SKALNY – KĄT NACHYLENIA SIECI SPEKAŃ 150°



*Przemieszczenia
styczne na
spękaniach
0.0463 km*

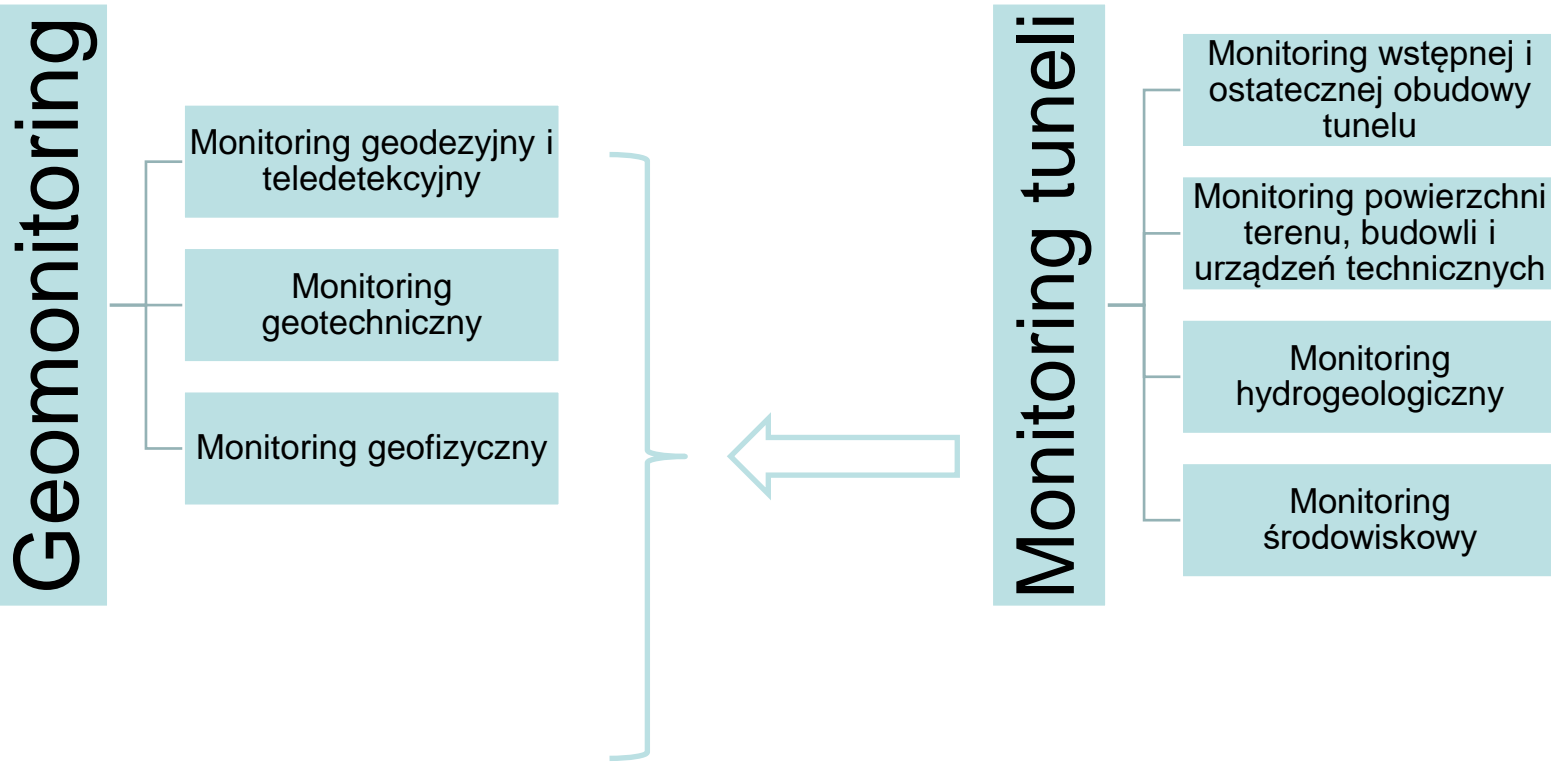


*Przemieszczenia
normalne na
spękaniach
0.0851 m*

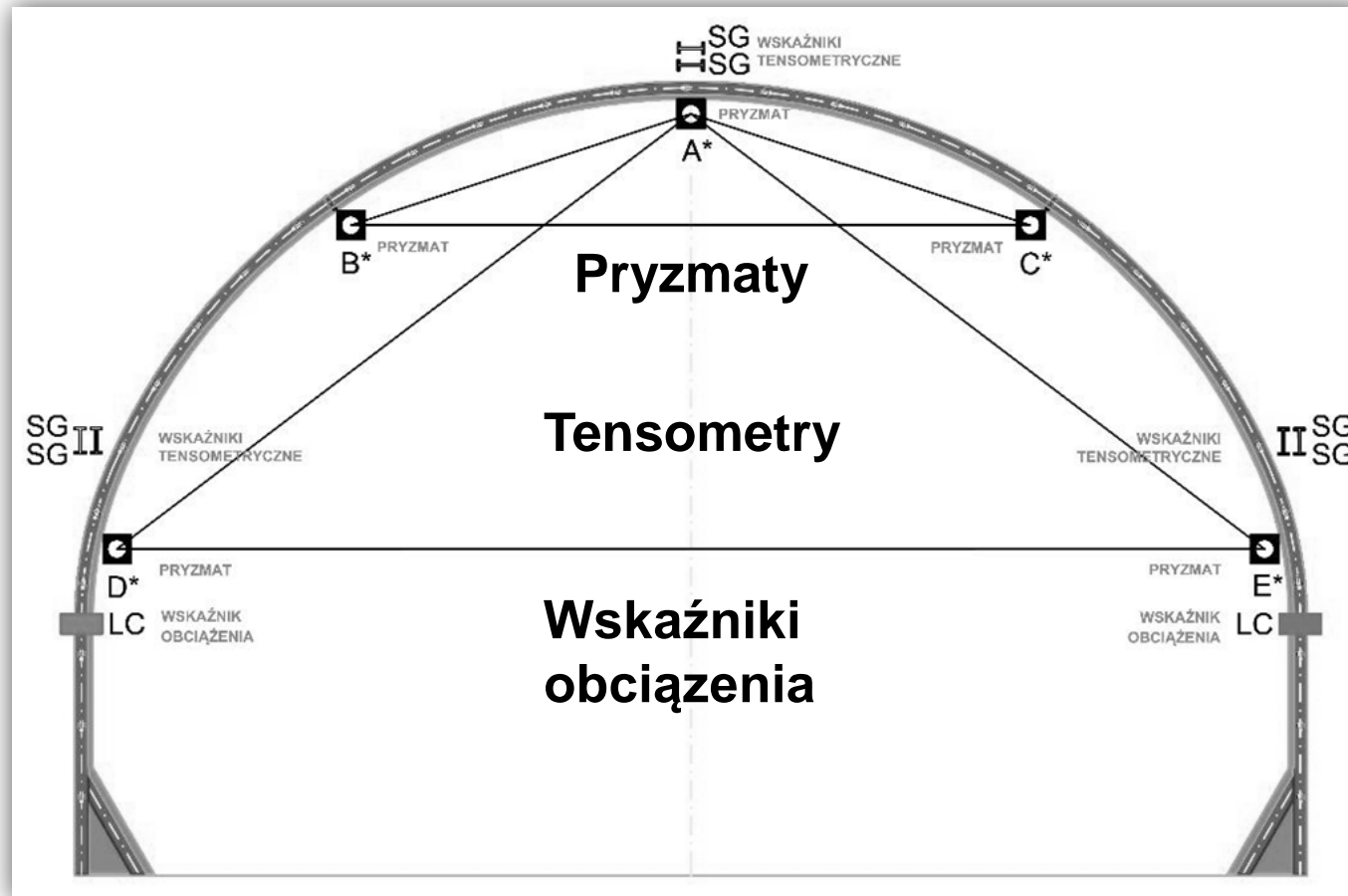


Monitoring tuneli

- **PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7,**
- **PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7,**
- **ISO 18674 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Monitorowanie geotechniczne za pomocą urządzeń terenowych (10 części).**



Monitoring geotechniczny **OBUDOWY WSTĘPNEJ** konwergencja, stan naprężeń i odkształceń żeber stalowych



Monitoring geotechniczny **OBUDOWY WSTĘPNEJ** konwergencja, stan naprężeń i odkształceń żeber stalowych

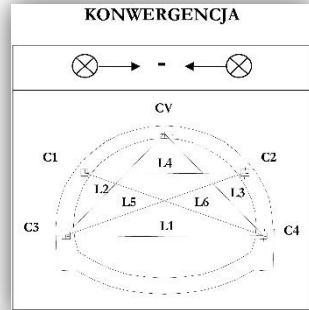


**INSTALACJA WSKAŹNIKA
OBCIĄŻENIA W ŻEBRZE
STALOWYM**

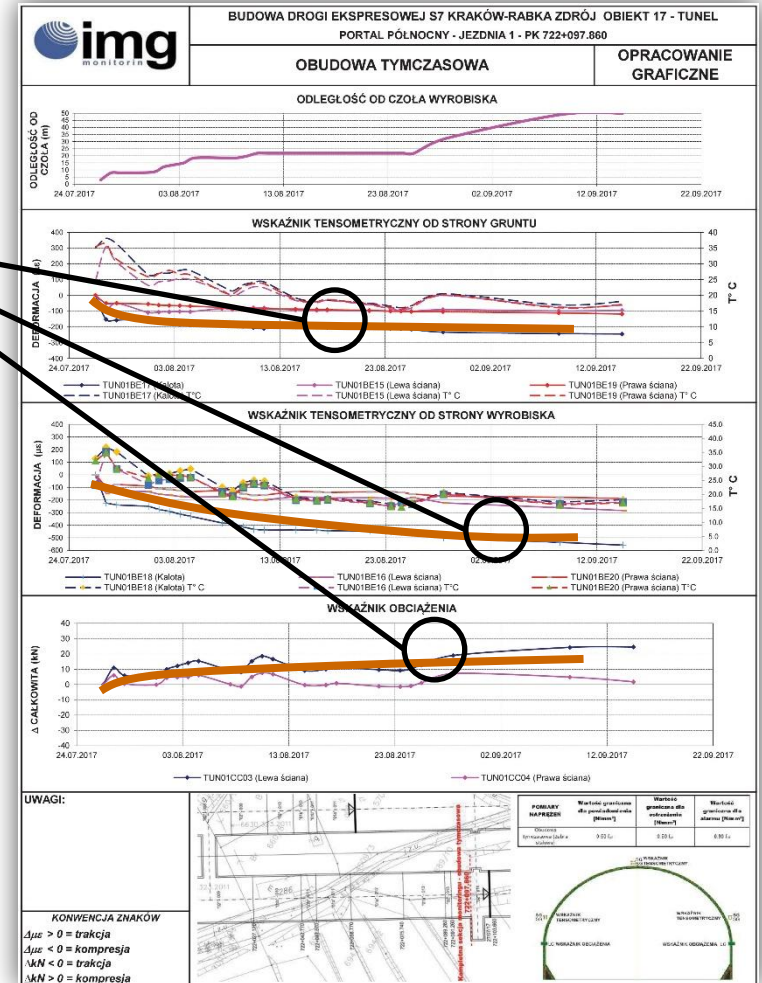
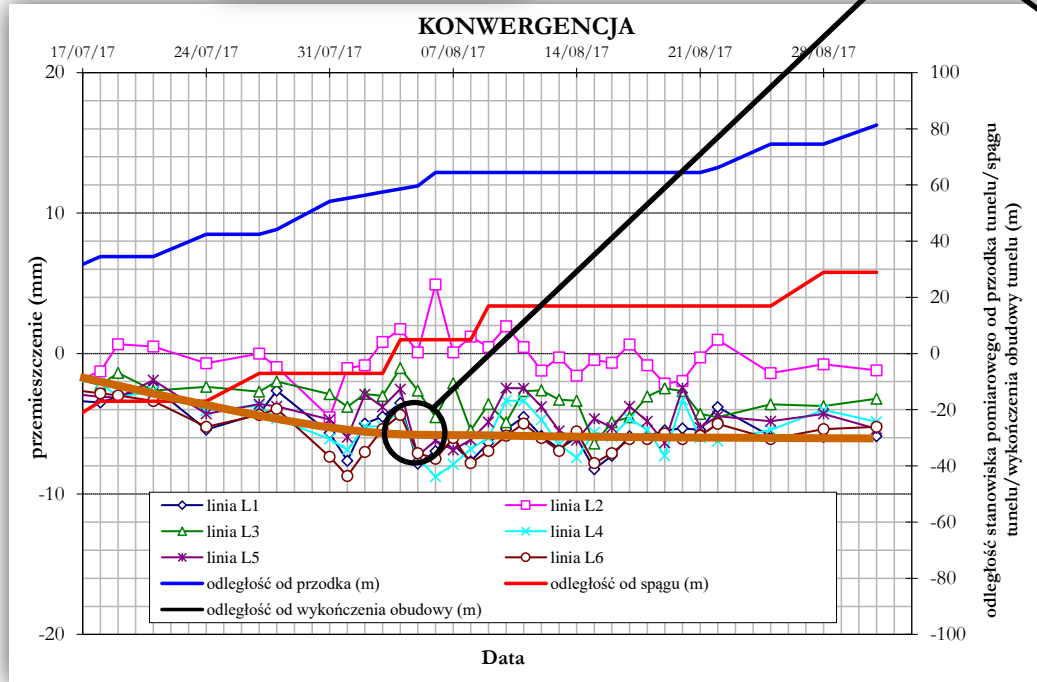


**INSTALACJA TENSOMETRÓW
NA ŻEBRZE STALOWYM**

Monitoring geotechniczny **OBUDOWY WSTĘPNEJ** konwergencja, stan naprężeń i odkształceń żeber stalowych



Równowaga

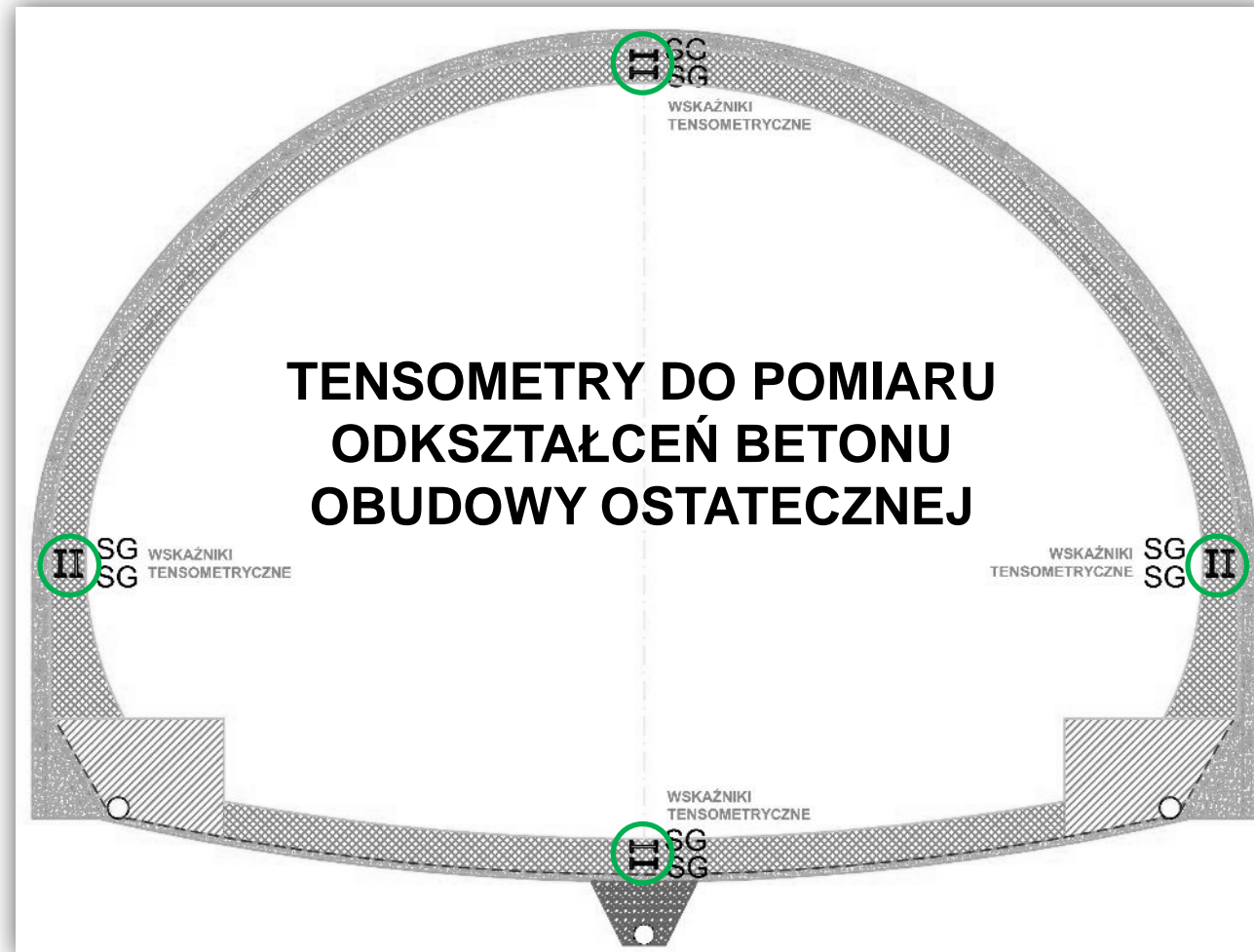


Wykres konwergencji względem odległości przodka tunelu

Wykresy sił normalnych i odkształceń żebra stalowego względem odległości przodka tunelu



Monitoring strukturalny **OBUDOWY OSTATECZNEJ** stan naprężeń i odkształceń betonu

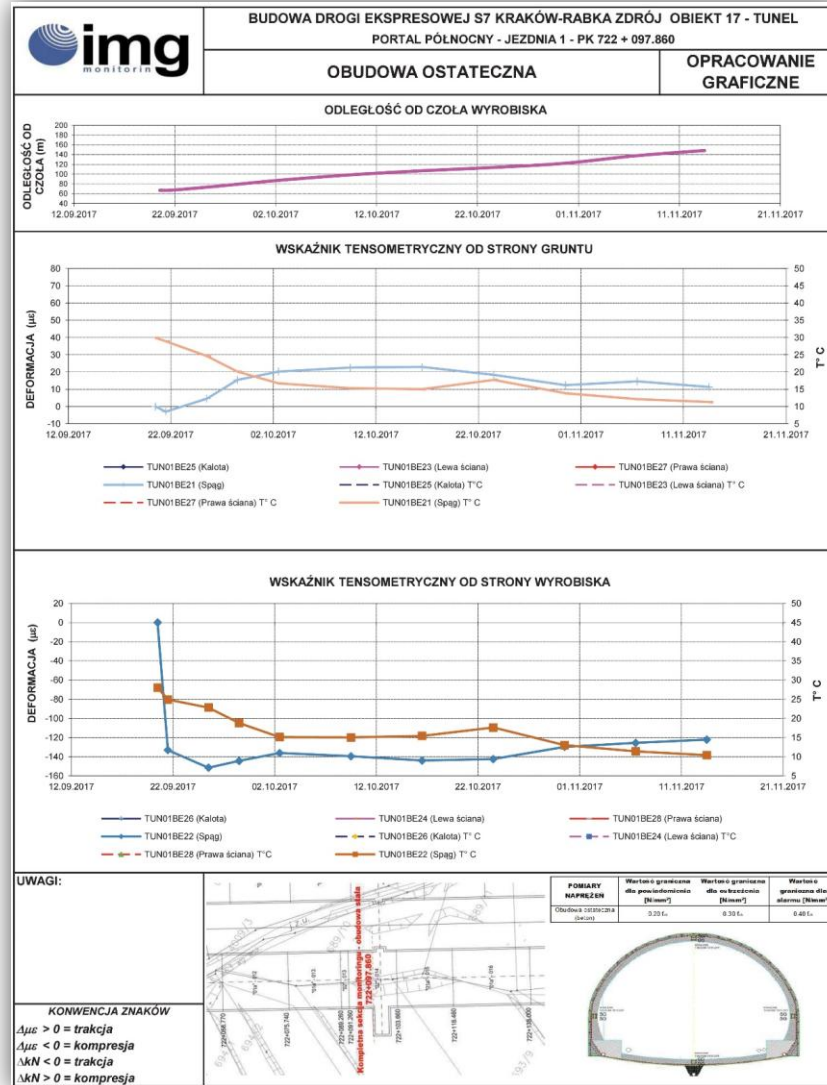


Monitoring strukturalny **OBUDOWY OSTATECZNEJ** stan naprężeń i odkształceń betonu



INSTALACJA TENSOMETRÓW NA ZBROJENIU OBUDOWY OSTATECZNEJ

Monitoring strukturalny **OBUDOWY OSTATECZNEJ** stan naprężeń i odkształceń betonu



Wykresy odkształceń betonu względem odległości przodka tunelu

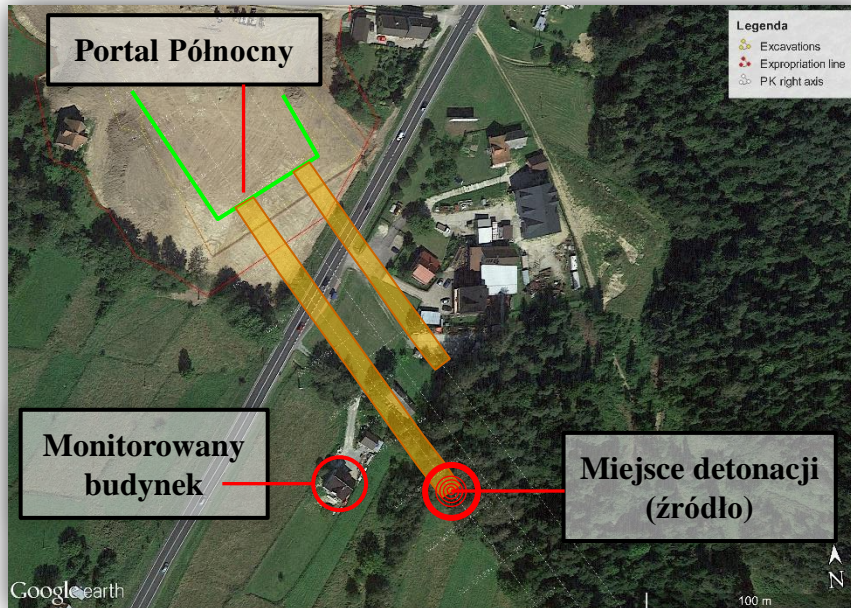




AGH

Monitoring drgań wywołanych prowadzeniem robót MW

PN-B-02170:2016-12 – Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki

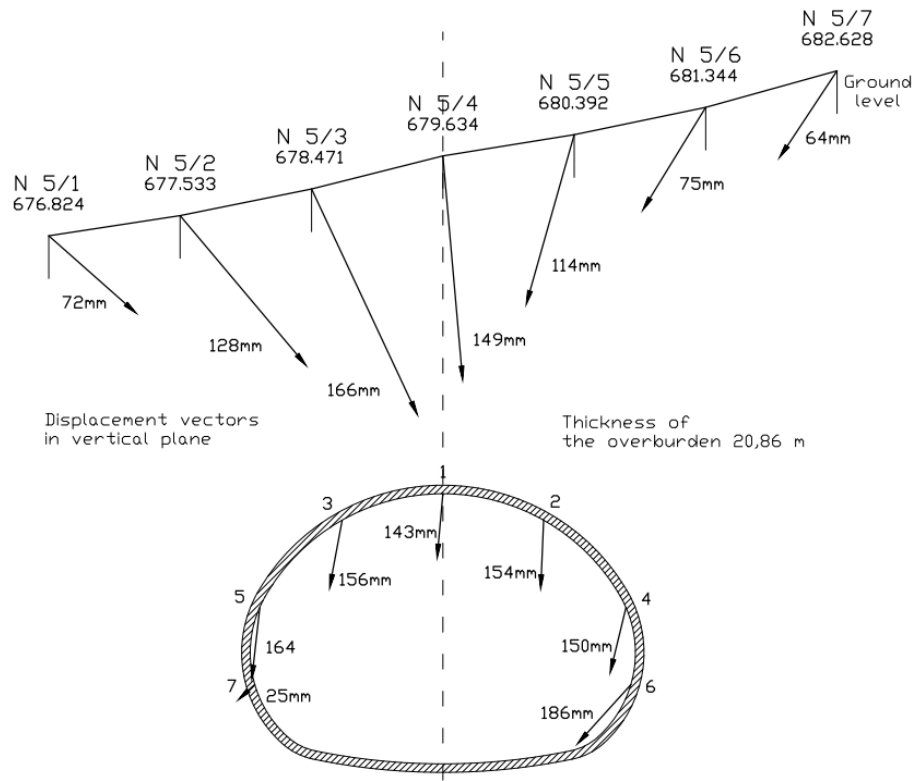


Do oceny drgań przekazywanych przez podłoże na budynki, aktualnie w Polsce, obowiązuje norma PN-B-02170:2016-12, która w grudniu 2016 roku zastąpiła normę PN-B-02170:1985.

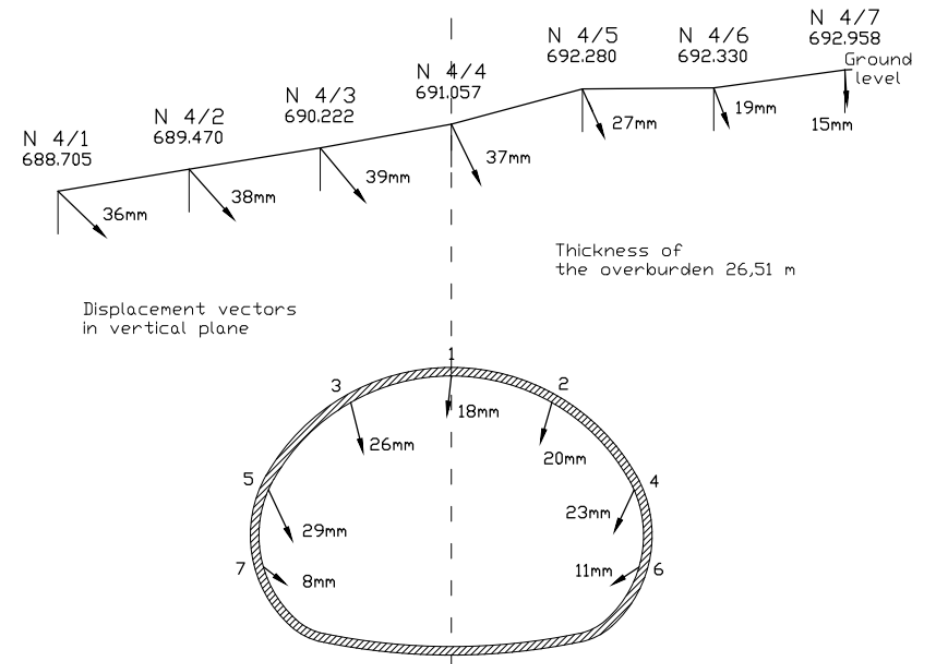


Wpływ drażenia tunelu na otoczenie

Deformacje powierzchni



212 m

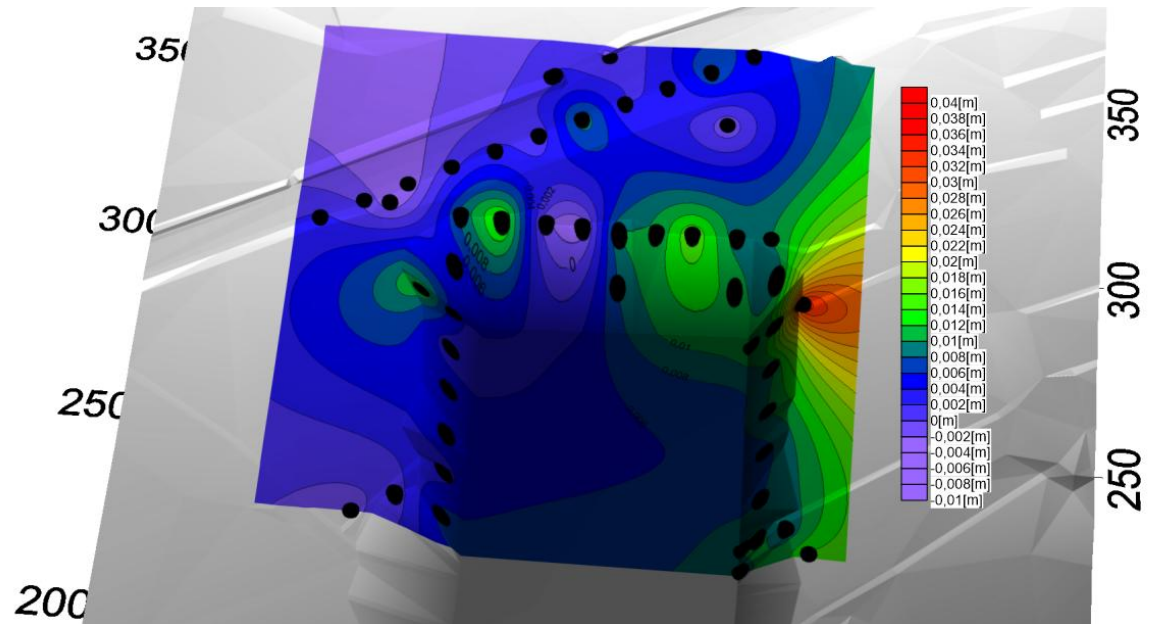


306 m

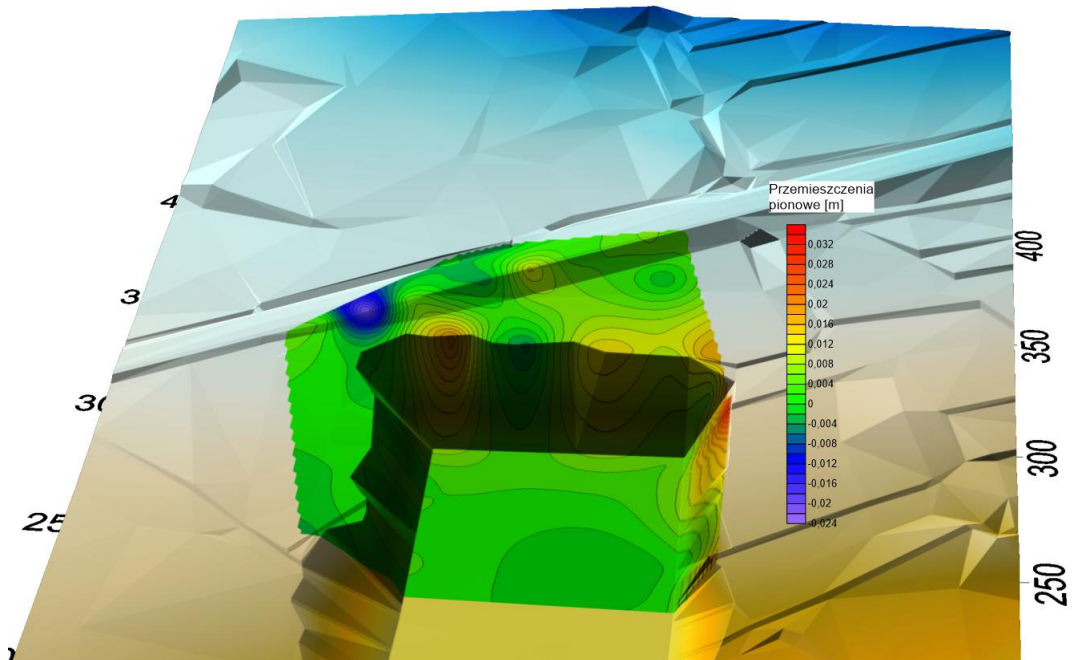
Wpływ drażenia tunelu na otoczenie

Portal północny

26.06.2017

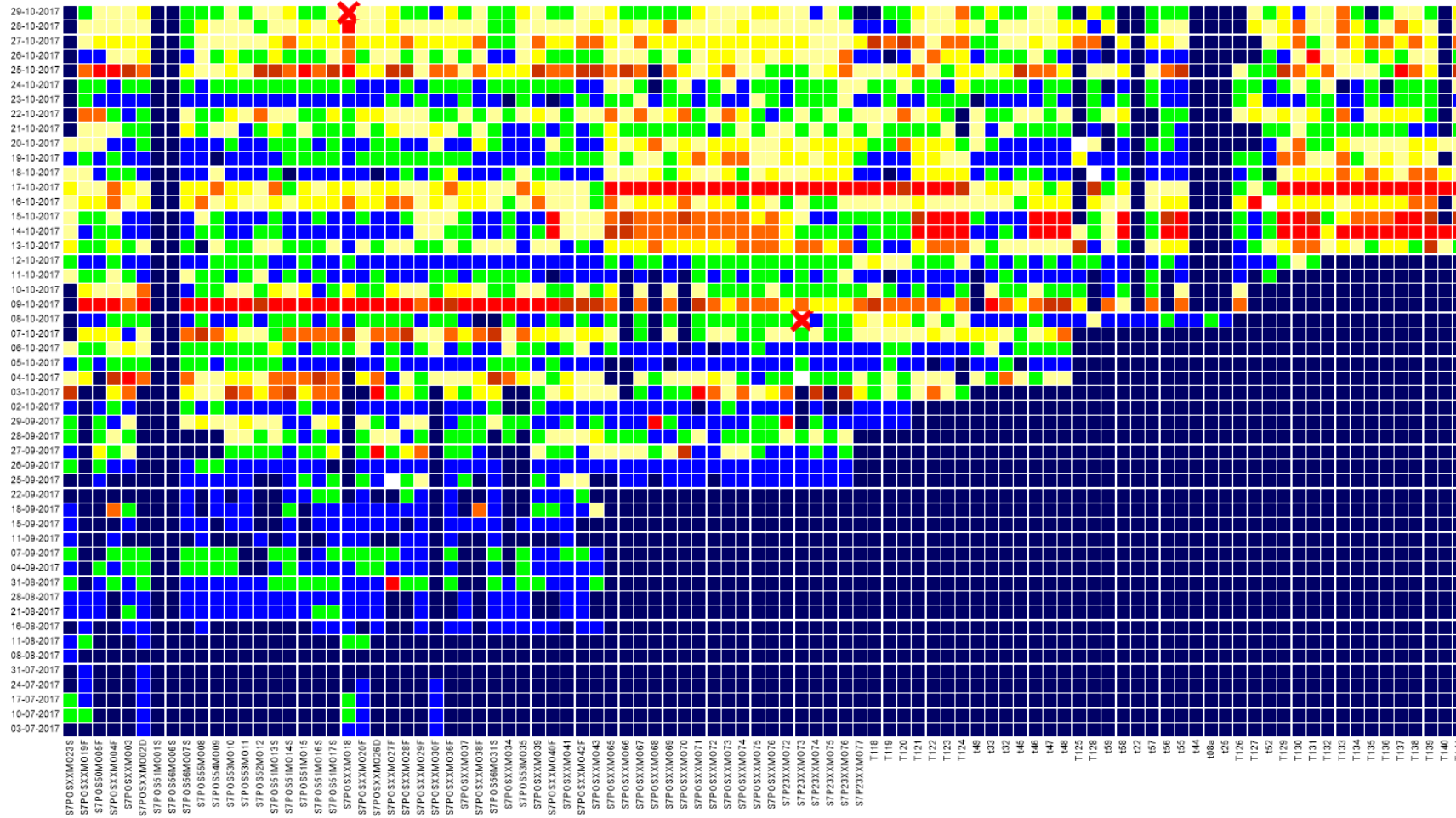


25.10.2017



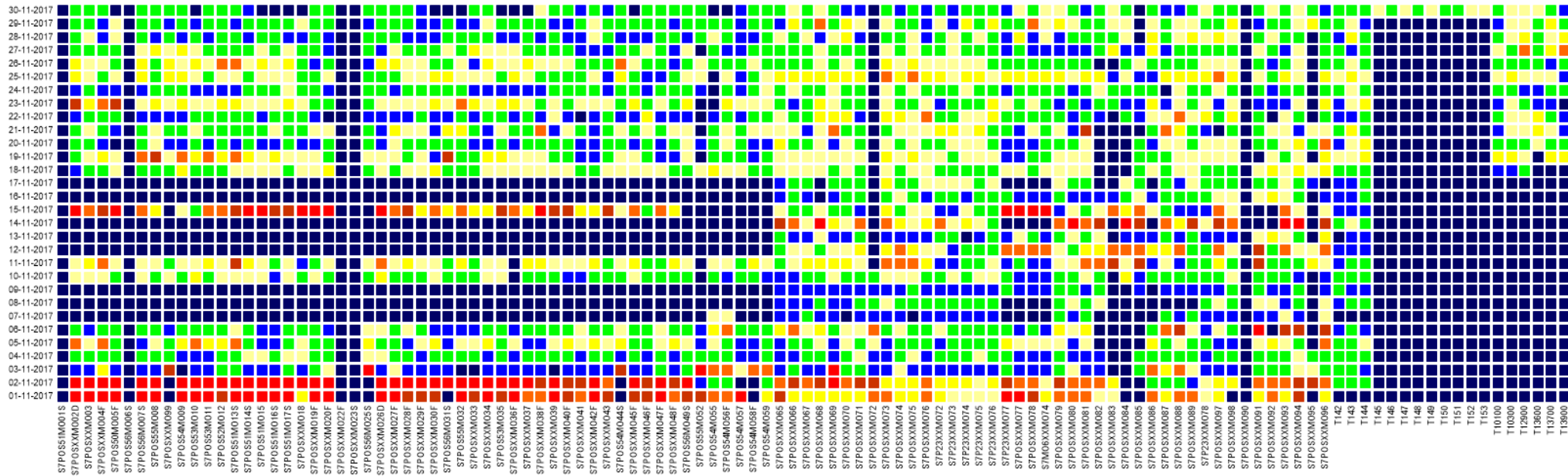
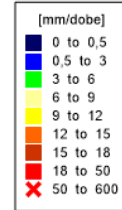
Wpływ drażenia tunelu na otoczenie

Skarpa czołowa



Prędkości przemieszczeń poziomych skarpa czołowa

Wpływ drażenia tunelu na otoczenie



Prędkości przemieszczeń poziomych, skarpa czołowa



PODSUMOWANIE

- Projektowanie obudów tuneli wymaga od projektanta kompleksowej wiedzy zarówno z zakresu budownictwa podziemnego i geomechaniki (geoinżynierii)
- Dotychczas stosowane metody wyznaczania obciążeń działających na obudowę oparte o teorie m.in. *Protodiakonowa, Cymbariewicza*, etc. nie uwzględniają współpracy obudowy z górotworem
- Uwzględnienie współpracy obudowy z górotworem (GRC) oraz obliczenia numeryczne pozwalają na znaczące zmniejszenie wartości obciążeń działających na obudowę, a tym samym optymalizację jej kształtu i geometrii
- Monitoring się opłaca

