



AKTUALNE PROBLEMY TECHNICZNE PRZY REALIZACJI MOSTÓW SPRĘŻONYCH

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG

Katedra Konstrukcji Inżynierskich
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska





LOKALNE PROBLEMY W OBRĘBIE SKUPIONYCH SIŁ KABLI SPRĘŻAJĄCYCH

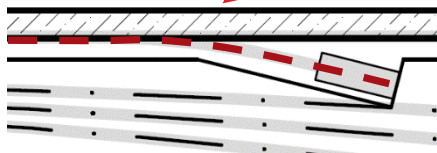
Zarysowanie w obrębie
głowicy kotwiącej



Zarysowanie płyt w obszarze
stopniowej mobilizacji sprężenia



ZIDENTYFIKOWANE PROBLEMY



Zarysowanie w miejscu
zakrzywienia kabla



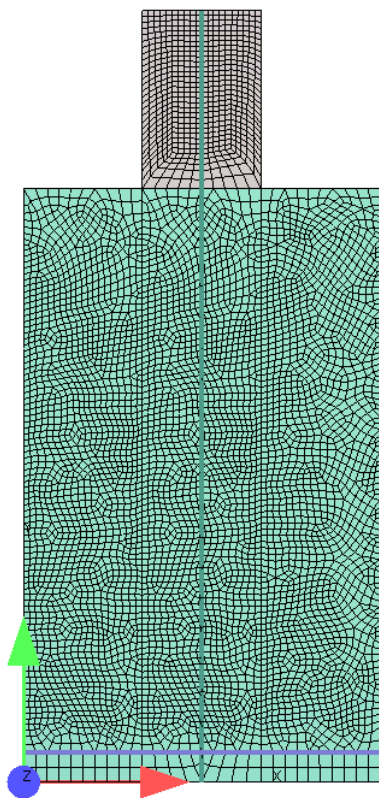
Zarysowanie w miejscu
styku segmentów



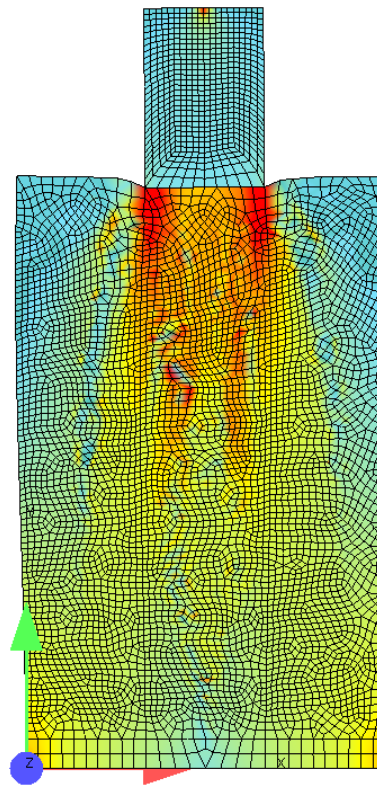


ZAKOTWIENIE KABLA - ŚCISKANIE BLOKU BETONOWEGO I ŻELBETOWEGO

MODEL BEZ ZBROJENIA
POPRZECZNEGO



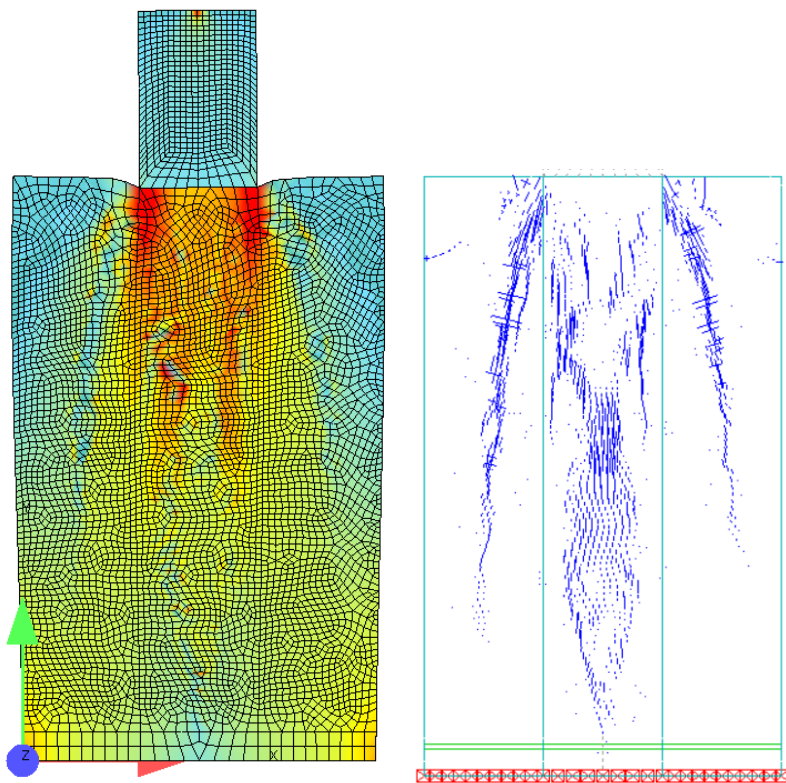
WIZUALIZACJA



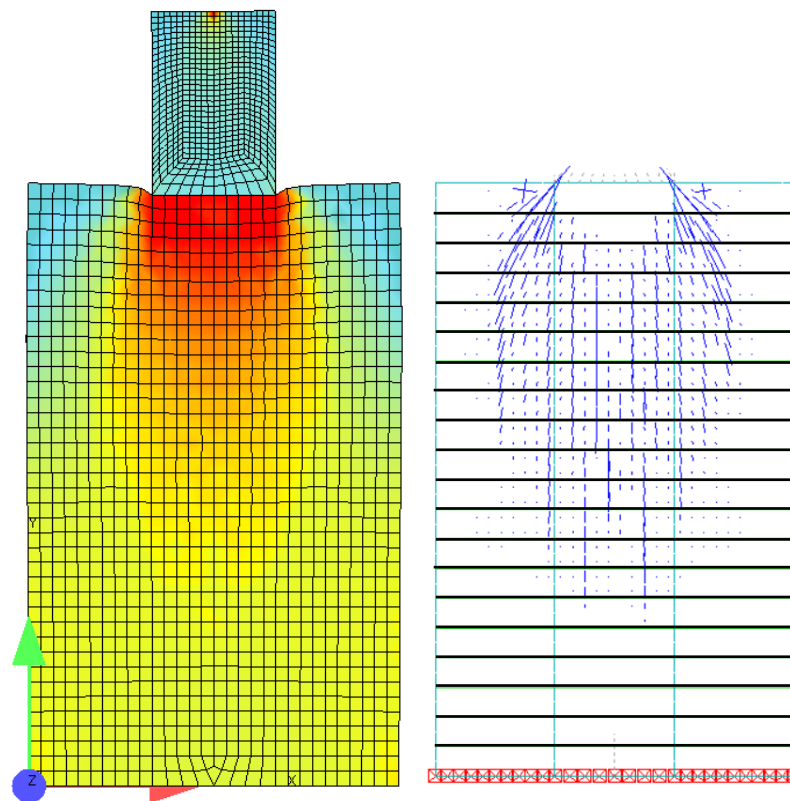
DEFORMACJA



ZAKOTWIENIE KABLA



MODEL BEZ ZBROJENIA
POPRZECZNEGO

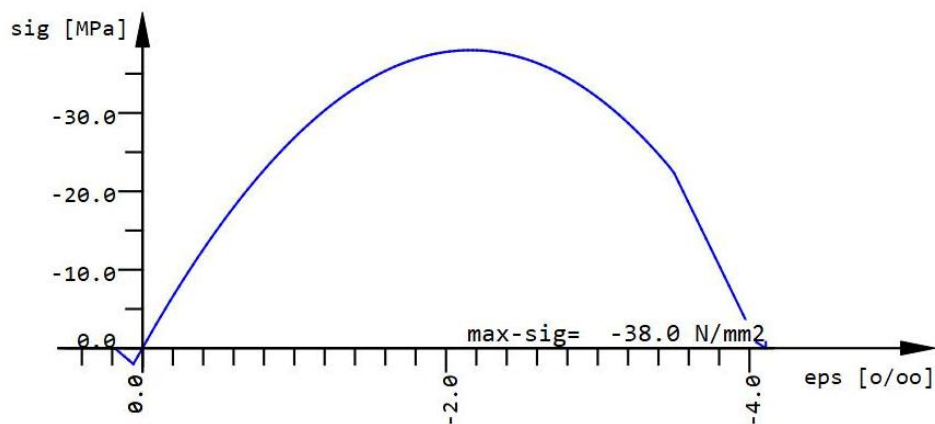


MODEL ZE ZBROJENIEM
POPRZECZNYM

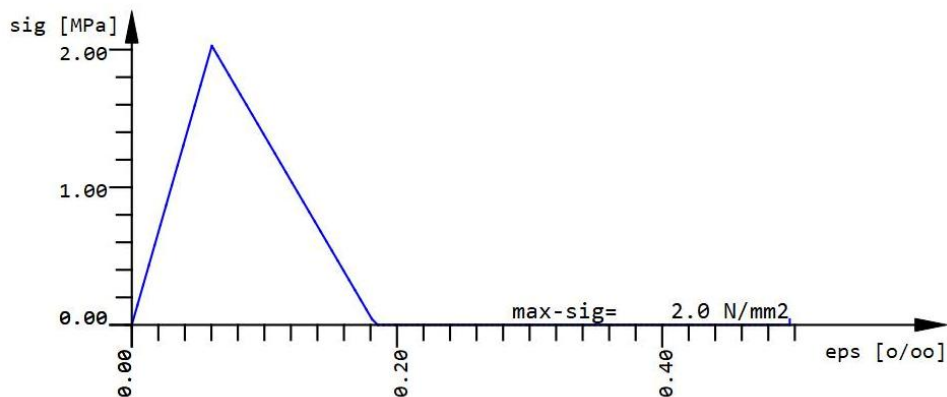


PRAWA MATERIAŁOWE

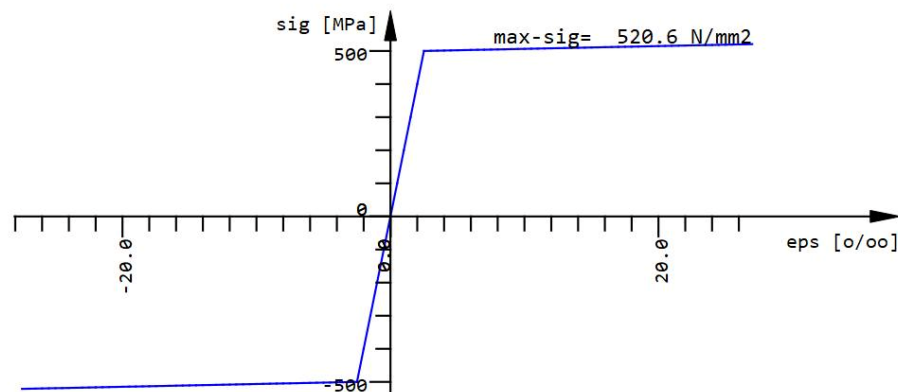
Prawo materiałowe betonu



Prawo materiałowe betonu przy rozciąganiu

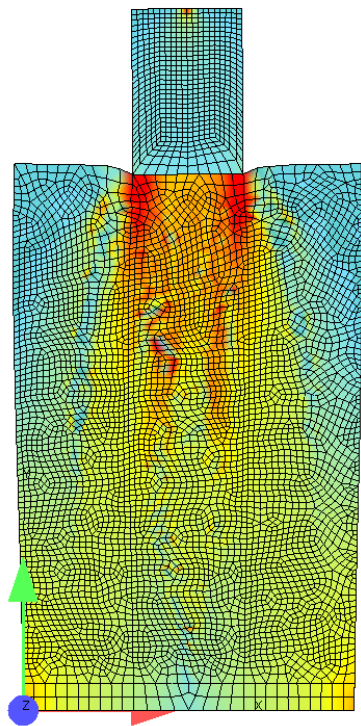


Prawo materiałowe stali zbrojeniowej



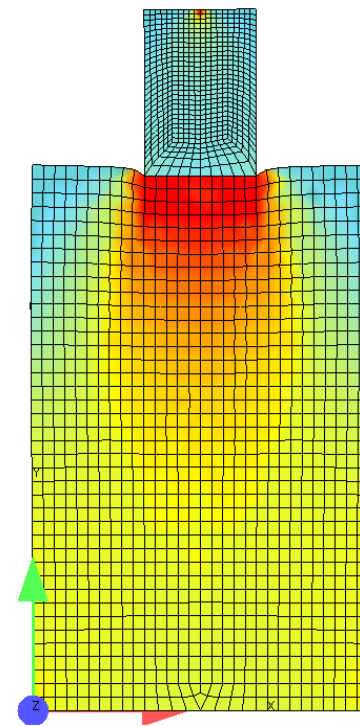
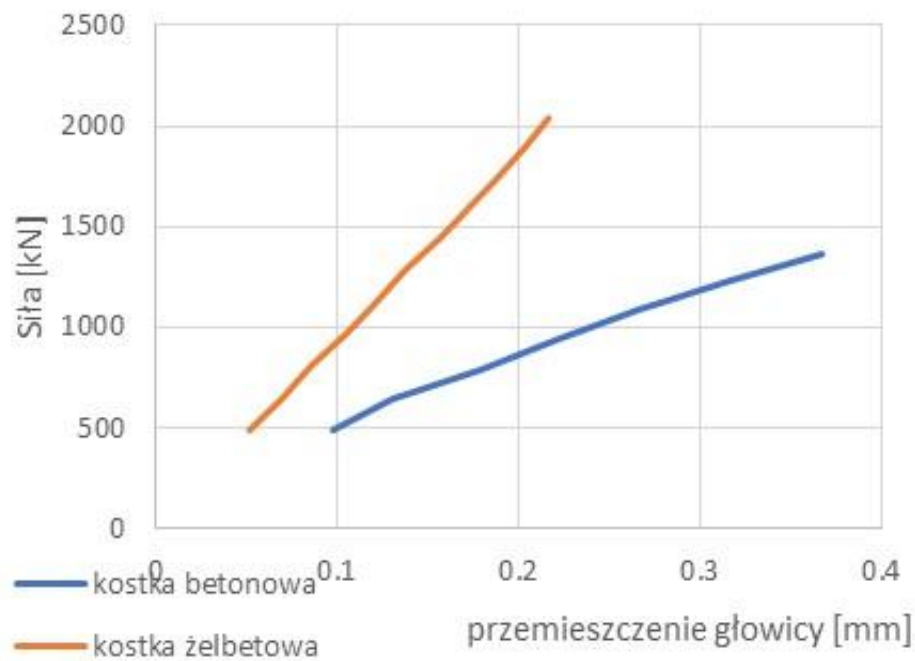


ZAKOTWIENIE KABLA



MODEL BEZ ZBROJENIA
POPRZECZNEGO

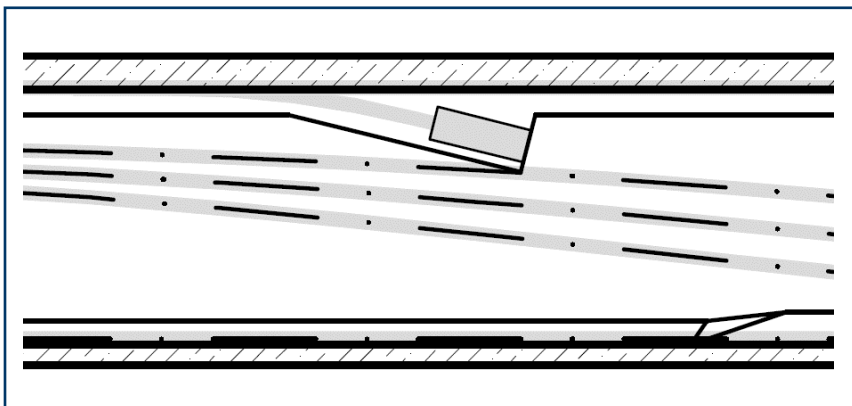
Test ściskania



MODEL ZE ZBROJENIEM
POPRZECZNYM



ZAKRZYWIENIE KABŁA SPRĘŻAJĄCEGO



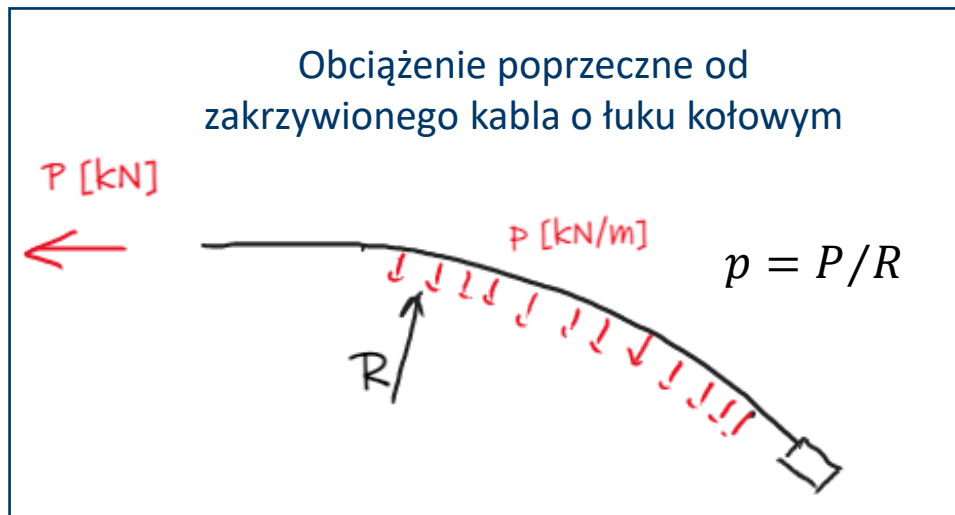
Przykład – kabel 19 splotowy



$$P = 3\,700 \text{ kN}$$

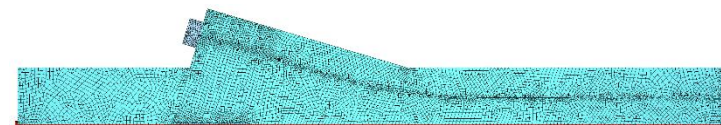
$$R = 7 \text{ m} > 6,2 = R_{\min}$$

$$p = 528 \text{ kN/m}$$



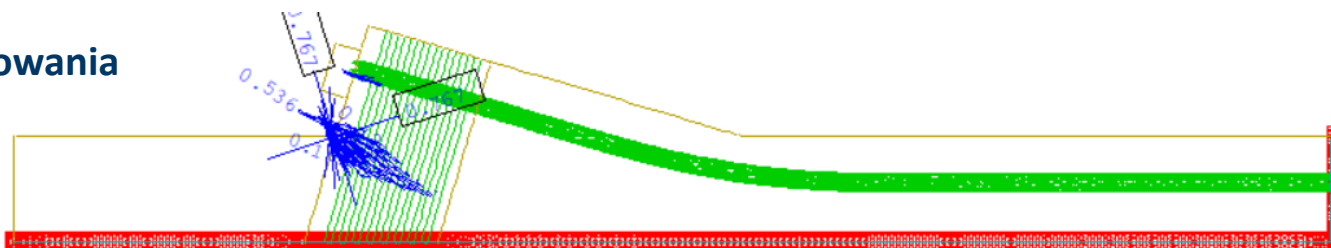


ZAKRZYWIENIE KABLA SPRĘŻAJĄCEGO

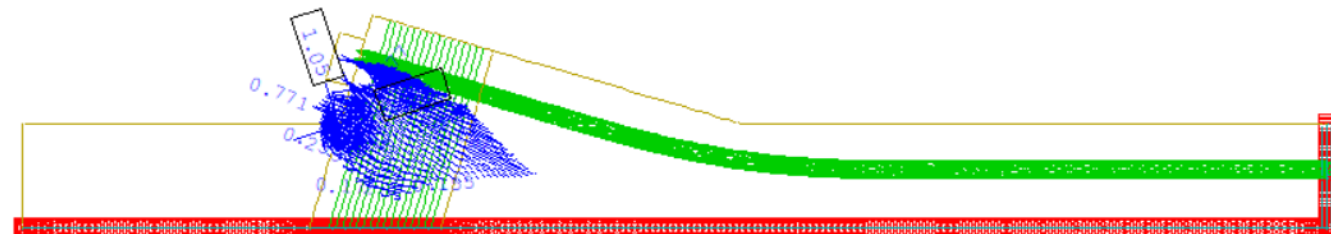


Rozwój obszaru zarysowania

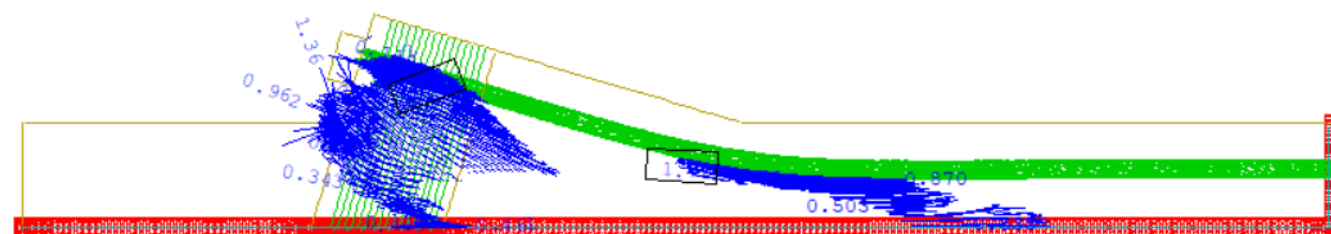
$P = 1800 \text{ kN}$



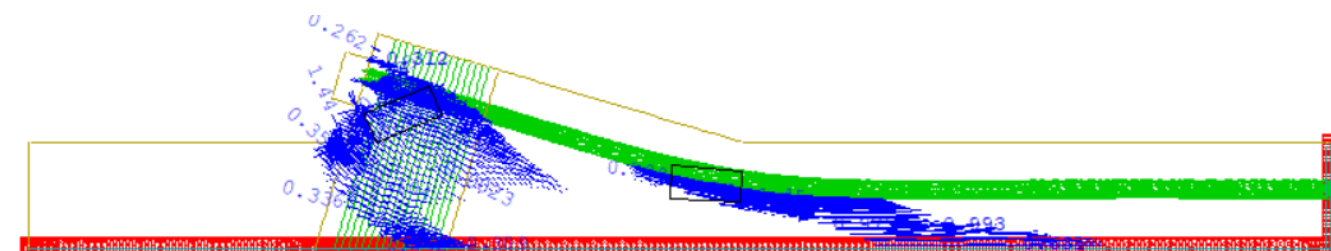
$P = 3600 \text{ kN}$



$P = 4200 \text{ kN}$

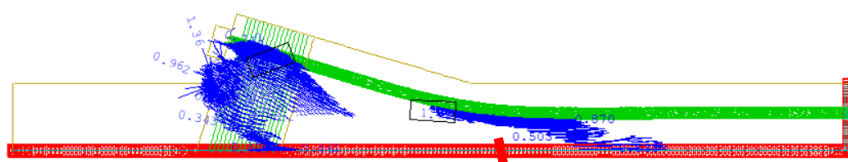
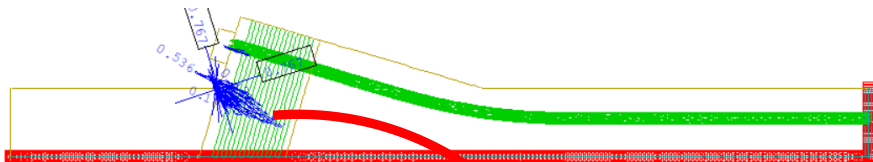
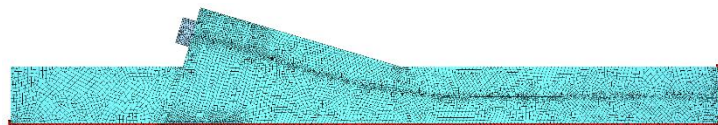


$P = 4600 \text{ kN}$





ZAKRZYWIENIE KABLA SPRĘŻAJĄCEGO

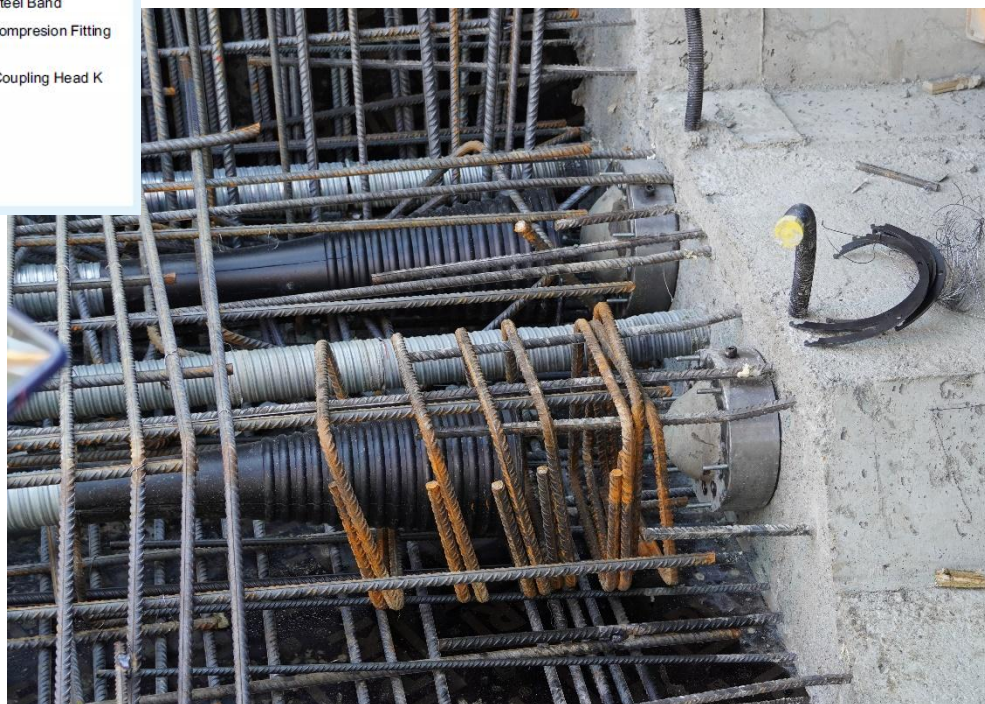
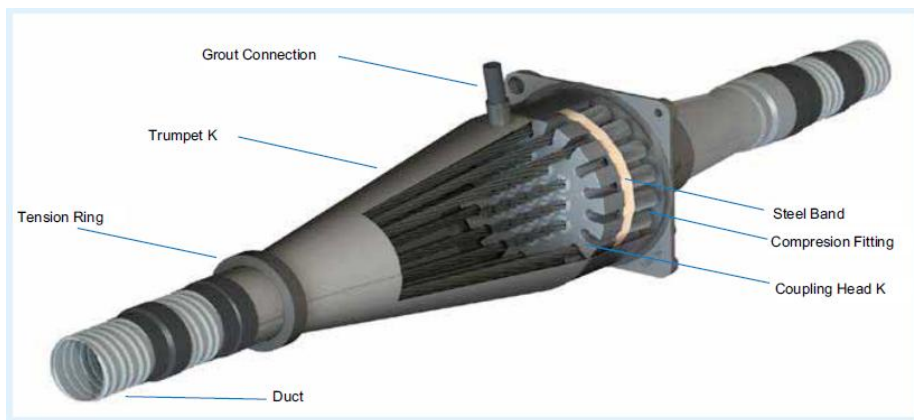




POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

UCIĄGLENIE SPRĘŻENIEM SEGMENTÓW

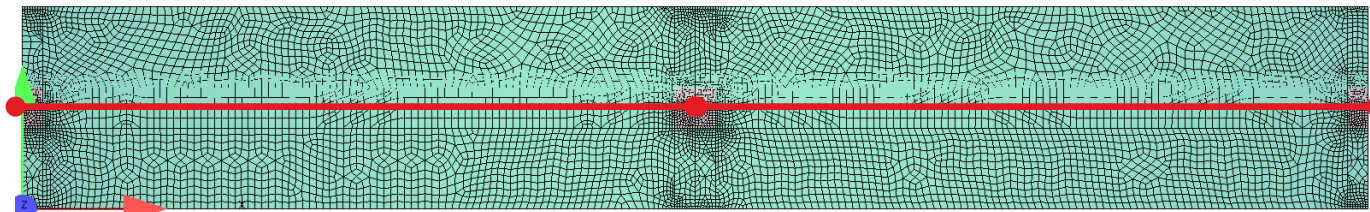




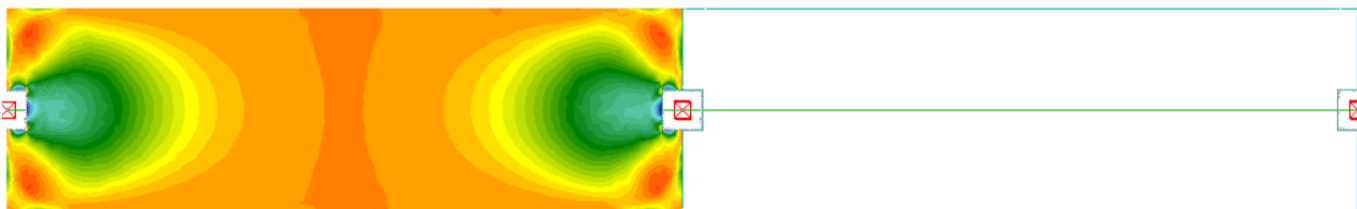
c)

UCIĄGLENIE SPRĘŻENIEM SEGMENTÓW

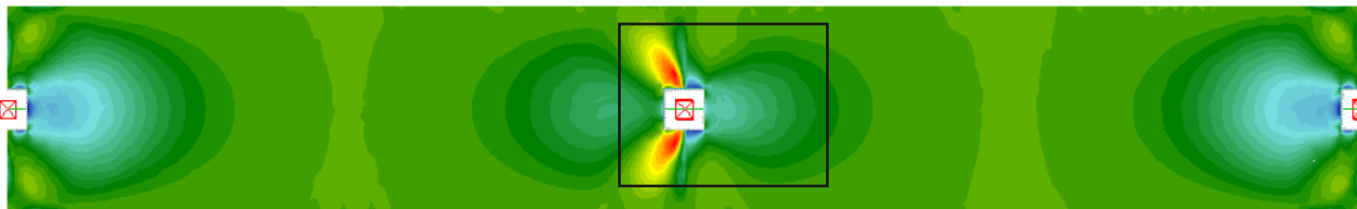
Model
numeryczny



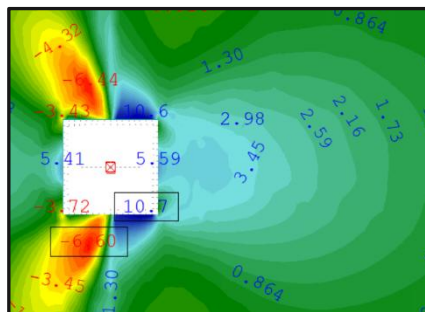
Sprężenie
segmentu 1



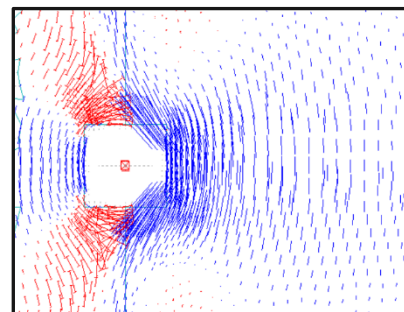
Sprężenie
segmentu 2
za pomocą
łącznika



Wartości naprężeń
głównych – kierunek I



Kierunek I naprężeń
głównych

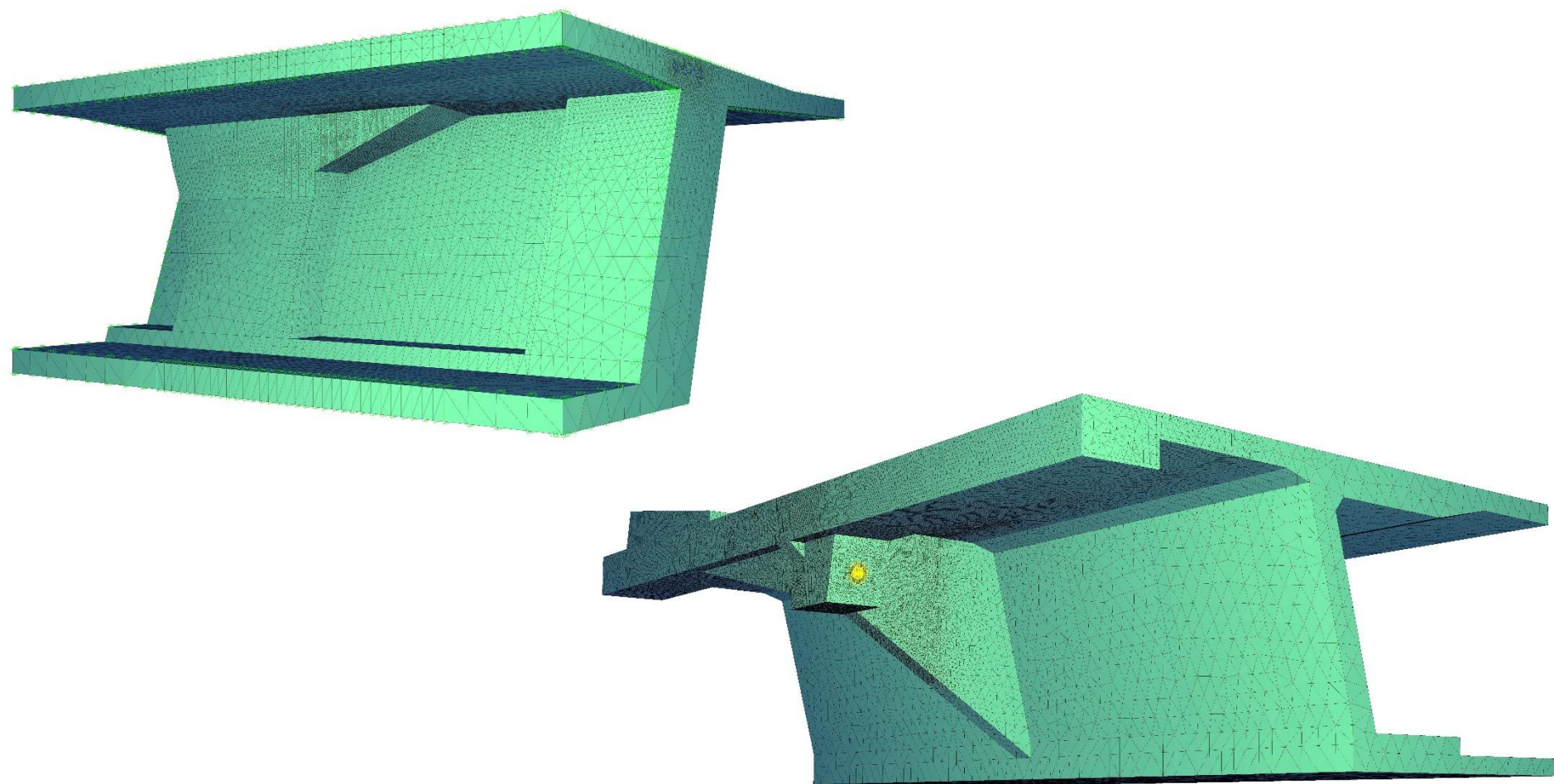




POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODELE 3D KONSTRUKCJI W OBRĘBIE DUŻYCH SIŁ SKUPIONYCH





POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 1 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA

fot.
(139)

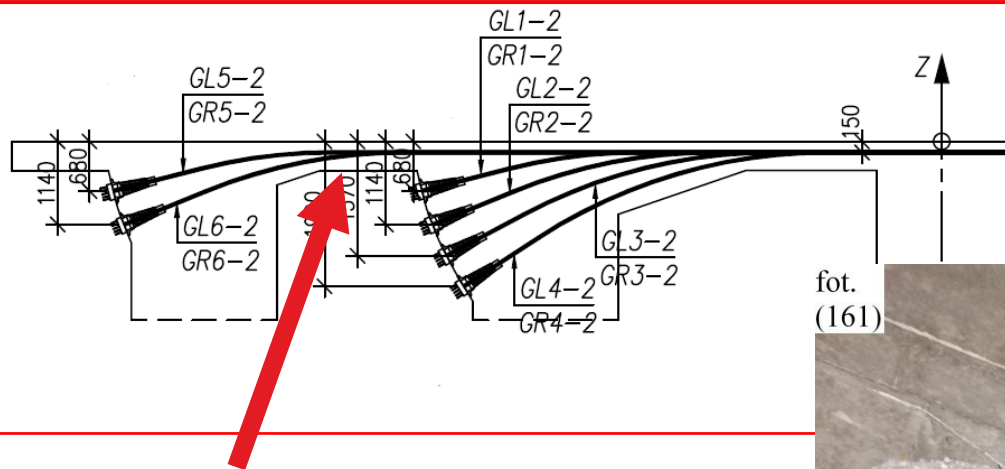


fot.
(144)





MODEL 3D NR 1 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA



fot.
(161)

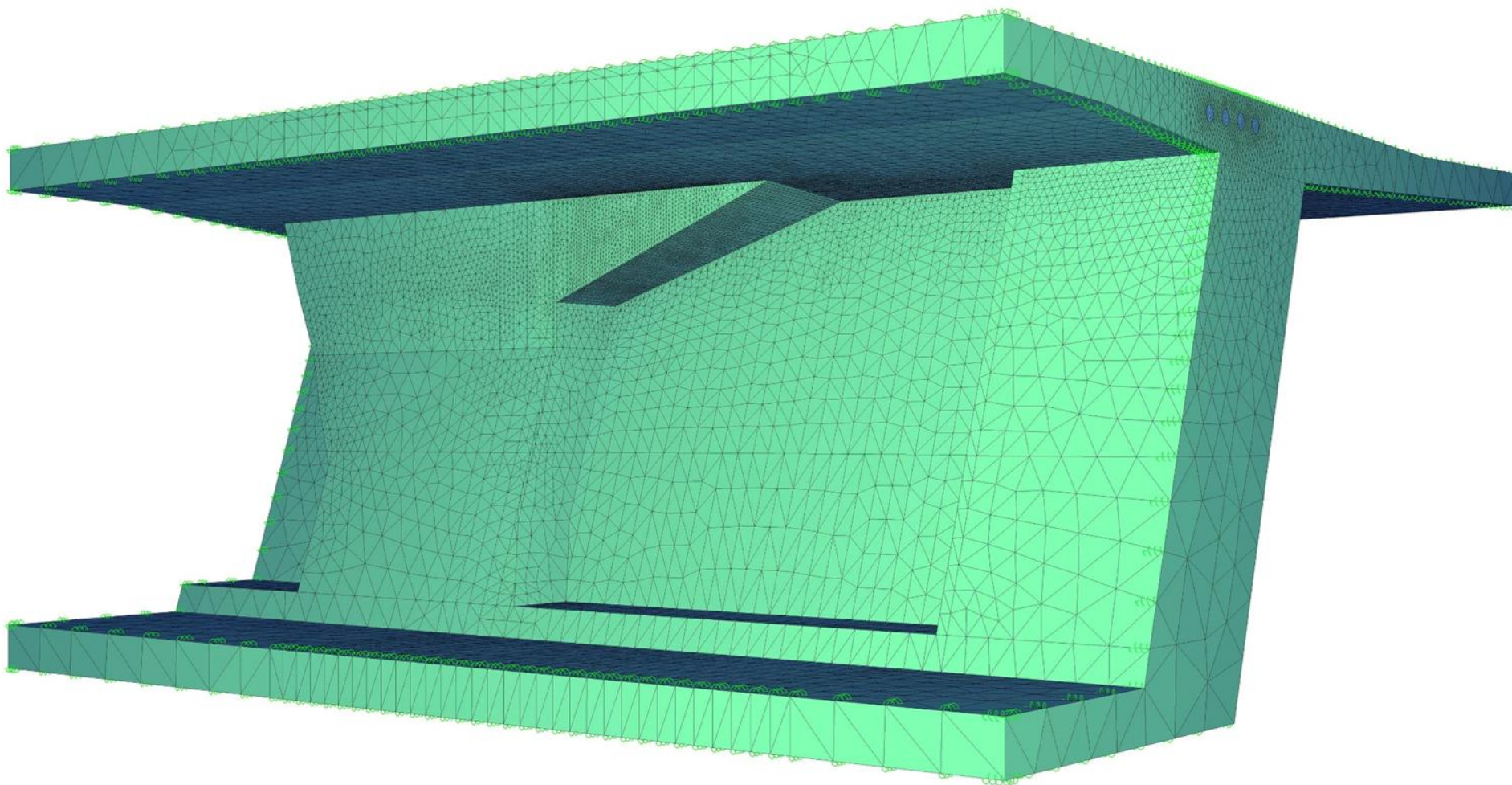




POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 1 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA





POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

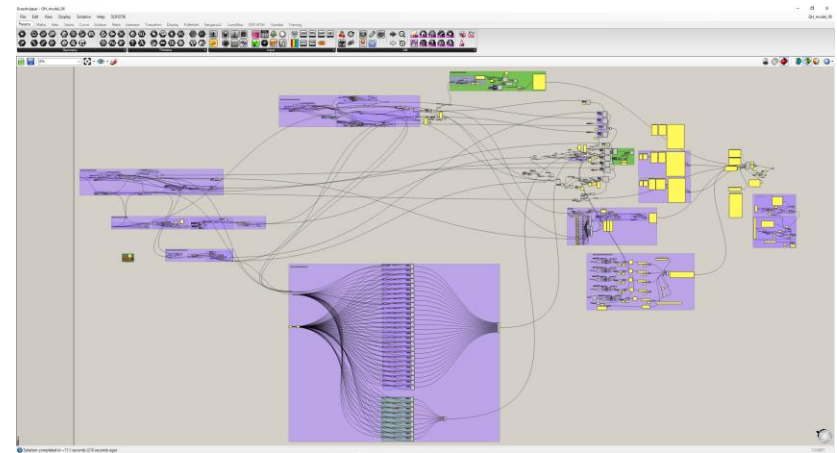
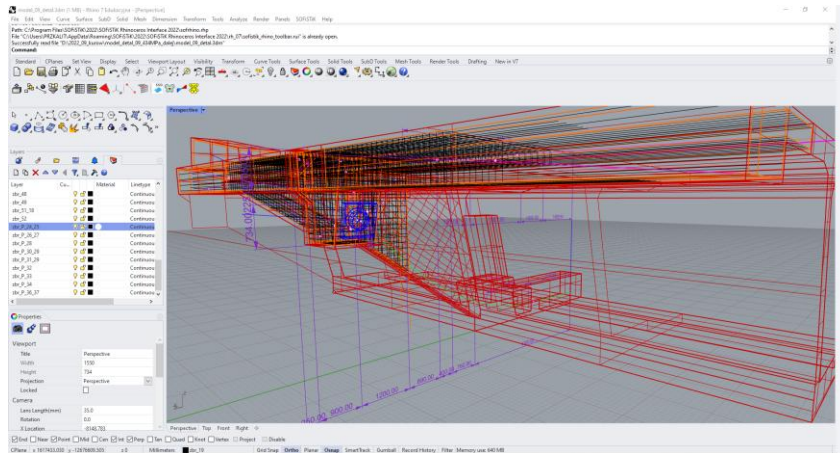
MODEL 3D NR 1 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA



RhinoCeros®



SOFiSTiK

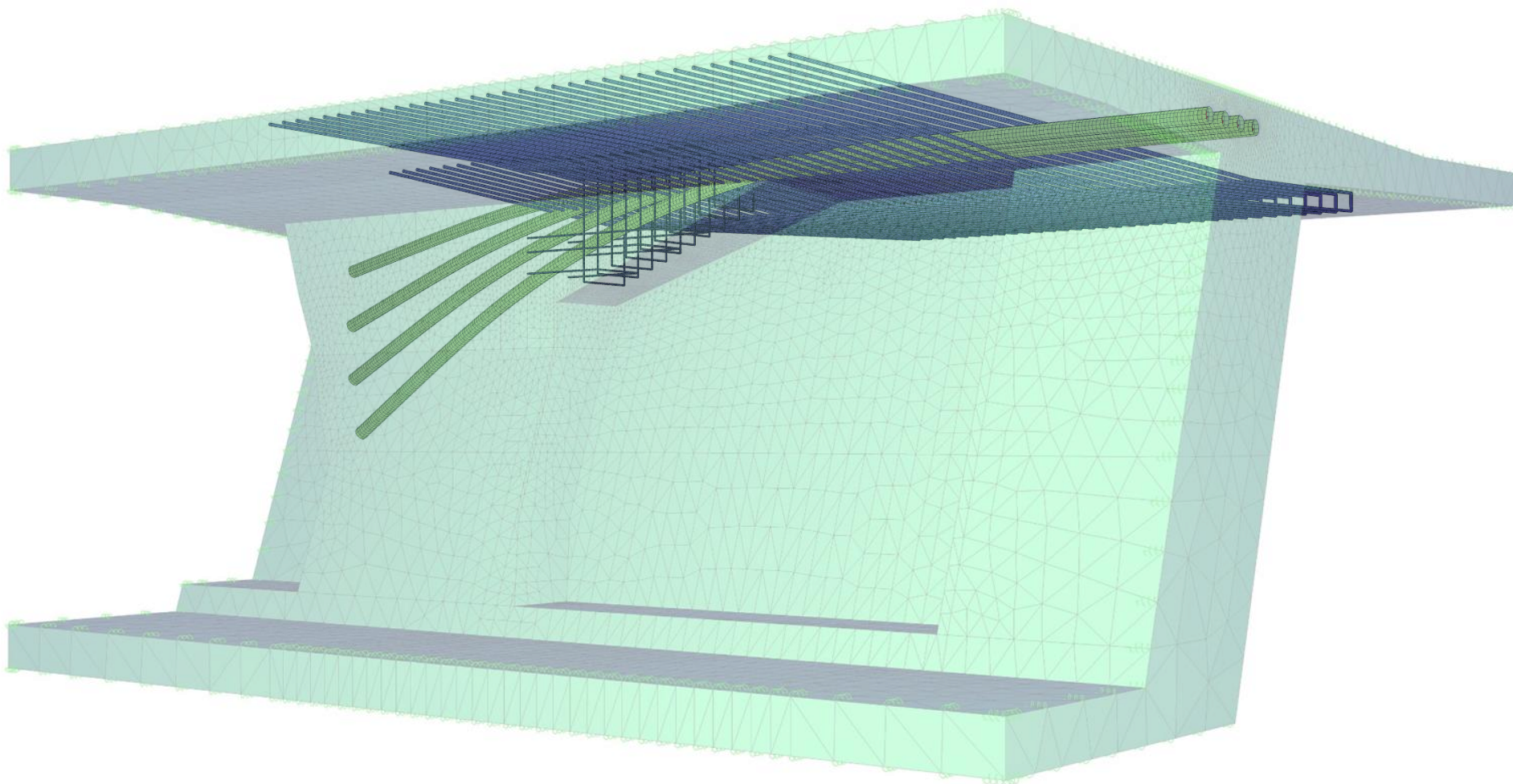




POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 1 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA

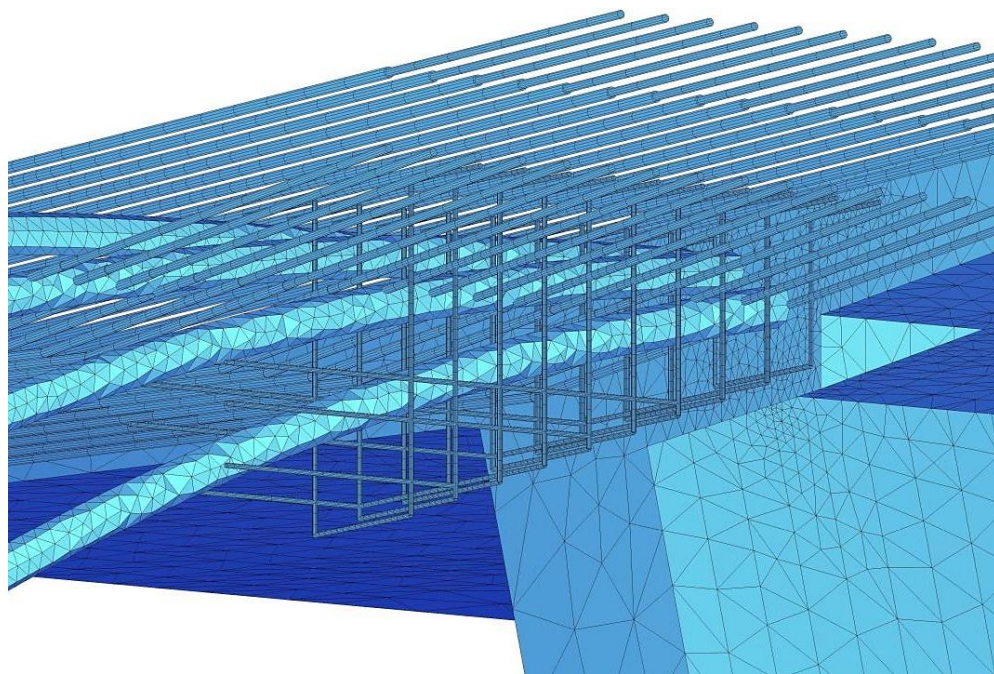
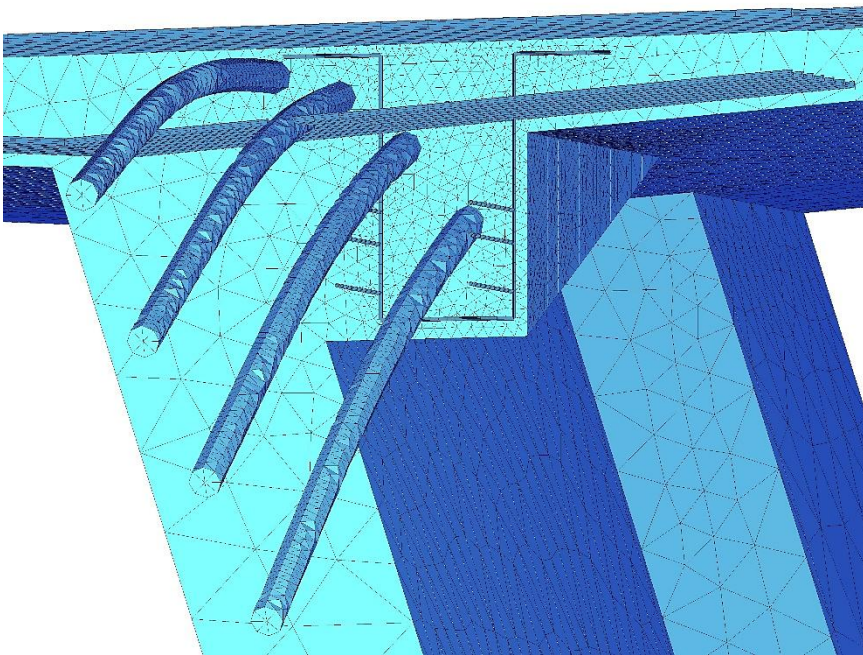




POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 1 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA





MODEL 3D NR 1 – MODEL MATERIAŁU

3.11.12 LADE Elasto-plastic Material Law

Elasto-plastic material according to LADE with non-associated flow rule.

Application range

All materials with friction including rock and concrete (module ASE, 3D solid elements)

Parameters

LADE	Description	Unit	Default
P1	Parameter η_1	—	!
P2	Exponent m	—	!
P3	Uniaxial tensile strength f_t	$[kN/m^2]_{1089}$	0.0
P4	Parameter η_2 for flow rule	—	P1/10
P5	Compressive strength (cap)	$[kN/m^2]_{1089}$	-
P6	Tensile failure strain ε_{tu}	$[\%]_{1081}$	-

$$f = I_1^3 - \left[27 + \eta_1 \cdot \left(\frac{p_a}{I_1} \right)^m \right] \cdot I_3 \leq 0 \quad (3.91a)$$

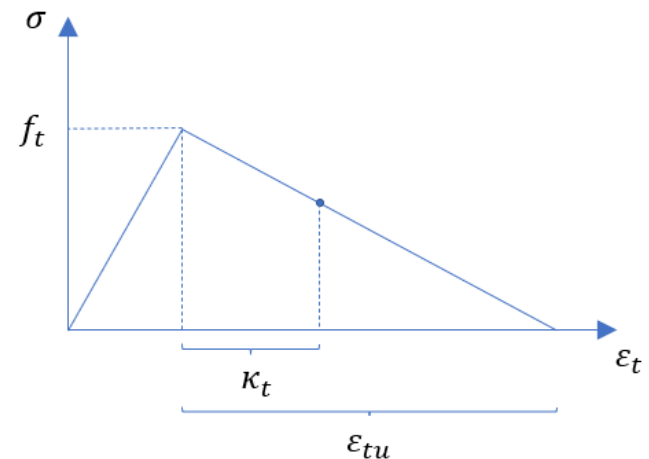
$$g = I_1^3 - \left[27 + \eta_2 \cdot \left(\frac{p_a}{I_1} \right)^m \right] \cdot I_3 \quad (3.91b)$$

with

$p_a = 103.32 kN/m^2$ atmospheric air pressure,

$I_1 = -(\sigma_1 - P_3) - (\sigma_2 - P_3) - (\sigma_3 - P_3)$

$I_3 = -(\sigma_1 - P_3) \cdot (\sigma_2 - P_3) \cdot (\sigma_3 - P_3)$



Liniowe prawo osłabienia

- Lade, P. v. (1982). Three-Parameter Failure Criterion for Concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 108(EM5), 850–863. <https://doi.org/10.1061/jmcea3.0002874>
- da Fontoura, S. A. B. (2012). Lade and modified lade 3D rock strength criteria. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), 1001–1006. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0279-1>



MODEL 3D NR 1 – MODEL MATERIAŁU

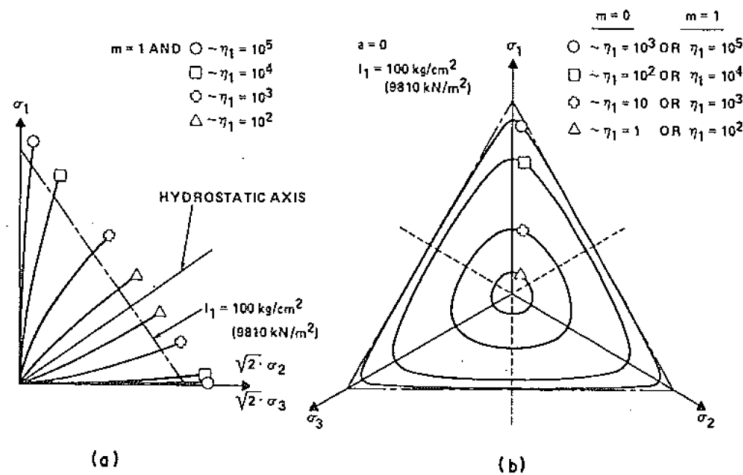


FIG. 1.—Characteristics of Proposed Failure Surfaces Shown in Principal Stress Space. Traces of Failure Surfaces Shown in (a) Triaxial Plane, and (b) Octahedral Plane

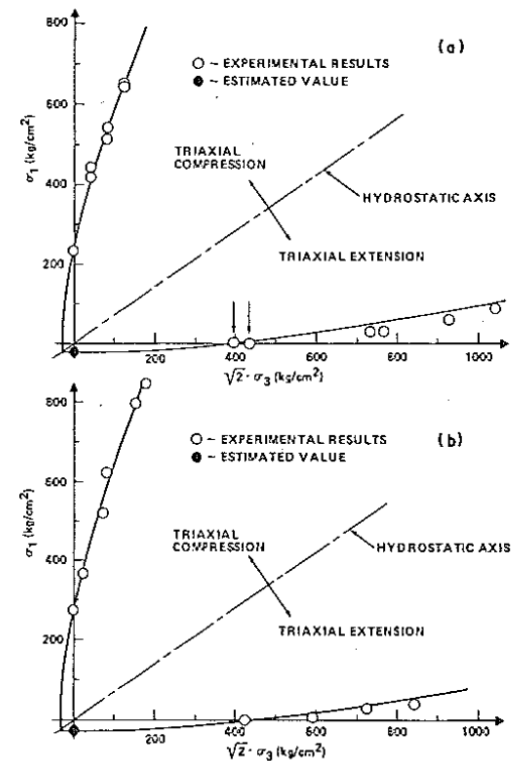
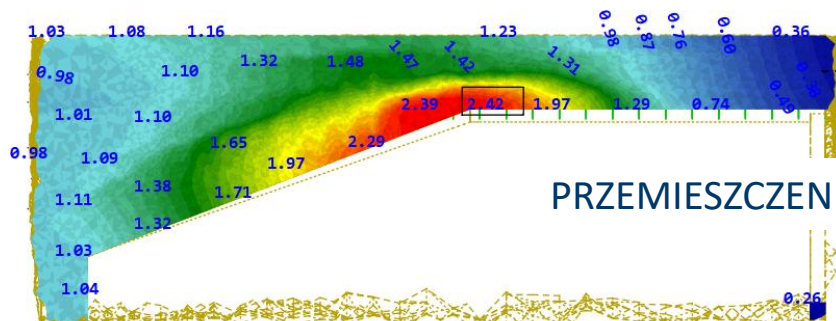
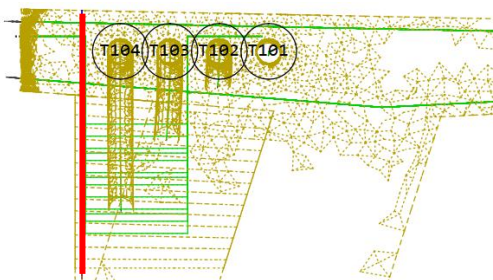


FIG. 6.—Comparison of Proposed Failure Criterion in Triaxial Planes with Results of Triaxial Compression and Extension Tests Performed by (a) Mills and Zimmerman (17) on Mix A Concrete, and by (b) Bertacchi and Rossi (see Ref. 5) ($1 \text{ kg/cm}^2 = 98.1 \text{ kN/m}^2$)

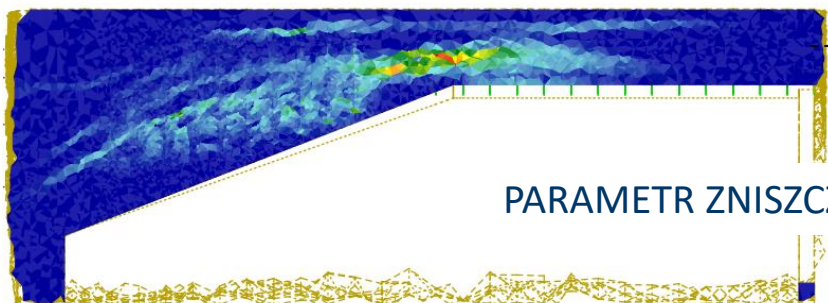
- Lade, P. v. (1982). Three-Parameter Failure Criterion for Concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 108(EM5), 850–863. <https://doi.org/10.1061/jmcea3.0002874>



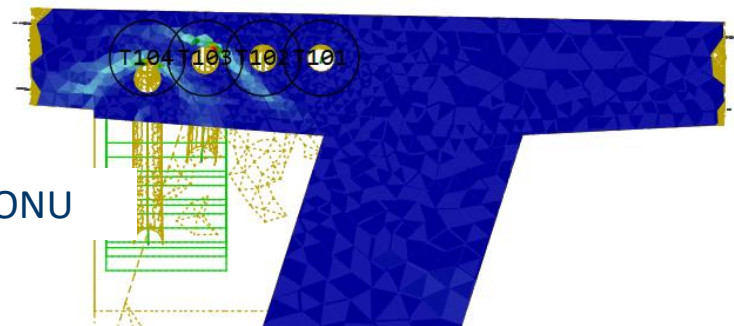
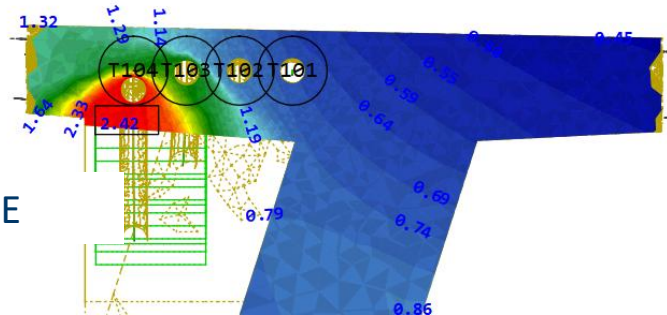
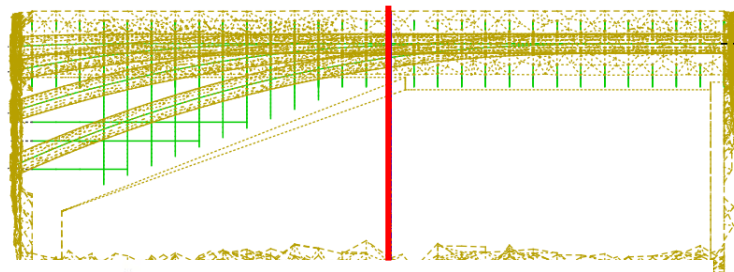
MODEL 3D NR 1 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA



PRZEMIESZCZENIA PIONOWE



PARAMETR ZNISZCZENIA BETONU





POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA





POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA





POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA

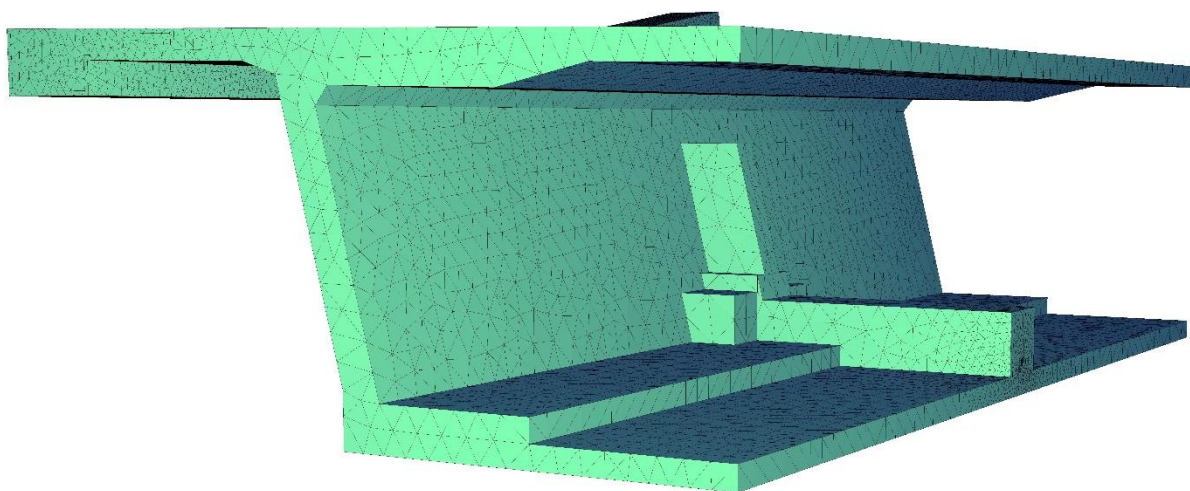
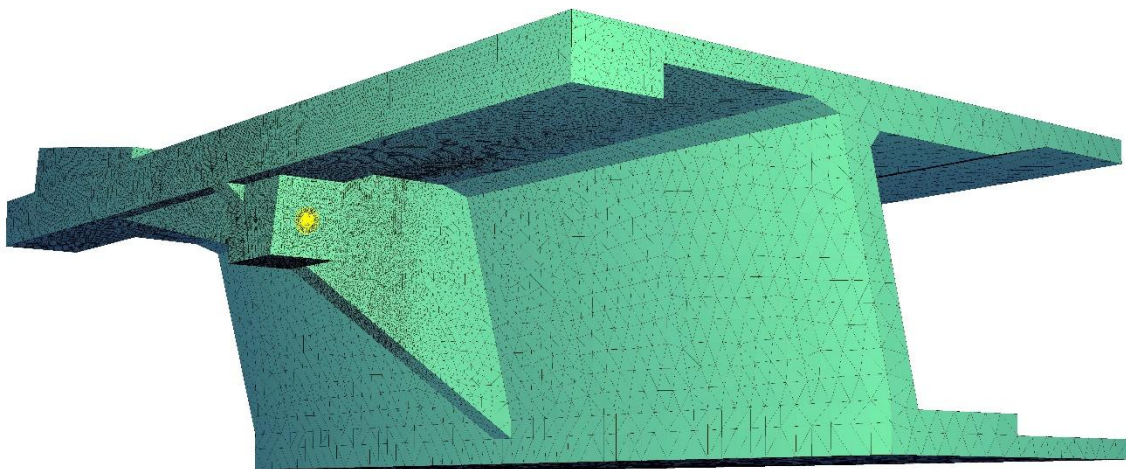




POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA

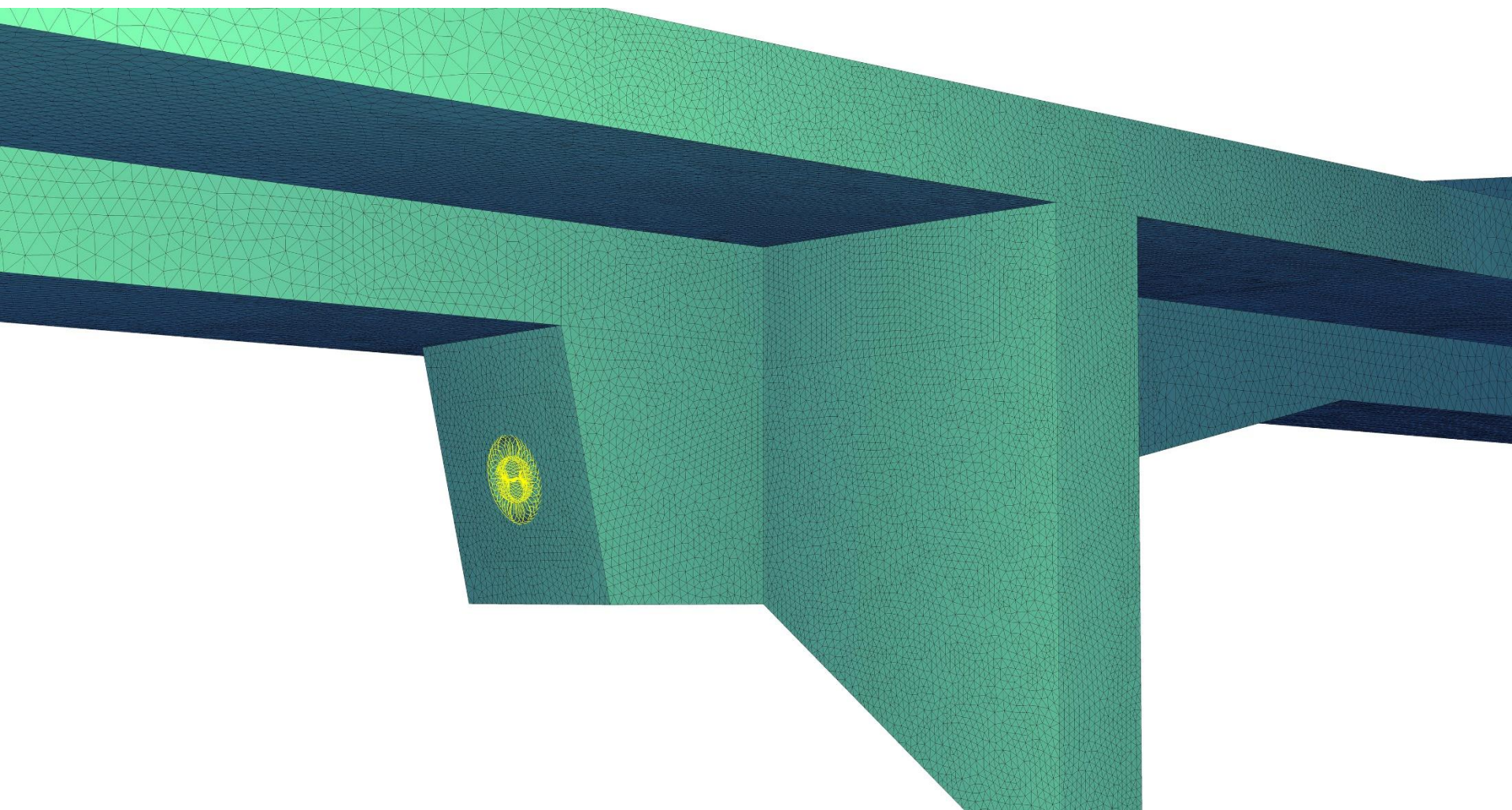




POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA

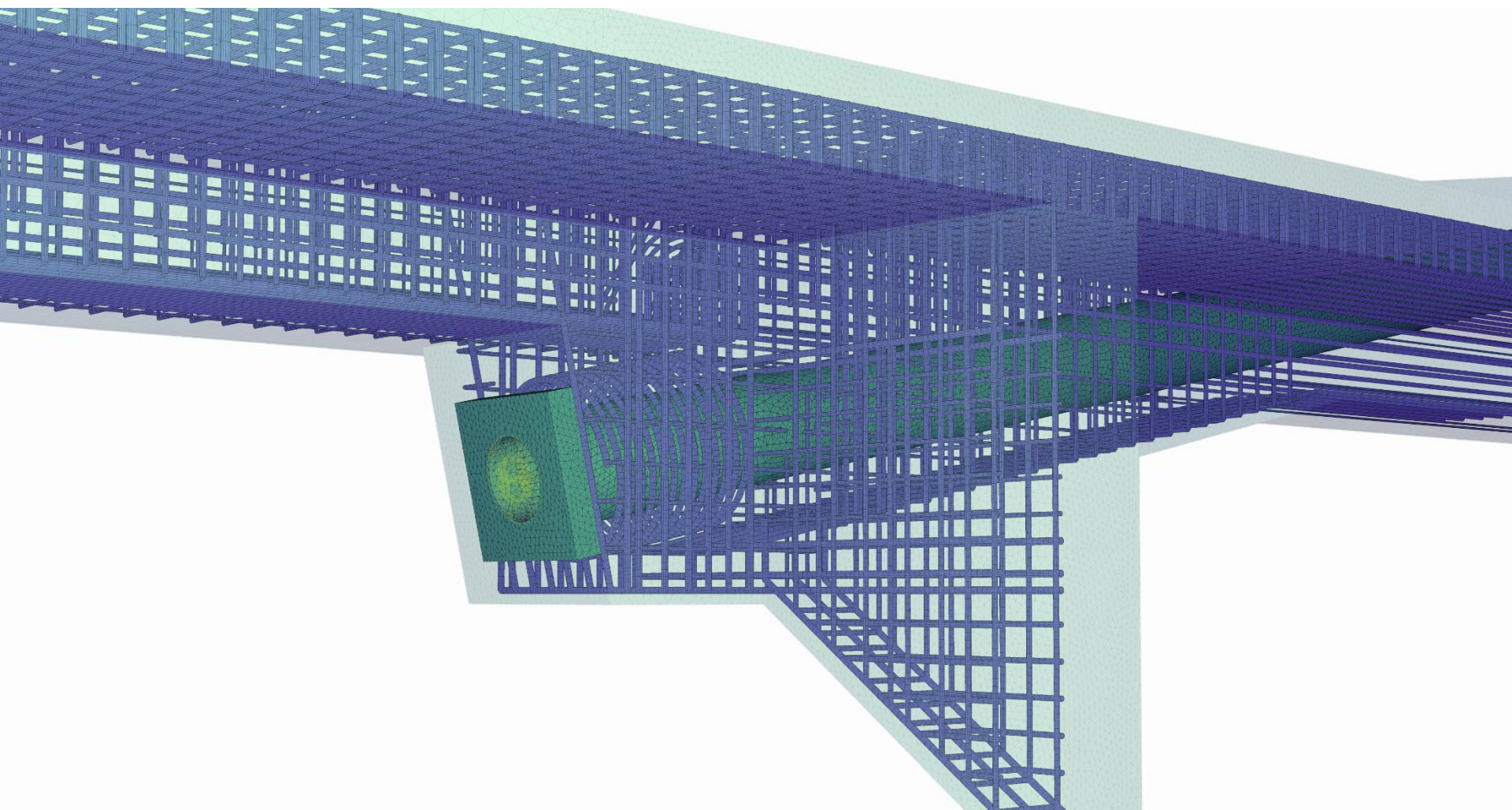




POLITECHNIKA
GDAŃSKA

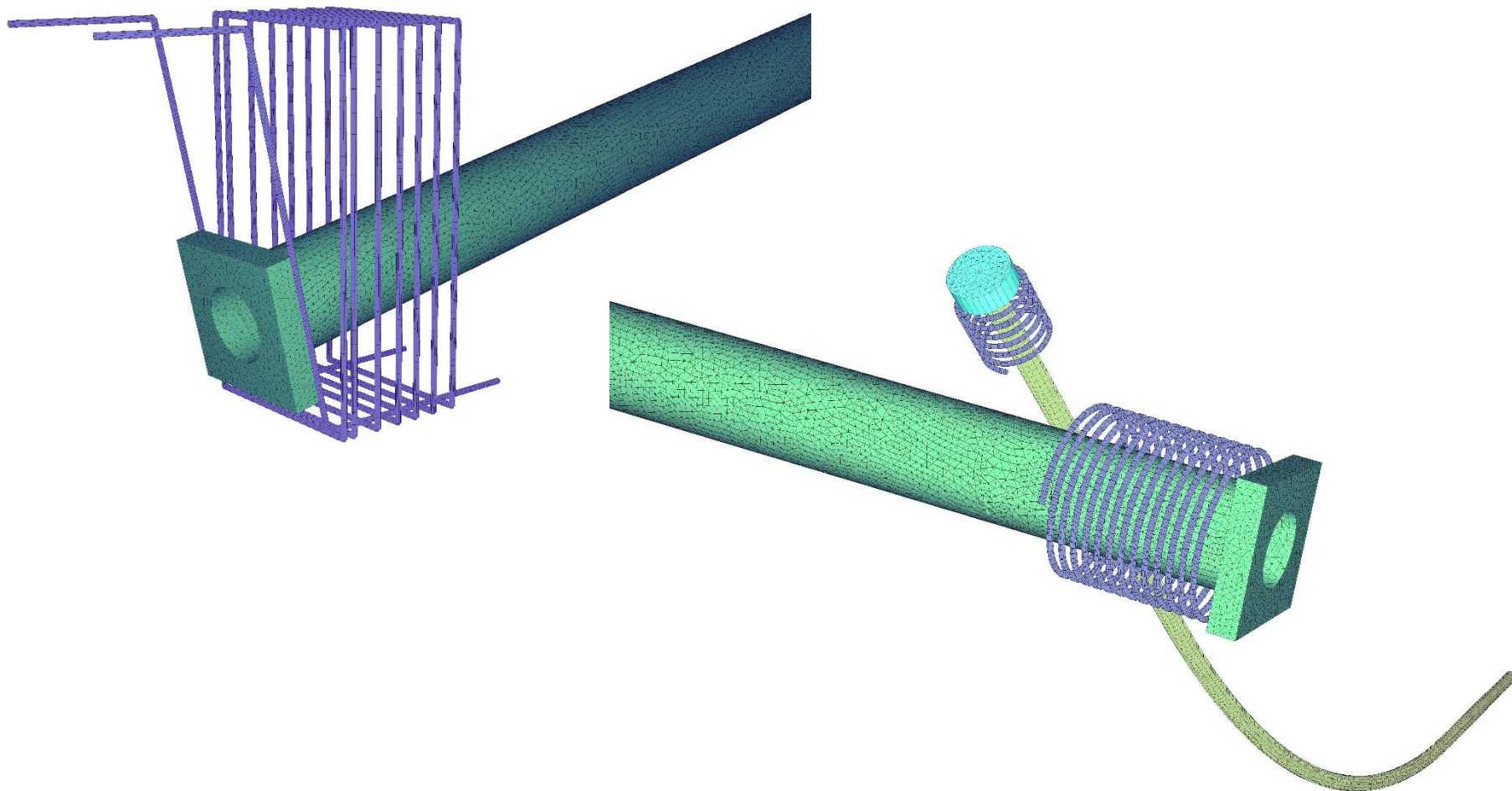
Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA





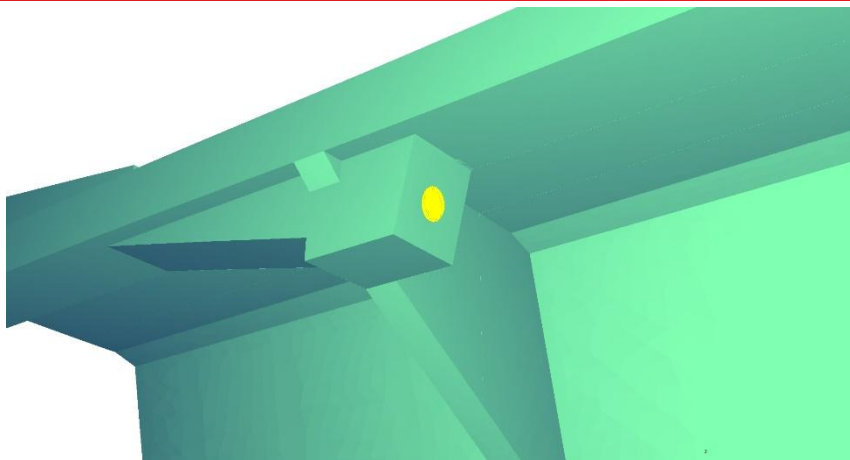
MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA



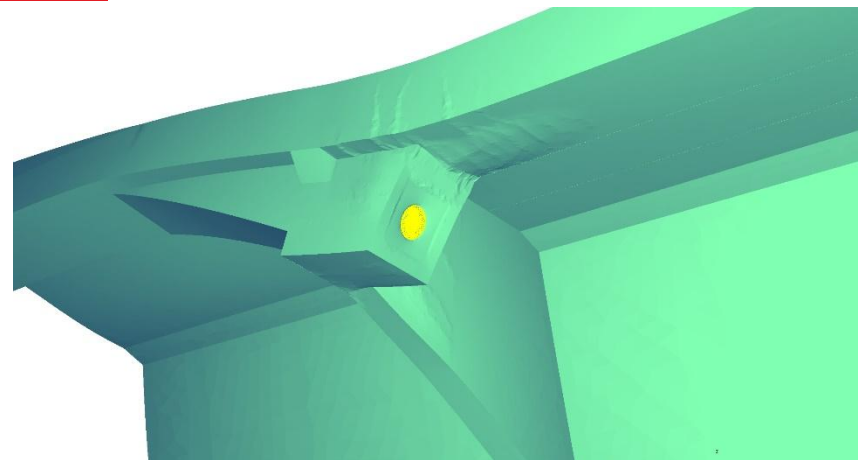


MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA

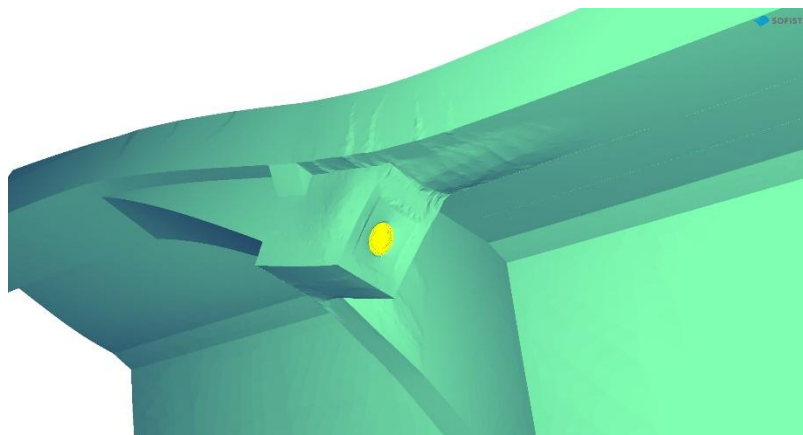
DEFORMACJA – SKALA 100:1



$P = 1000 \text{ kN}$



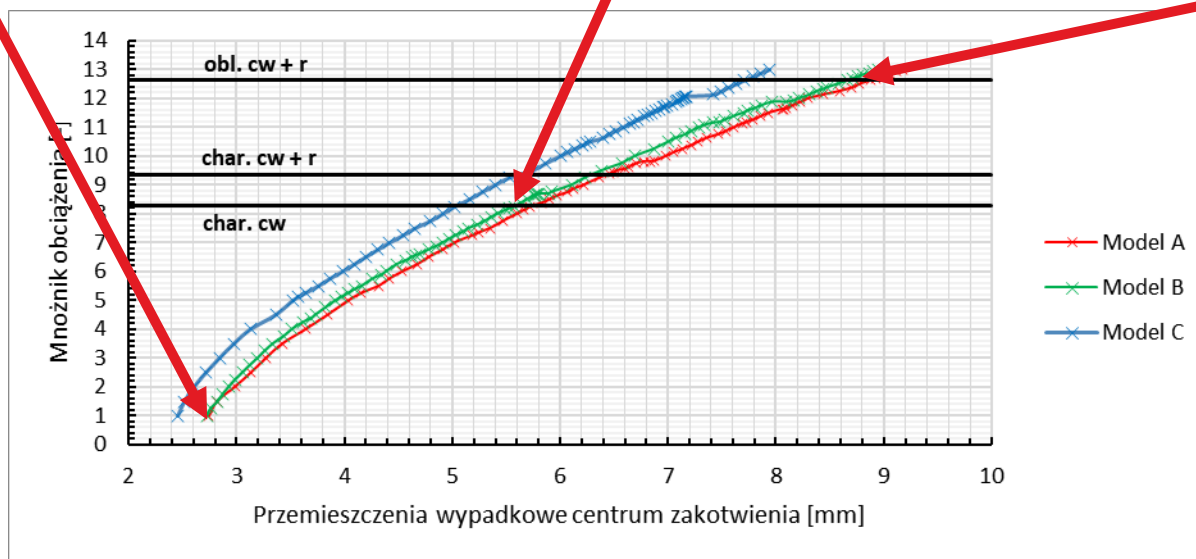
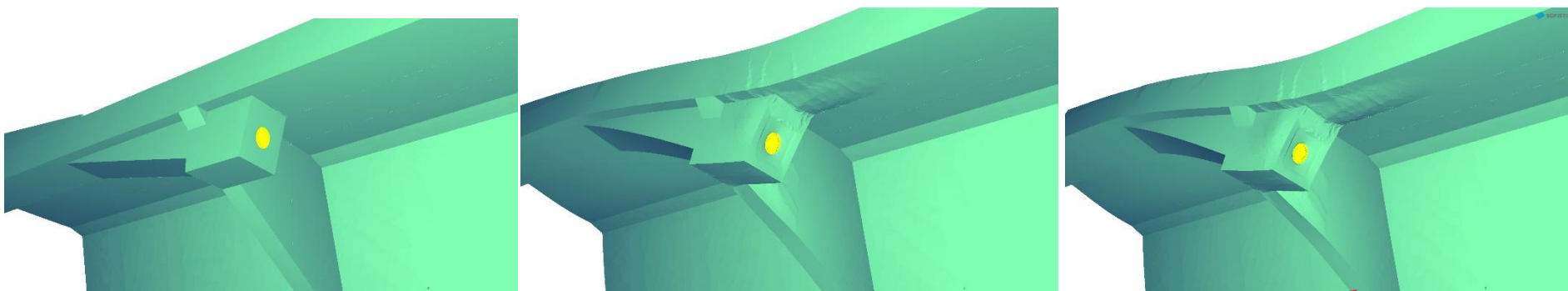
$P = 8250 \text{ kN}$



$P = 13\,000 \text{ kN}$



MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA



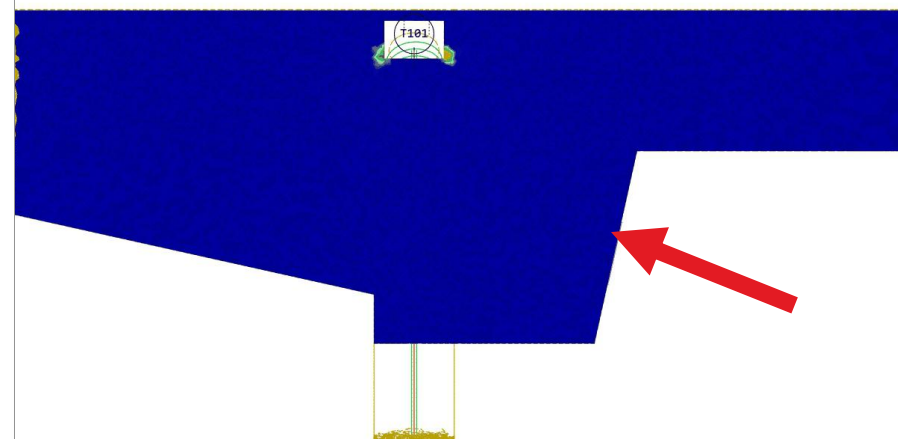
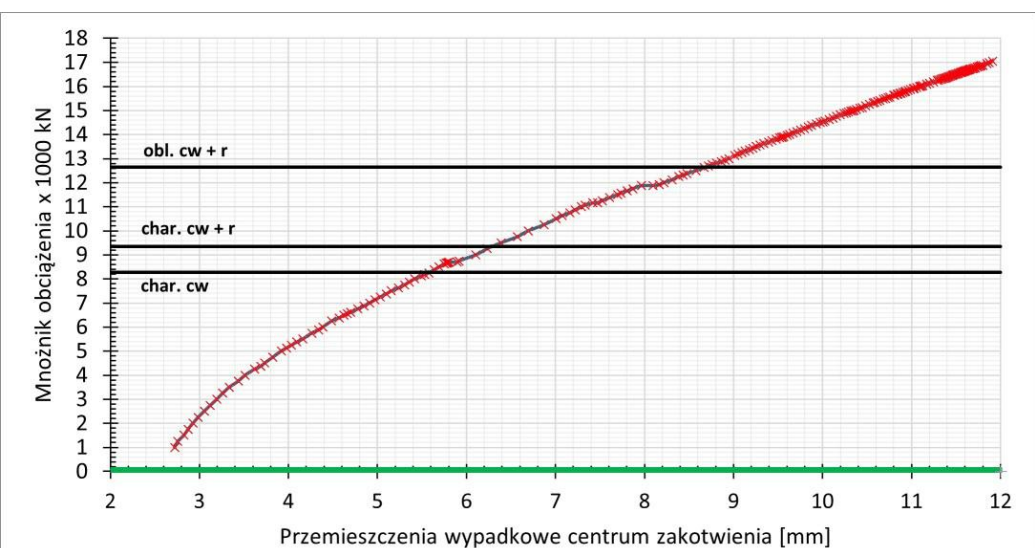
DEFORMACJA W SKALI 100:1



POLITECHNIKA
GDAŃSKA



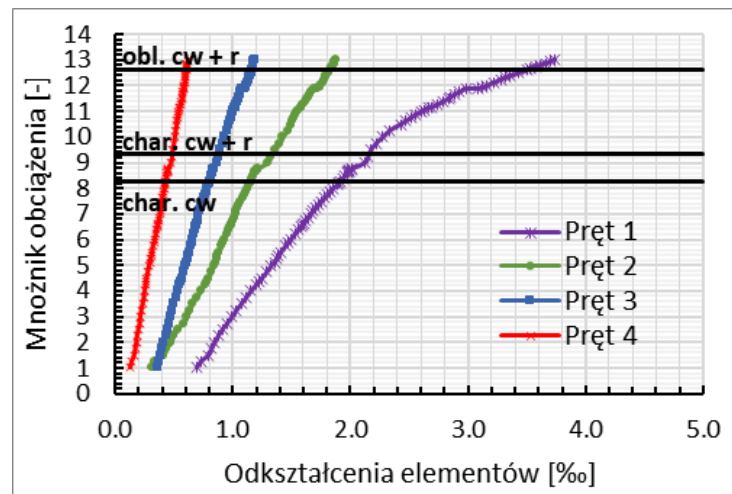
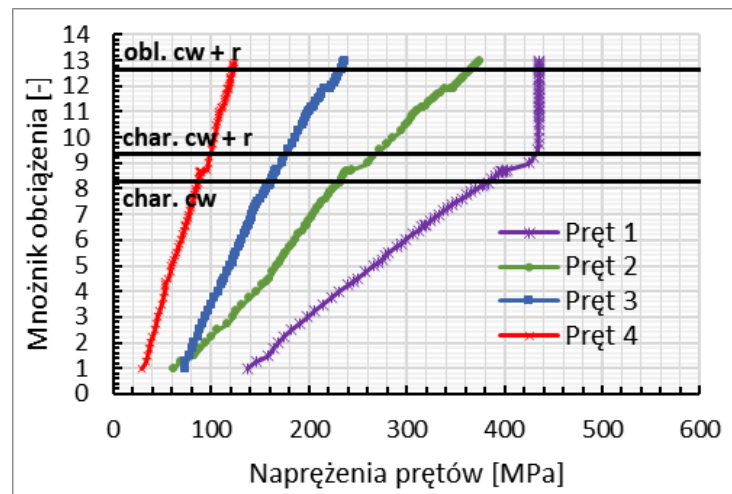
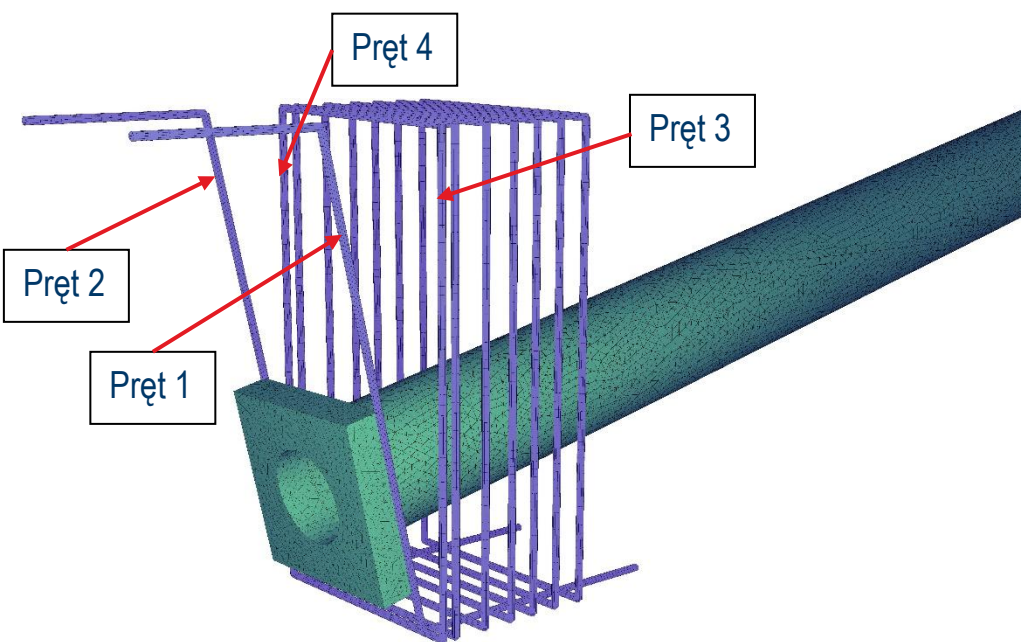
ŚCIEŻKA OBCIĄŻENIE - PRZEMIESZCZENIE



PARAMETR DEGRADACJI BETONU



MODEL 3D NR 2 Z UWZGLĘDNIENIEM ZBROJENIA





WNIOSKI

Nieliniowe modele MES zbrojonych elementów sprężonych to wirtualne laboratorium wytrzymałościowe, dzięki któremu możemy zaoszczędzić:

- mnóstwo pracy
- dużo czasu
- bardzo dużo pieniędzy

A przede wszystkim zwiększyć bezpieczeństwo i trwałość



WNIOSKI

Nieliniowe modele MES zbrojonych elementów sprężonych to wirtualne laboratorium wytrzymałościowe, dzięki któremu możemy zaoszczędzić:

- **mnóstwo pracy**
- dużo czasu
- bardzo dużo pieniędzy

A przede wszystkim zwiększyć bezpieczeństwo i trwałość



WNIOSKI

Nieliniowe modele MES zbrojonych elementów sprężonych to wirtualne laboratorium wytrzymałościowe, dzięki któremu możemy zaoszczędzić:

- mnóstwo pracy
- **dużo czasu**
- bardzo dużo pieniędzy

A przede wszystkim zwiększyć bezpieczeństwo i trwałość



WNIOSKI

Nieliniowe modele MES zbrojonych elementów sprężonych to wirtualne laboratorium wytrzymałościowe, dzięki któremu możemy zaoszczędzić:

- mnóstwo pracy
- dużo czasu
- **bardzo dużo pieniędzy**

A przede wszystkim zwiększyć bezpieczeństwo i trwałość



WNIOSKI

Nieliniowe modele MES zbrojonych elementów sprężonych to wirtualne laboratorium wytrzymałościowe, dzięki któremu możemy zaoszczędzić:

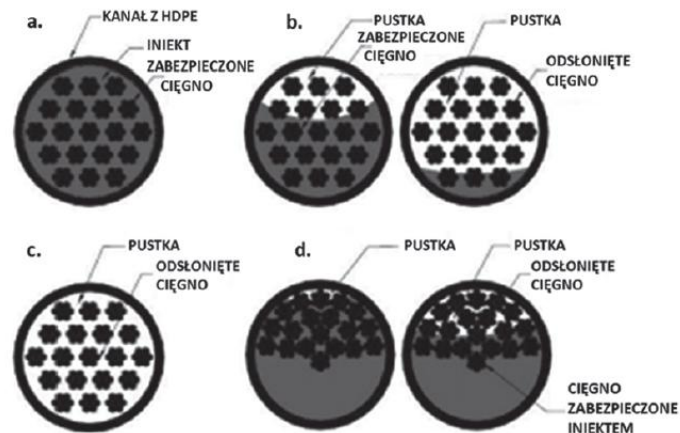
- mnóstwo pracy
- dużo czasu
- bardzo dużo pieniędzy

A przede wszystkim zwiększyć bezpieczeństwo i trwałość.

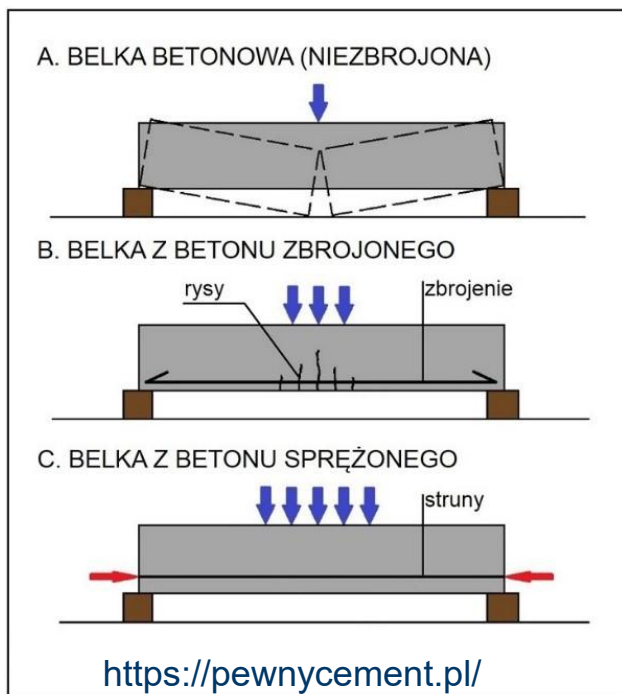
Prof. inż. ANDRZEJ JAROMINIAK
Warszawa

Zagrożenia cięgien sprężających w mostach kablobetonowych

Największe zagrożenia cięgien korozją występują w iniekcji, w strefach kontaktu iniekt – pustka w iniekcji [16]. Powodem są różne potencjały elektryczne powierzchni cięgien w tych strefach. Korozję przyspiesza prąd makrokomórkowy między obszarem anodowym, jakim jest powierzchnia kontaktu iniekt – powietrze, i pasywną masą iniektu oraz karbonatyzacja iniektu i chlorki.



BETONOWY MOST SPRĘŻONY STOI DZIĘKI STALI SPRĘŻAJĄCEJ

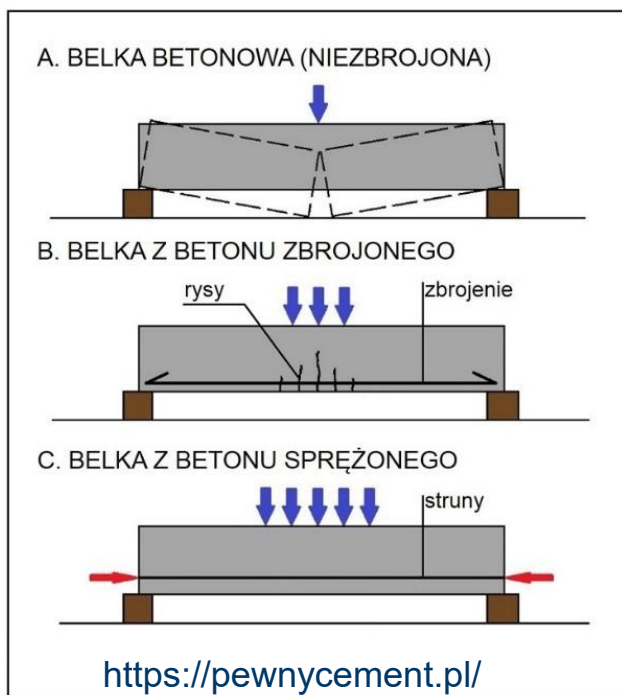


Stal konstrukcyjna S355 wytrzymałość - 355 MPa

Stal zbrojeniowa BST 500 wytrzymałość - 500 MPa

Stal sprężająca Y1860 wytrzymałość - 1860 MPa

BETONOWY MOST SPRĘŻONY STOI DZIĘKI STALI SPRĘŻAJĄCEJ



Stal konstrukcyjna S355 wytrzymałość - 355 MPa

Stal zbrojeniowa BST 500 wytrzymałość - 500 MPa

Stal sprężająca Y1860 wytrzymałość - 1860 MPa

Dlatego mosty sprężone na starcie są tańsze od stalowych o średnio 20%



**Stal konstrukcyjna S355 wytrzymałość -
355 MPa - ubytek 1cm² to strata 20 kN**



**Stal zbrojeniowa BST 500 wytrzymałość -
500 MPa - ubytek 1cm² to strata 35 kN**



**Stal sprężająca Y1860 wytrzymałość -
1860 MPa - ubytek 1cm² to strata **130 kN****



**Jeszcze nigdy w historii konstrukcji tak
wiele**

nie zależało od tak nielicznych

**Co zatem się stanie z konstrukcją jak tych
nielicznych zabraknie?**



POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

WNIOSKI

KWIDZYN -2021



13:18



13:32 21/KWI/2021



POLITECHNIKA
GDAŃSKA

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

WNIOSKI

KWIDZYN -2023





**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Lokalne zarysowania w żelbetowych mostach sprężonych.
Wybrane problemy

WNIOSKI

KWIDZYN -2025





**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA

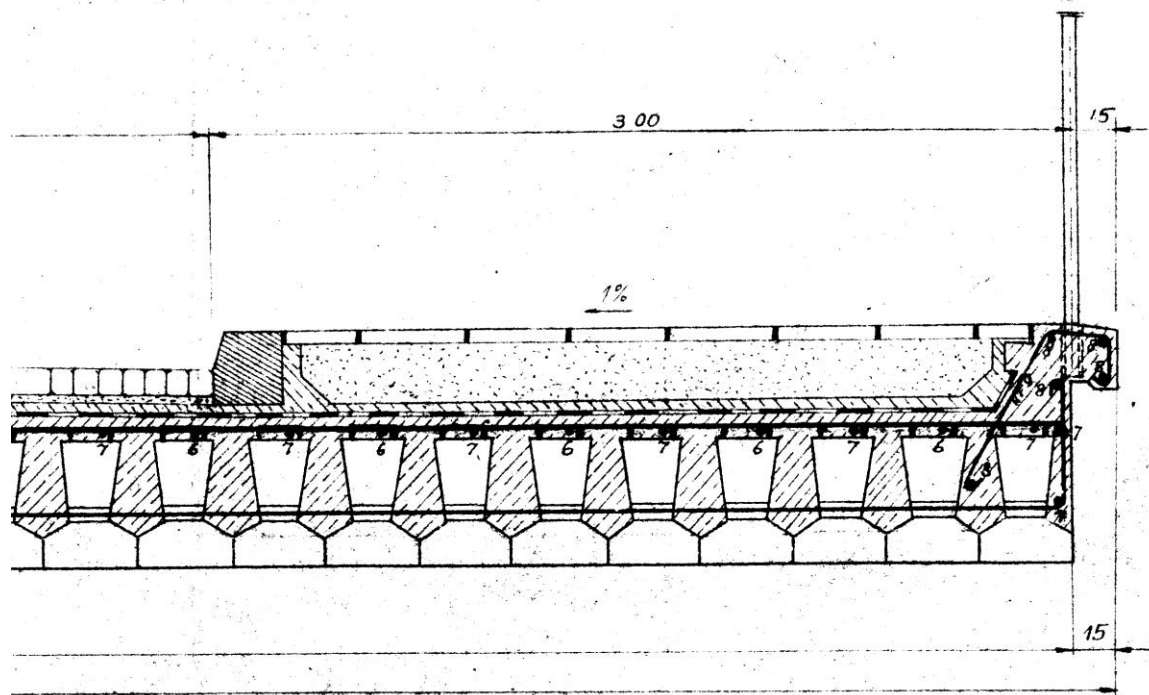
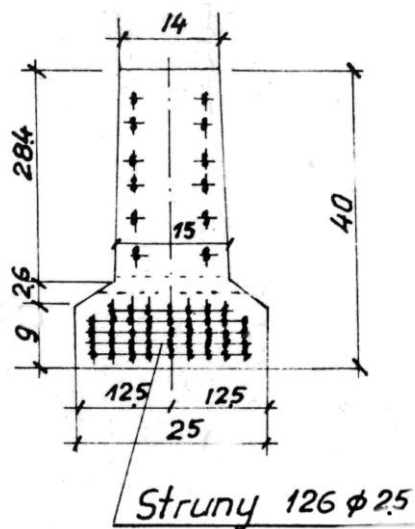




**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA

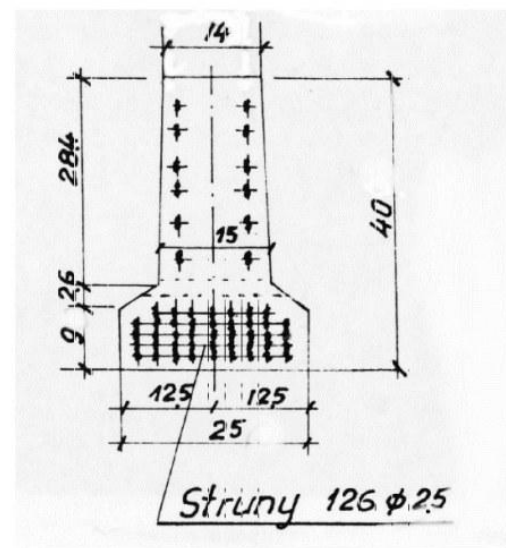
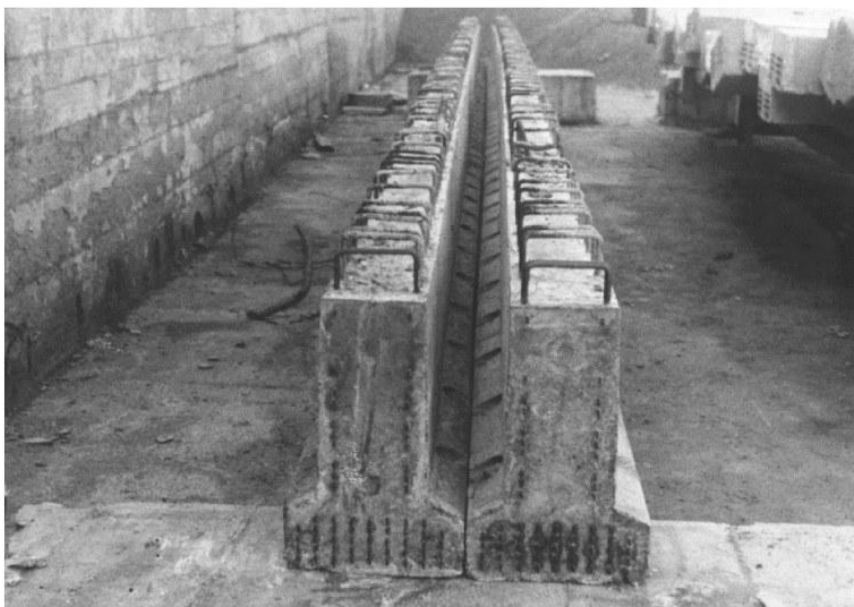






POLITECHNIKA
GDAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA





**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA





11:47 13/SIE/2021



11:47 13/SIE/2021

Dziękuję za uwagę