

Zastosowanie metody sterowania konwergencją do projektowania obudowy wyrobisk kapitalnych w kopalniach podziemnych na przykładzie kopalń JSW S.A.

Application of the convergence-confinement method to design of main underground mine workings lining on the example of JSW S.A. coal mines



*Mgr inż. Piotr Dawidziuk**



*Mgr inż. Aleksandra Otto**



Dr inż. Paweł Kamiński, **)*



*Dr hab. inż., prof. AGH
Piotr Małkowski**)*

Treść: W warunkach polskiego budownictwa podziemnego obudowę kopalnianych wyrobisk kapitalnych, takich jak komory wykonywane w rejonach podszybi, projektuje się najczęściej jako stalowo-betonową lub stalowo-kotwowo-betonową. Rekomendowana metodyka projektowania oparta jest o normę PN-G-05600:1998. Ponieważ obudowa musi być projektowana jako konstrukcja podatna, w obliczeniach brane jest pod uwagę wyłącznie ciśnienie statyczne. Istotnie odmienne podejście obliczeniowe prezentuje metoda sterowania konwergencją, oparta o wytyczne Nowej Austriackiej Metody Budowy Tuneli. Założenie o konieczności powstrzymania przemieszczeń górotworu na jak najwcześniejszym etapie implikuje konieczność projektowania konstrukcji obudowy ze względu na tzw. ciśnienie deformacyjne. W pracy przedstawiona została metodyka i zależności obliczeniowe wykorzystywane w metodzie sterowania konwergencją. Przykładowe obliczenia wykonane zostały dla rzeczywistych warunków górniczo-geologicznych kopalń JSW S.A. Uzyskane wyniki zweryfikowane zostały za pomocą obliczeń numerycznych prowadzonych metodą elementów skończonych.

Abstract: In specific conditions of Polish underground construction support of main underground mine workings, such as chambers constructed in the vicinity of shafts, is designed as a composite steel-concrete or steel-bolt-concrete lining. Recommended method of design is based on the norm PN-G-05600:1998. Since a liner must be designed as yieldable construction, only a static pressure is considered in calculations. Significantly different approach is represented by convergence-confinement method, based on recommendations of New Austrian Tunnelling Method. Due to necessity of rock mass displacement prevention at the earliest possible stage, a liner must be designed taking into account so called deformational pressure. In this paper a methodology and calculation formulas, used in convergence-confinement method, are presented. Examples of calculations were made on the basis of real geological and mining conditions of JSW S.A. coal mines. Subsequently obtained results were verified with numerical calculations made with finite elements method.

*) Przedsiębiorstwo Budowy Szybów S.A.

***) AGH, Wydział Inżynierii Ładowej i Gospodarki Zasobami

Słowa kluczowe:

metoda sterowania konwergencją, wyrobiska kapitalne, obudowa stalowo-betonowa, metoda elementów skończonych

Keywords:

convergence-confinement method, main workings, composite steel-concrete lining, finite element method

1. Wprowadzenie

Analiza konstrukcji i technologii wykonywania obudowy wstępnej tuneli drażonych zgodnie z wytycznymi Nowej Metody Austriackiej (NATM) pozwoliła na wprowadzenie do polskiej praktyki górniczej obudowy powłokowej, rozumianej jako obudowa utworzona z cienkiej, ściśle przylegającej do górotworu warstwy materiału konstrukcyjnego ukształtowanej według zakrzywionej powierzchni (Wichur i in. 2005). W roku 1982 w katowickim Biurze Studiów i Projektów Górniczych opracowana została norma branżowa zawierająca wytyczne projektowania i obliczeń statycznych tego typu obudów (BN-82/0434-07). Po wprowadzeniu niewielkich modyfikacji w roku 1997 została ona zastąpiona Polską Normą wydaną przez Polski Komitet Normalizacyjny (PN-G-05600:1998).

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w Polskiej Normie grubość warstwy betonu będącej elementem obudowy powłokowej nie może przekraczać 4% szerokości wyrobiska (PN-G-05600:1998). Ta cecha konstrukcyjna umożliwia ograniczenie występowania w konstrukcji momentów gnących, stanowiących przyczynę powstawania niekorzystnych naprężeń rozciągających. Zgodnie z zaleceniami Polskiej Normy wymiarowanie obudowy powłokowej należy prowadzić metodą stanów granicznych nośności na ściskanie i ścinanie, pomijany jest natomiast wpływ zginania. Jednakże wraz ze zwiększaniem grubości warstwy betonu obudowa powłokowa przechodzi w obudowę sklepioną, dla której niezbędne jest uwzględnienie wpływu momentów gnących na stateczność konstrukcji.

W praktyce górniczej obudowa powłokowa wykonywana jest najczęściej jako stalowo-betonowa lub stalowo-betonowo-kotwowa. Tego typu schematy obudowy wykorzystywane są jako obudowa wstępna wlotów do podszybi (Kamiński i in. 2017) oraz obudowa zasadnicza wyrobisk podszybia i innych wyrobisk kapitalnych o długiej żywotności. Do podstawowych materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych do wykonywania obudowy powłokowej należy beton natryskowy lub torkret oraz typowe odrzwia stalowe wykonane z kształtowników V. Ponadto obserwuje się obecnie wzrost zainteresowania wykorzystaniem zbrojenia rozproszonego betonu natryskowego wykonywanego z włókien stalowych lub polipropylenowych (Tajduś i in. 2012, Rozmus i Ficek 2020, Prusek i in. 2021). Poprzez obetonowanie odrzwi typowej obudowy łukowej uzyskiwana jest istotna poprawa nośności elementów odrzwi i złącz oraz warunków współpracy układu obudowa-górotwór (Chudek i in. 1985).

2. Projektowanie obudowy powłokowej z wykorzystaniem PN-G-05600**2.1. Wyznaczenie przemieszczeń**

Zgodnie z wytycznymi Polskiej Normy należy wykazać, że konstrukcja obudowy powłokowej jest zdolna przenieść przemieszczenia wymuszone przez otaczający ją górotwór. Musi zostać zatem spełniony następujący warunek:

$$u^{ob} \geq 0,9 \cdot u_w \quad (1)$$

gdzie:

u^{ob} – podatność radialna obudowy, m,

u_w – przemieszczenie radialne górotworu, m.

Przemieszczenie radialne górotworu należy obliczać w oparciu o rozwiązanie stanu naprężenia i odkształcenia sprężysto-plastycznej, nieważkiej tarczy z otworem kołowym, obciążonej na brzegach izotropowym ciśnieniem pierwotnym górotworu (Wichur i in. 2007). Podatność radialną dla obudowy stalowo-betonowej należy obliczać na podstawie wzoru (PN-G-05600:1998):

$$u^{ob} = 0,003 \cdot r_o + \frac{d_p \cdot t}{\pi} [m] \quad (2)$$

gdzie:

r_o – promień krzywizny powłoki, m,

d_p – przemieszczenie obudowy na odcinku dylatacji podłużnej, m,

t – liczba dylatacji podłużnych w obudowie.

Współczynnik 0,9 podawany we wzorze (1) ma za zadanie uwzględnienie częściowego odprężenia górotworu występującego przed wykonaniem obudowy powłokowej (PN-G-05600:1998). Należy zwrócić uwagę, iż w praktyce górniczej wartość podanego współczynnika jest silnie uzależniona od lokalnych warunków górniczo-geologicznych i powinna być określana indywidualnie dla każdego wyrobiska. Wpływ na ten współczynnik będzie mieć również rodzaj zastosowanego materiału natryskowego, którym może być nie tylko beton, ale również spoiwo mineralno-cementowe, także z rozproszonym zbrojeniem (Prusek i in. 2021). Określenie wielkości przemieszczeń występujących przed wykonaniem obudowy może zostać przeprowadzone analitycznie (Wichur i in. 2007), empirycznie (Vlachopoulos i Diederichs 2009) i numerycznie za pomocą pełnej analizy 3D lub analizy osiowosymetrycznej (Otto 2021, Fabich i in. 2015).

Jak wynika z wzoru (2) podatność radialna obudowy stalowo-betonowej bez dylatacji podłużnych jest bardzo ograniczona, w związku z czym przy projektowaniu obudowy wyrobisk posadowionych na dużych głębokościach, w warunkach występowania znacznych ciśnień pierwotnych, praktycznie niemożliwe jest spełnienie warunku (1). W związku z tym konieczne jest zastosowanie upodatnienia obudowy.

Cytowana wielokrotnie PN-G-05600 nie podaje praktycznych zaleceń technologicznych dotyczących wykonywania dylatacji podłużnych. Upodatnienie typowej obudowy łukowej z profili V polega na połączeniu elementów odrzwi za pomocą strzemion odpowiednich dla danego rodzaju kształtownika z momentem dokręcenia, umożliwiającym ich wzajemny przesuw. Istotny problem stanowi wykonanie dylatacji powłoki betonowej. W światowym budownictwie tunelowym przy występowaniu problemów związanych z nadmierną konwergencją wyrobisk stosowane są rozwiązania polegające na zabudowie stalowych elementów upodatniających (Hoek 2006, Button i in. 2003, Schubert i Brunnegger 2017). Tym niemniej można ocenić, iż w warunkach polskiego budownictwa górniczego tego typu rozwiązanie mogłoby wiązać się z istotnymi problemami technologicznymi.

Alternatywną metodą umożliwiającą spełnienie warunku (1) jest zastosowanie tak zwanego upodatnienia technologicznego, polegającego na fazowym wykonywaniu elementów obudowy powłokowej (Chudek i in. 1985). Zastosowanie

tego typu rozwiązania polega na wykonywaniu bezpośrednio w przodku wstępnej obudowy kotwowej lub obudowy łukowo-podatnej oraz prowadzeniu betonowania odrzwi w strefie pozaprzedkowej po wystąpieniu częściowego odprężenia górotworu. W tym wypadku istotnym problemem jest określenie optymalnej odległości od czoła przodka, w której powinno się prowadzić betonowanie odrzwi.

2.2. Wyznaczenie obciążeń

Polska Norma podaje cztery modele obciążeń obudowy wyrobiska (PN-G-05600:1998):

- model wyrobiska płytko zalegającego,
- model ośrodka sprężystego,
- model ośrodka sprężysto-plastycznego,
- model ośrodka sprężysto-plastyczno-spekowego.

W praktyce, ze względu na zwiększającą się głębokość eksploatacji, dla wykonywanych obecnie wyrobisk w większości przypadków powinien być stosowany jeden z dwóch ostatnich modeli.

Zgodnie z zaleceniami PN do sprawdzenia nośności obudowy należy przyjmować wyłącznie ciśnienie statyczne, związane z grawitacyjnym oddziaływaniem warstw skalnych, położonych w zasięgu stref niesprężystych (PN-G-05600:1998). Działanie ciśnienia deformacyjnego, związanego z przemieszczaniem się ośrodka skalnego w kierunku wyrobiska, jest w praktyce pomijane, ponieważ przyjmuje się, że podatność obudowy musi umożliwić wystąpienie całości wymuszonych przemieszczeń górotworu.

Istotnie odmienne podejście do projektowania obudowy wyrobisk podziemnych zawarte jest w wytycznych Nowej Austriackiej Metody Budowy Tuneli, zakładającej, że przemieszczenia górotworu muszą zostać zatrzymane na możliwie jak najwcześniejszym etapie, uniemożliwiając tym samym spekanie i rozluźnianie skał wokół wyrobiska. W związku z tym obudowa wyrobiska projektowana jest przede wszystkim z uwagi na ciśnienie deformacyjne, a jedną z podstawowych metod projektowania stanowi metoda sterowania konwergencją (Tajduś i in. 2012).

3. Projektowanie obudowy powłokowej z wykorzystaniem metody sterowania konwergencją

3.1. Założenia metody sterowania konwergencją

Metoda sterowania konwergencją (CCM – *Convergence Confinement Method*) jest metodą graficzną, wykorzystującą trzy krzywe (Tajduś i in. 2012, Walentek 2019):

- krzywa reakcji masywu skalnego (GRC – *Ground Reaction Curve*) – przedstawia zależność pomiędzy przemieszczeniem radialnym konturu wyrobiska a naprężeniem radialnym jakie należy przyłożyć do konturu wyrobiska aby zapobiec dalszemu ruchowi,
- krzywa charakterystyki obudowy (SCC – *Support Characteristics Curve*) – przedstawia zależność pomiędzy przemieszczeniem radialnym obudowy a ciśnieniem deformacyjnym działającym na obudowę,
- krzywa przemieszczeń podłużnych (LDP – *Longitudinal Displacement Profile*) – przedstawia zależność pomiędzy przemieszczeniem radialnym konturu wyrobiska a odległością od czoła przodka.

Obliczenia analityczne w metodzie sterowania konwergencją opierają się na rozwiązaniu nieważkiej tarczy z otworem, obciążonej od zewnątrz ciśnieniem pierwotnym. Do obliczeń przyjmuje się następujące założenia upraszczające:

- kołowy kształt przekroju poprzecznego wyrobiska,

- hydrostatyczny stan naprężeń pierwotnych,
- jednorodność i izotropowość masywu skalnego.

3.2. Krzywa reakcji masywu skalnego GRC

W celu wyznaczenia krzywej reakcji masywu skalnego GRC konieczna jest znajomość następujących parametrów związanych z lokalnymi uwarunkowaniami geologiczno-górnictwymi:

- kąt tarcia wewnętrznego górotworu ϕ ,
- spójność górotworu c ,
- moduł Younga górotworu E ,
- liczba Poissona górotworu ν ,
- naprężenie pierwotne p_o ,
- promień wyrobiska r_o .

Zgodnie z kryterium Coulomba-Mohra wytrzymałość górotworu na jednoosiowe ściskanie można wyznaczyć na podstawie wzoru (Hoek 2006):

$$R_c = \frac{2 \cdot c \cdot \cos\phi}{1 - \sin\phi} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Do dalszych obliczeń wprowadzono następujące współczynniki obliczeniowe:

$$\alpha = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (5)$$

Naprężenie krytyczne, przy którym górotwór przechodzi ze stanu sprężystego w plastyczny (naprężenie na granicy strefy plastycznej i sprężystej) należy obliczyć ze wzoru (Hoek 2006):

$$p_{cr} = \frac{2 \cdot p_o - R_c}{1 + \alpha} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

Jeżeli podporność aktywna obudowy jest większa od ciśnienia krytycznego, górotwór zachowuje się jak ośrodek liniowo-sprężysty. W tej sytuacji przemieszczenie radialne konturu wyrobiska jest wyznaczone ze wzoru (Hoek 2006):

$$u_{ie}(p_i) = \frac{r_o \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot (p_o - p_i) \text{ [m]} \quad (7)$$

W przypadku gdy podporność aktywna obudowy jest mniejsza od ciśnienia krytycznego, górotwór zachowuje się jak ośrodek plastyczny. W tej sytuacji przemieszczenie radialne konturu wyrobiska jest wyznaczone ze wzoru (Hoek 2006):

$$u_{ip}(p_i, r_p) = \frac{r_o \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \left[2 \cdot (1 - \nu) \cdot (p_o - p_{cr}) \cdot \left(\frac{r_p}{r_o} \right)^2 - (1 - 2 \cdot \nu) \cdot (p_o - p_i) \right] \text{ [m]} \quad (8)$$

Jak wynika ze wzoru (8) przemieszczenie górotworu jest zależne nie tylko od podporności aktywnej obudowy, ale także od promienia strefy plastycznej. Promień strefy plastycznej można wyznaczyć na podstawie następującej zależności (Hoek 2006):

$$r_p(p_i) = r_o \cdot \left[\frac{2 \cdot (p_o \cdot (\alpha - 1) + R_c)}{(1 + \alpha) \cdot ((\alpha - 1) \cdot p_i + R_c)} \right]^{\frac{1}{\alpha - 1}} \text{ [m]} \quad (9)$$

Należy zwrócić uwagę, iż wzór (9) stosuje się dla modelu idealnie sprężysto-plastycznego, w którym nie jest uwzględnione osłabienie parametrów wytrzymałościowych górotworu w strefie plastycznej. W celu obliczenia promienia strefy plastycznej dla modelu sprężysto-plastycznego (z osłabieniem) przyjęto wzór podawany przez Polską Normę (PN-G-05020:1997):

$$r_p(p_i) = r_o \cdot \left(\frac{p_{cr} \cdot \beta + R'_c}{p_i \cdot \beta + R'_c} \right)^{\frac{1}{\beta}} [m] \quad (10)$$

gdzie:

R'_c – wytrzymałość górotworu na ściskanie w obrębie strefy plastycznej (norma PN-G-05020:1997 zaleca przyjmowanie 40 do 60% wytrzymałości górotworu w obrębie strefy sprężystej), MPa.

Jak wynika z równań (7)÷(10) wielkość przemieszczeń górotworu oraz zasięg strefy plastycznej są wprost zależne od obciążenia obudowy p_i . Należy zwrócić uwagę, że tego typu zależność nie jest uwzględniana w Polskich Normach (PN-G-05600:1998, PN-G-05020:1997). Krzywą reakcji masywu skalnego wykreślono dla modelu idealnie sprężysto-plastycznego i sprężysto-plastycznego z osłabieniem przedstawiono na rysunku 1. Do dalszych rozważań przyjęto model sprężysto-plastyczny z osłabieniem.

3.3. Krzywa przemieszczeń podłużnych LDP

Podczas gdy krzywe GRC i SCC określane są dla przekroju poprzecznego wyrobiska w płaskim stanie odkształcenia, krzywa LDP określa zachowanie się górotworu na długości wyrobiska, uwzględniając zależność przemieszczeń radialnych masywu skalnego od odległości od czoła przodka. Krzywa LDP jest niezbędna do oszacowania wielkości przemieszczeń górotworu, zachodzących przed wykonaniem obudowy, a zatem spełnia tę samą funkcję co ogólny współczynnik 0,9 podawany przez PN-G-05600.

Empiryczne rozwiązanie krzywej LDP dla górotworu sprężysto-plastycznego zostało podane przez Vlachopoulosa i Diederichsa (Vlachopoulos i Diederichs 2009). Dla uproszczenia obliczeń w pierwszej kolejności należy wprowadzić pojęcie znormalizowanego promienia strefy plastycznej R^* , znormalizowanego przemieszczenia radialnego u_i^* i znormalizowanej odległości od czoła przodka X^* . Znormalizowany promień strefy plastycznej można wyznaczyć z następującego wzoru (Vlachopoulos i Diederichs 2009):

$$R^* = \frac{r_{pmax}}{r_o} \left[\frac{m}{m} \right] \quad (11)$$

gdzie:

r_{pmax} – maksymalny promień strefy plastycznej (dla $p_i = 0$), m.

Znormalizowane przemieszczenie radialne można wyznaczyć z następującego wzoru (Vlachopoulos i Diederichs 2009):

$$u_i^* = \frac{u_i}{u_{max}} \left[\frac{m}{m} \right] \quad (12)$$

gdzie:

u_i – przemieszczenie radialne konturu wyrobiska, m,
 u_{max} – maksymalne przemieszczenie radialne konturu wyrobiska, (dla $p_i = 0$), m.

Znormalizowaną odległość od czoła przodka można wyznaczyć z następującego wzoru (Vlachopoulos i Diederichs 2009):

$$X^* = \frac{x}{r_o} \left[\frac{m}{m} \right] \quad (13)$$

gdzie:

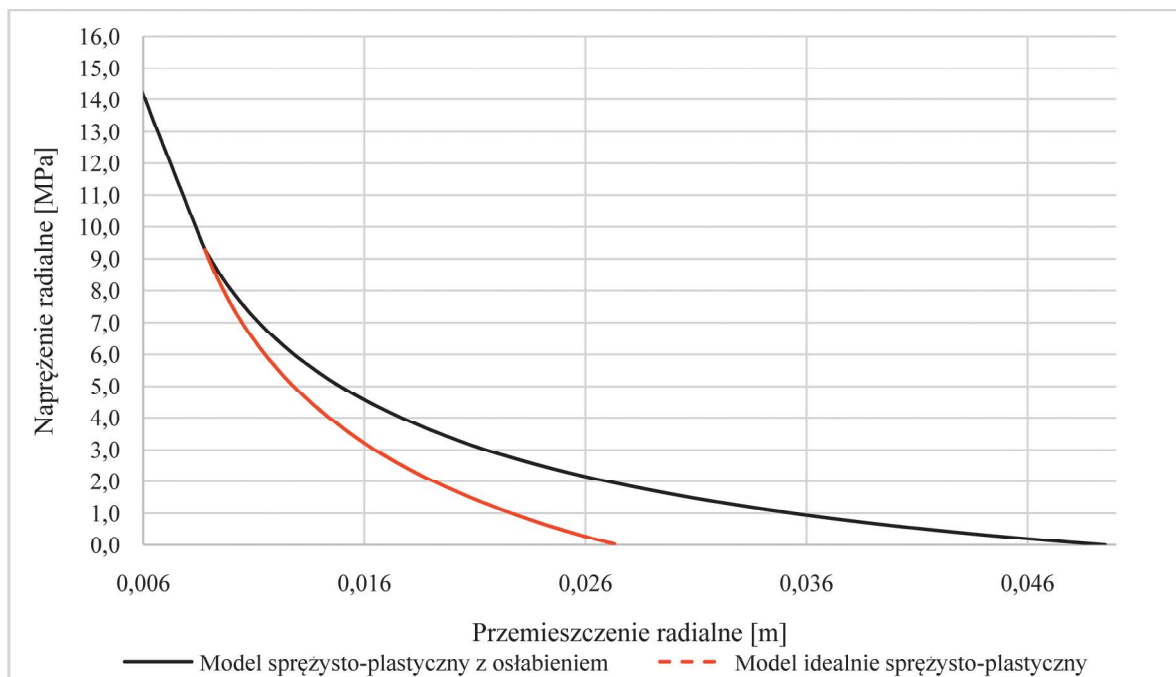
x – odległość od czoła przodka (ujemna przed czołem przodka, dodatnia za czołem przodka), m.

W celu wykreślenia krzywej LDP w pierwszej kolejności należy wyznaczyć wielkość znormalizowanych przemieszczeń radialnych konturu wyrobiska bezpośrednio w czołe przodka ($x = 0$) (Vlachopoulos i Diederichs 2009):

$$u_0^* = \frac{1}{3} \cdot e^{-0,15 \cdot R^*} \left[\frac{m}{m} \right] \quad (14)$$

Znormalizowane przemieszczenia w górotworze ($x < 0$ i wyrobisku ($x > 0$) należy wyznaczać z następującego wzoru (Vlachopoulos i Diederichs 2009):

$$u_i^* = \begin{cases} u_0^* \cdot e^{X^*} & \text{dla } X^* < 0 \\ 1 - (1 - u_0^*) \cdot e^{-\frac{3 \cdot X^*}{2 \cdot R^*}} & \text{dla } X^* > 0 \end{cases} \left[\frac{m}{m} \right] \quad (15)$$



Rys. 1. Krzywa reakcji masywu skalnego (GRC)
 Fig. 1. Ground Reaction Curve (GRC)

3.4. Krzywa charakteryzująca obudowę SCC i określenie punktu współpracy obudowy z górotworem

Równania podane przez Hoeka (Hoek 2012) umożliwiają oszacowanie następujących parametrów obudowy stalowej, betonowej i kotwowej:

- podporności rozumianej jako maksymalne dopuszczalne obciążenie obudowy,
- sztywności opisującej nachylenie krzywej SCC.

Należy zwrócić uwagę, że są to zależności bardzo uproszczone, pomijające wpływ sił tnących oraz momentów gnących na stateczność projektowanej obudowy. Dla obudowy stalowej przyjmuje się założenie, że współpracuje ona z górotworem w sposób ścisły, a ewentualne pustki wypełniane są betonem natryskowym. Istotną trudność wiąże się z określeniem parametrów obudowy kotwowej, w przypadku której współpraca z górotworem jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym. W związku z tym zależności podane przez Hoeka opisują wyłącznie kotwy mechaniczne mocowane punktowo w górotworze. W warunkach polskiego górnictwa węgla kamiennego częściej stosowane są kotwy prętowe lub elastyczne wklejane na całej długości otworu.

W celu wyznaczenia krzywej SCC dla obudowy stalowej konieczna jest znajomość następujących parametrów:

- pole powierzchni przekroju poprzecznego profilu stalowego A_s ,
- moduł Younga stali E_s ,
- obliczeniowa granica plastyczności stali f_{yd} ,
- rozstaw odrzwi stalowych s_i .

W celu wyznaczenia krzywej SCC dla obudowy betonowej konieczna jest znajomość następujących parametrów:

- moduł Younga betonu E_c ,
- liczba Poissona betonu ν_c ,
- obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie f_{cd} ,
- grubość warstwy t_c .

Podporność obudowy należy wyznaczać na podstawie następujących zależności (Hoek 2012):

- dla obudowy stalowej:

$$p_{smax} = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{s_i \cdot r_o} [MPa] \tag{16}$$

- dla obudowy betonowej:

$$p_{cmax} = \frac{f_{cd}}{2} \cdot \left[1 - \frac{(r_o - t_c)^2}{r_o^2} \right] [MPa] \tag{17}$$

Sztywność obudowy należy wyznaczać na podstawie następujących zależności (Hoek 2012):

- dla obudowy stalowej:

$$K_s = \frac{A_s \cdot E_s}{s_i \cdot r_o^2} \left[\frac{MPa}{m} \right] \tag{18}$$

- dla obudowy betonowej:

$$K_c = \frac{E_c \cdot (r_o^2 - (r_o - t_c)^2)}{2 \cdot (1 - \nu_c^2) \cdot (r_o - t_c) \cdot r_o^2} \left[\frac{MPa}{m} \right] \tag{19}$$

Dopuszczalne przemieszczenie obudowy można wyznaczyć z następującego wzoru (Tajduś i in. 2012):

$$u_{dop} = \frac{p_{max}}{K} [m] \tag{20}$$

Obliczenie parametrów obudowy mieszanej należy prowadzić według następującej metodyki (Tajduś i in. 2012):

- sztywność obudowy mieszanej należy określić poprzez sumowanie sztywności poszczególnych rodzajów obudów,
- maksymalne przemieszczenie obudowy mieszanej należy przyjmować jako najmniejsze maksymalne przemieszczenie spośród obudów wchodzących w skład obudowy mieszanej.

Podporność obudowy mieszanej określa się z następującego wzoru:

$$p_{ob} = K_{ob} \cdot u_{dop_{ob}} [MPa] \tag{21}$$

Podporność obudowy stalowo-betonowej wynosi zatem:

$$p_{ob} = (K_c + K_s) \cdot \min \left\{ \begin{matrix} u_{dop_c} \\ u_{dop_s} \end{matrix} \right\} [MPa] \tag{22}$$

4. Wykorzystanie metody sterowania konwergencją do projektowania obudowy wyrobiska na przykładzie KWK „Knurów-Szczygłowice”

4.1. Obliczenia analityczne

Parametry wejściowe do obliczeń krzywej GRC zestawiono w tabeli 1. W obliczeniach posłużono się rzeczywistym przekrojem geologicznym z KWK „Knurów-Szczygłowice”. Projektowane wyrobisko jest komorą funkcyjną posadowioną na głębokości 842 m.

Tabela 1. Parametry wejściowe do obliczeń krzywej GRC – KWK „Knurów-Szczygłowice”

Table 1. Input parameters for the calculation of GRC curve – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice”

Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
Spójność górotworu	c	MPa	7,09
Kąt tarcia wewnętrznego górotworu	ϕ	°	40,22
Moduł Younga górotworu	E	MPa	7 509
Liczba Poissona górotworu	ν	-	0,12
Naprężenie pierwotne	p_o	MPa	21,04
Promień wyrobiska	r_o	m	3,19

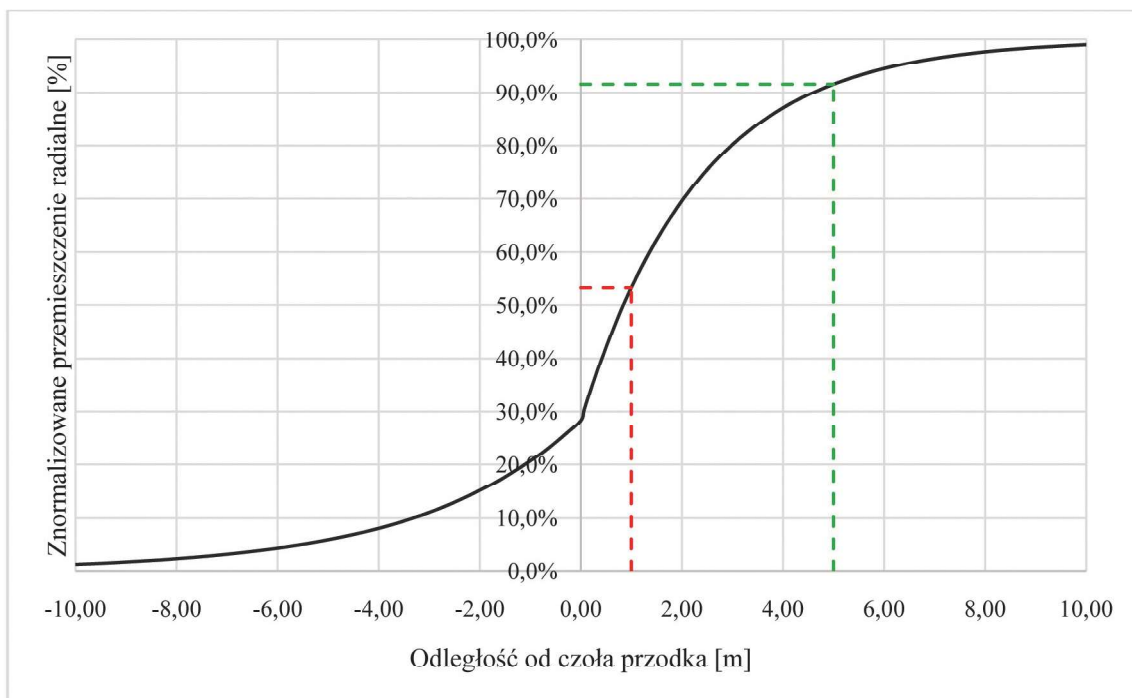
Obliczenia krzywej charakteryzującej obudowę przeprowadzono dla obudowy stalowo-betonowej. Parametry wejściowe do wykreślenia krzywej SCC zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry wejściowe do obliczeń krzywej SCC – KWK „Knurów-Szczygłowice”

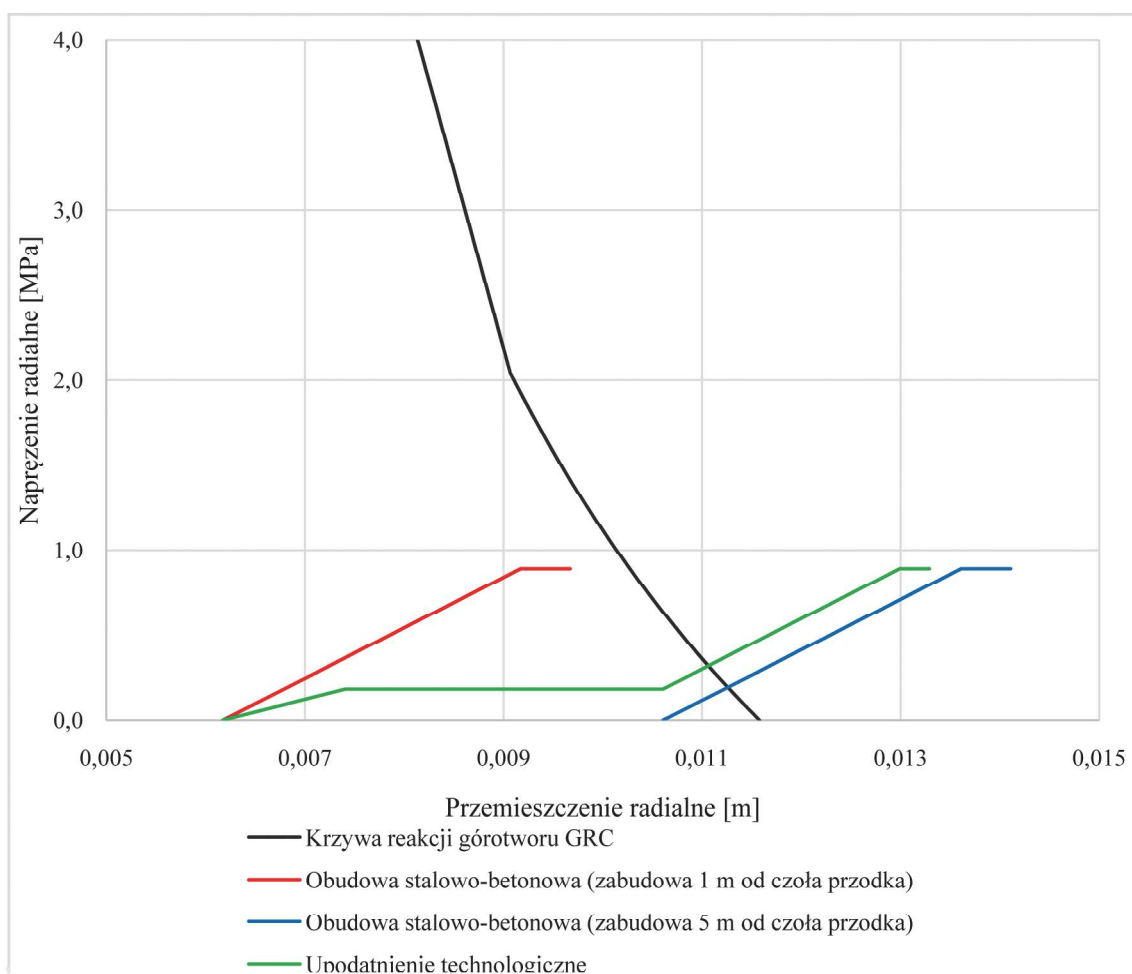
Table 2. Input parameters for the calculation of SCC curve – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice”

Obudowa stalowa z łuków profilu V36			
Przekrój poprzeczny kształtownika	A_s	m ²	0,00452
Moduł Younga stali	E_s	MPa	200 000
Rozstaw odrzwi	s_i	m	0,6
Obliczeniowa granica plastyczności stali	f_{yd}	MPa	417
Obudowa z betonu natryskowego klasy C40/50			
Wytrzymałość obliczeniowa betonu na ściskanie	f_{cd}	MPa	28,57
Moduł Younga betonu natryskowego	E_c	MPa	28 000
Liczba Poissona betonu natryskowego	ν_c	-	0,25
Grubość warstwy betonu natryskowego	t_c	m	0,05

Wyznaczoną dla zadanych warunków krzywą LDP przedstawiono na rysunku 2. Krzywe GRC i SCC przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Krzywa przemieszczeń podłużnych (LDP) – KWK „Knurów-Szczygłowice”
 Fig. 2. Longitudinal Displacement Profile – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice”



Rys. 3. Krzywa reakcji górotworu (GRC) i krzywe charakteryzujące obudowę (SCC) – KWK „Knurów-Szczygłowice”
 Fig. 3. Ground Reaction Curve (GRC) and Support Characteristics Curve (SCC) – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice”

Jak wynika z wykresu przedstawionego na rys. 2 w odległości 1 m od czoła przodka zachodzi ponad 50% docelowych przemieszczeń górotworu. W odległości 5 m jest to już ponad 90%. Jednocześnie dla założonego wstępnie schematu obudowy stalowo-betonowej (rys. 3 – kolor czerwony) nie występuje przecięcie krzywych GRC i SCC. Oznacza to, że ciśnienie deformacyjne działające na obudowę przekracza jej podporność. W celu ograniczenia wielkości ciśnienia deformacyjnego konieczne jest dopuszczenie do częściowego przemieszczenia górotworu. Przy wykonywaniu obudowy w odległości 5 m od czoła przodka (rys. 3 – kolor niebieski) obudowa przenosi działające na nią obciążenia – tego typu rozwiązanie nie może być jednak zastosowane w praktyce górniczej, ponieważ nie zapewnia bezpieczeństwa załodze pracującej w przodku.

W celu ograniczenia obciążenia działającego na obudowę przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa załogi konieczne jest zastosowanie upodatnienia technologicznego (Chudek i in. 1985). W strefie przodkowej należy wykonać typową obudowę łukowo-podatną z elementami odrzwi łączonymi za pomocą strzemion, umożliwiających ich wzajemny przesuw. Nanoszenie warstwy betonu natryskowego należy prowadzić w odległości nie mniejszej niż 5 m od czoła przodka, dla której wystąpi ponad 90% prognozowanych przemieszczeń górotworu.

Podporność obudowy łukowo-podatnej jest istotnie mniejsza od podporności sztywnej obudowy stalowej (Bobek i in. 2016). Można określić ją ze wzoru podawanego przez Polską Normę (PN-G-05020):

$$p_{\text{LP}} = \frac{N_z}{s_l \cdot r_o} [\text{MPa}] \quad (23)$$

gdzie:
 N_z – nośność zsuwna odrzwi, MN.

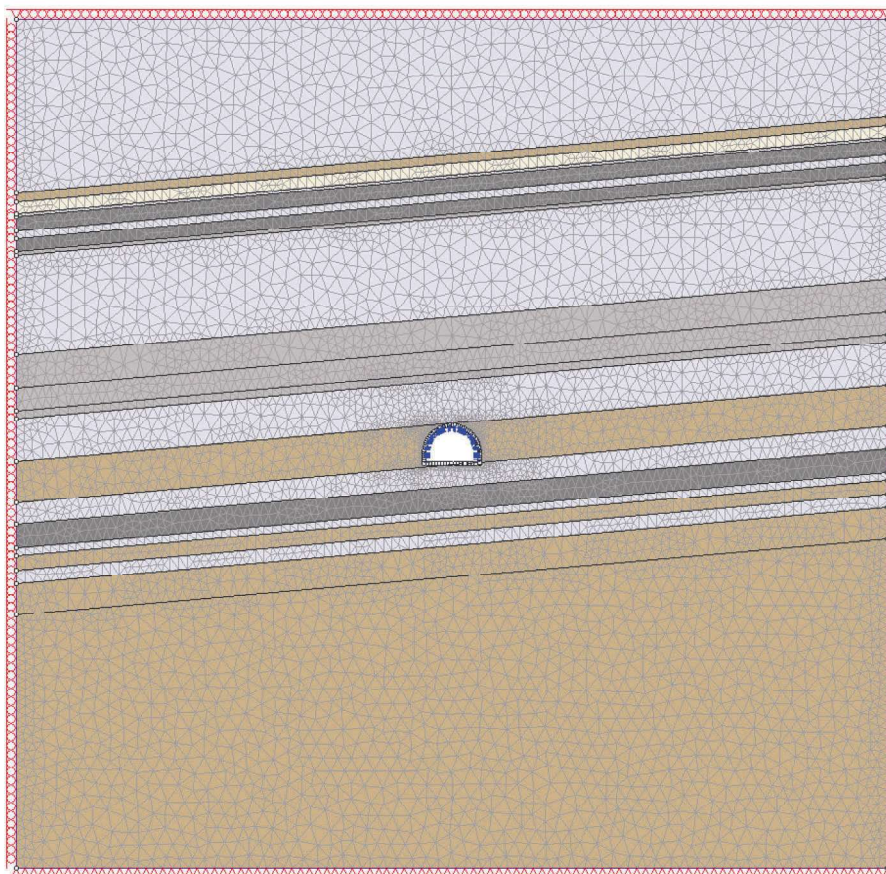
Polska Norma zaleca przyjmować wartość dla kształownika V36 równą 0,30 MN (PN-G-05020). Instrukcja doboru obudowy odrzwiowej wg Głównego Instytutu Górnictwa podaje wartość nośności zsuwniej danej wielkości odrzwi zależną od rodzaju zastosowanych strzemion oraz momentu dokręcenia nakrętek (Rułka i in. 2001). Ostatecznie do obliczeń przyjęta została wartość nośności zsuwniej równa 0,35 MN. Krzywą charakteryzującą zaproponowany schemat obudowy oznaczono na rysunku 2 kolorem zielonym. Jak wynika z wykresu zastosowanie upodatnienia technologicznego pozwala na ograniczenie obciążenia obudowy, a jednocześnie na szybkie podparcie stropu wyrobiska i zapewnienie bezpieczeństwa załogi pracującej w przodku.

4.2. Obliczenia numeryczne

Obliczenia przeprowadzone za pomocą metody sterowania konwergencją zweryfikowano za pomocą obliczeń numerycznych. Przy budowie modelu numerycznego wzięto pod uwagę dodatkowe czynniki, które nie mogły zostać uwzględnione w obliczeniach analitycznych:

- warstwowa budowa górotworu,
- nachylenie warstw skalnych,
- rzeczywisty, łukowy przekrój wyrobiska.

W obliczeniach wykorzystany został program RS2, oparty na metodzie elementów skończonych. W celu przeprowadzenia analizy stanu naprężenia i odkształcenia w rejonie przedmiotowego wyrobiska zbudowany został dwuwymiarowy model górotworu, przedstawiający przekrój poprzeczny przez projektowane wyrobisko. Model obliczeniowy przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Numeryczny model górotworu – KWK „Knurów-Szczygłowice”
 Fig. 4. Geomechanical model – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice”

Przy budowie modelu obliczeniowego przyjęto następujące założenia:

- górotwór jest ośrodkiem sprężysto-plastycznym z osłabieniem i izotropowym,
- warunek stanu granicznego jest obliczany według kryterium zniszczenia Coulomba-Mohra,
- w górotworze występuje hydrostatyczny stan naprężeń pierwotnych,
- brak możliwości przemieszczeń radialnych na krawędziach modelu.

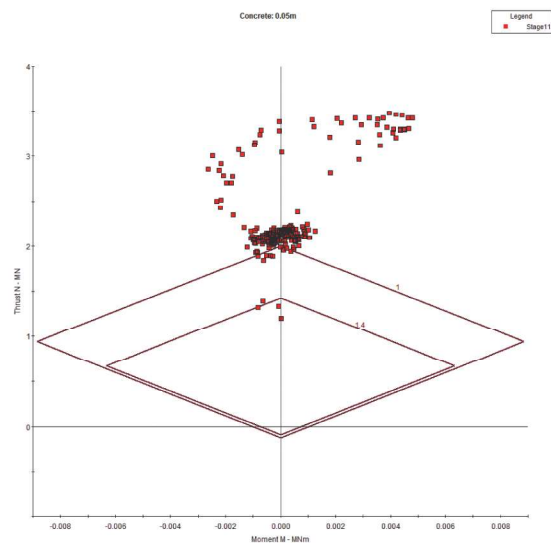
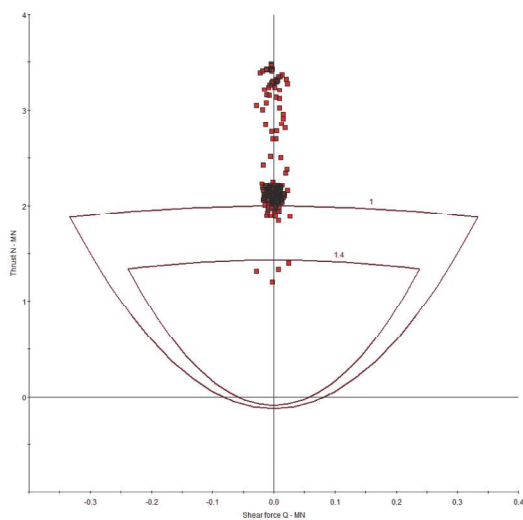
Efekt postępującego czoła przodka został uwzględniony poprzez przyłożenie do konturu wyrobiska ciśnienia o wartości odpowiadającej pewnej części ciśnienia radialnego, dobranej w ten sposób, aby wartość przemieszczeń konturu wyrobiska odpowiadała wartościom oszacowanym analitycznie na podstawie wykreślonej uprzednio krzywej LDP. Oznacza to, że przy budowie modelu numerycznego wykorzystane zostały wyniki uzyskane na podstawie wstępnych obliczeń analitycznych.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono w dwóch wariantach:

- 1) wykonywanie obudowy stalowo-betonowej w odległości 1 m od czoła przodka,
- 2) wykonywanie obudowy łukowo-podatnej w odległości 1 m od czoła przodka i przeprowadzenie betonowania w odległości 5 m od czoła przodka.

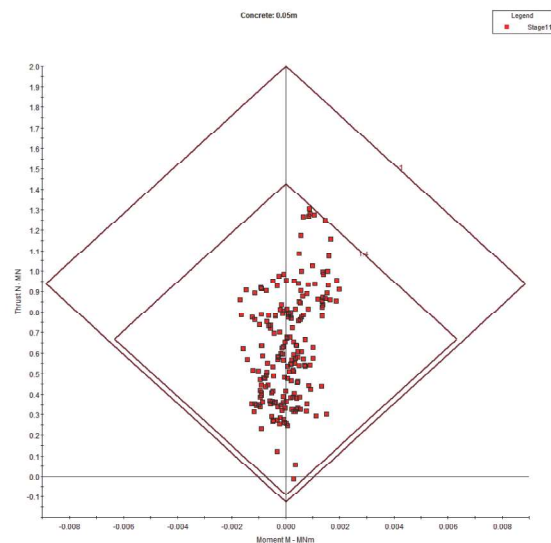
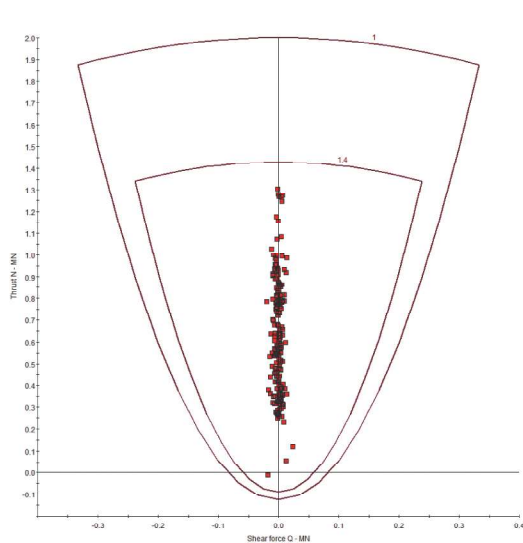
W celu oceny stateczności obudowy stalowo-betonowej posłużono się wykresami nośności granicznej, uwzględniającymi stany graniczne nośności na zginanie i ścinanie oraz osiowe ściskanie i rozciąganie dla elementów stalowych i betonowych (Hoek i in. 2008). Do programu wprowadzono charakterystyczne wytrzymałości betonu i stali. Przyjęto, że zgodnie z zalecaniami Polskiej Normy dla betonu musi zostać spełniony współczynnik bezpieczeństwa $FS = 1,4$, a dla stali $FS = 1,1$ (PN-B-03264).

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wykresy dla betonu, pominięto wykresy dla stali, ponieważ ze względu na mniejszą dopuszczalną wartość przemieszczeń warstwa betonu ulega zniszczeniu jako pierwsza.



Rys. 5. Wykresy nośności granicznej betonu – KWK „Knurów-Szczygłowice” – wariant 1 (obudowa stalowo-betonowa wykonywana na 1 m od czoła przodka)

Fig. 5. Support capacity plots of concrete – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice” – variant 1 (composite steel-concrete support installed 1 m behind the face)



Rys. 6. Wykresy nośności granicznej betonu – KWK „Knurów-Szczygłowice” – wariant 2 (obudowa stalowo-betonowa wykonywana na 5 m od czoła przodka)

Fig. 6. Support capacity plots of concrete – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice” – variant 2 (composite steel-concrete support installed 5 m behind the face)

Na podstawie obliczeń numerycznych wykazano, że wykonanie sztywnej obudowy stalowo-betonowej w strefie przodkowej (wariant 1) będzie skutkowało istotnym wzrostem sił osiowych w obudowie, a tym samym przekroczeniem wymaganego współczynnika bezpieczeństwa (rys. 5). Przeprowadzenie betonowania odrzwi w odległości 5 m od czoła przodka (wariant 2 – rys. 6) umożliwi wystąpienie częściowego odprężenia górotworu i ograniczenie ciśnienia deformacyjnego działającego na obudowę. Tym samym dla wariantu 2 spełniony jest wymagany współczynnik bezpieczeństwa.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono mapę przemieszczeń górotworu oraz zasięgu strefy plastycznej dla obu wariantów. W wariant 2 przemieszczenia górotworu wahają się od 14 cm w stropie do 40 cm w spągu wyrobiska. Zasięg strefy uplastycznionego górotworu waha się od 10 do 49 cm. Wartości

te są nieznacznie większe od prognozowanych na podstawie obliczeń analitycznych (przemieszczenia konturu wyrobiska 11 cm, zasięg strefy plastycznej 25 cm). Wcześniej wykonane sztywnej obudowy stalowo-betonowej (wg wariantu 1) wpływa na nieznaczne ograniczenie zasięgu strefy uplastycznionej i wielkości przemieszczeń górotworu.

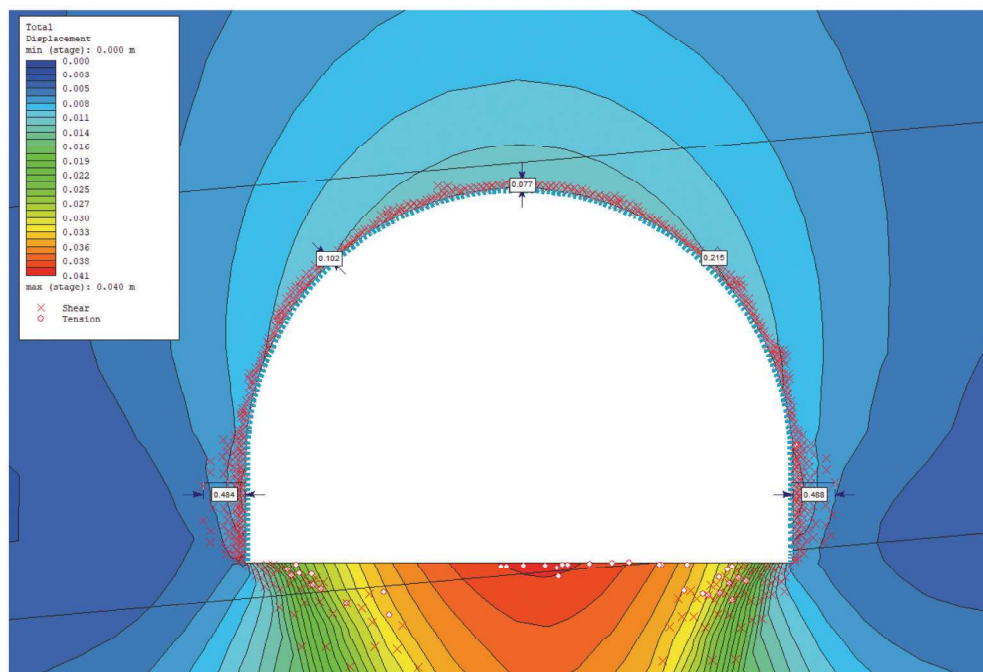
5. Wykorzystanie metody sterowania konwergencją do projektowania obudowy wyrobiska na przykładzie KWK „Borynia-Zofiówka”

5.1. Obliczenia analityczne

Parametry wejściowe do obliczeń zestawiono w tabeli 3. W obliczeniach posłużono się rzeczywistym przekrojem

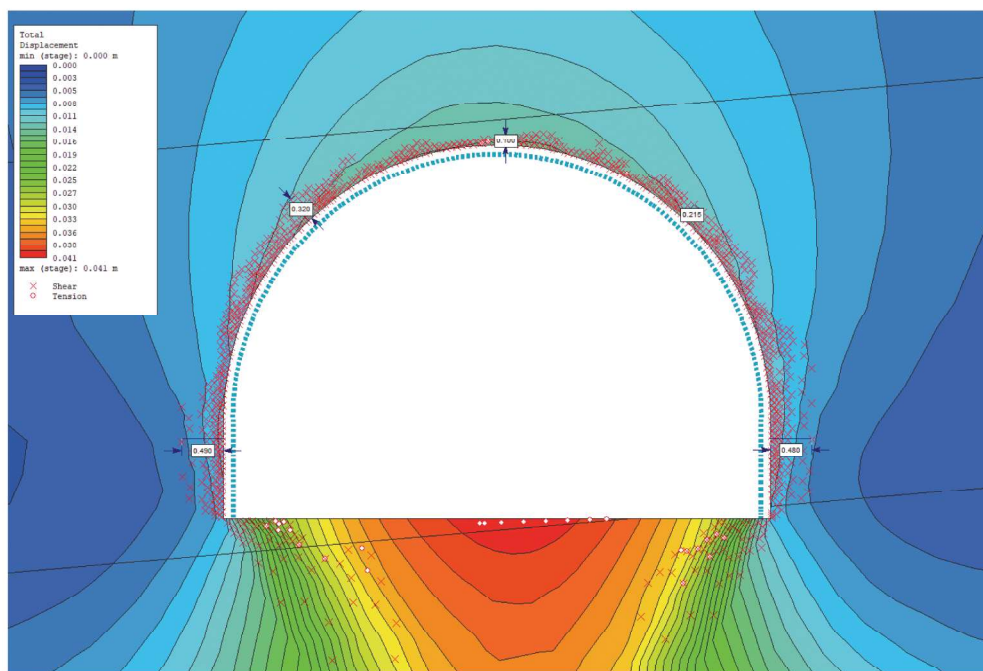
Rys. 7. Przemieszczenia górotworu oraz zasięg strefy plastycznej – KWK „Knurów-Szczygłowice” – wariant 1 (obudowa stalowo-betonowa wykonywana 1 m od czoła przodka)

Fig. 7. Displacement and yielded elements map – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice” – variant 1 (composite steel-concrete support installed 1 m behind the face)



Rys. 8. Przemieszczenia górotworu oraz zasięg strefy plastycznej – KWK „Knurów-Szczygłowice” – wariant 2 (obudowa stalowo-betonowa wykonywana 5 m od czoła przodka)

Fig. 8. Displacement and yielded elements map – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice” – variant 2 (composite steel-concrete support installed 5 m behind the face)



geologicznym z KWK „Borynia-Zofiówka”. Projektowane wyrobisko jest komorą funkcyjną posadowioną na głębokości 985 m.

Tabela 3. Parametry wejściowe do obliczeń krzywej GRC – KWK „Borynia-Zofiówka”

Table 3. Input parameters for the calculation of GRC curve – Coal Mine “Borynia-Zofiówka”

Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
Spójność górotworu	c	MPa	8,72
Kąt tarcia wewnętrzznego górotworu	φ	°	36,00
Moduł Younga górotworu	E	MPa	7 526
Liczba Poissona górotworu	ν	-	0,18
Napężenie pierwotne	p_o	MPa	24,63
Promień wyrobiska	r_o	m	3,40

Obliczenia krzywej charakteryzującej obudowę przeprowadzono dla obudowy stalowo-betonowej. Parametry wejściowe do wykreślenia krzywej SCC zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry wejściowe do obliczeń krzywej SCC – KWK „Knurów-Szczygłowice”

Table 4. Input parameters for the calculation of SCC curve – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice”

Obudowa stalowa z łuków profilu V36			
Przekrój poprzeczny kształtownika	A_s	m ²	0,00452
Moduł Younga stali	E_s	MPa	200 000
Rozstaw odrzwi	s_j	m	0,9
Obliczeniowa granica plastyczności stali	f_{yd}	MPa	417
Obudowa z betonu natryskowego klasy C40/50			
Wytrzymałość obliczeniowa betonu na ściskanie	f_{cd}	MPa	28,57
Moduł Younga betonu natryskowego	E_c	MPa	28 000
Liczba Poissona betonu natryskowego	ν_c	-	0,25
Grubość warstwy betonu natryskowego	t_c	m	0,05

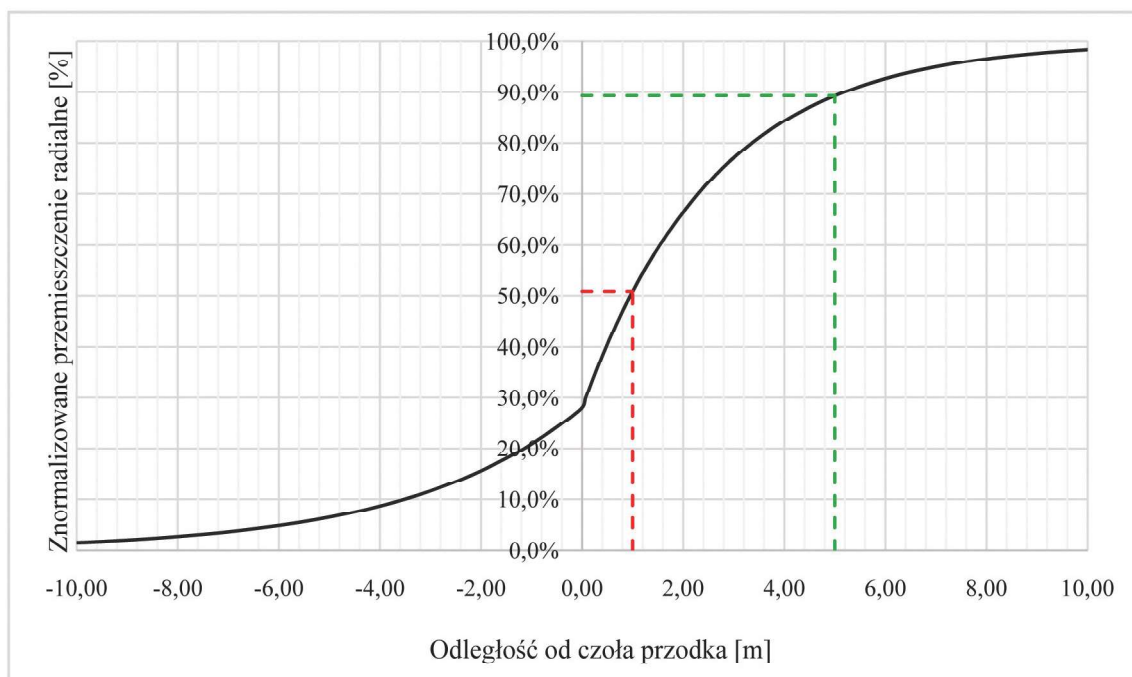
Wyznaczoną dla zadanych warunków krzywą LDP przedstawiono na rysunku 9. Krzywe GRC i SCC przedstawiono na rysunku 10.

Jak wynika z wykresu przedstawionego na rysunku 9 w odległości 1 m od czoła przodka zachodzi ponad 50% docelowych przemieszczeń górotworu. W odległości 5 m jest to już blisko 90%. Jednocześnie, analogicznie jak w poprzednim przykładzie, w celu ograniczenia wyteżenia obudowy zachodzi konieczność zastosowania upodatnienia technologicznego (kolor zielony – rys. 10). Wykonanie sztywnej obudowy stalowo-betonowej w strefie przodkowej skutkować będzie wystąpieniem silnego ciśnienia deformacyjnego o wartości przekraczającej podporność obudowy wyrobiska. Przeprowadzenie fazowego wznoszenia obudowy umożliwi redukcję ciśnienia deformacyjnego do wartości nieprzekraczającej podporności obudowy.

5.2. Obliczenia numeryczne

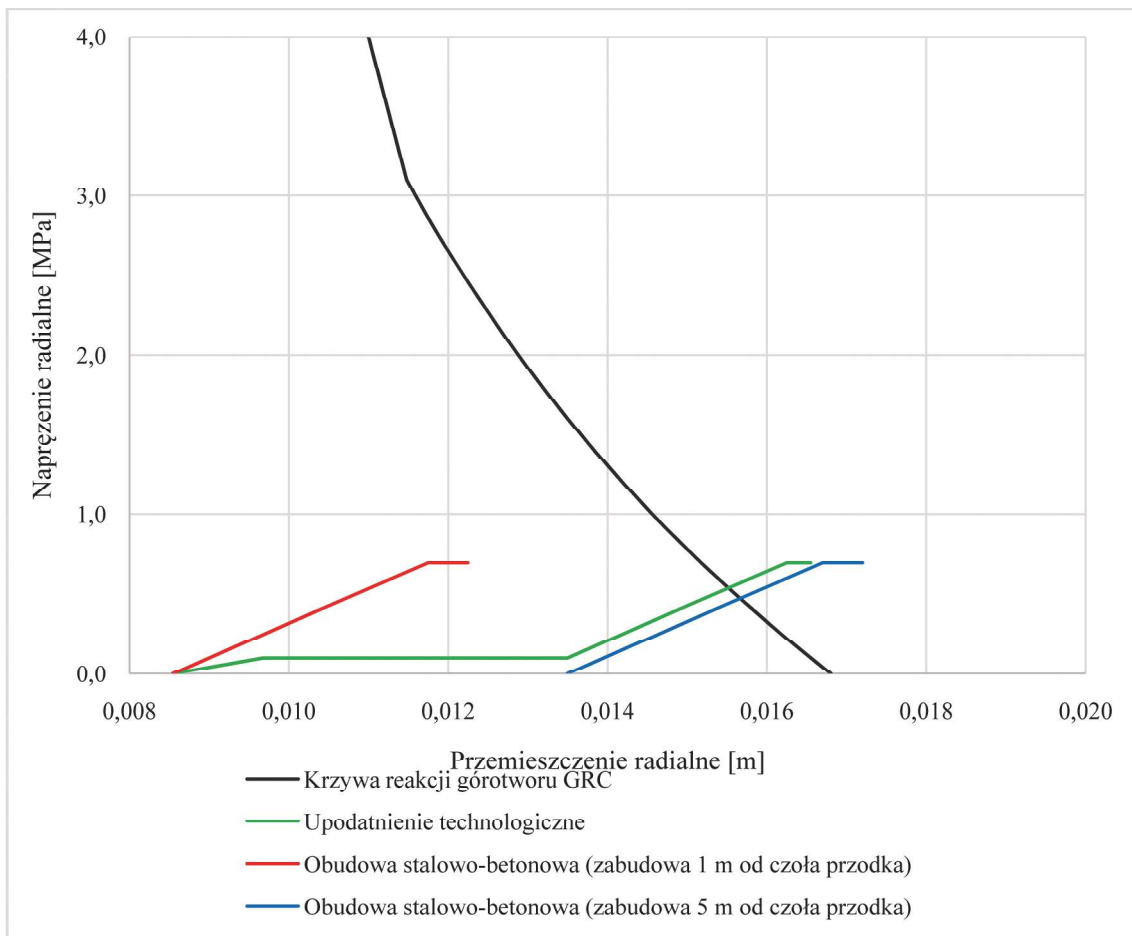
Obliczenia przeprowadzone za pomocą metody sterowania konwergencją zweryfikowano stosując obliczenia numeryczne. Podobnie jak w pierwszym przykładzie, przy budowie modelu wzięto pod uwagę dodatkowe czynniki, które nie mogły zostać uwzględnione w obliczeniach analitycznych, a zatem warstwową budowę górotworu, nachylenie warstw skalnych i rzeczywisty kształt przekroju poprzecznego wyrobiska. Ponadto w rozpatrywanym przykładzie założono, że po upływie pewnego czasu od wykonania analizowanej komory w jej sąsiedztwie (około 15 m poniżej) wydrążony zostanie przekop technologiczny.

W przeciwieństwie do poprzedniego przykładu w modelu zastosowano anizotropowy stan naprężeń pierwotnych. Przyjęto, że pierwotne naprężenia poziome działające prostopadle do osi wyrobiska przyjmują 50% wartości pierwotnych naprężeń pionowych, natomiast pierwotne naprężenia poziome działające wzdłuż osi wyrobiska – 110% wartości pierwotnych naprężeń pionowych. Pozostałe założenia dotyczące modelowania przyjęto analogicznie jak w poprzednim przykładzie. Widok modelu numerycznego przedstawiono na rysunku 11.



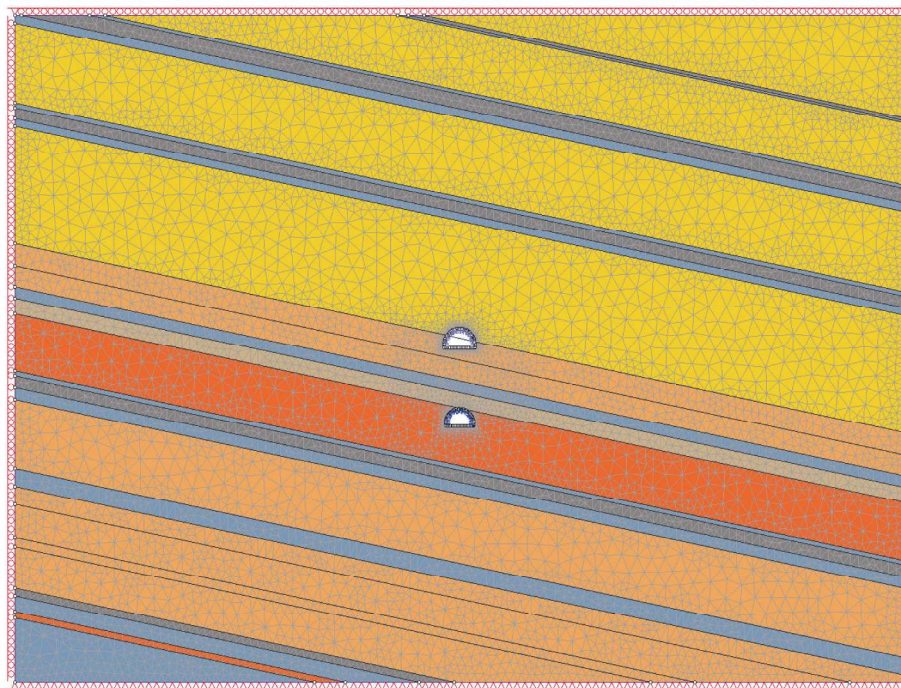
Rys. 9. Krzywa przemieszczeń podłużnych (LDP) – KWK „Knurów-Szczygłowice”

Fig. 9. Longitudinal Displacement Profile (LDP) – Coal Mine “Knurów-Szczygłowice”



Rys. 10. Krzywa reakcji górotworu (GRC) i krzywe charakteryzujące obudowę (SCC) – KWK „Borynia-Zofiówka”

Fig. 10. Ground Reaction Curve (GRC) and Support Characteristics Curve (SCC) – Coal Mine “Borynia-Zofiówka”



Rys. 11. Numeryczny model górotworu – KWK „Borynia-Zofiówka”

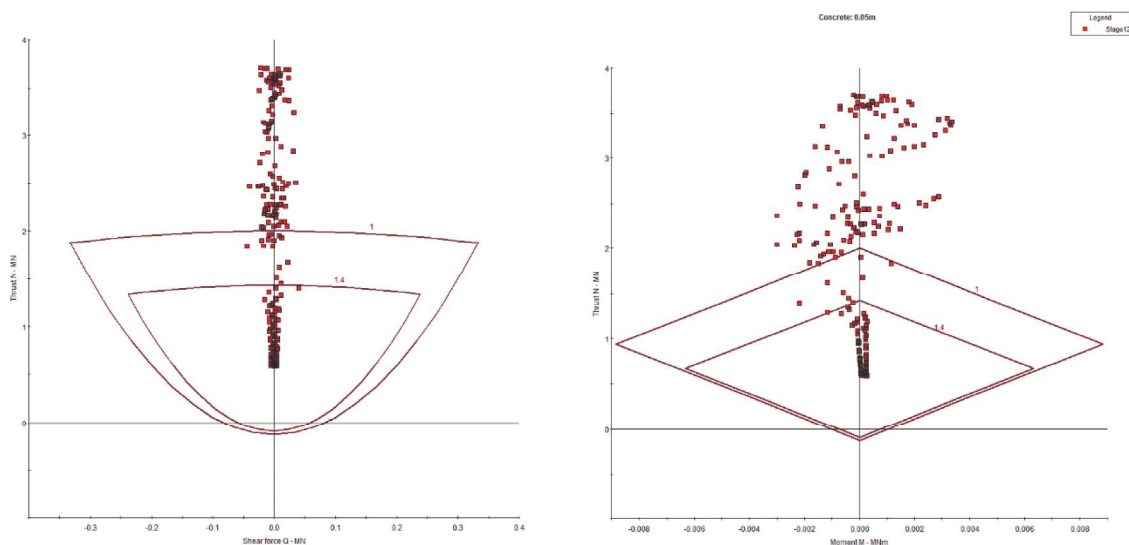
Fig. 11. Geomechanical model – Coal Mine “Borynia-Zofiówka”

Wykresy nośności granicznej dla obudowy stalowo-betonowej wykonywanej w strefie przodkowej (wariant 1) i obudowy wznoszonej z wykorzystaniem upodatnienia technologicznego (wariant 2) przedstawiono na rysunkach 12 i 13. W obu przypadkach wykresy przedstawiają sytuację przed wydrążeniem wspomnianego przekopu technologicznego.

Jak wynika z rysunków 12 i 13, podobnie jak w poprzednim przykładzie, zastosowanie upodatnienia technologicznego umożliwia redukcję sił osiowych występujących w obudowie. Obudowa stalowo-betonowa w wariancie 2 (rysunek 13) spełnia warunki stanu granicznej nośności z zachowaniem wymaganych współczynników bezpieczeństwa. W drugim etapie analizy rozpatrzono wpływ drążenia przekopu technologicznego na stan obudowy analizowanego wyrobiska. Wykresy nośności granicznej obudowy po wykonaniu przekopu przedstawiono na rysunku 14.

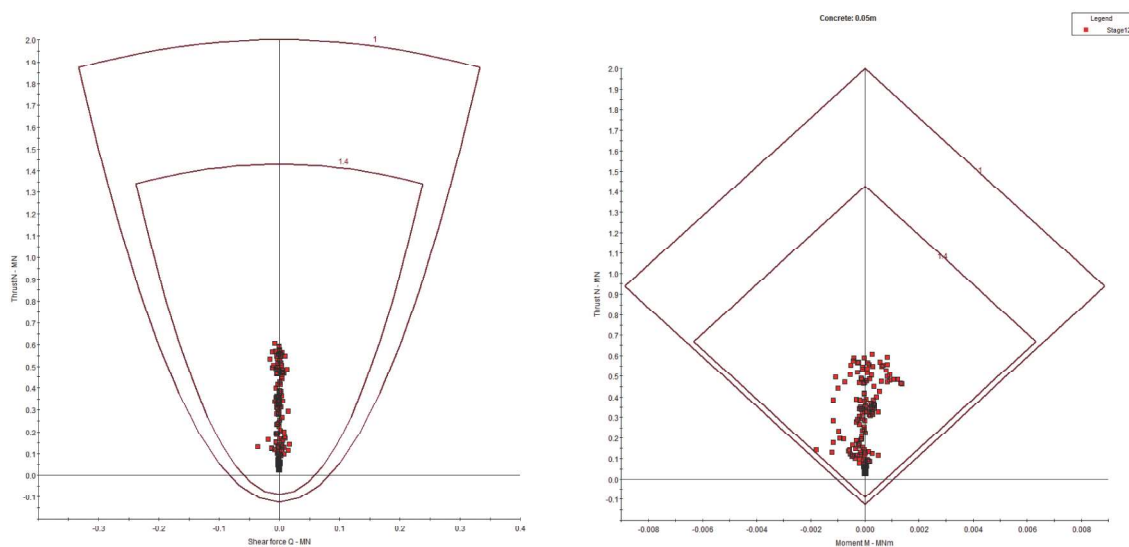
Jak wynika z rysunku 14, wydrążenie przekopu technologicznego w sąsiedztwie analizowanego wyrobiska skutkować będzie wystąpieniem sił rozciągających w obudowie, a tym samym przekroczeniem stanu granicznej nośności obudowy w prawym i lewym ociosie wyrobiska. W celu przeciwdziałania uszkodzeniom obudowy konieczna jest zmiana lokalizacji projektowanego przekopu lub zmiana kolejności rozcinki górotworu. Jak wynika z obliczeń numerycznych wpływ drążenia wyrobiska sąsiedniego jest istotnym czynnikiem, zasadniczo wpływającym na stateczność projektowanej obudowy. Wzajemne oddziaływanie wyrobisk sąsiednich nie może zostać uwzględnione w obliczeniach prowadzonych z pomocą metody CCM.

Na rysunkach 15 i 16 przedstawiono mapę przemieszczeń górotworu oraz zasięgu strefy plastycznej dla obu wariantów.



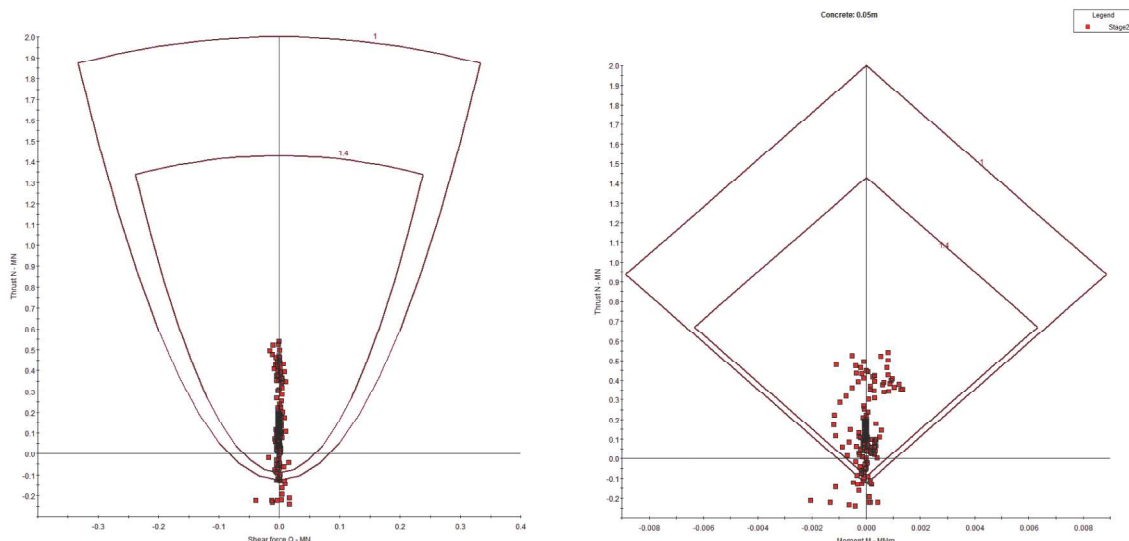
Rys. 12. Wykresy nośności granicznej betonu – KWK „Borynia-Zofiówka” – wariant 1 (obudowa stalowo-betonowa wykonywana 1 m od czoła przodka)

Fig. 12. Support capacity plots of concrete – Coal Mine “Borynia-Zofiówka” – variant 1 (composite steel-concrete support installed 1 m behind the face)



Rys. 13. Wykresy nośności granicznej betonu – KWK „Borynia-Zofiówka” – wariant 2 (obudowa stalowo-betonowa wykonywana 5 m od czoła przodka)

Fig. 13. Support capacity plots of concrete – Coal Mine “Borynia-Zofiówka” – variant 2 (composite steel-concrete support installed 5 m behind the face)



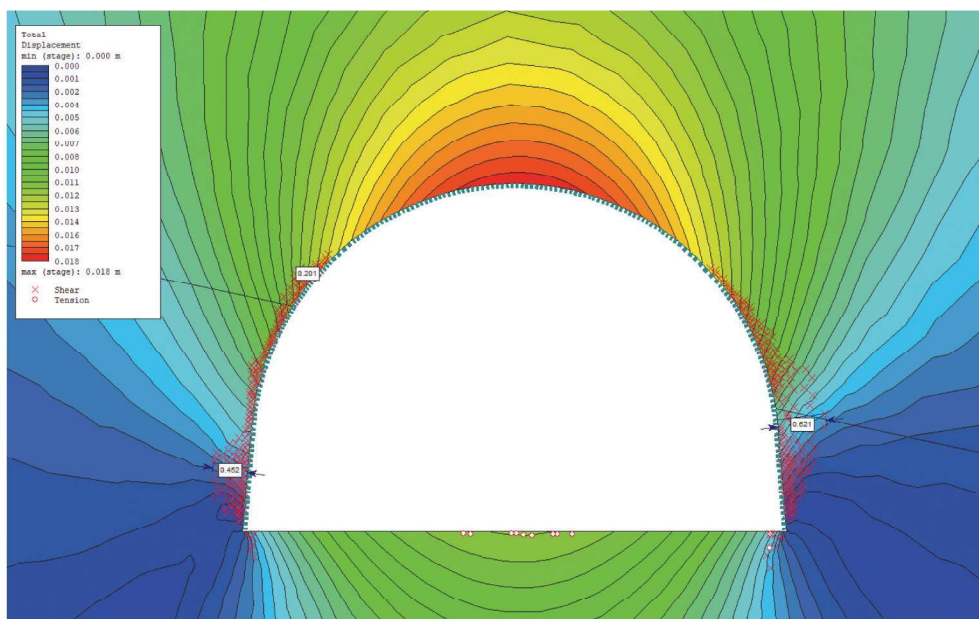
Rys. 14. Wykresy nośności granicznej betonu – KWK „Borynia-Zofiówka” – analiza wpływu drażenia przekopu technologicznego

Fig. 14. Support capacity plots of concrete – Coal Mine “Borynia-Zofiówka” – analysis of influence of technological heading drivage

Przemieszczenia górotworu wahają się od 12 cm w spągu do 19 cm w stropie. Strefa uplastycznionego górotworu występuje wyłącznie w ociosach wyrobiska. Zasięg strefy plastycznej waha się od 40 do 62 cm. W obu przypadkach wartości te zbliżone są do prognozowanych na podstawie obliczeń analitycznych (przemieszczenia konturu wyrobiska 15 cm, zasięg strefy plastycznej 43 cm). Podobnie, jak w poprzednim przykładzie, wcześniejsze wykonanie sztywnej obudowy stalowo-betonowej (wg wariantu 1) wpływa na nieznaczne ograniczenie zasięgu strefy uplastycznionej i wielkości przemieszczeń górotworu.

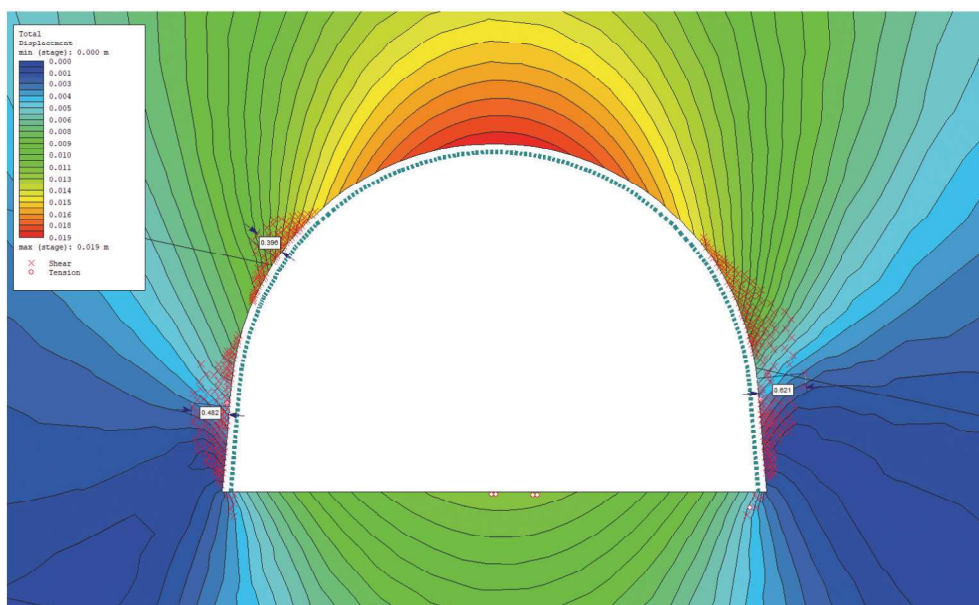
6. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona w artykule metodyka projektowania obudowy za pomocą metody sterowania konwergencją (CCM) jest powszechnie stosowana w światowym budownictwie podziemnym, znajdując szczególne zastosowanie do projektowania obudowy wstępnej tuneli (Tajduś i in. 2012). W przeciwieństwie do metodyki zalecanej przez normę PN-G-05600:1998 w metodzie sterowania konwergencją obudowa jest projektowana ze względu na ciśnienie deformacyjne, w związku z czym nie jest konieczne zastosowanie



Rys. 15. Przemieszczenia górotworu oraz zasięg strefy plastycznej – KWK „Borynia-Zofiówka” – wariant 1 (obudowa stalowo-betonowa wykonywana 1 m od czola przodka)

Fig. 15. Displacement and yielded elements map – Coal Mine “Borynia-Zofiówka” – variant 1 (composite steel-concrete support installed 1 m behind the face)



Rys. 16. Przemieszczenia górotworu oraz zasięg strefy plastycznej – KWK „Borynia-Zofiówka” – wariant 2 (obudowa stalowo-betonowa wykonywana 5 m od czoła przodka)

Fig. 16. Displacement and yielded elements map – Coal Mine “Borynia-Zofiówka” – variant 2 (composite steel-concrete support installed 5 m behind the face)

upodatnienia obudowy, umożliwiającego wystąpienie całości wymuszonych przemieszczeń górotworu. Co więcej, założenie o umożliwieniu wystąpienia całości przemieszczeń górotworu jest niezgodne z zaleceniami Nowej Austriackiej Metody Budowy Tuneli, stanowiącej podstawowy zestaw wytycznych stosowanych obecnie w światowym budownictwie podziemnym. Zastosowanie obudowy o zbyt dużej podatności może doprowadzić do wystąpienia niekontrolowanego rozluźnienia i spękania skał w otoczeniu wyrobiska, doprowadzając tym samym do przejścia ośrodka plastycznego w ośrodek spękania o zerowej spójności i obniżonym kącie tarcia wewnętrznego (Chudek i in. 1985), a tym samym do istotnej zmiany warunków przyjmowanych w założeniach projektowych.

Dodatkową korzyścią wynikającą z zastosowania metody sterowania konwergencją jest możliwość uwzględnienia trójwymiarowości rozpatrywanego zagadnienia. Obliczenia prowadzone zgodnie z wytycznymi normy PN-G-05600:1998 prowadzone są wyłącznie dla tarczy o jednostkowej grubości znajdującej się w płaskim stanie odkształcenia. Metoda sterowania konwergencją umożliwia analizę efektu postępującego odprężenia górotworu skorelowanego z odległością od czoła przodka. Problem ten jest uwzględniany przez normę wyłącznie poprzez wprowadzenie do warunku (1) współczynnika 0,9, który w zależności od lokalnych uwarunkowań górnictwo-geologicznych może różnić się w znacznym stopniu od warunków rzeczywistych. Zagadnienie to zostało opisane szerzej między innymi przez A. Wichurę (Wichur i in. 2007).

Zastosowanie metody sterowania konwergencją wymaga wprowadzenia założeń dotyczących jednorodności górotworu, izotropowości naprężeń pierwotnych i kołowego kształtu przekroju wyrobiska. Zastosowane założenia mogą mieć istotny wpływ na uzyskiwane wyniki. Przeprowadzone obliczenia numeryczne, szczególnie na przykładzie KWK „Borynia-Zofiówka”, wykazały istotną słabość metody, polegającą na przyjmowaniu daleko idących uproszczeń. Jak wykazano na przykładzie, metoda CCM nie powinna być stosowana samodzielnie w skomplikowanych warunkach geologiczno-górnictwowych, w szczególności przy dużej niejednorodności górotworu, znacznym nachyleniu warstw skalnych i bliskości

wyrobisk sąsiadujących. Ważnym aspektem jest także sposób wymiarowania obudowy, które w metodzie CCM prowadzone jest wyłącznie ze względu na osiowe ścisnienie z pominięciem zginania i ścinania. Do dalszych ograniczeń metody zalicza się także trudność w modelowaniu wpływu obudowy kotwowej, szczególnie wykonywanej z kotew wklejanych.

W związku z powyższym obliczenia prowadzone metodą sterowania konwergencją, należy w miarę możliwości weryfikować za pomocą stosownych obliczeń numerycznych, w których liczba uproszczeń może zostać ograniczona do niezbędnego minimum. Należy podkreślić, że przedstawione zastrzeżenia dotyczą w praktyce większości metod analitycznych stosowanych w geomechanice, w tym metod proponowanych przez Polskie Normy.

Literatura

- BN-82/0434-07: Wyrobiska korytarzowe i komorowe w kopalniach. Obudowa powłokowa. Wytyczne projektowania i obliczeń statycznych.
- BOBEK R., GLUCH P., RATAJCZAK A., ŚLEDŹ T., TWARDOKĘS J., WARDAS A. 2016 – Sposoby wzmocnienia górotworu dla poprawy stateczności wyrobisk korytarzowych na dużej głębokości w warunkach występowania zagrożeń naturalnych i technicznych w kopalniach węgla kamiennego, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, nr 94, 53-66.
- BUTTON E.A., SCHUBERT W., MORITZ B. 2003 – The Application of Ductile Support Methods in Alpine Tunnels, 10th ISRM Congress, Sandton.
- CHUDEK M., MATEJA J., RULKA K. 1985 – Podstawy teoretyczne oraz nowe zasady doboru, ustalenia obciążeń i wymiarowania obudów długotrwałych wyrobisk korytarzowych i komorowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo, z. 124.
- FABICH S., BAUER J., RAJCAKOWSKAM., ŚWITON S. 2015 – Design of the shaft lining and shaft stations for deep polymetallic ore deposits: Victoria Mine case study, Mining Science, vol. 22, 127-146.
- HOEK E. 2006 – Practical Rock Engineering. Tunnels in weak rock. Rocscience Inc., Toronto.
- HOEK E., CARRANZA-TORRES C., DIEDERICH S., CORKUM B.,

- 2008 – The 2008 Kersten Lecture. Integration of geotechnical and structural design in tunnelling, Annual Geotechnical Engineering Conference, Minneapolis.
- HOEK E. 2012 – Rock Support Interaction analysis for tunnels in weak rock masses, Rocscience Inc., Toronto.
- KAMIŃSKI P., ŁAPUSZEK B., SZYNDLER J. 2017 – Wykonanie wlotu podszybia szybu „Janina VI” na poziomie 800, „Wiadomości Górnicze”, R. 68, nr 4, 178-183.
- OTTO A. 2021 – Ocena przydatności zastosowania metod numerycznych w projektowaniu wlotów szybowych, Akademia Górniczo-Hutnicza. Kraków praca magisterska, niepublikowana.
- PN-B-03264:2002: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-G-05020:1997: Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe. Obudowa sklepienia. Zasady projektowania i obliczeń statycznych.
- PN-G-05600:1998: Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe. Obudowa powłokowa. Zasady projektowania i obliczeń statycznych.
- PRACA ZBIOROWA POD. RED. K. RUŁKI 2001 – Uprozczone zasady doboru obudowy odrzwiowej wyrobisk korytarzowych w zakładach wydobywających węgiel kamienny, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- PRUSEK S., MAŁKOWSKI P., ROTKEGEL M., BRODA M. 2021 – Beton natryskowy w polskich kopalniach węgla kamiennego, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- ROZMUS A., FICEK P. 2020 – Wzmacnianie skorodowanej stalowej obudowy odrzwiowej za pomocą torkretowania na przykładzie KWK Piast-Ziemowit Ruch Ziemowit, „Przeгляд Górniczy”, nr 7, 38-44.
- SCHUBERT W., BRUNNEGGER S. 2017 – New ductile tunnel lining system, World Tunnel Congress, Bergen.
- TAJDUŚ A., CAŁA M., TAJDUŚ K. 2012 – Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projektowanie i budowa tuneli, Wydawnictwo AGH, Kraków.
- VLACHOPOULOS N., DIEDERICH S. 2009 – Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnel; Rock Mechanics and Rock Engineering, 42 (2), 131-146.
- WALENTEK A. 2019 – Analysis of the Applicability of the Convergence Control Method for Gateroad Design Based on Conducted Underground Investigations, Archives of Mining Sciences, vol. 64, no. 4, 765-783.
- WICHURA., FRYDRYCH K., STROJEK D. 2005 – Zasady doboru obudowy powłokowej, „Górnictwo i Geoinżynieria”, z. 3/1, 499-509.
- WICHUR A., BAJOREK M., FRYDRYCH K. 2007 – Metoda sprawdzania podatności obudowy powłokowej, „Górnictwo i Geoinżynieria”, z. 3/1, 459-468.

Artykuł wpłynął do redakcji – wrzesień 2021
Artykuł akceptowano do druku – 12.11.2021