

METODA PROJEKTOWANIA PORTALOWO-SZKIELETOWEJ OBUDOWY POŁĄCZEŃ WYROBISK KORYTARZOWYCH

MAREK ROTKEGEL

PROJEKT OBUJOWY

OBLICZENIA

ZASTOSOWANIE

DOUMENTACJA TECHNICZNA



GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
KATOWICE 2017

Marek Rotkegel

Metoda projektowania portalowo-szkieletowej obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych



G I G

GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
Katowice 2017

Rada Programowa ds. Wydawnictw: prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś (przewodniczący), prof. Roman Ditchkovsky, prof. Dou Lin Ming, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, prof. Juraj Durove, prof. dr hab. inż. Czesława Rosik-Dulewska, doc. ing. Richard Snuparek, prof. Tomasz S. Wiltowski, prof. dr hab. inż. Teodor Winkler, prof. Valery N. Zakharov

Komitet Kwalifikacyjno-Opiniodawczy: prof. dr hab. inż. Jan Wachowicz (przewodniczący), dr hab. inż. Małgorzata Wysocka, prof. GIG (zastępca przewodniczącego), dr inż. Jan Bondaruk, dr hab. inż. Józef Kabiesz, prof. GIG, dr hab. inż. Grzegorz Mutke, prof. GIG, prof. dr hab. Adam Smoliński, prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk

Recenzenci

dr hab. inż. Jarosław Brodny, prof. PŚI
dr inż. Stanisław Stałęga

Redakcja wydawnicza

Małgorzata Kuśmirek-Zegadło

Korekta

Barbara Dusik

Skład, łamanie

Krzysztof Gralikowski

Projekt okładki

Adam Piernikarczyk

ISBN 978-83-65503-08-4

Printed in Poland

All rights reserved

Copyright by Główny Instytut Górnictwa

Sprzedaż wydawnictw Głównego Instytutu Górnictwa prowadzi

Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych

wydawnictwa.gig.eu

tel. 32 259-24-03, 32 259-24-04, e-mail: mkusmirek@gig.eu

Katowice, GIG 2017. Ark. wyd. 12,0. Format B5.

Druk i oprawa: Zakład Poligraficzny „Węglogryf”, Katowice.

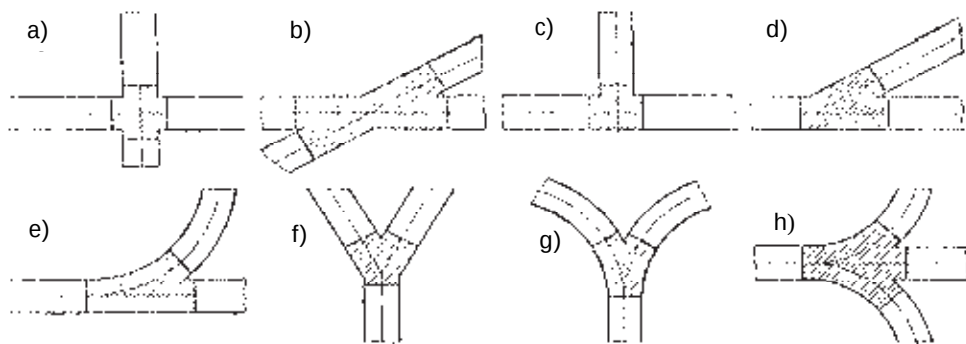
Spis treści

1. Wprowadzenie	5
2. Sposoby zabezpieczania połączeń wyrobisk	8
3. Metody określania obciążeń działających na obudowę połączeń wyrobisk korytarzowych	14
3.1. Zasady doboru obudowy wyrobisk korytarzowych	14
3.2. Określanie obciążenia obudowy z wykorzystaniem metod numerycznych	23
3.2.1. Wpływ kąta połączenia wyrobisk na stan wytrzymałości górotworu	23
3.2.2. Zasięg strefy spękań skał stropowych na długości wyrobiska	33
4. Szkieletowe obudowy odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk korytarzowych	42
4.1. Ogólna charakterystyka	42
4.2. Proces projektowo-konstrukcyjny	42
4.2.1. Określenie założeń	44
4.2.2. Opracowanie koncepcji	45
4.2.3. Projektowanie geometrii obudowy	46
4.2.4. Analiza wytrzymałościowa	48
4.2.5. Geometryczna weryfikacja konstrukcji	56
4.2.6. Sporządzenie dokumentacji rysunkowej	57
4.3. Narzędzia informatyczne stosowane w procesie projektowo-konstrukcyjnym	58
4.3.1. Program UZDO	59
4.3.2. Program ODRZWIA	64
4.3.3. Biblioteka CAD	70
4.3.4. Skanowanie laserowe	71
4.4. Materiały i kształtowniki stosowane na obudowę	73
4.5. Maksymalne wykorzystywanie parametrów podpornościowych obudowy portalowej	81
4.5.1. Stabilizacja portalu i pełny odpór ociosów	81
4.5.2. Modyfikacja kształtu portalu	87
4.5.3. Wzmacnianie belek wspornika	95
4.5.4. Wzmacnianie naroża odgałęzienia	99
4.6. Produkcja obudowy	101
4.7. Zabudowa w wyrobisku	102
5. Określanie obciążeń działających na obudowę w warunkach dołowych	106
5.1. Metoda określania obciążeń przez pomiar deformacji	106
5.2. Metoda określania obciążeń obudowy przez analizę nośności wybranych elementów	107
5.3. Badania i obserwacje dołowe	109
5.3.1. Odgałęzienie portalowe w kopalni „Bobrek-Centrum”	109
5.3.2. Odgałęzienie portalowe w kopalni „Chwałowice”	115
5.3.3. Odgałęzienie portalowe w kopalni „Marcel”	120
5.3.4. Skrzyżowanie portalowe w Przedsiębiorstwie Górniczym „Silesia”	122

5.3.5. Odgałęzienie portalowe w Zakładzie Górniczym „Sobieski”	124
5.3.6. Odgałęzienie portalowe w kopalni „Murcki-Staszic”	128
5.4. Interpretacja wyników i podsumowanie	133
6. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych szkieletowej obudowy	
połączeń wyrobisk korytarzowych	135
6.1. Typowe konstrukcje obudowy odgałęzień i skrzyżowań	135
6.1.1. Główne założenia projektowe	135
6.1.2. Przykłady portalowej obudowy odgałęzień	137
6.1.3. Przykłady portalowej obudowy skrzyżowań	140
6.2. Nietypowe obudowy portalowe	145
6.2.1. Obudowy połączeń wynikające z nietypowej geometrii	145
6.2.2. Konstrukcje obudów zabezpieczające wyrobiska nachylone	147
6.2.3. Konstrukcje obudów dla warunków zwiększonych obciążeń górotworem	150
6.2.4. Konstrukcje obudów zabezpieczające połączenia wyrobisk o znacznych gabarytach	152
6.2.5. Inne nietypowe konstrukcje	155
6.3. Wybrane przykłady obudowy portalowej stosowanej poza połączeniami wyrobisk	157
6.3.1. Komora nad zbiornikiem retencyjnym II w kopalni „Pniówek”	157
6.3.2. Wzmocnienie obudowy skrzyżowania	160
6.3.3. Obudowa portalowa rejonu zmiany kierunku wyrobiska	163
6.3.4. Kombinowana obudowa odgałęzienia wyrobisk	164
6.3.5. Przebudowa wyrobiska w skrzyżowanie	165
Podsumowanie	169
Literatura	171

1. WPROWADZENIE

Eksploracja złoża w podziemnych zakładach górniczych wymaga wydrążenia i zabezpieczenia wielu udostępniających wyrobisk korytarzowych. Wyrobiska te, w zależności od systemu eksploatacji, struktury udostępniania złoża, a także wielkości kopalni, tworzą rozbudowaną sieć wyrobisk, łączących się ze sobą w wielu miejscach. Umożliwia to sprawny odstawę urobku, transport ludzi i materiałów oraz wentylację kopalni. Połączenia te ze względu na układ i kierunki wyrobisk mogą tworzyć odgałęzienia, rozwidlenia lub skrzyżowania, których schematy przedstawiono na rysunku 1.1. Zgodnie z definicją zawartą w Leksykonie górniczym (Olszewski i in. 1989) odgałęzienie wyrobiska korytarzowego to miejsce, w którym jedno wyrobisko korytarzowe rozdziela się na dwa wyrobiska. Rozwidlenie zostało zdefiniowane jako rozgałęzienie wyrobiska na dwa, przy czym osie wyrobisk mają kształt litery Y, a skrzyżowanie wyrobisk korytarzowych – jako przecięcie się dwóch chodników pod kątem prostym (skrzyżowanie proste) lub pod kątem ostrym (skrzyżowanie skośne). Niezależnie od tego mogą być one projektowane jako poziome lub nachylone w tym samym kierunku lub w różnych kierunkach.

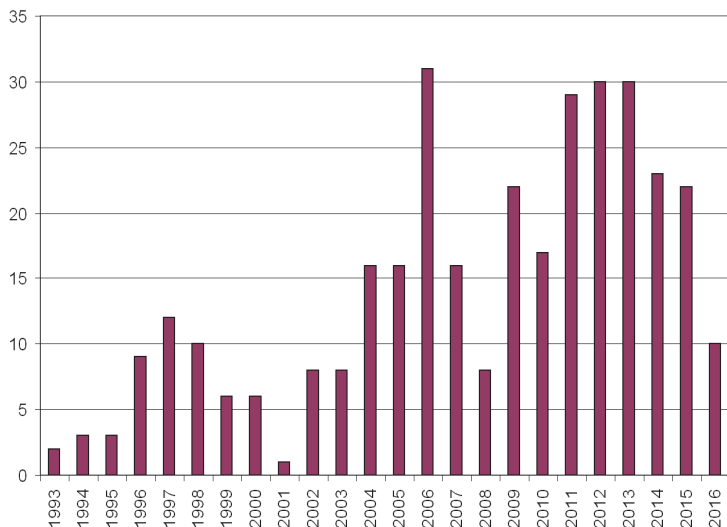


Rys. 1.1. Rodzaje połączeń wyrobisk korytarzowych: a, b, c – skrzyżowania; d, e, f, g, h – odgałęzienia i rozwidlenia (Stałęga 2001)

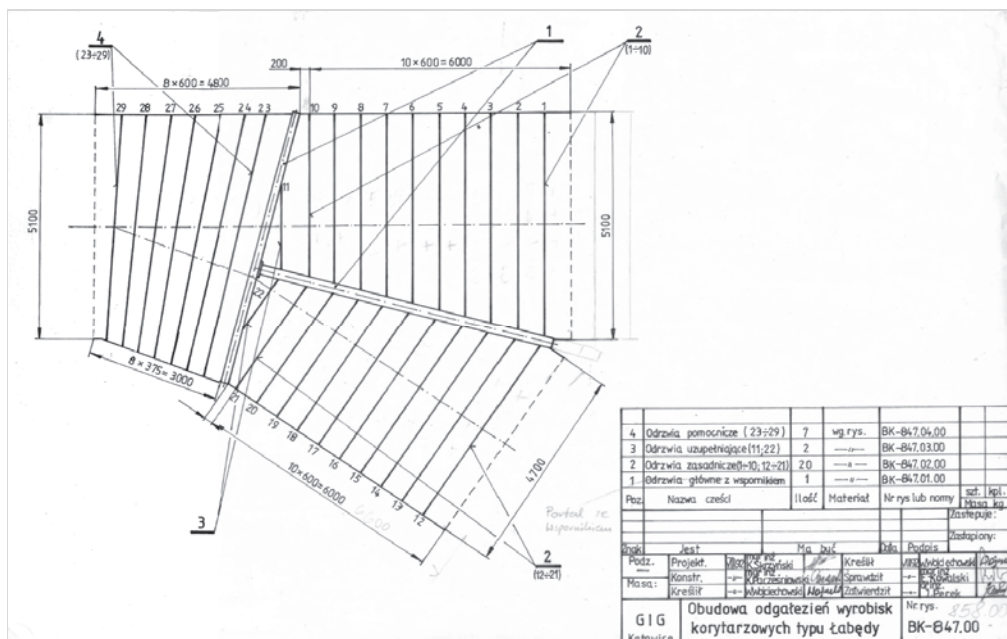
Zdecydowana większość połączeń wyrobisk korytarzowych to wyrobiska wielkogabarytowe o przekroju poprzecznym przekraczającym 30 m^2 , dla których dobór obudowy od kilku lat wymaga opinii rzeczoznawcy do spraw ruchu zakładu górniczego w zakresie grupy XIV (Ustawa 2011; Rozporządzenie 2002, 2006, 2017; Obwieszczenie 2016).

Jednym ze sposobów zabezpieczania połączeń wyrobisk korytarzowych jest stosowanie obudowy portalowej, zwanej też szkieletową lub portalowo-szkieletową, której zasadnicza konstrukcja w postaci ramy uzupełniona jest odrzwiami. Sposób ten pozwala na dostosowywanie obudowy do warunków geologiczno-górniczych i rozmiaru połączenia wynikającego z rozmiaru, układu i przeznaczenia wyrobisk. Obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych, oparte na konstrukcji portalowej (szkieletowej), są coraz częściej stosowane w polskich kopalniach węgla kamiennego. Zwłaszcza w ostatnich latach dał się zauważyć znaczny wzrost liczby zastosowanych tego typu konstrukcji. Główny Instytut Górnictwa – Zakład Technologii Eksploatacji i Obudów

Górnich (GIG-BG) od 25 lat zajmuje się problematyką związaną z projektowaniem portalowych obudów odgałęzień i skrzyżowań (rys. 1.2). Pierwszy taki projekt został opracowany w sierpniu 1992 roku (rys. 1.3). Od tego czasu do końca roku 2016 zaprojektowano 338 konstrukcji tego typu, przeznaczonych do zabudowy w konkretnych wyrobiskach kopalń.



Rys. 1.2. Liczba projektów portalowych obudów połączeń wyrobisk wykonanych w GIG-BG w latach 1993–2016



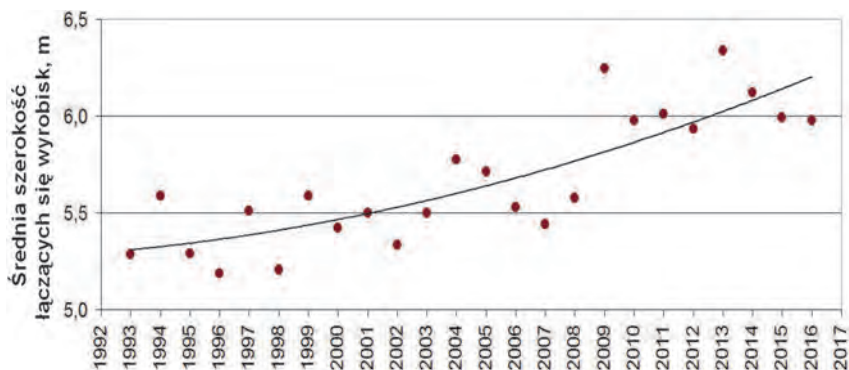
Rys. 1.3. Rysunek zestawieniowy pierwszego projektu portalowej obudowy odgałęzienia opracowanego w GIG (sierpień 1992 r.)

W tym czasie obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych były przedmiotem prawie 400 zadań projektowych wykonywanych przez GIG-BG, przede wszystkim oryginalnych obudów, a także projektów próbnych, projektów opracowanych w celu certyfikacji obudowy (wcześniej dopuszczenia Prezesa WUG), modyfikacji i adaptacji konstrukcji do zmienionej, nowej lokalizacji obudowy lub samych obliczeń wytrzymałościowych.

Początkowo projekty wykonywane były głównie na zlecenie producentów obudów, dostarczających do kopalń gotowe konstrukcje. W ostatnich latach projekty wykonywane były także dla kopalń, które same, na drodze procedur przetargowych, zlecały wykonawstwo konstrukcji. Do roku 2016 około 75% projektów obudów wykonano na zlecenie ich producentów, a około 25% – na zlecenie kopalń węgla kamiennego.

Z rozeznania autora wynika, że zaprojektowane w GIG portalowe obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych stanowią co najmniej 2/3 wszystkich tego typu konstrukcji zastosowanych w polskim górnictwie węglowym.

Zwiększenie zainteresowania portalowymi obudowami odgałęzień i skrzyżowań (rys. 1.2) wynika przede wszystkim z prowadzenia eksploatacji w coraz trudniejszych warunkach geologiczno-górnictwowych, na coraz większej głębokości i w sytuacji występowania zaszłości eksploatacyjnych, powodujących wzrost obciążeń działających na obudowę. Nie bez znaczenia jest też konieczność stosowania coraz większych gabarytów wyrobisk, co pokazano na rysunku 1.4. Średnia wielkość (szerokość) łączących się wyrobisk w ciągu ostatnich 24 lat wzrosła o blisko jeden metr. Należy zaznaczyć, że znaczna część tego wzrostu przypada na ostatnią dekadę.



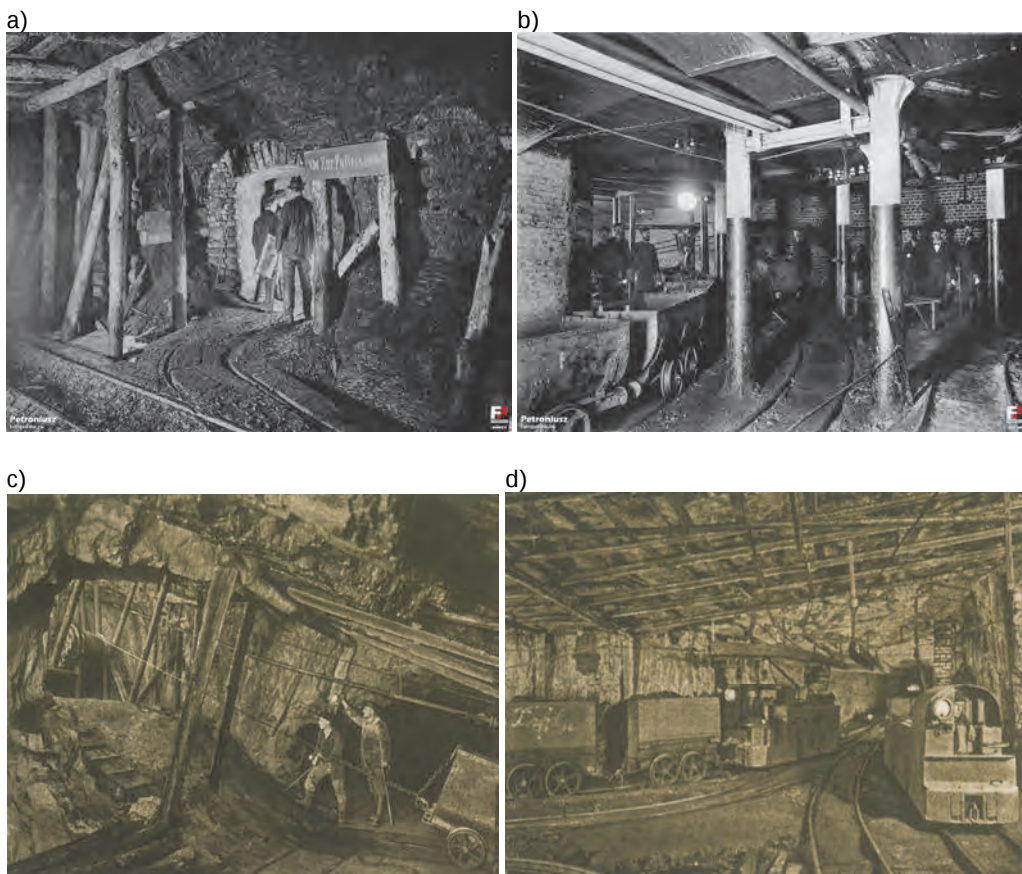
Rys. 1.4. Wielkość – rozmiar wyrobisk zabezpieczanych obudowami portalowymi projektowanymi w GIG-BG w latach 1993–2016

(Wielkość przyjęto jako średni rozmiar wszystkich łączących się wyrobisk w danym roku; linia trendu dla analizowanego okresu: $y = 0,001x^2 - 4,0782x + 4054,1$)

Istotną zaletą odgałęzień i rozwidleń portalowo-szkieletowych jest także ich mniejsza wysokość w porównaniu z połączeniem wyrobisk zabezpieczonym obudową tradycyjną. Ma to istotne znaczenie w przypadku zagrożenia metanowego, a ponadto pozwala uniknąć konieczności urabiania i odstawy znacznych objętości skał stropowych. Niezaprzeczalną zaletą obudów portalowych jest możliwość ich dopasowania do wymagań odbiorcy, co ma istotne znaczenie w przypadku skomplikowanych geometrycznie połączeń wyrobisk.

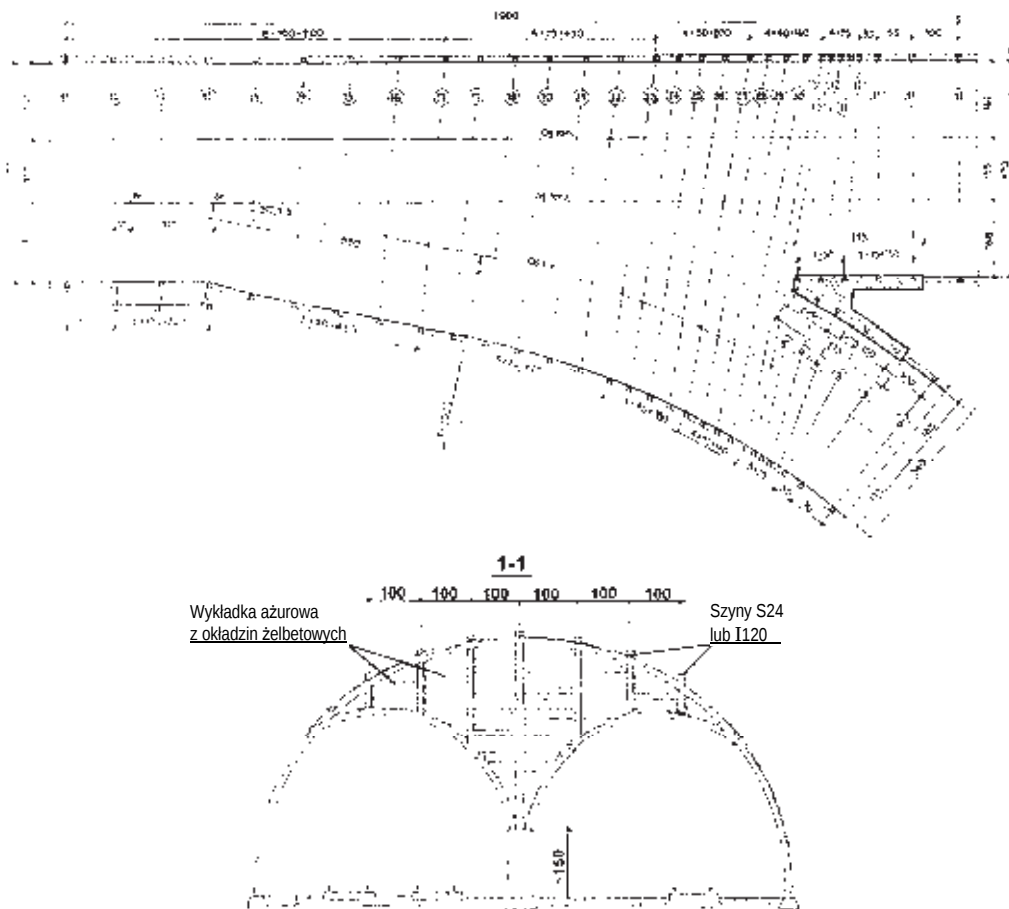
2. SPOSOBY ZABEZPIECZANIA POŁĄCZEŃ WYROBISK

Z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, że początki zabezpieczania rejonów połączeń wyrobisk przez podparcie stropu, a następnie przez stosowanie obudowy, zbiegają się w czasie z wprowadzaniem do użytku wszelkiego rodzaju obudów wyrobisk korytarzowych. Świadczyć o tym mogą archiwalne poradniki, ryciny i fotografie (fot. 2.1).



Fot. 2.1. Archiwalne fotografie przedstawiające zabezpieczenia połączeń wyrobisk korytarzowych (fot. a–b – Internet 1; fot. c–d – udostępnione dzięki uprzejmości Muzeum Górnictwa Węglowego w Zabrzu)

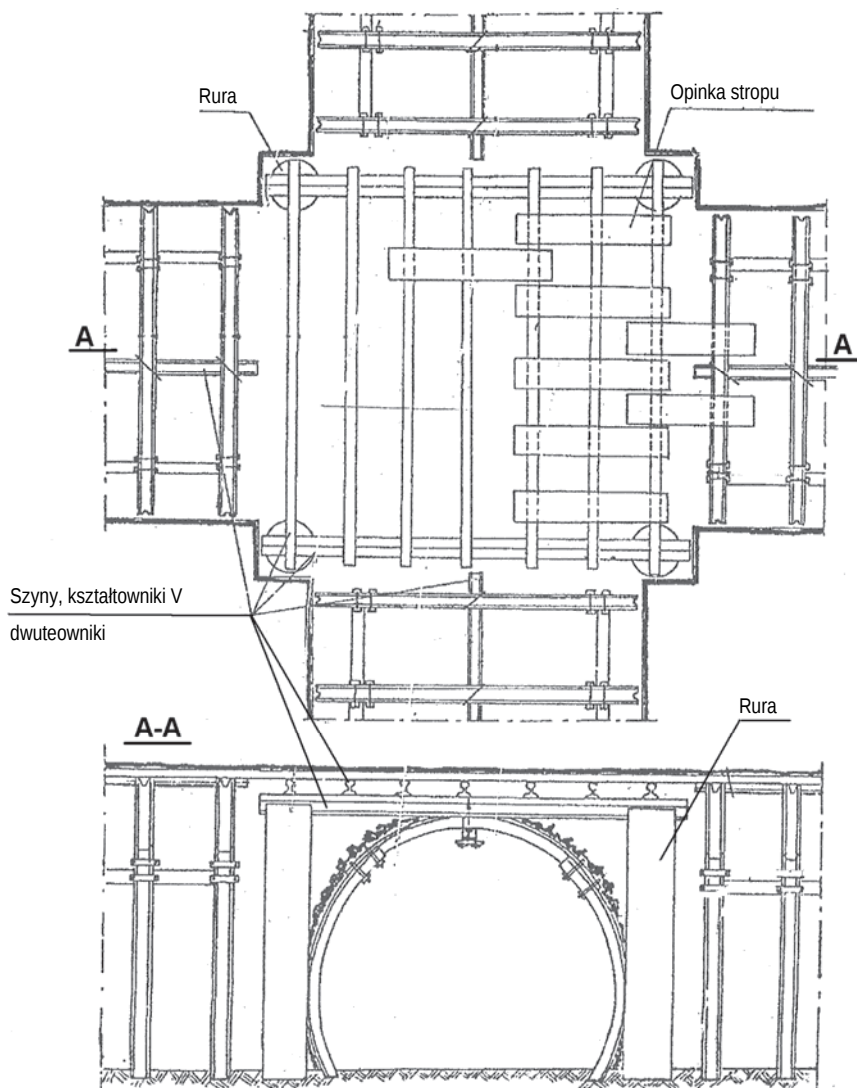
Wraz z rozwojem obudów opracowywano nowe sposoby zabezpieczania połączeń wyrobisk. Podstawowym, tradycyjnym rozwiązaniem konstrukcyjnym, stosowanym także do dziś do zabezpieczania odgałęzień i rozwidleń są tzw. obudowy palmowe lub okularowe, oparte na wielkogabarytowych stalowych odrzwiach, a w przypadku skrzyżowań – obudowy słupowe ze stropem zabezpieczonym za pomocą rusztu z profili stalowych. Przykłady takich konstrukcji przedstawiono na rysunkach 2.1 i 2.2 oraz fotografii 2.2.



Rys. 2.1. Przykładowy schemat tradycyjnej obudowy odgałęzień (GBSiPG 1974)

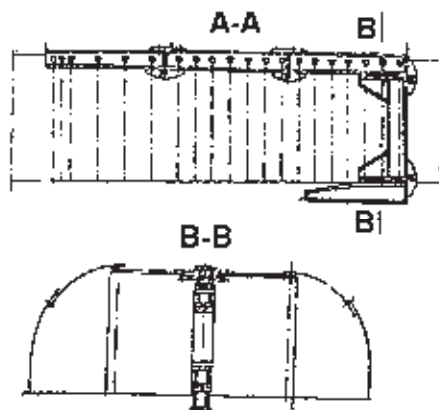
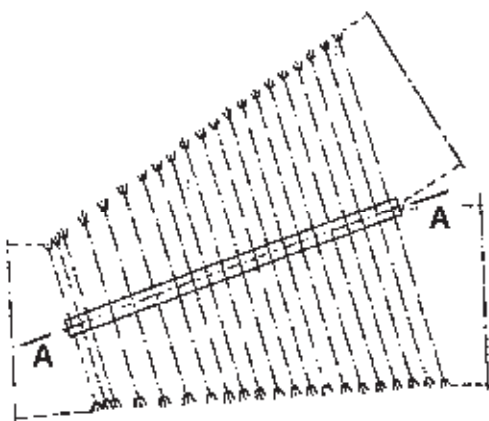


Fot. 2.2. Czoło odgałęzienia zabezpieczone obudową tradycyjną

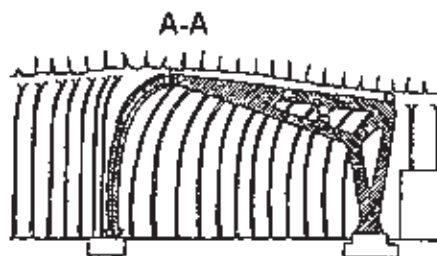
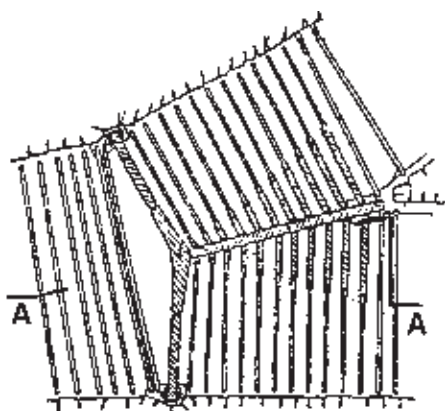


Rys. 2.2. Przykładowy schemat tradycyjnej obudowy skrzyżowania (Stałęga 2001)

Oprócz wspomnianych wyżej tradycyjnych rozwiązań obudów odgałęzień i skrzyżowań w ostatnich latach stosowano także obudowy bazujące na stalowym szkieletie, najczęściej ze skręcanych belek, tworzących różne zarysy dopasowane do łączących się wyrobisk. Wkład w opracowanie takich konstrukcji wnieśli ośrodki badawcze i instytuty (m.in. BUDOKOP, GIG), a także producenci obudów (Huta „Łabędy”, Heintzmann-Silesia, PPG ROW-JAS) oraz kopalnie (m.in. „Bogdanka”, „Marcel”, „Janina”). Jedne z pierwszych, ciekawszych rozwiązań tych konstrukcji przedstawiono na rysunkach 2.3 i 2.4 oraz fotografii 2.3. Próbę usystematyzowania schematów obudów połączeń wyrobisk korytarzowych, ze szczególnym uwzględnieniem obudów portalowych, przedstawiono na rysunku 2.5, natomiast na rysunku 2.6 przedstawiono liczbę projektów poszczególnych typów obudów szkieletowych realizowanych w GIG.



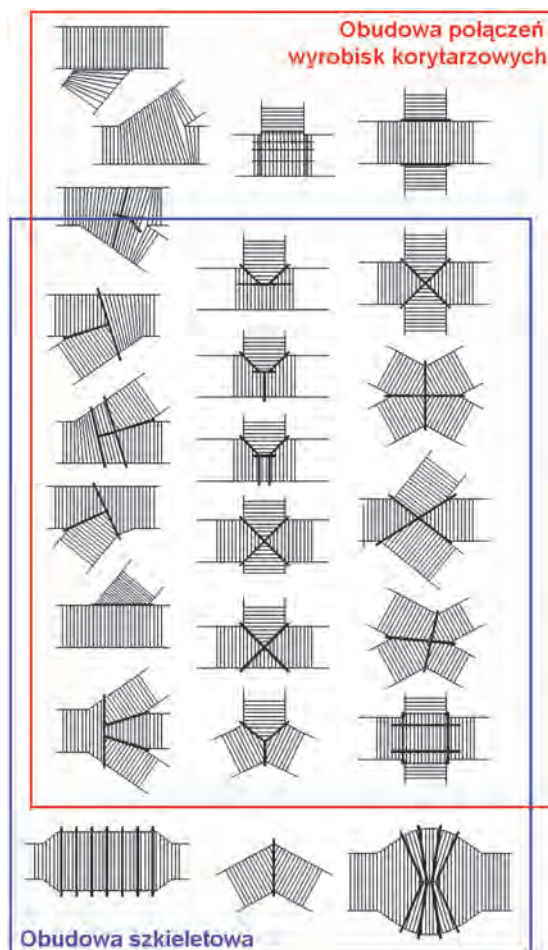
Rys. 2.3. Jedna z pierwszych konstrukcji szkieletowej obudowy odgałęzień wyrobisk korytarzowych (Stałęga 2001)



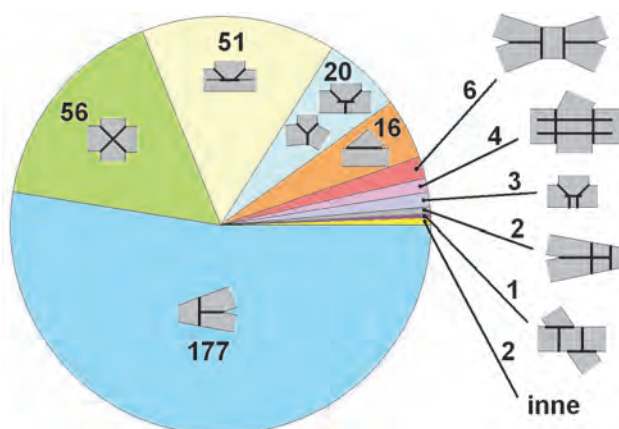
Rys. 2.4. Jedna z pierwszych konstrukcji portalowej obudowy odgałęzień wyrobisk korytarzowych (Wojtusiak 1975)



Fot. 2.3. Fragmenty konstrukcji przedstawionej na rysunku 2.4



Rys. 2.5. Schematy obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych i obudowy szkieletowej



Rys. 2.6. Liczba projektów poszczególnych typów konstrukcji szkieletowej wykonanych w GIG w latach 1993–2016

Jak wynika z wykresu (rys. 2.6) dominującym typem wśród zaprojektowanych konstrukcji jest obudowa odgałęzień wyrobisk korytarzowych oparta na konstrukcji portalowo-wspornikowej (177 projektów). Dostyć często stosowana jest także obudowa skrzyżowań na bazie dwóch krzyżujących się portali (56 projektów) lub dwóch wsporników połączonych z belką przystropową (51 projektów). Z uwagi na ich liczbę można przyjąć, że oprócz przypadków szczególnych, są to rozwiązania typowe (opisano je w rozdz. 6.1). Pozostałe rozwiązania, w liczbie 55, stanowią 16% ogólnej liczby projektów i można je uznać za nietypowe.

3. METODY OKREŚLANIA OBCIĄŻEŃ DZIAŁAJĄCYCH NA OBUDOWĘ POŁĄCZEŃ WYROBISK KORYTARZOWYCH

Wartość obciążenia działającego na obudowę w rejonie połączeń wyrobisk korytarzowych jest kluczowym elementem procesu projektowania obudowy. Wynika ona ze stanu naprężenia i odkształcenia masywu skalnego otaczającego połączenie wyrobisk, a jej znajomość pozwala na zaprojektowanie konstrukcji obudowy spełniającej wymagania jakości, niezawodności i bezpieczeństwa (Duży 2005). Chudek (1986) określił podstawowe wymagania dotyczące lokalizacji połączeń wyrobisk w skałach zwięzłych, ich gabarytów oraz podał sposoby obliczania obciążeń. Również Rułka z zespołem i Małoszewski z zespołem wskazali sposób określania obciążeń działających na obudowę odgałęzień (Rułka, Mateja, Jasnowski 1984; Małoszewski, Mateja, Rułka 1989a, 1989b). Natomiast Zakład Badawczo-Rozwojowy Budownictwa Górniczego opracował tymczasowe wytyczne w tym zakresie (BUDOKOP 1988). Szereg hipotez określających zachowanie się górotworu w rejonie odgałęzienia lub skrzyżowania wyrobisk przytoczył w swej pracy Stałęga (2001), który podzielił je na kilka grup. W pierwszej grupie umieścił hipotezy oparte na metodach empirycznych bazujących na wieloletnich obserwacjach i pomiarach górotworu. Do drugiej grupy zaliczył hipotezy oparte na warunku granicznej równowagi górotworu – Protodiakonowa, Terzagiego, Ruppenejta, Cymbariewicza, Sałustowicza i inne. Podstawę tych hipotez stanowi przyjęcie modelu opartego na teorii sklepienia ciśnień lub modelu wynikającego z założenia, że proces deformacji obejmuje ogół skał nadległych. Kolejną grupę stanowiły hipotezy oparte na równaniach ośrodka sypkiego, traktujące górotwór jako ośrodek sypki rozporowy lub bezrozporowy. Czwartą, najbardziej zróżnicowaną grupę, tworzą hipotezy oparte na równaniach ośrodka o złożonych cechach mechanicznych. Górotwór może być traktowany jako sprężysty, sprężysto-spekany, sprężysto-plastyczny lub sprężysto-plastyczno-spekany. Do tej grupy można także zaliczyć modele reologiczne.

3.1. Zasady doboru obudowy wyrobisk korytarzowych

W praktyce projektowej obciążenie obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych najczęściej oblicza się w oparciu o obowiązujące zasady doboru obudowy. Określają one wartość obciążenia w poszczególnych strefach połączenia, wynikających z jego geometrii.

- **„Zasady doboru i projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny”** (Chudek i in. 1999)

Jednym ze sposobów obliczania obciążeń działających na obudowę połączeń wyrobisk korytarzowych jest metoda opisana w ww. zasadach. Przedstawiono w nich między innymi metodę określania oddziaływania górotworu na obudowę połączenia wyrobisk korytarzowych dla podstawowych schematów połączeń.

Dla określenia obciążeń działających na obudowę w pierwszej kolejności oblicza się naprężenie pierwotne w górotworze nienaruszonym za pomocą wzoru

$$\rho_z = -\gamma H, \text{ MPa} \quad (3.1)$$

gdzie:

γ – ciężar objętościowy skał nadległych w masywie, MN/m³;
 H – głębokość lokalizacji wyrobiska, m.

W kolejnym kroku oblicza się wielkość naprężeń w górotworze

$$\sigma_z = \rho_z k_1 k_2 k_3 k_4 k_d, \text{ MPa} \quad (3.2)$$

gdzie:

ρ_z – naprężenie pierwotne w górotworze, MPa;
 k_1 – współczynnik koncentracji naprężeń wynikający z oddziaływania zaburzeń tektonicznych;
 k_2 – współczynnik koncentracji naprężeń wynikający z oddziaływania sąsiednich wyrobisk;
 k_3 – współczynnik koncentracji naprężeń wynikający z oddziaływania krawędzi eksploatacyjnych i resztek pokładów;
 k_4 – współczynnik koncentracji naprężeń wynikający z nachylenia warstw masywu;
 k_d – współczynnik uwzględniający oddziaływanie wstrząsu górotworu.

Na podstawie uzyskanych wyników możliwe jest obliczenie współczynnika wyężenia górotworu

$$n_w = \frac{0,1\sigma_z}{f} \quad (3.3)$$

a następnie parametru charakteryzującego stan górotworu

$$n_{sg} = n_w n_e \quad (3.4)$$

przy czym wskaźnik zwięzłości skał f określony jest jako

$$f = f_{sr} d_1 d_2 d_3 \quad (3.5)$$

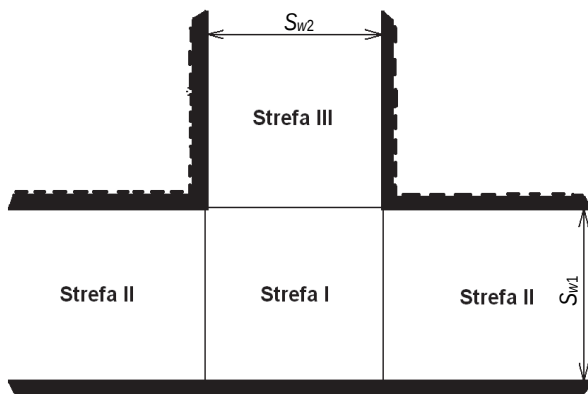
gdzie:

σ_z – naprężenia w górotworze, MPa;
 f_{sr} – średnia ważona wskaźnika zwięzłości skał z analizowanego profilu;
 d_1 – współczynnik osłabienia strukturalnego skał wynikającego z podzielności masywu skalnego;
 d_2 – współczynnik zmniejszenia wytrzymałości masywu skalnego związanego z wpływem wody;
 d_3 – współczynnik degradacji masywu skalnego wynikającej z zaszłości eksploatacyjnych;
 n_w – współczynnik wyężenia górotworu;
 n_e – parametr charakteryzujący właściwości odkształceniowe górotworu;
 n_{sg} – parametr charakteryzujący stan górotworu.

Dysponując parametrem n_{sg} , wskaźnikiem zwięzłości skał f oraz zastępczą szerokością wyrobiska S_w , z nomogramów zamieszczonych w „Zasadach...” można odczytać wartość obciążenia statycznego górotworu. W przypadku połączeń wyrobisk korytarzowych kluczowym zagadnieniem jest określenie zastępczej szerokości wyrobiska.

Dla skrzyżowania trójstronnego pod kątem prostym wielkość oddziaływania górotworu na obudowę połączenia określa się dla trzech stref, pokazanych na rysunku 3.1, a mianowicie:

- strefy I – obejmującej część wspólną dla obu wyrobisk,
- strefy II – obejmującej odcinki wyrobiska głównego i przylegające do wyrobiska odgałęziającego się,
- strefy III – obejmującej odcinek wyrobiska odgałęziającego się przylegający do wyrobiska głównego.



Rys. 3.1. Podział rejonu skrzyżowania pod kątem prostym na strefy oddziaływania górotworu na obudowę

W obrębie strefy I obciążenie statyczne obudowy odgałęzienia określa się dla maksymalnej szerokości wyrobiska w tej strefie, którą wyznacza się za pomocą wzoru

$$S_w^{\max} = S_{w1} \sqrt{1 + \frac{S_{w2}}{S_{w1}}}, \text{ m} \quad (3.6)$$

W oparciu o maksymalną szerokość wyrobiska, parametry dotyczące właściwości masywu i stanu naprężenia w masywie w otoczeniu wyrobiska, wartość obliczeniową obciążenia statycznego obudowy określa się analogicznie jak dla wyrobisk korytarzowych. Jednak z uwagi na różną koncentrację naprężeń, współczynnik koncentracji naprężeń oblicza się oddzielnie dla każdej ze stref. I tak:

• w strefie I i II

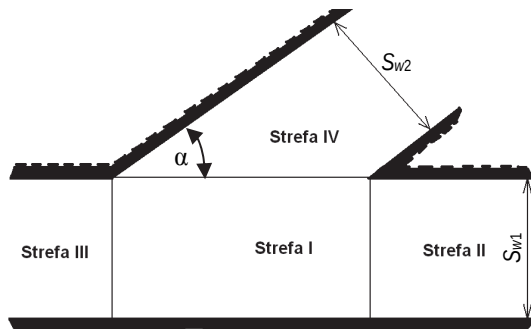
$$n_w = \frac{0,095 \left[1,5 - 0,3 \left(1 - \sqrt{\frac{S_{w2}}{S_{w1}}} \right) \right] \sigma_z}{f} \quad (3.7)$$

• w strefie III

$$n_w = \frac{0,1 \left[1,5 - 0,3 \left(1 - \sqrt{\frac{S_{w1}}{S_{w2}}} \right) \right] \sigma_z}{f} \quad (3.8)$$

W przypadku odgałęzienia pod kątem ostrym wielkość oddziaływania górotworu na obudowę odgałęzienia określa się dla czterech stref, przedstawionych na rysunku 3.2, a mianowicie:

- strefy I – obejmującej część wspólną dla obu wyrobisk,
- strefy II – obejmującej odcinek wyrobiska głównego przylegający do wyrobiska odgałęziającego się od strony kąta ostrego,
- strefy III – obejmującej odcinek wyrobiska głównego przylegający do wyrobiska odgałęziającego się od strony kąta rozwartego,
- strefy IV – obejmującej odcinek wyrobiska odgałęziającego się przylegający do wyrobiska głównego.



Rys. 3.2. Podział rejonu odgałęzienia pod kątem ostrym na strefy oddziaływania górotworu na obudowę

W obrębie strefy I obciążenie statyczne obudowy odgałęzienia określa się dla maksymalnej szerokości wyrobiska w tej strefie, którą oblicza się za pomocą wzoru

$$S_w^{\max} = S_{w1} \sqrt{1 + \frac{S_{w2}}{S_{w1}}}, m \quad (3.9)$$

W oparciu o maksymalną szerokość wyrobiska, współczynniki określające właściwości masywu i stanu naprężenia w masywie w otoczeniu wyrobiska, wartość obliczeniową obciążenia statycznego obudowy określa się analogicznie jak dla wyrobisk korytarzowych. Natomiast współczynnik koncentracji naprężeń, podobnie jak poprzednio, oblicza się dla każdej ze stref:

• w strefie I i II

$$n_w = \frac{0,095 \left(1,8 - 0,3 \sqrt{\frac{S_{w2}}{S_{w1}}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \sigma_z}{f} \quad (3.10)$$

• w strefie III

$$n_w = \frac{0,1 \left[1,5 + 0,3 \sqrt{\frac{S_{w2}}{S_{w1}}} \operatorname{tg} \left(45 - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sigma_z}{f} \quad (3.11)$$

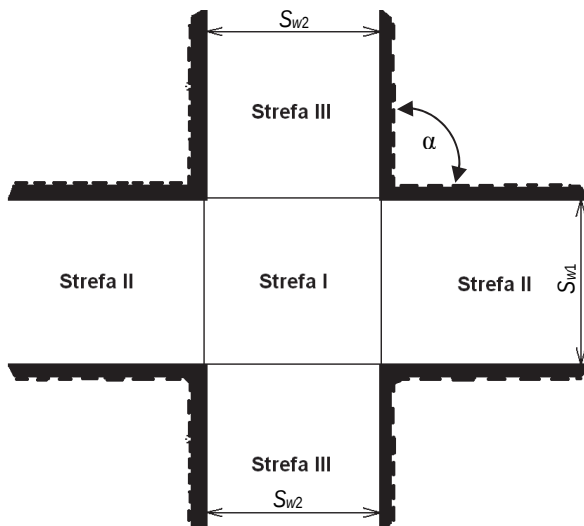
• w strefie IV

$$n_w = \frac{0,1 \left(1,8 - 0,3 \sqrt{\frac{S_{w1}}{S_{w2}}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \sigma_z}{f} \quad (3.12)$$

Jak wynika ze wzorów, współczynnik koncentracji naprężeń jest zależny od kąta α między osiami łączących się wyrobisk.

W przypadku skrzyżowania zarówno pod kątem prostym, jak i pod kątem ostrym wielkość oddziaływania górotworu na jego obudowę określa się dla trzech stref przedstawionych na rysunku 3.3, a mianowicie:

- strefy I – obejmującej część wspólną dla obu wyrobisk,
- strefy II – obejmującej odcinek wyrobiska głównego przylegający do wyrobiska przecinającego,
- strefy III – obejmującej odcinek wyrobiska przecinającego przylegający do wyrobiska głównego.



Rys. 3.3. Podział skrzyżowania na strefy oddziaływania górotworu na obudowę

W obrębie strefy I obciążenie statyczne obudowy skrzyżowania określa się dla maksymalnej szerokości wyrobiska w tej strefie za pomocą wzoru

$$S_w^{\max} = S_{w1} \sqrt{1 + \frac{S_{w2}}{S_{w1}}}, \text{ m} \quad (3.13)$$

W oparciu o maksymalną szerokość wyrobiska, parametry dotyczące właściwości masywu i stanu naprężenia w masywie w otoczeniu wyrobiska, wartość obliczeniową obciążenia statycznego obudowy określa się analogicznie jak dla wyrobisk korytarzowych. Podobnie jak poprzednio współczynnik koncentracji naprężeń oblicza się osobno dla każdej ze stref:

• w strefie II

$$n_w = \frac{0,1 \left(1,8 - 0,3 \sqrt{\frac{S_{w2}}{S_{w1}}} \tan \frac{\alpha}{2} \right) \sigma_z}{f} \quad (3.14)$$

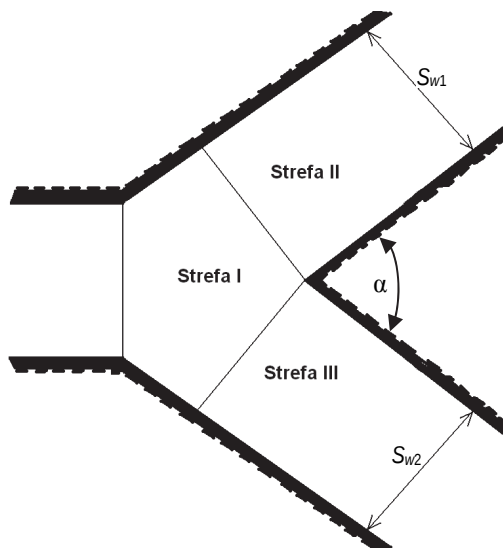
• w strefie III

$$n_w = \frac{0,1 \left(1,8 - 0,3 \sqrt{\frac{S_{w1}}{S_{w2}}} \tan \frac{\alpha}{2} \right) \sigma_z}{f} \quad (3.15)$$

Natomiast w strefie I współczynnik koncentracji naprężeń przyjmuje się jako równy większemu z wyznaczonych dla strefy II i III. Podobnie jak poprzednio, współczynnik koncentracji naprężeń jest zależny od kąta między osiami łączących się wyrobiska.

W przypadku rozwidleń, stanowiących szczególny przypadek odgałęzień, wielkość oddziaływania górotworu na obudowę określa się dla trzech stref, przedstawionych na rysunku 3.4. Są to:

- strefa I – obejmująca odcinek wyrobiska przed rozwidleniem, charakteryzujący się wzrostem gabarytów wyrobiska,
- strefa II – obejmująca odcinek wyrobiska I po rozwidleniu,
- strefa III – obejmująca odcinek wyrobiska II po rozwidleniu.



Rys. 3.4. Podział rozwidlenia na strefy oddziaływania górotworu na obudowę

W przypadku rozwidlenia symetrycznego obliczenia prowadzi się tylko dla dwóch stref, gdyż warunki w strefach II i III są takie same.

Obciążenie statyczne obudowy rozwidlenia w obrębie strefy I określa się dla maksymalnej szerokości wyrobiska w tej strefie za pomocą wzoru

$$S_w^{\max} = \sqrt{S_{w1}^2 + S_{w2}^2 - 2S_{w1}S_{w2} \cos(180 - \alpha)}, \text{ m} \quad (3.16)$$

W oparciu o maksymalną szerokość wyrobiska, parametry dotyczące właściwości masywu i stanu naprężenia w masywie w otoczeniu wyrobiska, wartość obliczeniową obciążenia statycznego obudowy określa się analogicznie jak dla wyrobisk korytarzowych. Podobnie jak poprzednio współczynnik koncentracji naprężeń oblicza się osobno dla każdej z nich:

• w strefie II

$$n_w = \frac{0,095 \left(1,8 - 0,3 \sqrt{\frac{S_{w2}}{S_{w1}}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \sigma_z}{f} \quad (3.17)$$

- w strefie III

$$n_w = \frac{0,095 \left(1,8 - 0,3 \sqrt{\frac{S_{w1}}{S_{w2}}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \sigma_z}{f} \quad (3.18)$$

- „Obudowa górnicza. Zasady projektowania i doboru obudowy wyrobisk korytarzowych w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny” (Drzęźła i in. 2000)

Kolejną metodą obliczania obciążeń działających na obudowę połączeń wyrobisk korytarzowych jest metoda opisana w załączniku 6 do ww. zasad. Zawarto w nich także wskazówki dotyczące stosowania elementów wchodzących w skład obudowy. Autorzy przyjęli kilka schematów obudów połączeń i wyznaczyli dla nich metodykę obliczeniową. Poniżej zaprezentowano najważniejsze schematy obudowy odgałęzień i skrzyżowań.

Wartości obciążeń działających na obudowę określa się dla 1 m długości wyrobiska za pomocą wzoru

$$Q_{obl} = Q_o k_1 k_2 k_3 k_4 k_\alpha k_\gamma k_n k_r k_T + Q_{dyn} + Q_m, \text{ kN/m} \quad (3.19)$$

a dla 1 m² powierzchni stropu wyrobiska za pomocą wzoru

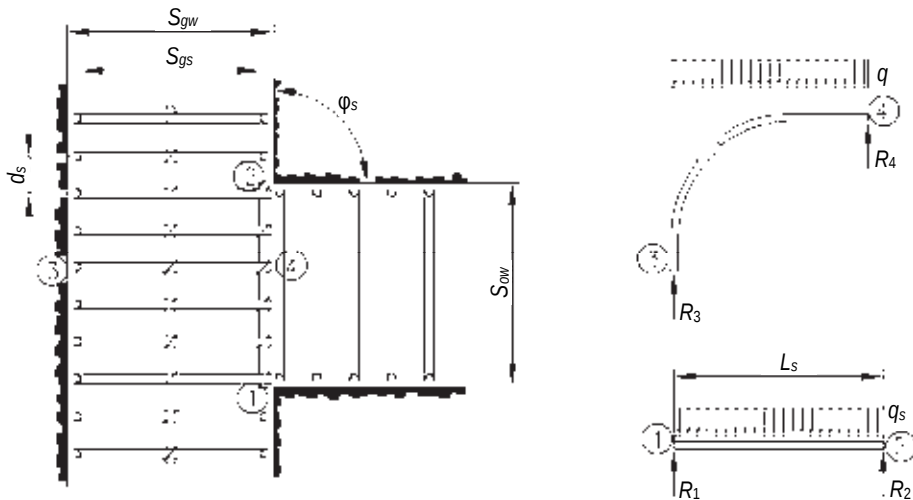
$$q_1 = \frac{Q_{st} + Q_m}{S_q} + q_{dyn}, \text{ kN/m}^2 \quad (3.20)$$

gdzie:

- Q_{obl} – obciążenie obliczeniowe działające na obudowę, kN/m;
- Q_{st} – całkowite obciążenie statyczne, kN/m;
- Q_o – charakterystyczne obciążenie statyczne, kN/m;
- Q_{dyn} – obciążenie pseudostatyczne od wstrząsów górotworu, kN/m;
- Q_m – obciążenie pseudostatyczne od podwieszonych maszyn i urządzeń, kN/m;
- k_1 – współczynnik wpływu krawędzi;
- k_2 – współczynnik wpływu eksploatacji;
- k_3 – współczynnik wpływu rozmakalności i podzielności warstwowej;
- k_4 – współczynnik wpływu uskoku;
- k_α – współczynnik wpływu nachylenia wyrobiska;
- k_γ – współczynnik wpływu ciężaru objętościowego skał;
- k_n – współczynnik wpływu poprzecznego nachylenia warstw skał;
- k_r – współczynnik wpływu wyrobisk równoległych;
- k_T – współczynnik długotrwałości utrzymania wyrobiska;
- S_q – rozpiętość obudowy, na którą oddziałuje obciążenie, m.

Charakterystyczne obciążenie statyczne natomiast odczytuje się z tablic z uwzględnieniem głębokości lokalizacji wyrobiska, szerokości obliczeniowej oraz wytrzymałości na ściskanie pakietu skał.

W przypadku skrzyżowania trójstronnego, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.5, oblicza się całkowite obciążenie działające na obudowę.



Rys. 3.5. Schemat skrzyżowania łukowo-prostego z kształtowników stalowych: S_{gw} – szerokość wyrobiska głównego w wyłomie, S_{gs} – szerokość wyrobiska głównego w świetle obudowy, S_{ow} – szerokość wyrobiska krzyżującego się w wyłomie, L_s – długość skrzyżowania, d_s – rozstaw odrzwi na skrzyżowaniu, φ_s – kąt skrzyżowania, R_{1-4} – reakcje podporowe w charakterystycznych punktach, q – obciążenie ciągłe działające na odrzwia w wyrobisku głównym, q_s – obciążenie podciągów ociosowych

W pierwszej kolejności oblicza się długość skrzyżowania

$$L_s = \frac{S_{ow}}{\sin \varphi_s}, \text{ m} \quad (3.21)$$

a następnie powierzchnię skrzyżowania

$$P_s = L_s S_{gw}, \text{ m}^2 \quad (3.22)$$

w dalszej kolejności oblicza się wartość obciążenia obudowy skrzyżowania za pomocą wzoru

$$Q_{sk} = P_s q_1, \text{ kN/m} \quad (3.23)$$

gdzie:

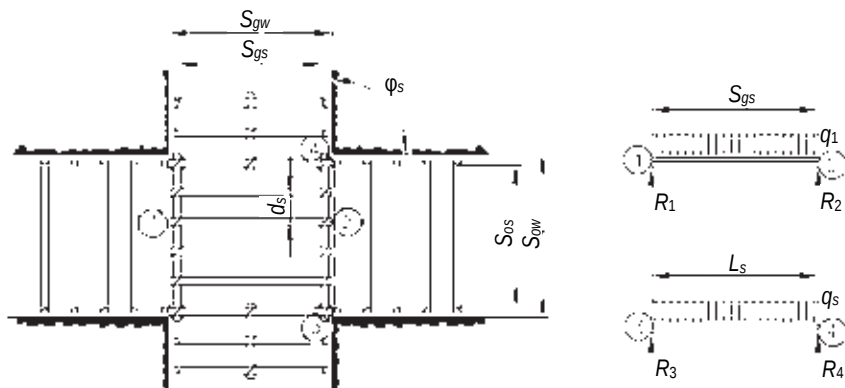
- L_s – długość skrzyżowania, m;
- S_{ow} – szerokość wyrobiska odgałęziającego się, m;
- S_{gw} – szerokość wyrobiska głównego, m.

W przypadku skrzyżowania słupowego, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.6, podobnie jak poprzednio, oblicza się całkowite obciążenie działające na obudowę.

Długość skrzyżowania i jego powierzchnię oblicza się analogicznie jak poprzednio, natomiast całkowite obciążenie skrzyżowania za pomocą wzoru

$$Q_s = L_s Q_{obl}, \text{ kN} \quad (3.24)$$

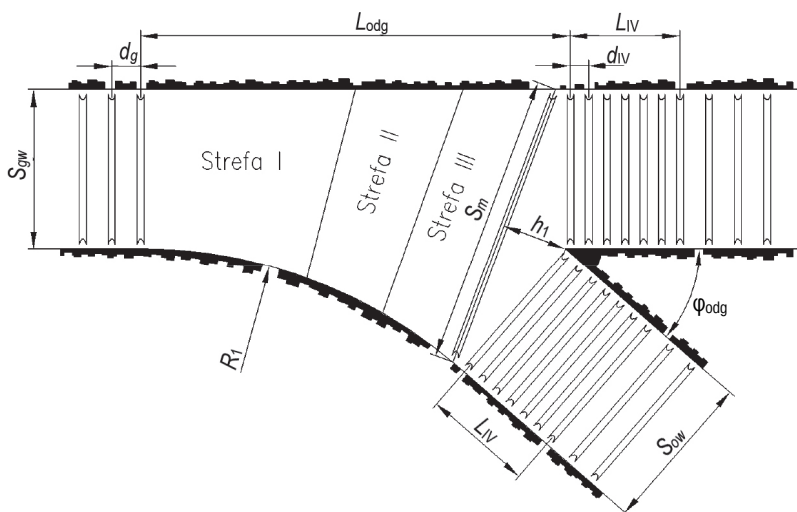
Drzęźła i inni (2000) podali także wzory na obliczenie wartości obciążeń działających na poszczególne elementy obudowy – stropnice, podciąg, stojaki.



Rys. 3.6. Schemat skrzyżowania prostego słupowego: S_{gw} – szerokość wyrobiska głównego w wyłomie, S_{gs} – szerokość wyrobiska głównego w świetle obudowy, S_{ow} – szerokość wyrobiska krzyżującego się w wyłomie, S_{os} – szerokość wyrobiska krzyżującego się w świetle obudowy, L_s – długość skrzyżowania, d_s – rozstaw odrzwi na skrzyżowaniu, φ_s – kąt skrzyżowania, R_{1-4} – reakcje podporowe w charakterystycznych punktach, q_1 – obciążenie ciągłe działające na stropnice w wyrobisku głównym, q_s – obciążenie podciągów ociosowych

Dla obudowy odgałęzienia, według schematu przedstawionego na rysunku 3.7, obciążenie obliczeniowe Q_{obl} określa się dla maksymalnej szerokości wyrobiska, powiększonej o zasięg wpływów w ociosach za pomocą wzoru

$$Q_{obl} = 1,3Q_o k_1 k_2 k_3 k_4 k_\gamma + Q_{dyn}, \text{ kN/m} \quad (3.25)$$



Rys. 3.7. Schemat obudowy odgałęzienia palmowego: S_{gw} – szerokość wyrobiska głównego w wyłomie, S_{ow} – szerokość wyrobiska odgałęzionego w wyłomie, S_m – maksymalna szerokość odgałęzienia, L_{odg} – długość odgałęzienia, L_{iv} – długość wzmacnianych odcinków wyrobisk za narożnikiem odgałęzienia, d_g – rozstaw odrzwi w wyrobisku głównym, d_{iv} – rozstaw odrzwi na wzmacnianych odcinkach wyrobisk za narożnikiem odgałęzienia, φ_{odg} – kąt odgałęzienia, R_1 – promień krzywizny wyłomu wyrobiska odgałęzionego, h_1 – rzut strzałki sklepienia odgałęzienia

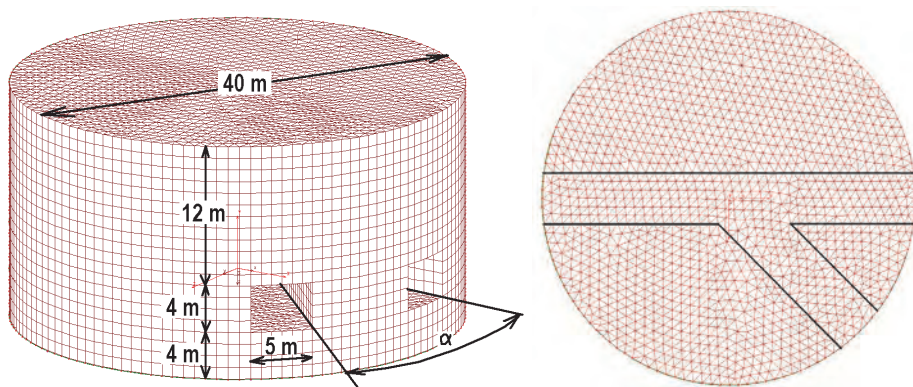
3.2. Określanie obciążenia obudowy z wykorzystaniem metod numerycznych

Analizę numeryczną stanu wyężenia górotworu wokół połączenia wyrobisk przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych (COSMOS/M) i metody różnic skończonych (FLAC3D).

3.2.1. Wpływ kąta połączenia wyrobisk na stan wyężenia górotworu

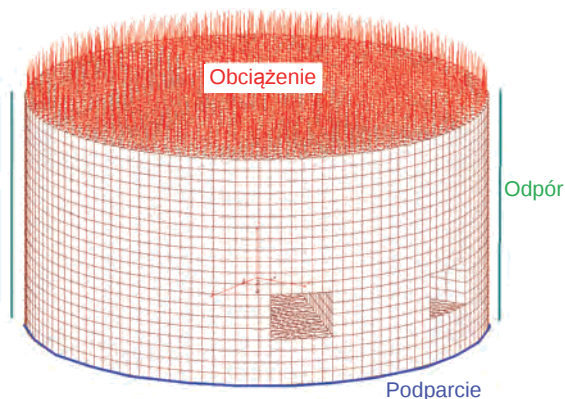
Analiza wpływu kąta połączenia wyrobisk na stan wyężenia górotworu, przeprowadzona z użyciem metody elementów skończonych i programu COSMOS/M, miała na celu porównanie rozkładu naprężeń wokół połączenia wyrobisk korytarzowych w przypadku różnych kątów odgaęzienia. Badaniu poddano połączenia wyrobisk o przekroju prostokątnym $5,0 \times 4,0$ m, odgaęzające się pod kątem 90° , 60° , 45° i 30° . Wszystkie modele odgaęzień i skrzyżowań były zlokalizowane w jednakowych warunkach geologiczno-górnictwowych, w jednorodnej warstwie litologicznej, o parametrach zbliżonych do łupka ilastego, w ośrodku jednorodnym i izotropowym. Taka analiza pozwalała jedynie na ocenę jakościową wyężenia górotworu.

Modele obejmowały obszar o promieniu 20 m, licząc od środka odgaęzienia lub skrzyżowania. Wysokościowy zasięgi modeli to 4 m poniżej spodka modelowanego wyrobiska i 12 m powyżej stropu. Łączna wysokość modelu wynosiła zatem 20 m. W analizach przyjęto głębokość spągu wyrobiska wynoszącą około 616 m, co skutkowało obciążeniem górnej powierzchni modelu ciężarem nadległych warstw skalnych o łącznej miąższości 600 m. Na rysunku 3.8 przedstawiono jeden z modeli – połączenie wyrobisk pod kątem 45° .



Rys. 3.8. Model odgaęzienia o kącie między wyrobiskami $\alpha = 45^\circ$

Wszystkie zbudowane modele podparto na ich spodniej powierzchni i na pobocznicach, a następnie na powierzchni wierzchniej obciążano je siłami wynikającymi z ciężaru warstw nadległych i uśrednionymi siłami grawitacyjnymi. Na rysunku 3.9 przedstawiono sposób podparcia i obciążenia modelu.

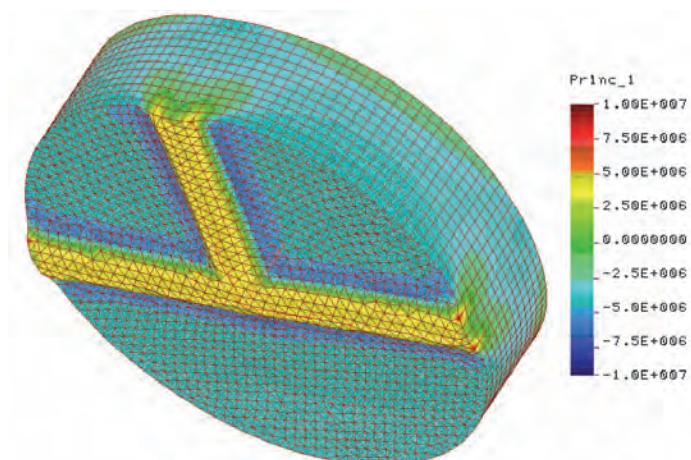


Rys. 3.9. Sposób podparcia i obciążenia modelu

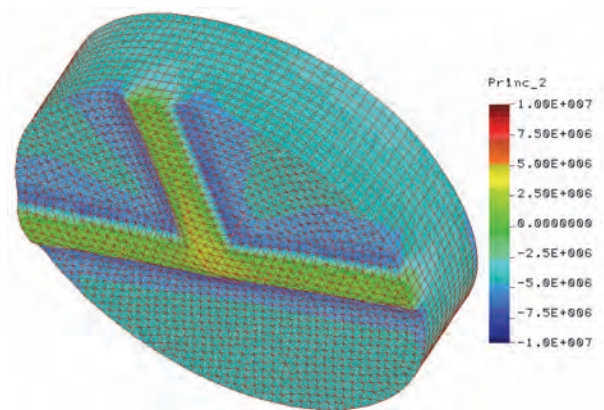
W wyniku przeprowadzonych obliczeń dla każdego z modeli otrzymano rozkłady naprężeń w poszczególnych elementach.

Na rysunkach 3.10–3.33 przedstawiono naprężenia główne w modelach połączeń w warstwie stropowej. Rysunki 3.10–3.12 przedstawiają połączenie wyrobisk pod kątem 90°, 3.13–3.15 – połączenie wyrobisk pod kątem 60°, 3.16–3.18 – połączenie wyrobisk pod kątem 45°, natomiast rysunki 3.19–3.21 – połączenie wyrobisk pod kątem 30°. Na rysunkach zastosowano jednakową skalę naprężeń: od –10 MPa do +10 MPa i jednakową skalę deformacji: 50×.

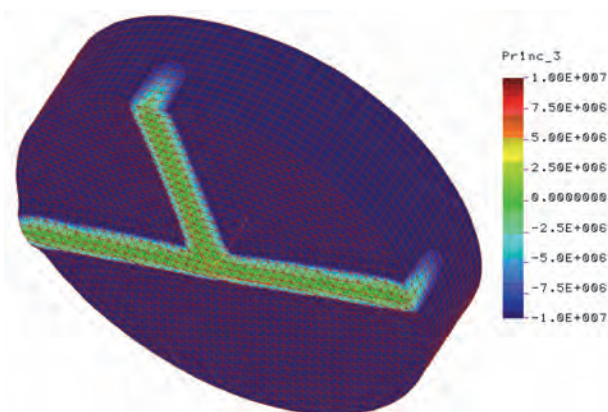
Na rysunkach 3.22–3.33 przedstawiono rozkład naprężeń głównych w modelach skrzyżowań w warstwie ociosowej. I tak rysunki 3.22–3.24 przedstawiają model połączenia wyrobisk pod kątem 90°, 3.25–3.27 – model połączenia wyrobisk pod kątem 60°, 3.28–3.30 – model połączenia wyrobisk pod kątem 45°, natomiast rysunki 3.31–3.33 – model połączenia wyrobisk pod kątem 30°. Na rysunkach zastosowano zmienne skale naprężeń od minimalnej do maksymalnej wartości, deformacje natomiast przedstawiono w skali 50×.



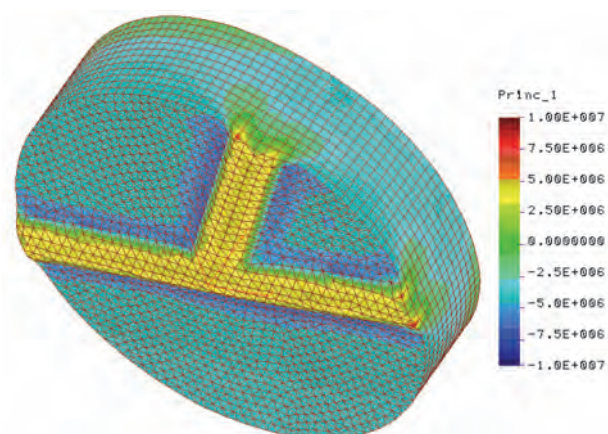
Rys. 3.10. Naprężenia główne σ_1 w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 90° (naprężenia w Pa, skala deformacji 50×)



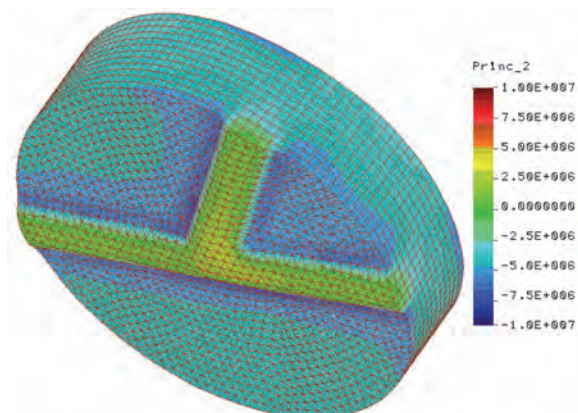
Rys. 3.11. Naprężenia główne σ_{II} w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 90° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



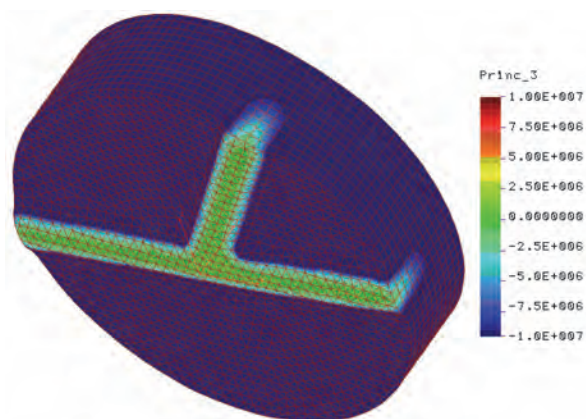
Rys. 3.12. Naprężenia główne σ_{III} w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 90° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



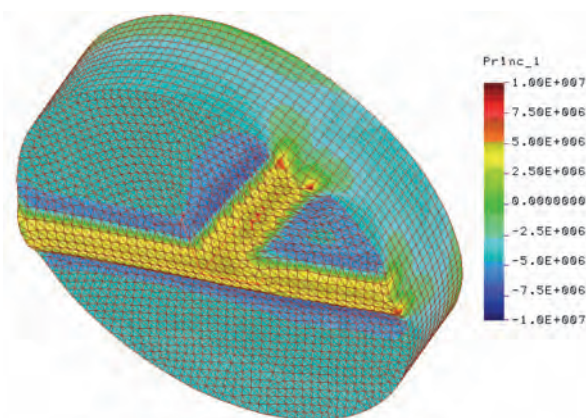
Rys. 3.13. Naprężenia główne σ_I w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 60° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



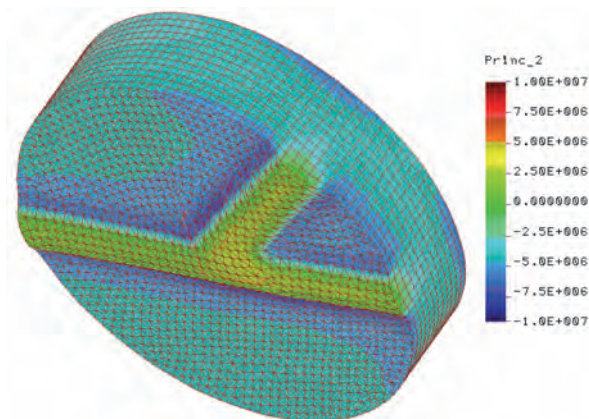
Rys. 3.14. Naprężenia główne σ_{II} w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 60° (naprężenia w Pa, skala deformacji 50×)



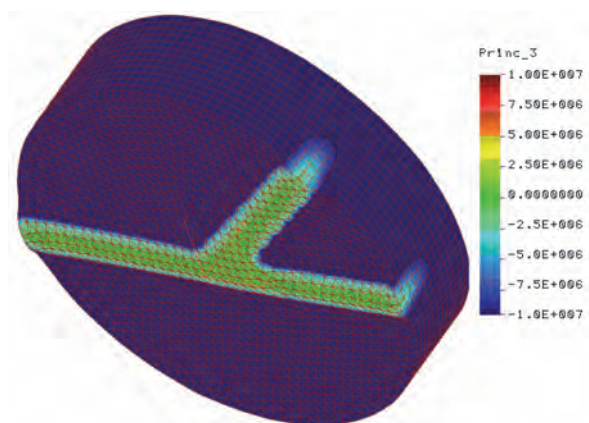
Rys. 3.15. Naprężenia główne σ_{III} w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 60° (naprężenia w Pa, skala deformacji 50×)



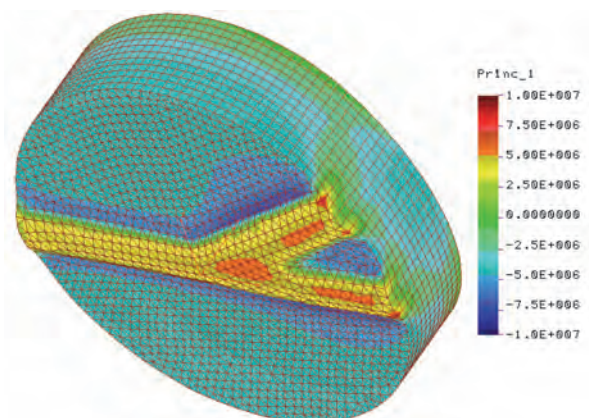
Rys. 3.16. Naprężenia główne σ_I w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 45° (naprężenia w Pa, skala deformacji 50×)



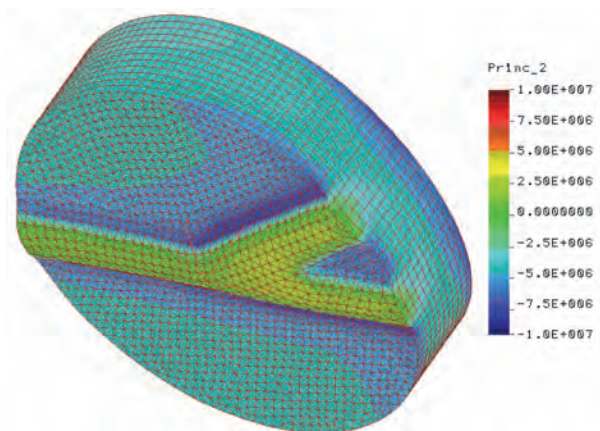
Rys. 3.17. Naprężenia główne σ_{II} w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 45° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



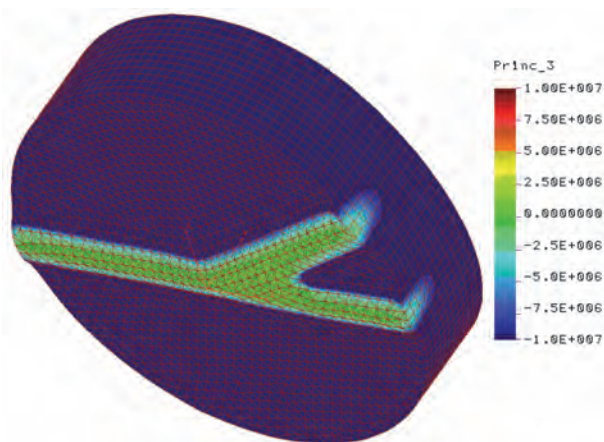
Rys. 3.18. Naprężenia główne σ_{III} w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 45° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



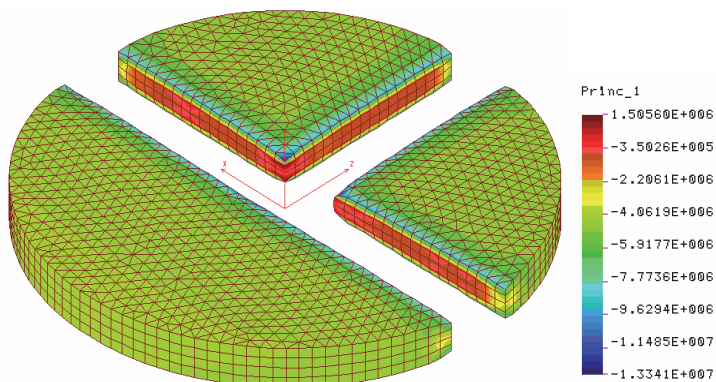
Rys. 3.19. Naprężenia główne σ_I w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 30° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



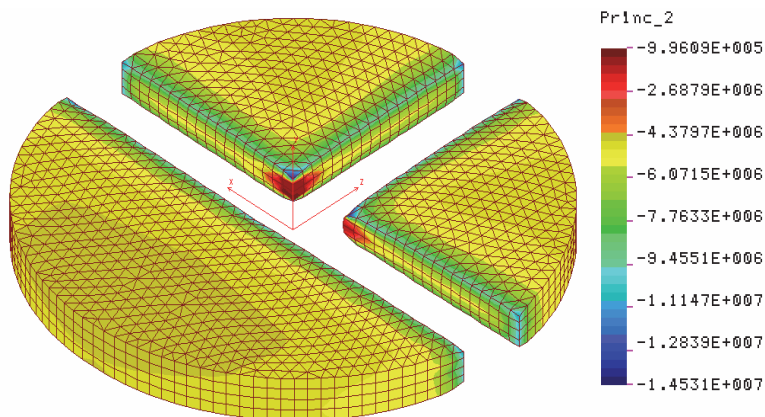
Rys. 3.20. Naprężenia główne σ_{II} w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 30° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



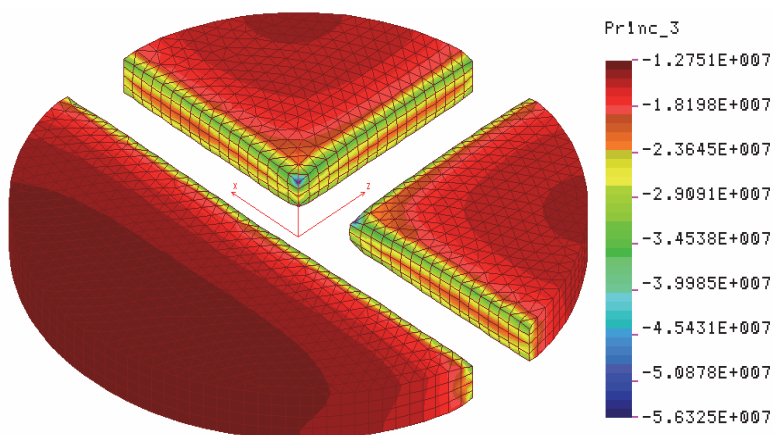
Rys. 3.21. Naprężenia główne σ_{III} w warstwach stropowych ponad połączeniem wyrobisk pod kątem 35° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



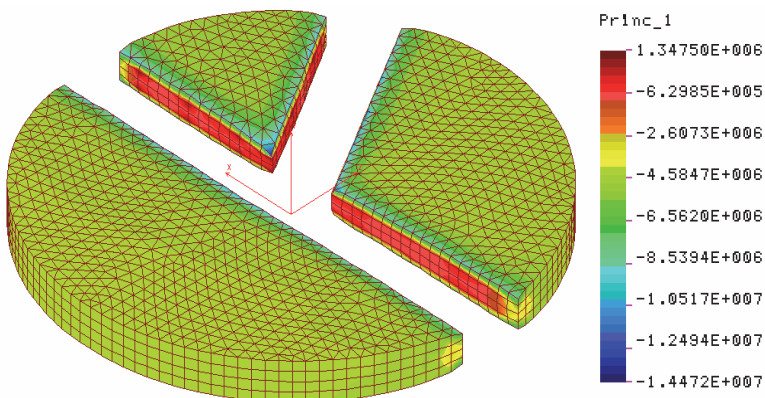
Rys. 3.22. Naprężenia główne σ_I w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 90° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



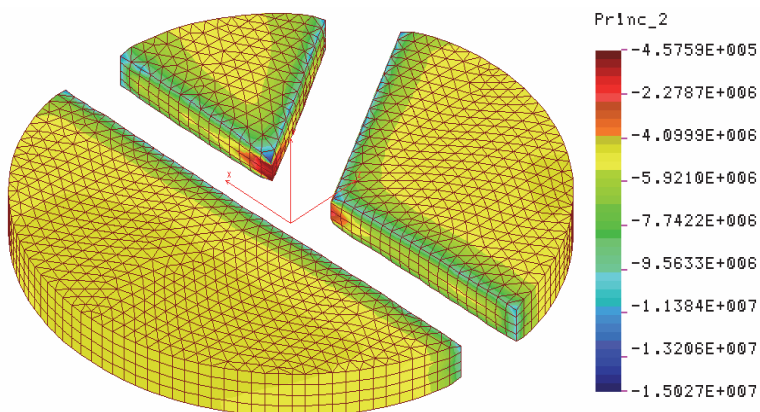
Rys. 3.23. Naprężenia główne σ_{II} w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 90° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



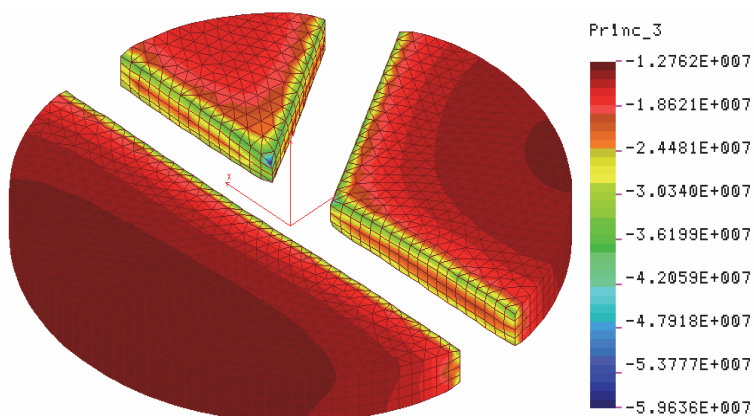
Rys. 3.24. Naprężenia główne σ_{III} w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 90° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



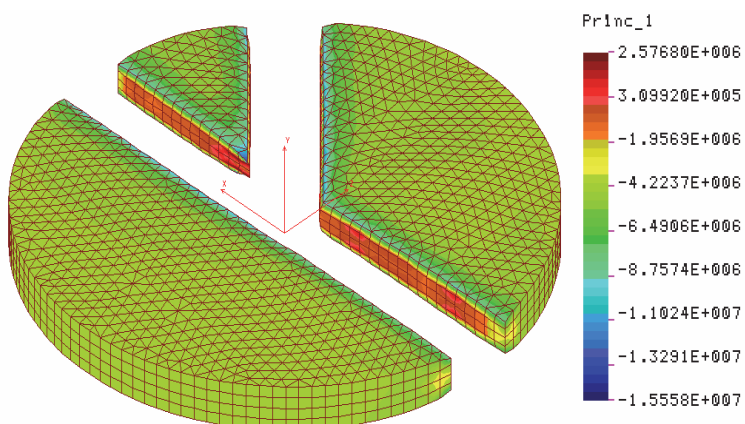
Rys. 3.25. Naprężenia główne σ_I w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 60° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



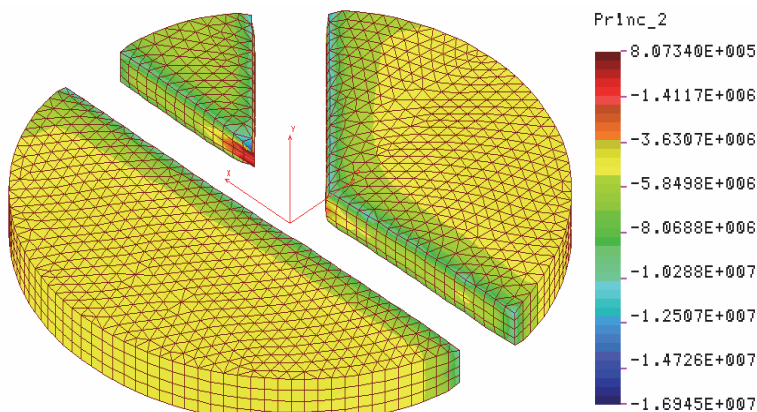
Rys. 3.26. Naprężenia główne σ_{II} w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 60° (naprężenia w Pa, skala deformacji 50×)



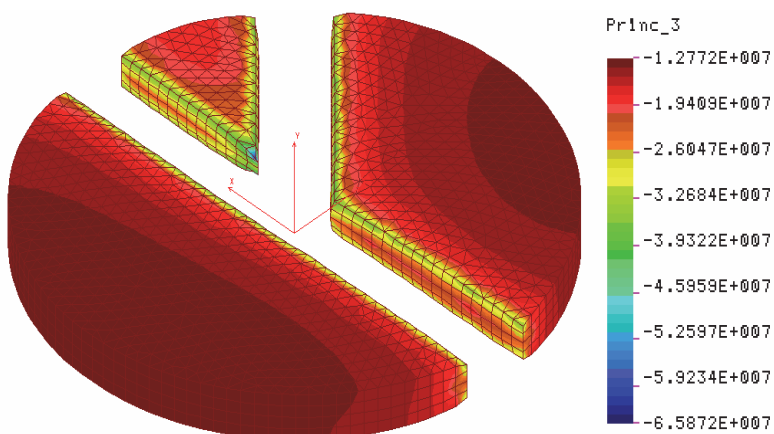
Rys. 3.27. Naprężenia główne σ_{III} w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 60° (naprężenia w Pa, skala deformacji 50×)



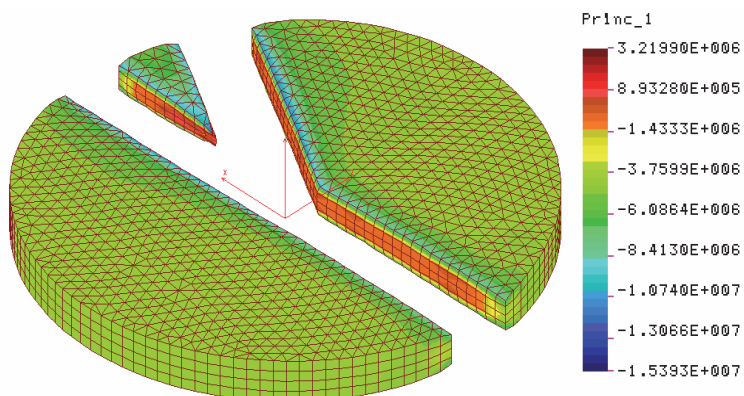
Rys. 3.28. Naprężenia główne σ_I w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 45° (naprężenia w Pa, skala deformacji 50×)



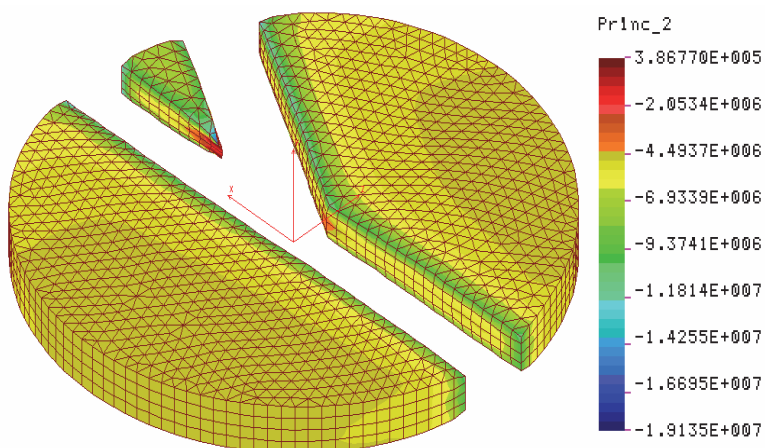
Rys. 3.29. Naprężenia główne σ_{II} w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 45° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



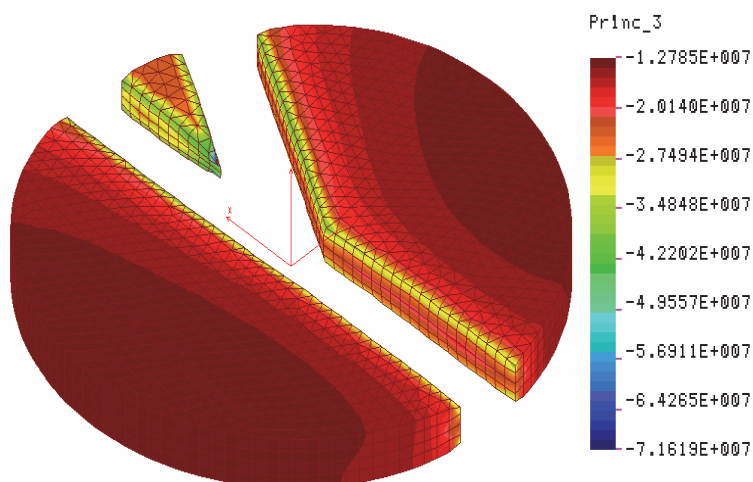
Rys. 3.30. Naprężenia główne σ_{III} w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 45° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



Rys. 3.31. Naprężenia główne σ_I w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 30° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)

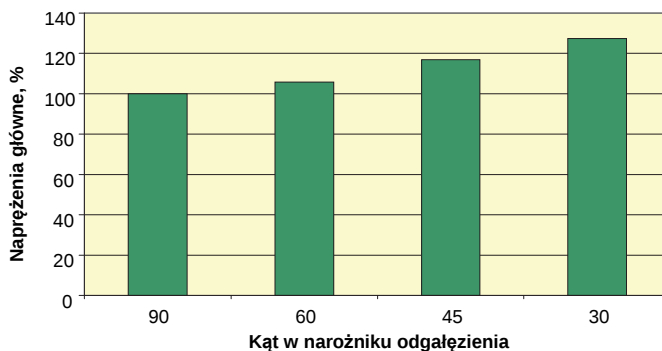


Rys. 3.32. Naprężenia główne σ_{II} w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 30° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)



Rys. 3.33. Naprężenia główne σ_{III} w warstwach ociosowych połączenia wyrobisk pod kątem 30° (naprężenia w Pa, skala deformacji $50\times$)

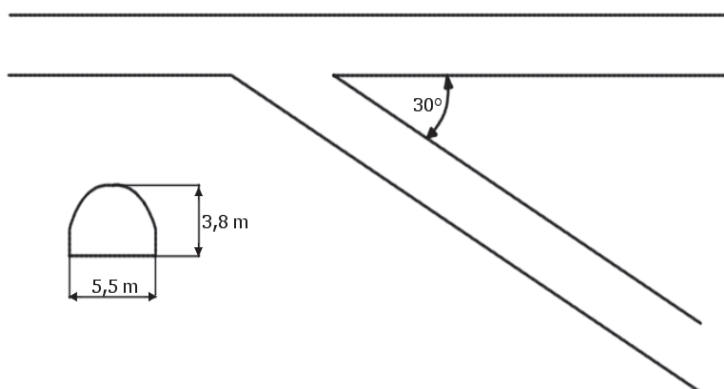
Jak widać na przedstawionych mapach naprężeń (rys. 3.10–3.33), wraz ze zmniejszaniem się kąta połączenia wyrobisk, wzrastają naprężenia w rejonie wyrobiska. Szczególnie dotyczy to naroża, gdzie koncentracja naprężeń może prowadzić do jego destrukcji (Szczepaniak 1963; Majcherczyk i Małkowski 1998). Zmiany maksymalnych naprężeń głównych σ_{III} w narożniku odgałęzienia, w zależności od kąta, w odniesieniu do skrzyżowania o kącie 90° , przedstawiono na rysunku 3.34.



Rys. 3.34. Zmiany naprężeń głównych σ_{III} w zależności od kąta łączących się wyrobisk (naprężenia w skrzyżowaniu 90° – 100%)

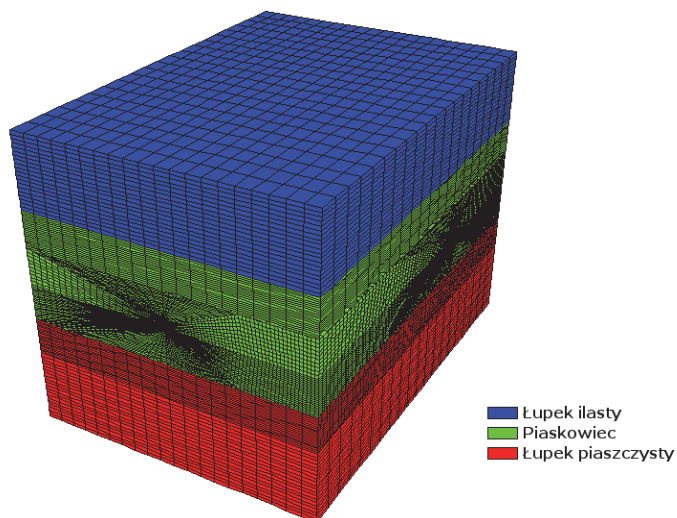
3.2.2. Zasięg strefy spękań skał stropowych na długości wyrobiska

Określenie zasięgu strefy spękań wokół odgałęzienia wyrobisk przeprowadzono z wykorzystaniem programu FLAC3D firmy Itasca, opartego na metodzie różnic skończonych (Filcek, Wałaszczuk, Tajduś 1994) i schemacie obliczeniowym Lagrange'a. Program umożliwia przestrzenne modelowanie znacznych odkształceń i zniszczeń ośrodków skalnych i obudów. Istotna przy takim modelowaniu górotworu jest także możliwość obliczania dużych przemieszczeń i naprężeń oraz uwzględniania nieliniowego zachowania się materiałów, a także możliwość analizy utraty stateczności wyrobisk. Do obliczeń wybrano połączenie wyrobisk pod kątem 30°, w którym na wcześniejszym etapie stwierdzono największe wartości naprężeń spośród analizowanych połączeń. Na rysunku 3.35 przedstawiono schemat odgałęzienia.

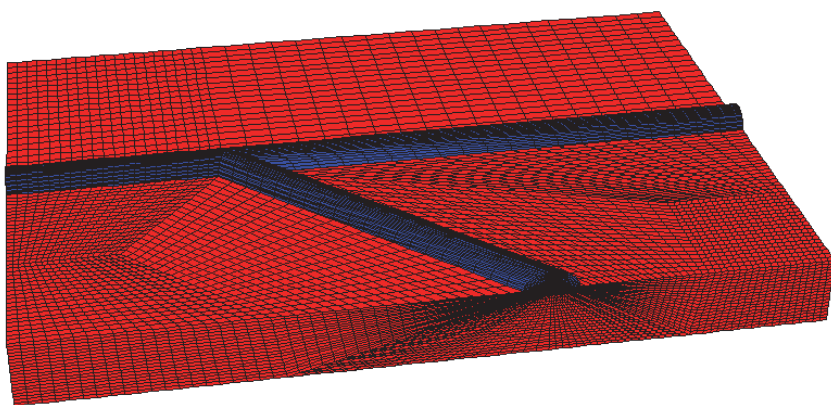


Rys. 3.35. Schemat odgałęzienia przyjętego do obliczeń

Przyjęto, że w rejonie odgałęzienia występują łupki ilaste, łupki piaszczyste i piaskowiec. Model odgałęzienia wyrobisk z otaczającym go górotworem przedstawiono na rysunku 3.36, natomiast rysunek 3.37 pokazuje fragment modelu z geometrią wyrobisk i sposób ich połączenia.



Rys. 3.36. Model przyjęty do obliczeń – widok ogólny – wymiary 80 m × 112 m × 80 m



Rys. 3.37. Model numeryczny wyrobisk i sposób ich połączenia

Do opisu stanu naprężeń występujących w górotworze wykorzystano kryterium wyężeniowe Coulomba-Mohra, oparte na zależnościach między wytrzymałością na ścinanie i wartością kąta wewnętrznego oraz spójnością (kohezją)

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \text{ MPa} \quad (3.26)$$

gdzie:

- τ – naprężenie ścinające przy zniszczeniu, MPa;
- σ_n – efektywne naprężenie normalne, MPa;
- c – spójność, MPa;
- φ – kąt tarcia wewnętrznego.

Przy wyznaczaniu parametrów skał korzystano z klasyfikacji GSI, opartej na badaniach Hoeka (Hoek, Kaiser, Bawden 1995; Hoek 1999) i wyznaczanej z nomogramów. Parametry modelu, skał górotworu i obudowy przyjęte do analiz zebrano w tabeli 3.1.

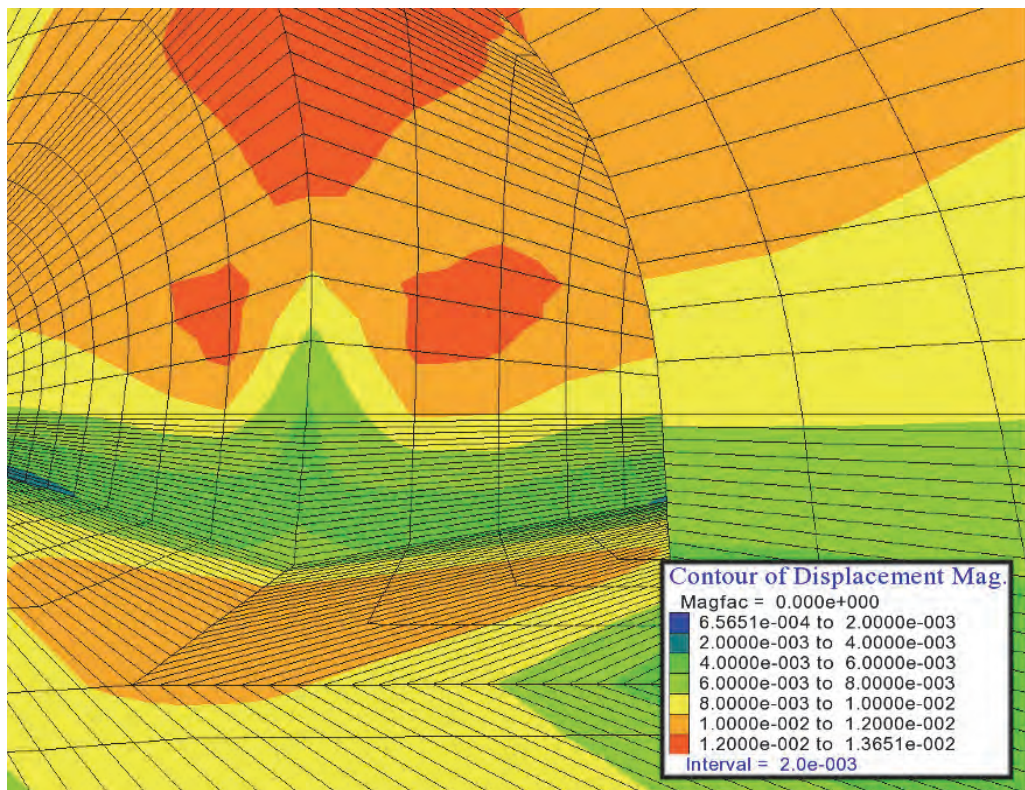
Tabela 3.1. Parametry górotworu

Lp.	Parametr	Rodzaj skały		
		łupek ilasty	łupek piaszczysty	piaskowiec
1	Gęstość objętościowa, kg/m ³	2600	2600	2600
2	Moduł Younga, MPa	3000	6000	9000
3	Liczba Poissona	0,25	0,25	0,25
4	Kohezja, MPa	1,92	2	3,51
5	Kąt tarcia wewnętrznego, stopnie	25	26	26
6	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	0,58	0,74	1,91
7	GSI	65	70	75

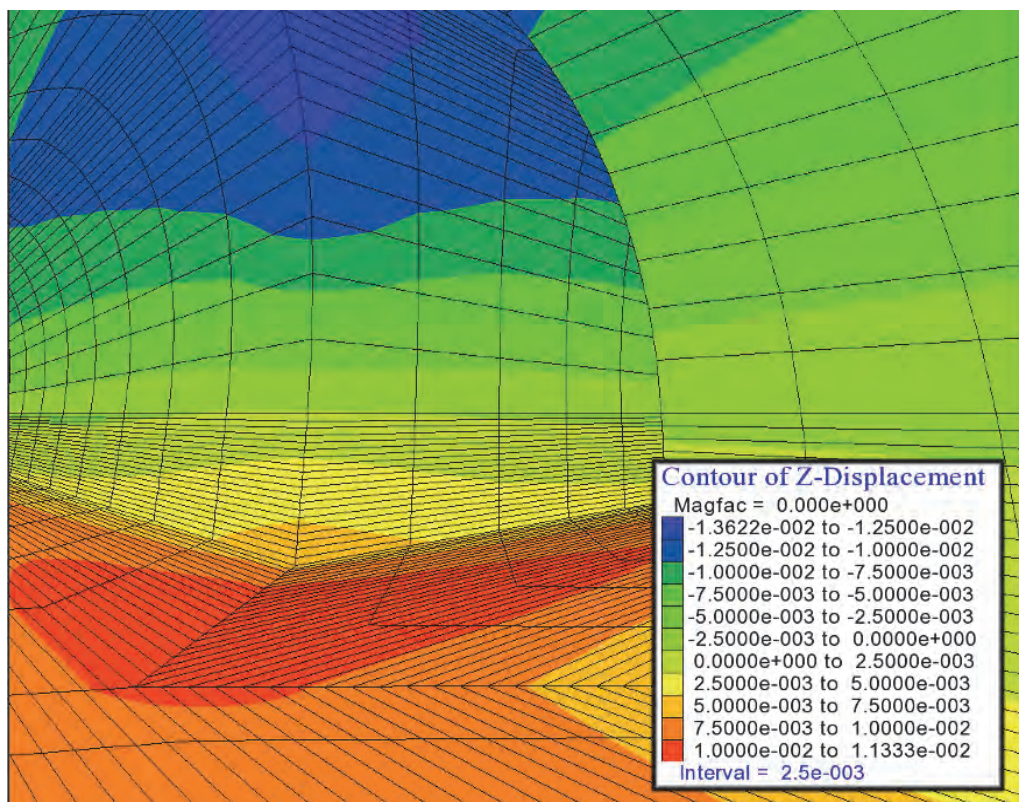
Analizę prowadzono w przestrzennym stanie odkształcenia i naprężenia. Na bocznych powierzchniach modelu przyjęto zerowe przemieszczenie poziome, zaś na dolnej – zerowe przemieszczenie pionowe. Górną powierzchnię modelu obciążono ciśnieniem 15 MPa, wynikającym z ciężaru warstw nadkładu występującego na głębokości 600 m.

W pierwszym etapie obliczenia prowadzono na modelu sprężystym pełnym (bez wyrobisk). W drugim etapie usunięto elementy z obszaru wyrobiska i rozwiązywano model sprężysto-plastyczny.

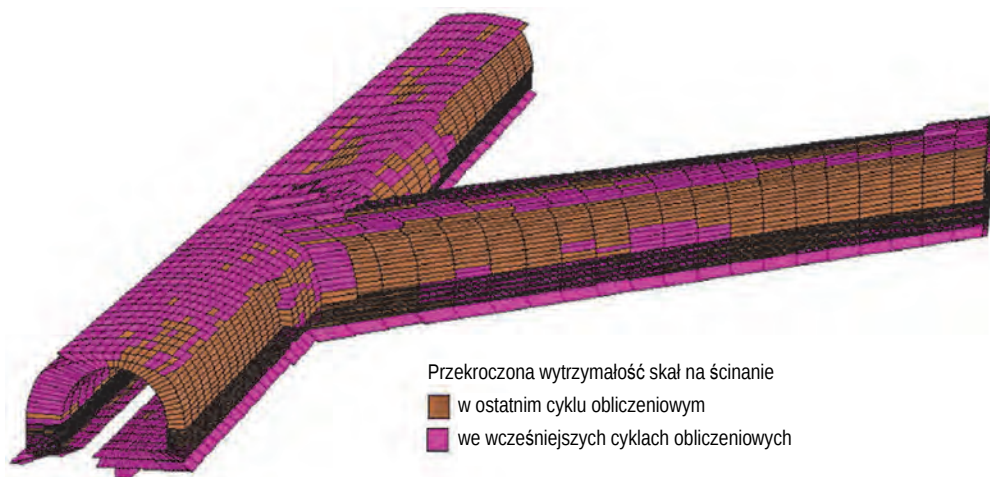
Obliczone przemieszczenia w rejonie odgałęzienia wyrobisk przedstawiono na rysunkach 3.38 i 3.39, natomiast strefę spękań górotworu – na rysunku 3.40.



Rys. 3.38. Przemieszczenia całkowite w rejonie odgałęzienia wyrobisk

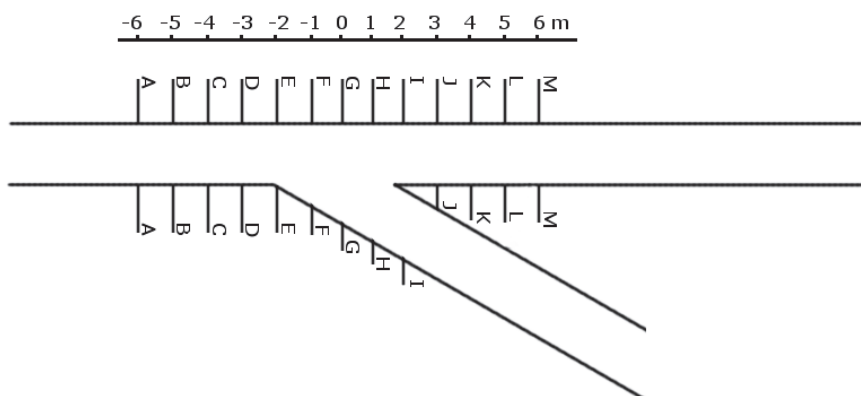


Rys. 3.39. Przeszaczenia pionowe w rejonie odgałężenia wyrobisk

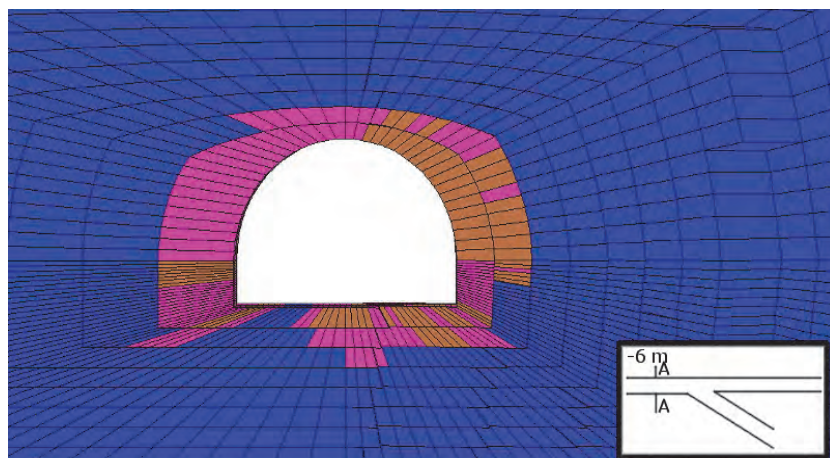


Rys. 3.40. Strefa spękań górotworu – widok ogólny

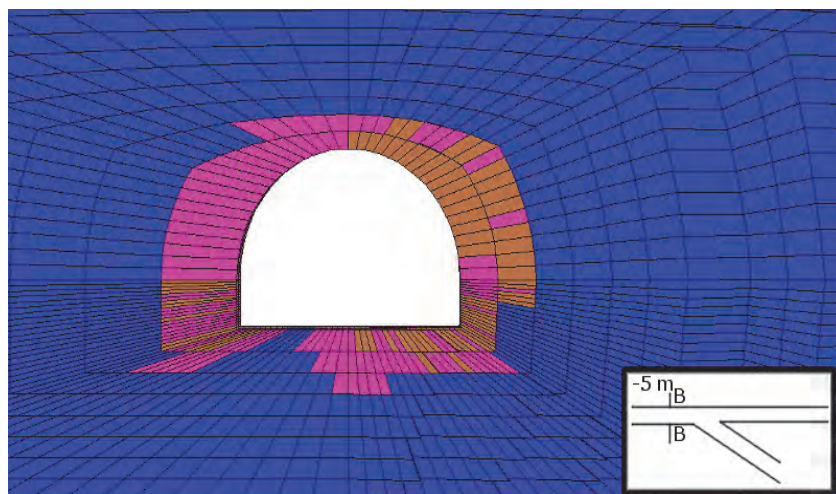
Dla wyznaczenia obciążenia obudowy odgałężenia w postaci graficznej zapisano kolejne przekroje wyrobiska oddalone od siebie 1 m, z zaznaczoną strefą spękań. Przekroje te (rys. 3.41) przedstawiono na rysunkach 3.42–3.54.



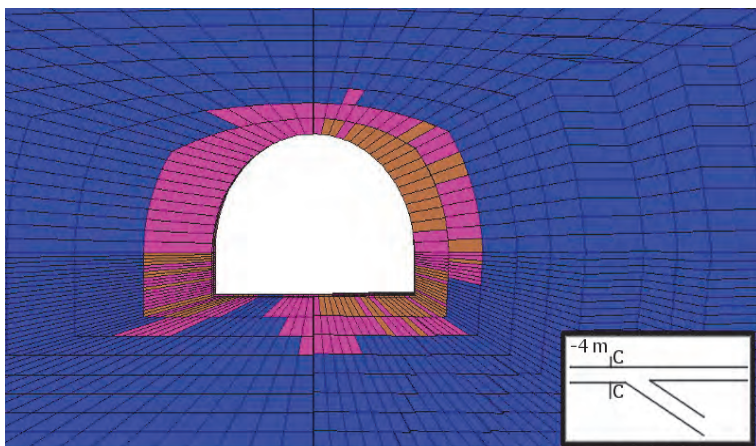
Rys. 3.41. Wybrane przekroje wyrobiska z zaznaczoną strefą spękań



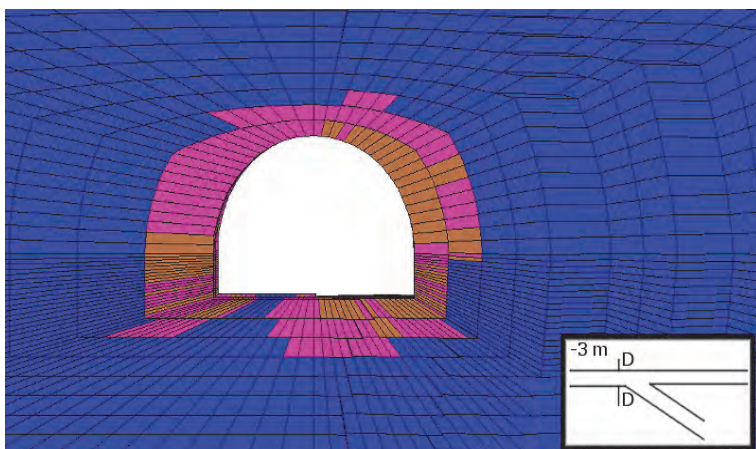
Rys. 3.42. Zasięg strefy spękań w odległości 6 m przed środkiem skrzyżowania



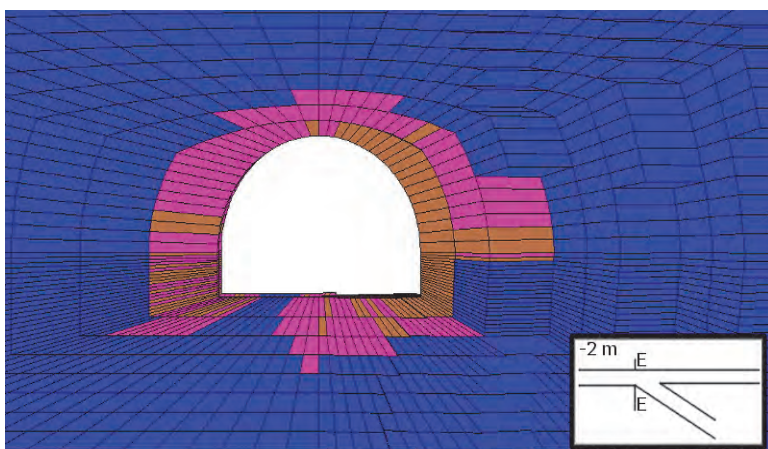
Rys. 3.43. Zasięg strefy spękań w odległości 5 m przed środkiem skrzyżowania



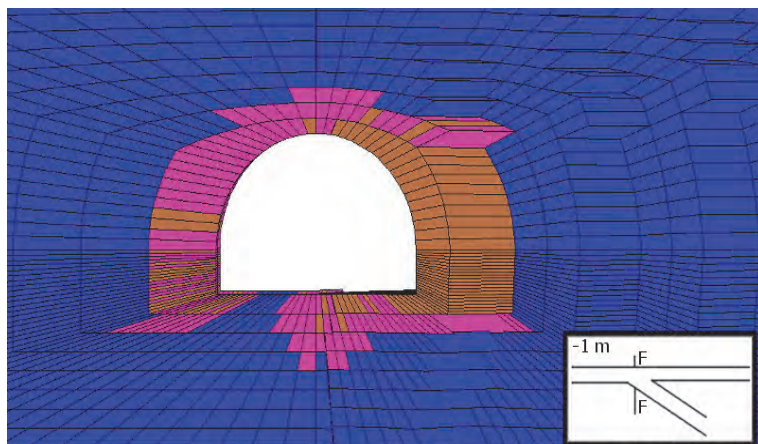
Rys. 3.44. Zasięg strefy spękań w odległości 4 m przed środkiem skrzyżowania



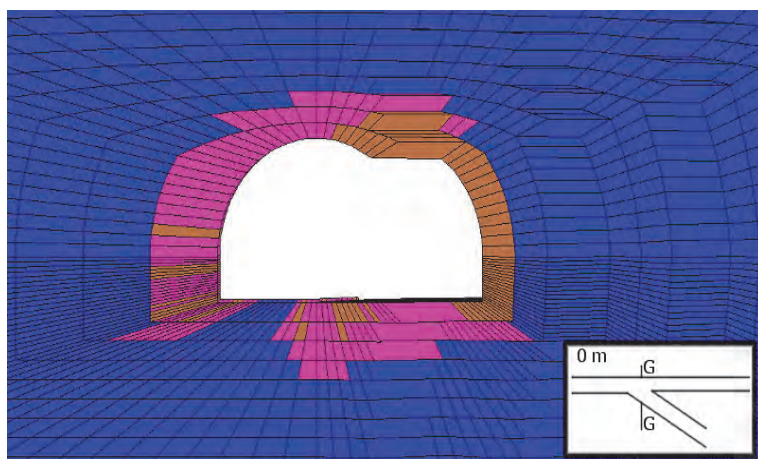
Rys. 3.45. Zasięg strefy spękań w odległości 3 m przed środkiem skrzyżowania



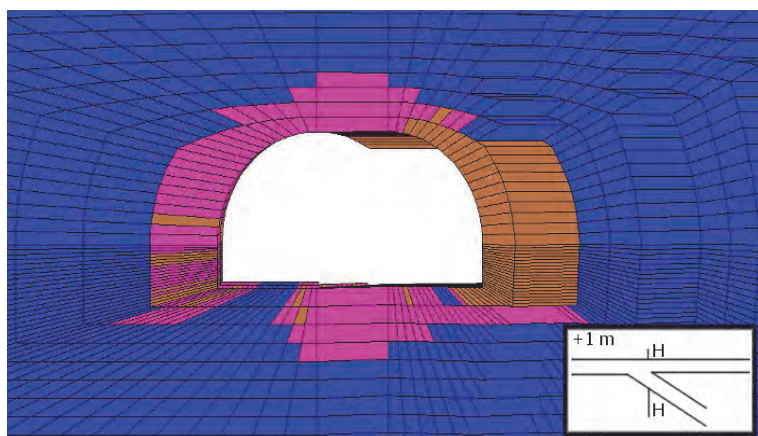
Rys. 3.46. Zasięg strefy spękań w odległości 2 m przed środkiem skrzyżowania



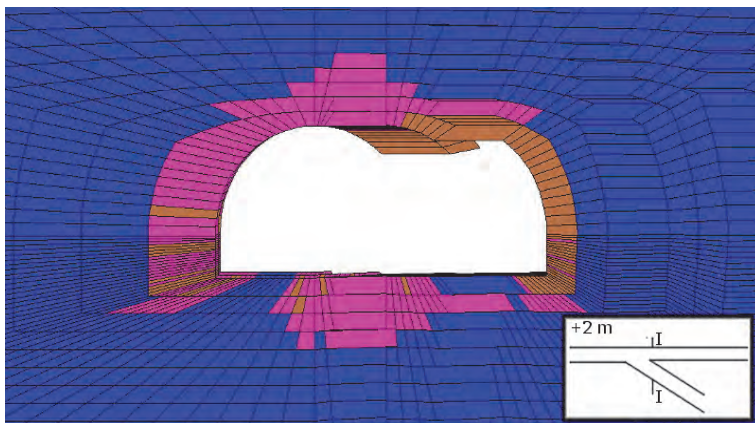
Rys. 3.47. Zasięg strefy spękań w odległości 1 m przed środkiem skrzyżowania



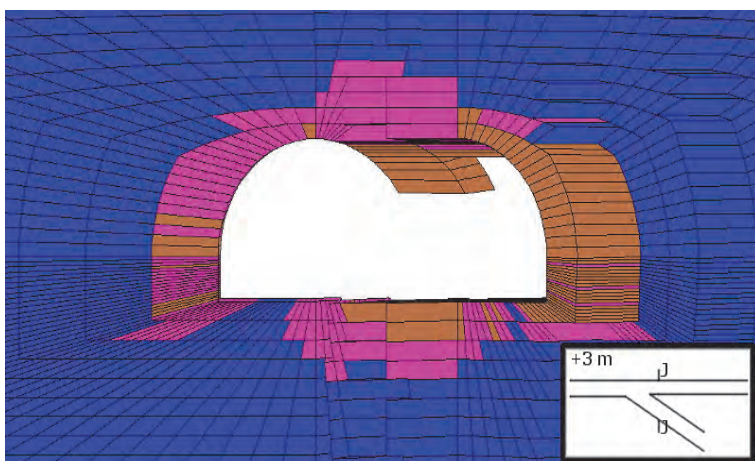
Rys. 3.48. Zasięg strefy spękań w środku skrzyżowania



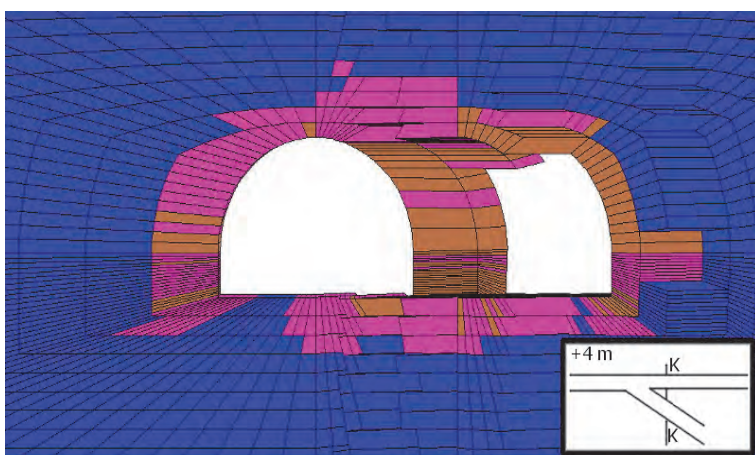
Rys. 3.49. Zasięg strefy spękań w odległości 1 m za środkiem skrzyżowania



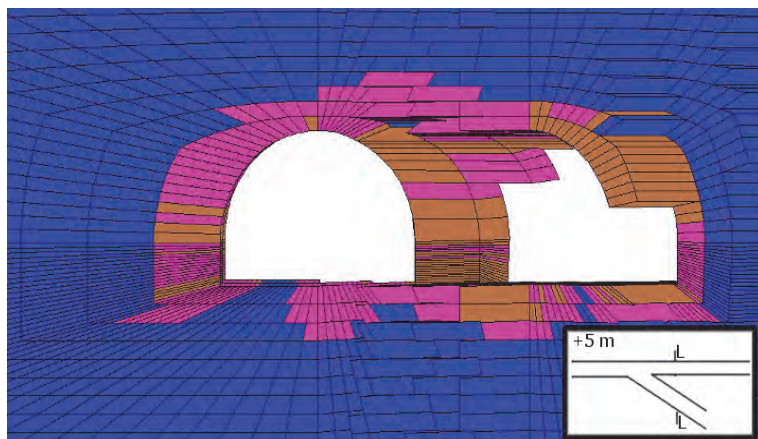
Rys. 3.50. Zasięg strefy spękań w odległości 2 m za środkiem skrzyżowania



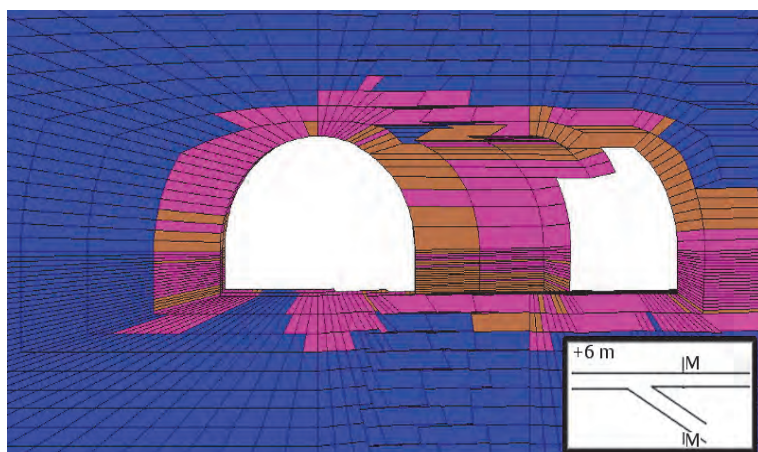
Rys. 3.51. Zasięg strefy spękań w odległości 3 m za środkiem skrzyżowania



Rys. 3.52. Zasięg strefy spękań w odległości 4 m za środkiem skrzyżowania



Rys. 3.53. Zasięg strefy spękań w odległości 5 m za środkiem skrzyżowania



Rys. 3.54. Zasięg strefy spękań w odległości 6 m za środkiem skrzyżowania

Na podstawie wyników przytoczonych analiz, można stwierdzić, że rozkład naprężeń w górotworze wokół połączenia wyrobisk korytarzowych zależy od geometrii tego połączenia. Większych naprężeń należy się spodziewać w przypadku odgałęzień pod ostrymi kątami, mniejszych – przy kątach zbliżonych do prostego. Ponadto z przeprowadzonych badań wynika, że najbardziej wytężonym obszarem górotworu w rejonie odgałęzień jest naroże i w pierwszej kolejności ulega ono uszkodzeniom (Szczepaniak 1963; Majcherczyk i Małkowski 1998). Wzmocnienie tego obszaru górotworu wpływa na zmniejszenie obciążeń obudowy i poprawę stateczności wyrobiska, co przedstawiono w podrozdziale 4.5.4. Przytoczone analizy i uzyskane wyniki mogą być pomocne przy szacowaniu obciążeń i ich rozkładu na długości odgałęzienia. Pozwala to na optymalizację konstrukcji obudowy do warunków geologiczno-górnich.

4. SZKIELETOWE OBUDOWY ODGAŁĘZIEŃ I SKRZYŻOWAŃ WYROBISK KORYTARZOWYCH

4.1. Ogólna charakterystyka

Obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych, oparte na konstrukcji żebrowej, szkieletowej, ramowej, najczęściej przestrzennej, nazywane są portalowo-szkieletowymi lub nazwami pochodzącymi od nazw producentów (np. „Łabędy”, „Heintzmann”). Dla niektórych konstrukcji stosowane są nazwy nawiązujące do ich typu, na przykład: *Portal*, *Konti*, *Polytrab* czy *Polydoor* (Wizner, Wolny, Duży 2013). Konstrukcję zasadniczą stanowią w tych obudowach skręcane śrubami belki proste lub łamane, tworzące przestrzenne ustroje nośne. Przyłączone są do nich odrzwia nazywane uzupełniającymi, a między typową obudową wyrobiska a portalem zabudowywane są odrzwia przejściowe. Większość elementów jest projektowanych indywidualnie, dzięki czemu portalowe obudowy można dopasować do warunków geologiczno-górnictwowych i indywidualnych wymagań inwestora (Rułka, Kowalski, Perek 1999).

4.2. Proces projektowo-konstrukcyjny

Proces wytwarzania obiektów technicznych, także obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń, opiera się na tworzeniu i przetwarzaniu informacji. Na całość tego procesu w początkowej fazie składa się sformułowanie problemu technicznego, określenie wymagań i założeń, następnie tworzone są koncepcje projektowe i rozwiązywane są poszczególne zadania konstrukcyjne. W dalszej kolejności sporządzane są rysunki, opisy, wykazy części (Dietrich i in. 1995), określane warunki techniczne wykonania i odbioru oraz opracowywane instrukcje ruchowo-eksploatacyjne. Zasadniczym etapem procesu wytwórczego jest jego finał – zmaterializowanie myśli technicznej w postaci gotowego wyrobu.

Celem konstruowania jest tworzenie nowych obiektów technicznych, wynikających z określonych potrzeb i możliwości ich realizacji (Dietrich 1974; Dietrich i in. 1995; Osiński i in. 1999). Konstruowanie jest procesem ciągłym, napędzanym powstawaniem kolejnych potrzeb i oczekiwań po spełnieniu poprzednich. Pierwszym krokiem zawsze jest zdefiniowanie potrzeby. W dalszej części rozstrzyganych jest wiele problemów, wśród których można wymienić techniczne, użytkowe (związane z funkcjonalnością, ergonomią) i ekonomiczne.

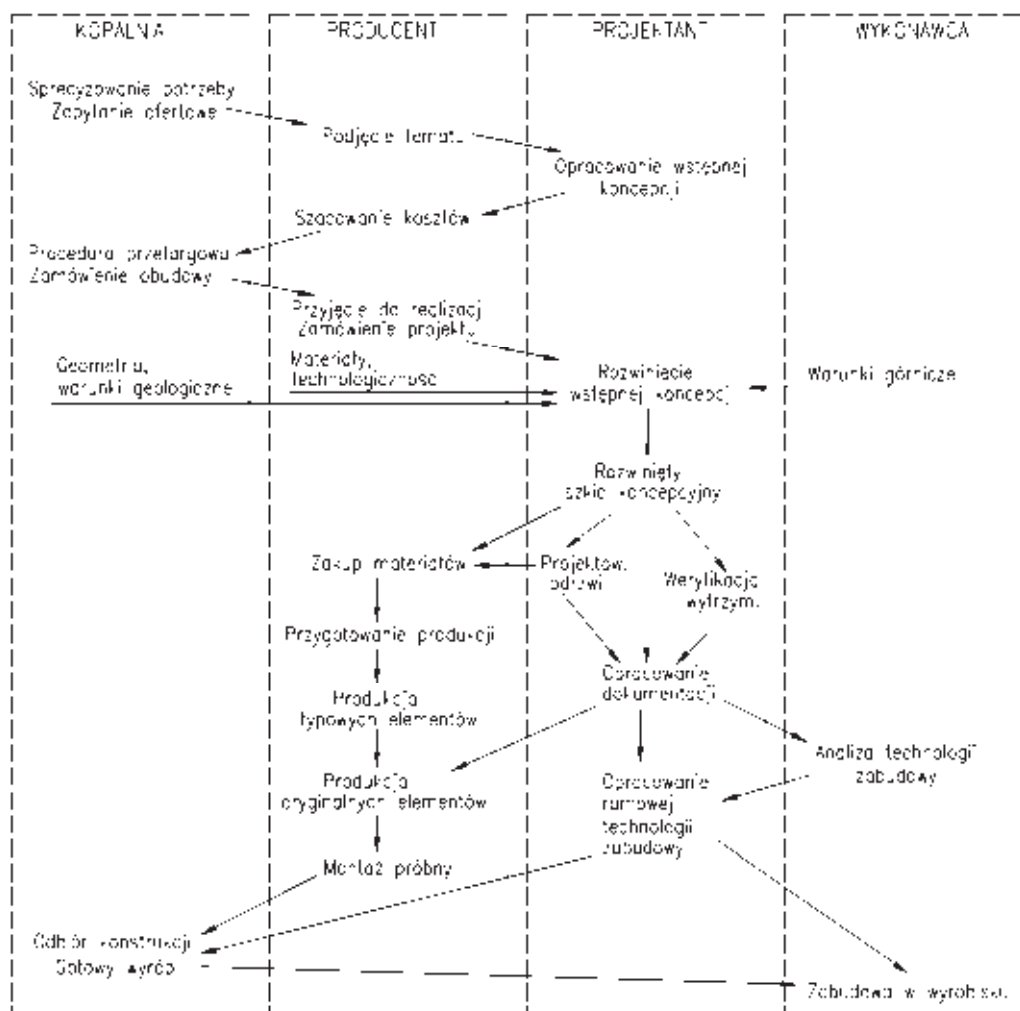
Proces projektowania (a także wytwarzania) powinien się rozpocząć od określenia założeń konstrukcyjnych. Jest to zbiór danych obejmujących opis działania konstruowanego układu, opis warunków pracy, do jakich obiekt zostanie zaprojektowany oraz opis istotnych wymagań stawianych temu układowi. Formułując założenia konstrukcyjne wykorzystuje się maksymalnie doświadczenie i tradycję konstrukcyjną, zdobyte przy wcześniejszych realizacjach. Na ich podstawie powstaje kilka wariantów koncepcji obiektu, w których określa się podstawowe elementy wchodzące w jego skład i podaje materiały potrzebne do jego budowy. Po wyborze koncepcji opracowuje się projekt wstępny, określający podstawowe cechy geometryczne i materiałowe. Następnie prowadzona jest weryfikacja teoretyczna, obejmująca sprawdzanie parametrów

wytrzymałościowych, funkcjonalności, określenie niezawodności, trwałości, a także kosztów wykonania i eksploatacji. W dalszej kolejności powstaje projekt techniczny, określający wszystkie wymiary konstrukcji, zastosowane materiały, sposób obróbki elementów, sposób montażu i eksploatacji. Zwieńczeniem tych działań jest gotowa konstrukcja przeznaczona do eksploatacji. Ostatnim etapem konstruowania jest obserwacja prowadzona w trakcie użytkowania w normalnych warunkach eksploatacyjnych. Pozwala ona na wykrycie wad i wskazanie zalet konstrukcji oraz określenie kierunków jej doskonalenia (Dietrich i in. 1995).

Wyborów i decyzji w trakcie konstruowania dokonuje się, korzystając z różnych kryteriów. Najważniejsze z nich to kryterium bezpieczeństwa i funkcjonalności. Istotne są także kryteria masy, ekonomiki użytkowania oraz technologiczności konstrukcji (Dietrich 1974; Dziama 1985). W przypadku obudowy wyrobisk górniczych należy wymagać, aby zaprojektowana konstrukcja skutecznie opierała się działaniom sił zewnętrznych podczas wznoszenia i użytkowania w założonym czasie, prawidłowo zachowywała się w normalnych warunkach użytkowania, a ponadto utrzymywała konstrukcyjną całość w przypadkach wystąpienia sytuacji ekstremalnych.

Proces projektowania i wytwarzania portalowej obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych nie odbiega znacznie od procesu projektowania i konstruowania maszyn i urządzeń. Jednak z uwagi na podnoszenie atrakcyjności swojej oferty i konkurencję na rynku, producenci niekiedy godzą się na skrajnie krótkie terminy wykonania kompletnej obudowy. W przypadkach tych tradycyjne podejście do procesu wytwarzania jest zastępowane równocześnie prowadzonym projektowaniem i wytwarzaniem. Oczywiście nie wszystkie działania mogą być w ten sposób realizowane. Natomiast możliwe jest, na podstawie wstępnego projektu, przystąpienie do produkcji typowych elementów, analogicznych do wcześniej wykonywanych. W grupie tej znajdują się blachy czołowe belek, ucha i sworznie do łączenia odrzwi z konstrukcją zasadniczą, elementy upodatniające obudowę. W szczególnych przypadkach mogą to być nawet kompletne elementy konstrukcji zasadniczej – poszczególne belki. Takie podejście do procesu wytwarzania konstrukcji wymaga wysokiej dyscypliny, kultury technicznej, odpowiedzialności i zgrania zespołów projektantów i wytwórców. Poważnym sprzymierzeńcem w takich działaniach jest technika komputerowa. Chodzi tu o systemy CAE (Dietrich i in. 1995; Osiński i Wróbel 1995; Osiński i in. 1999) i przesył danych (dokumentacji konstrukcyjnej) przez internet. Bez tych systemów trudno sobie wyobrazić współczesny efektywnie prowadzony proces wytwarzania. Przykładowy przebieg nowoczesnego, symultanicznego procesu wytwarzania obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych przedstawiono na rysunku 4.1.

Pomimo przenikania się poszczególnych etapów procesu projektowania i wytwarzania, a tym samym niemożności wskazania wyraźnych granic między nimi, w dalszej części rozdziału podjęto próbę wyodrębnienia podstawowych etapów i ich opisanie na przykładzie konkretnej obudowy połączenia wyrobisk, zaprojektowanej, wykonanej i zabudowanej w roku 2003 (Rotkegel 2003a).

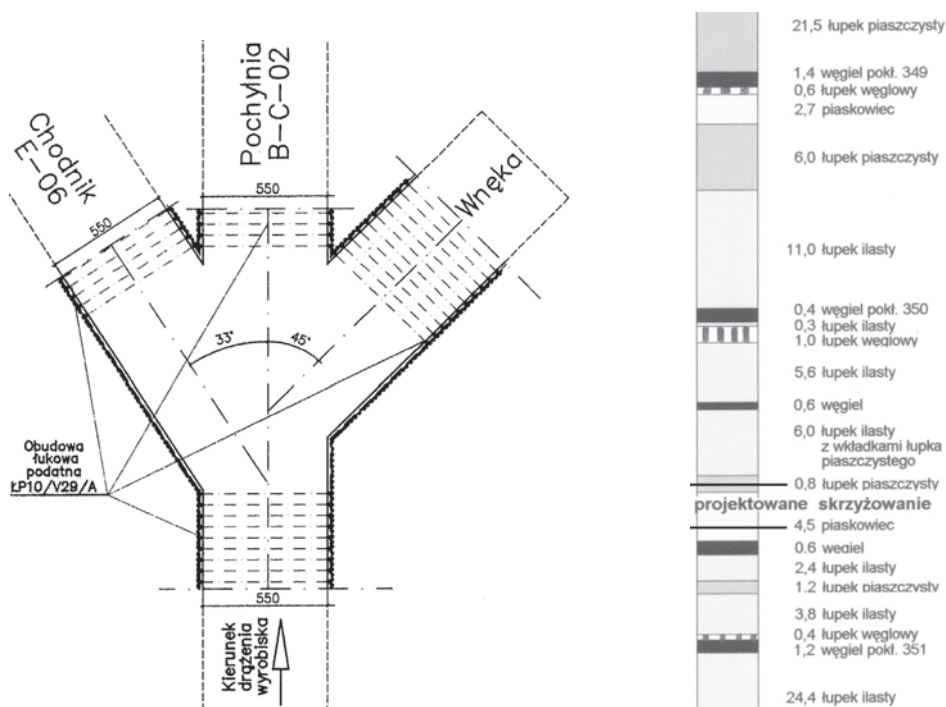


Rys. 4.1. Jeden z możliwych schematów projektowania i wytwarzania obudowy odgałęzień wyrobisk korytarzowych (Rotkegel, Dragon 2006)

4.2.1. Określenie założeń

Etapem otwierającym proces projektowy jest identyfikacja potrzeby, będąca zarazem zdefiniowaniem zadania projektowego. W przypadku projektowania obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych w identyfikacji potrzeby zawarte jest określenie geometrii połączenia – wymaganej wielkości wyrobisk i kątów, pod jakimi się one ze sobą łączą. Chodzi o dokładne określenie położenia wyrobisk w przestrzeni. Następnym ważnym zagadnieniem jest określenie wartości obciążeń, jakie będą działać na obudowę. Następuje ono w oparciu o dostarczony przez kopalnię opis warunków geologiczno-górnich i parametry wytrzymałościowe skał w otoczeniu projektowanego połączenia wyrobisk. Do podjęcia prac projektowych konieczne jest zatem posiadanie kompletu informacji dotyczących lokalizacji planowanego wyrobiska i parametrów

górotworu w jego otoczeniu. Dla wspomnianego przykładowego skrzyżowania część danych przedstawiono na rysunku 4.2. Przedmiotowe skrzyżowanie łączy ze sobą pod kątem 33° chodnik E-06 z pochylnią B-C-02. Po przeciwnej stronie od pochylni pod kątem 45° odgałęzia się wnęka. W rejonie projektowanego połączenia wyrobiska zaprojektowano jako poziome (Rotkegel 2003a).



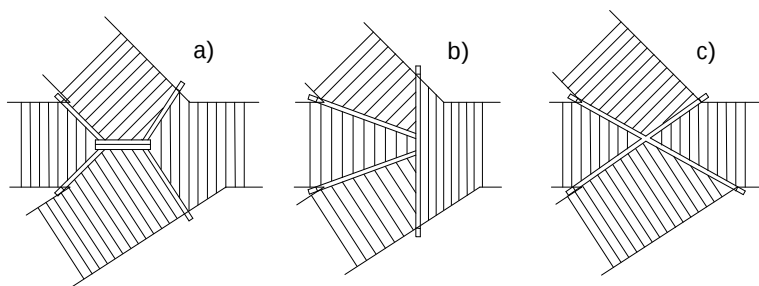
Rys. 4.2. Wybrane dane wejściowe do rozpoczęcia prac projektowych

4.2.2. Opracowanie koncepcji

Opracowanie koncepcji i wybór optymalnej jest pierwszym właściwym etapem konstruowania, rzutującym na ostateczną postać obudowy. Na tym etapie powstaje kilka wariantów, z których następnie wybiera się rozwiązanie optymalne ze względu na przyjęte kryteria – podporność, funkcjonalność, koszt produkcji oraz bezpieczeństwo i prostotę zabudowy. Idealną konstrukcją jest taka, która w zadowalającym stopniu rozwiązuje powyższe kwestie przy korzystnej cenie (Rotkegel 2003a).

Z powyższego wynika, że każda zaprojektowana konstrukcja jest oryginalna, niepowtarzalna i przeznaczona do zabezpieczenia połączenia konkretnych wyrobisk w ściśle określony sposób. Na rysunku 4.3 przedstawiono trzy warianty obudowy przykładowego skrzyżowania. Do dalszych prac projektowych wybrano wariant c – konstrukcję obudowy w postaci dwóch krzyżujących się portali, uzupełnionych odrzwiami. O wyborze tym zdecydowały głównie względy ekonomiczne i planowana technologia zabudowy zaproponowana przez kopalnię (przebudowa wyrobiska). Wybrana koncepcja obudowy charakteryzowała się najmniejszą masą, dzięki czemu zminimalizowane zostały koszty materiałowe oraz koszty związane z transportem

i zabudową w wyrobisku. Na tym etapie także wstępnie określa się materiały, z jakich zostanie wykonana konstrukcja i ustala wielkość profili używanych do wykonania konstrukcji zasadniczej oraz odrzwi, a także rozstawy odrzwi. Ustalenia te podlegają potem szczegółowej weryfikacji wytrzymałościowej i weryfikacji pod względem ewentualnych kolizji.



Rys. 4.3. Analizowane warianty obudowy przykładowego skrzyżowania:
a – cztery wsporniki spięte belkami głównymi, b – portal i dwa wsporniki,
c – dwa krzyżujące się portale lub portal i dwa wsporniki

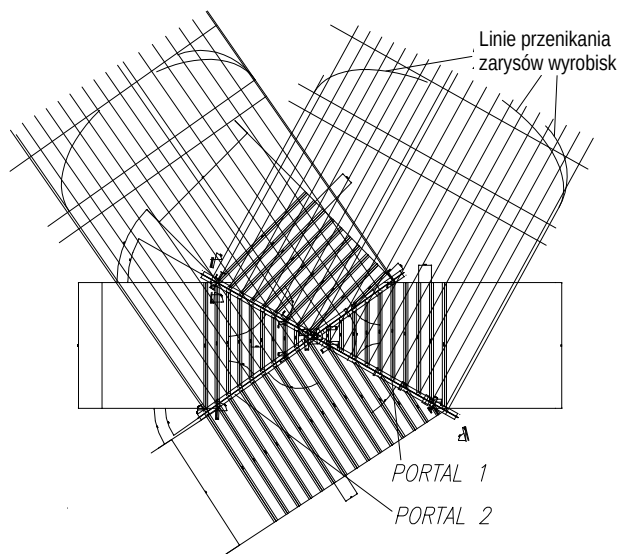
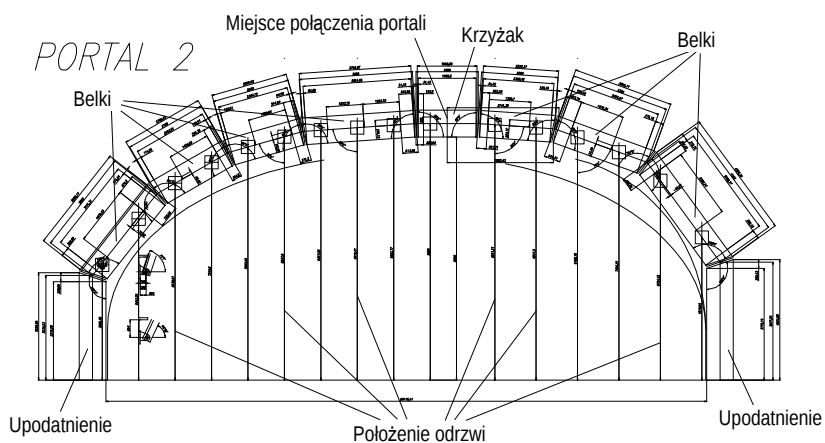
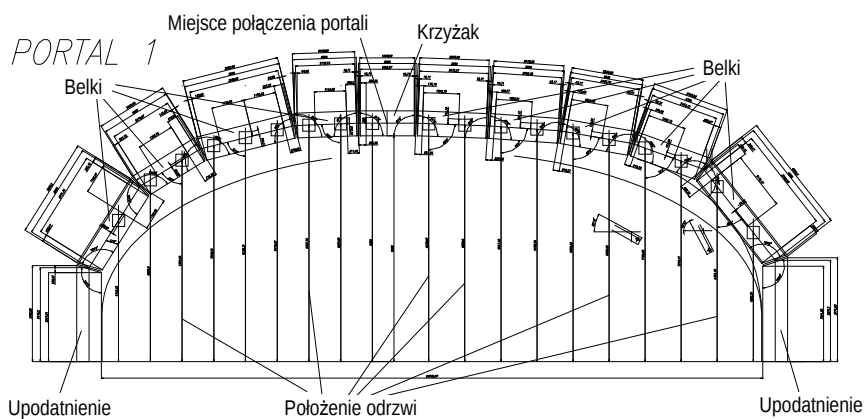
4.2.3. Projektowanie geometrii obudowy

Po zaakceptowaniu przez użytkownika koncepcji, można podjąć dalsze prace projektowe, obejmujące szczegółowe określenie kształtu i wymiarów całej konstrukcji. Ten etap dzielony jest na część dotyczącą konstrukcji zasadniczej i część dotyczącą odrzwi.

Jako pierwsze zostają określone gabaryty i kształt konstrukcji zasadniczej oraz jej podział na belki. Przy ich określaniu stosuje się kilka istotnych zasad. Podstawową jest zapewnienie należytych wymiarów wynikających z linii przenikania się „brył” wyrobisk, co bezpośrednio rzutuje na rozpiętość konstrukcji szkieletowej. Ponadto ważne jest, aby poszczególne belki (elementy) były w miarę zwarte i krótkie, dzięki czemu mogą być łatwiej transportowane, a potem montowane. Na tym etapie ustalany jest podział konstrukcji na poszczególne belki i lokalizacja uch, wynikająca z założonego rozstawu odrzwi. Podział konstrukcji na belki musi uwzględniać takie rozmieszczenie uch, aby nie występowały kolizje między konstrukcją zasadniczą a łączonymi z nią odrzwiami. Dotyczy to szczególnie blach łączących belki i półek dwuteownika. Określane jest także dokładne ustawienie konstrukcji w wyrobisku.

Na rysunku 4.4 przedstawiono szkic konstrukcji zasadniczej, będący podstawą do tworzenia dokumentacji warsztatowej. Zawierający wszystkie wymiary szkic, stanowi także podstawę do dalszej analizy ewentualnych kolizji i szczegółowego sprawdzenia dokumentacji rysunkowej. W niektórych przypadkach może być także wykorzystywany przy zakupie materiałów, a nawet przy podejmowaniu produkcji niektórych elementów.

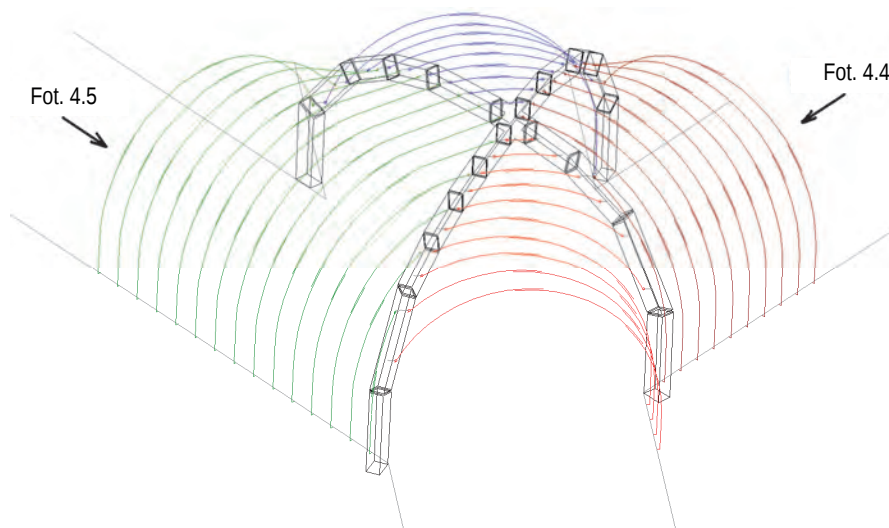
Jak widać na przedstawionym przykładzie (rys. 4.4), konstrukcja zasadnicza składa się z 16 belek ustawionych na czterech elementach upodatniających. W części stropowej, za pomocą specjalnego łącznika krzyżowego, skręcone są ze sobą belki przystropowe. Powstaje w ten sposób przestrzenna rama w kształcie dwóch krzyżujących się portali. W rzucie pionowym mają one kształt litery X.



Rys. 4.4. Kompletny szkic konstrukcji zasadniczej (rysunek poglądowy, podziałka zmienna)

Dysponując geometrią konstrukcji zasadniczej, a w szczególności położeniem punktów połączenia z nią odrzwi, możliwe jest rozpoczęcie ich projektowania. Określenie parametrów geometrycznych odrzwi stało się w ostatnim czasie znacznie łatwiejsze i mniej czasochłonne. Związane jest to z opracowaniem i wdrożeniem w Głównym Instytucie Górnictwa specjalistycznego oprogramowania typu CAD (program ODRZWIA), dedykowanego właśnie projektowaniu odrzwi obudowy chodnikowej wszelkich typów (Rotkegel 2003b, 2003c).

Wynikiem prezentowanych etapów konstruowania jest zarys kompletnego skrzyżowania zabezpieczonego projektowaną obudową, przedstawiony na rysunku 4.5. Rysunek ten jest jednocześnie bazą do projektowania rozmieszczenia rozpór, wskazania miejsc, w których może zaistnieć kolizja elementów i sprawdzenia poprawności zaprojektowanych odrzwi. Ponadto trójwymiarowy rysunek obudowy stanowi model geometryczny do analiz wytrzymałościowych.

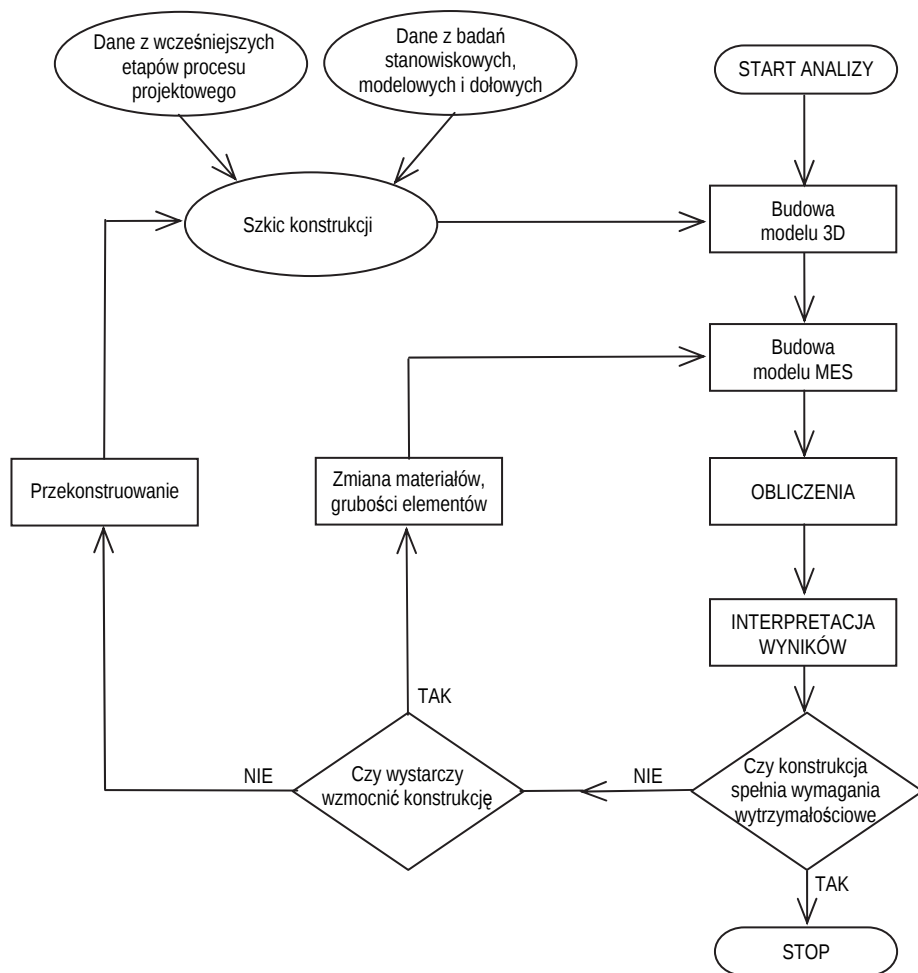


Rys. 4.5. Trójwymiarowy rysunek obudowy skrzyżowania (fot. 4.4 i 4.5 – patrz s. 58)

4.2.4. Analiza wytrzymałościowa

Kluczowym zagadnieniem, z uwagi na bezpieczne użytkowanie obudowy, jest sprawdzenie jej wytrzymałości w warunkach prognozowanych obciążeń górotworem (Rotkegel 2003a). Najważniejsze elementy zostały przebadane w trakcie badań stanowiskowych. Szczegółowe informacje na temat tych badań można znaleźć w obszernej pracy Stałęgi (2001). Mimo że wszystkie bardziej wyężone fragmenty obudowy odgałęzień i skrzyżowań zostały przebadane w stanowisku, to dla każdej nowo projektowanej konstrukcji przeprowadza się symulację jej pracy w warunkach obciążeń spodziewanych w miejscu zabudowy. Badania takie przeprowadza się numerycznie z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES, ang. FEM) (Rakowski i Kacprzyk 1993; Chmielewski i Nowak 1996). W trakcie realizacji wielu projektów wypracowany został algorytm prowadzenia numerycznych badań modelowych. Na rysunku 4.6 przedstawiono plan analizy wytrzymałościowej. Wynika z niego, że prze-

bieg procesu w dążeniu do uzyskania zadowalających wyników, może się zapętlać. Uwzględniono dwie pętle – większa związana z przekonstruowaniem całej konstrukcji lub jej fragmentów i mniejsza pętla dotycząca drobnych zmian na poziomie modelu MES (zmiana grubości elementów, zmiana materiałów). Oczywiście jest, że zmiany w modelu pociągają za sobą także zmiany w projektowanej konstrukcji.

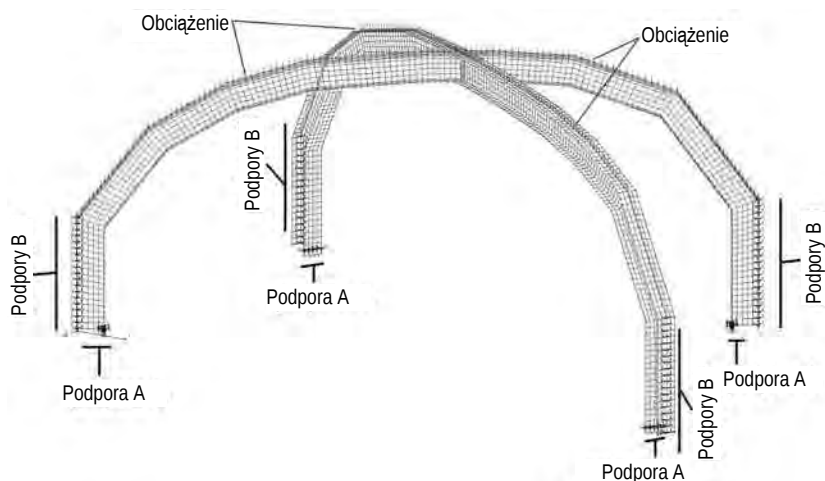


Rys. 4.6. Algorytm obliczeń wytrzymałościowych

Dla prezentowanego przebiegu projektowania obudowy wykonano trzy cykle obliczeniowe, przytoczone poniżej. Analiza wytrzymałościowa konstrukcji zasadniczej obudowy skrzyżowania przebiegała w kilku etapach. W pierwszym – prowadzono badania w zakresie liniowym. Wykazały one, że w niektórych miejscach konstrukcji pod wpływem przewidywanych obciążeń ze strony górotworu, występują naprężenia przekraczające granicę plastyczności materiału. W kolejnym kroku analizę rozszerzono o badania nieliniowe, uwzględniające nieliniowość fizyczną, związaną z nieliniową charakterystyką materiału. Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie plastycznej rezerwy

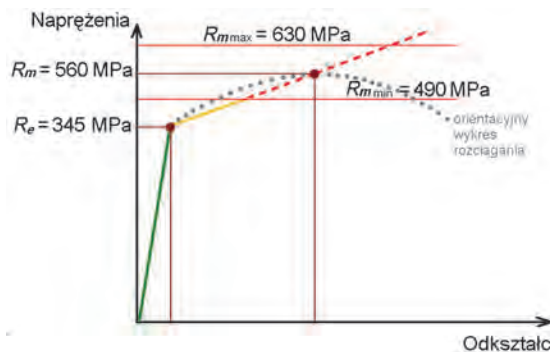
materiału i pracy konstrukcji w zakresie odkształceń plastycznych, a przez to zwiększenie dopuszczalnych wartości naprężeń występujących w konstrukcji. W związku z powyższym trzon weryfikacji wytrzymałościowej stanowiły analizy nieliniowe (Rotkegel 2003a).

Dla przeprowadzenia analiz konieczne było zbudowanie modelu, który odzwierciedlałby zarówno parametry geometryczne, jak i fizyczne modelowanego ustroju. Powstał więc przestrzenny model, składający się z 4493 czterowęzłowych elementów powłokowych typu SHELL4T, zdefiniowanych na 4828 węzłach. Elementy te zebrano w trzech grupach. W pierwszej grupie znalazły się elementy modelujące półki dwuteownika IPB, druga grupa obejmowała elementy modelujące środnik, natomiast w trzeciej grupie (aktywowanej tylko w ostatnim etapie analizy) zebrano elementy modelujące półki wzmocnione dodatkowo blachą nakładkową. Model ten został podparty w sposób odzwierciedlający podparcie i rozparcie konstrukcji w górotworze. Podparcie konstrukcji na spągu modelowały podpory A, natomiast odpór ociosów – podpory typu B. Tak podpartą konstrukcję obciążono siłami odpowiadającymi obciążeniom, jakimi górotwór oddziałuje na obudowę. Obciążenie to obliczono w oparciu o „Uprozczone zasady doboru obudowy...” (Rułka i in. 2001). Uwzględniono zmienną szerokość wyrobiska. Wynika z tego różna wartość obciążenia działającego na poszczególne odrzwia i belki konstrukcji zasadniczej. Uwzględniono także fakt, że część tego obciążenia jest przenoszona przez odrzwia na spąg. Na rysunku 4.7 przedstawiono model portali – konstrukcji zasadniczej z zaznaczonym sposobem podparcia i obciążenia.



Rys. 4.7. Model konstrukcji zasadniczej obudowy skrzyżowania z zaznaczonym sposobem podparcia i obciążenia

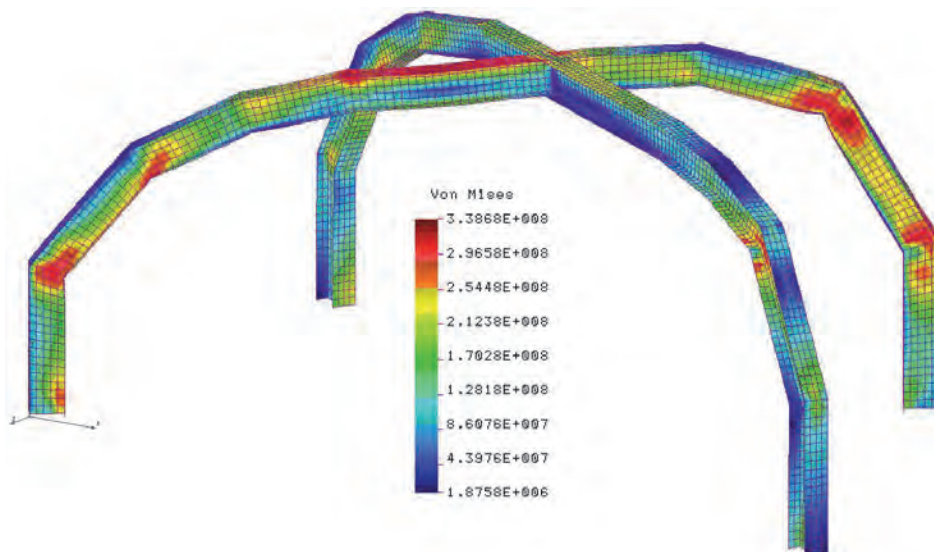
Elementom nadano parametry materiałowe odpowiadające stali 18G2A (S355), opisane biliniową charakterystyką materiału (Rusiński, Czmochoński, Smolnicki 2000). Przyjętą charakterystykę materiałową przedstawiono na rysunku 4.8. Punktami charakterystycznymi są: granica plastyczności ($R_e = 345$ MPa) i wytrzymałość materiału na rozciąganie ($R_m = 560$ MPa), przyjęta jako średnia wartość z zakresu między minimalną a maksymalną wytrzymałością ($R_{m18G2A} = 490\text{--}630$ MPa).



Rys. 4.8. Przykładowy biliniowy model materiału: $R_{m \max}$ – maksymalna wytrzymałość na rozciąganie, $R_{m \min}$ – minimalna wytrzymałość na rozciąganie, R_m – wytrzymałość na rozciąganie, R_e – granica plastyczności

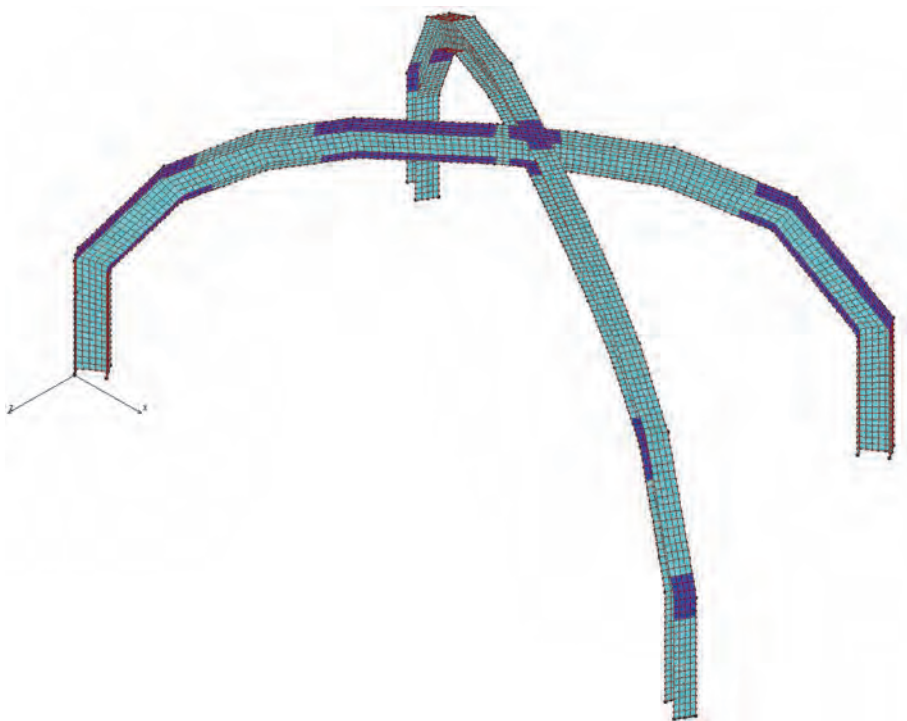
Z analizą nieliniową związany jest iteracyjny charakter obliczeń numerycznych. Przedmiotowe badania przeprowadzono z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody Newtona-Raphsona (MNR) (Rakowski 1996; SRAC 1999). W trakcie symulacji na model oddziaływano siłami narastającymi od zera do założonej wartości (odpowiadającej oddziaływaniu górotworu na obudowę). Program automatycznie rozpoznaje, na której linii charakterystyki znajduje się każdy z elementów i nadaje mu parametry opisane pierwszą bądź drugą linią powyższej charakterystyki.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano między innymi zdeformowaną postać modelu i wartości sił wewnętrznych przeliczanych automatycznie na naprężenia. Na rysunku 4.9 przedstawiono mapę naprężeń zredukowanych, wyznaczonych według hipotezy Hubera (Dyląg, Jakubowicz, Orłóś 1996). Maksymalne wartości osiągały w tym przypadku 338,7 MPa.



Rys. 4.9. Rozkład naprężeń w modelu konstrukcji zasadniczej obudowy skrzyżowania (skala deformacji 10×, naprężenia w Pa)

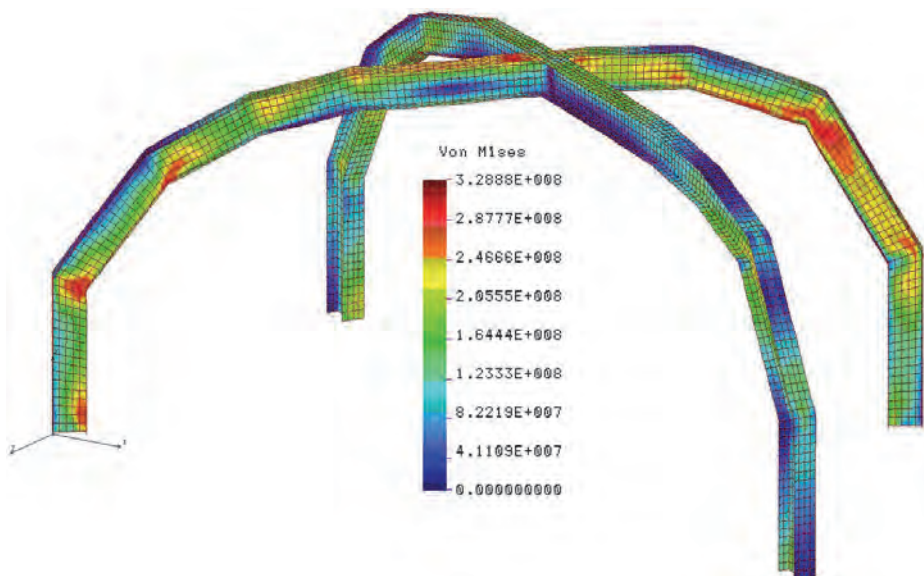
Uzyskane wartości naprężeń, pomimo pewnej rezerwy w stosunku do wytrzymałości materiału, skłoniły do wzmocnienia konstrukcji w miejscach najbardziej wyężonych. W przebiegu procesu projektowego powodowało to cofnięcie do wcześniejszych etapów zgodnie z mniejszą pętlą algorytmu obliczeniowego (rys. 4.6). Analizę takiej obudowy przeprowadzono dla modelu przedstawionego na rysunku 4.10. W modelu miejscowo zastosowano elementy o zwiększonej grubości. Zebrano je w oddzielnej grupie i nadano im grubość uwzględniającą wzmocnienia w postaci spawanych nakładek na półki. Miejsca wzmocnienia zaznaczono ciemniejszym odcieniem (rys. 4.10). Pozostałe parametry zarówno geometryczne, jak i fizyczne pozostały identyczne jak we wcześniejszych analizach.



Rys. 4.10. Model obudowy skrzyżowania ze spawanymi nakładkami wzmacniającymi (ciemniejszym kolorem zaznaczono elementy wzmocnione)

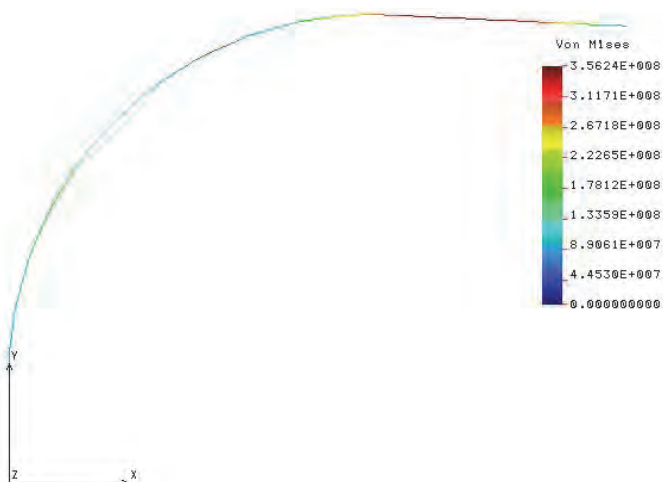
W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano, podobnie jak poprzednio, rozkład naprężeń zredukowanych, przedstawiony na rysunku 4.11. Widoczne było zmniejszenie maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych z 338,7 do 328,9 MPa. Ponadto zauważono lepsze wykorzystanie materiału, czego dowodem był bardziej równomierny stan wyężenia elementów niż w modelu wyjściowym i znaczne zmniejszenie obszarów spiętrzenia naprężeń.

Kolejnym weryfikowanym wytrzymałościowo elementem obudowy skrzyżowania były odrzwia uzupełniające, stanowiące istotną część konstrukcji. W przykładowej obudowie przeprowadzono analizę odrzwia o częściowo prostoliniowej stropnicy, z czym związana była mniejsza nośność. Do badań wytypowano odrzwia najszerze, najbardziej obciążone, z najdłuższym prostym odcinkiem łuku stropnicowego i zabudowane



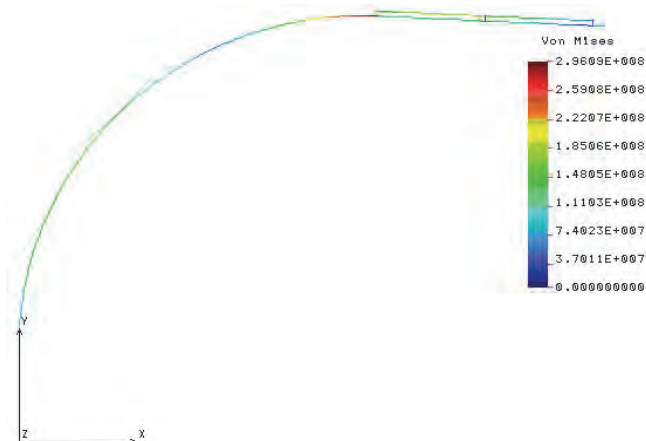
Rys. 4.11. Rozkład naprężeń w modelu wzmocnionej konstrukcji zasadniczej obudowy skrzyżowania (skala deformacji 10×, naprężenia w Pa)

w największym rozstawie. Badania przeprowadzono z użyciem metody elementów skończonych za pomocą programu COSMOS/M w zakresie liniowym. W celu przeprowadzenia obliczeń zbudowano model z elementów belkowych typu BEAM2D. Elementom tym nadano parametry przekrojowe kształtownika V32. Model odrzwi podparty został w miejscu kontaktu ze spągiem i w miejscu połączenia sworzniowego z portalem. W wyniku obliczeń otrzymano rozkład naprężeń w poszczególnych elementach. Maksymalna wartość wynosiła 356,2 MPa, a ekstremum zlokalizowane było w płaskiej (prostoliniowej) części stropnicy. Na rysunku 4.12 przedstawiono rozkład naprężeń w modelu odrzwi.



Rys. 4.12. Naprężenia w modelu odrzwi

Dla poprawy stanu wyężenia tego fragmentu odrzwi zastosowano dodatkowy element prosty, łączony za pomocą strzemion z prostą częścią stropnicy. Uzyskano w ten sposób podwójne złożenie kształtowników V32 na tym odcinku. W wyniku zastosowania tego dodatkowego elementu uzyskano znaczne obniżenie wartości naprężeń w elementach odrzwi. Na rysunku 4.13 przedstawiono rozkład naprężeń w elementach wzmocnionych odrzwi. Maksymalne naprężenia nie przekraczały 300 MPa.



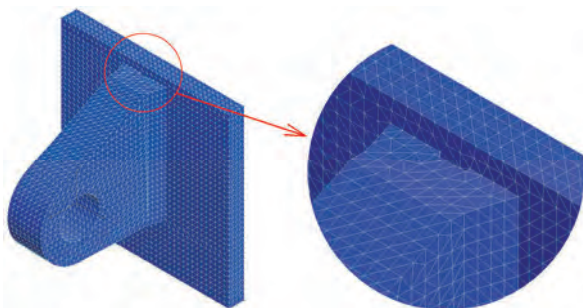
Rys. 4.13. Naprężenia w modelu wzmocnionych odrzwi

Zdarza się, że analiza wytrzymałościowa samej konstrukcji zasadniczej i odrzwi nie jest wystarczająca i musi objąć także inne elementy konstrukcji. W przykładowej obudowie dodatkową analizę przeprowadzono dla nowo zaprojektowanych uch przeznaczonych do łączenia odrzwi z poszczególnymi belkami. Zastosowany łącznik jednoprzegubowy, przedstawiony na fotografii 4.1, zastąpił stosowane wcześniej z powodzeniem rozwiązanie łącznika dwuprzegubowego. Sprawdzony łącznik nie mógł być użyty ze względu na uwarunkowania geometryczne połączenia odrzwi z konstrukcją zasadniczą. Analizę, podobnie jak poprzednio, przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Wytypowano do nich łącznik najbardziej obciążony, tzn. łączący odrzwia o największej szerokości z konstrukcją.

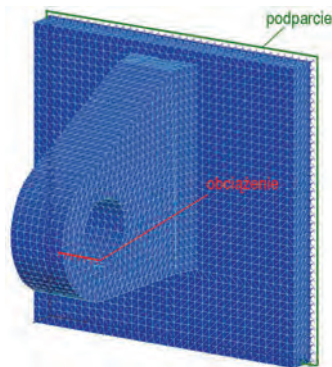


Fot. 4.1. Łącznik jednoprzegubowy

Dla przeprowadzenia badań zbudowano model łącznika, w którym uwzględniono jego budowę – kształt i wymiary oraz połączenie ucha z podstawą za pomocą spoin. Na rysunku 4.14 przedstawiono model przedmiotowego łącznika. Model został podparty na wszystkich krawędziach płyty, co odpowiada w przybliżeniu przyspawaniu do środka belki z dwuteownika szerokostopowego IPB spoiną pachwinową na całym obwodzie. Ucho obciążono siłami pionowymi działającymi na otwór. Na rysunku 4.15 przedstawiono sposób podparcia i obciążenia modelu.

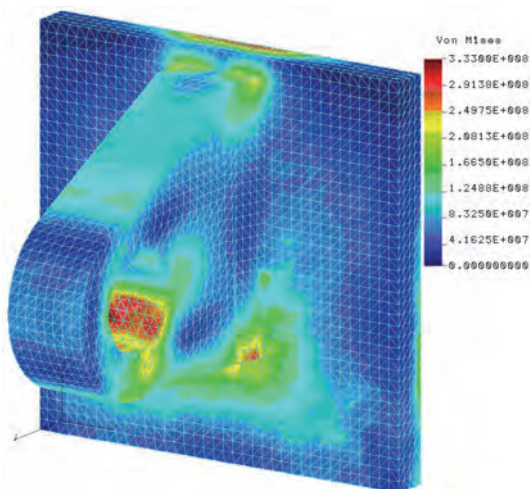


Rys. 4.14. Model łącznika z uwzględnieniem spoin



Rys. 4.15. Sposób podparcia i obciążenia łącznika

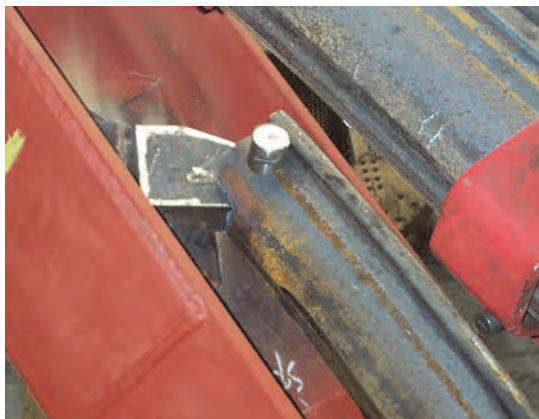
Wartość sił dobrano tak, aby uwzględniały one obciążenie obudowy i rozstaw odrzwi. W wyniku analizy otrzymano przede wszystkim rozkład naprężeń zredukowanych w modelowanym elemencie. Na rysunku 4.16 przedstawiono barwną mapę naprężeń zredukowanych wyznaczonych według hipotezy Hubera. Maksymalne wartości wynosiły $\sigma_{red} = 333,3$ MPa i były niższe od granicy plastyczności oraz zlokalizowane na obciążonej powierzchni otworu. Nie stanowiły zatem zagrożenia dla poprawnej pracy analizowanego elementu.



Rys. 4.16. Rozkład naprężeń w łączniku odrzwi z konstrukcją zasadniczą

4.2.5. Geometryczna weryfikacja konstrukcji

Przed przekazaniem szkiców do wykonania dokumentacji, zaprojektowana konstrukcja wymaga gruntownego sprawdzenia. Trudno wymienić wszystkie elementy i fragmenty konstrukcji podlegające tej weryfikacji. Dla każdej projektowanej obudowy lista sprawdzanych elementów jest tworzona od nowa. Na tej liście najczęściej znajduje się sprawdzenie i wykluczenie możliwych do zaistnienia kolizji pomiędzy elementami. W przykładowej obudowie skrzyżowania, oprócz standardowego sprawdzenia czy kołnierze łuków V nie kolidują z blachami czołowymi, konieczne było określenie wycięcia w dnie profilu V niektórych odrzwi tak, aby możliwe było połączenie odrzwi z konstrukcją zasadniczą (Rotkegel 2003a). Sytuację tę przedstawiono na fotografii 4.2.



Fot. 4.2. Podcięcie w dnie kształtownika V

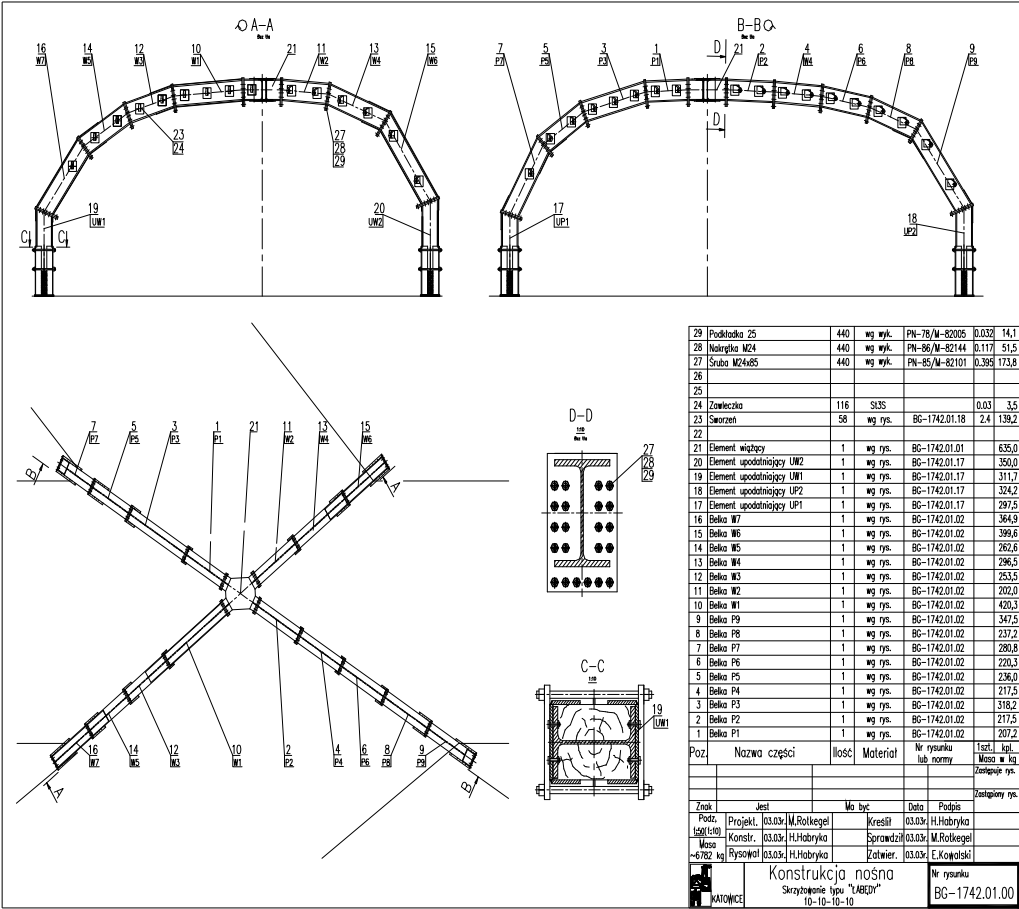
Kolejnym elementem poddanym szczegółowej analizie było ucho do mocowania odrzwi do konstrukcji zasadniczej pod bardzo ostrym kątem. W tym celu zaprojektowano i pozytywnie zweryfikowano specjalną konstrukcję ucha umożliwiającą zamocowanie odrzwi w sposób bezkolizyjny zarówno ze środkiem dwuteownika IPB, jak i z blachą czołową belki. Sytuację tę przedstawiono na fotografii 4.3.



Fot. 4.3. Specjalne ucho do mocowania odrzwi do belki pod ostrym kątem

4.2.6. Sporządzenie dokumentacji rysunkowej

Sporządzenie dokumentacji technicznej jest ostatnim etapem procesu projektowego, wieńczącym całość wcześniejszych działań. Cała dokumentacja techniczna obecnie wykonywana jest z wykorzystaniem systemu AutoCAD. Dysponując dodatkowo bibliotekami typowych, powtarzalnych elementów, można znacznie skrócić czas projektowania (Rotkegel 2003a; Rotkegel, Skuplik, Bock 2005; Rotkegel 2013b). Na rysunku 4.17 przedstawiono rysunek zestawieniowy konstrukcji zasadniczej, stanowiący część dokumentacji rysunkowej omawianej obudowy skrzyżowania.



Rys. 4.17. Rysunek zestawieniowy konstrukcji zasadniczej przykładowego skrzyżowania

Wykonana dokumentacja techniczna przekazywana jest do producenta obudowy. Każda zaprojektowana i wykonana konstrukcja jest próbnie montowana na powierzchni. Montaż próbny ostatecznie weryfikuje zaprojektowaną konstrukcję. Dopiero po zmontowaniu i zaakceptowaniu przez odbiorcę, konstrukcja może zostać przekazana do zabudowy w wyrobisku. Na fotografiach 4.4 i 4.5 przedstawiono prezentowaną obudowę skrzyżowania w czasie montażu próbnego u producenta.



Fot. 4.4. Obudowa w trakcie montażu próbnego – widok od strony wyrobiska odgałęziającego się w prawo (rys. 4.5)



Fot. 4.5. Obudowa w trakcie montażu próbnego – widok od strony wyrobiska odgałęziającego się w lewo (rys. 4.5)

4.3. Narzędzia informatyczne stosowane w procesie projektowo-konstrukcyjnym

Jak wcześniej wspomniano w większości etapów projektowania obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych wykorzystywane są programy wspomagające ten proces – programy i systemy CAD. Programy te można podzielić na dwie grupy. Pierwsza to ogólnodostępne programy komercyjne. Należą do niej programy do

opracowywania dokumentacji rysunkowej, na przykład AutoCAD i programy obliczeniowe do symulacji komputerowych, jak COSMOS/M czy ANSYS. Natomiast do drugiej grupy można zaliczyć specjalistyczne programy autorskie, wspomagające poszczególne etapy procesu projektowego. Są to programy do obliczania obciążeń działających na obudowę (OCG, UZDO), do projektowania odrzwi (POC1, PO_3, PO_5, P_O_Z, P_O_P, ODRZWIA), a także katalog typowych profili (Biblioteka CAD). Programy te zostały opisane w licznych publikacjach (np. Skrzyński i in. 1994; Skrzyński, Kowalski, Pacześniowski 1996; Skrzyński 1997; Stałęga 2001). Dalszy opis poszczególnych programów ograniczono do programów napisanych przez autora, gdyż literatura dotycząca komercyjnego oprogramowania CAD jest dostępna, a same programy podlegają ciągłej i szybkiej ewolucji (Rusiński 1994; Konderla i Kasprzak 1997).

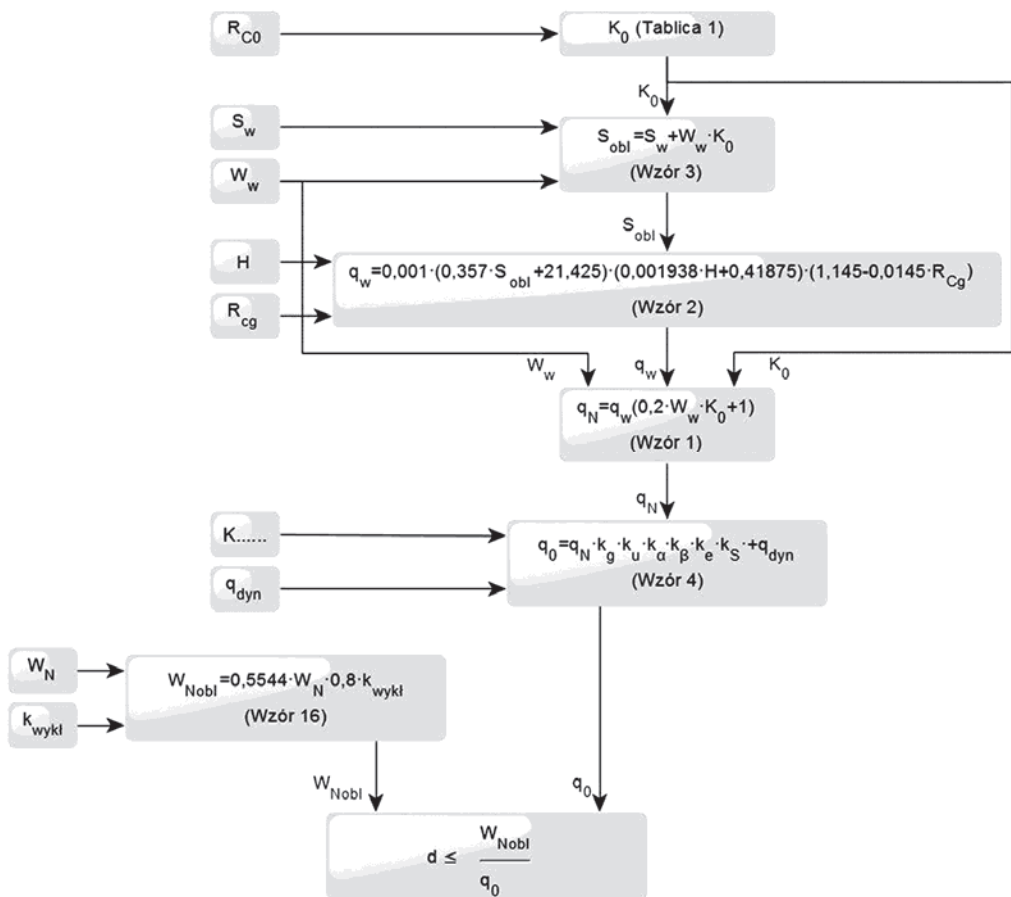
4.3.1. Program UZDO

W procesie doboru i projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych oraz ich połączeń, kluczowym zagadnieniem jest określenie obciążeń, jakie będą działać na projektowaną obudowę. Stosuje się w tym celu metody (Chudek i in. 1999; Drzęźła i in. 2000, 2011; Rułka i in. 2001; Piechota i in. 2002) zaopiniowane pozytywnie na przełomie XX i XXI wieku przez Komisję ds. Obudowy Wyższego Urzędu Górniczego, a także wykorzystuje się wcześniejsze doświadczenia. Każda z metod oparta jest na własnych modelach obliczeniowych oraz zestawach parametrów i współczynników. Największą popularnością w kopalniach cieszą się zasady opracowane przez zespół pod kierunkiem Drzęźli (Drzęźła i in. 2000), co wynika między innymi z opracowania w środowisku EXCEL arkusza kalkulacyjnego pod nazwą OBUD3.

Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom kopalń, w roku 2015 opracowano program komputerowy UZDO, wspomagający dobór obudowy (Rotkegel 2016b), oparty na algorytmie podanym w „Uproszczonych zasadach doboru obudowy...” opracowanych w GIG (Rułka i in. 2001). Nazwa programu jest akronimem początku tytułu tych zasad. Program został napisany w środowisku DELPHI (Lischner 2002; Grażyński i Zarzycki 2003) opartym na języku programowania Turbo Pascal (Marciniak 1991). Dzięki temu wykorzystuje znany z systemu WINDOWS interfejs użytkownika – okienka i pola edycyjne, przyciski, okna dialogowe itp. Dzięki intuicyjnemu stosowaniu programu wyraźnie wzrasta efektywność prac.

Program działa w oparciu o algorytm „Uproszczonych zasad doboru obudowy...” (Rułka i in. 2001), przedstawiony na rysunku 4.18. Na wstępie określone są parametry wymagane do obliczenia wartości pionowego obciążenia statycznego obudowy q_N . Uwzględnia się przy tym między innymi parametry charakteryzujące właściwości górotworu otaczającego wyrobisko, lokalizację wyrobiska i gabaryty jego przekroju poprzecznego. Następnie określone jest obciążenie obliczeniowe obudowy q_o , wynikające z pionowego obciążenia statycznego i warunków geologiczno-górnictwowych opisanych szeregiem wskaźników i współczynników. W ten sposób uwzględniane są między innymi uskoki, krawędzie eksploatacyjne, wyrobiska sąsiadujące, nachylenie wyrobiska, nachylenie warstw skalnych oraz obciążenia dynamiczne. Obliczone obciążenie jest przyjmowane w analizach wytrzymałościowych obudowy.

W dalszej kolejności obliczany jest wymagany rozstaw odrzwi jako stosunek nośności obudowy do wyznaczonego obciążenia obliczeniowego.



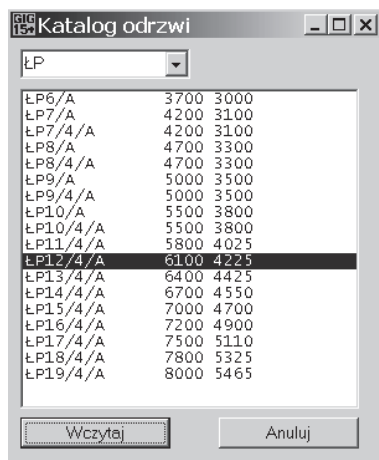
Rys. 4.18. Algorytm doboru obudowy wyrobisk korytarzowych; numery wzorów i tabel według „Uproszczonych zasad doboru obudowy...” (Rułka i in. 2001); R_{C0} – wytrzymałość na ściskanie skał w ociosach [MPa], R_{cg} – wytrzymałość na ściskanie analizowanego pakietu skał [MPa], S_w – szerokość wyrobiska w wyłomie [m], W_w – wysokość wyrobiska w wyłomie [m], S_{obl} – obliczeniowa szerokość wyrobiska [m], H – głębokość lokalizacji wyrobiska [m], q_w – ciśnienie warunkowe [MPa], q_N – wartość charakterystyczna obciążenia obudowy [MPa], q_0 – wartość obliczeniowa obciążenia obudowy [MPa], q_{dyn} – jednostkowe obciążenie dynamiczne [MPa], k_o – współ-czynnik wpływu kąta tarcia wewnętrznego skał w ociosach, k_g – współczynnik osłabienia górotworu, k_u – współczynnik wpływu uskoku, k_α – współczynnik wpływu nachylenia poprzecznego warstw skalnych, k_β – współczynnik wpływu nachylenia podłużnego wyrobiska, k_e – współczynnik wpływu krawędzi eksploatacyjnej, k_s – współczynnik wpływu wyrobiska sąsiadującego, W_N – wskaźnik nośności odrzwi [MN/m], k_{wykl} – współczynnik wpływu wykładki, W_{Nobl} – wskaźnik nośności obliczeniowej odrzwi [MN/m], d – rozstaw odrzwi [m]

Program napisany został w konwencji „wszystko na jednym ekranie”. Interfejs użytkownika obejmuje główny panel do wprowadzania danych i prezentacji wyników. Główne okno programu przedstawiono na rysunku 4.19. Podrzędne panele (okna) dotyczą opcji dodatkowych – wyboru odrzwi z katalogu i operacji zapisu oraz wydruku wyników obliczeń. Takie podejście daje użytkownikowi podgląd wprowadzanych

danych i możliwość odczytu wyników obliczeń. Pozwala to na wyeliminowanie błędów spowodowanych pominięciem niektórych parametrów. Ponadto użytkownik na bieżąco widzi, jak poszczególne parametry wpływają na ostateczny wynik obliczeń. W głównym oknie poszczególne pola edycyjne pogrupowano tematycznie. Opcje w poszczególnych grupach pozostają niewidoczne dla użytkownika do czasu aktywowania grupy. Są to pola definiujące wpływ uskoku, krawędzi eksploatacyjnych, występowania wyrobisk sąsiadujących, obciążeń dynamicznych. Nieaktywowana grupa świadczy o niewystępowaniu danego czynnika. Natomiast pola do identyfikacji wyrobiska, definiowania gabarytów jego przekroju poprzecznego, właściwości otaczającego górotworu oraz wyniki obliczeń są stale widoczne. Zawsze widoczna jest także grupa obejmująca parametry odrzwi i obudowy. Program wyposażono także w moduł do obliczania kosztów obudowy w oparciu o przyjęty rozstaw odrzwi, ich masę oraz cenę za tonę (Rotkegel 2016b).

Rys. 4.19. Widok panelu przygotowania danych i wyników obliczeń wymaganej podziałki obudowy

Użytkownik programu ma do dyspozycji dwa tryby pracy z aplikacją. W pierwszym – sam definiuje wymiary wyrobiska w świetle obudowy, parametry podpornościowe i masę odrzwi. Natomiast w drugim trybie użytkownik wybiera z bazy danych dostępne odrzwia, określa ich wielkość, po czym program w sposób automatyczny wczytuje wymagane parametry do bloku obliczeniowego. Na tym etapie możliwe jest wybranie odpowiedniego kształtownika i gatunku stali. Na rysunku 4.20 przedstawiono okno z katalogiem odrzwi.



Rys. 4.20. Okno wbudowanego katalogu odrzwi

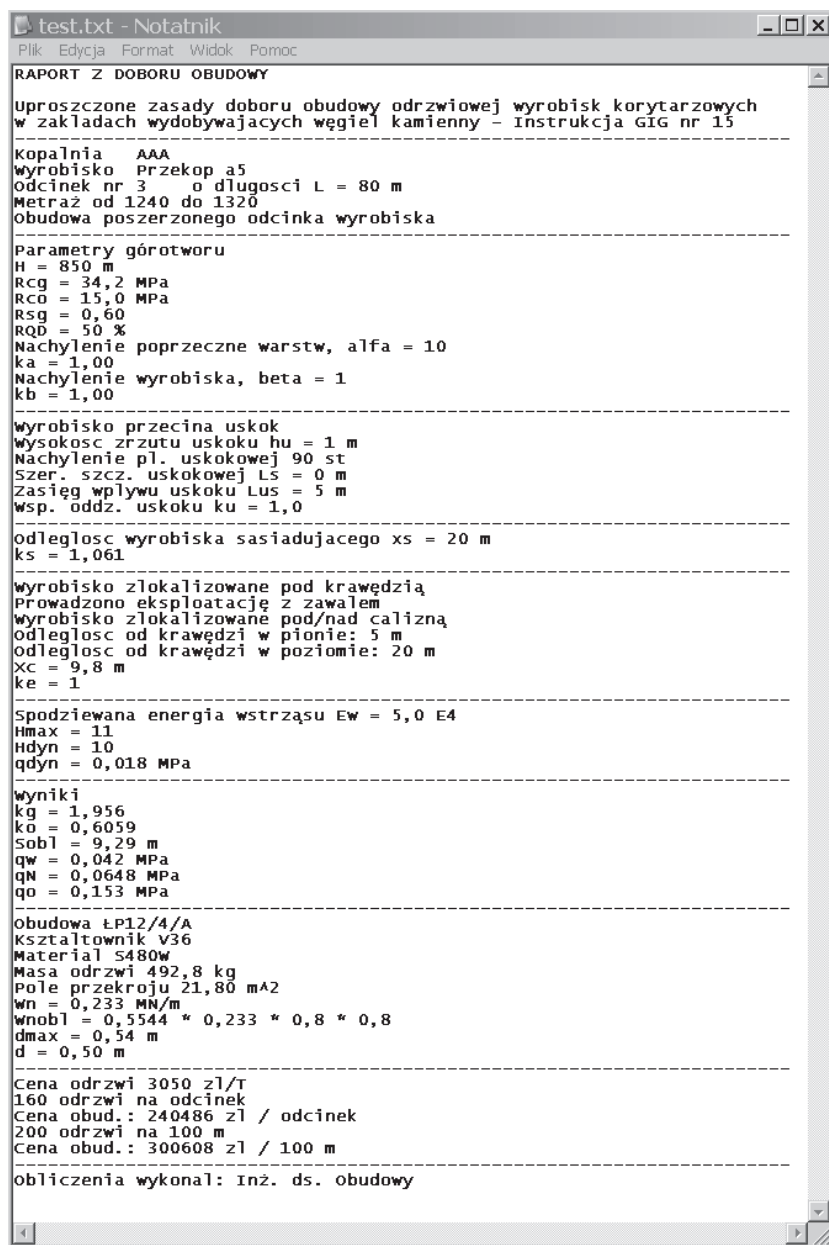
Pliki tekstowe z danymi do katalogu odrzwi charakteryzują się prostą i przejrzystą strukturą, dzięki czemu mogą być modyfikowane i uzupełniane według indywidualnych potrzeb użytkownika. Wygląd przykładowego pliku z katalogu przedstawiono na rysunku 4.21.

	S	W	F	V25	V29	V32	V34	V36	V25A	V29A	V32A	V34A	V36A	V25AAV29AAV32AAV34AAV36AAV25kgV29kgV32kgV34kgV36kg
ŁP6/A	3700	3000	0950	0241					0289					2281
ŁP7/A	4200	3100	1100	0207	0256	0291	0302	0314	0248	0307	0349	0358	0374	0265
ŁP7/4/A	4200	3100	1300			0295	0308	0321		0354	0367	0381		0378
ŁP8/A	4700	3300	1470	0176	0221	0255	0266	0275	0209	0265	0306	0317	0327	0225
ŁP8/4/A	4700	3300	1750			0259	0271	0279		0310	0322	0332		0332
ŁP9/A	5000	3500	1110	0159	0202	0235	0246	0253	0190	0242	0282	0295	0302	0204
ŁP9/4/A	5000	3500	1310			0210	0238	0249	0256		0252	0286	0299	0306
ŁP10/A	5500	3800	1490	0133	0173	0204	0215	0223	0158	0208	0245	0258	0267	0170
ŁP10/4/A	5500	3800	1770			0182	0206	0217	0225		0218	0247	0260	0270
ŁP11/4/A	5800	4025	1980	0121	0162	0188	0200	0208	0145	0194	0226	0240	0250	0155
ŁP12/4/A	6100	4225	2180	0107	0149	0173	0185	0194	0128	0179	0208	0222	0233	0137
ŁP13/4/A	6400	4425	2390	0097	0137	0160	0172	0182	0116	0164	0192	0206	0218	0124
ŁP14/4/A	6700	4550	2560		0125	0151	0163	0173		0150	0181	0196	0208	
ŁP15/4/A	7000	4700	2760		0116	0142	0154	0164		0139	0170	0185	0197	
ŁP16/4/A	7200	4900	2960		0108	0133	0145	0155		0130	0160	0174	0186	
ŁP17/4/A	7500	5110	3210		0099	0125	0137	0147		0119	0150	0164	0176	
ŁP18/4/A	7800	5325	3480		0092	0117	0129	0139		0110	0140	0155	0167	
ŁP19/4/A	8000	5465	3660		0086	0112	0124	0134		0103	0134	0149	0161	

Rys. 4.21. Plik z parametrami odrzwi ŁP

Dla każdego parametru zarezerwowano cztery pozycje cyfr. Czterocyfrowe pola, ustawione w kolumny separowane spacją, opisują kolejno: szerokość, wysokość, pole przekroju w świetle obudowy oraz parametry podpornościowe odrzwi z kształtowników V25, V29, V32 i V36 ze stali trzech kategorii wytrzymałościowych: 25G2 (zgodnie z PN-H-93441-1), S480W (zgodnie z PN-H-84042) i S550W. W ostatnich kolumnach zamieszczono masę odrzwi. Przy modyfikacji plików, dla poprawnego wczytania przez program, konieczne jest zachowanie usytuowania poszczególnych danych i ich formatów. W wyniku obliczeń program podaje przede wszystkim wartość obciążeń działających na obudowę i obliczony dopuszczalny rozstaw odrzwi. Następnie program, uwzględniając masę pojedynczych odrzwi, wybrany rozstaw oraz cenę jednostkową, oblicza liczbę i koszt odrzwi w dwóch wariantach – wymaganą do zabezpieczenia odcińka wyrobiska o założonej wcześniej długości i dla wyrobiska o długości 100 m.

Jak wcześniej wspomniano program wyposażono w procedury wydruku i zapisu raportu na dysku. Raport taki przedstawiono na rysunku 4.22.



```
test.txt - Notatnik
Plik Edycja Format Widok Pomoc

RAPORT Z DOBORU OBUDOWY

Uproszczone zasady doboru obudowy odrzwiowej wyrobisk korytarzowych
w zakładach wydobywających węgiel kamienny - Instrukcja GIG nr 15

-----
Kopalnia AAA
Wyrobisko Przekop a5
Odcinek nr 3 o długości L = 80 m
Metraż od 1240 do 1320
Obudowa poszerzonego odcinka wyrobiska
-----
Parametry górotworu
H = 850 m
Rcg = 34,2 MPa
Rco = 15,0 MPa
Rsg = 0,60
RQD = 50 %
Nachylenie poprzeczne warstw, alfa = 10
ka = 1,00
Nachylenie wyrobiska, beta = 1
kb = 1,00
-----
Wyrobisko przecina uskok
Wysokość zrzutu uskoku hu = 1 m
Nachylenie pł. uskokowej 90 st
Szer. szcz. uskokowej Ls = 0 m
Zasięg wpływu uskoku Lus = 5 m
Wsp. oddz. uskoku ku = 1,0
-----
Odległość wyrobiska sąsiadującego xs = 20 m
ks = 1,061
-----
Wyrobisko zlokalizowane pod krawędzią
Prowadzono eksploatację z zawalem
Wyrobisko zlokalizowane pod/nad calizną
Odległość od krawędzi w pionie: 5 m
Odległość od krawędzi w poziomie: 20 m
xc = 9,8 m
ke = 1
-----
Spodziewana energia wstrząsu Ew = 5,0 E4
Hmax = 11
Hdyn = 10
qdyn = 0,018 MPa
-----
Wyniki
kg = 1,956
ko = 0,6059
sobl = 9,29 m
qw = 0,042 MPa
qN = 0,0648 MPa
qo = 0,153 MPa
-----
Obudowa ŁP12/4/A
Kształtownik v36
Materiał S480W
Masa odrzwi 492,8 kg
Pole przekroju 21,80 m^2
wn = 0,233 MN/m
wnobl = 0,5544 * 0,233 * 0,8 * 0,8
dmax = 0,54 m
d = 0,50 m
-----
Cena odrzwi 3050 zł/T
160 odrzwi na odcinek
Cena obud.: 240486 zł / odcinek
200 odrzwi na 100 m
Cena obud.: 300608 zł / 100 m
-----
obliczenia wykonał: Inż. ds. obudowy
```

Rys. 4.22. Plik tekstowy raportu doboru obudowy

Opracowany program przeszedł pomyślnie testy w realizowanych pracach badawczych i projektowych (Rotkegel 2016b).

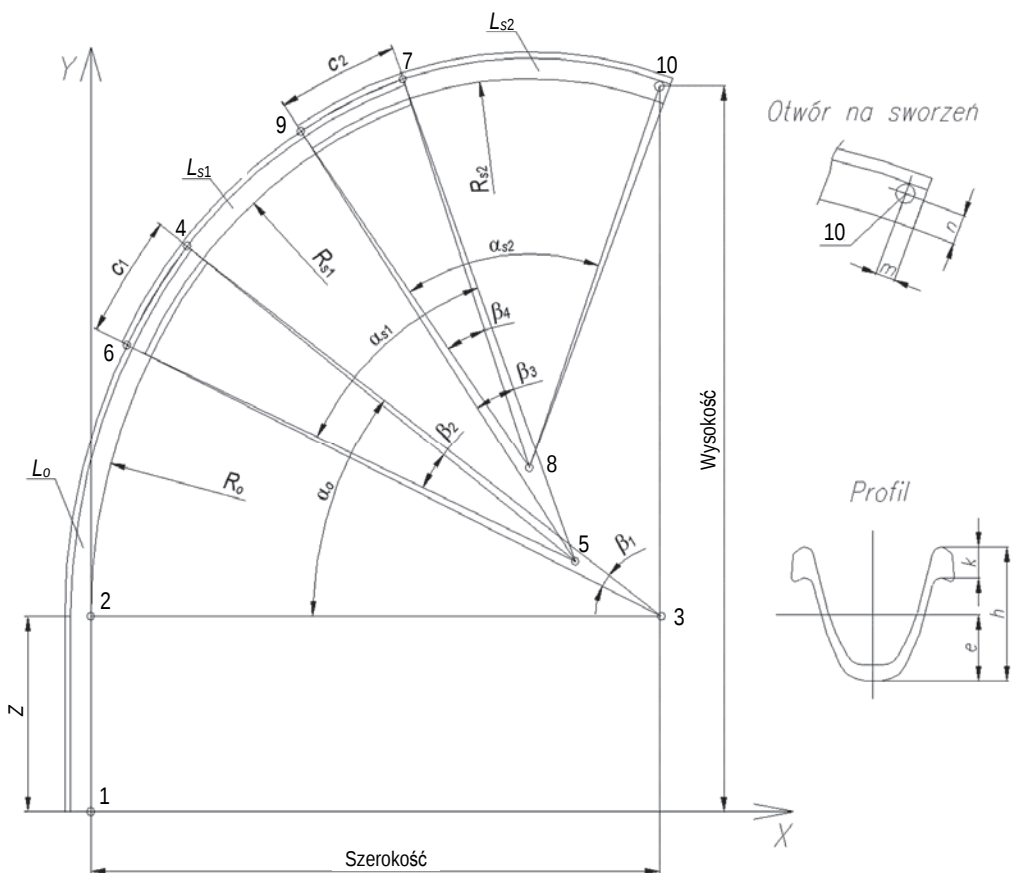
4.3.2. Program ODRZWIA

Istotnym elementem portalowej obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych są odrzwia przejściowe (rys. 4.5), zabudowywane pomiędzy konstrukcją zasadniczą a typową obudową oraz uzupełniające, zabezpieczające wyrobisko w miejscu zabudowy szkieletu, połączone z konstrukcją ramową. Taka konstrukcja obudowy wymaga indywidualnego, czasochłonnego projektowania każdego odrzwia. Z kolei zaprojektowanie lub choćby narysowanie nawet pojedynczych odrzwi w ogólnodostępnym komercyjnym programie CAD, jest procesem uciążliwym, który sprowadza się do wielokrotnego przeliczania długości elementów łukowych i zakładek na ich zakresy kątowe, z uwzględnieniem zastosowanego kształtownika i promienia gięcia łuku. Dodatkowym utrudnieniem jest uwzględnienie połączenia elementów w złączu ciernym i związane z tym złożone zależności geometryczne, a w niektórych przypadkach – zmiana krzywizny łuku na jego długości. Doskonałym narzędziem jest wąsko wyspecjalizowane oprogramowanie – na przykład programy opracowane w latach 90. XX wieku do projektowania odrzwi (Skrzyński, Kowalski, Pacześniowski 1996), a także program ODRZWIA, opracowany przez autora w roku 2002 (Rotkegel 2003b, 2003c, 2004), i rozbudowywany w kolejnych latach (Rotkegel 2009).

Jak uciążliwy jest proces projektowania geometrii odrzwi łukowej obudowy chodnikowej można się przekonać, analizując stosunkowo prostą geometrię odrzwi uzupełniających, przedstawionych na fotografii 4.6. Przykładowe odrzwia składają się najczęściej z elementu ociosowego i dwóch łuków stropnicowych. Element ociosowy charakteryzuje się dwiema krzywiznami – częścią łukową i przyspągowym odcinkiem prostym z – o zerowej krzywiznie. Łuki stropnicowe charakteryzują się najczęściej stałą krzywizną na całej ich długości. Odrzwia łączone są z konstrukcją zasadniczą obudowy odgałęzienia przegubowo z wykorzystaniem połączenia sworzniowego $\varnothing 50$. Model geometryczny takich odrzwi z oznaczeniami symboli przedstawiono na rysunku 4.23.



Fot. 4.6. Odrzwia uzupełniające w konstrukcji obudowy odgałęzienia



Rys. 4.23. Model geometryczny odrzwi uzupełniających: L_o – długość łuku ociosowego, R_o – promień krzywizny łuku ociosowego, c_1 – zakładka łuku ociosowego i stropnicowego 1, c_2 – zakładka łuków stropnicowych, L_{s1} – długość łuku stropnicowego 1, L_{s2} – długość łuku stropnicowego 2, R_{s1} – promień krzywizny łuku stropnicowego 1, R_{s2} – promień krzywizny łuku stropnicowego 2, α_o – kątowny zakres łukowego odcinka łuku ociosowego, α_{s1} – kątowny zakres łuku stropnicowego 1, α_{s2} – kątowny zakres łuku stropnicowego 2, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – kąty zakładek, 1–10 – numery punktów charakterystycznych, e – położenie osi obojętnej przekroju kształownika, h – wysokość przekroju kształownika, k – wysokość kołnierzy kształownika, m, n – położenie osi sworznia względem końca łuku

W układzie współrzędnych przyjętym na rysunku 4.23 można określić współrzędne wszystkich punktów charakterystycznych, dochodząc w końcu do szerokości i wysokości odrzwi w miejscu ich połączenia z konstrukcją zasadniczą. Skrócony model matematyczny odrzwi, w którym uwzględniono prostopadłość do spągu prostego odcinka elementu ociosowego, przedstawiono w postaci wzorów na współrzędne punktu 10 – środka otworu na sworzeń. W przyjętym układzie współrzędnych położenie punktu 10 jest jednocześnie szerokością i wysokością odrzwi w miejscu ich połączenia z konstrukcją zasadniczą. Szerokość odrzwi wynosi zatem:

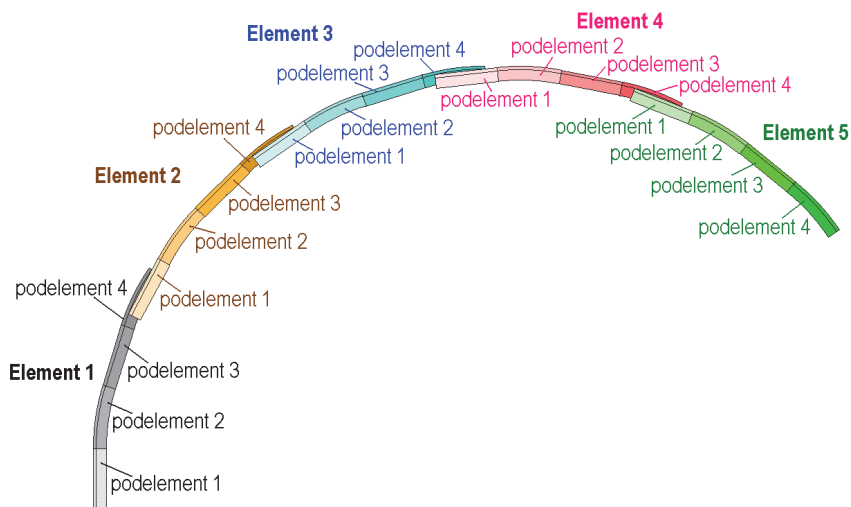
$$\begin{aligned}
x_{10} = & x_1 + R_o - \\
& (R_o + h) \cos \alpha_o + \\
& (R_{s1} + h - k) \cos \left(\alpha_o - \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} \right) - \\
& (R_{s1} + h) \cos \left(\alpha_o - \frac{\beta_1}{2} - \frac{\beta_2}{2} + \alpha_{s1} \right) + \\
& (R_{s2} + h - k) \cos \left(\alpha_o - \frac{\beta_1}{2} - \frac{\beta_2}{2} + \alpha_{s1} - \frac{\beta_3}{2} + \frac{\beta_4}{2} \right) - \\
& (R_{s2} + n) \cos \left(\alpha_o - \frac{\beta_1}{2} - \frac{\beta_2}{2} + \alpha_{s1} - \frac{\beta_3}{2} - \frac{\beta_4}{2} + \alpha_{s2} \right)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

a wysokość odrzwi wyraża się wzorem

$$\begin{aligned}
y_{10} = & y_1 + z + \\
& (R_o + h) \sin \alpha_o - \\
& (R_{s1} + h - k) \sin \left(\alpha_o - \frac{\beta_1}{2} + \frac{\beta_2}{2} \right) + \\
& (R_{s1} + h) \sin \left(\alpha_o - \frac{\beta_1}{2} - \frac{\beta_2}{2} + \alpha_{s1} \right) - \\
& (R_{s2} + h - k) \sin \left(\alpha_o - \frac{\beta_1}{2} - \frac{\beta_2}{2} + \alpha_{s1} - \frac{\beta_3}{2} + \frac{\beta_4}{2} \right) + \\
& (R_{s2} + n) \sin \left(\alpha_o - \frac{\beta_1}{2} - \frac{\beta_2}{2} + \alpha_{s1} - \frac{\beta_3}{2} - \frac{\beta_4}{2} + \alpha_{s2} \right)
\end{aligned} \tag{4.2}$$

(oznaczenia we wzorach (4.1) i (4.2) – patrz oznaczenia pod rys. 4.23).

Wzory matematyczne wyrażające związki między geometrią poszczególnych elementów odrzwi i ich połączeń w zakładce, a geometrią całych odrzwi, są zawile, co w trakcie ich określania dla nowo projektowanych odrzwi może powodować znaczne błędy systematyczne. Ponadto sama budowa modelu matematycznego, a później jego weryfikacja, są bardzo czasochłonne, a w ramach jednej obudowy połączenia wyrobisk może występować wiele wariantów odrzwi. Znaczne uproszczenie tego procesu jest możliwe dzięki zastosowaniu programu ODRZWIA. Podczas opracowywania koncepcji programu, a później jego algorytmu przyjęto, że program będzie prosty w obsłudze, intuicyjny, a wprowadzanie, przeglądanie i edycja danych przejrzyste i jednoznaczne. Jednocześnie program w żadnym stopniu nie może ograniczać działań projektanta, a jego możliwości projektowe powinny być większe niż obecne możliwości produkcyjne wykonawców odrzwi. Spełnienie tych założeń było możliwe pod warunkiem opracowania uniwersalnego, ogólnego modelu odrzwi. Opracowany model, przedstawiony na rysunku 4.24, obejmuje pięć elementów (łuków). Każdy z nich może składać się z maksymalnie czterech odcinków o różnej krzywiźnie (Rotkegel 2009).

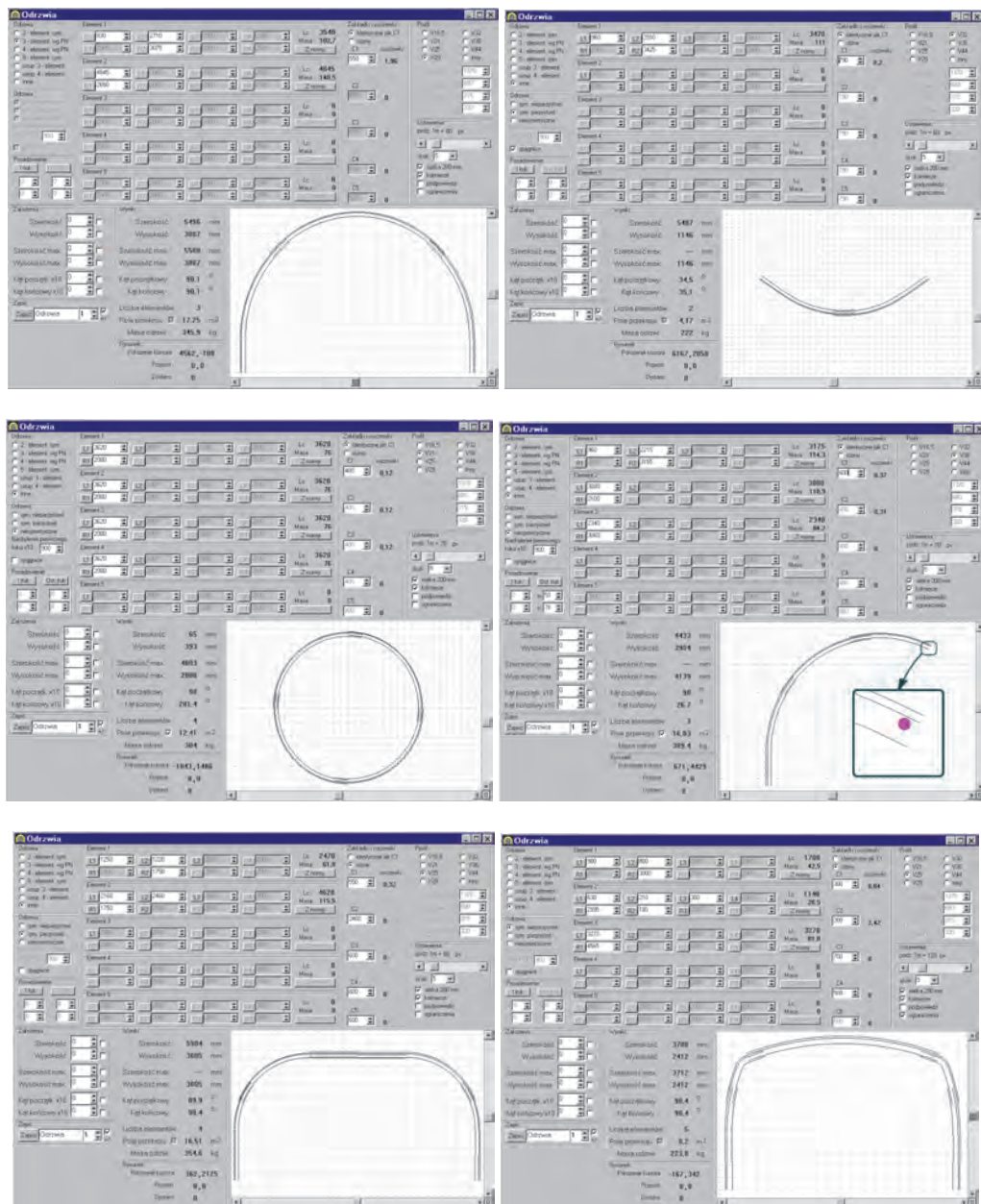


Rys. 4.24. Uniwersalny model odrzwi opracowany dla potrzeb programu ODRZWIA

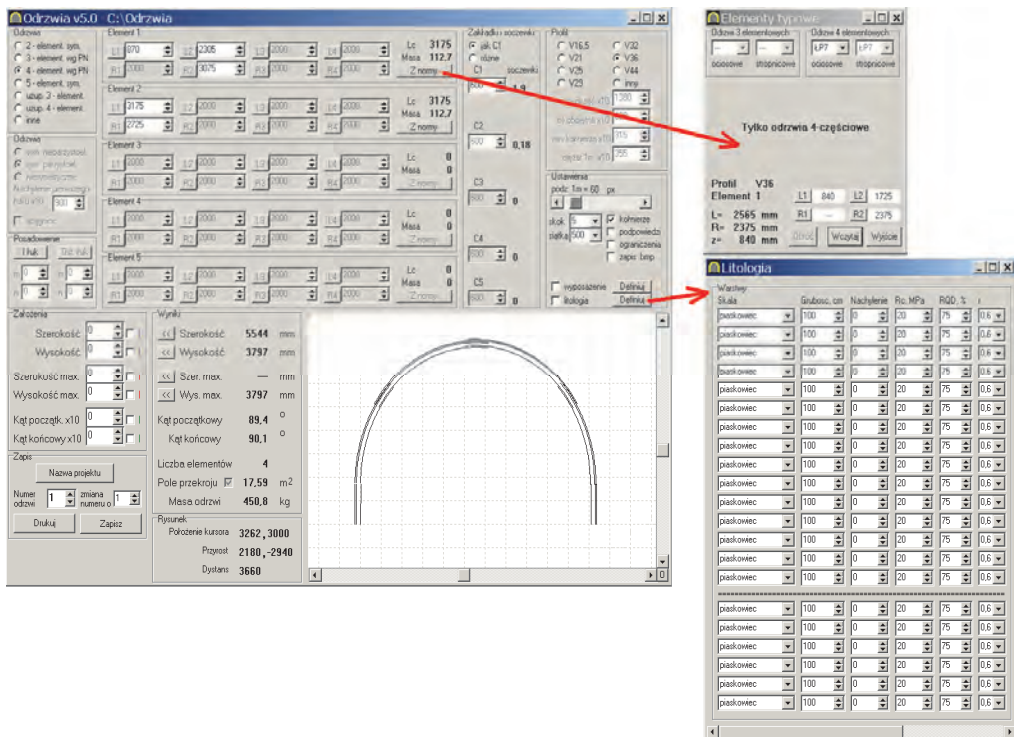
Dzięki uniwersalnemu modelowi program ODRZWIA pozwala na projektowanie praktycznie dowolnych odrzwi. Ograniczeniem jest jedynie wyobraźnia i zdrowy rozsądek projektanta. Mogą to być między innymi odrzwia dwu-, trzy-, cztero-, pięcioczęściowe i inne. Mogą składać się z elementów o jednej stałej krzywiznie lub o wielu krzywiznach (maksymalnie czterech). Uniwersalność programu pozwala na projektowanie odrzwi symetrycznych i niesymetrycznych, a odrzwia symetryczne mogą być parzysto- lub nieparzystoelementowe. Dodatkowo możliwe jest uwzględnianie różnych wariantów posadowienia odrzwi – bezpośrednio na spągu, na stopach podporowych lub przez elementy pośrednie, na przykład wsporniki czy sworznie. Odrzwia mogą być wykonane z każdego z walcowanych w Polsce profili typu V, jak również innego profilu charakteryzującego się podobną budową i sposobem łączenia ze sobą elementów odrzwi, którego parametry użytkownik sam wprowadza. Możliwe jest także projektowanie odrzwi o różnych długościach zakładów w złączach. Na rysunku 4.25 przedstawiono niektóre możliwości projektowe opisywanego programu.

W wyniku prac projektowych uzyskuje się szerokość i wysokość odrzwi względem posadowienia, maksymalną szerokość i maksymalną wysokość oraz kąty między linią spągu a łukami ociosowymi. Dodatkowo program oblicza pole przekroju obudowy w świetle oraz masę poszczególnych łuków i całych odrzwi. Wyniki obliczeń przedstawiane są w postaci liczbowej i graficznej. Graficzna prezentacja wyników obejmuje podgląd zarysu odrzwi w trakcie projektowania, generowanie map bitowych oraz rysunków wektorowych. Uzyskane pliki graficzne wektorowe (w formacie .dxf – *data exchange format*), opisujące pełny zarys odrzwi, a także zarys uproszczony sprowadzony do osi obojętnej przekroju kształtownika, mogą być wykorzystywane jako podkłady w trakcie tworzenia dokumentacji warsztatowej w programach CAD lub jako modele w programach obliczeniowych MES. Program rozbudowano także o moduł planowania rozmieszczenia maszyn i urządzeń w wyrobisku oraz o możliwość wprowadzenia warstw skalnych jako tła dla nowo projektowanych odrzwi. Opracowano także bibliotekę elementów zgodnych z normą PN-G-15000-03, pozwalającą na szybkie kompilacje odrzwi z typowych elementów łukowych. Wprowadzono także możli-

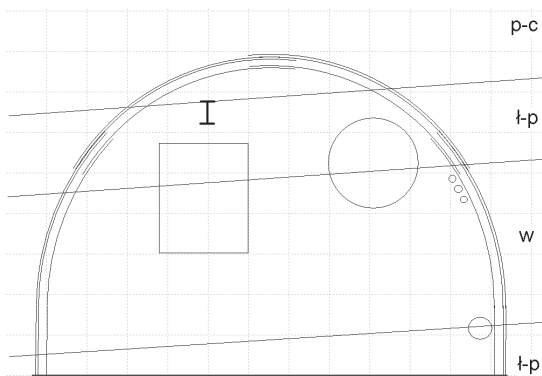
wość dokonywania kontrolnych pomiarów na rysunku projektowanych odrzwi w trakcie ich konstruowania. Podstawowe okno programu wraz z wybranymi oknami uzupełniającymi przedstawiono na rysunku 4.26. Natomiast na rysunku 4.27 przedstawiono rastrowy rysunek odrzwi (mapa bitowa) wygenerowany przez program ODRZWIA, z naniesionym zarysem wybranych urządzeń stanowiących wyposażenie wyrobiska i z warstwami skał, w jakich wyrobisko zostało zlokalizowane.



Rys. 4.25. Przykłady zastosowania programu ODRZWIA



Rys. 4.26. Główne i uzupełniające okna programu w trakcie konstruowania odrzwia ŁP10/V36/4/A



Rys. 4.27. Odrzwia ŁP10/V36/4/A zaprojektowane w programie ODRZWIA z zarysem wybranych urządzeń stanowiących wyposażenie wyrobiska oraz z warstwami skał

Oprócz prezentacji usytuowania wyrobiska względem warstw skalnych program automatycznie oblicza średnie ważone podstawowych parametrów skał występujących w stropie, ociosach i spągu wyrobiska, takie jak: R_c , RQD i rozmakalność. Parametry poszczególnych warstw, jak również zasięg profilu charakterystycznego skał, są wprowadzane i ustalane przez użytkownika. Opcja ta jest szczególnie przydatna przy doborze obudowy do konkretnych warunków geologiczno-górnictwowych (Rotkegel 2009).

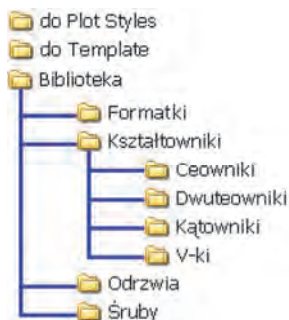
4.3.3. Biblioteka CAD

W projektowaniu portalowej obudowy odgałęzień i skrzyżowań niezastąpione są biblioteki typowych elementów. Oczywiście jest, że w trakcie normalnej pracy z systemami CAD, samoczynnie powstają zbiory danych, które często stanowią pokaźne biblioteki. Jednak dla efektywnego wykorzystywania konieczne jest ich uporządkowanie i wprowadzenie jednolitych zasad ich tworzenia. Właściwe zarządzanie zasobami biblioteki pozwala na znaczne skrócenie czasu projektowania nowej konstrukcji. Uzyskuje się to przez przywoływanie (wczytywanie) powtarzalnych elementów, zamiast rysowania ich za każdym razem od nowa. Biblioteki typowych elementów i symboli nie są niczym nowym w dziedzinie komputerowego wspomaganie projektowania. Prawdopodobnie to właśnie one są podstawą sukcesu systemów CAD. Projektując jakikolwiek wyrób można wykorzystać elementy zaprojektowane wcześniej, opierając się na tradycji i doświadczeniu – zgodnie z teorią projektowania. W projektowaniu komputerowym sprowadza się to bardzo często do adaptacji istniejącej już dokumentacji rysunkowej w całości lub we fragmentach.

Oczywiście jest, że oferta gotowych komercyjnych wersji bibliotek jest bardzo bogata. Część tych bibliotek jest dostępna w sieci (Szewczyk 2002a, 2002b). Nie zawsze jednak tworzą one uporządkowane zbiory, a ponadto istnieje luka w dziedzinie elementów wykorzystywanych przy projektowaniu obudowy wyrobisk korytarzowych. Dlatego też podjęto działania zmierzające do zbudowania takiej biblioteki i ujednolicenia formy dokumentacji rysunkowej tworzonej w GIG-BG, przeznaczonej na platformę AutoCAD (Rotkegel, Skuplik, Bock 2005).

BIBLIOTEKĘ zbudowano w oparciu o gotowe rysunki poszczególnych elementów, stanowiące odrębne pliki, które bez przeszkód mogą zostać wstawione do projektu jako bloki. Dzięki temu importowanie dowolnego elementu sprowadza się zawsze do tej samej instrukcji i wskazania pliku z właściwym rysunkiem. Daje to także możliwość łatwej edycji wstawianych elementów.

Opracowana BIBLIOTEKA składa się z ponad pół tysiąca bloków – rysunków gotowych do wstawienia do aktualnego projektu. Wszystkie elementy są zgodne z podstawowym szablonem rysunku, to znaczy wykorzystują te same warstwy rysunkowe i style poszczególnych elementów, co nie powoduje zbędnego zwiększenia objętości pliku. Elementy biblioteki zebrano w czterech grupach, przy czym grupa KSZTAŁTOWNIKI zawiera cztery podgrupy. W poszczególnych folderach zebrano elementy zbliżone kształtem lub zastosowaniem. I tak w folderze FORMATKI zebrano ramki rysunkowe najczęściej stosowanych formatów, tabliczki rysunkowe i elementy z wykazów części. W katalogu KSZTAŁTOWNIKI zebrano najczęściej wykorzystywane profile opracowane w oparciu o normy i tablice wyrobów hutniczych (Bogucki i Żybertowicz 1996). Są to ceowniki normalne, ekonomiczne, dwuteowniki normalne, szerokostopowe, równoległościennne, kątowniki oraz podstawowe profile na obudowy chodnikowe – kształtowniki korytkowe KS21 i KO21 (wg PN-H-93441-2), jak również kształtowniki typu V (wg PN-H-93441-3). Odrębne grupy stanowią śruby z łbem sześciokątnym i odrzwia ŁP (wg PN-G-15000-02 i PN-G-15000-03; Huta Łabędy 2015). Dodatkowymi folderami są katalogi zawierające szablony wydruku i podstawowego rysunku, wczytywane automatycznie przy uruchomieniu AutoCAD-a. Zawierają one między innymi ujednolicone warstwy rysunkowe, style linii, tekstu i wymiarowania. Na rysunku 4.28 przedstawiono strukturę opracowanej BIBLIOTEKI.



Rys. 4.28. Struktura opracowanej BIBLIOTEKI

Proces importu elementów do rysunku odbywa się za pomocą wczytania odpowiedniego bloku (pliku). Są one pogrupowane w BIBLIOTECE w podkatalogach zgodnie z wyżej przedstawioną konwencją.

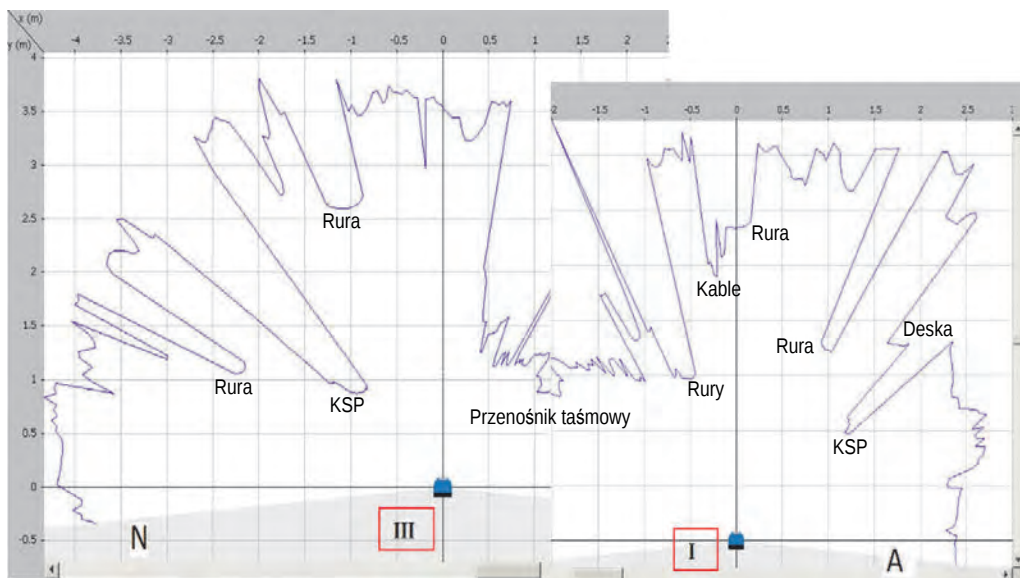
Opracowana biblioteka jest otwartym systemem. W dowolnym momencie może być ona rozbudowana o nowe elementy. Ważne jest przy tym zachowanie przyjętych zasad tworzenia obiektów. BIBLIOTEKA pozwala na zwiększenie efektywności nie tylko samego konstruowania, ale także procesu tworzenia dokumentacji rysunkowej nowo projektowanego wyrobu, a o jej przydatności świadczy wieloletnie użytkowanie oraz ciągła jej rozbudowa o nowe elementy (Rotkegel, Skuplik, Bock 2005).

4.3.4. Skanowanie laserowe

Skanowanie laserowe jest coraz częściej stosowane w przemyśle do określania gabarytów, deformacji i przemieszczeń modernizowanych, przebudowywanych lub diagnozowanych konstrukcji i obiektów technicznych. Dotyczy również przemysłu wydobywczego i podziemnych wyrobisk górniczych, gdzie pomimo często trudnych warunków dla pracy skanera, od kilku lat prowadzi się udane próby skanowania (Rotkegel i in. 2015a, 2015b). Stosowanie skanowania jest także nieodzowne w szczególnych przypadkach projektowania obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych, zwłaszcza gdy konieczne jest nawiązanie do istniejącej obudowy lub w przypadku wzmocnienia istniejącej obudowy.

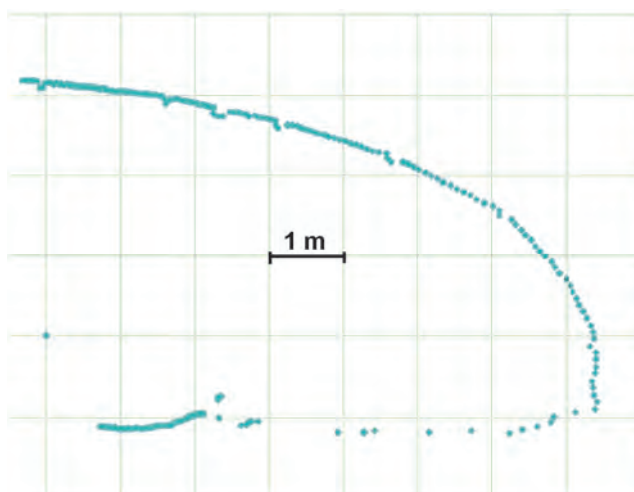
W wielu zagadnieniach pomiarowych i projektowych stosowanie skanera 2D jest wystarczające, a skanowanie tylko wybranych przekrojów upraszcza proces obróbki danych pomiarowych. Przykładem takiego urządzenia może być skaner 2D opracowany w Głównym Instytucie Górnictwa (Szade i in. 2012a, 2012b), którego funkcjonalność potwierdzono w licznych badaniach dołowych.

Ważnym zastosowaniem skanera dwuwymiarowego w podziemiach kopalń jest ocena deformacji obudowy skrzyżowania. W praktyce polega to na profilowaniu wybranych przekrojów w obszarze skrzyżowania, najczęściej w osiach belek projektowanej konstrukcji wzmocniającej. Uzyskane w ten sposób profile można łatwo nanieść na tworzoną dokumentację rysunkową, na przykład w celu precyzyjnego zaprojektowania wzmocnień w przypadku znacznej zmiany geometrii względem wymiarów pierwotnych. Na rysunku 4.29 przedstawiono wynik skanowania 2D rejonu skrzyżowania w płaszczyźnie zabudowy projektowanego portalu, przedstawionego w dalszej części opracowania – w podrozdziale 6.3.2.

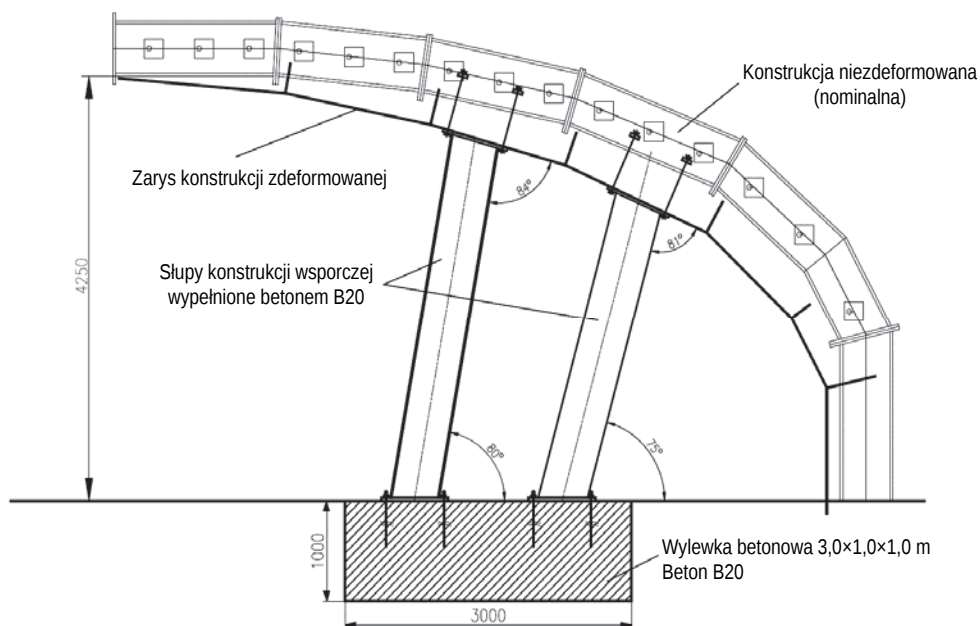


Rys. 4.29. Jeden z przekrojów skrzyżowania

Kolejnym przykładem może być skanowanie prowadzone w celu oceny stopnia deformacji istniejącej obudowy odgałęzienia i zaprojektowania konstrukcji wzmacniającej obudowę zdeformowaną na skutek zwiększenia obciążeń, błędów montażowych czy zastosowania niewłaściwych materiałów (Rotkegel, Szade, Szot 2016). Na rysunku 4.30 przedstawiono profil geometryczny wspornika, będący podstawą do zaprojektowania konstrukcji wsporczej, przedstawionej na rysunku 4.31.



Rys. 4.30. Profil geometryczny wspornika – zarys konstrukcji zdeformowanej



Rys. 4.31. Zaprojektowane wzmocnienie obudowy skrzyżowania

4.4. Materiały i kształtowniki stosowane na obudowę

Jak wcześniej podano portalowa obudowa połączeń wyrobisk korytarzowych składa się z konstrukcji zasadniczej – przestrzennej ramy i odrzwi – uzupełniających i przejściowych. O ile w konstrukcji zasadniczej można zastosować praktycznie dowolny profil, to w przypadku odrzwi zakres stosowanych materiałów i profili jest dość ograniczony. Jako odrzwia w obudowie połączeń wyrobisk stosuje się takie same przekroje i materiały, jak dla obudowy wyrobisk korytarzowych. Są to kształtowniki V, zgodne z PN-H-93441-3, najczęściej w rozmiarze V29, V32 lub V36 walcowane ze stali typowej, zgodne z PN-H-93441-1 lub o podwyższonych parametrach mechanicznych, zgodnych z PN-H-84042. Mimo niewielkiej liczby stosowanych kształtowników (praktycznie V29, V32 i V36), możliwe jest dopasowanie odrzwi do spodziewanych obciążeń. Z uwzględnieniem trzech gatunków stali (zgodnej z PN-H-93441-1, PN-H-84042 i stali o podwyższonych parametrach mechanicznych II generacji) (Rotkegel 2013a) uzyskuje się dziewięć wariantów odrzwi o różnej nośności. Natomiast jako elementy konstrukcji zasadniczej (przestrzennej ramy, szkieletu) stosuje się najczęściej dwuteowniki lub profile zamknięte – skrzynkowe. W przeciętnych warunkach obciążeń ze strony górotworu stosowane są dwuteowniki szerokostopowe HEB, sporadycznie HEM (zgodnie z PN-H-93452), a w trudniejszych warunkach przekroje zamknięte, indywidualnie projektowane. W tabelach 4.1 i 4.2 zestawiono parametry stosowanych profili.

W procesie projektowym należy dążyć do uzyskania rozwiązania optymalnego (Dietrich 1974; Dietrich i in. 1995). W projektowaniu obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych jest to możliwe w przypadku określania jej kształtu i formatu. Niestety przy doborze materiałów w wielu przypadkach należy kierować się ich dostępnością na

Tabela 4.1. Parametry przekrojowe profili na konstrukcję zasadniczą obudowy (gatunek stali 18G2A-S355)

Przekrój	Norma	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>B</i>	<i>W_x</i>	Masa	<i>W_x/m</i>
		cm ²	mm	mm	cm ³	kg/m	cm ³ kg/m
IPN450	PN-H-93407	147	450	170	2040	115	17,73
IPN500	PN-H-93407	179	500	185	2750	141	19,50
2×IPN400	PN-H-93407	236	400	310	2920	185	15,78
HEB450	PN-H-93452	218	450	300	3550	171	20,76
2×IPN450	PN-H-93407	294	450	340	4080	230	17,73
HEB500	PN-H-93452	239	500	300	4290	187	22,94
Przekrój zamknięty skrzynkowy 500×300 (28/16)	rysunek	310	500	300	4680	243	19,21
HEB550	PN-H-93452	254	550	300	4970	199	24,97
2×IPN500	PN-H-93407	358	500	370	5500	282	19,50
HEM550	PN-H-93452	354	572	306	6920	278	24,89
2×IPN550	PN-H-93407	424	550	400	7220	332	21,74
Przekrój zamknięty skrzynkowy 550×400 (30/20)	rysunek	436	550	400	7332	342	21,43

Tabela 4.2. Parametry przekrojowe profili na odrzwia

Profil	<i>A</i> cm ²	<i>H</i> mm	<i>B</i> mm	<i>W_x</i> cm ³	<i>W_y</i> cm ³	Masa kg/m	Gatunki stali
V29	36,31	124	150	87,60	100,80	28,5	
V32	40,89	137	171	121,45	137,31	32,1	
V36	45,16	138	171	127,64	143,74	35,5	
							25G2, 34GJ, 31Mn4 ($R_e \geq 340$ MPa, $R_m \geq 550$ MPa) G480V, S480W ($R_e \geq 480$ MPa, $R_m \geq 650$ MPa) S550W ($R_e \geq 550$ MPa, $R_m \geq 730$ MPa)

Objaśnienie symboli: *A* – pole przekroju poprzecznego kształtownika, *H* – wysokość przekroju kształtownika, *B* – szerokość przekroju kształtownika, *W_x*, *W_y* – wskaźniki wytrzymałości na zginanie sprężyste, *R_e* – granica plastyczności, *R_m* – wytrzymałość na rozciąganie.

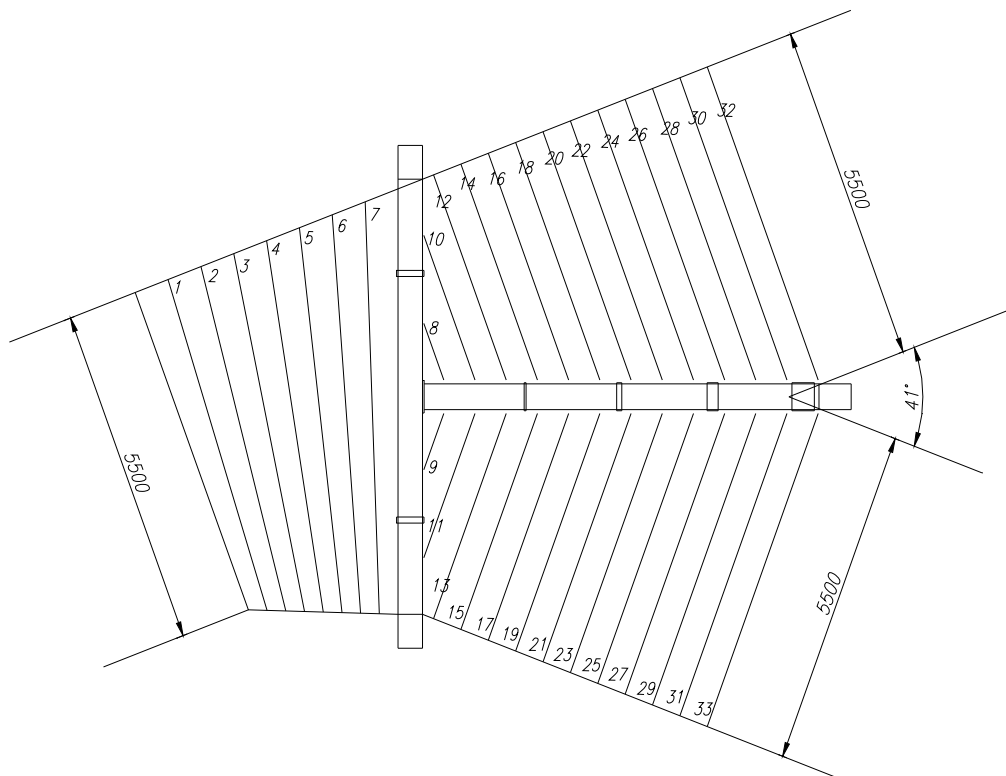
rynku – możliwością ich zakupu w krótkim czasie. Dysponując skończoną liczbą kształtowników walcowanych z pewnych gatunków stali, można wybrać rozwiązanie optymalne, przy czym jednym z ważniejszych kryteriów optymalizacji jest chwilowa dostępność profilu na rynku. Analizę wpływu przekroju i gatunku materiału na stan wyężenia konstrukcji przeprowadzono dla obudowy odgaęzienia wyrobisk korytarzowych (Rotkegel 2005). W analizowanym przypadku obudowy odgaęzienia dostępnymi kształtownikami były:

- dwuteownik normalny I500, zgodny z PN-H-93407 ze stali St3S,
- dwuteownik normalny I450, zgodny z PN-H-93407 ze stali 18G2A,
- dwuteownik normalny I500, zgodny z PN-H-93407 ze stali St44,
- dwuteownik równoleęścienny IPE550, zgodny z PN-H-93419 ze stali 18G2A.

Z uwagi na rozmiary i cenę obiektu (przedmiotu analizy) przeprowadzenie laboratoryjnych badań wytrzymałościowych nie jest możliwe. W związku z tym jedynym sposobem przeprowadzenia takich prób są badania modelowe, na przykład z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Dla przeprowadzenia badań konieczne było zbudowanie pięciu modeli o analogicznej budowie, identycznym schemacie podparcia i obciążenia. Różniły się one prze-

krojami belek konstrukcji zasadniczej oraz parametrami materiałowymi. Modele gabarytami odpowiadały jednostronnemu połączeniu pod kątem 41° dwóch wyrobisk korytarzowych o formatach odpowiadających obudowie ŁP10. Zarys tego odgałęzienia przedstawiono na rysunku 4.32.



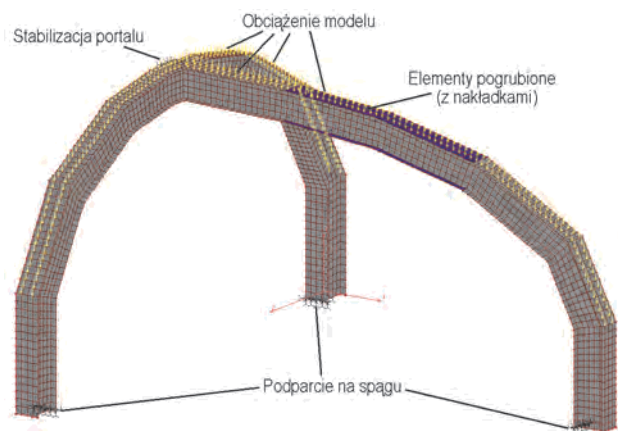
Rys. 4.32. Połączenie wyrobisk z naniesionym zarysem projektowanej obudowy, szerokością wyrobisk i numeracją drzwi

Dla zwiększenia przejrzystości modele oznaczono literami A–E. Na każdy model złożyły się 4022 czterowęzłowe elementy powłokowe typu SHELL opisane na 4006 węzłach. Elementy, w zależności od modelu, zebrano w dwóch lub trzech grupach. Pierwsza grupa obejmowała elementy modelujące półki dwuteowników, druga środniki, natomiast w trzeciej grupie zebrano elementy symulujące półki wzmocnione nakładkami. W zależności od przyjętego dwuteownika elementom każdej z grup nadano odpowiednie grubości. W tabeli 4.3 zestawiono parametry modeli (Rotkegel 2005). Każdy z modeli obciążano siłami równomiernie rozłożonymi na długości każdej z belek. Wartość sił dobierano tak, aby odpowiadała obciążeniom konstrukcji przez górotwór, wyznaczonym w oparciu o „Uprozczone zasady doboru obudowy odrzwiowej...” (Rułka i in. 2001). Uwzględniono przy tym fakt, że część tego obciążenia przenoszą odrzwia uzupełniające bezpośrednio na spąg. Na rysunku 4.33 przedstawiono kompletny przykładowy model z zaznaczonym sposobem podparcia i obciążenia oraz wzmocnionymi elementami.

Tabela 4.3. Podstawowe parametry analizowanych modeli

Oznaczenie modelu	Oznaczenie przekroju belki	Gatunek materiału	Przekroje	$h \times b$ mm	W_x cm ³	Grubość elementów w grupie		
						I (półki)	II (środniki)	III (półki wzmocnione)
A	2×I500	18G2A		500×370	5500	27,0	18,0	nie występują
B	2×I500	St3S		500×370	5500	27,0	18,0	nie występują
				532×370	8125	27,0	18,0	43,0
C	2×I450	18G2A		450×340	4080	24,3	16,2	nie występują
				482×340	6250	24,3	16,2	40,0
D	2×I500	St44		500×370	5500	27,0	18,0	nie występują
				532×370	8125	27,0	18,0	43,0
E	2×IPE550	18G2A		550×420	4880	17,2	11,0	nie występują
				585×420	8745	17,2	11,0	35,0

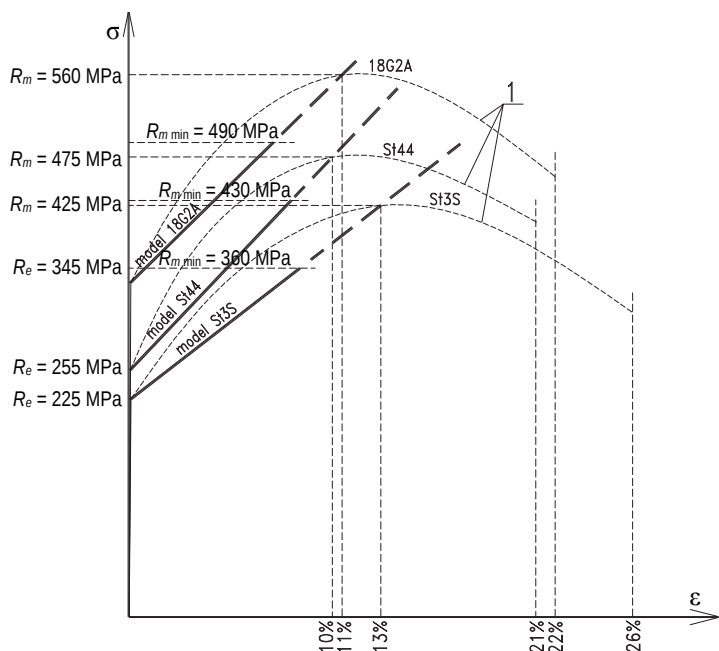
Objaśnienie symboli: h – wysokość przekroju, b – szerokość przekroju, W_x – wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie.



Rys. 4.33. Geometryczne modele zbudowane do analiz

Przyjęto modele materiałów z uwzględnieniem dostępnych kształtowników i gatunków stali. Krzywe materiałowe we wszystkich przypadkach przybliżono biliniowymi

charakterystykami opisującymi model ciała sprężysto-plastycznego z umocnieniem liniowym (Bąk i Burczyński 2013). Na rysunku 4.34 przedstawiono charakterystyki materiałowe przyjęte w analizach, odpowiadające gatunkom stali St3S, St44 i 18G2A. Przedstawiono także minimalne wartości wytrzymałości na rozciąganie ($R_{m \min}$) i orientacyjne wykresy rozciągania każdego z materiałów.

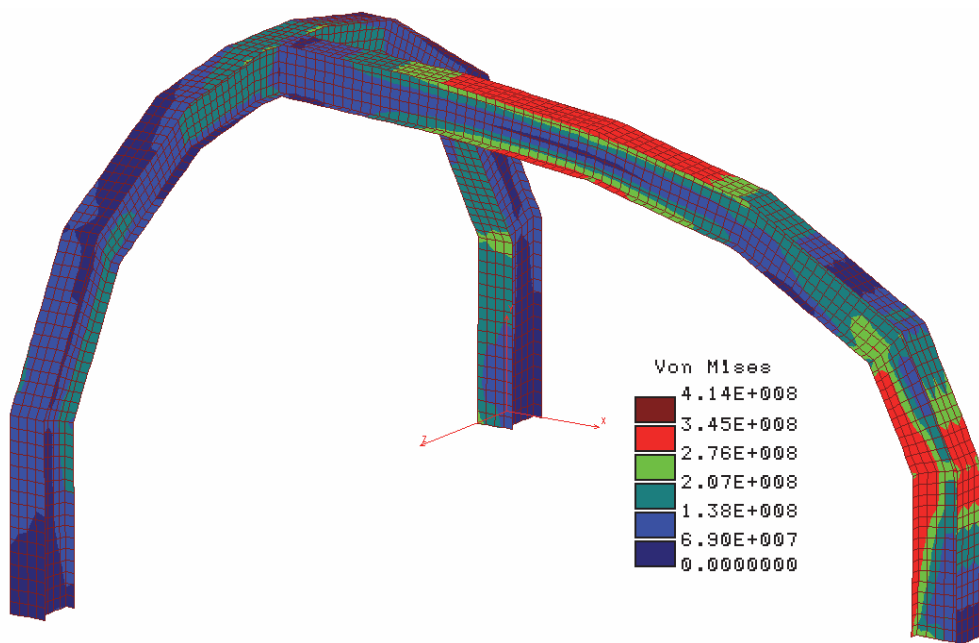


Rys. 4.34. Modele stali przyjęte do analiz: σ – naprężenia zredukowane, ϵ – odkształcenia, R_m – wytrzymałość na rozciąganie, $R_{m \min}$ – minimalna wytrzymałość na rozciąganie, $R_{m \max}$ – maksymalna wytrzymałość na rozciąganie, R_e – granica plastyczności

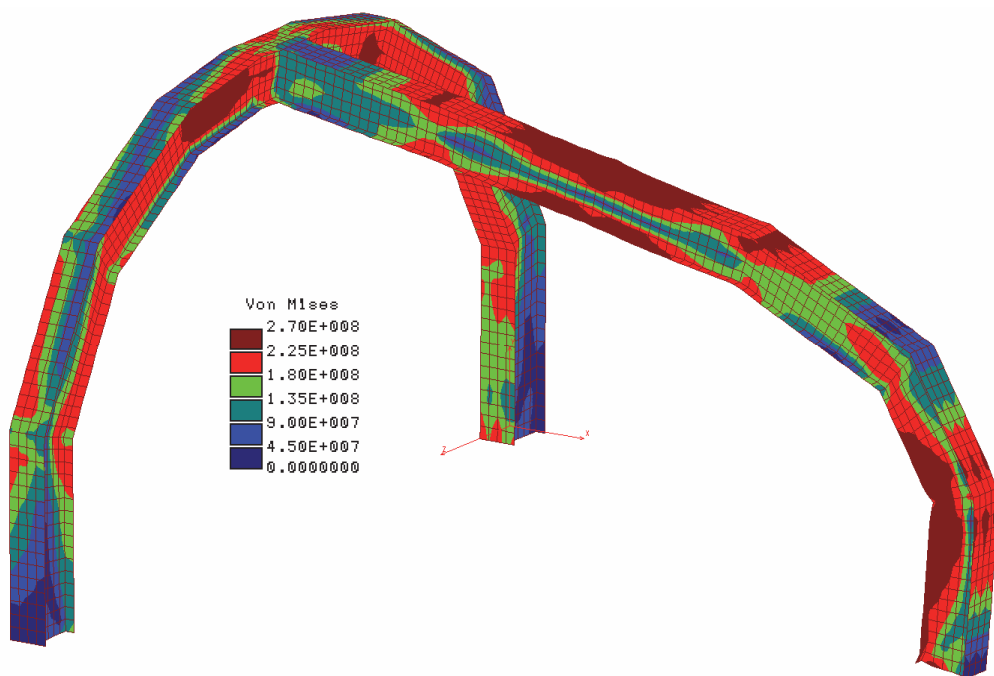
Analiza była wieloetapowa. Pierwszym etapem było określenie stanu wyężenia konstrukcji zbudowanej z połączonych ze sobą dwóch dwuteowników normalnych I500 ze stali 18G2A (S355). Na rysunku 4.35 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych w konstrukcji zasadniczej obudowy odgaęlenia bez dodatkowych wzmocnień lecz z dodatkowym podparciem portalu.

W żadnym miejscu modelu (rys. 4.35) naprężenia nie przekroczyły granicy plastyczności materiału ($R_{e \ 18G2A} = 345$ MPa). Przeprowadzona symulacja potwierdziła więc możliwość bezpiecznego stosowania modelowanej konstrukcji w zaplanowanym miejscu zabudowy. Jednak z uwagi na problemy zaopatrzeniowe konieczne było zastosowanie profili alternatywnych.

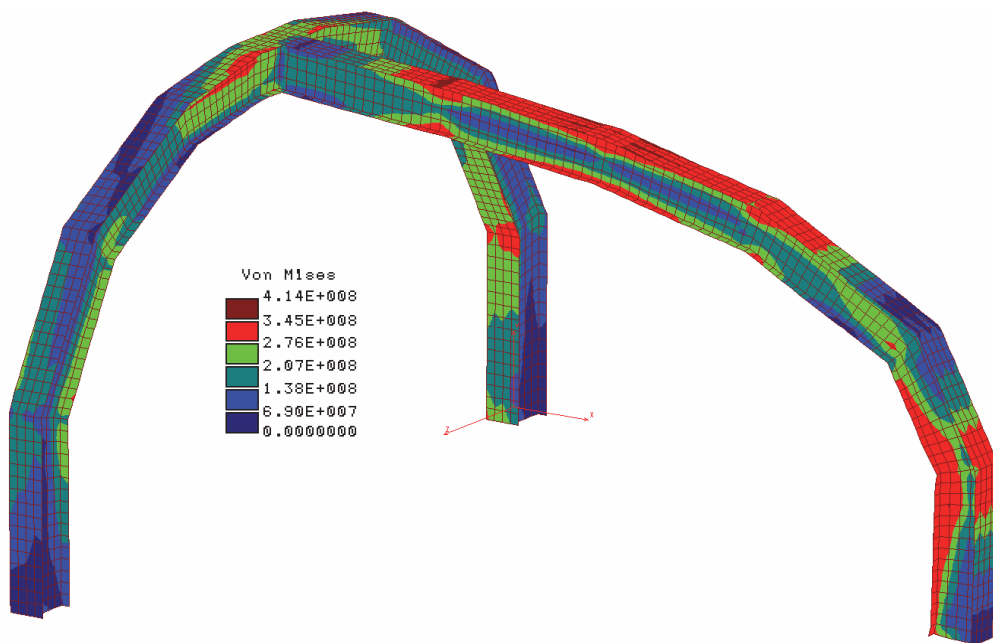
W kolejnych etapach w podobny sposób analizowano pozostałe modele, oznaczone B–E. Na rysunkach 4.36–4.39 przedstawiono stan wyężenia i deformacji analizowanych modeli. Mimo że badania przeprowadzono dla wszystkich wariantów konstrukcji, przedstawiono jedynie modele ze wzmocnionymi półkami i z portalem dodatkowo stabilizowanym. Na wszystkich rysunkach skalę naprężeń dobrano tak, aby szósty kolor, odpowiadający najwyższym naprężeniom, był przypisany elementom uplastycznionym – w których przekroczona została granica plastyczności.



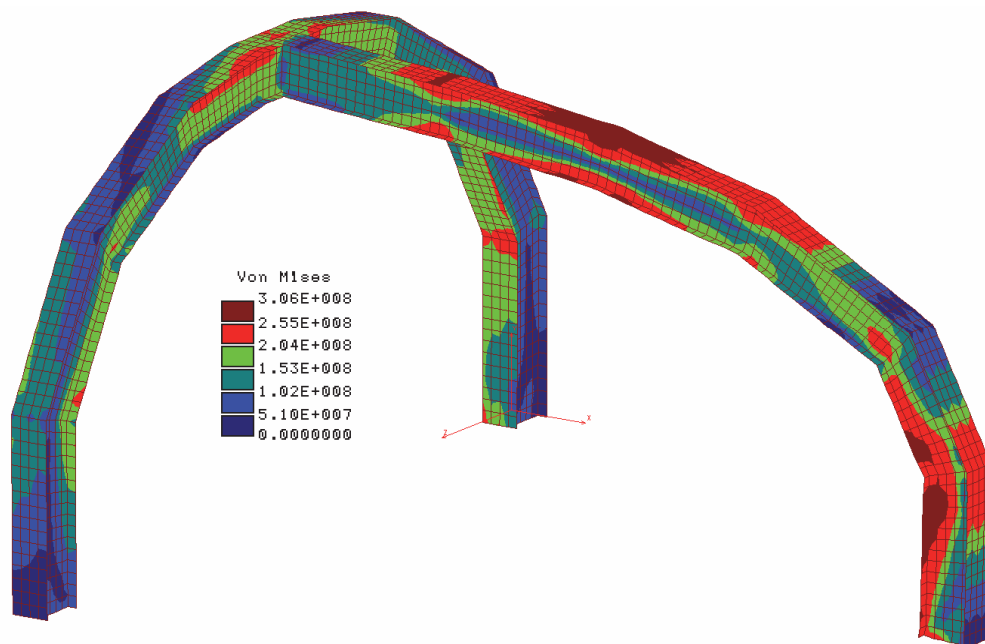
Rys. 4.35. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu A – konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego I500 (podwójnego) ze stali 18G2A (S355) (naprężenia w Pa)



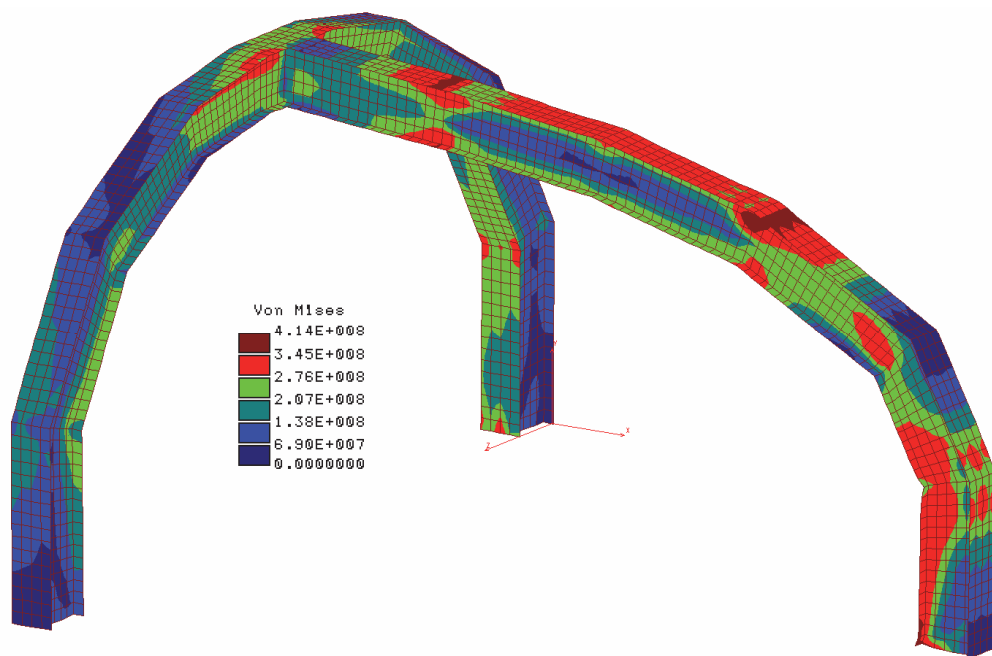
Rys. 4.36. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu B – konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego I500 (podwójnego) ze stali St3S z dwoma wzmocnionymi belkami wspornika oraz zastabilizowanym portalem (naprężenia w Pa, skala deformacji 2×)



Rys. 4.37. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu C – konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego I450 (podwójnego) ze stali 18G2A z dwoma wzmocnionymi belkami wspornika oraz zastabilizowanym portalem (naprężenia w Pa, skala deformacji 2×)



Rys. 4.38. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu D – konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego I500 (podwójnego) ze stali St44 z dwoma wzmocnionymi belkami wspornika oraz zastabilizowanym portalem (naprężenia w Pa, skala deformacji 2×)



Rys. 4.39. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu E – konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego IPE550 (podwójnego) ze stali 18G2A z dwoma wzmocnionymi belkami wspornika oraz zastabilizowanym portalem (naprężenia w Pa, skala deformacji 2×)

Przedstawione mapy naprężeń (rys. 4.35–4.39) pokazują, że w przypadku zastosowania dwuteowników ze stali St3S i St44 (modele odpowiednio B i D), pomimo wzmocnienia belek wspornika i zastabilizowania portalu, w konstrukcji występują znaczne obszary uplastycznione. Jedynie w modelach C i D, wykonanych ze stali 18G2A, stan wyężenia jest akceptowalny, zwłaszcza w przypadku niewielkiego rozszerzenia zasięgu wzmocnień.

Jak widać rodzaj zastosowanego przekroju i gatunku stali istotnie wpływa na stan wyężenia konstrukcji. W warunkach występujących obecnie obciążeń obudowy nie może być mowy o stosowaniu stali o niskich parametrach mechanicznych, na przykład St3S. Większość zamodelowanych konstrukcji, dla właściwej pracy, wymaga pełnej stabilizacji portalu. Jej brak prowadzi do dużej deformacji wspornika na skutek uplastycznienia znacznych części przekroju drugiej i trzeciej belki. W analizowanym przypadku obudowy odgałęzienia jako stabilizację zastosowano układ dwóch długich kotwi. Reasumując, do konstrukcji obudowy odgałęzień narażonych na znaczne obciążenia, jak w prezentowanym przypadku, nie jest przydatna stal węglowa zwykłej jakości. Ewentualne jej zastosowanie stanowi dodatkowe wzmocnienie prawie całej konstrukcji, ale wiąże się ze znacznymi kosztami i czyni to rozwiązanie nieekonomicznym, a ponadto nie zawsze daje zadowalającą poprawę stanu wyężenia konstrukcji (Rotkegel 2005).

W przypadku zastosowania „wytrzymałych” przekrojów (profil + materiał) możliwe jest ich dodatkowe skuteczne wzmocnienie przy niewielkim nakładzie kosztów. Uzyskuje się wtedy konstrukcję, która jest w stanie przeciwstawić się działającym obciążeniom. Przykładem może być nieco zmodyfikowany model, oznaczony literą E.

4.5. Maksymalne wykorzystywanie parametrów podpornościowych obudowy portalowej

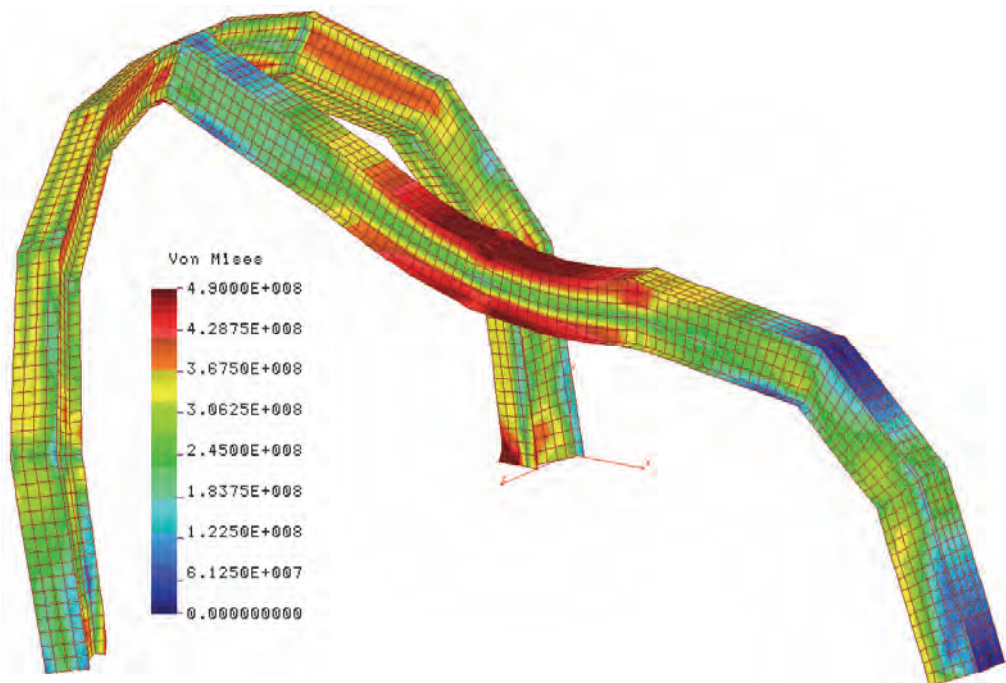
Spełnianie przez obudowę wyrobisk korytarzowych podstawowej roli – jaką jest ochrona wyrobiska przed oddziaływaniem górotworu – wymaga jej właściwej zabudowy, zgodnej z założeniami projektowymi. Pozwala to na pełne wykorzystanie wytrzymałości elementów, przez co obudowa staje się tańsza, a zabezpieczenie wyrobiska efektywniejsze. W każdym przypadku sprowadza się to do zapewnienia obudowie maksymalnego „komfortu pracy”, czyli między innymi właściwego podparcia oraz obciążenia odrzwi. W przypadku typowej obudowy łukowej ważne jest zapewnienie jej pełnego kontaktu z otaczającym górotworem i zapewnienie właściwej stabilizacji odrzwi. Natomiast w przypadku obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych, spełnienie tego wymogu jest warunkiem koniecznym, lecz niewystarczającym dla jej właściwej pracy (Rotkegel, Bock, Witek 2010).

4.5.1. Stabilizacja portalu i pełny odpór ociosów

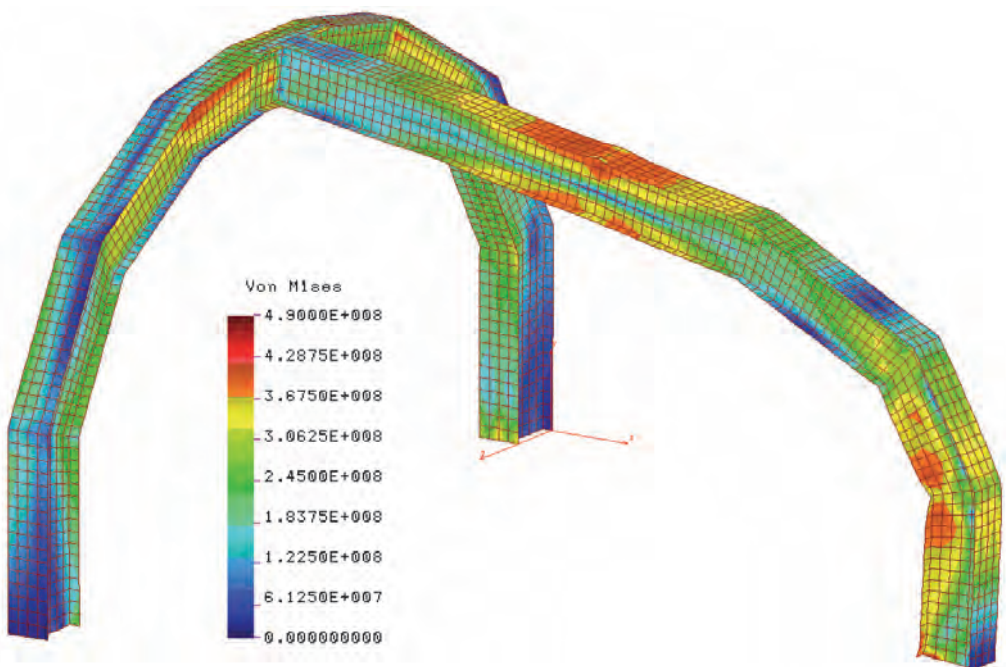
Uzyskiwane w trakcie analiz wytrzymałościowych zdeformowane postacie konstrukcji i rozkłady naprężeń, w większości przypadków wskazują na konieczność wprowadzenia dodatkowych podpór stabilizujących portal w płaszczyźnie zabudowy. Przykład stanu wyężenia i deformacji konstrukcji podpartej jedynie na spodku wyrobiska przedstawiono na rysunku 4.40. W prezentowanym przykładzie maksymalne naprężenia znacznie przekraczają minimalną granicę wytrzymałości $R_{m\min}$, osiągając wartość 522,8 MPa i są zlokalizowane w połowie rozpiętości wspornika. Tak duża wartość naprężeń musi skutkować uszkodzeniem konstrukcji. Ponadto wyraźnie widać oddziaływanie wspornika na portal, powodujące jego znaczne przemieszczenia. Powstałe deformacje modelu grożą utratą stateczności całej konstrukcji. W związku z tym konieczne jest zaprojektowanie, uwzględnienie w obliczeniach, a później w zabudowie, środków pozwalających na zmniejszenie opisanych wyżej skutków.

Dla poprawy stanu wyężenia i ograniczenia deformacji konstrukcji założono podparcie portalu i segmentów upodatniających o ociosy tak, aby uniemożliwić zwiększenie ich rozpiętości. Ponadto zablokowano przemieszczenia portalu w części przystropowej. Zastosowany schemat podparcia i rozparcia modelu wpływa na znaczne zmniejszenie wyężenia i deformacji modelu, co w identycznej skali jak wcześniej, przedstawiono na rysunku 4.41. Maksymalne naprężenia występowały, jak poprzednio, w połowie rozpiętości wspornika, jednak ich wartość została znacznie zredukowana do 429,1 MPa. Natomiast deformacje modelu były niezauważalne.

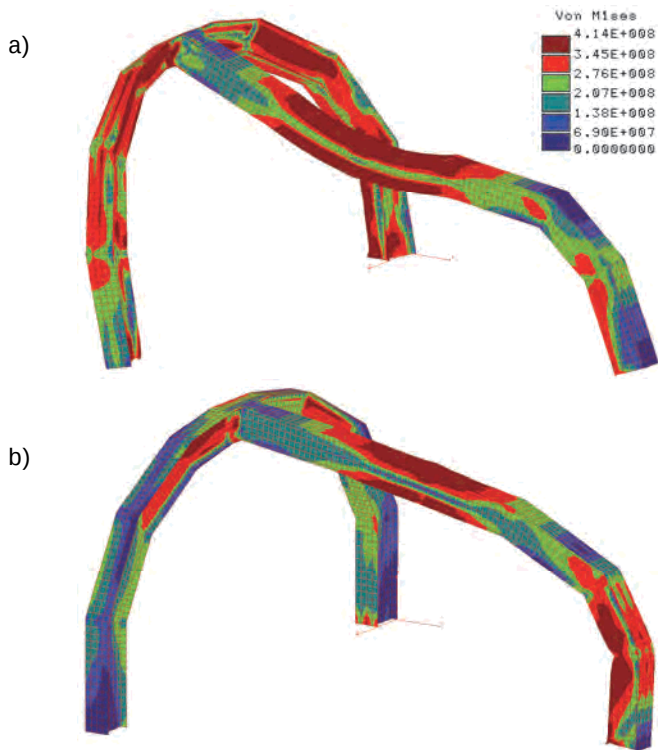
Jak widać wprowadzenie dodatkowego podparcia obudowy, powoduje zmniejszenie deformacji i poprawę stanu wyężenia konstrukcji. Daje to zmniejszenie wartości naprężeń zredukowanych i ograniczenie stref uplastycznienia materiału, w których $\sigma_{red} > 345$ MPa. Na rysunku 4.42 bordowym kolorem zaznaczono zasięg stref uplastycznienia w obu modelach – bez dodatkowego podparcia i z dodatkowym podparciem stabilizującym portal. Należy jednak zaznaczyć, że mimo znacznego zmniejszenia wyężenia konstrukcji po podparciu portalu, wartości naprężeń w prezentowanym przykładzie w dalszym ciągu są wysokie, a przez to najbardziej wyężone miejsca konstrukcji wymagają wzmocnień.



Rys. 4.40. Rozkład naprężeń i zdeformowana postać modelu (naprężenia w Pa, zakres naprężeń $0-R_{m \min}$, skala deformacji $1\times$)



Rys. 4.41. Rozkład naprężeń i zdeformowana postać modelu z dodatkowo podpartym portalem (naprężenia w Pa, zakres naprężeń $0-R_{m \min}$, skala deformacji $1\times$)



Rys. 4.42. Porównanie uplastycznionych stref konstrukcji wyjściowej (a) i z dodatkowym podparciem portalu (b)

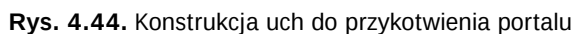
Kluczowym zagadnieniem w procesie projektowania połączeń wyrobisk korytarzowych jest przeniesienie założeń przyjętych w analizach modelowych do konkretnego zastosowania, z uwzględnieniem warunków geologiczno-górnictwowych i możliwości technicznych. W większości przypadków obudowy odgałęzień chodzi głównie o realizację właściwego podparcia portalu. W związku z tym istotnymi wynikami obliczeń są reakcje podporowe. Ich wartości wskazują możliwe do zastosowania sposoby stabilizacji konstrukcji. W każdym przypadku siły stabilizujące portal (reakcje dodatkowych podpór) muszą być przeniesione na dalsze odcinki obudowy za pomocą rozpór lub na górotwór przez przykotwienie portalu. Ważne jest wtedy sprawdzenie, czy spełniony jest warunek wyrażony następującym wzorem

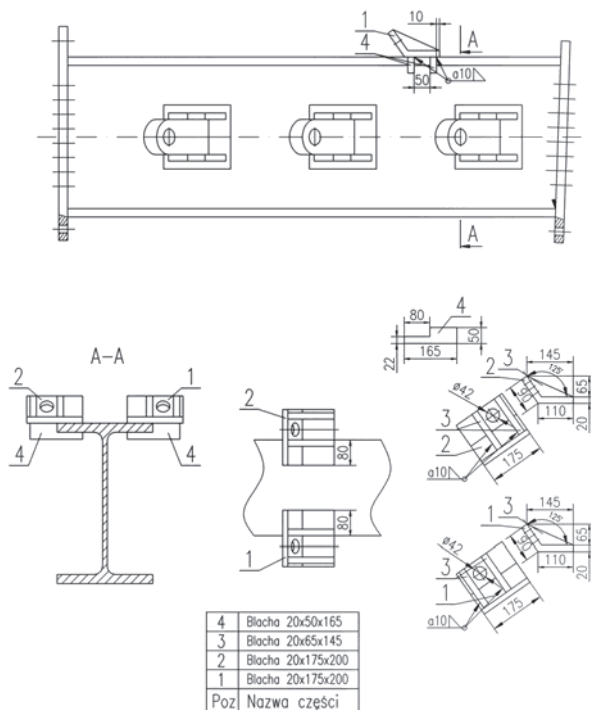
$$\sum R_{\text{stab}} \leq n_r N_{r, \text{rozpór}} + n_c N_{c, \text{rozpór}} + m N_{\text{kotwi}}, \text{ kN} \quad (4.3)$$

gdzie:

- R_{stab} – reakcje podporowe stabilizujące portal, kN;
- n_r – liczba rozpór rozciąganych stabilizujących portal;
- n_c – liczba rozpór ściskanych stabilizujących portal;
- $N_{r, \text{rozpór}}$ – siła rozciągająca przenoszona przez rozpórę, kN;
- $N_{c, \text{rozpór}}$ – siła ściskająca przenoszona przez rozpórę, kN;
- m – liczba kotwi stabilizujących portal;
- N_{kotwi} – nośność kotwi, kN.

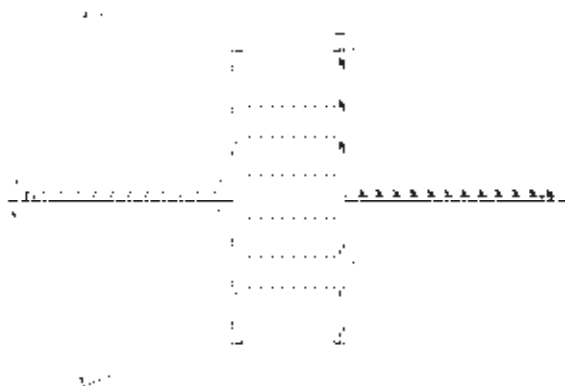
Zastosowanie schematu kotwienia przedstawionego powyżej wymaga zaprojektowania odpowiednich uch, pozwalających na prawidłową pracę zabudowanych ukośnie kotwi. Ucha takie zaprojektowano oddzielnie dla portalu i wspornika. Charakteryzują się one skośnym usytuowaniem osi otworów na kotwie. Na rysunku 4.44 przedstawiono możliwą do zastosowania konstrukcję ucha przyspawanego do portalu, natomiast na rysunku 4.45 – ucha przyspawanego do belek wspornikowych.





Rys. 4.45. Konstrukcja uch do przykotwienia wspornika

Idea stabilizującego przykotwienia konstrukcji zasadniczej została szerzej opisana w pracach Rotkegela, Daniłowicza i Stałęgi (Daniłowicz, Rotkegel, Stałęga 2006; Rotkegel i Daniłowicz 2007). Innym rozwiązaniem, poprawiającym stabilizację konstrukcji zasadniczej obudowy odgałęzienia, jest oparcie portalu o podciąg montowany na odrzwiach przejściowych lub w przypadku podwójnego odgałęzienia wzajemne oparcie portalu przez proste odcinki kształtowników V, jak to pokazano na rysunku 4.46 i fotografii 4.7.

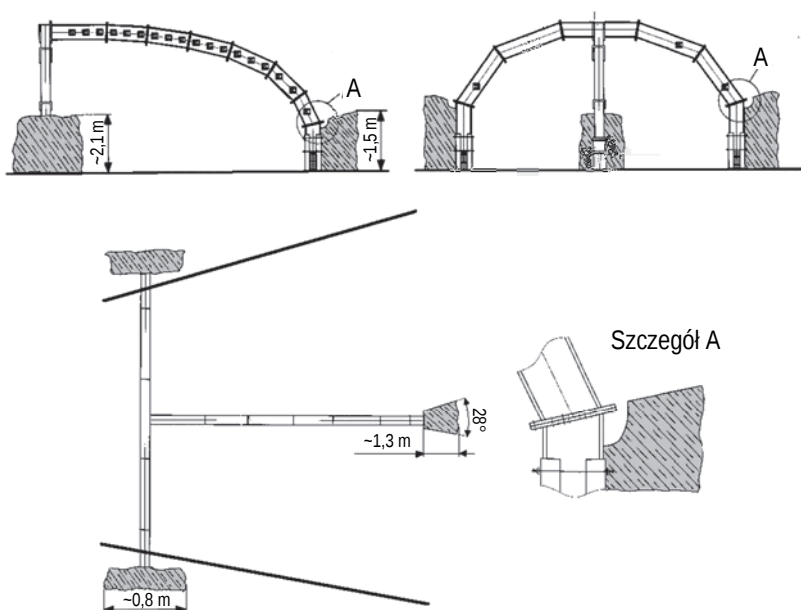


Rys. 4.46. Podwójna obudowa portalowa z elementami rozporowymi zabudowanymi między portalami (kopalnia „Chwałowice”)



Fot. 4.7. Połączenie elementu rozporowego z portalem

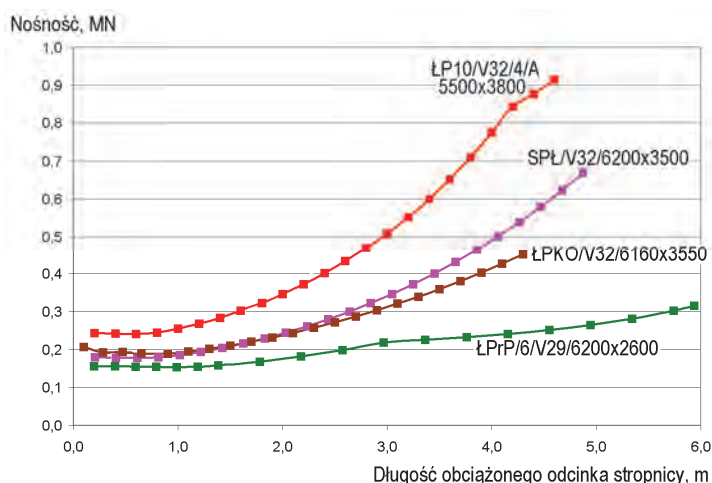
Istotne są także założenia przyjęte w procesie obliczeniowym, dotyczące rozparcia modelu konstrukcji o ociosy. Dla spełnienia tych założeń konieczne jest zastosowanie środków pozwalających na natychmiastowe oddziaływanie ociosów uniemożliwiających zwiększenie rozpiętości konstrukcji. Najprostszym i najskuteczniejszym sposobem zapewnienia pełnego kontaktu segmentów upodatniających z ociosami, jest ich obetonowanie. Należy przy tym pozostawić wolne przestrzenie pod blachami czołowymi tak, aby możliwe było zmniejszenie wysokości i właściwa praca upodatnień. Ponadto nie można dopuścić do zabetonowania wewnętrznych przestrzeni segmentów (nad stosem drewna). Na rysunku 4.47 przedstawiono sposób obetonowania segmentów upodatniających, pozwalający na spełnienie założeń przyjętych w modelowaniu.



Rys. 4.47. Schemat zewnętrznego obetonowania portalu i wspornika

Przedstawione sposoby stabilizacji konstrukcji i jej rozparcia, pozwalają w praktyce na uzyskanie schematu podparcia przyjętego w badaniach modelowych. Jak wykazały przedstawione wcześniej analizy modelowe, takie rozwiązanie znacznie zmniejsza wyężenie i odkształcenie portalowej obudowy odgałęzień.

Równie ważnym zagadnieniem jest odpowiednia, optymalna zabudowa odrzwi i opinki (Rotkegel 2014). Kluczowe jest zapewnienie pełnego kontaktu odrzwi z górtworem. Brak rozparcia odrzwi w górtworze skutkuje znacznie niższą ich nośnością, a przez to skutecznością całej obudowy. Wpływ sposobu zabudowy odrzwi na ich nośność był przedmiotem wielu analiz i opracowań (Konopa 1983; Konopa i Sawka 1987; Gajko, Rotkegel, Saługa 2002). Badania autora (Rotkegel 2012a) wykazały, że w przypadku niektórych odrzwi, wraz ze skracaniem obciążanego odcinka stropnicy, nośność odrzwi może spaść nawet do poziomu 25% nośności uzyskiwanej w warunkach równomiernego obciążenia. Na rysunku 4.48 przedstawiono nośność odrzwi w zależności od długości obciążanego odcinka stropnicy dla wybranych, analizowanych typów i rozmiarów odrzwi.

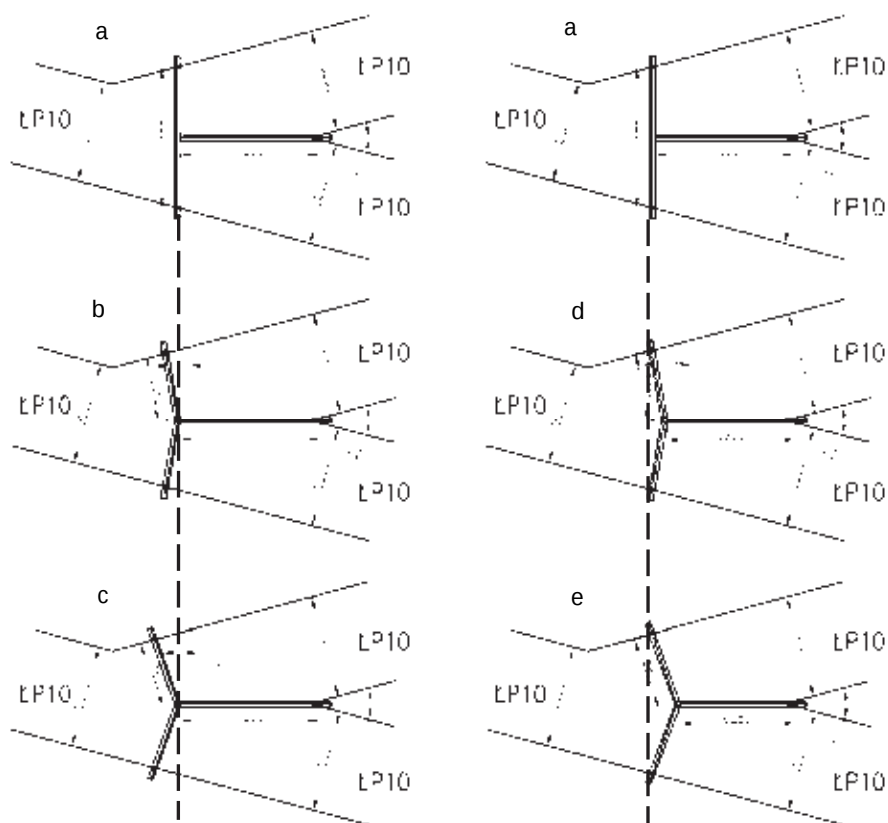


Rys. 4.48. Nośność odrzwi w zależności od długości stropnicy, na jakiej działa obciążenie (Rotkegel 2012a)

4.5.2. Modyfikacja kształtu portalu

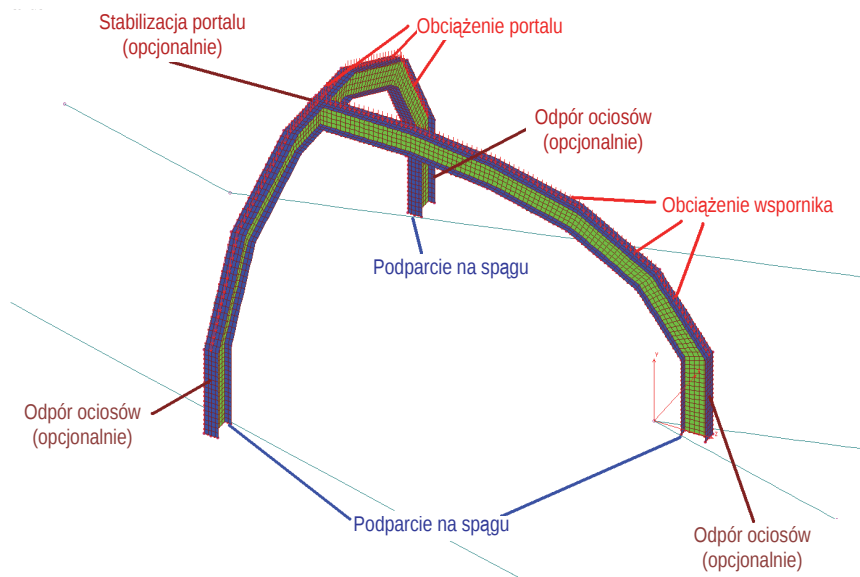
Analiza wyników badań modelowych portalowej obudowy odgałęzień, wykazała, że oddziaływanie wspornika na portal powoduje znaczne deformacje całej konstrukcji i podniesienie naprężeń w poszczególnych jej elementach. Możliwe jest jednak takie zmodyfikowanie konstrukcji, aby była ona w pełni stabilna (Rotkegel 2010). Zaproponowano zatem zastosowanie portalu leżącego w dwóch pionowych, nachylonych względem siebie płaszczyznach i przeprowadzono analizę porównawczą konstrukcji, w których portal leży w płaszczyznach przecinających się pod kątami 20° i 40°. Analizowano dwa warianty konstrukcji. Pierwszy wariant ze stałą długością wspornika i zwiększającą się rozpiętością całej konstrukcji i drugi – ze stałą rozpiętością konstrukcji i zmniejszającą się długością wspornika. Dodatkowo dla pełnego porównania

przeprowadzono analizę konstrukcji wyjściowej, z portalem leżącym w jednej płaszczyźnie. Na rysunku 4.49 przedstawiono poziome rzuty analizowanych rozwiązań z podstawowymi wymiarami dla obu wariantów.



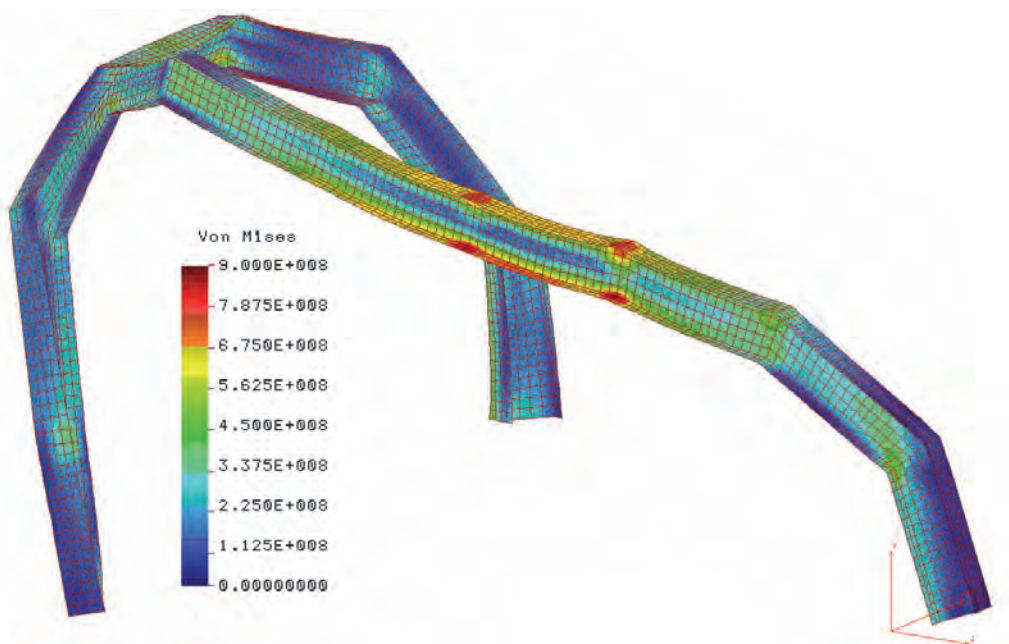
Rys. 4.49. Analizowane schematy obudowy odgałęzienia portalowego ze stałą długością wspornika (po lewej) i ze stałą rozpiętością całej konstrukcji zasadniczej (po prawej): a – portal w jednej płaszczyźnie, b, d – portal załamany pod kątem 20°, c, e – portal załamany pod kątem 40°

Analizy prowadzono dla konstrukcji z dwuteowników szerokostopowych IPB550. Modele podparto w miejscu kontaktu konstrukcji ze spągim, a obciążono siłami odpowiadającymi średnim warunkom geologiczno-górnictwem. Opcjonalnie założono także odpór ociosów oraz stabilizację portalu. Sposób podparcia i obciążenia modeli przedstawiono na rysunku 4.50.

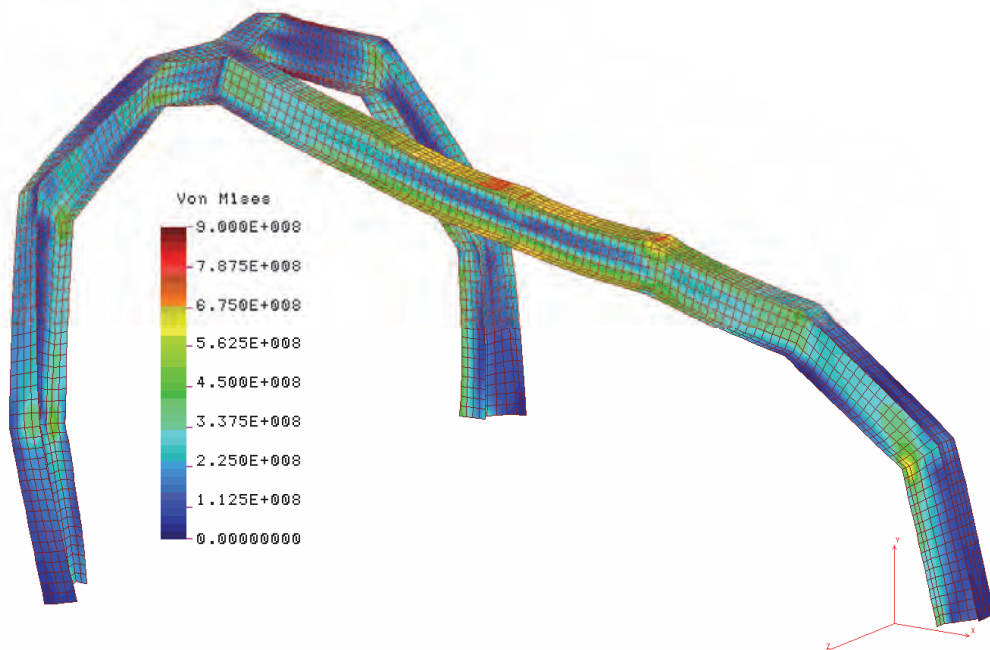


Rys. 4.50. Sposób podparcia i obciążenia modeli

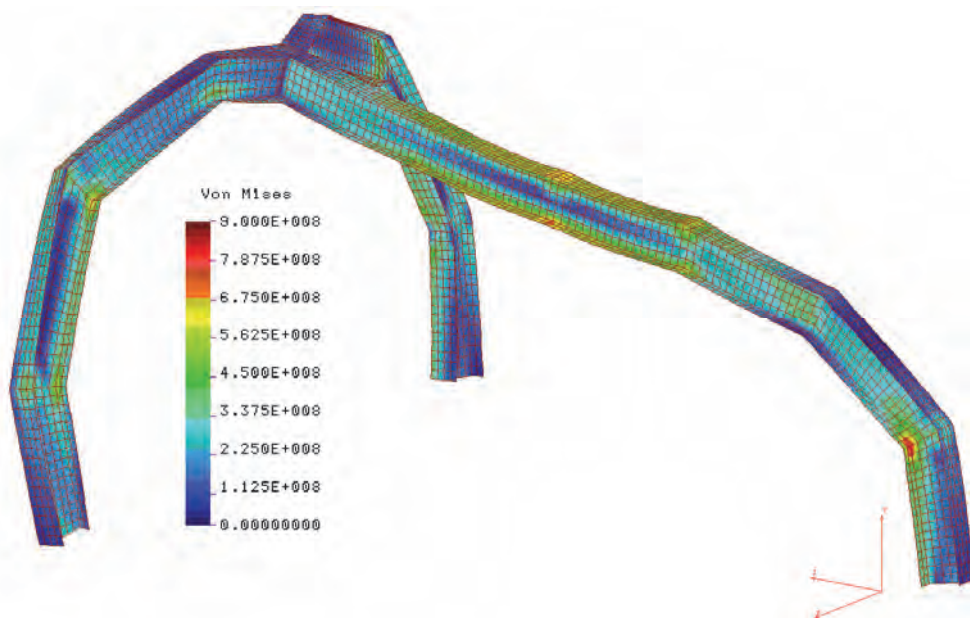
W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano między innymi rozkład naprężeń zredukowanych i zdeformowane postaci modeli. Na rysunkach 4.51–4.55 przedstawiono w jednakowej skali barwne mapy naprężeń zredukowanych w modelach podpartych tylko na spągu, wywołanych założonym obciążeniem ze strony górotworu.



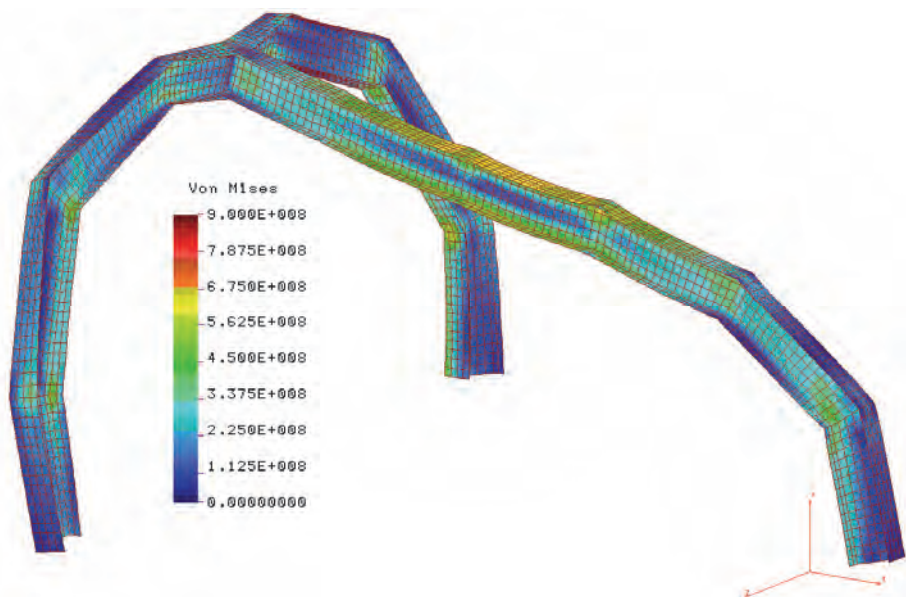
Rys. 4.51. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu z portalem jednopłaszczyznowym (rys. 4.49a) (naprężenia w Pa, skala deformacji 10×)



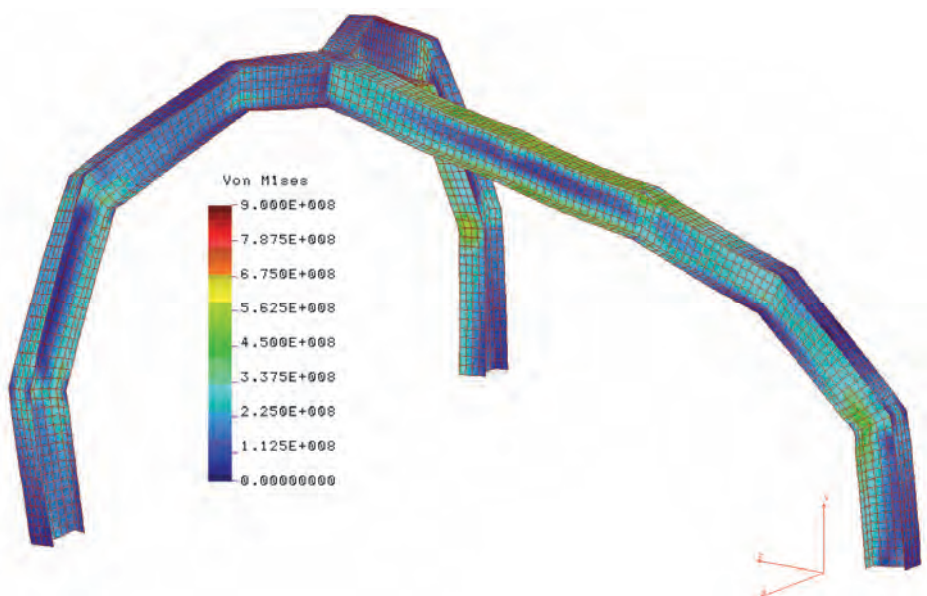
Rys. 4.52. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 20° przy zachowanej rozpiętości wspornika (rys. 4.49b) (naprężenia w Pa, skala deformacji $10\times$)



Rys. 4.53. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 40° przy zachowanej rozpiętości wspornika (rys. 4.49c) (naprężenia w Pa, skala deformacji $10\times$)



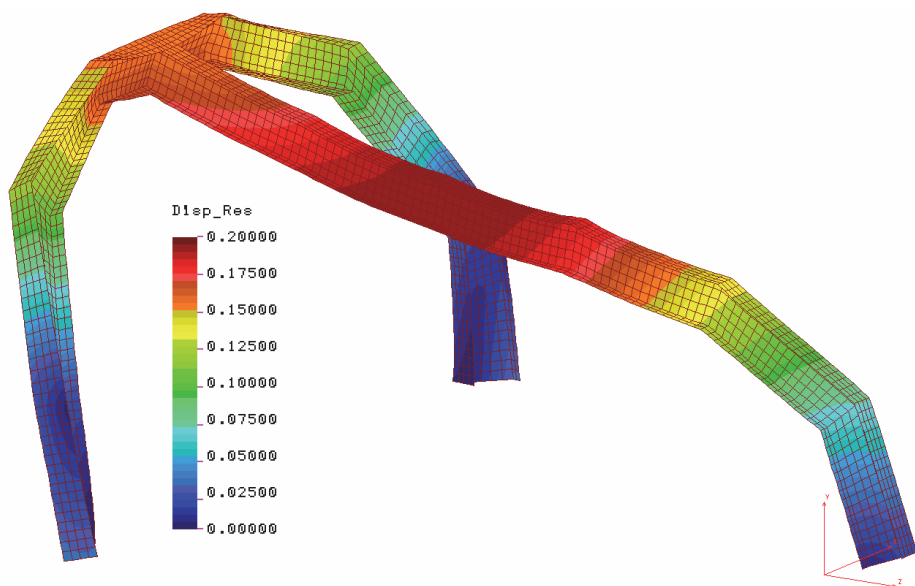
Rys. 4.54. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 20° , przy zachowanej rozpiętości całej konstrukcji (rys. 4.49d) (naprężenia w Pa, skala deformacji $10\times$)



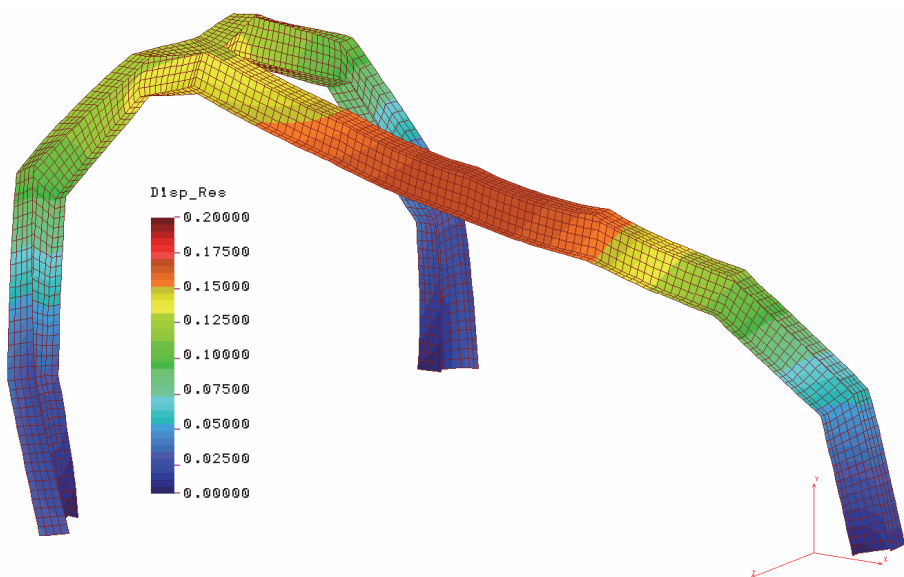
Rys. 4.55. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 40° , przy zachowanej rozpiętości całej konstrukcji (rys. 4.49e) (naprężenia w Pa, skala deformacji $10\times$)

Jak pokazują rysunki 4.51–4.55 zmiana kształtu obudowy odgałęzienia wpływa na stan wyężenia całej konstrukcji. Wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych,

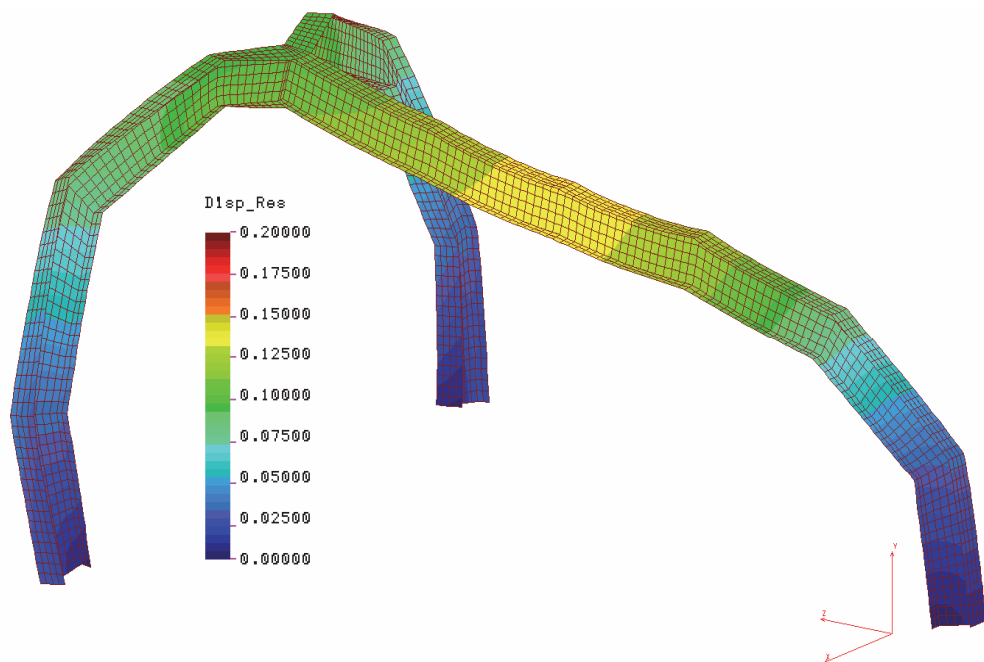
uzyskanych w trakcie analizy liniowej, zmniejszają się z 890 do 571 MPa. Przemieszczenia natomiast zmniejszają się ze 195 mm w modelu bazowym do 90 mm w modelu z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach ukośnych pod kątem 40° (Rotkegel 2010; Rotkegel, Bock, Witek 2010). Na rysunkach 4.56–4.60 przedstawiono w jednakowej skali zdeformowane postaci modelu obudowy odgałęzienia.



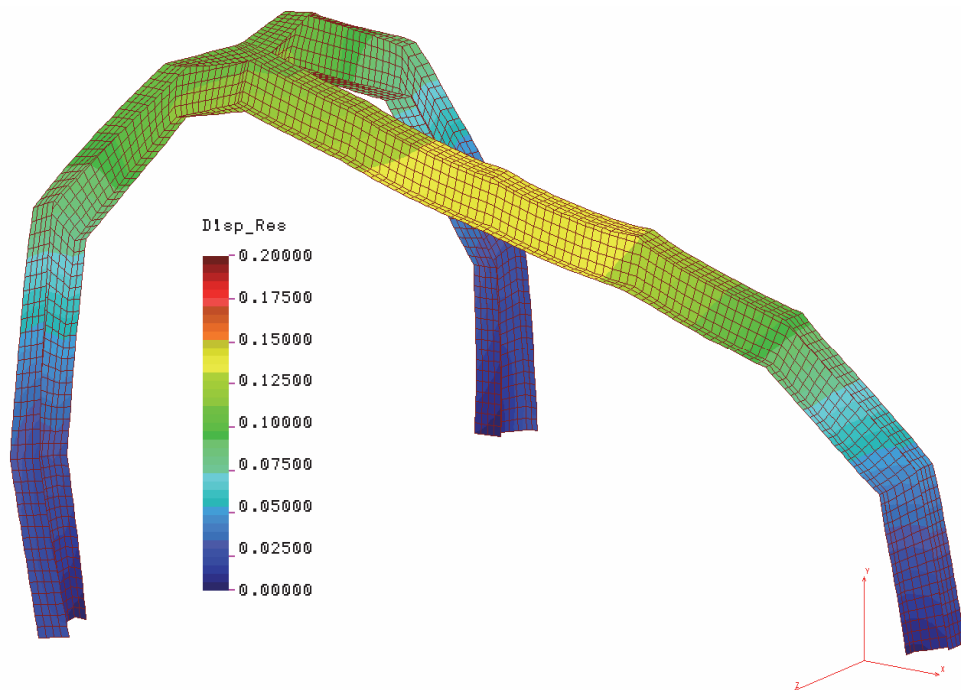
Rys. 4.56. Deformacje modelu *a* z portalem jednopłaszczyznowym (skala deformacji 10×)



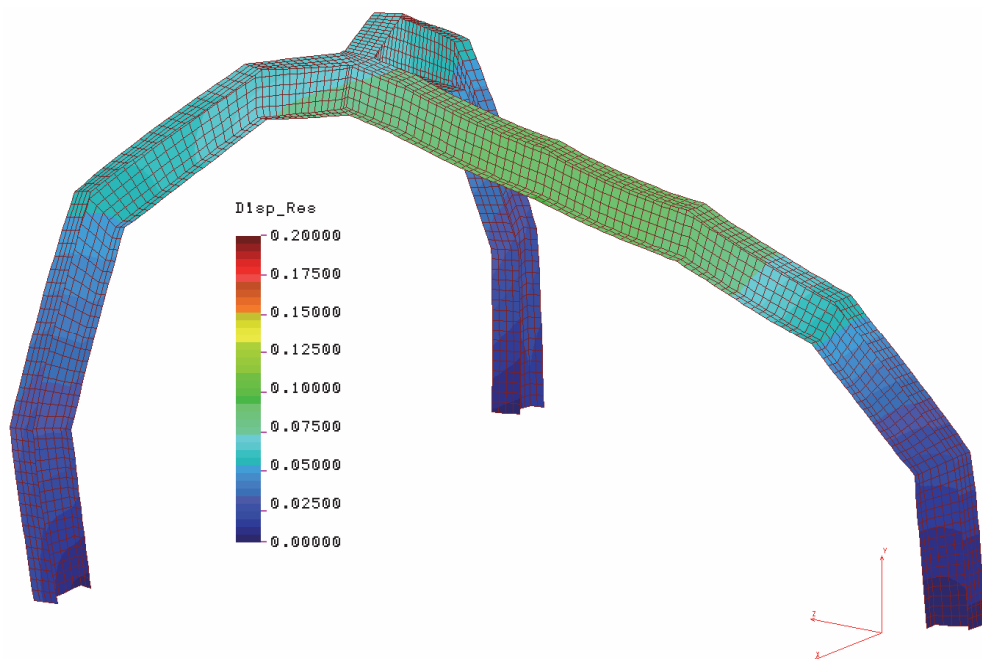
Rys. 4.57. Deformacje modelu *b* z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 20° , przy zachowanej rozpiętości wspornika (skala deformacji 10×)



Rys. 4.58. Deformacje modelu *c* z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 40° , przy zachowanej rozpiętości wspornika (skala deformacji $10\times$)



Rys. 4.59. Deformacje modelu *d* z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 20° , przy zachowanej rozpiętości całej konstrukcji (skala deformacji $10\times$)



Rys. 4.60. Deformacje modelu *e* z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 40°, przy zachowanej rozpiętości całej konstrukcji (skala deformacji 10×)

Pełne wyniki przeprowadzonej analizy zestawiono w tabeli 4.4. Oprócz naprężeń i przemieszczeń podano także sumaryczną reakcję podporową pionową, będącą liczbowym odpowiednikiem sumarycznego obciążenia obudowy i wartość reakcji podporowej w miejscu podparcia stabilizującego portal, wymaganą do utrzymania portalu w pierwotnej płaszczyźnie zabudowy.

Tabela 4.4. Wyniki analizy porównawczej modeli

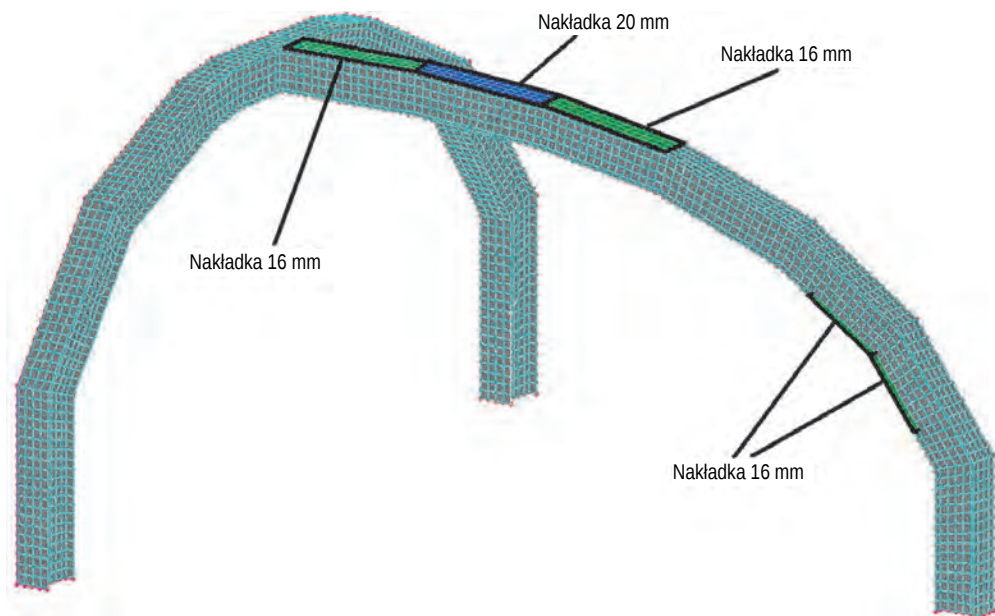
Model	Opis modelu	Całkowite obciążenie $F = R_y$, MN	Maksymalne naprężenie σ_{red} , MPa	Całkowite przemieszczenie konstrukcji u , mm	Poziome przemieszczenie portalu u_x , mm	Reakcja podporowa stabilizująca portal R_x , MN
a	Z portalem jednopłaszczyznowym	5,142	890	195	166	2,931
b	Z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 20°, z zachowaną rozpiętością wspornika	5,400	727	170	140	2,727
c	Z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 40°, z zachowaną rozpiętością wspornika	5,571	829	135	104	2,378
d	Z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 20°, z zachowaną rozpiętością całej konstrukcji	5,253	647	139	114	2,509
e	Z portalem leżącym w dwóch płaszczyznach skrzyżowanych pod kątem 40°, z zachowaną rozpiętością całej konstrukcji	5,253	571	90	68	2,023

Jak wynika z przedstawionej analizy, zastosowanie portalu „dwupłaszczyznowego” wyraźnie wpływa na zmniejszenie deformacji i poprawę stanu wyężenia całej konstrukcji. Wpływ ten wzrasta wraz ze zmianą kąta przecięcia się płaszczyzn połówek portalu. Zmniejszenie kąta między połówkami portalu powoduje zmniejszenie przemieszczenia przystopowej części portalu i zmniejszenie sił wymaganych do zachowania pionowego usytuowania (zastabilizowania) portalu (Rotkegel 2010; Rotkegel, Bock, Witek 2010). Należy też zwrócić uwagę na fakt, że zmiana kształtu portalu w obu analizowanych wariantach, nie powoduje zwiększenia kosztów materiałowych. Mankamentem takiego rozwiązania jest natomiast utrudniona zabudowa w wyrobisku, możliwa jedynie w komorze montażowej. Przykład takiego rozwiązania przedstawiono w rozdziale 6.2.

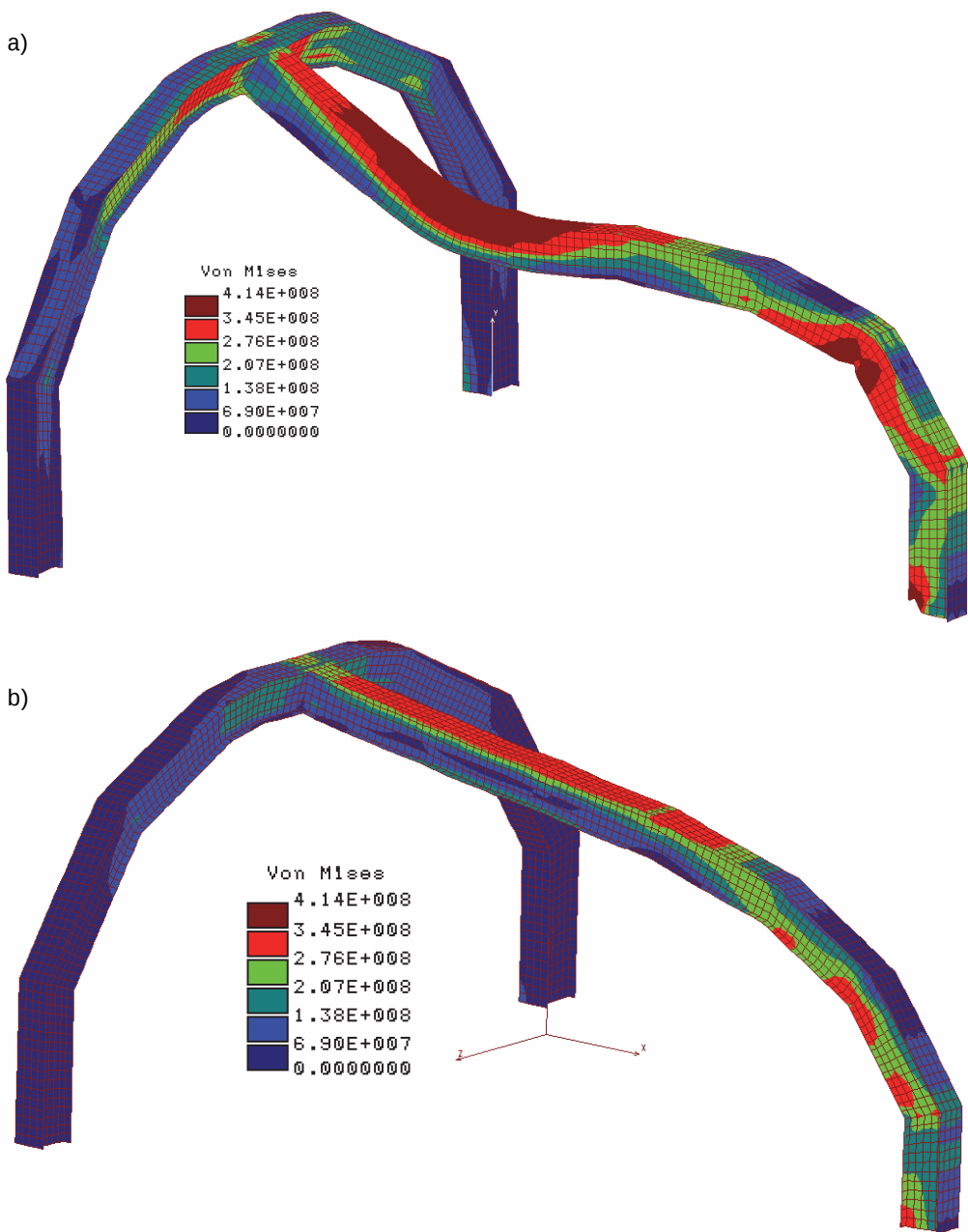
4.5.3. Wzmacnianie belek wspornika

Sposobem optymalnego wykorzystania wytrzymałości kształtowników na konstrukcję zasadniczą jest wzmocnienie najbardziej wyężonych fragmentów. To rozwiązanie jest alternatywą dla zmiany profilu belek na cięższy. Sprowadza się to najczęściej do zastosowania dodatkowych blach spawanych w miejscach, gdzie zostały przekroczone dopuszczalne naprężenia (Rotkegel, Bock, Witek 2010). Grubość blach nakładkowych, stanowiących wzmocnienie, mieści się w większości przypadków w przedziale 10–20 mm. Tylko sporadycznie stosuje się blachy o większej grubości.

W trakcie analizy sprawdza się, w których belkach przekroczona została ich wytrzymałość i konieczne jest zastosowanie blach nakładkowych. W kolejnych krokach analizy określa się grubość, jaką powinny posiadać blachy, dla wyeliminowania stref uplastycznienia konstrukcji. Na rysunku 4.61 przedstawiono przykładowy schemat wzmocnienia belek wspornika, a na rysunku 4.62 efekt zastosowania wzmocnień.



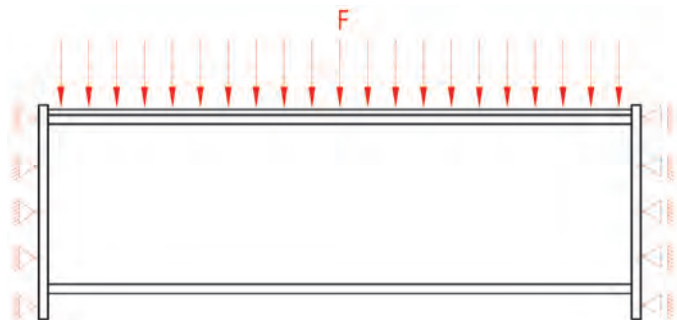
Rys. 4.61. Przykład wzmocnienia belek wspornika blachami nakładkowymi



Rys. 4.62. Porównanie rozkładu naprężeń zredukowanych w konstrukcji przed wzmocnieniem (a) i po wzmocnieniu blachami nakładkowymi (b); bordowym kolorem zaznaczono elementy uplastycznione (naprężenia w MPa, skala deformacji 10×)

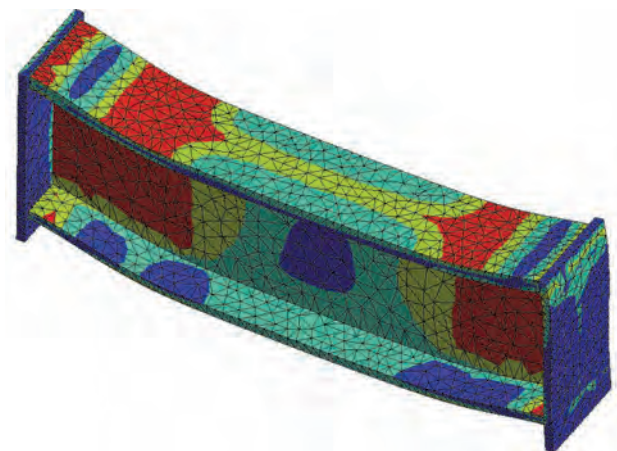
Jak pokazuje rysunek 4.62 wzmocnienie konstrukcji zasadniczej, nawet w ograniczonym zakresie, przynosi zadowalające efekty. Istotą badań prowadzonych w roku 2010 było natomiast określenie właściwego sposobu połączenia blach nakładkowych

ze wzmacnianą belką i sprawdzenie poprawności modelowania tego wzmocnienia w uproszczony sposób (Rotkegel, Bock, Witek 2010). Celem analizy było sprawdzenie pracy belki wspornika, wzmocnionej blachami nakładkowymi. W pierwszym etapie badaniom poddano podstawowy model, w którym wzmocnienie górnej półki belki dwuteowej zamodelowano jako jej większą grubość, a wzmacniający element ze wzmacniającą blachą jako jednorodny materiał. Następnie nadano warunki brzegowe – schemat podparcia i obciążenia belki przedstawiono na rysunku 4.63. Belkę podpartą na płytach czołowych obciążono siłą F , działającą prostopadłe do płaszczyzny półki o wartości $F = 5,0$ MN. Wartość obciążenia została dobrana tak, aby w jej wyniku w badanym modelu powstały odkształcenia plastyczne.



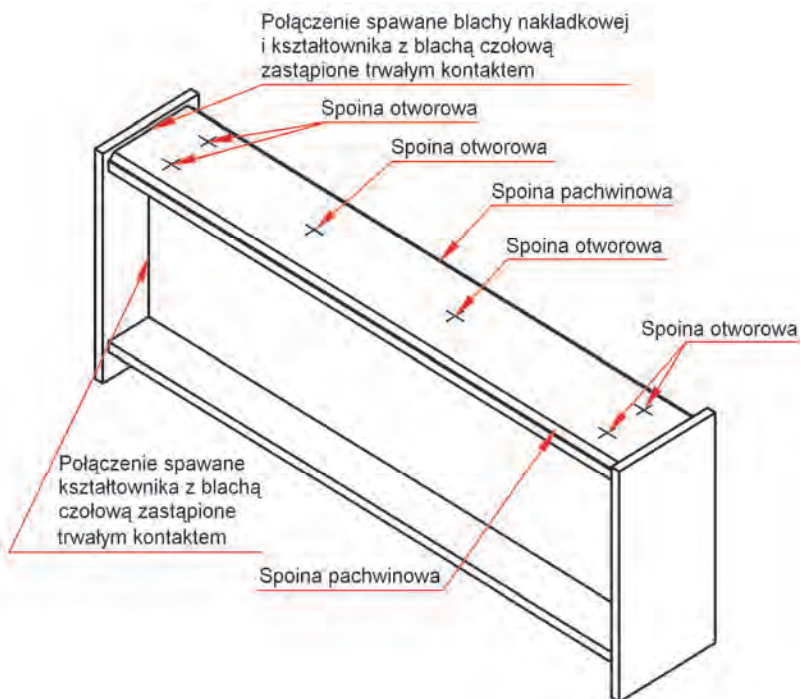
Rys. 4.63. Sposób podparcia i obciążenia belki; F – siła działająca na belkę

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano między innymi naprężenia zredukowane i odkształcenia modelu, przedstawione na rysunku 4.64, na którym czerwone pola oznaczają elementy uplastycznione.



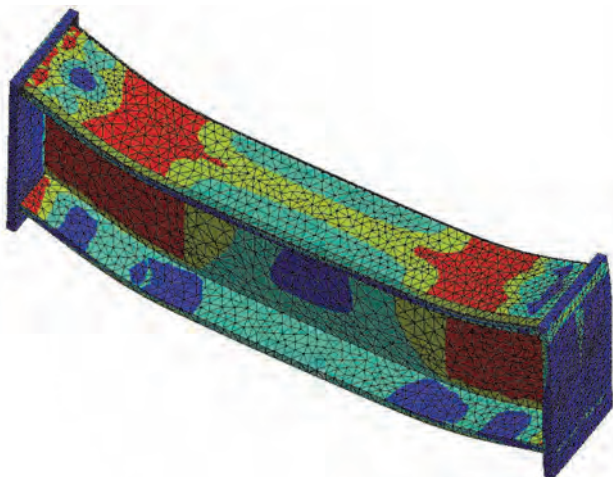
Rys. 4.64. Rozkład naprężeń i zdeformowana postać modelu (skala deformacji 10×)

W drugim analizowanym modelu uwzględniono grubość blachy nakładkowej i sposób jej spawania do belki dwuteowej. Uwzględniono przy tym spoiny pachwinowe na całym obwodzie blachy nakładkowej i spoiny otworowe. Model ten schematycznie przedstawiono na rysunku 4.65.

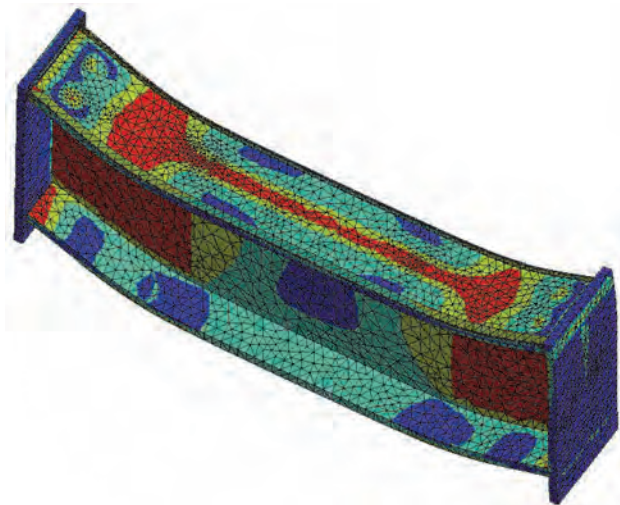


Rys. 4.65. Połączenia spawane i określenie kontaktów w rozbudowanym modelu

Na rysunku 4.66 przedstawiono wyniki obliczeń wytrzymałościowych – barwną mapę naprężeń zredukowanych dla całego modelu. Natomiast na rysunku 4.67 przedstawiono mapę naprężeń dla modelu z ukrytą (wyłączoną) blachą nakładkową, co pozwala na prezentację naprężeń w miejscu spoin otworowych. Podobnie jak poprzednio, uplastycznione fragmenty konstrukcji zaznaczono czerwonym kolorem.



Rys. 4.66. Rozkład naprężeń i zdeformowana postać modelu z widoczną blachą nakładkową (skala deformacji 10x)



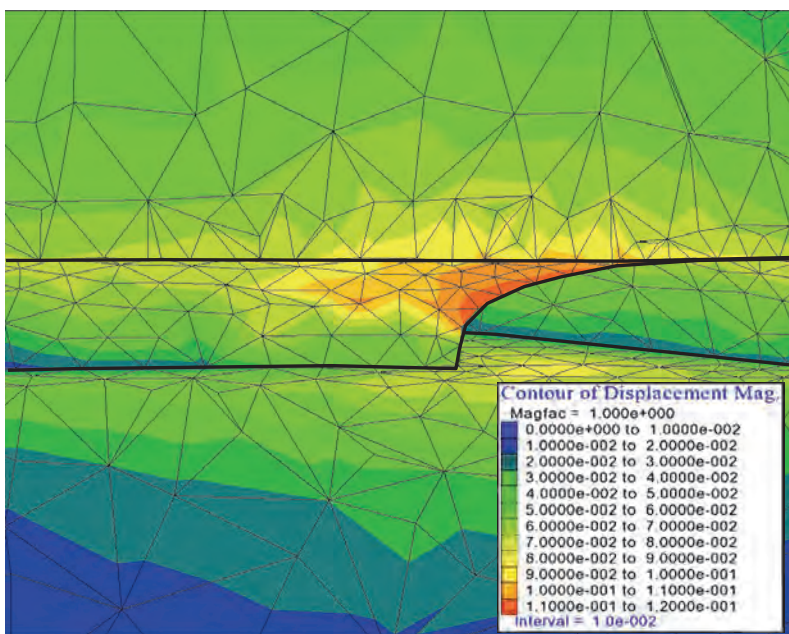
Rys. 4.67. Rozkład naprężeń i zdeformowana postać modelu z „ukrytą” blachą nakładkową (skala deformacji 10×)

Przeprowadzone analizy wykazały zasadność stosowania blach nakładkowych do wzmacniania belek konstrukcji zasadniczej obudowy. Jednocześnie, porównując wyniki obliczeń wytrzymałościowych analizowanych modeli, można stwierdzić, że badania modelowe przeprowadzone na uproszczonych modelach z wystarczającą dokładnością odwzorowują pracę całego elementu (Rotkegel, Bock, Witek 2010).

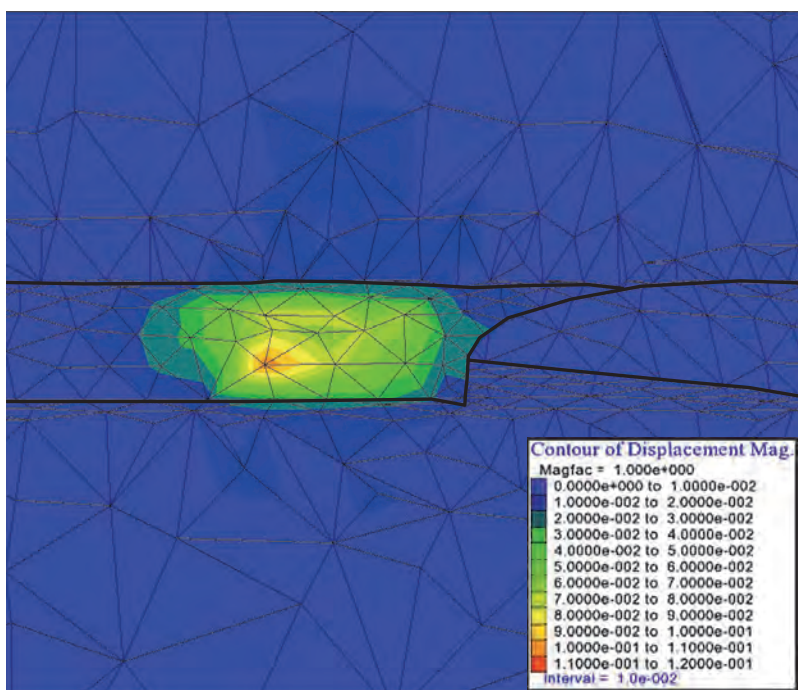
4.5.4. Wzmacnianie naroża odgałęzienia

Obliczenia analityczne (Szczepaniak 1963) i analizy numeryczne górotworu (Majcherczyk i Małkowski 1998; Bock, Prusek, Rotkegel 2009; Rotkegel i Bock 2009) wykazały, że najbardziej wyężonym obszarem górotworu w rejonie odgałęzienia jest ostre naroże (klin) ociosów łączących się wyrobisk. Zniszczenie skał w tym obszarze skutkuje brakiem odporu dla wspornika i powiększeniem się szerokości wyrobiska. Zagrożenie tym zjawiskiem jest większe w przypadku małych kątów połączenia i niskich parametrów skał ociosowych. Dla określenia wpływu parametrów górotworu na jego przemieszczenia w rejonie narożnika odgałęzienia, przeprowadzono analizę numeryczną za pomocą programu FLAC3D (Rotkegel, Bock, Witek 2010), wykorzystując kryterium Coulomba-Mohra. Analizowano trzy rodzaje górotworu i trzy sposoby wzmocnienia tego obszaru – iniekcja górotworu, zastosowanie ściągów i wykonanie betonowego naroża. Na rysunku 4.68 przedstawiono przemieszczenia całkowite górotworu o niskich parametrach wytrzymałościowych dla przypadku bez wzmocnień, natomiast na rysunku 4.69 – zmniejszenie przemieszczeń górotworu w przypadku zastosowania iniekcji i stalowych ściągów.

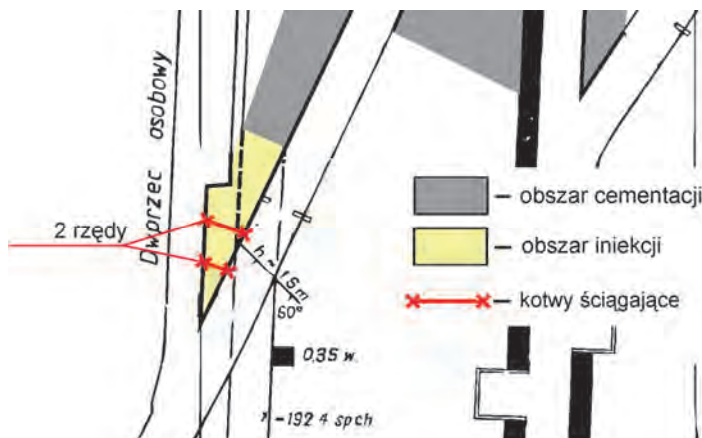
Z uwagi na zadowalające wyniki analiz, zastosowanie iniekcji naroża odgałęzienia, połączone z zastosowaniem ściągów, zostało pozytywnie zweryfikowane w warunkach dołowych w ramach wzmacniania wyrobisk poziomy 416 m w kopalni „Murcki”. Schemat tych wzmocnień przedstawiono na rysunku 4.70.



Rys. 4.68. Przeszaczenia całkowite w rejonie łączących się wyrobisk dla modelu bazowego bez wzmocnień (górotwór o niskich parametrach wytrzymałościowych)



Rys. 4.69. Zmniejszenie przeszaczeń całkowitych w rejonie łączących się wyrobisk z zastosowaniem ściąągów stalowych i iniekcji górotworu w stosunku do modelu bazowego (górotwór o niskich parametrach wytrzymałościowych)



Rys. 4.70. Schemat iniekcji górotworu i ściągow w rejonie naroża połączeń wyrobisk w kopalni „Murcki”

4.6. Produkcja obudowy

Ważnym etapem procesu wytwórczego portalowej obudowy odgałęzień i skrzyżowań jest produkcja – wykonanie obudowy. Z uwagi na różnorodność elementów proces ten jest prowadzony na różnych wydziałach produkcyjnych, przy udziale działu zaopatrzeniowego. Część elementów jest wykonywana przez producenta, wykonanie niektórych części lub usług jest podzlecane, a typowe elementy są kupowane. Podział ten jest różny i zmienny w zależności od możliwości producenta – dostępnych maszyn i urządzeń, chwilowego obciążenia robotami itp. Elementy, które jeden producent wykonuje własnymi siłami, inny zleca podwykonawcom.

W procesie produkcji portalowej obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych kluczową kwestią jest zapewnienie odpowiedniej jakości wykonywanej konstrukcji, a tym samym wysokiego poziomu bezpieczeństwa. W większości przypadków wymaga się, aby producent (wykonawca) obudowy, posiadał uprawnienia do oznaczania tego typu wyrobów (portalowych, szkieletowych obudów połączeń wyrobisk) znakiem bezpieczeństwa „B” oraz do prowadzenia prac spawalniczych w zakresie wykonawstwa konstrukcji stalowych klasy 1 zgodnego z PN-B-06200. Oznacza to między innymi konstrukcje obciążane statycznie lub dynamicznie, wykonane ze stali konstrukcyjnej niestopowej lub niskostopowej. Do klasy tej zalicza się konstrukcje, w których zastosowano szczególne rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne oraz takie, których awaria wiązałaby się ze znacznym zagrożeniem życia lub stratą materialną. Produkcja wymusza zakwalifikowanie zakładu do grupy I zgodnie z PN-M-69009, do stosowania standardowego systemu jakości zgodnie z PN-EN 729-3 oraz do pełnego poziomu kwalifikacji nadzoru zgodnie z PN-EN-719.

Dla zapewnienia odpowiedniej jakości wykonania konstrukcji portalowej obudowy odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk korytarzowych prowadzi się cały szereg badań na różnych etapach produkcji. Należy tu wymienić przede wszystkim badania kluczowych spoin (połączenia blach czołowych z dwuteownikiem). Spoiny podlegają kontroli wizualnej i badaniom ultradźwiękowym, a stwierdzone wady muszą zostać usunięte. Ważne są także parametry wytrzymałościowe kształtowników stosowanych na

odrzwia. W tym celu z kołnierzy pobierane są próbki do badań wytrzymałościowych – próby rozciągania i próby udarności. Ponadto obudowa zostaje próbnie zmontowana, dzięki czemu możliwe jest sprawdzenie możliwości jej montażu oraz rzeczywistych wymiarów. Wyniki badań są podstawą do wystawienia dokumentacji kontroli jakości. Dokumentacja taka obejmuje:

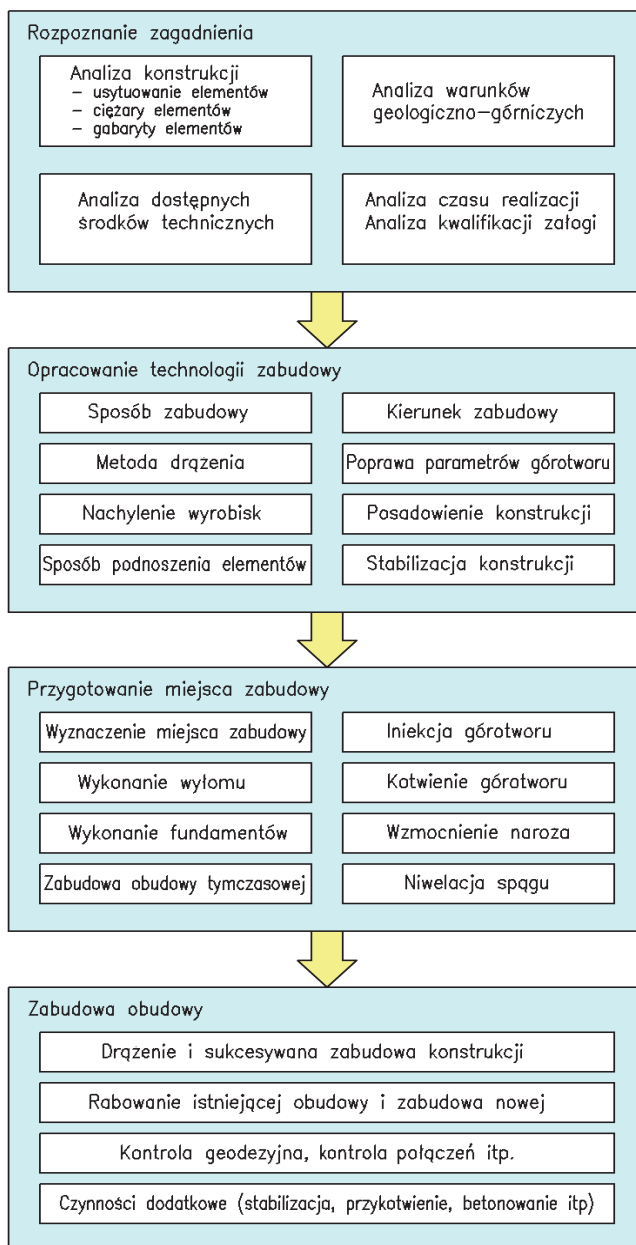
- deklarację zgodności,
- gwarancję producenta,
- kartę wyrobu,
- orzeczenie kontroli jakości,
- specyfikację elementów odgałęzienia,
- zestawienie materiałów atestowanych,
- schemat montażowy i znakowanie konstrukcji i odrzwi,
- certyfikat na przedmiot zamówienia uprawniający do oznaczania go znakiem bezpieczeństwa.

4.7. Zabudowa w wyrobisku

Zabudowa szkieletowej obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych jest zagadnieniem bardzo obszernym i musi być rozpatrywana indywidualnie w oparciu o gotowy projekt konkretnej obudowy. Szczegółowa technologia zabudowy musi uwzględniać typ konstrukcji, usytuowanie poszczególnych zespołów (portali, wsporników) w przestrzeni wyrobiska, jego wielkość oraz, w przypadku przebudowy, postać konstrukcyjną i stan istniejącej obudowy. Istotny jest także ciężar poszczególnych elementów i ich gabaryty, co wpływa na konieczność zastosowania odpowiednich maszyn i urządzeń umożliwiających podniesienie elementów w miejsce ich zabudowy. Bardzo ważne jest rozpoznanie warunków geologiczno-górnich – przede wszystkim stanu spękań górotworu, parametrów skał otaczających wyrobisko, wykroplenia wody, a także zagrożeń, jakie występują w miejscu zabudowy. W planowaniu zabudowy w wyrobisku trzeba także uwzględnić czas niezbędny na realizację zadania oraz kwalifikacje załogi.

W procesie zabudowy szkieletowej obudowy połączenia wyrobisk korytarzowych można wyszczególnić kilka etapów, następujących po sobie – według schematu przedstawionego na rysunku 4.71.

Pierwszym etapem jest analiza dokumentacji pod kątem konstrukcji, maszyn i urządzeń, wymaganych do zabudowy poszczególnych elementów z uwagi na wysokość podnoszenia, podnoszone ciężary oraz gabaryty belek. Istotne jest rozpoznanie i analiza warunków geologiczno-górnich, z uwzględnieniem zagrożeń naturalnych, zwłaszcza obwałami, wykropleniami wody oraz tąpniętami. Jest to także ostatni moment na weryfikację przyjętych w projektowaniu parametrów skał i górotworu. Nie bez znaczenia jest także określenie czasu, jaki może być przeznaczony na zabudowę konstrukcji (liczba zmian roboczych i przerwy między nimi), z uwagi na zachowanie funkcjonalności wyrobiska w trakcie wykonywania przebudowy. W zależności od tego zabudowa może zająć kilka tygodni lub kilka miesięcy, na przykład obudowa stawiana jedynie w dni wolne od pracy. Na wydłużenie prac z całą pewnością wpływa także konieczność wykonania fundamentów – stóp betonowych lub zabudowa spągnic. Fakt taki należy uwzględnić w technologii, projektując odpowiednie zabezpieczenie konstrukcji na czas przestojów.



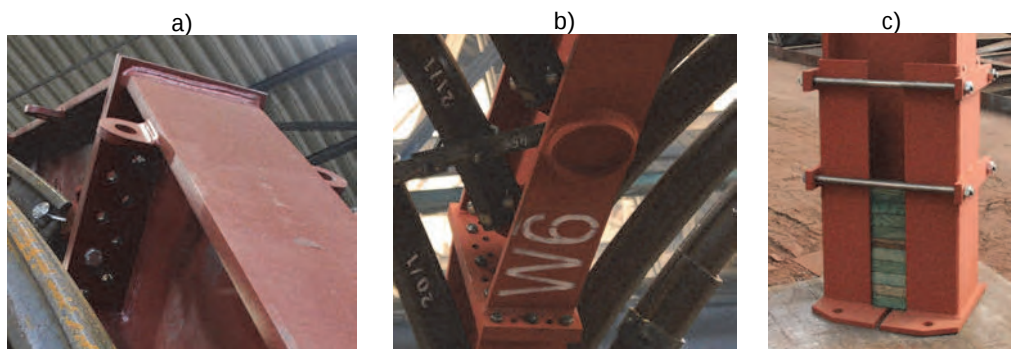
Rys. 4.71. Etapy zabudowy obudowy połączenia wyrobisk

Kolejnym etapem, poprzedzającym właściwą zabudowę, jest opracowanie szczegółowej technologii. Muszą być w niej uwzględnione wcześniejsze analizy, a także określony sposób zabudowy (w komorze montażowej lub za postępem), kierunek zabudowy (np. od strony portalu lub wspornika) czy metoda drążenia (kombajnem lub za pomocą MW), a także sposób posadowienia obudowy i jej stabilizacji. Są to elementy szczególnie istotne w przypadku połączenia wyrobisk nachylonych.

W niektórych przypadkach należy przewidzieć iniekcję wzmacniającą górotwór, jak to miało miejsce przy zabudowie obudowy komory nad zbiornikiem (Rotkegel i Filipowicz 2016) lub wzmacnianie naroża wyrobisk przez betonowanie lub zastosowanie ściągów, zwłaszcza przy ostrych kątach połączenia lub niskich parametrach wytrzymałościowych skał ociosowych.

Dysponując planem działania przystępuje się do trzeciego etapu – przygotowania miejsca zabudowy. W etapie tym należy przeprowadzić zabiegi poprzedzające właściwą zabudowę obudowy (kotwienie, iniekcja itp.). A ponadto na samym początku konieczne jest geodezyjne wyznaczenie miejsca zabudowy, uwzględniające poziomy posadowienia konstrukcji i płaszczyzny usytuowania portali, wsporników zasadniczych elementów. W następnej kolejności można przystępować do sukcesywnego wykonywania wyłomu i fundamentów, a w przypadku przebudowy do rabowania istniejących odrzwi. Należy też odpowiednio wykonać niwelację spągu, umożliwiającą wykonanie fundamentów oraz posadowienie konstrukcji i odrzwi. Jednocześnie w przypadku planowanej zabudowy szkieletu w komorze montażowej należy wykonać odpowiednią obudowę wielkogabarytową, najczęściej indywidualnie projektowaną, w którą wpisują się zabudowywane elementy. Na tym etapie należy także przygotować odpowiednie środki techniczne do podnoszenia belek, na przykład kotwie z bloczkami lub wciągnikami.

Po odpowiednim przygotowaniu miejsca zabudowy przystępuje się do właściwego wznoszenia obudowy. Najczęściej sukcesywnie zabudowuje się poszczególne belki konstrukcji zasadniczej i łączy się do nich przegubowo odrzwia posadowione bezpośrednio na spodku wyrobiska lub przez stopy podporowe (Chmielewski 2005), jednocześnie je stabilizując za pomocą rozpór stałych lub regulowanych (Chmielewski i Łaboński 1997). Wykonuje się przy tym odpowiednią opinię z siatek lub okładzin żelbetowych oraz wykładkę. W każdej fazie wznoszenia konstrukcja musi być odpowiednio zabezpieczona przed utratą stateczności i upadkiem. Może być w tym celu tymczasowo przykotwiona do stropu lub podparta na stojakach o dużej podporności. Odpowiednio wykorzystuje się w tym celu ucha technologiczne i gniazda na stojaki. Elementy te przedstawiono na fotografii 4.8. W trakcie wznoszenia konieczna jest stała kontrola geodezyjna wznoszonej obudowy, sprawdzanie momentów dokręcenia nakrętek śrub w połączeniach kołnierзовych belek oraz w strzemionach.



Fot. 4.8. Elementy technologiczne wykorzystywane w trakcie zabudowy:
a – ucha do przykotwienia belki, b – gniazda do podparcia konstrukcji,
c – segment upodatkniący przystosowany do przykotwienia

Wymagania dotyczące zabudowy dla konkretnej obudowy każdorazowo określone są w dokumentacji techniczno-ruchowej, natomiast wykonawca robót montażowych opracowuje szczegółową technologię zabudowy. Technologia zabudowy portalowej obudowy komory nad zbiornikiem, przedstawionej w podrozdziale 6.3.1, była przedmiotem pracy Rotkegela i Filipowicza (2016). Natomiast wiele przykładów kolejności drążenia i technologii zabudowy obudowy odgałęzień i skrzyżowań podaje literatura (Chudek 1986; Chudek, Pach, Straś 1986; Stałęga 2001).

5. OKREŚLANIE OBCIĄŻEŃ DZIAŁAJĄCYCH NA OBUDOWĘ W WARUNKACH DOŁOWYCH

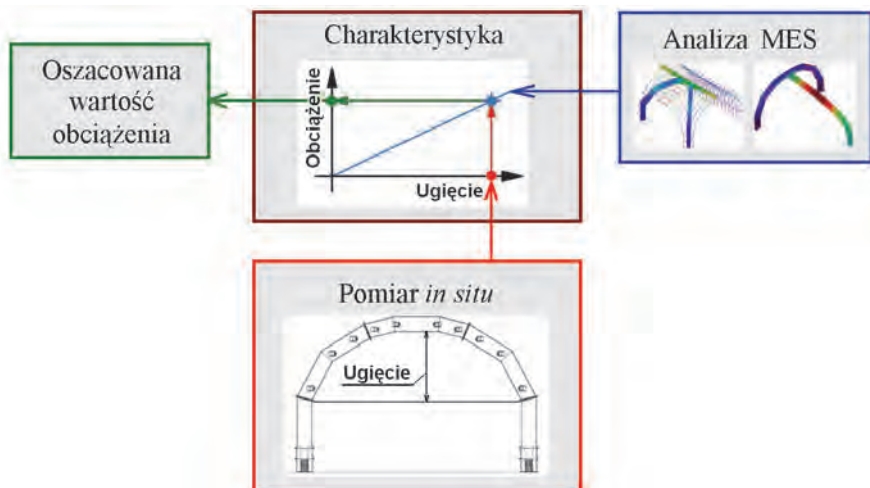
Dla poprawnego zaprojektowania każdej konstrukcji konieczna jest znajomość obciążeń, jakie będą na nią działały w całym zaplanowanym okresie jej użytkowania. Jest to szczególnie istotne w przypadku portalowej obudowy odgałęzień i skrzyżowań, gdzie bardzo ograniczone są możliwości późniejszego, doraźnego jej wzmocnienia. Na etapie projektowania do obliczania obciążeń wykorzystywane są metody analityczne, zawarte w metodach doboru obudowy lub metody numeryczne. Jednak w większości przypadków projektowane konstrukcje portalowych obudów połączeń wyrobisk korytarzowych są na granicy zakresu stosowania zasad doboru obudowy lub nawet ją przekraczają. Wynika to z ich znacznych gabarytów. Z tego względu ważna jest weryfikacja obliczeń w trakcie użytkowania obudowy. Jednak określenie obciążeń działających na portalową obudowę *in situ* nastręcza szereg trudności. Najważniejsze – to duże wartości sił działających na obudowę, wynikające ze znacznych gabarytów wyrobisk. Pomiar tych sił wymagałby zastosowania specjalnie skonstruowanych dynamometrów, dopasowanych zakresem pomiarowym do konkretnej konstrukcji. Znacznie lepszym i tańszym rozwiązaniem wydają się być metody pośrednie, oparte na analizie stanu deformacji zabudowanej konstrukcji (Rotkegel 2012b).

5.1. Metoda określania obciążeń przez pomiar deformacji

Metoda określania obciążeń działających na obudowę przez pomiar deformacji obudowy, polega na poszukiwaniu takiego schematu obciążenia, przy którym odpowiedź modelu będzie zbliżona lub identyczna z pracą rzeczywistej konstrukcji zabudowanej w konkretnym wyrobisku. Przez porównanie ugięć elementów konstrukcji i modelu możliwe jest określanie obciążeń, które to ugięcie wywołują (Podgórski i Kleśta 1987; Rotkegel 2012b).

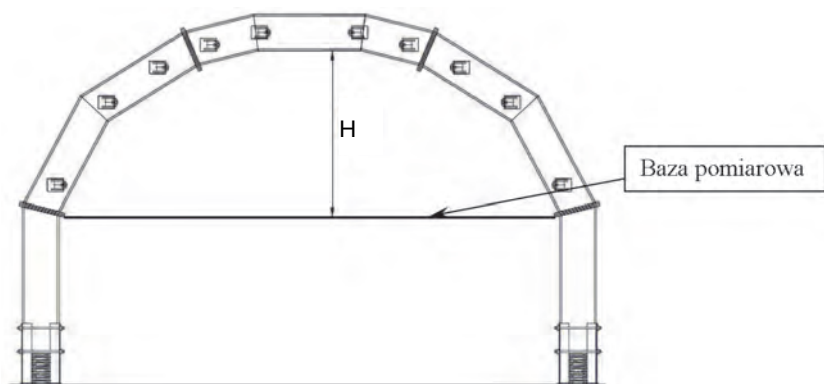
W czasie projektowania obudowy połączenia wyrobisk prowadzi się weryfikację wytrzymałościową konstrukcji. Dla przeprowadzenia analizy budowany jest model numeryczny, odzwierciedlający cechy geometryczne i fizyczne projektowanej konstrukcji. Następnie model ten zostaje podparty w miejscach analogicznych, jak w przypadku rzeczywistej obudowy, i poddany analizom wytrzymałościowym.

Z uwagi na cel analizy – wsteczne określenie obciążeń działających na obudowę – istotne są deformacje modelu i przemieszczenia charakterystycznych węzłów. Dla konkretnej postaci konstrukcji, zastosowanych materiałów i przekrojów poszczególnych elementów, można przypisać wielkość obciążenia wywołującą konkretne deformacje. W przypadku modelu sprężystego istnieje proporcjonalna zależność między obciążeniem modelu a jego deformacjami i naprężeniami. Natomiast w modelu nieliniowym (sprężysto-plastycznym) – z chwilą przekroczenia granicy plastyczności materiału i wystąpienia lokalnego uplastycznienia konstrukcji – zależności te zmieniają się nieproporcjonalnie. Mimo to możliwe jest wyznaczenie charakterystyki odkształceniowej całej konstrukcji. Ideę wyznaczania obciążenia obudowy na podstawie pomiarów deformacji konstrukcji przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Idea wyznaczania obciążenia obudowy na podstawie jej deformacji

W warunkach kopalnianych najczęściej brak jest możliwości pomiarów deformacji całej obudowy ze względu na zainstalowane maszyny, urządzenia i instalacje w rejonie połączenia wyrobisk. Doświadczenie pokazuje, że w większości przypadków, z pewnymi utrudnieniami, możliwe jest jedynie określenie ugięcia portalu przez pomiar położenia dolnego pasa belki głównej względem przyjętej bazy pomiarowej. Sposób tego pomiaru przedstawiono na rysunku 5.2 – tak przeprowadzono badania na pięciu konstrukcjach obudów.

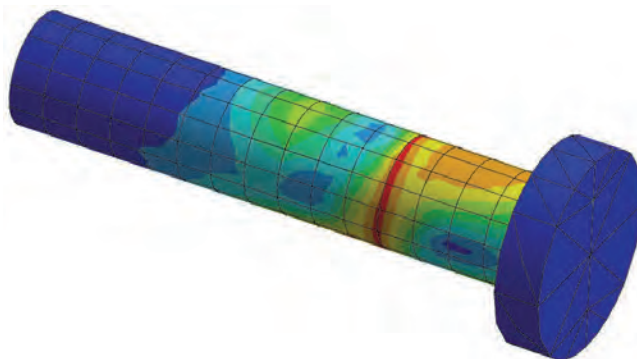


Rys. 5.2. Sposób pomiaru usytuowania belki głównej względem bazy pomiarowej;
 H – wysokość

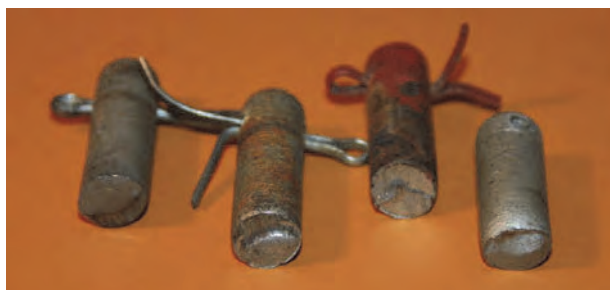
5.2. Metoda określania obciążeń obudowy przez analizę nośności wybranych elementów

Metoda określania obciążeń na podstawie analizy nośności wybranych, a właściwie uszkodzonych elementów, oparta jest na analizie wstecznej uszkodzeń elementów portalowej obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych. Metoda pozwala na dokładne

określenie obciążeń działających na obudowę, jednak pod warunkiem znajomości nośności uszkodzonych elementów. Elementy te mogą być zastosowane w konstrukcji w sposób planowy lub przypadkowy. Pierwszy przypadek dotyczy różnych elementów zastosowanych w konstrukcji, które mają wskazywać pewne stany przekroczenia założonych obciążeń. Stanowią one zatem wskaźniki, indykatory obciążenia. Można do nich zaliczyć sworznie, stosowane w elementach upodatniających. Gdy obciążenie przekroczy ich wytrzymałość, następuje ich ścięcie. Jak wykazały obliczenia analityczne i analizy modelowe, nośność pojedynczego sworznia, w zależności od rzeczywistych parametrów zastosowanego materiału, może wynosić od 44 do 55 kN. W idealnym przypadku zadziałania równomiernego obciążenia na wszystkie cztery sworznie, większego niż ~200 kN, następuje ich ścięcie, a konstrukcja pracuje dalej jako podatna. Podatność ta jest zapewniana przez zginięcie stosu z impregnowanego drewna dębowego lub bukowego. Na rysunku 5.3 przedstawiono wynik analizy wytrzymałościowej pojedynczego sworznia – barwną mapę naprężeń, natomiast na fotografii 5.1 sworznie po ich ścięciu. Z uwagi na stosunkowo niewielką nośność stosowanych sworzni, metoda ta praktycznie może być stosowana jedynie w celu stwierdzenia, czy na konstrukcję zadziały obciążenia i czy pracuje ona jako upodatniona.



Rys. 5.3. Rozkład naprężeń zredukowanych w ścinanym sworzniu



Fot. 5.1. Ścięte sworznie

Analiza wielkości zginięcia (sprasowania) stosu drewna przez prowadnik elementu upodatniającego jest trudna do interpretacji. Trudności wiążą się przede wszystkim z szerokim zakresem parametrów wkładek drewnianych i skomplikowanym mechanizmem ich niszczenia, opartym częściowo na wcinaniu się prowadnika w stos i jego

przecinaniu, a częściowo na jego zgniataniu. Utrudnieniem są także nieokreślone z wystarczającą dokładnością siły tarcia między prowadnikiem a prowadnicami. Ponadto znaczną przeszkodą jest utrudniony dostęp z wyrobiska do stosu wkładek drewnianych. Przeprowadzone obserwacje wskazują, że w większości przypadków elementy upodatniające w części przyspodkowej są niedostępne – zagłębione w górotwór lub przysypane urobkiem. Do tej metody mogą zostać zaliczone także analizy wsteczne nieplanowanych uszkodzeń elementów konstrukcji. W roku 2011 doszło do dwóch takich zdarzeń. Nastąpiło wówczas uszkodzenie połączeń śrubowych belek wspornika, spowodowane niezamierzonym zastosowaniem nakrętek o zbyt niskiej wytrzymałości. Na podstawie analizy sił, jakie są w stanie przenosić owe elementy, można wnioskować o wielkości obciążenia działającego na całą obudowę. Z wykorzystaniem tej metody przeprowadzano analizę obciążeń dwóch obudów odgałęzień.

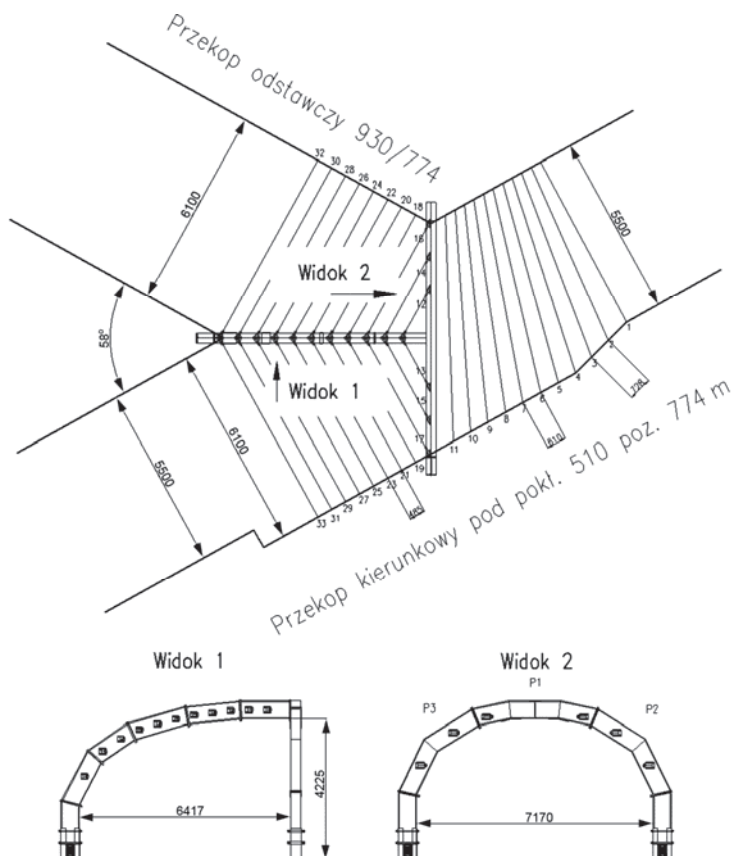
5.3. Badania i obserwacje dołowe

Badania i obserwacje dołowe przeprowadzono na siedmiu konstrukcjach portalowej obudowy odgałęzień i skrzyżowań. Pięć z tych konstrukcji poddano analizie określania obciążeń za pomocą metody pomiarów deformacji konstrukcji, natomiast dwie – z wykorzystaniem metody nośności uszkodzonych elementów.

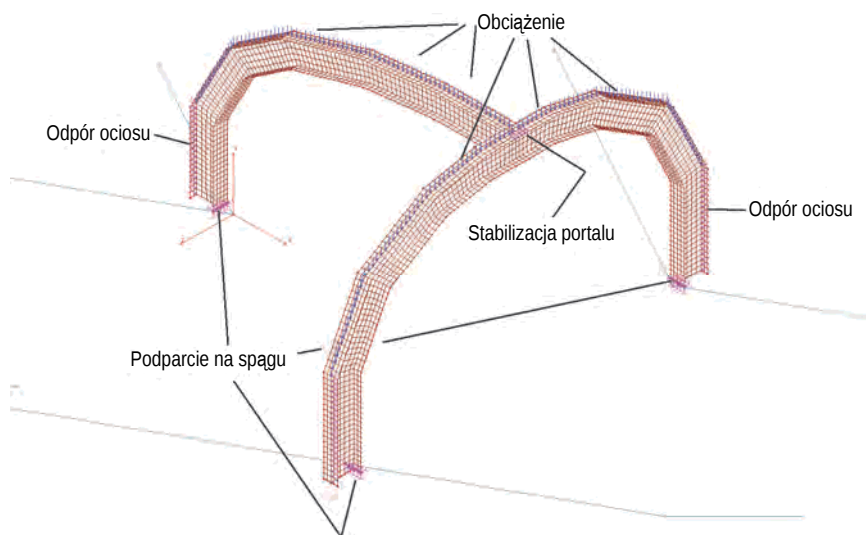
5.3.1. Odgałęzienie portalowe w kopalni „Bobrek-Centrum”

Badaniom poddano konstrukcję obudowy, zaprojektowaną i wykonaną w pierwszej połowie roku 2010, przeznaczoną do zabezpieczenia połączenia przekopu kierunkowego pod pokładem 510, poziom 774 z przekopem odstawczym 930/774 w kopalni „Bobrek-Centrum” Ruch „Centrum” (Rotkegel 2012b). Fragment mapy z zaznaczonym połączeniem wyrobisk przedstawiono na rysunku 5.4, natomiast zarys zaprojektowanej konstrukcji – na rysunku 5.5. Zasadniczą konstrukcję stanowił portal usytuowany ponad łączącymi się wyrobiskami i połączony z nim w sklepieniu wspornik, zabudowany w pobliżu linii przenikania zarysów wyrobisk. Nominalna szerokość portalu wynosiła 7170 mm, a rozpiętość wspornika – 6384 mm. Nominalna wysokość konstrukcji zasadniczej wynosiła 4225 mm. W analizowanej obudowie portal składał się z trzech belek, natomiast wspornik – z pięciu. Cała konstrukcja zasadnicza posadowiona była na spodku wyrobiska przez elementy upodatniające. Wszystkie belki wykonano z dwuteownika szerokostopowego IPB550 zgodnie z PN-H-93452 ze stali 18G2A (S355).

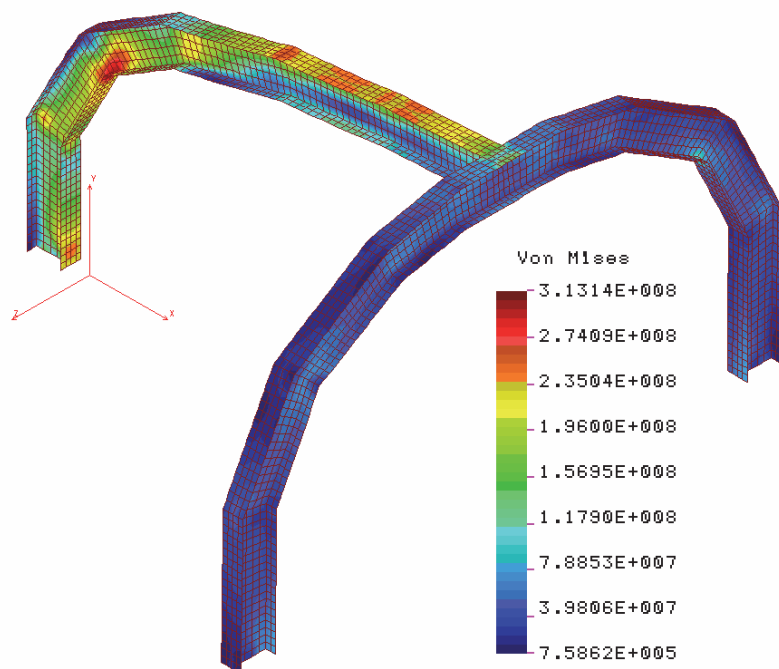
Z uwzględnieniem parametrów górotworu w rejonie projektowanej obudowy i wymaganych jej gabarytów, w oparciu o „Uproszczone zasady doboru obudowy...”, obliczone zostały wartości spodziewanych obciążeń, jakimi górotwór oddziaływać będzie na obudowę. Obciążenie to ($q_0 = 0,126$ MPa) przyjęto do weryfikacji wytrzymałościowej nowo projektowanej obudowy. Model obudowy obciążono w ten sposób, aby otrzymać właśnie to obciążenie. Model podparty został podporami stałymi, zlokalizowanymi w miejscu kontaktu ze spodkiem wyrobiska. Dodatkowo założono podparcie belek upodatniających tak, aby uniemożliwić zwiększenie rozpiętości portalu i wspornika. Na rysunku 5.6 przedstawiono sposób podparcia i obciążenia modelu.



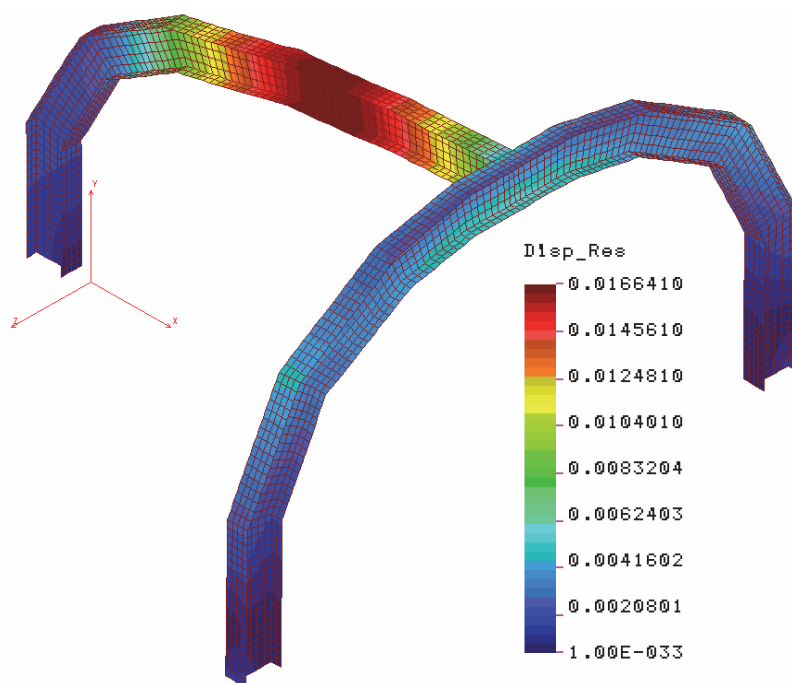
Rys. 5.5. Zarys obudowy odgałęzienia portalowego przekopu kierunkowego pod pokładem 510, poziom 774 m z przekopem odstawczym 930/774 w kopalni „Bobrek-Centrum”



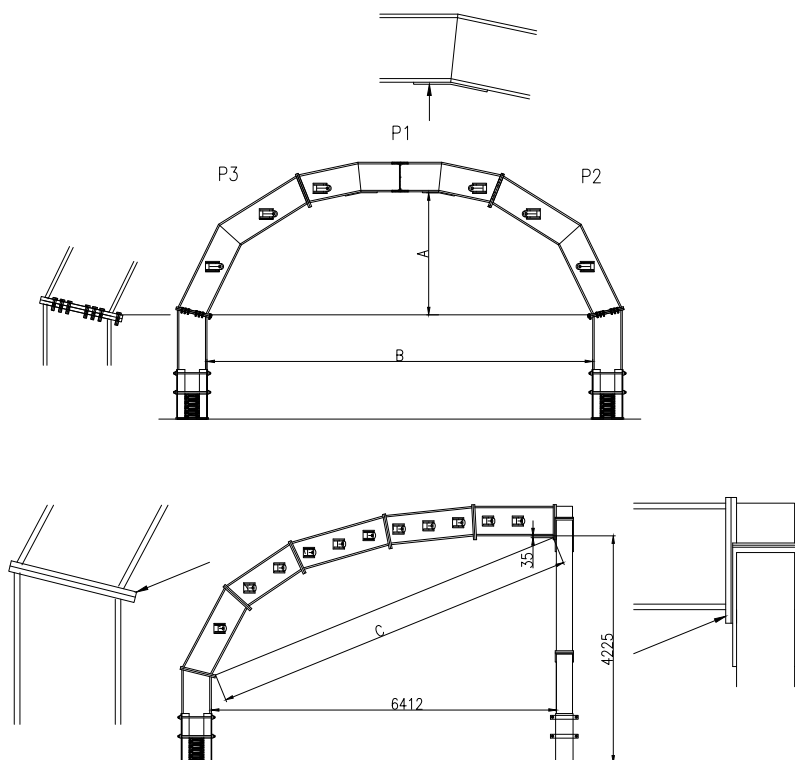
Rys. 5.6. Sposób podparcia i obciążenia modelu obudowy odgałęzienia



Rys. 5.7. Rozkład naprężeń zredukowanych w konstrukcji
(naprężenia w Pa, skala deformacji 10×)



Rys. 5.8. Deformacje konstrukcji (przemieszczenie w m, skala deformacji 10×)

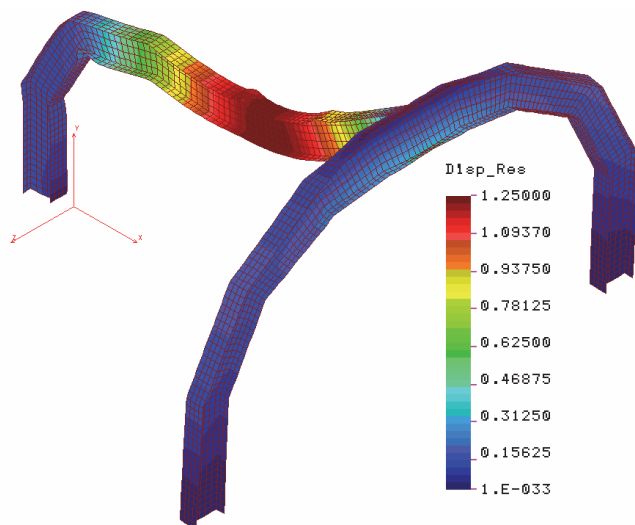


Rys. 5.9. Mierzone wielkości A, B i C oraz przyjęta baza pomiarowa

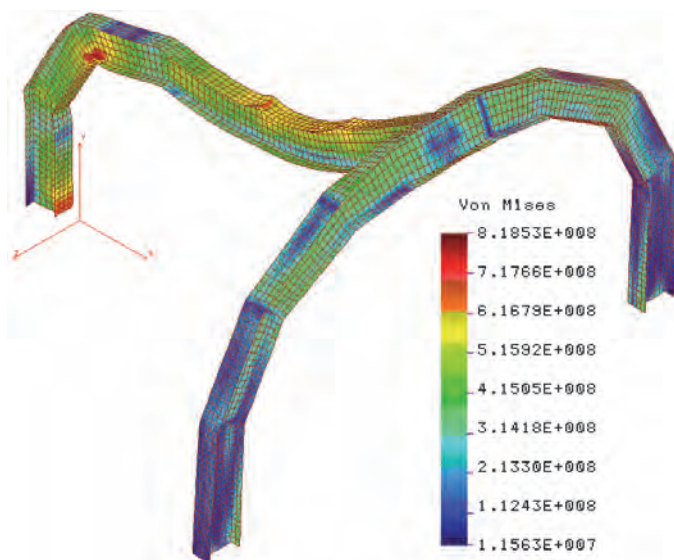
Tabela 5.1. Wyniki pomiarów deformacji obudowy odgałęzienia portalowego przekopu kierunkowego pod pokładem 510, poziom 774 m z przekopem odstawczym 930/774 (pomiar wykonano 21.06.2011 r. – cztery miesiące od zabudowy)

A, mm			B, mm			C, mm		
wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny	wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny	wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny
2256	2257,7	2272	7180	7176,2	7170	6742	6740,4	6730
2257			7179			6737		
2260			7178			6745		
			7176			6740		
			7171			6738		
			7173					
Różnica	-14,3		Różnica	+ 6,2		Różnica	+ 10,4	

Kolejnym etapem analiz było poszukiwanie wartości obciążenia, przy jakiej model numeryczny obudowy odgałęzienia zdeformuje się (ugnie się) w ten sam sposób, jak rzeczywista konstrukcja zabudowana w wyrobisku. W tym celu w modelu numerycznym zwiększano obciążenie aż do osiągnięcia ugięcia portalu 14,3 mm w miejscu prowadzenia pomiarów. W wyniku analizy otrzymano zdeformowaną postać modelu, a także odpowiadający jej rozkład naprężeń zredukowanych. Wyniki tych obliczeń – deformacje i odpowiadające im naprężenia zredukowane przedstawiono na rysunkach 5.10 i 5.11. Uzyskany w badaniach stan ugięcia portalu odpowiadał obciążeniom ze strony górotworu na bardzo wysokim poziomie $q_0 = 0,340$ MPa.



Rys. 5.10. Ogólna postać zdeformowanego modelu przy obniżeniu belki głównej portalu 14,2 mm (przemieszczenia w m, skala deformacji 1×)



Rys. 5.11. Rozkład naprężeń zredukowanych dla ugięcia portalu 14,2 mm (naprężenia w Pa, skala deformacji 1×)

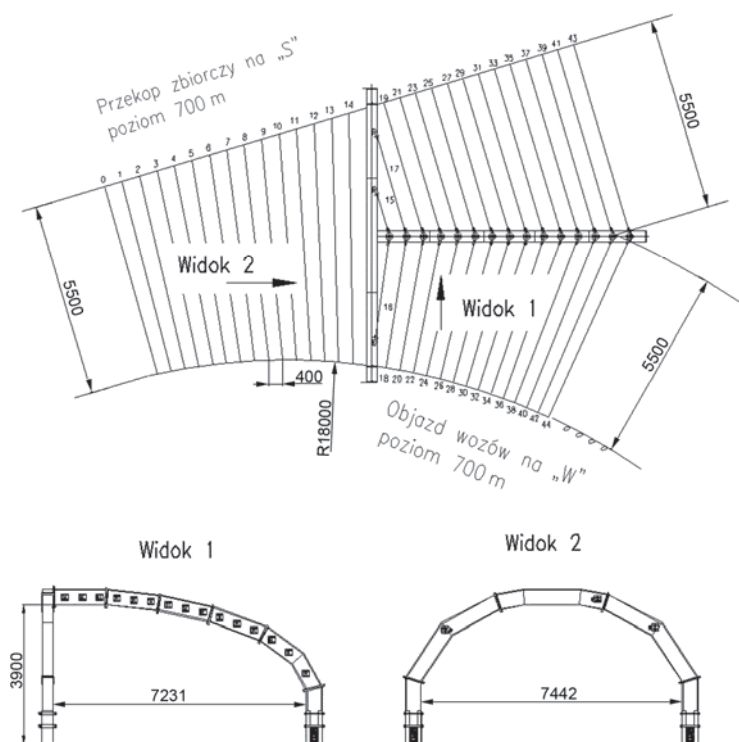
Jak pokazują rysunki 5.10–5.11, uzyskanie ugięć belek portalu na poziomie 14 mm wiązało się z obciążeniem modelu niewiarygodnie wysokimi wartościami obciążeń, które spowodowałyby powstanie naprężeń w konstrukcji obudowy o wartościach znacznie wyższych nawet od wytrzymałości materiału na rozciąganie (R_m). W związku z tym stwierdzono, że otrzymane wyniki symulacji byłyby niemożliwe do uzyskania w warunkach rzeczywistych, z uwagi na przekroczenie wytrzymałości zastosowanego materiału.

5.3.2. Odgałęzienie portalowe w kopalni „Chwałowice”

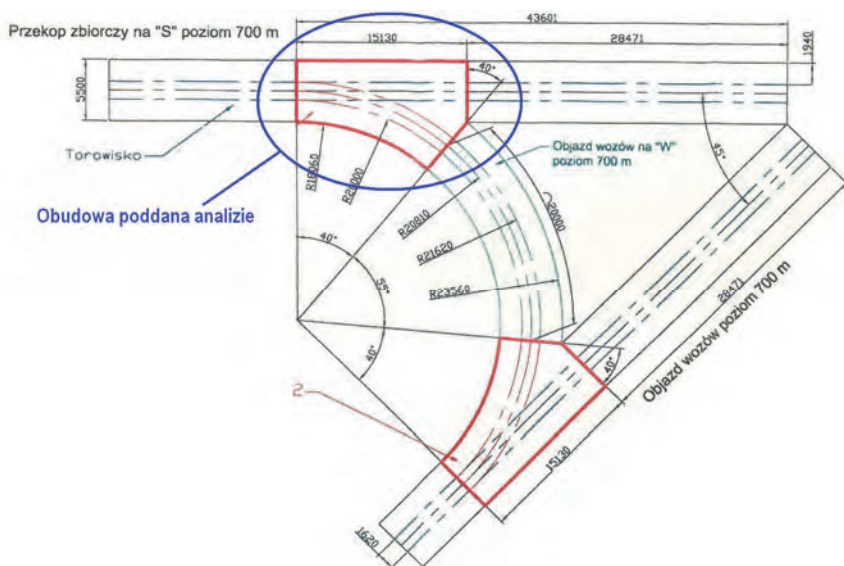
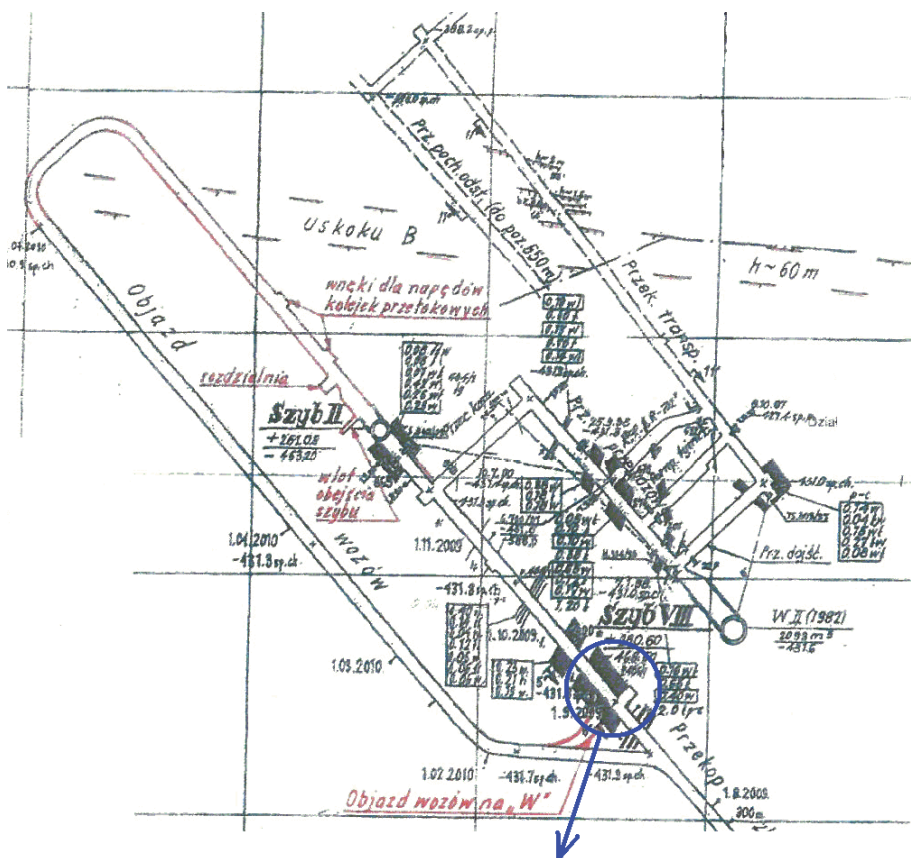
W kopalni „Chwałowice” wiosną i latem roku 2011 zabudowane zostały dwie bliźniacze portalowe obudowy odgałęzienia. W obu przypadkach przeprowadzono pomiary deformacji. Jednak w jednej konstrukcji nie stwierdzono deformacji w stosunku do wymiarów nominalnych i w związku z tym nie poddano jej dalszej analizie.

Badaniom poddano konstrukcję obudowy, zaprojektowaną i wykonaną na początku roku 2011, przeznaczoną do zabezpieczenia połączenia przekopu zbiorczego na „S” poziom 700 m z objazdem wozów na „W” (Rotkegel 2012b). Zarys zaprojektowanej konstrukcji przedstawiono na rysunku 5.12, natomiast fragment mapy z zaznaczonym połączeniem wyrobisk na rysunku 5.13. Nominalna szerokość portalu wynosiła 7442 mm, a rozpiętość wspornika – 7237 mm. Nominalna wysokość konstrukcji zasadniczej wynosiła 3900 mm. W analizowanej obudowie portal składał się z trzech belek, natomiast wspornik – z pięciu. Cała konstrukcja zasadnicza posadowiona była na spodku wyrobiska przez elementy upodatniające.

Dla warunków geologiczno-górnictwowych w rejonie zabudowy obudowy w oparciu o „Uprozczone zasady doboru obudowy...” określona została wartość obciążenia $q_0 = 0,063$ MPa. W pierwszym etapie obliczeń wytrzymałościowych portalu i wspornika zbudowano model z elementów typu SHELL (powłoka), odpowiadający geometrii zasadniczej konstrukcji obudowy odgałęzienia. Model obciążono w taki sposób, aby otrzymać obciążenie odpowiadające ciśnieniu górotworu, występującym w miejscu



Rys. 5.12. Zarys obudowy odgałęzienia portalowego przekopu zbiorczego na „S” poziom 700 m z objazdem wozów na „W” w kopalni „Chwałowice”



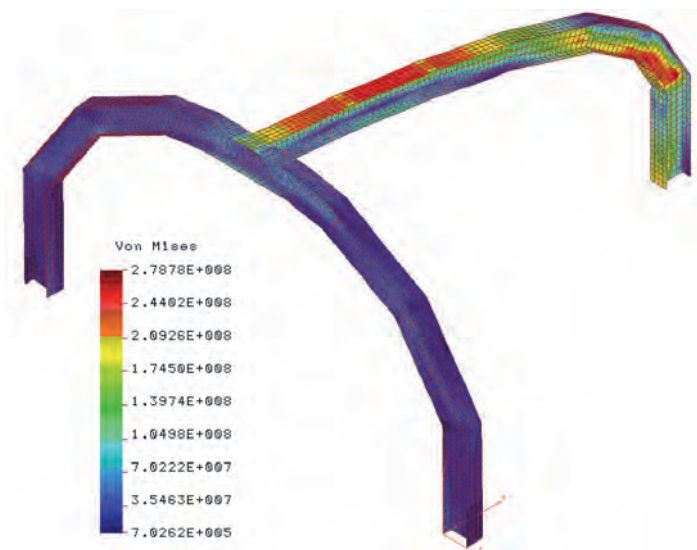
Rys. 5.13. Lokalizacja odgałęzienia przekopu zbiorczego na „S” poziom 700 m z objazdem wozów na „W” w kopalni „Chwałowice”

zastosowania obudowy, $q_0 = 0,063$ MPa. Model podparty został podporami stałymi, zlokalizowanymi w miejscu kontaktu ze spodkiem wyrobiska. Dodatkowo założono podparcie belek upodatniających tak, aby uniemożliwić zwiększenie rozpiętości portalu i wspornika. Na rysunku 5.14 przedstawiono sposób podparcia i obciążenia modelu.



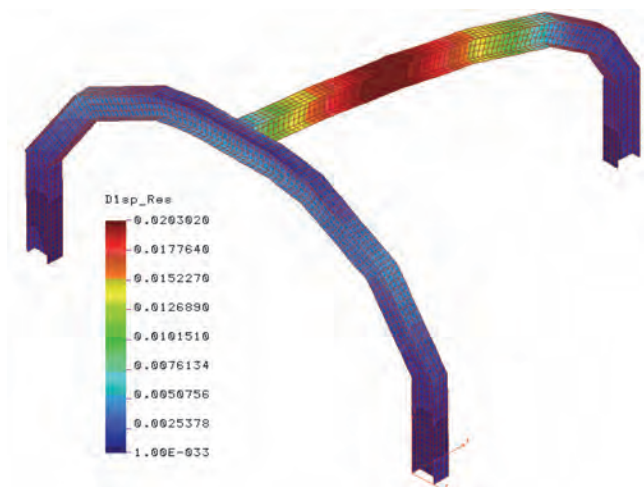
Rys. 5.14. Sposób podparcia i obciążenia modelu obudowy odgałęzienia

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano między innymi deformacje modelu, reakcje podporowe, składowe naprężenia i ich rozkład. Na rysunku 5.15 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych wyznaczonych według hipotezy Hubera. Maksymalna wartość naprężeń wywołanych założonym obciążeniem ($\sigma_{red \max} = 278,8$ MPa) była mniejsza od wytrzymałości materiału użytego na konstrukcję zasadniczą (stali 18G2A – S355).



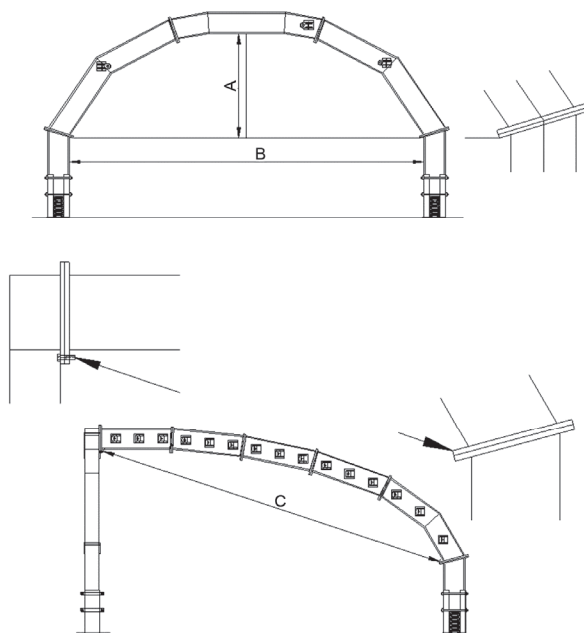
Rys. 5.15. Rozkład naprężeń zredukowanych w konstrukcji
(naprężenia w Pa, skala deformacji 10×)

Pod założonym obciążeniem konstrukcja ugięła się o około 20,3 mm. Deformacje modelu przedstawiono na rysunku 5.16.



Rys. 5.16. Deformacje konstrukcji (przemieszczenie w m, skala deformacji 10×)

Dla weryfikacji uzyskanych wartości obciążeń, jakimi górotwór oddziałuje na obudowę, przeprowadzono pomiary deformacji konstrukcji zabudowanej w wyrobisku. W trakcie badań mierzono przede wszystkim położenie belki głównej portalu względem przyjętej bazy pomiarowej. Sposób dokonywania pomiaru przedstawiono na rysunku 5.17, a wyniki zestawiono w tabeli 5.2.

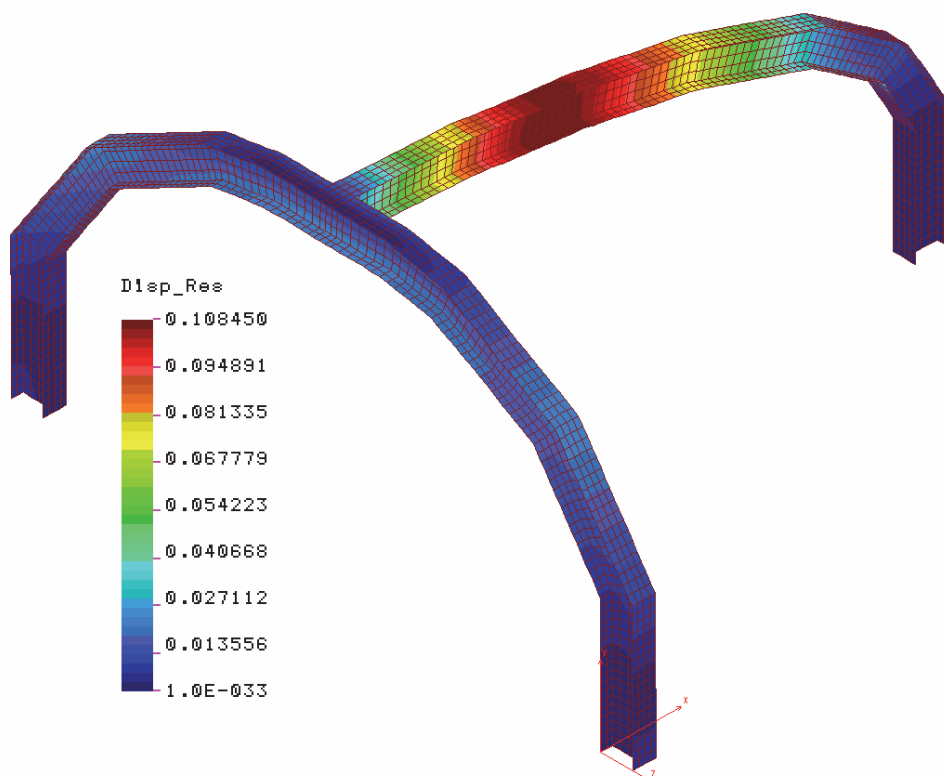


Rys. 5.17. Mierzone wielkości i przyjęta baza pomiarowa

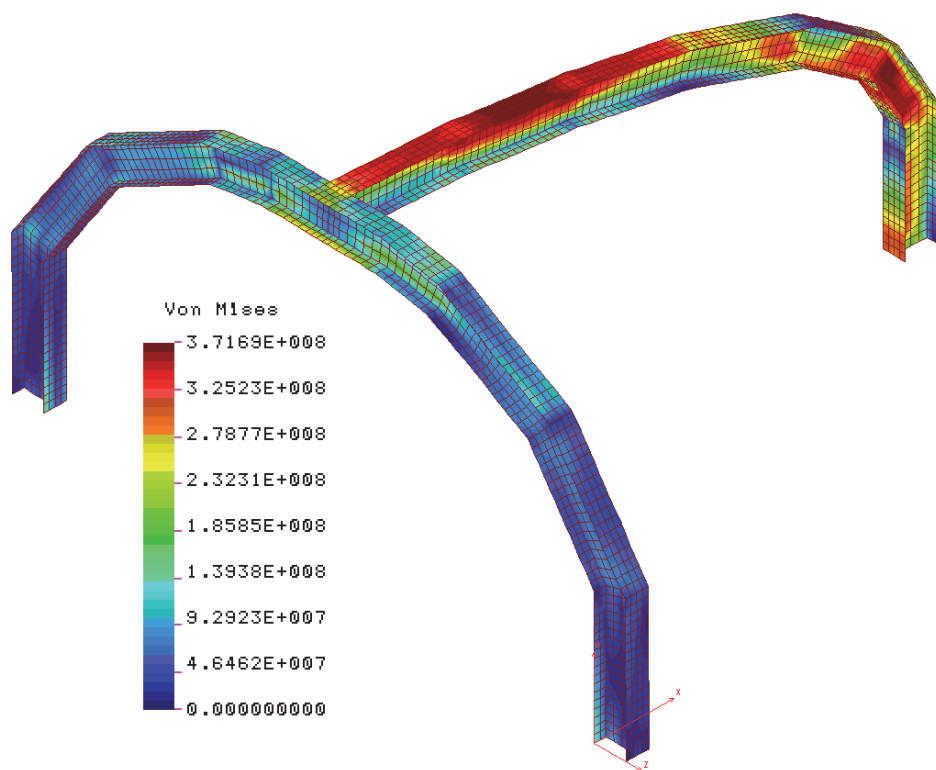
Tabela 5.2. Wyniki pomiarów deformacji obudowy odgałęzienia portalowego przekopu zbiorczego na „S” poziom 700 m z objazdem wozów na „W” w kopalni „Chwałowice” (pomiarzy wykonano 28.12.2011 r. – siedem miesięcy od zabudowy)

A, mm			B, mm			C, mm				
wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny	wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny	wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny		
2208	2208	2212	7443	7443	7442	7429	7430,5	7422		
2208			7444			7432				
2208			7443							
2208			7442							
Różnica	-4.0		Różnica	+1.0		Różnica	+8.5			

Kolejnym etapem analiz było poszukiwanie wartości obciążenia, przy jakiej model numeryczny obudowy odgałęzienia zdeformuje się (ugnie się) w ten sam sposób jak rzeczywista konstrukcja zabudowana w wyrobisku. W tym celu w modelu numerycznym zwiększano obciążenie aż do osiągnięcia ugięcia portalu 4,0 mm w miejscu prowadzenia pomiarów (wymiar A). W wyniku analizy otrzymano zdeformowaną postać modelu, a także odpowiadający jej rozkład naprężeń zredukowanych. Wyniki tych obliczeń – deformacje i odpowiadające im naprężenia zredukowane przedstawiono na rysunkach 5.18 i 5.19. Uzyskany w badaniach stan obudowy odpowiadał obciążeniom na poziomie $q_0 = 0,107 \text{ MPa}$.



Rys. 5.18. Ogólna postać zdeformowanego modelu przy obniżeniu belki głównej portalu 4,0 mm (przemieszczenia w m, skala deformacji 1×)

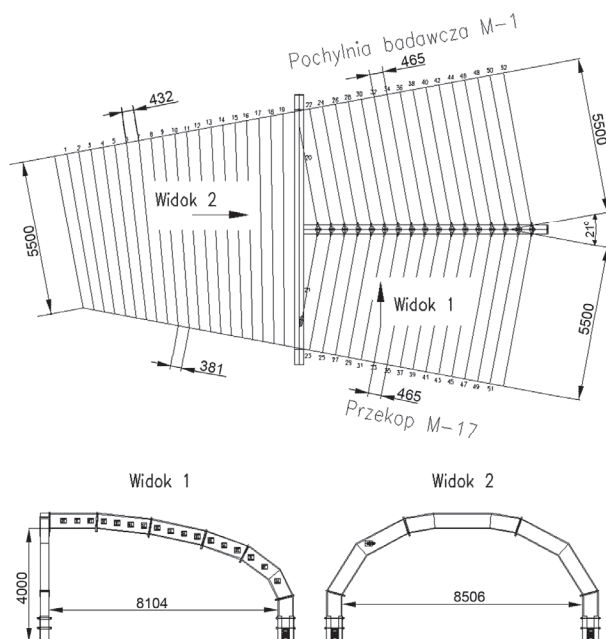


Rys. 5.19. Rozkład naprężeń zredukowanych dla ugięcia portalu 4,0 mm (naprężenia w Pa, skala deformacji 1x)

Jak pokazują rysunki 5.18–5.19, uzyskanie ugięć belek portalu na poziomie 4 mm wiąże się z oddziaływaniem obciążenia o wartości $q_0 = 0,107$ MPa, co powoduje powstawanie naprężeń zredukowanych w najbardziej wyężonym miejscu konstrukcji $\sigma_{red} = 371,7$ MPa. Można zatem stwierdzić, że uzyskane w wyniku badań dołowych i analizy numerycznej obciążenia obudowy były 1,7 razy większe od wyznaczonych za pomocą „Uproszczonych zasad doboru obudowy...”.

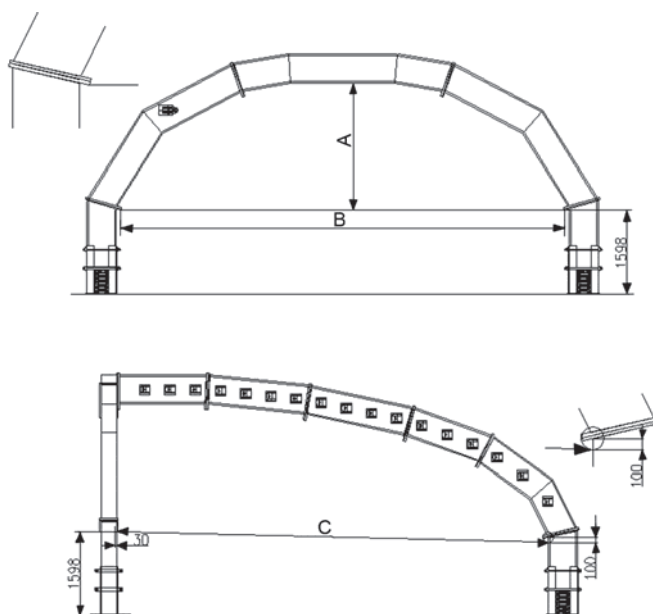
5.3.3. Odgałęzienie portalowe w kopalni „Marcel”

Podobne pomiary, jak przedstawiono powyżej, przeprowadzono także dla portalowej obudowy odgałęzienia pochylni badawczej M-1 z przekopem M-17 w kopalni „Marcel” (Rotkegel 2012b). Obudowa została zaprojektowana wiosną, a zabudowana latem roku 2011. Kompletna obudowa składa się z portalu i wspornika oraz 19 odrzwi przejściowych i 34 odrzwi uzupełniających. Odrzwia wykonano z kształtownika V36, natomiast konstrukcja zasadnicza została wykonana z dwuteownika szerokostopowego IPB550 zgodnie z PN-H-93452 ze stali 18G2A (S355). Zarys konstrukcji przedstawiono na rysunku 5.20.



Rys. 5.20. Obudowa odgałęzienia pochylni badawczej M-1 z przekopem M-17

Obudowę poddano pomiarom deformacji. Mierzono rozpiętość portalu i wspornika oraz wysokość wspornika od przyjętej bazy pomiarowej. Na rysunku 5.21 przedstawiono mierzone wielkości. Uzyskane wymiary odniesiono do wartości nominalnych (tab. 5.3).



Rys. 5.21. Sposób dokonywania pomiarów

Tabela 5.3. Wyniki pomiarów deformacji obudowy odgałęzienia portalowego pochylni badawczej M-1 z przekopem M-17 w kopalni „Marcel” (pomiaru wykonano 29.12.2011 r. – siedem miesięcy od zabudowy)

A, mm			B, mm			C, mm		
wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny	wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny	wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny
2433	2434,5	2405	8294	8297,0	8332	8123	8123,1	8137
2434			8294			8127		
2434			8301			8122		
2437			8294			8126		
			8298			8125		
			8296			8121		
			8302			8118		
Różnica	+ 29,5		Różnica	- 35,0		Różnica	- 13,9	

Jak wynika z przedstawionych wartości pomiarów konstrukcja miała większą wysokość niż wartość nominalna, zaprojektowana. Natomiast wymiary pomierzone rozpiętości portalu i wspornika były mniejsze. Wynikać to mogło z dokładności wykonania poszczególnych elementów lub z innego obciążenia konstrukcji niż przyjęte w analizie numerycznej. Wątpliwości te mogłyby rozwiązać pomiary wykonane w trakcie próbnego montażu konstrukcji i bezpośrednio po zabudowie w wyrobisku. W związku z powyższym odstąpiono od dalszej analizy tej konstrukcji.

5.3.4. Skrzyżowanie portalowe w Przedsiębiorstwie Górniczym „Silesia”

W ramach prowadzonych prac badawczych badaniom poddano także konstrukcję obudowy skrzyżowania przekopu północnego poziom IV z pochylnią odstawczo-wentylacyjną w Przedsiębiorstwie Górniczym „Silesia” (Rotkegel 2012b). Obudowa została zaprojektowana i zabudowana wiosną roku 2011. Kompletna obudowa składała się z portalu i dwóch wsporników oraz 32 odrzwi uzupełniających. Odrzvia wykonano z kształtownika V32, natomiast konstrukcja zasadnicza została wykonana z dwuteownika szerokostopowego IPB550 zgodnie z PN-H-93452 ze stali 18G2A (S355). Zarys konstrukcji przedstawiono na rysunku 5.22. Obudowę poddano pomiarom deformacji. Mierzono rozpiętość portalu i wspornika oraz wysokość wspornika od przyjętej bazy pomiarowej. Na rysunku 5.23 przedstawiono zmierzone wielkości. Uzyskane wymiary odniesiono do wartości nominalnych; zestawiono je w tabeli 5.4.

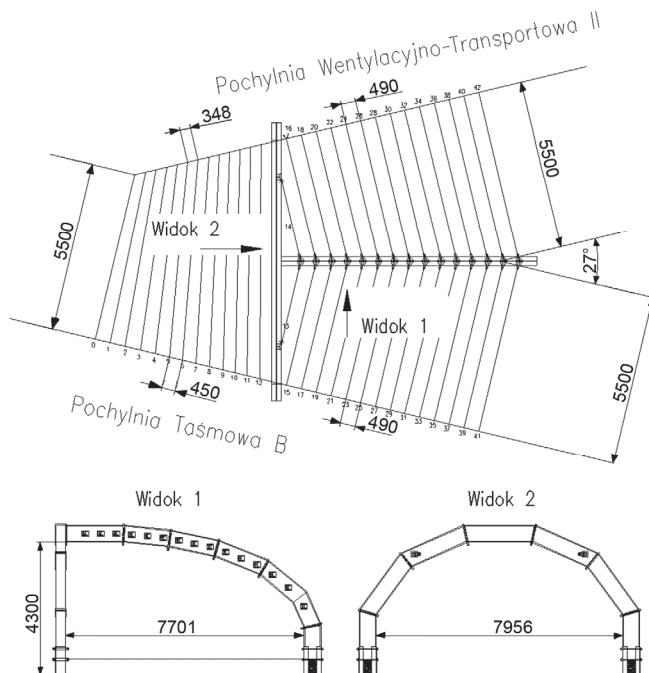
Jak wynika z przedstawionych wyników pomiarów, konstrukcja miała większą wysokość niż konstrukcja nominalna – zaprojektowana. Natomiast pomierzone wymiary rozpiętości portalu i wsporników były znacznie mniejsze od nominalnych. Tak duże różnice mogły wynikać jedynie z dokładności wykonania poszczególnych elementów. Należy raczej wykluczyć działanie innego obciążenia konstrukcji niż przyjęte w analizie numerycznej. Tak duże zawężenie rozpiętości konstrukcji skutkowałoby wyraźnymi jej deformacjami. Nie można jednak wykluczyć jednoczesnego wystąpienia wymienionych wyżej czynników. Wątpliwości te mogłyby rozwiązać pomiary wykonane w trakcie próbnego montażu konstrukcji i bezpośrednio po zabudowie wyrobiska. W związku z powyższym odstąpiono od dalszej analizy tej konstrukcji.

Tabela 5.4. Wyniki pomiarów deformacji obudowy skrzyżowania przekopu północnego poziom IV z pochylnią odstawczo-wentylacyjną w Przedsiębiorstwie Górniczym „Silesia” (pomiarzy wykonano 5.01.2012 r. – sześć miesięcy od zabudowy)

A, mm			B, mm			C, mm		
wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny	wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny	wymiar zmierzony	średnia z pomiarów	wymiar nominalny
2497	2507,0	2486,0	7402	7398,8	7470,0	9469	9468,2	9542,0
2506			7397			9467		
2507			7400			9467		
2511			7397			9464		
2506			7397			9471		
2507			7397			9470		
2515			7400			9464		
						9474		
Różnica	+ 21,0		Różnica	- 71,2		Różnica	- 73,8	

5.3.5. Odgałęzienie portalowe w Zakładzie Górniczym „Sobieski”

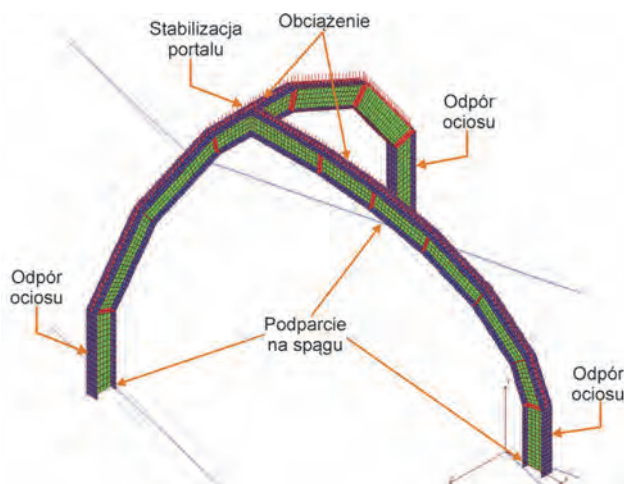
Obudowa odgałęzienia portalowego pochylni taśmowej B z pochylnią wentylacyjno-transportową II w Zakładzie Górniczym „Sobieski” składała się z konstrukcji zasadniczej oraz 12 odrzwi przejściowych i 30 uzupełniających. Konstrukcja zasadnicza, z belek o przekroju dwuteowym IPB550, składała się z portalu i połączonego z nim wspornika. Konstrukcję zasadniczą wykonano ze stali 18G2A (S355). Na rysunku 5.24 przedstawiono schemat obudowy oraz konstrukcję portalu i wspornika. Obudowa została zaprojektowana i wyprodukowana w styczniu roku 2011, a jej zabudowę wykonano w następnym miesiącu.



Rys. 5.24. Obudowa odgałęzienia pochylni taśmowej B z pochylnią wentylacyjno-transportową II w Zakładzie Górniczym „Sobieski”

Odgałęzienie pochylni taśmowej B z pochylnią wentylacyjno-transportową II wykonane zostało w południowej części partii „Wschód” w pokładzie 207. Na podstawie analizy warunków geologiczno-górnich w miejscu zabudowy obliczono i przyjęto wartość obciążenia obudowy odgałęzienia pochylni taśmowej B z pochylnią wentylacyjno-transportową II $q_0 = 0,12$ MPa. Dla przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej konstrukcji przedmiotowej obudowy odgałęzienia zbudowano model z elementów typu SHELL (powłoka), odpowiadający geometrii konstrukcji obudowy odgałęzienia.

Model obciążono w ten sposób, aby otrzymać obciążenie odpowiadające ciśnieniu górotworu występującym w miejscu zastosowania obudowy. Ciśnienie to, wyznaczone zgodnie z „Uproszczonymi zasadami doboru obudowy...”, osiąga 0,12 MPa. Model podparty został podporami stałymi, zlokalizowanymi w miejscu kontaktu ze spągami. Dodatkowo założono podparcie belek upodatkowanych tak, aby uniemożliwić zwiększenie ich rozpiętości. Na rysunku 5.25 przedstawiono sposób podparcia i obciążenia modelu.



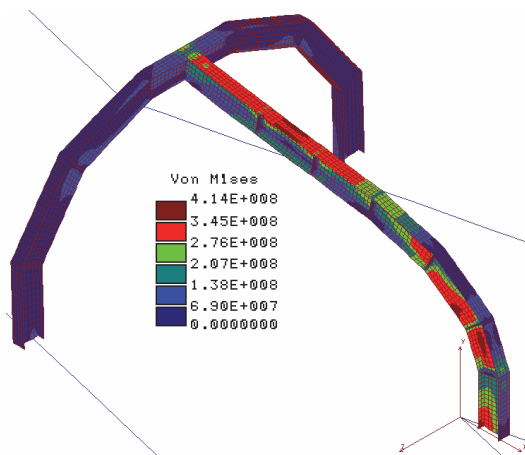
Rys. 5.25. Sposób podparcia i obciążenia modelu obudowy odgałęzienia

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano między innymi deformacje modelu, reakcje podporowe, składowe naprężenia i ich rozkład. Na rysunku 5.26 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych wyznaczonych według hipotezy Hubera. Maksymalne wartości naprężeń wywołanych założonym obciążeniem lokalnie przekraczały wytrzymałość materiału użytego na konstrukcję zasadniczą (stal 18G2A – S355).

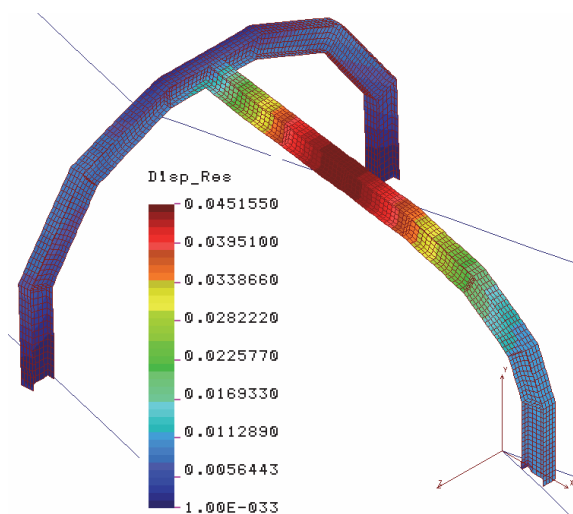
Pod założonym obciążeniem konstrukcja ugięła się o 45 mm. Deformacje modelu przedstawiono na rysunku 5.27.

W analizowanym modelu konstrukcji maksymalne wartości naprężeń, wywołane obciążeniem lokalnie w niewielkim stopniu przekraczały wytrzymałość materiału użytego na konstrukcję ($R_e = 345$ MPa). Mogło zatem wystąpić lokalne uplastycznienie konstrukcji i redystrybucja naprężeń.

Już w trakcie zabudowy w wyrobisku stwierdzono uszkodzenie (zerwanie) śrub i nakrętek w połączeniu belek wspornika. Spowodowane to było zastosowaniem nakrętek o zbyt niskiej wytrzymałości, niezgodnych z projektem, co skutkowało zerwaniem ich gwintu i w konsekwencji uszkodzeniem połączenia belek wspornika W2



Rys. 5.26. Rozkład naprężeń zredukowanych w konstrukcji (naprężenia w Pa, skala deformacji 10×)



Rys. 5.27. Deformacje konstrukcji (przemieszczenie w m, skala deformacji 10×)

z W3. Zerwanych zostało dziewięć połączeń śrubowych najniżej usytuowanych na blachach czołowych. Dodatkowo wystąpiło rozwarcie i wygięcie blach czołowych. Uszkodzone elementy przedstawiono na fotografiach 5.2 i 5.3. Konstrukcję w miejscu wystąpienia uszkodzeń dodatkowo podparto stojakami. Zdarzenie to pozwoliło na określenie rzeczywistych sił występujących w miejscu połączenia uszkodzonych belek i na tej podstawie na obliczenie obciążeń działających na obudowę. Dla realizacji tego celu przeprowadzono wytrzymałościową analizę numeryczną. Zmodyfikowano wykorzystany wcześniej model konstrukcji, wprowadzając na styku belek W2 i W3 elementy, które odwzorowywały uszkodzone śruby. W trakcie badań podejmowano próby określenia wartości obciążenia, które spowoduje powstanie w śrubach sił osiowych równych ich nośności. Maksymalne obciążenie przenoszone przez nakrętki połączeń

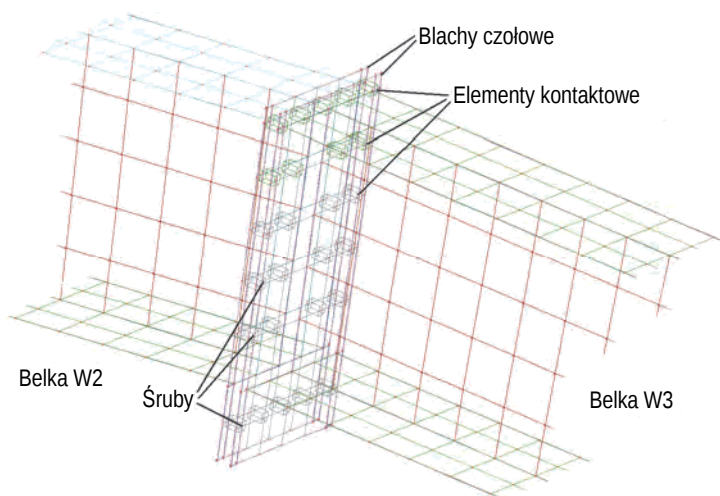
śrubowych określono w badaniach stanowiskowych. Uzyskano wartość około 200 kN, co spełniło wymagania klasy wytrzymałościowej zaledwie 4 zamiast 8. Na rysunku 5.28 przedstawiono zmodyfikowany model konstrukcji, uwzględniający połączenie belek W2 i W3.



Fot. 5.2. Zerwane nakrętki w połączeniach śrubowych belek W2 i W3

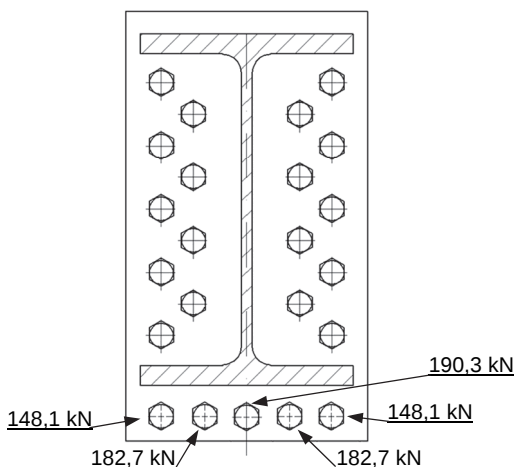


Fot. 5.3. Nowe śruby i nakrętki w połączeniu belek W2 i W3



Rys. 5.28. Fragment modelu konstrukcji z zamodelowanymi śrubami

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości obciążeń śrub w dolnym rzędzie połączenia czołowego, wywołane obciążeniem konstrukcji obudowy, odpowiadającym obciążeniom ze strony górotworu ($q_0 = 0,12 \text{ MPa}$). Wartości tych sił przedstawiono na rysunku 5.29.



Rys. 5.29. Wartości sił obciążających śruby w połączeniu belek W2 i W3

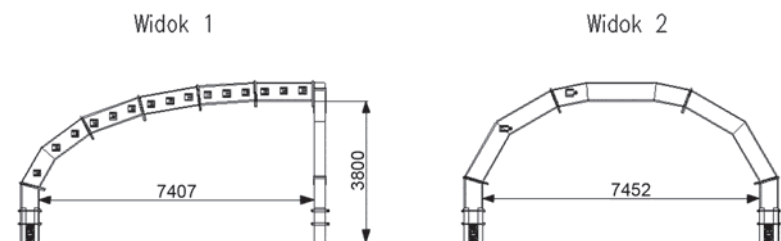
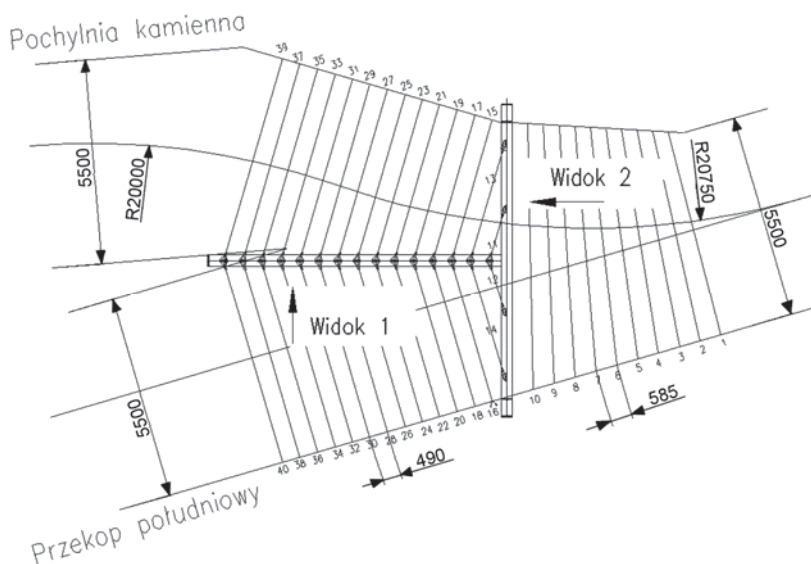
Obciążenie środkowej śruby jest w przybliżeniu równe maksymalnej sile, jaką są w stanie przenosić zastosowane nakrętki. Należy zatem przypuszczać, że uszkodzenie nakrętek w połączeniu rozpoczęło się od środkowej śruby w dolnym rzędzie. Takie przebieg uszkodzenia wynika z większej sztywności połączenia w pionowej osi (w pobliżu środka dwuteownika). Po przekroczeniu nośności tego połączenia i ścięciu gwintu w nakrętce, wzrosło obciążenie w sąsiadujących śrubach, a po uszkodzeniu ich nakrętek, proces przeniósł się na śruby wyżej położone – w następnych rzędach. Na skutek znacznych ugięć konstrukcji, wynikających z uszkodzenia połączenia belek wspornika, nastąpiło odprężenie górotworu i zmniejszenie obciążeń działających na obudowę, co przyhamowało proces uszkodzania kolejnych śrub i nakrętek oraz pozwoliło na awaryjne podparcie konstrukcji.

W celu przywrócenia funkcjonalności obudowy wymieniono wszystkie śruby i nakrętki w konstrukcji zasadniczej oraz przykotwiono belki wspornika w rejonie uszkodzenia.

Uzyskana w trakcie analiz duża zgodność otrzymanych wartości sił rozciągających w śrubach połączenia belek wspornika W2 i W3 z nośnością nakrętek może świadczyć o tożsamy wartościach obciążeń przyjętych w modelowaniu i wartościach rzeczywistych, które spowodowały uszkodzenie nakrętek.

5.3.6. Odgałęzienie portalowe w kopalni „Murcki-Staszic”

Obudowa portalowa połączenia przekopu południowego S z pochylnią kamienną na poziomie 720 m została zaprojektowana i wykonana pod koniec roku 2007. Zabudowę w wyrobisku przeprowadzono na początku roku 2008. Schemat konstrukcji przedstawiono na rysunku 5.30.



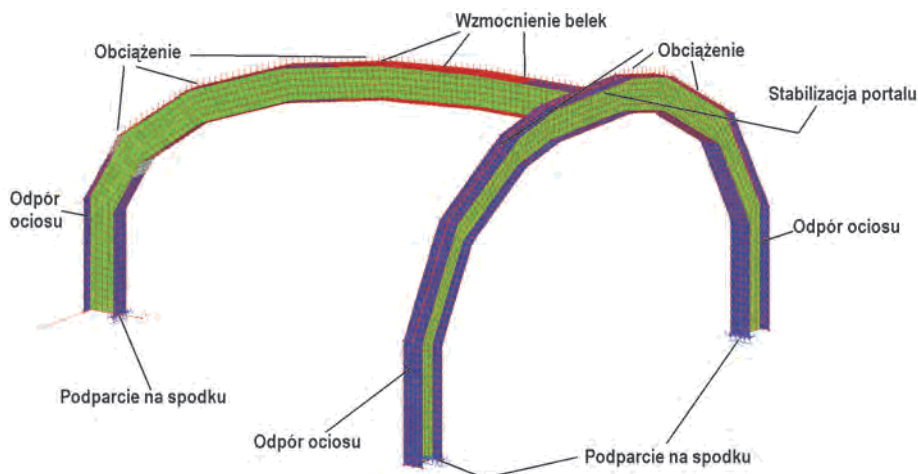
Rys. 5.30. Obudowa połączenia przekopu południowego S z pochylnią kamienną na poziomie 720 m

Obudowa składała się z konstrukcji zasadniczej oraz 10 odrzwi przejściowych i 30 odrzwi uzupełniających połączonych ze wspornikiem, wykonanych z kształownika V32. Konstrukcja wykonana została z belek dwuteowych IPB500 lokalnie wzmocnionych, wykonanych ze stali 18G2A. Na portal złożyły się trzy belki, natomiast na wspornik – pięć. Zarówno portal, jak i wspornik zakończone były elementami upodabniającymi, spoczywającymi na spodku wyrobiska.

Na podstawie parametrów górotworu w miejscu zabudowy obliczono i przyjęto do dalszych analiz wartość obciążenia równą 0,105 MPa.

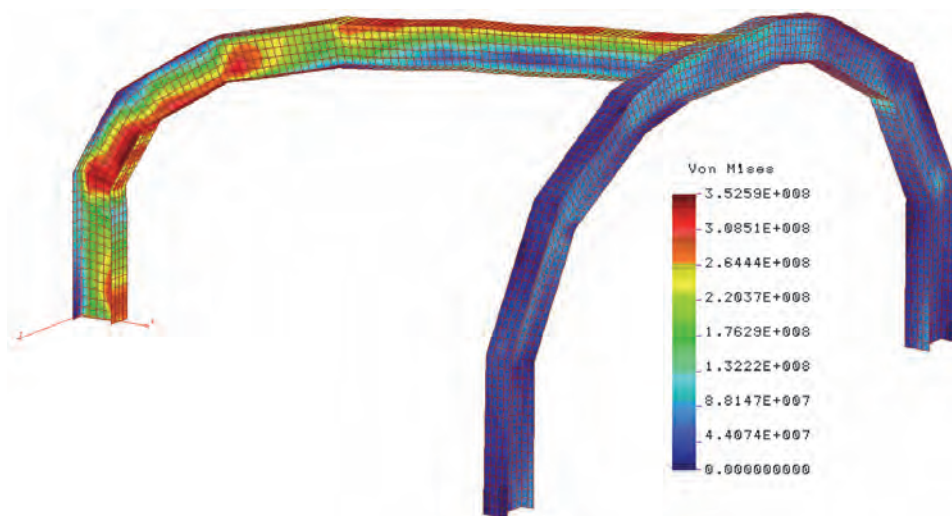
W celu przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej przedmiotowej obudowy odgałęzienia zbudowano model z elementów typu SHELL (powłoka), odpowiadający geometrii konstrukcji obudowy odgałęzienia. W kolejnym kroku zadano odpowiednie parametry materiałowe. Podobnie jak w poprzednim przypadku przyjęto materiał nieliniowy przybliżony charakterystyką biliniową, odpowiadający stali 18G2A (S355). Model obciążono w ten sposób, aby otrzymać obciążenie odpowiadające ciśnieniom górotworu występującym w miejscu zastosowania obudowy. Ciśnienie to, wyznaczone w oparciu o „Uprozczone zasady doboru obudowy...”, osiąga 0,105 MPa. Model podparty został podporami stałymi zlokalizowanymi w miejscu kontaktu ze spągiem.

Dodatkowo założono podparcie belek upodatniających tak, aby uniemożliwić zwiększenie ich rozpiętości. Na rysunku 5.31 przedstawiono sposób podparcia i obciążenia modelu.

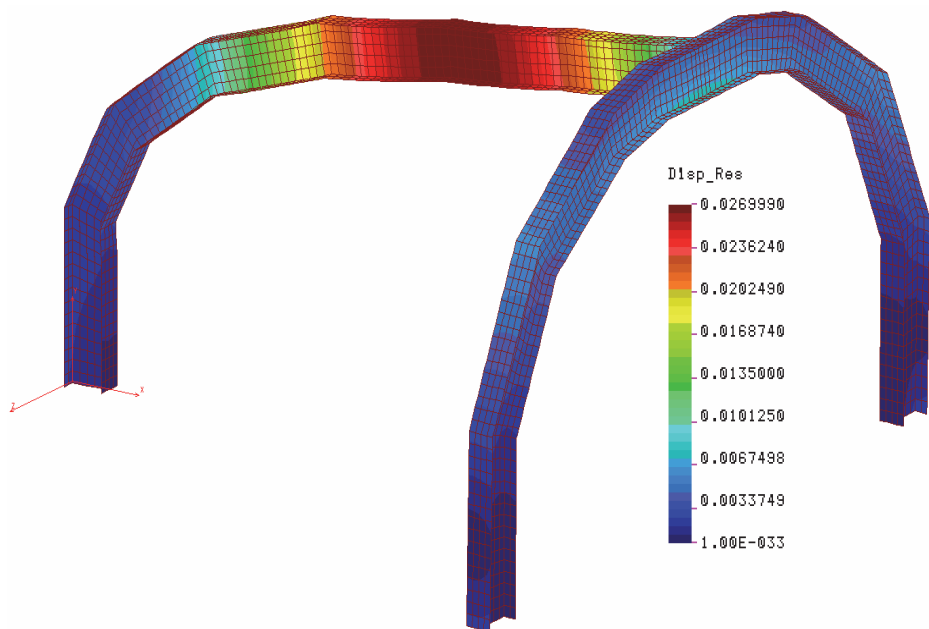


Rys. 5.31. Sposób podparcia i obciążenia modelu obudowy odgałęzienia

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano między innymi deformacje modelu, reakcje podporowe, składowe naprężeń i ich rozkład. Na rysunku 5.32 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych wyznaczonych według hipotezy Hubera. Maksymalna wartość naprężeń wywołanych założonym obciążeniem wynosiła $\sigma_{red} = 353 \text{ MPa}$ i lokalnie przekraczała wytrzymałość materiału użytego na konstrukcję zasadniczą (stal 18G2A – S355). Pod założonym obciążeniem konstrukcja ugięła się o 27 mm. Deformacje modelu przedstawiono na rysunku 5.33.



Rys. 5.32. Rozkład naprężeń zredukowanych w konstrukcji
(naprężenia w Pa, skala deformacji 10×)



Rys. 5.33. Deformacje konstrukcji (przemieszczenie w m, skala deformacji 10×)

W analizowanym modelu konstrukcji maksymalne wartości naprężeń wywołane obciążeniem, lokalnie, w niewielkim stopniu, przekraczały granice plastyczności materiału użytego na konstrukcję ($R_e = 345$ MPa). Mogło zatem wystąpić lokalne uplastycznienie konstrukcji i redystrybucja naprężeń.

W połowie roku 2011 stwierdzono uszkodzenie połączenia belek wspornika W2 i W3. Uszkodzenie to polegało na ścięciu gwintu w nakrętkach w dolnej części blach czołowych oraz rozwarciu przedmiotowego połączenia. Zaistniałe uszkodzenia przedstawiono na fotografiach 5.4 i 5.5, a fotografie 5.6 i 5.7 przedstawiają jedną z wymienionych śrub i nakrętki. Na gwintowej części śruby widać pozostałości po gwincie nakrętki. Na wewnętrznych powierzchniach nakrętek natomiast widoczne są pozostałości po ściętych zwojach gwintu. Zdarzenie to pozwoliło na określenie rzeczywistych sił występujących w miejscu połączenia uszkodzonych belek i na tej podstawie na obliczenie obciążeń działających na obudowę. W tym celu przeprowadzono wytrzymałościową analizę numeryczną. Zmodyfikowano wykorzystany wcześniej model konstrukcji, wprowadzając na styku belek W2 i W3 elementy, które odwzorowywały uszkodzone śruby. Zmodyfikowany model był analogiczny do przedstawionego w poprzednim podrozdziale (rys. 5.28). W trakcie badań podejmowano próby określania obciążenia obudowy, które spowoduje powstanie w śrubach sił osiowych równych ich nośności. Maksymalne obciążenie przenoszone przez nakrętki połączeń śrubowych przyjęto jak poprzednio na poziomie około 200 kN. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości obciążeń roboczych śrub w dolnym rzędzie połączenia czołowego blachami, wywołane obciążeniem konstrukcji obudowy odpowiadającym obciążeniom górotworem ($q_o = 0,105$ MPa). Wartości tych sił przedstawiono na rysunku 5.34.



Fot. 5.4. Ogólny widok połączenia belek wspornika W2 i W3



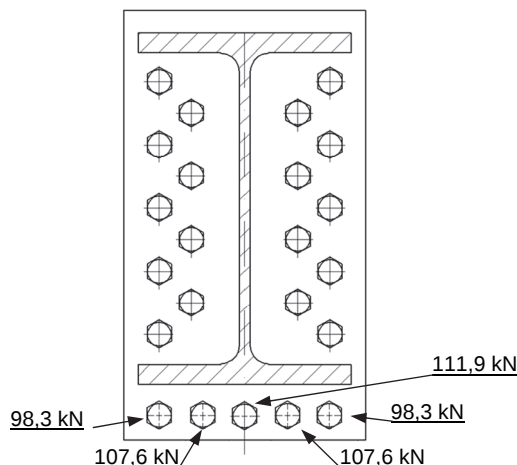
Fot. 5.5. Rozwarcie blach belek wspornika W2 i W3
(widoczne nowe śruby i nakrętki po wymianie)



Fot. 5.6. Uszkodzona śruba M24



Fot. 5.7. Uszkodzone nakrętki
– widoczny ścięty gwint



Rys. 5.34. Siły osiowe w śrubach, wywołane obciążeniem górnotworem

Obciążenie nakrętki środkowej śruby w dolnym rzędzie, inaczej niż w poprzednim przypadku, było wyraźnie mniejsze niż nośność samej nakrętki, stwierdzona w trakcie badań stanowiskowych. Mimo to doszło do uszkodzenia połączenia. Przyczyn takiego stanu rzeczy mogło być wiele. Najważniejsze z nich to niewielka ilość danych (parametrów górnotworu) do obliczenia spodziewanego obciążenia obudowy i przypuszczalnie niedokładne odzwierciedlenie w modelu warunków brzegowych – głównie sposobu podparcia konstrukcji. Nie można też wykluczyć naderwania gwintu nakrętek i w konsekwencji ich osłabienia już w trakcie montażu konstrukcji. Nakrętki nie były przystosowane do skręcania zaleconą w dokumentacji wartością momentu.

5.4. Interpretacja wyników i podsumowanie

Podsumowując przeprowadzone badania i obserwacje dołowe portalowych obudów odgałęzień i skrzyżowań, można stwierdzić, że wsteczne określenie obciążeń działających na obudowę jest zagadnieniem bardzo złożonym, w wielu przypadkach trudnym do realizacji, a w niektórych nawet niemożliwym. Przeanalizowano dwie możliwości prowadzenia badań. Pierwszą metodę, opartą na pomiarze deformacji konstrukcji, zastosowano w przypadku czterech konstrukcji obudowy odgałęzień (Rotkegel 2012b). Natomiast drugą metodę, opartą na analizie obciążenia uszkodzonych elementów, zastosowano w przypadku dwóch konstrukcji. Paradoksalnie uszkodzenie konstrukcji przyczyniło się do określenia rzeczywistych obciążeń działających na obudowę. W wyniku przeprowadzonych badań dla każdej z metod można sformułować poniższe wskazówki, spostrzeżenia oraz wnioski.

Metoda określania obciążeń obudowy, na podstawie deformacji konstrukcji, może być skutecznym i w miarę dokładnym sposobem. Wymaga jednak przyjęcia wielu baz pomiarowych i przeprowadzenia dokładnych pomiarów geometrii konstrukcji w trakcie próbnego montażu i tuż po zabudowie w wyrobisku. Pomocne mogą być techniki skanowania laserowego (Rotkegel i in. 2015a, 2015b; Rotkegel, Szade, Szot 2016). Nie gwarantuje to jednak możliwości prowadzenia badań i późniejszego przeprowadzenia pomiarów kontrolnych z uwagi na ewentualną niedostępność przyjętych baz

pomiarowych. Sytuacja taka miała miejsce w przypadku obudów odgałęzień zaprojektowanych dla kopalni „Bobrek-Centrum”, a wynikała z rozmieszczenia maszyn i urządzeń w rejonie połączenia wyrobisk. Ważnym zagadnieniem jest też miejsce pomiaru deformacji. Najwygodniejszy w warunkach dołowych jest pomiar ugięcia portalu, natomiast zdecydowanie lepsze rezultaty i większą dokładność można osiągnąć, dokonując pomiarów przemieszczenia drugiej lub trzeciej belki wspornika, licząc od portalu, gdzie przemieszczenia są kilkakrotnie większe. Niestety pomiar ten jest znacznie trudniejszy.

Metoda określania obciążeń na podstawie analizy wytrzymałościowej uszkodzonych elementów jest ciekawą alternatywą dla metody opartej na pomiarze deformacji. Najczęściej jest ona jednak stosowana w przypadku niezaplanowanego (awaryjnego) uszkodzenia konstrukcji. Trudno sobie wyobrazić elementy nośne konstrukcji, będące wskaźnikami obciążeń, przewidziane do zniszczenia w trakcie użytkowania. Prezentowane przykłady stanowią pewną dokumentację uszkodzeń obudowy spowodowanych niezamierzonym zastosowaniem nakrętek w połączeniach kołnierзовых belek, niepełniających odpowiednich wymagań. Odrębnym zagadnieniem, wykraczającym poza zakres niniejszego opracowania, jest zapewnienie dostaw elementów o wymaganej wytrzymałości i ich zastosowanie.

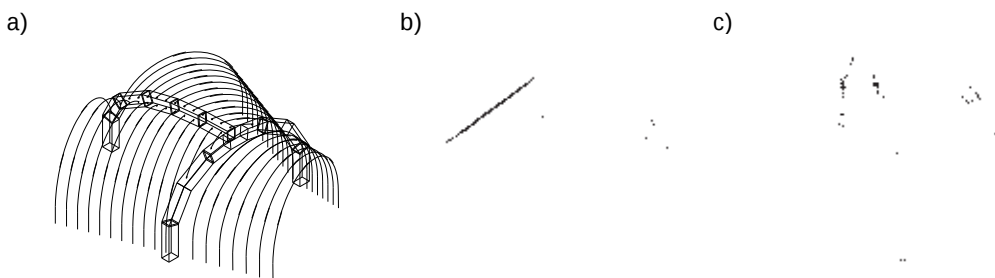
W obu analizowanych metodach konieczna jest, zwłaszcza w początkowym okresie stosowania, weryfikacja obliczonych obciążeń, dla kalibracji metody. Wymaga ona dokładnego rozpoznania warunków geologiczno-górnich w miejscu planowanego zabezpieczenia połączenia wyrobisk. Niezwykle istotna jest też znajomość rzeczywistych warunków podparcia i rozparcia konstrukcji w górotworze, pozwalająca na zbudowanie modelu odzwierciedlającego warunki brzegowe konkretnej obudowy. Szczególnie istotne są kwestie właściwej stabilizacji portalu i wspornika. Trudno przecenić także znajomość rzeczywistych parametrów mechanicznych materiałów zastosowanych na poszczególne elementy obudowy. Zwłaszcza dotyczy to konstrukcji badanych z uwzględnieniem nieliniowości fizycznej, kiedy to od przyjętych parametrów wytrzymałościowych zależy odpowiedź układu na obciążenia.

Przeprowadzone badania pozwoliły na przetestowanie metod w konkretnych warunkach dołowych na rzeczywistych konstrukcjach. Wskazały na konieczność rozbudowania obu metod.

6. PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH SZKIELETOWEJ OBUDOWY POŁĄCZEŃ WYROBISK KORYTARZOWYCH

6.1. Typowe konstrukcje obudowy odgałęzień i skrzyżowań

Typowe portalowe obudowy odgałęzień i skrzyżowań stosowane są do zabezpieczania połączeń wyrobisk korytarzowych pod kątem ostrym (odgałęzienia) i pod kątem zbliżonym do prostego (skrzyżowania) (Stoiński i in. 1996; Stałęga 1997, 1999, 2001; Rotkegel 2013a). Ich konstrukcje, przedstawione na rysunku 6.1, różnią się znacznie między sobą, jednak mają pewną wspólną cechę. Szkielet (konstrukcja zasadnicza) usytuowany jest w płaszczyźnie przenikania się obrysów łączących się wyrobisk. Dodatkowo w procesie projektowania przyjmuje się podstawowe założenia jak dla każdej obudowy wyrobisk korytarzowych. Obudowa połączenia wyrobisk powinna charakteryzować się odpowiednią nośnością, statecznością i właściwymi wymiarami w świetle. Jest to ważne zarówno ze względów wentylacyjnych, jak i dla zapewnienia odpowiednich skrajni i przestrzeni manewrowych dla maszyn i urządzeń. Istotny jest także podział konstrukcji na takie elementy, które mogą być dostarczone do miejsca zabudowy, a następnie montowane w bezpieczny i możliwie prosty sposób.



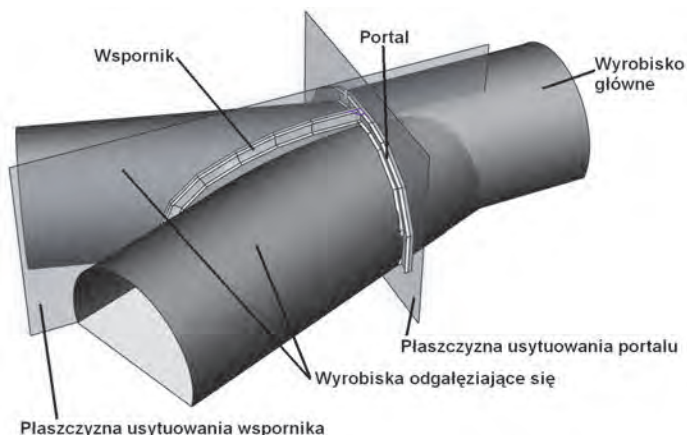
Rys. 6.1. Typowe rozwiązania portalowej obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych: a – obudowa odgałęzienia, b – obudowa skrzyżowania trójkątnego, c – obudowa odgałęzienia czterostronnego

Mimo że prezentowane konstrukcje można uznać za typowe, to każda z nich jest indywidualnie projektowana – stanowi rozwiązanie oryginalne, niepowtarzalne i dostosowane do warunków geologiczno-górnictwowych oraz wymagań odbiorcy (Rułka, Kowalski, Perek 1999; Rotkegel 2013a). Proces projektowo-konstrukcyjny jest wielopłaszczyznowy i obejmuje wiele etapów, często realizowanych równocześnie (Rotkegel 2003a; Rotkegel i Dragon 2006). Najważniejsze etapy to opracowanie koncepcji, analiza wytrzymałościowa i opracowanie dokumentacji rysunkowej.

6.1.1. Główne założenia projektowe

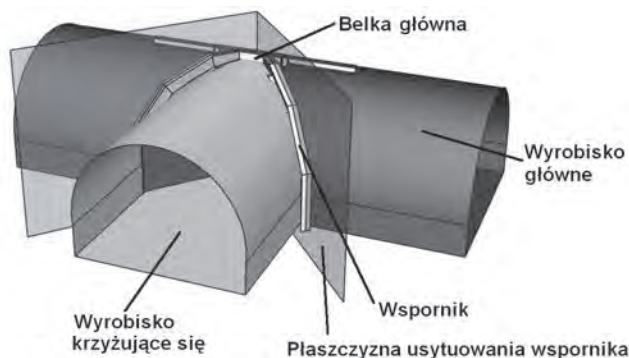
Obudowa portalowa odgałęzień najczęściej składa się z portalu i wspornika. Wspornik, wykonany z pięciu do siedmiu belek, lokalizowany jest ponad linią przenikania zarysów wyrobisk. Portal, stanowiący podparcie dla wspornika, jest rozpięty ponad

łączącymi się wyrobiskami. W zdecydowanej większości przypadków wykonany jest on z pięciu belek, rzadziej z trzech lub siedmiu. Oprócz tego zarówno portal, jak i wspornik posiadają dodatkowe belki o specjalnej konstrukcji, stanowiące upodatkowanie szkieletu. Belki wykonywane są z profili skrzynkowych lub dwuteowych (Rotkegel 2005). Ważnym elementem obudowy są odrzwia. Przejściowe zabezpieczają odcinek wyrobiska przed portalem, natomiast uzupełniające połączone są przegubowo ze wspornikiem. Na rysunku 6.2 przedstawiono założenia geometryczne przyjmowane w trakcie projektowania obudowy odgałęzień.



Rys. 6.2. Założenia do projektowania obudowy odgałęzienia

Typowa szkieletowa obudowa skrzyżowania trójstronnego składa się z dwóch wsporników. Usytuowane są one w płaszczyźnie przenikania się zarysów wyrobisk. Każdy ze wsporników składa się najczęściej z dwóch belek, rzadziej z trzech. W sklepieniu wyrobiska wsporniki połączone są z belką główną. Natomiast w części przyspodkowej belki połączone są z elementami upodatkiającymi o konstrukcji analogicznej jak w przypadku obudowy odgałęzień. Dodatkowo do końców belki głównej przykręcane są belki boczne. Ważnym elementem są odrzwia połączone z belką główną i podbudowujące belki boczne. Na rysunku 6.3 przedstawiono założenia projektowe.

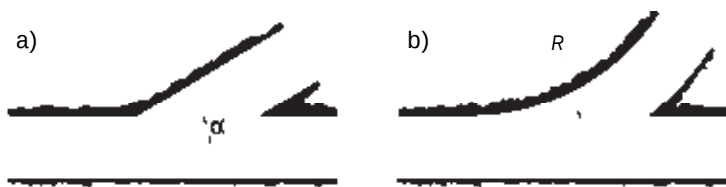


Rys. 6.3. Założenia do projektowania obudowy skrzyżowania

W przypadku skrzyżowania czterostronnego, szkielet (portal i dwa wsporniki) usytuowany jest analogicznie jak w odgałęzieniach, to znaczy w płaszczyznach przenikania się zarysów wyrobisk.

6.1.2. Przykłady portalowej obudowy odgałęzień

Zdecydowaną większość portalowych konstrukcji obudów połączeń wyrobisk korytarzowych stanowią obudowy jednostronnych odgałęzień – połączeń pod ostrym kątem wyrobisk prostoliniowych lub zakrzywionych, stanowiących podgrupę rozwidleń (rys. 2.5). Geometrię ich zarysów przedstawiono na rysunku 6.4. Odgałęzienia i rozwidlenia, oprócz wielkości wyrobisk, określane są odpowiednio przez kąt lub promień zakrzywienia wyrobiska (Rotkegel 2013a).



Rys. 6.4. Zarysy odgałęzień wyrobisk korytarzowych – prostoliniowych (a) i rozwidleń (b), α – kąt odgałęzienia, R – promień odgałęzienia

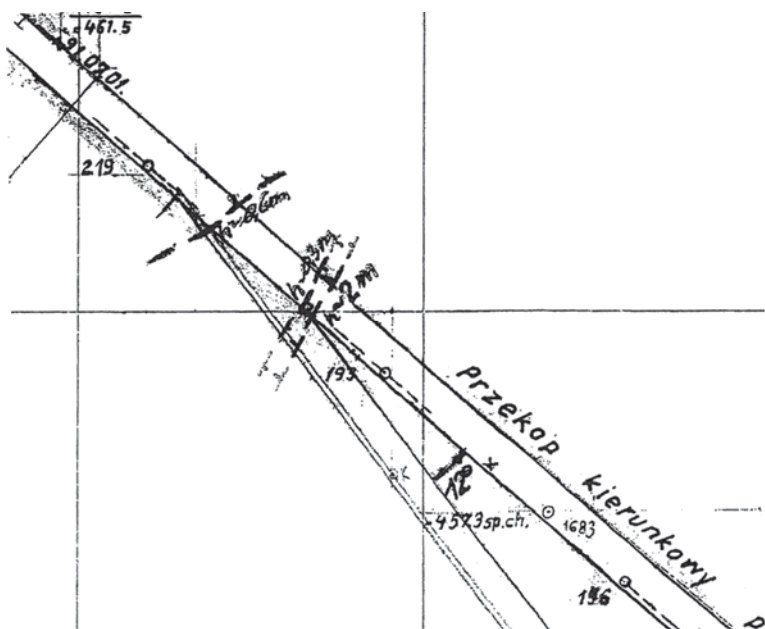
Ciekawym przykładem obudowy typowego, lecz wielkogabarytowego odgałęzienia wyrobisk korytarzowych, może być konstrukcja zaprojektowana, wykonana i zabudowana w kopalni „Bobrek-Centrum” w roku 2010. Na fotografiach 6.1 i 6.2 przedstawiono konstrukcję w trakcie próbnego montażu u producenta i konstrukcję na etapie zabudowy w kopalni, natomiast układ wyrobisk w miejscu połączenia i schemat obudowy przedstawiono na rysunkach 6.5 i 6.6.



Fot. 6.1. Konstrukcja obudowy odgałęzienia przekopu kierunkowego pod pokładem 510, poziom 774 m z przekopem odstawczym 774/585 w trakcie próbnego montażu u producenta

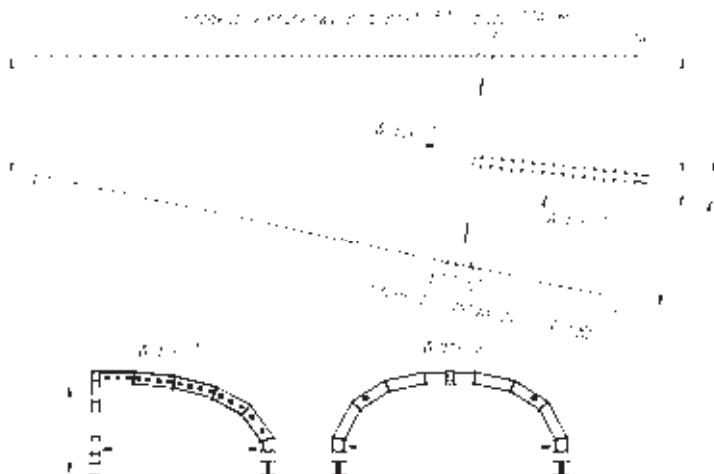


Fot. 6.2. Obudowa odgałęzienia przekopu kierunkowego pod pokładem 510, poziom 774 m z przekopem odstawczym 774/585 w końcowym etapie zabudowy w wyrobisku



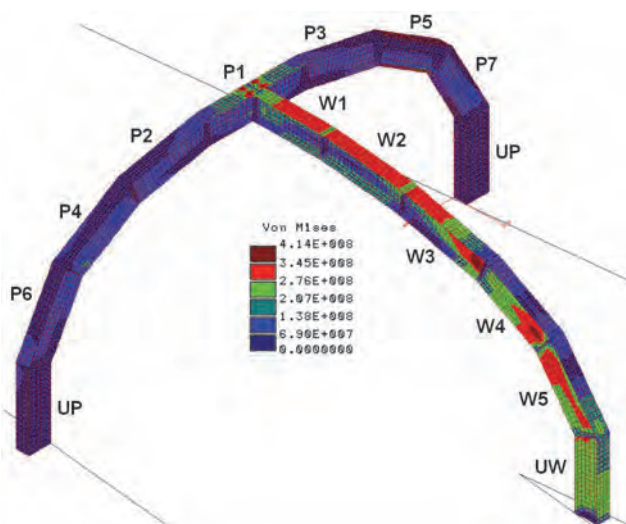
Rys. 6.5. Połączenie przekopu kierunkowego pod pokładem 510, poziom 774 m z przekopem odstawczym 774/585

Analiza wytrzymałościowa tego typu konstrukcji, dodatkowo o tak dużej rozpiętości, wskazuje jednoznacznie na konieczność właściwego rozparcia jej o ociosy wyrobiska, a także na konieczność zastabilizowania portalu. W obliczeniach uwzględniane są w takim przypadku rozpory i kontakt obudowy z górotworem. Natomiast w skrajnie niekorzystnych warunkach rozważane jest zastosowanie przykotwienia portalu kotwami ukośnymi (Rotkegel i Daniłowicz 2006). Na podstawie wyników analizy wytrzymałościowej można wnioskować o stanie naprężeń w konstrukcji obudowy. Portal jest w mniejszym stopniu wytyżony niż wspornik, zatem najczęściej projektuje się nieco



Rys. 6.6. Obudowa portalowa odgałęzienia przekopu kierunkowego pod pokładem 510, poziom 774 m z przekopem odstawczym 774/585

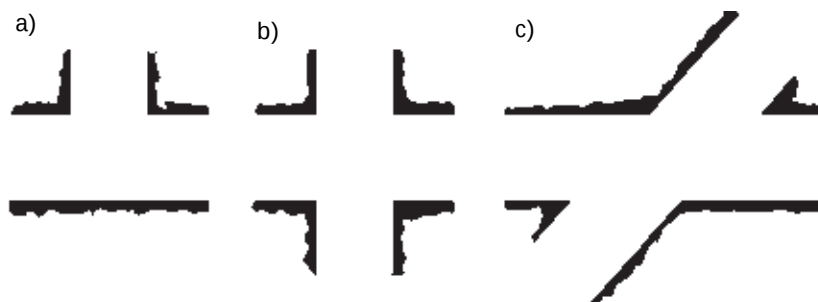
większą jego rozpiętość niż rozpiętość wspornika. Skracanie bardziej wyężonego wspornika kosztem zwiększania gabarytów portalu wiąże się jednak z koniecznością zabezpieczenia strefy „przed portalem” większymi odrzwiami, o niższej nośności (Małoszewski, Mateja, Rułka 1985), co skutkuje dużym zagęszczeniem odrzwi. Dodatkowo w przypadkach znacznych obciążeń obudowy i dużych jej gabarytów konieczne jest zastosowanie wzmocnień najbardziej obciążonych belek. Najczęściej w tych przypadkach stosuje się blachy nakładkowe, spawane do górnych pasów pierwszych belek wspornika – najczęściej W1, W2, W3 i W4. Na rysunku 6.7 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych w prezentowanej konstrukcji, wywołanych przez prognozowane obciążenia (Rotkegel 2013a).



Rys. 6.7. Rozkład naprężeń zredukowanych w belkach portalu i wspornika (naprężenia w Pa)

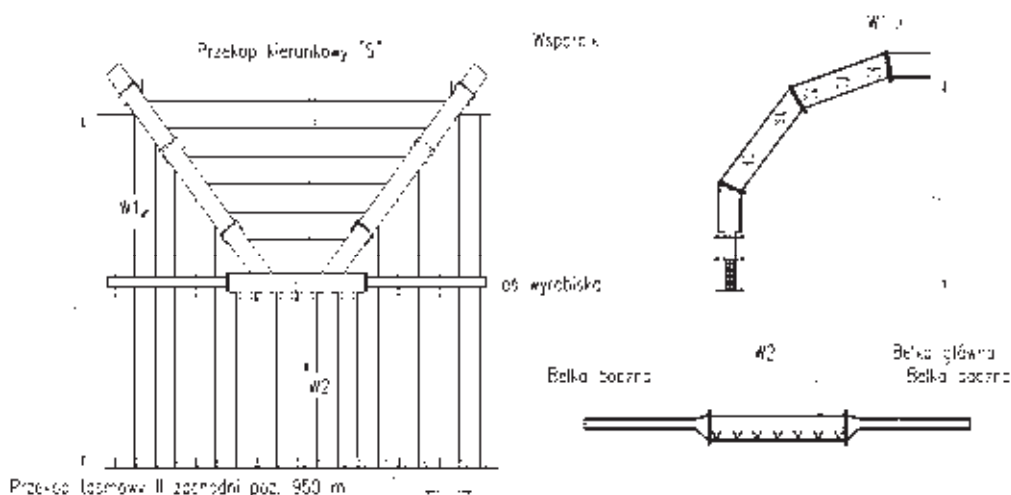
6.1.3. Przykłady portalowej obudowy skrzyżowań

Spośród portalowych obudów połączeń wyrobisk liczną grupę stanowią obudowy przeznaczone do zabezpieczania skrzyżowań. Często są to skrzyżowania pod kątem zbliżonym do prostego – trójstronne i czterostronne. Rzadziej projektowane są portalowe obudowy skrzyżowań czterostronnych pod kątem ostrym (Rotkegel 2013a). Na rysunku 6.8 przedstawiono zarysy typowych skrzyżowań wyrobisk korytarzowych.



Rys. 6.8. Zarysy skrzyżowań wyrobisk korytarzowych: a – trójstronnych pod kątem prostym, b – czterostronnych pod kątem prostym, c – czterostronnych pod kątem ostrym

Jednym z wielu przykładów obudowy skrzyżowania trójstronnego może być konstrukcja, zaprojektowana i wykonana w roku 2004, przeznaczona dla kopalni „Borynia”, której schemat przedstawiono na rysunku 6.9, a jej konstrukcję w trakcie próbnego montażu u producenta na fotografii 6.3. Zasadnicza część obudowy składała się z belki głównej, do której przykręcane były belki stanowiące dwa wsporniki. W skład każdego z nich wchodziły dwie belki i jeden segment upodatniający. Dodatkowo dla poprawy stateczności konstrukcji stosowane były belki boczne, połączone z belką główną, spinające odrzwia uzupełniające (Rotkegel 2013a).

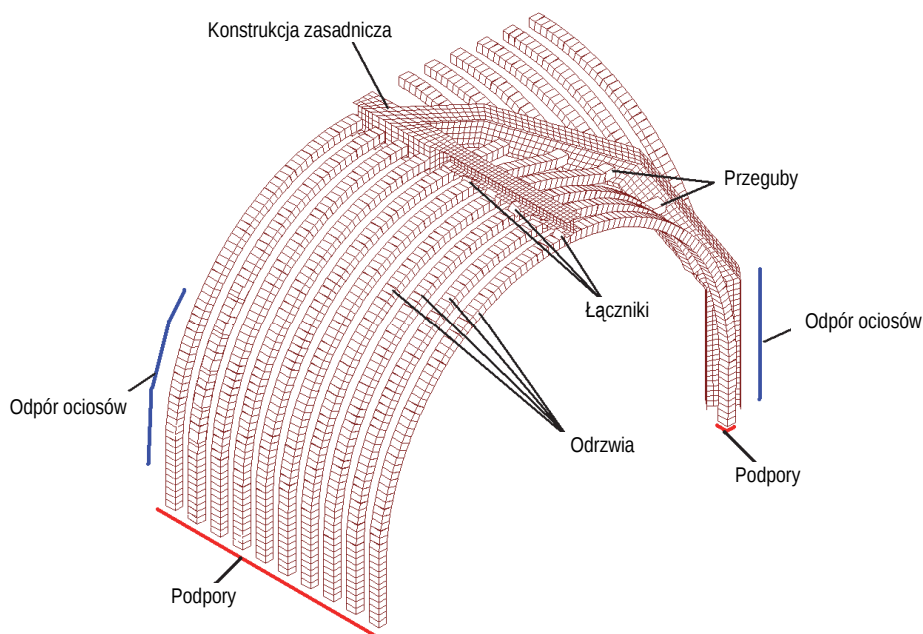


Rys. 6.9. Obudowa skrzyżowania trójstronnego

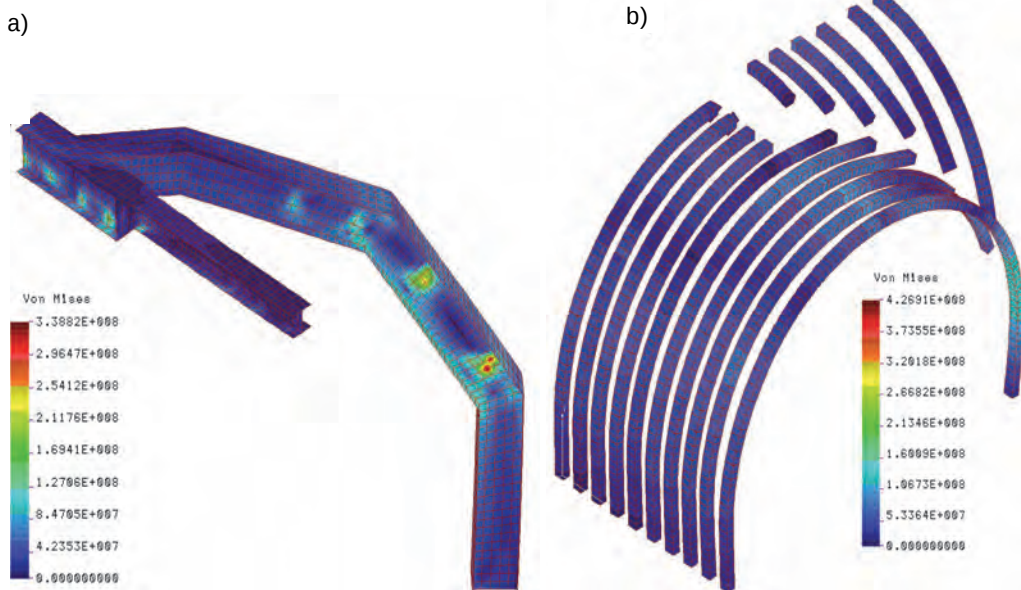


Fot. 6.3. Obudowa skrzyżowania w trakcie próbnego montażu u producenta

Z numerycznej analizy wytrzymałościowej takiej konstrukcji wynika korzystny rozkład naprężeń w poszczególnych elementach. Wymaga to jednak wykonania szczelnej wykładki, szczególnie za półodrzewiami łączonymi z belką główną. Odrzewia te stanowią istotny element nośny całej konstrukcji, ponieważ równoważą obciążenia pochodzące od wsporników. Na rysunku 6.10 przedstawiono model przygotowany do obliczeń, a na rysunku 6.11 – barwne mapy naprężeń w konstrukcji zasadniczej i w odrzewiach.



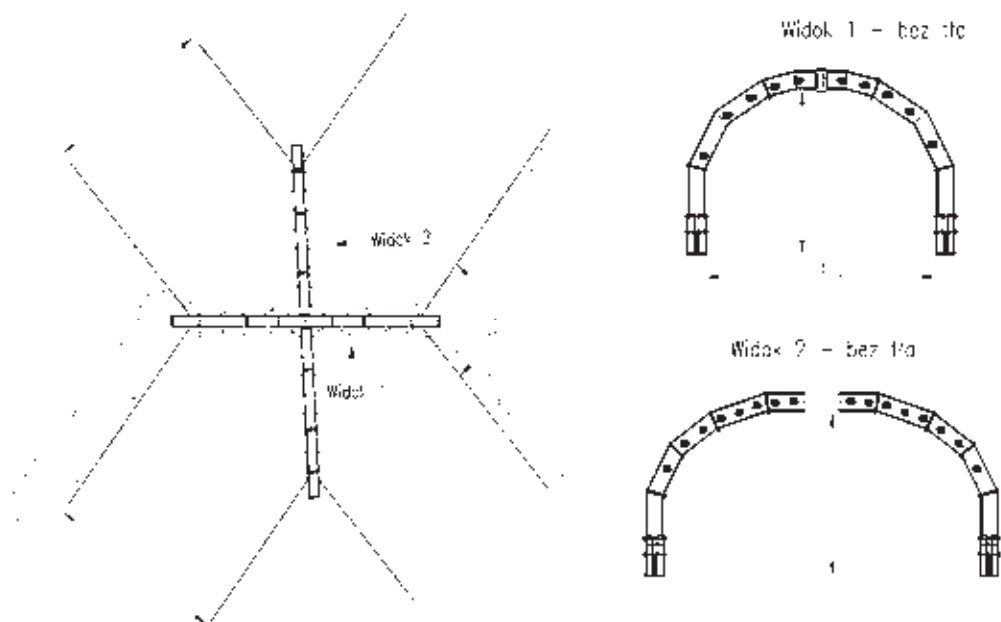
Rys. 6.10. Model obudowy skrzyżowania trójstronnego (z uwagi na symetrię zamodelowano połowę konstrukcji)



Rys. 6.11. Rozkład naprężeń zredukowanych w obudowie skrzyżowania: a – barwna mapa naprężeń w belkach dwuteowych, b – barwna mapa naprężeń w odrzwiach (naprężenia w Pa)

Od konstrukcji obudów skrzyżowań trójstronnych znacząco odbiegają obudowy przeznaczone do zabezpieczania skrzyżowań czterostronnych. W swej postaci konstrukcyjnej są one bliższe obudowie odgałęzień. Wykonywane są w postaci portalu i dwóch naprzeciwległych wsporników, których układ w rzucie tworzy krzyż. Portal i wsporniki usytuowane są najczęściej w płaszczyznach przenikania obrysów wyrobisk lub w ich pobliżu. Wsporniki łączone z belką główną portalu po jej przeciwległych stronach powodują znoszenie się obciążeń poziomych, które w przypadku odgałęzień destabilizują portal. Uzyskuje się przez to optymalny rozkład naprężeń w konstrukcji, dzięki czemu tego typu obudowy skrzyżowań charakteryzują się wysokimi parametrami podpornościowymi. Ponadto korzystny rozkład sił powoduje, że konstrukcja nie wymaga dodatkowych zabiegów stabilizujących obudowę (Rotkegel 2013a).

Przykładem wyżej wymienionej obudowy może być obudowa skrzyżowania pochylni odstawczo-wentylacyjnej na poz. IV z przekopem północnym poz. IV. Została ona zaprojektowana i wykonana w roku 2011 dla Przedsiębiorstwa Górniczego „Silesia”. W tym rozwiązaniu, krzyżujące się wyrobiska charakteryzują się różnymi formatami (wielkościami), odpowiadającymi odrzwiom ŁP10 i ŁP11. Z tego powodu portal i wsporniki miały różną rozpiętość i usytuowane były w płaszczyznach nieprostopadłych względem siebie. W szczególnym przypadku, gdy wyrobiska o tej samej wielkości łączą się pod kątem prostym, projektowana jest konstrukcja z jednakową rozpiętością w płaszczyźnie portalu i wsporników, a te są wzajemnie prostopadłe. Na rysunku 6.12 przedstawiono schemat prezentowanej obudowy, a fotografie 6.4 i 6.5 przedstawiają konstrukcję w trakcie próbnego montażu u producenta i konstrukcję już zabudowaną w wyrobisku.



Rys. 6.12. Schemat obudowy skrzyżowania czterostronnego dla PG „Silesia”

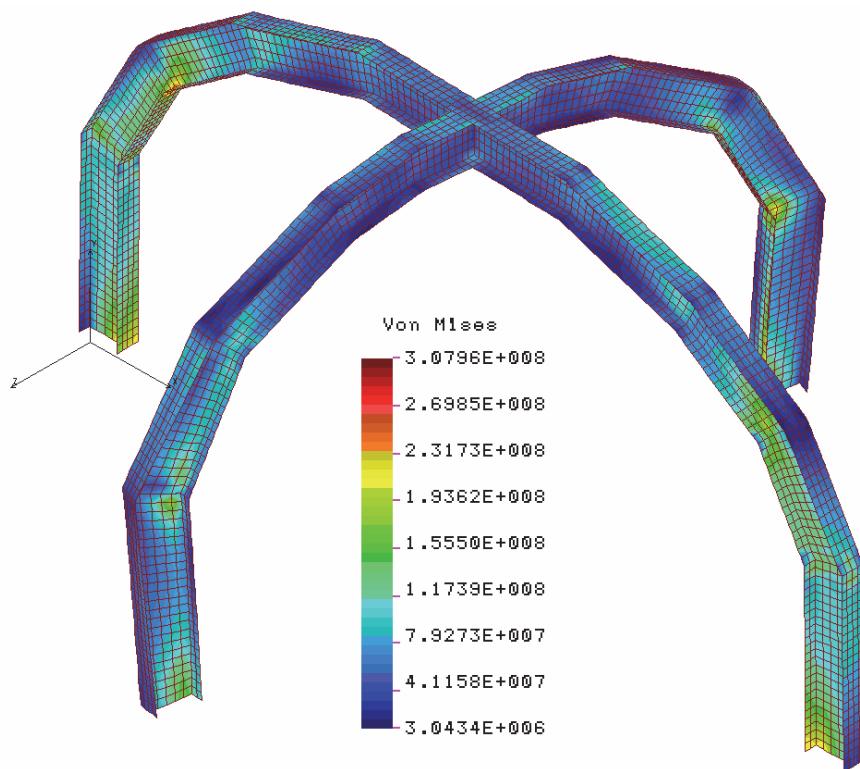
Jak wspomniano wcześniej, skrzyżowania czterostronne charakteryzują się bardzo korzystnym rozkładem naprężeń, wynikającym ze znoszenia się sił poziomych, jakimi wsporniki działają na portal. Dowodem na to może być barwna mapa naprężeń zredukowanych dla prezentowanej konstrukcji, którą przedstawiono na rysunku 6.13.



Fot. 6.4. Widok konstrukcji w trakcie montażu próbnego u producenta



Fot. 6.5. Część przystopowa konstrukcji obudowy zabudowanej w wyrobisku



Rys. 6.13. Rozkład naprężeń zredukowanych w elementach portalowej obudowy skrzyżowania wyrobisk (naprężenia w Pa)

6.2. Nietypowe obudowy portalowe

W początkowym okresie stosowania portalowej obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych rozwiązania odmienne od prezentowanych wyżej typowych układów, były projektowane i wykonywane sporadycznie, a ponadto tylko w nieznacznym stopniu różniły się od typowych konstrukcji. Przykłady takich obudów zebrał i opisał Stałęga (1997, 1999, 2001). W ostatnich latach natomiast coraz częściej zachodzi konieczność wprowadzania dalej idących zmian konstrukcji.

Szkieletowe obudowy odgałęzień i skrzyżowań, odbiegające od prezentowanych wyżej typowych rozwiązań, można podzielić na grupy obejmujące konstrukcje, których nietypowość wynika z:

- geometrii łączących się wyrobisk,
- znacznego nachylenia wyrobisk w obrębie połączenia,
- zwiększonych obciążeń ze strony górotworu,
- znacznych gabarytów wyrobisk,
- innych uwarunkowań, na przykład technologicznych, ekonomicznych itp.

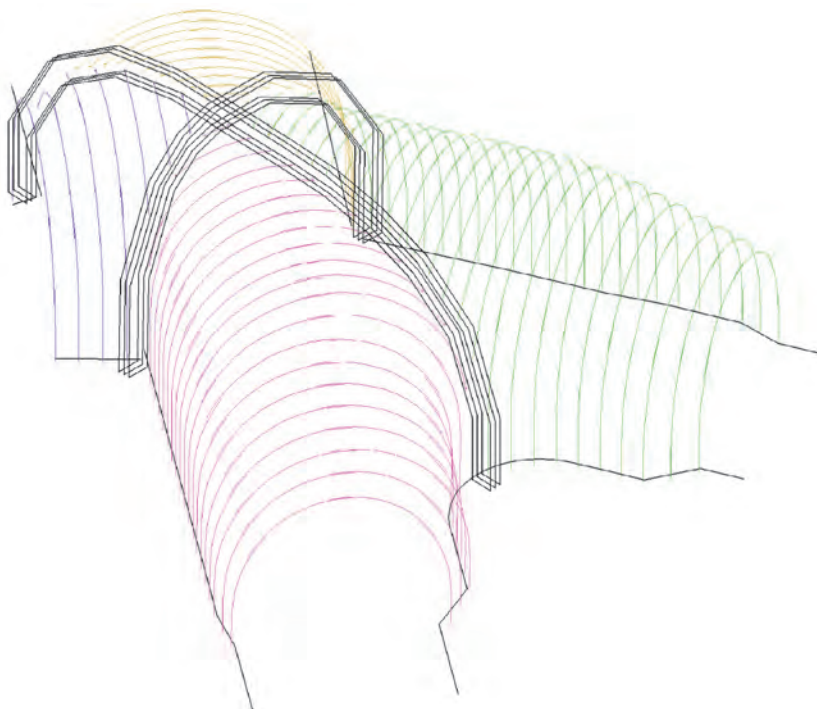
Zdarzają się jednak zadania projektowe, kiedy projektowaną konstrukcję trudno zaliczyć tylko do jednej z wyżej wymienionych grup (Rotkegel 2015).

6.2.1. Obudowy połączeń wynikające z nietypowej geometrii

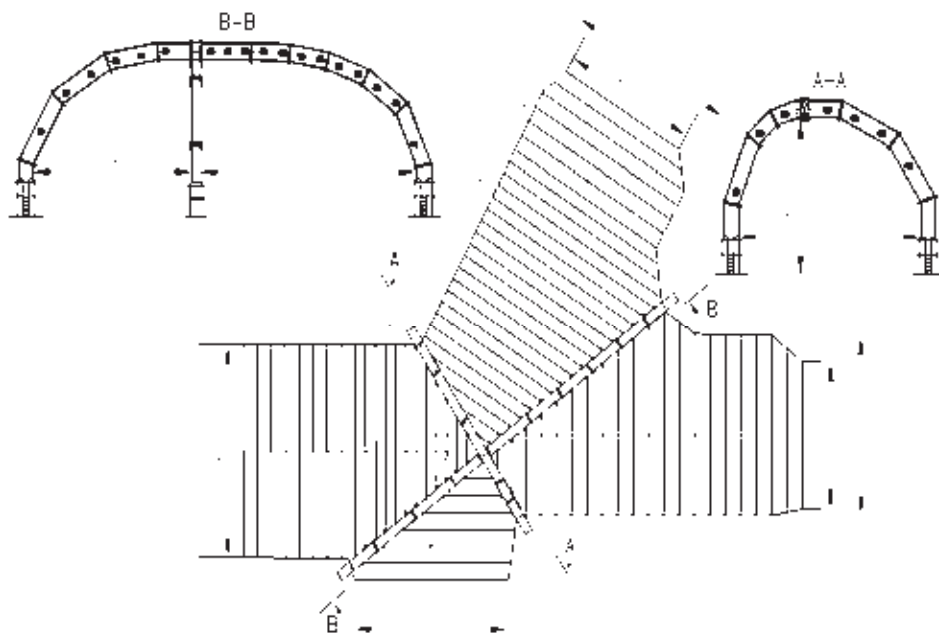
Skomplikowana geometria połączenia wyrobisk jest główną przyczyną stosowania obudów szkieletowych o nietypowej konstrukcji. Najczęściej są to konstrukcje o wyższym stopniu skomplikowania, których projektowanie wymaga większego zaangażowania. Skomplikowana geometria takich połączeń może być skutkiem dużych różnic między wielkościami łączących się wyrobisk, różnymi kształtami ich przekrojów poprzecznych, czy przecinania się osi wyrobisk w kilku punktach lub zróżnicowanych kątów między wyrobiskami (Rotkegel 2015).

Doskonałym przykładem wyżej wymienionej konstrukcji może być obudowa przeznaczona do zabezpieczania skrzyżowania czterostronnego chodnika odstawczego 2-824 z chodnikiem wentylacyjno-odstawczym 846 w kopalni „Wieczorek”. Jej schemat przedstawiono na rysunku 6.14. W obudowie tej, z uwagi na różne kąty między kierunkami łączących się wyrobisk i różne ich wielkości, konstrukcję zasadniczą stanowi niesymetryczny portal oraz dwa wsporniki o różnej rozpiętości i różnej liczbie belek. Pokazano to na rysunku 6.15. Usytuowanie odrzwi nawiązuje do obudowy dalszych odcinków wyrobisk, co pozwala na ograniczenie zakresu przebudowy (Rotkegel 2015).

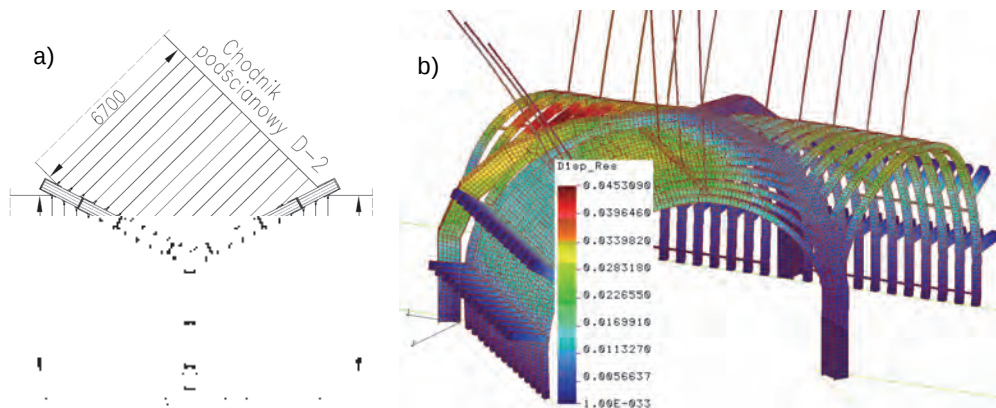
Nieco mniej skomplikowanymi konstrukcjami są obudowy skrzyżowań na bazie trzech wsporników połączonych ze sobą specjalnym łącznikiem w pułapie wyrobiska. Konstrukcje takie (przykład przedstawia rys. 6.16 i fot. 6.6) charakteryzują się korzystnym rozkładem naprężeń, szczególnie w przypadku zastosowania dodatkowego przykotwienia łuków odrzwi, co skutkuje wysoką nośnością w stosunku do ciężaru konstrukcji. Rozwiązania tego typu wymagają bardzo dokładnego wykonania łącznika wsporników (fot. 6.6b) z zachowaniem kątów między ramionami obudowy (Rotkegel 2015).



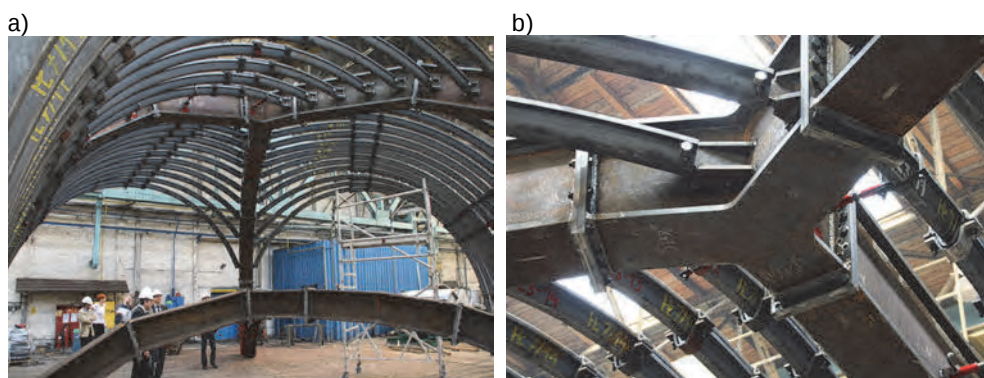
Rys. 6.14. Schemat obudowy portalowej skrzyżowania chodnika odstawczego 2-824 z chodnikiem wentylacyjno-odstawczym 846 w kopalni „Wieczorek”



Rys. 6.15. Konstrukcja obudowy skrzyżowania chodnika odstawczego 2-824 z chodnikiem wentylacyjno-odstawczym 846 w kopalni „Wieczorek”



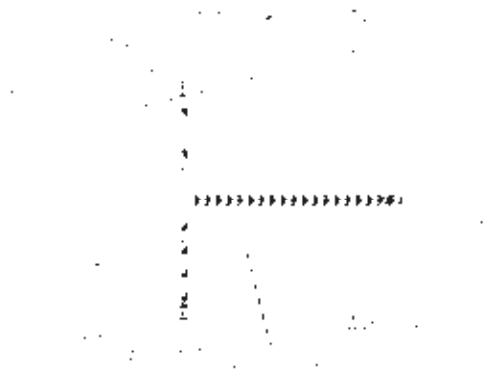
Rys. 6.16. Obudowa trójkątnego skrzyżowania z trzema wspornikami – połączenie pochylni badawczej wentylacyjnej D-2 z chodnikiem podścianowym D-2 w kopalni „Zofiówka”:
a – schemat obudowy, b – ugięcie modelu ($\delta_{\max} = 45 \text{ mm}$)



Fot. 6.6. Obudowa trójkątnego skrzyżowania z trzema wspornikami – połączenie pochylni badawczej wentylacyjnej D-2 z chodnikiem podścianowym D-2 w kopalni „Zofiówka”:
a – konstrukcja w trakcie montażu wstępnego, b – łącznik wsporników

6.2.2. Konstrukcje obudów zabezpieczające wyrobiska nachylone

Obudowy odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk nachylonych stanowią specyficzną grupę połączeń. W przypadkach niewielkich nachyleń często możliwe jest wypoziomowanie spodka wyrobiska w strefie połączenia. Upraszcza to projektowanie, wykonywanie oraz montaż konstrukcji, sprowadzając je do typowego rozwiązania. Natomiast przy znacznych nachyleniach konieczne jest zaplanowanie optymalnego ukształtowania spodka wyrobiska, z uwzględnieniem wymaganych gabarytów, wzajemnego usytuowania wyrobisk, a często także późniejszego wyposażenia. W przypadkach tych konieczne jest założenie wspólnego punktu wysokościowego wyrobisk i na tej podstawie, z uwzględnieniem nachylenia wyrobisk, ustalenie poziomów posadowienia konstrukcji zasadniczej i wszystkich odrzwi, jak to pokazano na rysunku 6.17, na przykładzie obudowy odgałęzienia w kopalni „Krupiński”. Przykładowa obudowa została zaprojektowana dla połączenia wyrobisk pochylni N-6 z chodnikiem N-11 w pokładzie 330/1.



Rys. 6.17. Zarys obudowy odgałęzienia pochylni N-6 z chodnikiem N-11 z zaznaczonymi poziomami posadowienia charakterystycznych elementów

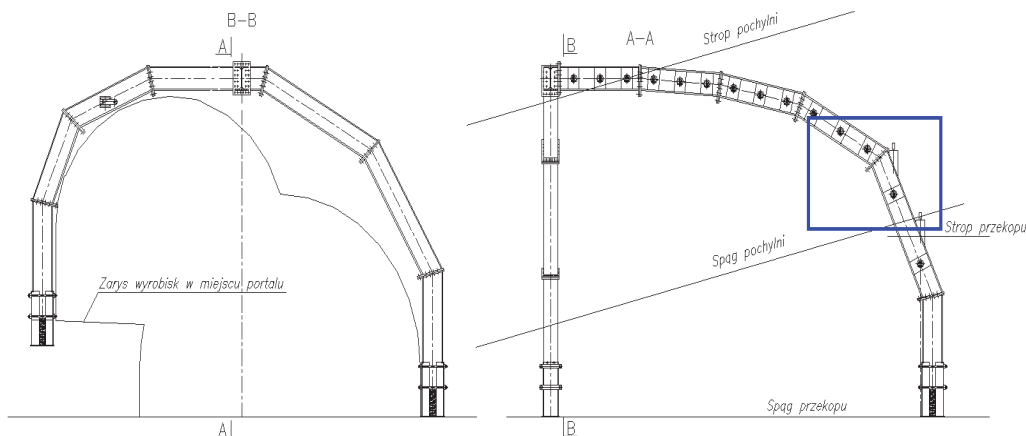
Konstrukcje takie powodują znaczne utrudnienia już na etapie próbnego montażu (fot. 6.7). Dla właściwego usytuowania obudowy u producenta, zgodnego z projektem, zastosowano „proteżowanie” drzwi oraz podstawki pod konstrukcję zasadniczą. Na fotografii 6.7 czerwonymi liniami zaznaczono poziomy posadowienia obudowy w wyrobisku (Rotkegel 2015).



Fot. 6.7. Obudowa w trakcie próbnego montażu (czerwonymi liniami zaznaczono poziomy posadowienia obudowy w wyrobisku)

Ciekawym rozwiązaniem obudowy odgałęzienia wyrobisk o znacznym nachyleniu jest konstrukcja zaprojektowana do zabezpieczenia upadowej odstawczej z przekopem marklowickim w kopalni „Marcel”. Konstrukcję zasadniczą obudowy przedstawiono na

rysunku 6.18, fragment jej wspornika – na fotografii 6.8, a konstrukcję w trakcie zabudowy – na fotografii 6.9. Wyrobiska łączyły się ze sobą pod kątem poziomym 15° , przy czym upadowa nachylona była do poziomu pod kątem $14,5^\circ$. W związku z powyższym wyrobiska w geometrycznym narożniku odgałęzienia nie miały ze sobą połączenia. Dodatkowo, z uwagi na znaczne różnice w poziomach spodków łączących się wyrobisk, konieczne było wykonanie muru oporowego, zabezpieczającego skarpę. Jego krawędź widoczna jest na fotografii 6.8. Takie usytuowanie względem siebie wyrobisk wymagało zaprojektowania portalu niesymetrycznego i opracowania specjalnych rozwiązań posadowienia odrzwi uzupełniających na górnej półce ostatniej belki wspornikowej (Rotkegel 2015).



Rys. 6.18. Obudowa odgałęzienia upadowej odstawczej z przekopem markłowickim w kopalni „Marcel” (prostokątem zaznaczono obszar pokazany na fot. 6.8)



Fot. 6.8. Widok belek wspornika od strony pochylni odstawczej; widoczne wsporniki do posadowienia odrzwi uzupełniających



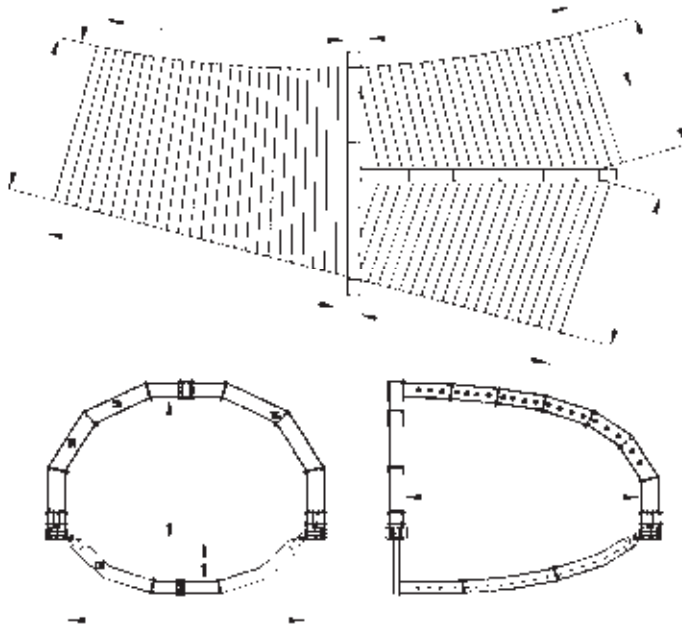
Fot. 6.9. Obudowa odgałęzienia w trakcie zabudowy (Internet 2)

6.2.3. Konstrukcje obudów dla warunków zwiększonych obciążeń górotworem

Schodzenie z robotami górniczymi na coraz większe głębokości czy występowanie zaszłości eksploatacyjnych, skutkuje zwiększonymi obciążeniami działającymi na obudowę. Obciążenia te dodatkowo wzrastają w rejonie połączeń wyrobisk na skutek znacznych gabarytów. W sytuacjach takich wymagane jest stosowanie ciężkich kształtowników, takich jak dwuteowniki szerokostopowe HEM, czy nawet przekroje zamknięte – skrzynkowe. Dodatkowo w warunkach występowania wielokierunkowych obciążeń działających ze strony ociosów czy spągu, zasadne jest stosowanie zamknięcia obudowy specjalnymi spągnicami (Daniłowicz i Rotkegel 2003; Rotkegel 2015). Doskonałym przykładem takich konstrukcji są obudowy połączeń wyrobisk projektowane dla warunków LW „Bogdanka”. Na rysunku 6.19 i fotografii 6.10 przedstawiono przykładową konstrukcję – schemat obudowy odgałęzienia R52 chodnika dojazdowego 2fS od objazdu E w LW „Bogdanka” i widok zmontowanej konstrukcji.

Dobrym przykładem obudów skrzyżowań trójstronnych o zwiększonej nośności mogą być konstrukcje, w których oprócz odrzwi wspierających belkę główną (rys. 6.1b, 6.3) zastosowano jeden lub dwa wsporniki z belek dwuteowych. Obudowy takie charakteryzują się mniejszym wyężeniem konstrukcji i zdecydowanie większą stabilnością, wynikającą ze zmniejszenia roli odrzwi łączonych z belką główną (Rotkegel 2015). Na rysunkach 6.20 i 6.21 przedstawiono modele takich konstrukcji, poddane analizie wytrzymałościowej.

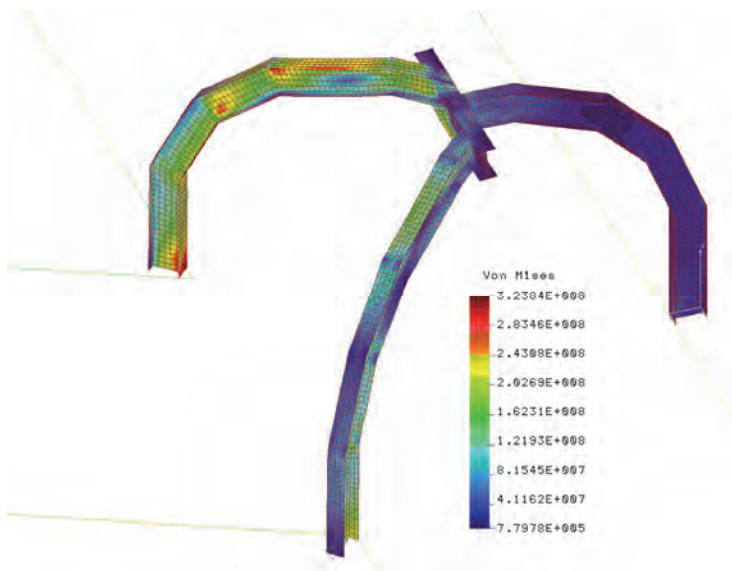
W przypadkach obudów odgałęzień bazujących na portalu i wsporniku, narażonych na duże obciążenia ze strony górotworu, stosuje się kotwienie stabilizacyjne konstrukcji zasadniczej tak, żeby nie dopuścić do niekontrolowanego przechylenia się portalu i przemieszczenia z płaszczyzny zabudowy (Rotkegel i Daniłowicz 2006, 2007).



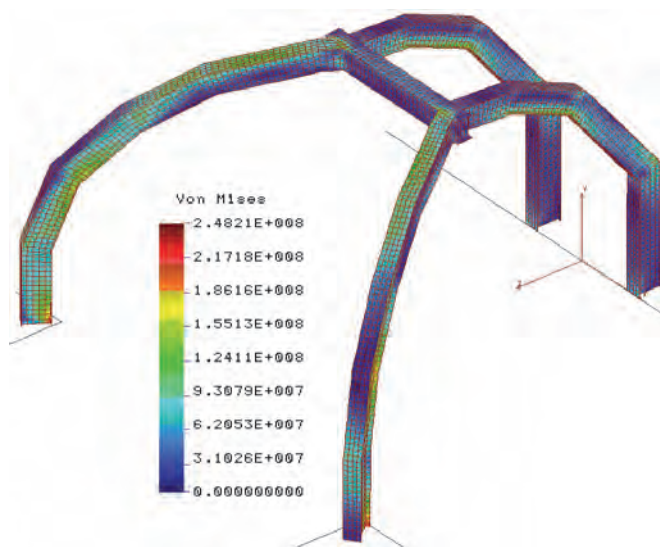
Rys. 6.19. Schemat obudowy odgałęzienia R52 zamkniętego spągnicami



Fot. 6.10. Obudowa odgałęzienia R52 w trakcie próbnego montażu; dla przeprowadzenia próbnego montażu spągnice są podniesione w stosunku do planowanego usytuowania w wyrobisku



Rys. 6.20. Konstrukcja zasadnicza obudowy skrzyżowania pochylni B-1 badawczej z chodnikiem B-3 badawczym w pokładzie 401 w kopalni „Budryk”



Rys. 6.21. Konstrukcja zasadnicza obudowy skrzyżowania przekopu taśmowego II wschodniego poz. 950 m z przekopem łączącym w kopalni „Borynia”

6.2.4. Konstrukcje obudów zabezpieczające połączenia wyrobisk o znacznych gabarytach

Postęp w mechanizacji robót górniczych, a także rozwój technologii eksploatacji i koncentracji wydobywania, wymuszają potrzebę wykonywania wyrobisk kapitalnych o znacznych przekrojach poprzecznych. Zmiany w tym zakresie widać na wykresie

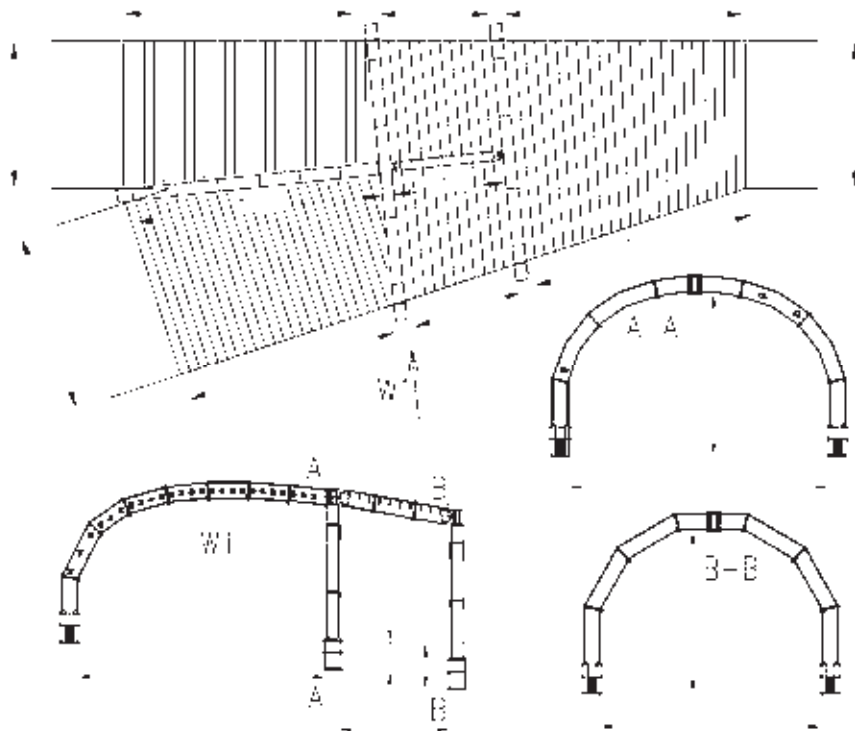
przedstawionym na rysunku 1.4. Formaty obudowy podyktowane są między innymi stosowanymi maszynami i urządzeniami czy względami wentylacyjnymi. Duże przekroje wyrobisk powodują, że w strefie połączenia uzyskuje się wyrobisko wielkogabarytowe. Efekt ten może być także wywołany lub dodatkowo spotęgowany w przypadkach odgałęzień wyrobisk pod ostrym kątem, mniejszym niż 20° . Wraz ze wzrostem wielkości przekroju połączenia zmniejsza się nośność obudowy, a ponadto obciążenia znacznie wzrastają wraz ze zwiększaniem szerokości wyrobiska. Wymaga to zapewnienia odpowiedniej wysokiej wytrzymałości poszczególnych elementów, na przykład przez zastosowanie ciężkich profili o wysokiej wytrzymałości, które można dodatkowo wzmacniać (Rotkegel 2015).

Przykładami konstrukcji zabezpieczających odgałęzienia i skrzyżowania wyrobisk o znacznych formatach mogą być prezentowane już wcześniej obudowy połączenia przekopu kierunkowego pod pokładem 510, poziom 774 m z przekopem odstawczym 774/585 w kopalni „Bobrek-Centrum” (rozdz. 6.1), czy odgałęzienie zaprojektowane i wykonane dla Zakładu Górniczo-Energetycznego „Sobieski-Jaworzno III” (Stałęga 1999, 2001). Konstrukcję tę przedstawiono na fotografii 6.11.



Fot. 6.11. Obudowa odgałęzienia pochylni w Zakładzie Górniczo-Energetycznym „Sobieski-Jaworzno III” (ZG „Sobieski”): a – konstrukcja w trakcie próbnego montażu u producenta (Stałęga 1999), b – belka stropowa łącząca portale i portal pomocniczy

Podobną konstrukcję zastosowano także w Zakładzie Górniczo-Energetycznym „Janina” do zabezpieczenia odgałęzienia pochylni kamiennej taśmowej z upadową. Obudowa zabezpieczała połączenie wyrobisk pod stosunkowo ostrym kątem (18°), dodatkowo nachylonych do poziomu w przeciwnych kierunkach 6° i 9° . Wynikała z tego znaczna długość obudowy, przekraczająca 21 m, znaczna maksymalna szerokość wyrobiska oraz różne poziomy posadowienia poszczególnych elementów. Konstrukcja zasadnicza składała się z dwóch portali spiętych przegubowo belką łączącą oraz wspornika. Uzupełniały ją 93 komplety odrzwi (uzupełniających i przejściowych) (Rotkegel 2015). Postać konstrukcyjną omawianej obudowy przedstawiono na rysunku 6.22.

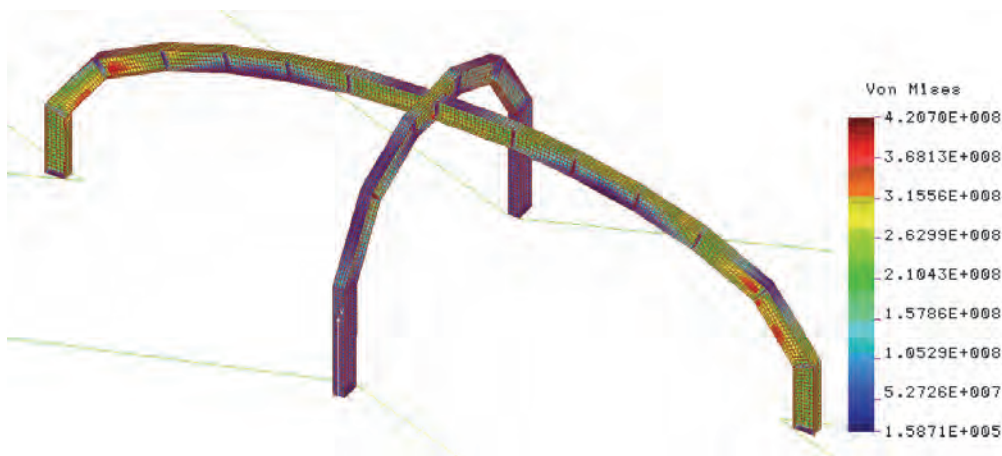


Rys. 6.22. Konstrukcja dwuportalowej obudowy odgałęzienia pochylni kamiennej taśmowej z upadową w ZGE „Janina”

Ciekawą obudową skrzyżowania z uwagi na znaczne gabaryty połączenia może być wykonana w roku 2012 portalowa obudowa skrzyżowania przekopu południowo-równoległego (poziom 1000 m) z objazdem wschodnim w kopalni „Bielszowice”. Z uwagi na znaczne gabaryty łączących się wyrobisk, odpowiadające ŁP12 i ŁP13 oraz stosunkowo niewielki kąt między nimi (41°), skrzyżowanie objęło strefę 18,1 m, przy szerokości portalu 7,2 m i rozpiętości każdego ze wsporników 9,1 m (Rotkegel 2015). Na fotografii 6.12 przedstawiono przedmiotową obudowę, natomiast na rysunku 6.23 – rozkład naprężeń zredukowanych w tej konstrukcji.



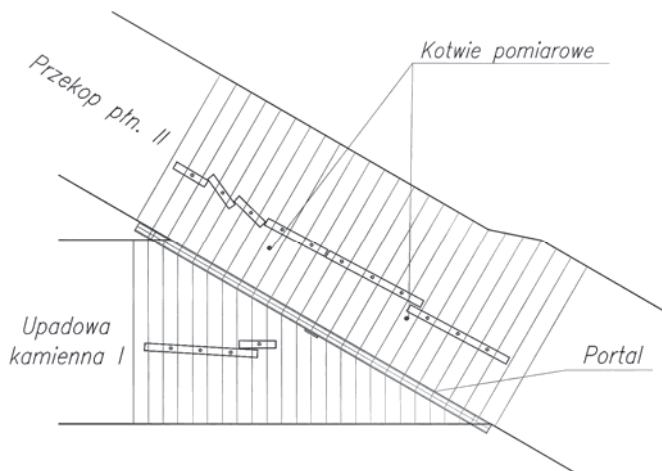
Fot. 6.12. Obudowa skrzyżowania wyrobisk o różnych gabarytach



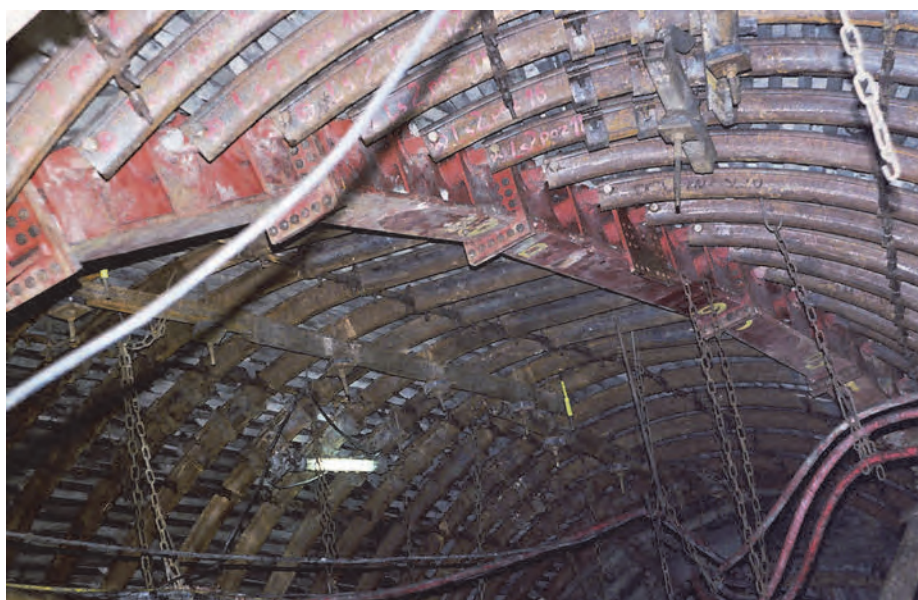
Rys. 6.23. Wyniki analizy wytrzymałościowej konstrukcji zasadniczej – rozkład naprężeń zredukowanych

6.2.5. Inne nietypowe konstrukcje

Wiele nietypowych konstrukcji obudowy odgałęzień i skrzyżowań wynika z innych uwarunkowań niż wcześniej wymienione. Najczęściej na kształt konstrukcji wpływają względy ekonomiczne lub technologiczne – łatwość zabudowy. Przykładem stosunkowo prostej i taniej obudowy odgałęzienia może być obudowa jednoportalowa połączenia upadowej kamiennej I i przekopu północnego II na poziomie 300 m w kopalni „Janina” (Rotkegel i in. 2004), której schemat i konstrukcję przedstawiono na rysunku 6.24 i fotografii 6.13. Konstrukcja składa się z portalu i połączonych z nim przegubowo odrzwi uzupełniających. Ważną funkcję pełni tu przykottwienie odrzwi.

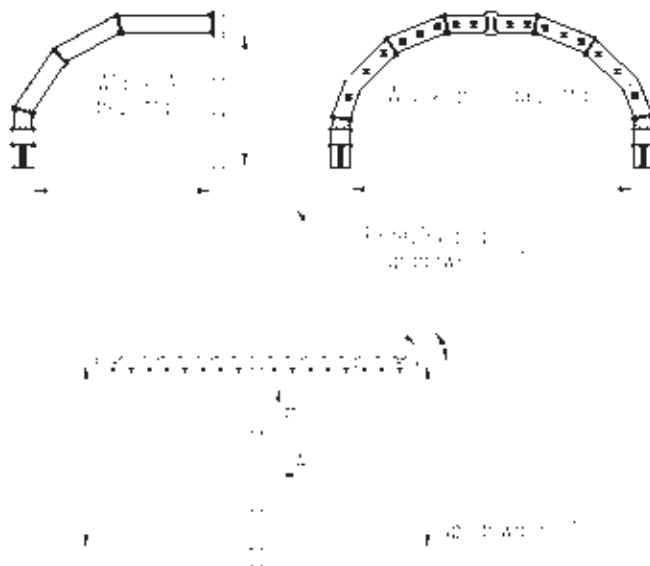


Rys. 6.24. Schemat obudowy odgałęzienia upadowej kamiennej I i przekopu północnego II na poziomie 300 m w kopalni „Janina” (Rotkegel i in. 2004)



Fot. 6.13. Obudowa odgałęzienia zabudowana na dole kopalni

Pewną modyfikacją wyżej wymienionej konstrukcji może być portal usytuowany nad wlotem do wyrobiska odgałęziającego się, dodatkowo stabilizowany wspornikiem – konstrukcja przybiera wówczas kształt litery T. Obudowa taka wymaga dodatkowych zabiegów, mających na celu zapewnienie odpowiedniej stabilności portalu, na przykład przykotwienia go do otaczającego górotworu. Konstrukcje tego typu projektowane były kilkakrotnie, najczęściej z powodu przyjętej przez kopalnię technologii zabudowy. Obudowy takie zostały zaprojektowane między innymi dla kopalń „Zofiówka” (rys. 6.25), „Pniówek”, „Krupiński” (układ dwóch konstrukcji) i NWR „Karbonia” (konstrukcja wykonana lecz niezabudowana).



Rys. 6.25. Obudowa odgałęzienia upadowej F-1 z przecinką do upadowej F-1 w kopalni „Zofiówka”

6.3. Wybrane przykłady obudowy portalowej stosowanej poza połączeniami wyrobisk

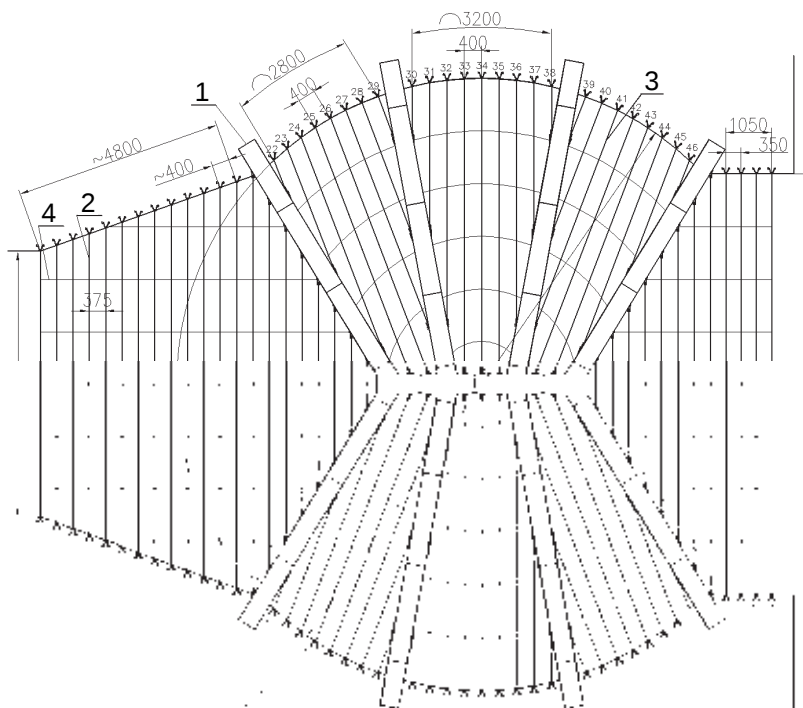
Obudowy o konstrukcji szkieletowej są stosowane przede wszystkim do zabezpieczania połączeń wyrobisk korytarzowych (Rotkegel 2013a, 2015). Jednak w szczególnych przypadkach zasadne jest stosowanie obudowy opartej na szkielecie do zabezpieczania specjalnych wyrobisk, takich jak: komory, podszybia, zmiany kierunku biegu wyrobisk czy wzmocnienia istniejącej obudowy. O ile szkieletowe obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych można podzielić umownie na konstrukcje typowe, bazujące na portalu i jednym lub dwóch wspornikach (Rotkegel 2013a) oraz nietypowe – każdorazowo dopasowywane do geometrii połączenia wyrobisk (Rotkegel 2015), to konstrukcje specjalne wykraczają poza połączenia wyrobisk (Rotkegel 2016a). Najczęściej obudowa taka stosowana jest w szeroko rozumianych wyrobiskach mających specjalne przeznaczenie, o znacznych gabarytach, o dużej zmienności przekroju czy też o zmiennym kierunku biegu. Projektowanie takich obudów wymaga indywidualnego i kompleksowego podejścia do zagadnienia, uwzględniającego między innymi technologię zabudowy, dobór zasadniczych elementów konstrukcji oraz sposób ich stabilizacji (Rotkegel 2003a, 2005; Prusek, Rotkegel, Skrzyński 2007). W dalszej części przedstawiono przykłady takich rozwiązań konstrukcyjnych opracowanych w Głównym Instytucie Górnictwa.

6.3.1. Komora nad zbiornikiem retencyjnym II w kopalni „Pniówek”

Wykonanie komory było pierwszym etapem budowy zbiornika retencyjnego II na poziomie 830 m w kopalni „Pniówek” – inwestycji mającej na celu usprawnienie systemu magazynowania transportowanego urobku. Komorę zaprojektowano do

pełnienia dwóch funkcji. Pierwszą było zabezpieczenie wyrobiska i zbiornika w trakcie jego drażenia, a drugą, docelową – funkcja komory nadzbiornikowej. W związku z tym konieczne było wydrążenie wyrobiska umożliwiającego zarówno głębinie zbiornika, jak i wykonanie ostatecznej obudowy. Do tych celów zastosowano obudowę o dużych gabarytach, większych niż średnica projektowanego zbiornika. Dodatkowo zwiększało to obciążenia działające na obudowę – i tak już duże z uwagi na trudne warunki geologiczno-górnictwa. Mając powyższe na uwadze obudowę komory zaprojektowano jako szkieletową z odrzwiami i półodrzwiemi uzupełniającymi. Za takim projektem przemawiała możliwość dowolnego kształtowania postaci konstrukcji zarówno jej schematu, jak i parametrów przekrojowych oraz materiałowych. Prace nad obudową komory obejmowały wiele wątków. Prowadzone działania dotyczyły projektowania obudowy i poprawy parametrów górotworu w rejonie. W trakcie projektowania dążono do uzyskania obudowy o wysokich parametrach podpornościowych. Jednocześnie w kopalni prowadzono iniekcję i kotwienie (Rotkegel i Filipowicz 2016).

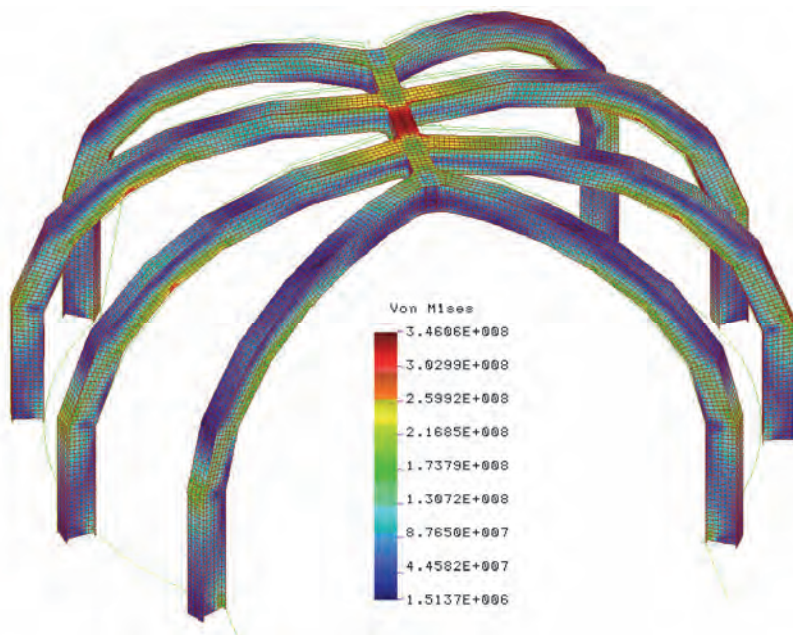
W efekcie prac projektowych powstała konstrukcja szkieletowa o ośmiu wspornikach, połączonych w pułapie wyrobiska z czterosegmentową belką. Wsporniki usytuowano w pionowych płaszczyznach *quasi*-radialnych względem pionowej osi przyszłego zbiornika. Wsporniki posadowiono na spodku komory poza obwodem koła o średnicy 14 m. Tak duży wymiar wynikał ze średnicy zbiornika (10 m) i uwzględnił grubość obudowy (1 m) oraz jednometrowy naddatek. Natomiast wysokość obudowy ustalono na 7,0 m (Rotkegel 2016a). Na rysunku 6.26 przedstawiono schemat obudowy.



Rys. 6.26. Schemat obudowy komory nad zbiornikiem retencyjnym II w kopalni „Pniówek”: 1 – konstrukcja zasadnicza, 2 – odrzwia przejściowe, 3 – odrzwia uzupełniające, 4 – rozpory

Na szkielet obudowy złożyły się 44 belki o przekroju zamkniętym (skrzyńkowym) o wymiarach 650×430 mm. Długość belek i miejsca ich podziału uzgodniono z kopalnią z uwzględnieniem technologii drażenia komory na dwie warstwy (Rotkegel i Filipowicz 2016).

Konstrukcję uzupełniono 83 odrzwiami wykonanymi z kształtownika V36 ze stali o podwyższonych parametrach mechanicznych II generacji – S550W. Masa konstrukcji zasadniczej obudowy przekraczała 85 ton. Konstrukcję poddano analizie wytrzymałościowej. Uwzględniono przy tym warunki posadowienia i obciążenia obudowy górotworem oraz urządzeniami i transportowaną masą. Na rysunku 6.27 przedstawiono stan wyężenia konstrukcji, na fotografii 6.14 – konstrukcję w trakcie montażu próbnego u producenta, natomiast na fotografii 6.15 – fragmenty konstrukcji zabudowanej w wyrobisku.



Rys. 6.27. Rozkład naprężeń zredukowanych w konstrukcji (naprężenia w Pa, skala deformacji $10\times$)



Fot. 6.14. Konstrukcja zmontowana próbnie u producenta



Fot. 6.15. Konstrukcja zmontowana w wyrobisku

6.3.2. Wzmocnienie obudowy skrzyżowania

Przykładem ciekawego zastosowania szkieletowej obudowy może być konstrukcja podbudowująca istniejącą, silnie zdeformowaną obudowę skrzyżowania wyrobisk w kopalni „Krupiński” w wykonaniu tradycyjnym, z zastosowaniem podciągów. W procesie projektowym przyjęto podstawowe założenie jak najlepszego dopasowania konstrukcji wzmacniającej do obudowy wzmacnianej oraz minimalnego zmniejszenia gabarytów skrzyżowania. Obudowę skrzyżowania stanowił ruszt wykonany z prostych stropnic podpartych na odrzwiach i stojakach zabudowanych w narożach skrzyżowania. Znaczne utrudnienie stanowiło istniejące wyposażenie wyrobiska w liczne rurociągi, kable i przenośnik taśmowy (Rotkegel 2016a). Na rysunku 6.28 przedstawiono zarys wyrobisk, a ich wyposażenie na fotografii 6.16.



Rys. 6.28. Zarys połączenia wyrobisk



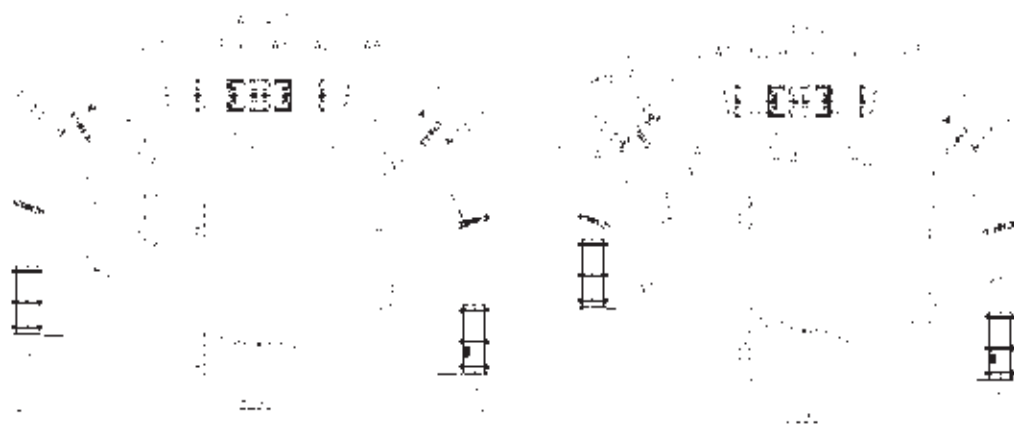
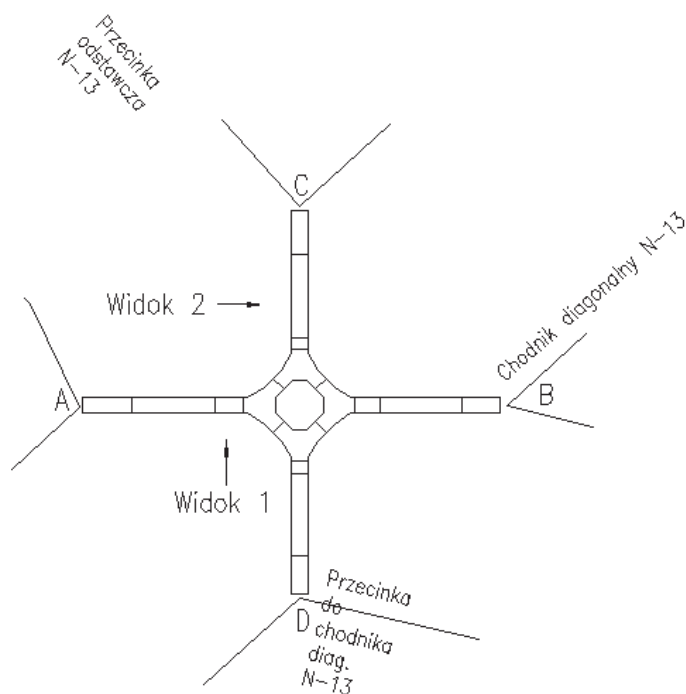
Fot. 6.16. Skrzyżowanie wyrobisk

Z uwagi na geometrię połączenia wyrobisk zdecydowano o zastosowaniu konstrukcji czterospornikowej, podobnej do typowych obudów skrzyżowań. Założono przy tym usytuowanie wsporników w płaszczyznach pionowych, stanowiących przekątne skrzyżowania. Dla usprawnienia procesu projektowego i dokładnego odwzorowania istniejącej obudowy zdecydowano o przeprowadzeniu skaningu laserowego. Wykorzystano w tym celu skaner laserowy 2D. Skaner pozycjonowany był w płaszczyznach projektowanych wsporników. Pomimo licznych zakłóceń w skanowaniu, wywołanych wyposażeniem wyrobiska, możliwe było uzyskanie zarysu skrzyżowania w płaszczyznach przekątnych, a po dodatkowej obróbce i pracach projektowych – zarysu przyszłej konstrukcji (Rotkegel, Szade, Szot 2016). Na rysunku 6.29 przedstawiono zaprojektowaną konstrukcję wzmocnienia istniejącej obudowy skrzyżowania.

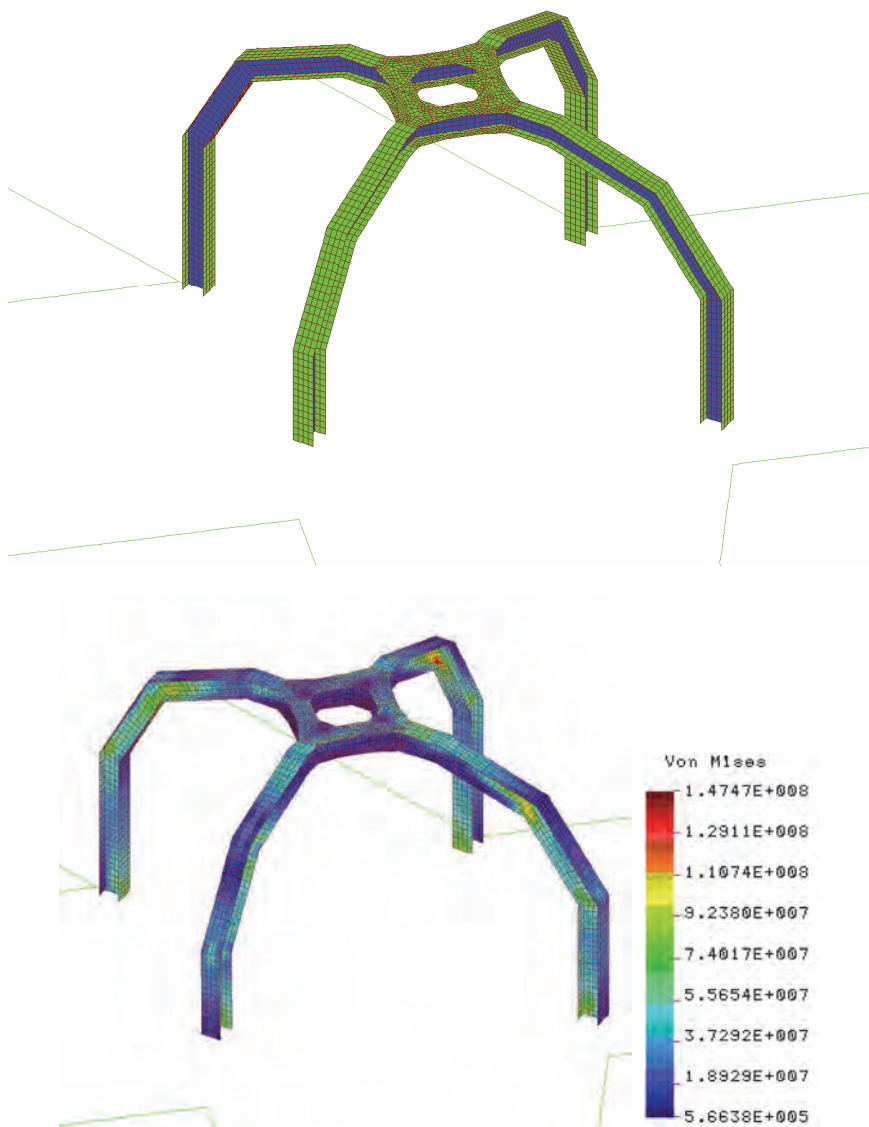
Konstrukcja składała się z czterech wsporników o różnej wysokości. Każdy z nich składał się z trzech belek, w tym jednej przyspągowej. W pułapie wyrobiska wsporniki połączono z czterosegmentowym wieńcem, będącym jednocześnie podstawą dla „materaca” wykładki mechanicznej, umożliwiającym natychmiastowe podparcie pułapu wyrobiska i prostych stropnic istniejącej obudowy. Ze względu na ograniczoną przestrzeń, belki zaprojektowano z dwuteownika szerokostopowego HEM320, charakteryzującego się wysoką wartością wskaźnika wytrzymałości na zginanie, większym od dwuteownika HEB450. Konstrukcję dopasowano do nachylenia wyrobiska określonego ze skanowania. Przeprojektowano także standardowe rozwiązanie segmentu upodatkowanego tak, aby możliwe było stosunkowo łatwe dopasowanie wysokości konstrukcji zmontowanej w wyrobisku (lecz nierozparte), przez zmianę wysokości drewnianych wkładek upodatkujących (Rotkegel 2016a).

Dla określenia parametrów podpornościowych projektowanej konstrukcji przeprowadzono analizę wytrzymałościową metodą elementów skończonych. W tym celu zbudowano model odzwierciedlający geometrię wzmocnienia, jej parametry materiałowe oraz sposób podparcia, rozparcia i obciążenia. W wyniku analiz uzyskano między

innymi rozkład naprężeń zredukowanych. Przeprowadzona analiza potwierdziła wysoką podporność konstrukcji. Dzięki temu można wnioskować o jej funkcjonalności. Na rysunku 6.30 przedstawiono model przygotowany do obliczeń i wyniki analizy wytrzymałościowej.



Rys. 6.29. Konstrukcja wzmocnienia obudowy skrzyżowania

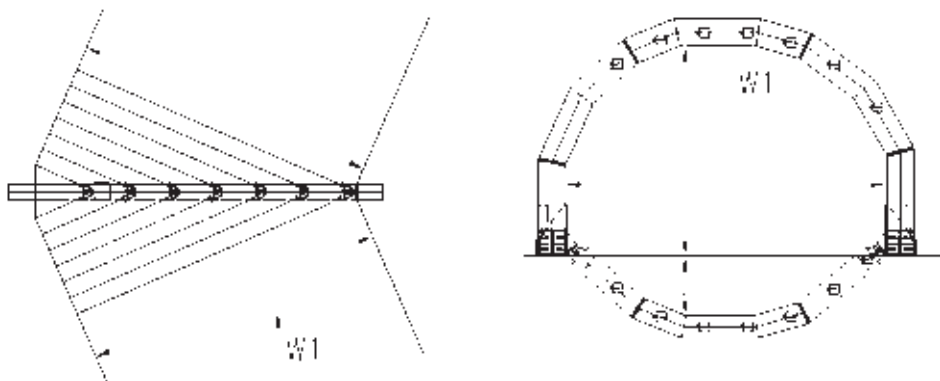


Rys. 6.30. Model konstrukcji przygotowany do obliczeń i barwna mapa naprężeń zredukowanych

6.3.3. Obudowa portalowa rejonu zmiany kierunku wyrobiska

Pewnym nietypowym zastosowaniem obudowy szkieletowej (portalowej) jest zabezpieczenie połączenia lub zmiany kierunku wyrobiska, jak to miało miejsce w przypadku upadowej równoległej i wytycznej głównej w kopalni „Zofiówka”. Wyrobiska łączyły się pod kątem około 133°, a miejsce połączenia podlegało wpływom uskoku „Bzie-Czechowice”. W związku z tym zdecydowano o zastosowaniu portalu wykonanego z belek o przekroju dwuteowym HEB550, dodatkowo zamkniętym spągnicami z dwuteownika HEB450. Z konstrukcją zasadniczą połączono przegubowo

odrzwia z kształtownika V36, posadowione na spodku wyrobiska (Rotkegel 2016a). Na rysunku 6.31 przedstawiono schemat obudowy, a na fotografii 6.17 – obudowę zabudowaną w wyrobisku.



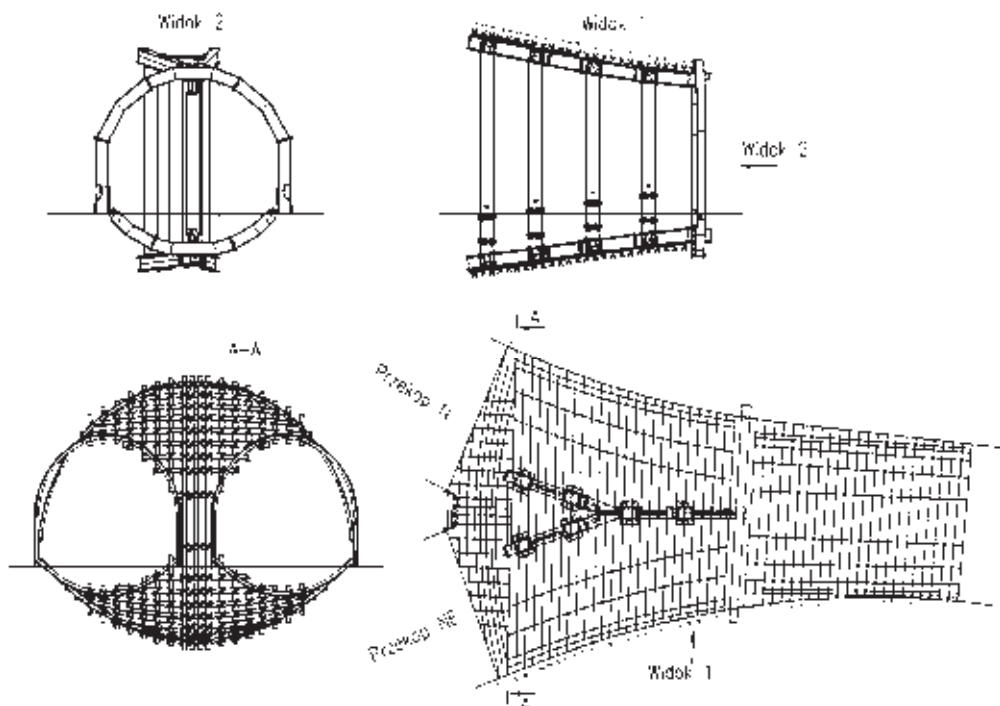
Rys. 6.31. Konstrukcja obudowy wyrobiska w miejscu zmiany kierunku



Fot. 6.17. Obudowa zabudowana w wyrobisku

6.3.4. Kombinowana obudowa odgałęzienia wyrobisk

Pomimo wielu zalet portalowej obudowy odgałęzień i skrzyżowań, w niektórych przypadkach stosowana jest z powodzeniem obudowa tradycyjna – „palmowa”. Wynika to przede wszystkim z prostej technologii zabudowy w przypadku drażenia wyrobiska, a także z łatwej przebudowy w przypadku wymiany skorodowanych czy zdeformowanych odrzwi lub odtwarzania całej obudowy. Niekiedy konieczne jest zastosowanie dodatkowych podpór dla odrzwi o znacznej rozpiętości. Zabudowywana jest wtedy belka przystropowa, podpierana przez stalowe słupy. W miejscu, gdzie mogłaby występować kolizja słupów z trasą kolejki, stosowany jest portal. Powstaje wtedy obudowa mieszana – kombinowana, w której odrzwia podpierane są przez słupy i szkieletową konstrukcję wsporczą. Przykładem mogą być obudowy odgałęzień projektowane dla LW „Bogdanka”, w których dodatkowo stosuje się zamknięcie spągnicami (Rotkegel 2016a). Na rysunku 6.32 przedstawiono jedno z rozwiązań tego typu obudowy.



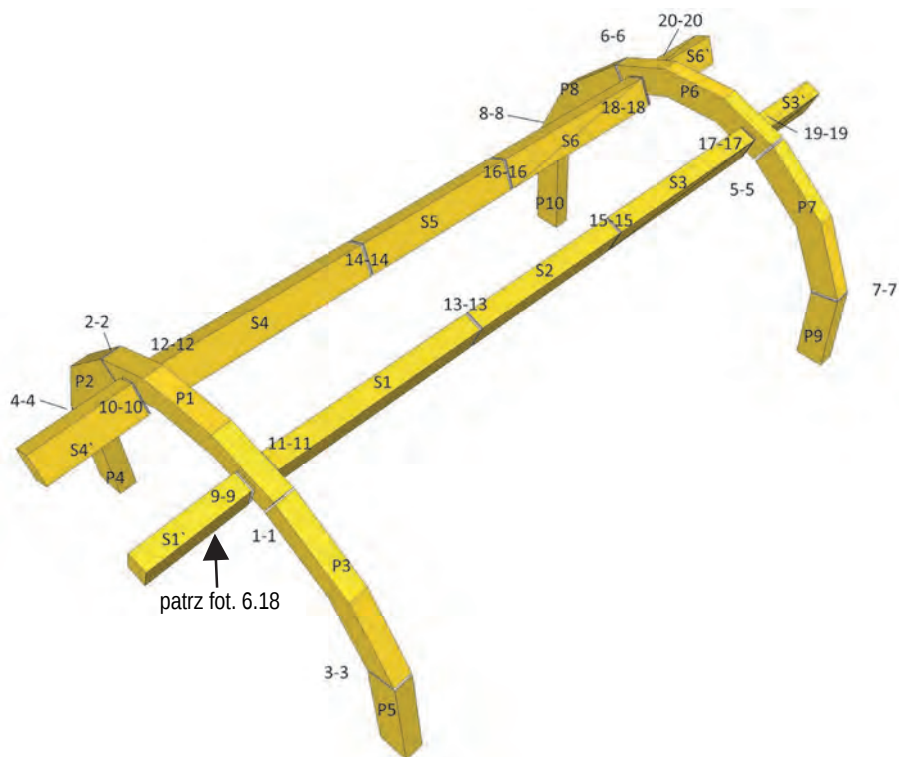
Rys. 6.32. Kombinowana obudowa odgałęzienia R-89

Jak widać prezentowana obudowa składała się z 52 odrzwi ze spągnicami, zabezpieczających strefę połączenia wyrobisk. Powierzchnia czołowa odgałęzienia została zabezpieczona obudową zbliżoną kształtem do czaszy (Głuch i Limburski 1987; Głuch i in. 1987). W jej skład wchodziły cztery łuki południkowe, 15 równoleżnikowych oraz 21 krótkich łuków uzupełniających. Odrzwia podbudowane zostały sześcioma słupami stalowymi wypełnionymi zbrojonym betonem, których długość w stosunkowo prosty sposób mogła być dostosowana do rzeczywistej wysokości wyrobiska. Słupy podpierały (rozpierały) odrzwia i spągnice pośrednio – przez wielosegmentowe belki przystropowe i przyspągowe, ułożone w kształt litery „Y”. Wysięgnikowa część belek przystropowych podwieszona została do portalu, a przyspągowa połączona z portalem spągnicowym. Portal został zaprojektowany jako pięciobelkowy, a portal spągnicowy jako trójbelkowy. Poszczególne elementy obudowy zostały ze sobą połączone śrubami, kłami, strzemionami lub strzemionami kątowymi.

6.3.5. Przebudowa wyrobiska w skrzyżowanie

Ciekawym zastosowaniem obudowy szkieletowej może być wykonanie przebudowy wyrobiska w skrzyżowanie. Obudowy takie wykonano między innymi w kopalniach „Marcel” i „Bogdanka”. W kopalni „Marcel” w miejscu zaplanowanego skrzyżowania pierwotnie zabudowano obudowę z odrzwi z kształtownika V29. Ostatecznie miało powstać skrzyżowanie dwóch pochylni. W tym celu opracowano konstrukcję obudowy umożliwiającą zabezpieczenie rejonu skrzyżowania, przy maksymalnym wykorzystaniu istniejącej obudowy. W wyniku prac projektowych powstała konstrukcja z dwóch

portali spiętych dwoma belkami stropowymi, podbudowującymi istniejące odrzwia i łuki stropnicowe (Rotkegel 2016a). Zarys konstrukcji zasadniczej przedstawiono na rysunku 6.33, a na fotografii 6.18 – fragment tej obudowy.

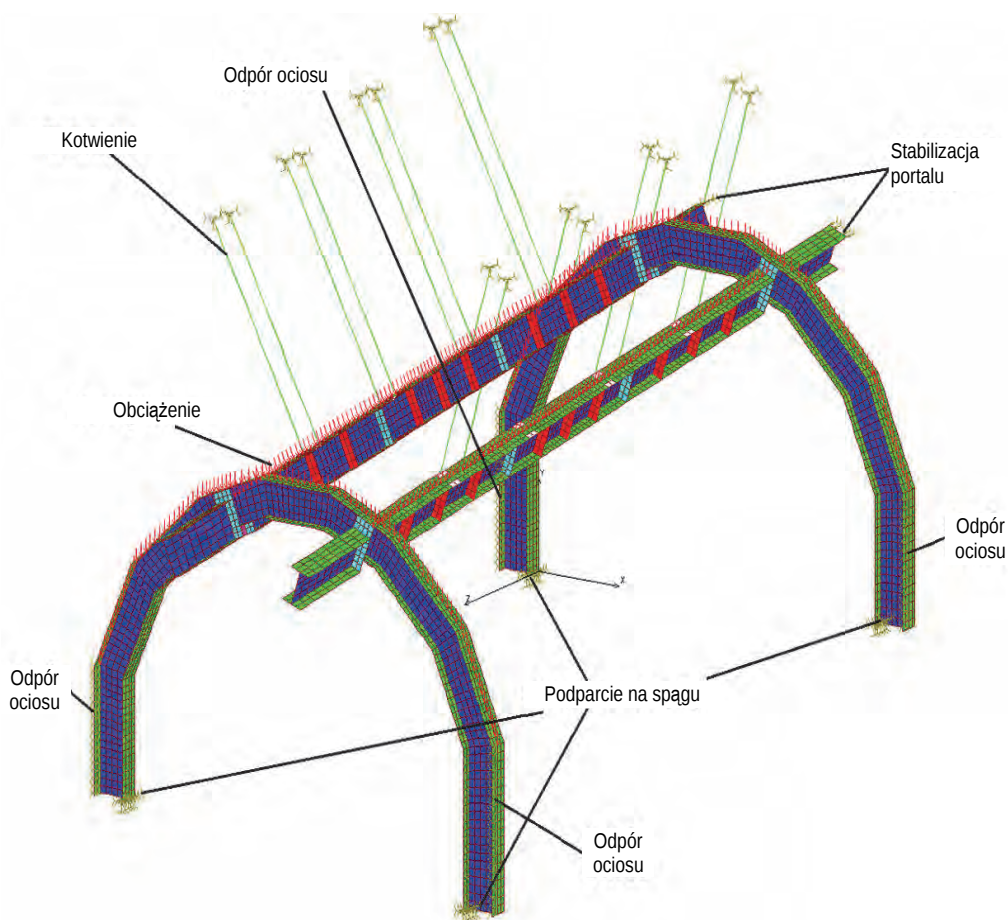


Rys. 6.33. Obudowa skrzyżowania podbudowująca istniejące odrzwia

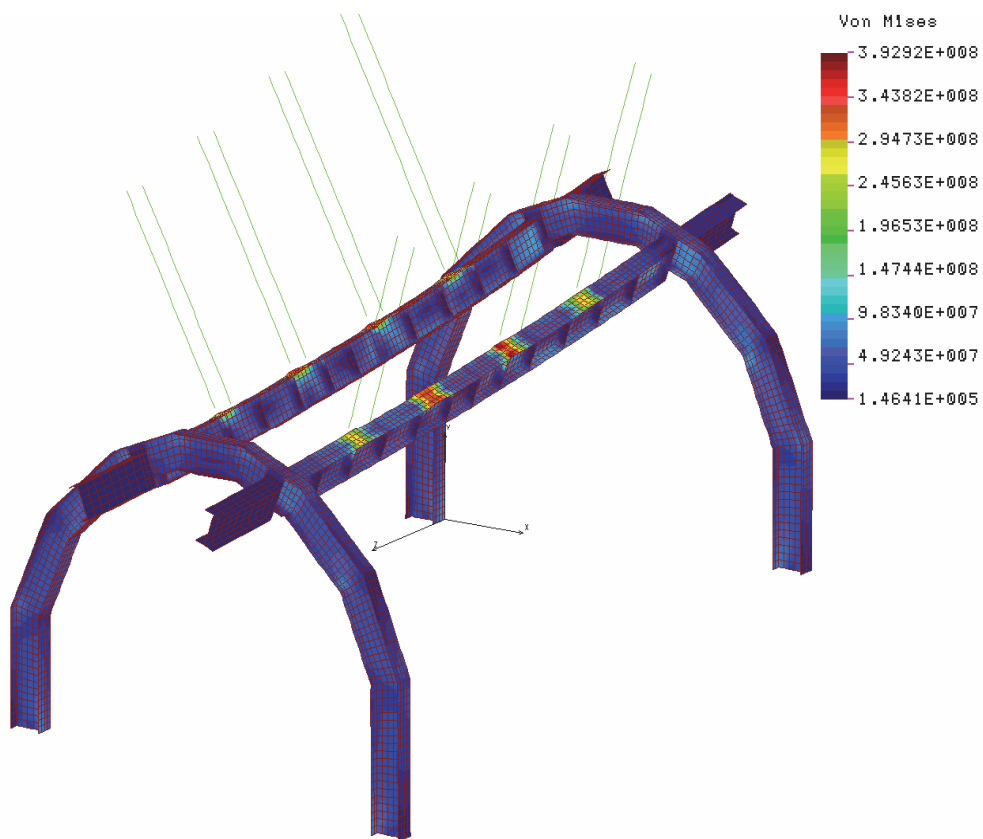


Fot. 6.18. Fragment konstrukcji wzmacniającej obudowę

Zastosowanie takiej obudowy związane było z przyjętą technologią wykonania skrzyżowania. W pierwszym etapie zabudowy do istniejących odrzwi montowane były belki przystropowe. Następnie demontowano odrzwa w miejscu dwóch portali. Kolejnym etapem była zabudowa portali i połączenie ich z belkami przystropowymi, a następnie zabudowa belek wysięgnikowych. Po połączeniu konstrukcji z istniejącą obudową, wykonaniu dolewek betonowych w miejscu posadowienia portali oraz przykotwieniu konstrukcji, przystąpiono do demontażu łuków ociosowych w miejscu skrzyżowania. W efekcie tych działań powstała obudowa skrzyżowania z łukami stropnicowymi odrzwi, wspartymi na belkach przystropowych opartych końcami na dwóch portalach. Parametry przekrojowe i materiałowe konstrukcji dobrane zostały w wyniku analizy modelowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Na rysunku 6.34 przedstawiono model przygotowany do analiz, a na rysunku 6.35 – najważniejsze uzyskane wyniki – rozkład naprężeń zredukowanych w konstrukcji.



Rys. 6.34. Model przygotowany do obliczeń



Rys. 6.35. Rozkład naprężeń zredukowanych w zaprojektowanej konstrukcji

Jak wynika z przedstawionych przykładów, zakres stosowania obudowy szkieletowej jest dość szeroki – obejmuje typowe i nietypowe połączenia wyrobisk korytarzowych, a także specyficzne odcinki wyrobisk poza połączeniami.

PODSUMOWANIE

Portalowa (szkieletowa, ramowa, żebrowa) obudowa połączeń wyrobisk korytarzowych jest obudową rozwijaną w polskim górnictwie węglowym około pół wieku. W tym czasie powstawały różnego rodzaju rozwiązania konstrukcyjne – projekty obudowy odgałęzień i skrzyżowań, które w różnym stopniu i zakresie były realizowane, a później weryfikowane w warunkach górniczych. Często były to konstrukcje, które z różnych względów nie weszły do szerszego stosowania, jak konstrukcja opisana przez Wojtusiaka (1975). Pewnym przełomem w tej dziedzinie, przypadającym na początek lat 90. XX wieku, było zaprojektowanie, wykonanie i zastosowanie obudowy odgałęzienia w postaci portalu i wspornika. W tych latach obudowy takie produkowały na potrzeby kopalń: firma Heintzmann Silesia, Huta „Łabędy” i przez krótki czas FAZOS, a w późniejszych latach PPG ROW-JAS. Początkowo rocznie produkowano pojedyncze egzemplarze. Główny Instytut Górnictwa od samego początku zaangażowany był w projektowanie i rozwój tego typu konstrukcji. W ciągu 24 lat (do końca 2016 r.) w GIG opracowano prawie 340 projektów portalowych obudów, przeznaczonych do zabudowy w kopalniach w konkretnych wyrobiskach. Dodatkowo opracowanych zostało kilkadziesiąt projektów próbnych, projektów przeznaczonych do dopuszczeń i certyfikacji, projektów adaptacyjnych do zmienionej lokalizacji oraz wykonano same obliczenia i analizy wytrzymałościowe dla obudów portalowych (szkieletowych). Można przypuszczać, że liczba ta stanowi co najmniej 2/3 wszystkich konstrukcji zaprojektowanych, wykonanych i zabudowanych w polskich kopalniach. Główny Instytut Górnictwa jest więc liderem w projektowaniu tego typu konstrukcji. W ramach prowadzonych prac powstały nowe metody i programy komputerowe wspomagające proces projektowania, a także rozwinięte zostały już istniejące narzędzia. Należy przede wszystkim wymienić prezentowane wcześniej programy do obliczania obciążeń działających na obudowę, do projektowania odrzwi oraz biblioteki wspomagające projektowanie w systemach CAD. Stosowanie tych narzędzi znacznie usprawnia i przyspiesza proces konstruowania.

Opracowane i zweryfikowane pozytywnie w trakcie kilkuset zadań projektowych metody projektowe i algorytmy obliczeniowe pozwalają na konstruowanie, a później wykonywanie i zabudowywanie w wyrobisku obudowy optymalnej – z uwzględnieniem kryterium bezpieczeństwa, kosztów wykonania i możliwości zabudowy.

Portalowe obudowy wyrobisk korytarzowych znajdują, zwłaszcza w ostatnich 10 latach, coraz szersze zastosowanie. Oprócz zabezpieczania połączeń wyrobisk mogą być i są one stosowane także do zabezpieczania komór, wzmacniania istniejącej obudowy skrzyżowań, czy też do zabezpieczania rejonów zmiany kierunku wyrobiska. Doskonale świadczą o tym przykłady obudów zaprezentowane w rozdziale 6. Popularność tej obudowy wynika z jednej strony z coraz trudniejszych warunków geologiczno-górnictwowych, a z drugiej – z szerokich możliwości jej kształtowania – dostosowywania do geometrii i funkcji wyrobiska. Sposób zabezpieczania odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk korytarzowych, wykorzystujący obudowy szkieletowe (portalowe, ramowe) pozwala na uzyskanie obudowy o wysokich parametrach podpornościowych, dopasowanej do gabarytów i wzajemnego usytuowania łączących się wyrobisk. Obudowy takie charakteryzują się zwartym, logicznym i przejrzystym układem odrzwi uzupełniających, nawiązującym do dalszych odcinków wyrobisk. Pozwalają także na

zminimalizowanie wielkości wykonywanego wyłomu, co eliminuje znaczne, zbędne przestrzenie w pułapie wyrobiska, jak w przypadku odgałęzień tzw. palmowych. Zaprezentowane przykłady rozwiązań konstrukcyjnych mogą być dowodem na możliwość praktycznie dowolnego kształtowania postaci konstrukcyjnej szkieletu takich obudów, dla uzyskania konstrukcji optymalnej z uwagi na koszt wykonania oraz uzyskanie maksymalnej nośności. Przykłady te tylko w pewnym stopniu wyczerpują możliwe zastosowania – z całą pewnością można stwierdzić, że istnieje cały szereg zupełnie innych, nowych zastosowań tego typu obudów, dotychczas niezidentyfikowanych.

Z uwagi na coraz trudniejsze warunki geologiczno-górnice prowadzenia eksploatacji, należy spodziewać się, że portalowe obudowy odgałęzień i skrzyżowań będą coraz częściej stosowane, a ich konstrukcja będzie się rozwijać. Należy liczyć się także ze stopniowym powiększaniem gabarytów obudowy. Jest to spowodowane ciągłym zwiększaniem wymaganych rozmiarów łączących się wyrobisk, co wynika ze stosowania wielkogabarytowych maszyn i urządzeń. Potwierdzają to również dotychczasowe trendy (rys. 1.4).

LITERATURA

1. Bąk R., Burczyński T. (2013): Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego. Warszawa, PWN.
2. Bock S., Prusek S., Rotkegel M. (2009): Design and control of working support in Polish coal mines based on three-dimensional numerical modeling. 28th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, USA.
3. Bogucki W., Żybertowicz M. (1996): Tablice do projektowania konstrukcji metalowych. Warszawa, „Arkady”.
4. BUDOKOP (1988): Tymczasowe wytyczne doboru obudów dla komór i połączeń wyrobisk korytarzowych. Mysłowice, BUDOKOP.
5. Chmielewski W. (2005): Dobór stalowych stóp podporowych dla obudowy odrzwiowej ŁPV górniczych wyrobisk korytarzowych. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 10, s. 15-20.
6. Chmielewski T., Nowak H. (1996): Mechanika budowli. Metoda przemieszczeń. Metoda Crossa. Metoda elementów skończonych. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
7. Chmielewski W., Łaboński S. (1997): Stabilizacja stalowych obudów podziemnych wyrobisk górniczych przy zmiennym rozstawie odrzwi. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 12, s. 39-42.
8. Chudek M. (1986): Obudowa wyrobisk górniczych, Część 1. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
9. Chudek M., Pach A., Straś J. (1986): Katalog obudów wyrobisk górniczych. Obudowa wyrobisk korytarzowych i ich połączeń. Warszawa, SITG.
10. Chudek M. i inni (1999): Zasady doboru i projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Gliwice – Kraków – Katowice, Politechnika Śląska – Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Ochrony Powierzchni.
11. Daniłowicz R., Rotkegel M. (2003): Sposób zabezpieczenia krzyżujących się wyrobisk w warunkach wypiętrzania spągu. Górnictwo i Inżynieria. Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej R. 27, z. 3-4, s. 253-258.
12. Daniłowicz R., Rotkegel M., Stałęga S. (2006): Odgałęzienia i skrzyżowania [w] Stalowe obudowy odrzwiowe. Nowe rozwiązania konstrukcyjne i metody projektowania. Praca zbiorowa pod redakcją K. Rułki. Katowice, Główny Instytut Górnictwa, s. 185-214.
13. Dietrich M. i inni (1995): Podstawy konstrukcji maszyn, Tom 1. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
14. Dietrych J. (1974): Projektowanie i konstruowanie. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
15. Drzęźła B. i inni (2000): Obudowa górnicza. Zasady projektowania i doboru obudowy wyrobisk korytarzowych w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Wyd. II popr. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej.
16. Drzęźła B. i inni (2011): Obudowa górnicza. Zasady projektowania i doboru obudowy wyrobisk korytarzowych w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Wyd. III popr. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej.
17. Duży S. (2005): Elementy teorii niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji w projektowaniu budowli podziemnych. Górnictwo i Geoinżynieria. Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej R. 29, z. 3/1, s. 199-206.
18. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłowski Z. (1996): Wytrzymałość materiałów. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
19. Dziama A. (1985): Metodyka konstruowania maszyn. Warszawa, Państwowe Wydaw. Naukowe.
20. Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A. (1994): Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Katowice, Śląskie Wydaw. Techniczne.

21. Gajko G., Rotkegel M., Saługa P. (2002): Badanie stanu naprężenia odrzwi obudowy łukowej pracującej w warunkach różnych wariantów obciążenia. Szkoła Eksploatacji Podziemnej. Kraków, IGSMIE PAN.
22. GBSiPG (1974): Katalog typowych połączeń wyrobisk korytarzowych w obudowie łukami korytkowymi z rozjazdami o skosie 1:5, Wydanie II. Katowice, Główne Biuro Studiów i Projektów Górniczych.
23. Głuch P., Limburski T. (1987): Przykłady utrzymania stateczności połączeń wyrobisk korytarzowych w trudnych warunkach geotechnicznych. Budownictwo Węglowe Projekty-Problemy nr 5, s. 1-7.
24. Głuch P., Kosiński Z., Limburski T., Stachowicz S. (1987): Obudowa ścian czołowych połączeń wyrobisk korytarzowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Górnictwo z. 157.
25. Grażyński A., Zarzycki Z. (2003): Delphi 7 dla każdego. Gliwice, Wydaw. Helion.
26. Hoek E. (1999): Rock engineering – course notes. Toronto, Evert Hook Consulting Engineer Inc.
27. Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. (1995): Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam, Balkema.
28. Huta Łabędy (2015): Stalowe obudowy górnicze i akcesoria. Katalog wyrobów.
29. Konderla P., Kasprzak T. (1997): Metody komputerowe w teorii sprężystości, Część I. Metoda elementów skończonych. Wrocław, Dolnośląskie Wydaw. Edukacyjne.
30. Konopa W. (1983): Wpływ wykładki obudowy chodnikowej na nośność i wytrzymałość odrzwi tej obudowy w świetle badań laboratoryjnych i rozważań teoretycznych. Wiadomości Górnicze nr 6, s. 148-153.
31. Konopa W., Sawka B. (1987): Nośność i wytrzymałość odrzwi łukowej obudowy chodnikowej ŁP-V jako funkcja ich wielkości. Prace Głównego Instytutu Górnictwa. Komunikat nr 742.
32. Lischner R. (2002): Delphi. Almanach. Gliwice, Wydaw. Helion.
33. Majcherczyk T., Małkowski P. (1998): Wpływ skrzyżowania wyrobisk chodnikowych na stan wyęźnienia górotworu. XXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Kraków, AGH.
34. Małoszewski J., Mateja J., Rułka K. (1985): Nośność stalowych odrzwi obudowy łukowej otwartej na podstawie przeprowadzonych badań. Prace Głównego Instytutu Górnictwa. Seria dodatkowa. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
35. Małoszewski J., Mateja J., Rułka K. (1989a): Podstawy teoretyczne projektowania i doboru stalowych obudów odrzwiowych dla wyrobisk komorowych i odgałęzień. Prace Głównego Instytutu Górnictwa. Komunikat nr 756.
36. Małoszewski J., Mateja J., Rułka K. (1989b): Projektowanie i dobór obudowy o konstrukcji otwartej i zamkniętej dla wyrobisk komorowych oraz odgałęzień. Prace Głównego Instytutu Górnictwa. Komunikat nr 757.
37. Marciniak A. (1991): Turbo Pascal 5.5. Poznań, Wydaw. Nakom.
38. Obwieszczenie (2016): Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo geologiczne i górnicze. Dz. U. poz. 1131.
39. Olszewski J., Osuchowski J., Pilecki J., Pluta L., Przybyła M., Szczepański Z., Zajdel F. (1989): Leksykon górniczy. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
40. Osiński Z., Wróbel J. (1995): Teoria konstrukcji. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN.
41. Osiński Z. i inni (1999): Podstawy konstrukcji maszyn. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN.
42. Piechota S. i inni (2002): Instrukcja doboru obudowy wyrobisk korytarzowych w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” SA, Lublin.
43. Podgórski K., Kleta H. (1987): Określenie ciśnienia górotworu na obudowę wyrobisk górniczych na podstawie pomiarów odkształceń obudowy i górotworu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Górnictwo nr 157, s. 95-105.

44. Prusek S., Rotkegel M., Skrzyński K. (2007): Proces projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych z wykorzystaniem systemu CAD. *Górnictwo i Geoinżynieria*. Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej R. 31, z. 3/1, s. 485-496.
45. Rakowski G. (1996): Metoda elementów skończonych. Wybrane problemy. Warszawa, Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej.
46. Rakowski G., Kacprzyk Z. (1993): Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Warszawa, Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej.
47. Rotkegel M. (2003a): Przykładowy przebieg wytwarzania obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 4, s. 5-28.
48. Rotkegel M. (2003b): Komputerowe wspomaganie projektowania nietypowych odrzwi obudowy chodnikowej. *Przegląd Górniczy* nr 12, s. 16-19.
49. Rotkegel M. (2003c): Specjalistyczny program do projektowania geometrii odrzwi łukowej obudowy wyrobisk korytarzowych. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* nr 12, s. 9-11.
50. Rotkegel M. (2004): Komputerowo wspomagane projektowanie odrzwi obudowy chodnikowej. Charakterystyka programu CAD i przykłady projektowe. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa* nr 862.
51. Rotkegel M. (2005): Wpływ wielkości kształowników i gatunku materiału na stan wyężenia konstrukcji obudowy odgałęzień wyrobisk korytarzowych. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 1, s. 5-16.
52. Rotkegel M. (2009): Program komputerowy do wspomagania konstruowania odrzwi stalowej obudowy wyrobisk korytarzowych. *Wiadomości Górnicze* nr 12, s. 707-711.
53. Rotkegel M. (2010): Influence of the shape of portal support of working junctions on its stress state [w] *New Techniques and Technologies in Mining. Conference of the School-of-Underground-Mining, Ukraine, Dnipropietrowsk/Yalta*. Taylor and Francis Group, s. 207-212.
54. Rotkegel M. (2012a): Wpływ sposobu obciążenia odrzwi obudowy chodnikowej na stan ich wyężenia i nośność. *Wiadomości Górnicze* nr 1, s. 29-33.
55. Rotkegel M. (2012b): Metoda określania obciążenia portalowej obudowy odgałęzień wyrobisk korytarzowych na podstawie jej deformacji. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 2, s. 89-103.
56. Rotkegel M. (2013a): Typowe rozwiązania konstrukcyjne portalowej obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych. *Przegląd Górniczy* nr 6, s. 7-16.
57. Rotkegel M. (2013b): Przykłady narzędzi informatycznych poprawiających efektywność projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych. *Wiadomości Górnicze* nr 7-8, s. 434-439.
58. Rotkegel M. (2014): Wpływ sposobu montażu siatek okładzinowych na ich pracę. *Przegląd Górniczy* nr 3, s. 79-85.
59. Rotkegel M. (2015): Wybrane przykłady nietypowych konstrukcji portalowej obudowy odgałęzień i skrzyżowań. *Przegląd Górniczy* nr 5, s. 86-95.
60. Rotkegel M. (2016a): Obudowy szkieletowe stosowane w wyrobiskach korytarzowych i komorowych. *Przegląd Górniczy* nr 4, s. 48-55.
61. Rotkegel M. (2016b): Program wspomagający dobór obudowy wyrobisk korytarzowych. *Wiadomości Górnicze* nr 10, s. 569-575.
62. Rotkegel M., Daniłowicz R. (2006): Zastosowanie kotwi do stabilizacji obudowy odgałęzienia. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 2, s. 81-90.
63. Rotkegel M., Dragon T. (2006): Optymalizacja procesu projektowania i wytwarzania portalowej obudowy odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk korytarzowych. XIII Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna *Górnictwo i Zagrożenia Naturalne 2006*. Głębokość eksploatacji a zagrożenia górnicze. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
64. Rotkegel M., Daniłowicz R. (2007): Wybrane sposoby zapewnienia właściwej stabilizacji szkieletowej obudowy odgałęzienia wyrobisk. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe* nr 1, s. 31-37.

65. Rotkegel M., Bock S. (2009): Określenie strefy spekań wokół połączenia wyrobisk. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 2/1, s. 7-13.
66. Rotkegel M., Filipowicz K. (2016): Obudowa portalowa jako zabezpieczenie komory nad zbiornikiem. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe* nr 1, s. 31-39.
67. Rotkegel M., Bock S., Witek M. (2010): Analiza wybranych sposobów pełnego wykorzystania parametrów nośnościowych portalowej obudowy odgałęzienia. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa* nr 881.
68. Rotkegel M., Skuplik M., Bock S. (2005): Komputerowe wspomaganie projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń. Możliwości i sposoby korzystania z biblioteki typowych elementów. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 3, s. 39-53.
69. Rotkegel M., Szade A., Szot Ł. (2016): Zastosowanie skaningu laserowego 2D w ocenie stanu technicznego podziemnych obiektów geoinżynierskich. *Przegląd Górniczy* nr 6, s. 67-77.
70. Rotkegel M., Daniłowicz R., Fraś A., Najman W. (2004): Obudowa szkieletowa odgałęzień chodników. *Przegląd Górniczy* nr 6, s. 34-37.
71. Rotkegel M., Szot Ł., Witek M., B. Szewczyk (2015a): Selection of the working support based on 3D laser scanner measurements. 16. Geokinematyczny Tag, Freiberg.
72. Rotkegel M., Szot Ł., Witek M., Szewczyk B. (2015b): Zastosowanie nowoczesnych narzędzi w projektowaniu obudowy chodnika podstawowego w pokładzie 510 w Zabytkowej Kopalni Węgla Kamiennego „Guido”. *Wiadomości Górnicze* nr 7-8, s. 387-394.
73. Rozporządzenie (2002): Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwwybuchowego w podziemnych zakładach górniczych.
74. Rozporządzenie (2006): Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 9 czerwca 2006 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwwybuchowego w podziemnych zakładach górniczych. *Dz.U.*2006.124.863.
75. Rozporządzenie (2016): Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. *Dz. U.* poz. 1118.
76. Rułka K., Kowalski E., Perek J. (1999): Nowe konstrukcje stalowych obudów odrzwiowych dla trudnych warunków geologiczno-górnictwowych. *Wiadomości Górnicze* nr 7-8, s. 323-329.
77. Rułka K., Mateja J., Jasnowski M. (1984): Zasady projektowania i doboru obudów dla komór i połączeń wyrobisk korytarzowych, Część I. Podstawy teoretyczne projektowania i doboru obudów dla komór i połączeń wyrobisk korytarzowych. *Budownictwo Węglowe. Projekty-Problemy* nr 10, s. 1-10.
78. Rułka K. i inni (2001): Uproszczone zasady doboru obudowy odrzwiowej wyrobisk korytarzowych w zakładach wydobywających węgiel kamienny. Główny Instytut Górnictwa, Seria Instrukcje nr 15.
79. Rusiński E. (1994): Metoda elementów skończonych. System COSMOS/M. Warszawa, Wydaw. Komunikacji i Łączności.
80. Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T. (2000): Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Wrocław, Oficyna Wydaw. Politechniki Wrocławskiej.
81. Skrzyński K. (1997): Zasady projektowania obudowy odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk korytarzowych. Konferencja nt. Nowe rozwiązania obudowy wyrobisk korytarzowych, skrzyżowań, odgałęzień i rozwidleń. Katowice, Zarząd Główny SITG.
82. Skrzyński K., Kowalski E., Paczeński K. (1996): Projektowanie obudów połączeń wyrobisk korytarzowych z wykorzystaniem wspomagania komputerowego. *Budownictwo Podziemne '96*. Kraków, Wydaw. AGH.
83. Skrzyński K., Perek J., Kowalski E., Paczeński K. (1994): Opracowanie metody konstruowania obudów odgałęzień symetrycznych i niesymetrycznych oraz skrzyżowań

- wyrobisk korytarzowych. Praca badawcza GIG nr 2006074BK. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
84. SRAC (1999): COSMOS/M – User's Guide. Los Angeles, USA.
 85. Stałęga S. (1997): Praktyczne przykłady zastosowania obudowy typu „łabędy” do zabezpieczania odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk korytarzowych. Konferencja nt. Nowe rozwiązania obudowy wyrobisk korytarzowych, skrzyżowań, odgałęzień i rozwidleń. Katowice, Zarząd Główny SITG.
 86. Stałęga S. (1999): Przegląd ciekawszych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych obudowy skrzyżowań i odgałęzień opartych na szkielecie żebrowym. Seminarium Nowe rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne stalowych obudów odrzwiowych dostosowanych do warunków wzmożonych ciśnień. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, Seria Konferencje nr 31, s. 99-108.
 87. Stałęga S. (2001): Podstawy teoretyczno-badawcze projektowania szkieletowych konstrukcji obudowy skrzyżowań i odgałęzień wyrobisk udostępniających. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa nr 845.
 88. Stoiński K., Perek J., Sawka B., Stałęga S., Kowalski E., Rułka K. (1996): Monografia. Przegląd i kierunki rozwoju obudowy wyrobisk korytarzowych i komorowych w kopalniach węgla kamiennego, Część III: Stalowe obudowy odrzwiowe dla wyrobisk korytarzowych i komorowych. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa nr 811.
 89. Szade A., Bochenek W., Passia H. i inni (2012a): Opracowanie laserowego systemu automatycznego pomiaru geometrii obudowy i wyposażenia szybów. Praca statutowa GIG nr 10010112-170. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
 90. Szade A., Bochenek W., Passia H. i inni (2012b): Opracowanie laserowego systemu automatycznego pomiaru geometrii obudowy i wyposażenia szybów – rozbudowa układu. Praca statutowa GIG nr 10011123-170. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
 91. Szczepaniak Z. (1963): Stan naprężeń w narożach połączeń podziemnych wyrobisk korytarzowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo z. 7.
 92. Szewczyk J. (2002a): Biblioteki DWG. CAD/CAM. Forum nr 2.
 93. Szewczyk J. (2002b): Kreskowania, symbole, czcionki i specyficzne formaty. CAD/CAM. Forum nr 3.
 94. Ustawa (2011): Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze. Dz. U. nr 163, poz. 981.
 95. Wizner L., Wolny L., Duży S. (2013): Kierunki rozwoju metod utrzymania stateczności połączeń wyrobisk korytarzowych. Budownictwo Górnicze i Tunelowe nr 1, s. 9-21.
 96. Wojtusiak A. (1975): Żebrowa stalowa obudowa połączeń wyrobisk korytarzowych. Konferencja naukowo-techniczna nt. Budownictwo górnicze. Mysłowice, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Budownictwa Górniczego BUDOKOP.
 97. Internet (1): http://wodzislaw_slaski.fotopolska.eu/sztolnie,20,20/woj.slaskie.html; dostęp 1.08.2017.
 98. Internet (2): <http://www.kprgibsz.pl/pl/galeria>; dostęp 17.02.2017.

Normy

99. PN-B-06200 Konstrukcje stalowe budowlane. Warunki wykonania i odbioru. Wymagania podstawowe.
100. PN-EN 719 Spawalnictwo. Nadzór spawalniczy. Zadania i odpowiedzialność.
101. PN-EN 729-3 Spawalnictwo. Spawanie metali. Standardowe wymagania dotyczące jakości w spawalnictwie.
102. PN-G-05020 Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe. Obudowa sklepienia. Zasady projektowania i obliczeń statycznych.

103. PN-G-15000-02 Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształtowników korytkowych. Odrzwia łukowe podatne ŁP, z kształtowników typu V, typoszereg A. Wymiary.
104. PN-G-15000-03 Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształtowników korytkowych. Odrzwia łukowe podatne ŁP, z kształtowników typu V, typoszereg A. Łuki.
105. PN-G-15000-05 Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształtowników korytkowych. Odrzwia łukowe otwarte. Badania stanowiskowe.
106. PN-H-84042 Stale mikrostopowe na kształtowniki i akcesoria górnicze.
107. PN-H-93441-1 Kształtowniki stalowe walcowane dla górnictwa. Ogólne wymagania i badania.
108. PN-H-93441-2 Kształtowniki stalowe walcowane na gorąco dla górnictwa. Kształtowniki korytkowe stropnicowe KS21 i kształtowniki korytkowe ociosowe KO21. Wymiary.
109. PN-H-93441-3 Kształtowniki stalowe walcowane na gorąco dla górnictwa. Kształtowniki typu V. Wymiary.
110. PN-H-93407 Stal. Dwuteowniki walcowane na gorąco.
111. PN-H-93452 Dwuteowniki stalowe szerokostopowe walcowane na gorąco. Wymiary.
112. PN-M-69009 Spawalnictwo. Zakłady stosujące procesy spawalnicze. Podział.

ISBN 978-83-65503-08-4