

# 10

## METODA BADANIA WPŁYWU UTRATY STATECZNOŚCI NA OPORY RUCHU KOMBAJNU ŚCIANOWEGO

### 10.1 WSTĘP

W systemie ścianowym najczęściej stosowanymi maszynami urabiającymi są kombajny ścianowe. Maszyny te są dobierane do określonych warunków geologiczno-górnictwowych, aby osiągnąć zamierzony cel techniczny. Jednakże ze względów bezpieczeństwa konieczne jest zachowanie stateczności maszyny. Przez stateczność rozumiemy zdolność do utrzymania równowagi przez maszynę w przewidzianych dla niej warunkach użytkowania.

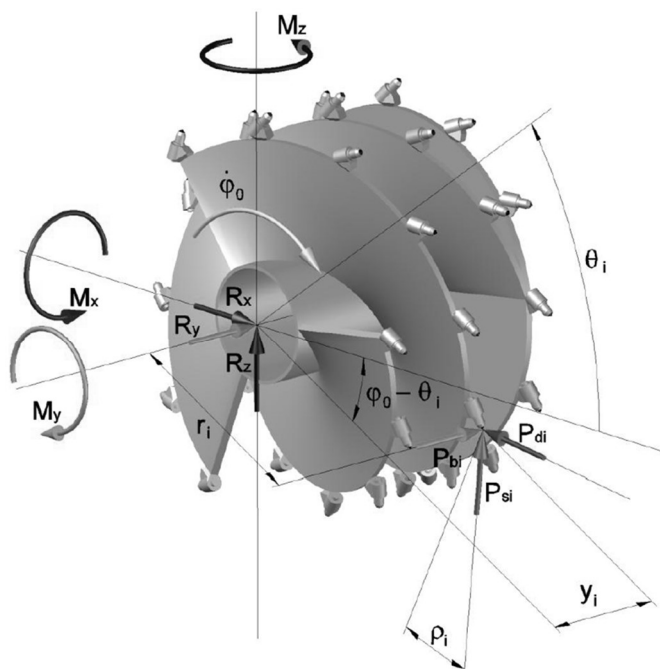
Zgodnie z normą zharmonizowaną PN-EN 1552:2005 [7] kombajn powinien zachować stateczność podczas transportu na bliższe i dalsze odległości, montażu, naprawy i w trakcie urabiania calizny węglowej. Podczas gdy w pierwszych przypadkach jedynym obciążeniem czynnym jest ciężar kombajnu, o tyle podczas urabiania calizny węglowej prócz ciężaru, obciążenie czynne stanowią siły wynikające z urabiania oraz ładowania urobku.

### 10.2 OPIS METODY BADAŃ

Zaproponowana w normie [7] metoda jest adekwatna w przypadku, gdy obciążenie czynne stanowi jedynie siła ciężkości. Dotyczy to zatem sytuacji transportu, montażu, demontażu i naprawy kombajnu.

W trakcie urabiania calizny obciążenia poszczególnych noży będących w kontakcie z calizną stanowi układ przestrzenny sił, które mogą być zredukowane do wybranego punktu w postaci trzech składowych sił:  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  oraz trzech momentów:  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  (rys. 10.1).

Ponieważ w normie [7] do oceny stateczności kombajnu zaproponowano model płaski, nie można w nim uwzględnić tak zredukowanego obciążenia organów urabiających. Poza tym nie uwzględnia się obciążenia czynnego w postaci siły posuwu, realizowanego przez ciągniki kombajnu.



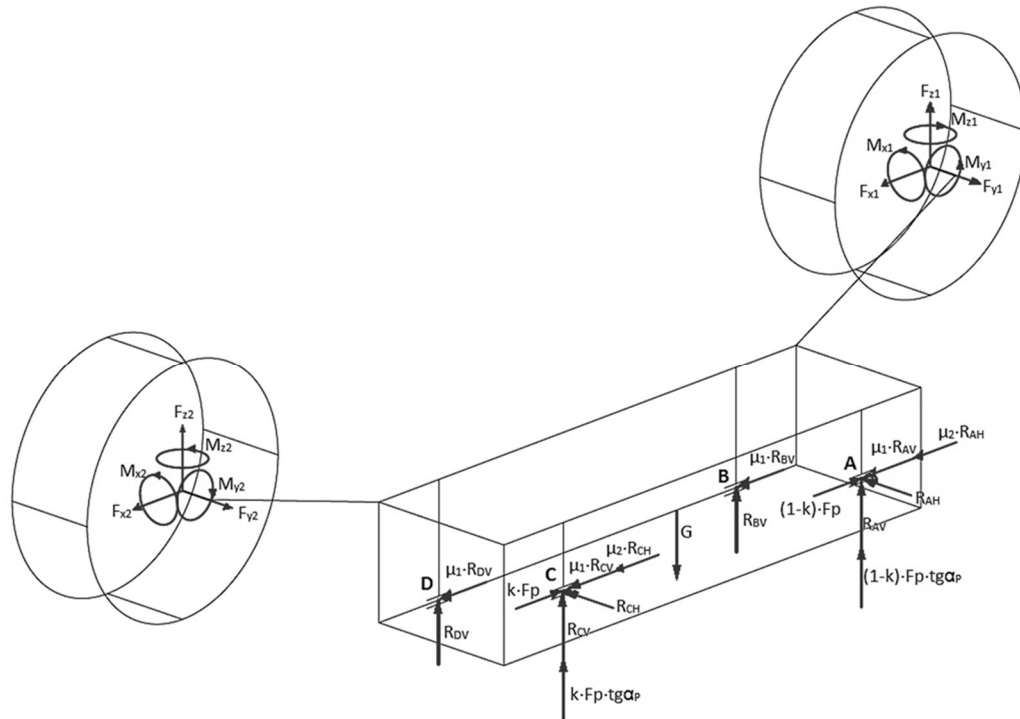
Rys. 10.1 Przestrzenny układ sił na organie urabiającym

Źródło: [3]

W związku z powyższym zaproponowano nową metodę analizy wykorzystującą model obciążenia kombajnu (rys. 10.2), który pozwala uwzględnić obciążenia czynne kombajnu wynikające z realizacji procesu urabiania calizny węglowej oraz siły ciężkości. Obciążenie bierne kombajnu stanowią reakcje w płozach, które są punktami podparcia kombajnu: B, D – od strony czoła ściany oraz A, C – od strony zrobów.

Analiza zwrotu składowych reakcji w poszczególnych punktach podparcia  $R_{AV}$ ,  $R_{BV}$ ,  $R_{CV}$  i  $R_{DV}$ , pozwala na ustalenie czy stateczność kombajnu jest zachowana. Stosując zasadę zastosowaną w normie [7], zgodnie z którą stateczność jest zachowana, gdy wypadkowa obciążenia kombajnu znajduje się między punktami podparcia, warunkiem zachowania stateczności jest wystąpienie składowych reakcji podparcia, prostopadłych do płaszczyzny podparcia, o zwrocie przedstawionym na rys. 10.2.

Wymaga to rozwiązania przestrzennego układu sił przedstawionego na rys. 10.2. Obciążenie czynne kombajnu w postaci obciążenia zredukowanego obu organów urabiających ( $F_{x1}$ ,  $F_{y1}$ ,  $F_{z1}$ ,  $M_{x1}$ ,  $M_{y1}$ ,  $M_{z1}$  – dla organu wyprzedzającego i  $F_{x2}$ ,  $F_{y2}$ ,  $F_{z2}$ ,  $M_{x2}$ ,  $M_{y2}$ ,  $M_{z2}$  – dla organu tylnego) oraz siła ciężkości traktowane są jako wiadome, natomiast składowe reakcji prostopadłe do płaszczyzny podparcia:  $R_{AV}$ ,  $R_{BV}$ ,  $R_{CV}$  i  $R_{DV}$  oraz działające w płaszczyźnie podparcia:  $R_{AH}$  i  $R_{CH}$  wraz z siłą posuwu  $F_p$  stanowią niewiadome układu równań równowagi. Ponieważ mamy do dyspozycji układ 6 równań, w których występuje 7 niewiadomych, mamy do czynienia z układem statycznie niewyznaczalnym.



Rys. 10. 2 Przestrzenny model obciążenia kombajnu

Dotychczasowe próby rozwiązania tego problemu poprzez zastosowanie modelu matematycznego [1] wykazały, że ze względu na jego postać brak jest możliwości identyfikacji parametrów modelu w oparciu o badania eksperymentalne.

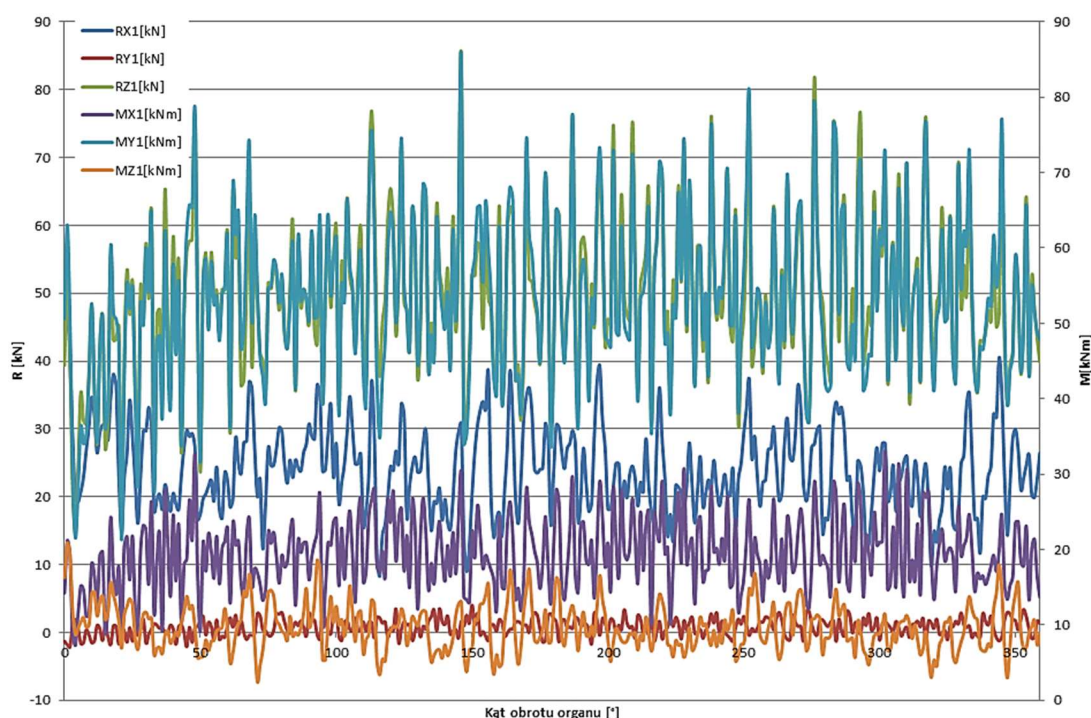
W związku z powyższym wykorzystano zasadę, że do utrzymania ciała w stanie równowagi wystarczą trzy punkty podparcia. Zgodnie z tym można prowadzić analizę eliminując jedną z podpór kombajnu co sprawi, że należy napisać równania równowagi dla następujących wariantów podparcia: (A, B, C); (A, B, D); (A, C, D); (B, C, D).

Ze względu na rozwiązania konstrukcyjne posadowienia kombajnu, utrata stateczności kombajnu względem osi wywrotu A-C skutkuje jego obrotem, wskutek czego organ urabiający urabia skały stropowe (reakcje B i D mają znak ujemny). W sytuacji, gdy wartość ujemną przyjmują reakcje A i C następuje utrata stateczności względem krawędzi wywrotu B-D, co sprawia, że obciążone są elementy prowadzenia kombajnu. Elementy te są obciążone także w sytuacji utraty stateczności w stosunku do krawędzi A-B oraz C-D, lecz wówczas obciążenie przenoszone jest tylko przez jeden element, odpowiednio w punkcie A lub C.

Najistotniejsza jest utrata stateczności względem krawędzi podparcia A-C, gdyż wówczas może dojść do zaczepienia kombajnu o elementy stropnicy sekcji obudowy zmechanizowanej, co z punktu widzenia oceny bezpieczeństwa stanowi sytuację niebezpieczną. W pozostałych przypadkach utraty stateczności wystąpi zwiększenie oporów ruchu kombajnu oraz intensywne zużycie elementów podchwytu.

### 10.3 IDENTYFIKACJA ZREDUKOWANEGO OBCIĄŻENIA ORGANU URABIAJĄCEGO KOMBAJNU

Do wyznaczenia zredukowanego obciążenia organów urabiających kombajnu ścianowego wykorzystano program „GeneSiS”, opracowany w Instytucie Mechanizacji Górnictwa, Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej [3]. Program ten umożliwia symulację procesu urabiania calizny węglowej dla zaprojektowanego lub zadanego układu noży na organach urabiających. Wynikiem procesu symulacji komputerowej są przebiegi składowych obciążenia zredukowanego do obu organów urabiających w trakcie jednego obrotu organów. Przykładowe przebiegi tych obciążeń przedstawiono na rys. 10.3 – przebiegi zredukowanych obciążeń dla organu wyprzedzającego oraz na rys. 10.4 – analogiczne przebiegi dla tylnego organu.



Rys. 10.3 Wartości zredukowanych obciążeń na wyprzedzającym organie urabiającym w funkcji kąta obrotu organu, dla  $H = 2,4\text{m}$ ,  $v_p = 7\text{ m/min}$ , Typ węgla: II

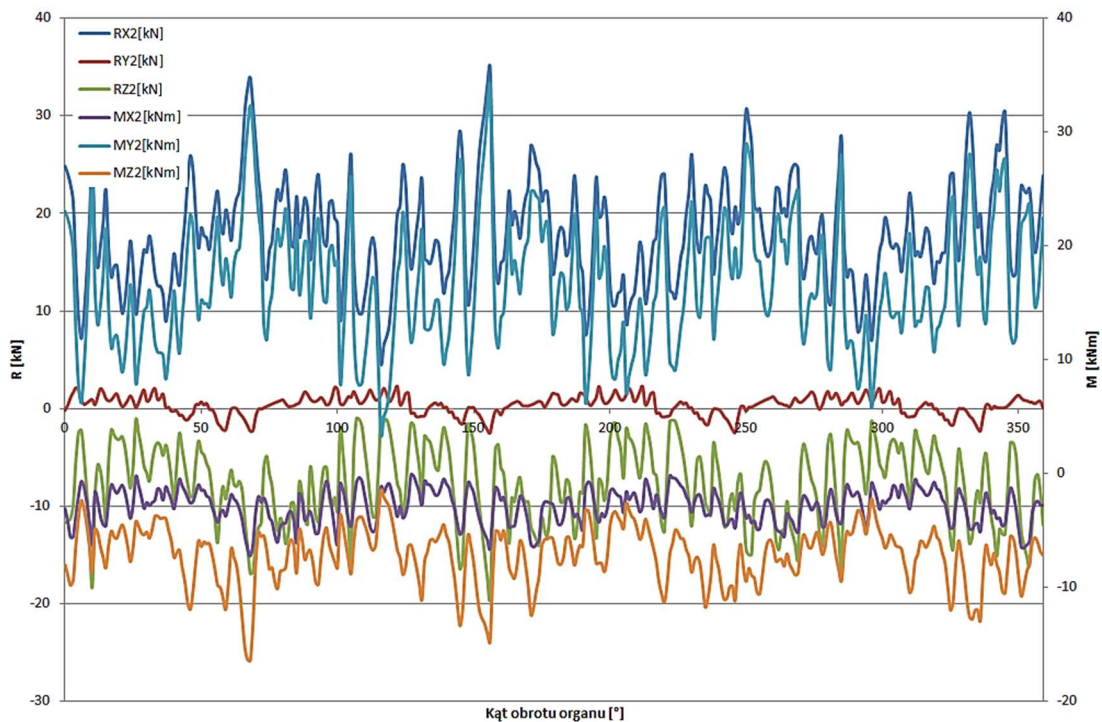
Zmienność obciążenia wynika głównie ze zmienności przebiegu składowych oporów skrawania i głębokości skrawów realizowanych przez poszczególne noże, ruchowego kąta przyłożenia oraz liczby noży będących w kontakcie z calizną. Na potrzeby analizy stateczności uśrednia się obciążenia dla jednego obrotu organu urabiającego co w zależności od prędkości kątowej organu odpowiada przedziałowi czasu od 1,15 s do 1,76 s.

Wykorzystanie programu „GeneSiS” umożliwia analizę wpływu szeregu czynników na zachowanie stateczności kombajnu, związanych z:

- Warunkami geologiczno-górnictwymi:

- Urabialność węgla, scharakteryzowana przez wytrzymałość węgla na ściskanie –  $R_c$ , wytrzymałość węgla na rozciąganie –  $R_r$ , kąt bocznego rozkruszenia węgla –  $\psi$ ,
- Wysokość ściany,
- Nachylenie podłużne i poprzeczne ściany,
- Cechami geometrycznymi kombajnu,
- Cechami konstrukcyjnymi organów urabiających:
  - Średnica i zabiór,
  - Zwrot urabiania.

Dzięki temu możliwe jest przeprowadzenie wszechstronnej analizy z wykorzystaniem modelu obciążenia kombajnu zweryfikowanego doświadczalnie [3].



Rys. 10. 4 Wartości zredukowanych obciążeń na tylnym organie urabiającym w funkcji kąta obrotu organu, dla  $H = 2,4\text{m}$ ,  $v_p = 7\text{ m/min}$ , Typ węgla: II

#### 10.4 OBIEKT I ZAKRES BADAŃ

Przykładową symulację komputerową przedstawiono dla kombajnu KSW-880E produkcji KOPEX [4]. W tabeli 10.1 przedstawiono charakterystykę techniczną kombajnu oraz zakres zmienności poszczególnych parametrów związanych z kombajnem, zmienianych w trakcie analizy.

Ilościowe cechy geometryczne kombajnu, niezbędne do przeprowadzenia symulacji uzyskano z dokumentacji technicznej modelu KSW-880E/3,3kV.

Wysokość ściany zmieniano w przedziale od 1,8-3,5 m co 0,2 m (w przypadku ostatniej rozpatrywanej wysokości – 0,1 m). Wykorzystano organ urabiający o średnicy 1,8 m. Całkowita liczba noży na organie wynosiła 52, z czego 20 noży

usytuowano na tarczy odcinającej. Na czterech płatach ślimakowych umieszczonych jest 8 linii skrawania, natomiast na tarczy odcinającej znajdują się cztery linie skrawania. Zabiór wspomnianego organu wynosi 800 mm. Na podstawie tego organu opracowano organ o zabiorze 1000 mm, różniący się liczbą noży, natomiast nie różniący się ich umiejscowieniem na poboczniczy organu. Prędkość obrotowa przyjęta do obliczeń wynosi 36,2 obr/min.

**Tabela 10.1 Dane techniczne kombajnu KOPEX-880E**

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość	Wartości przyjęte do badań
1.	Zakres wysokości urabiania	mm	1500-3800	1800-3500
2.	Średnica organów urabiających	mm	1400-2200	1800
3.	Wielkość zabioru	mm	750-1000	800; 1000
4.	Prędkość obrotowa organu	min <sup>-1</sup>	36,2 - 50,7	36,2
5.	Prędkość posuwu	m/min	0 - 25,6	0 - 15
6.	Siła uciągu kombajnu	kN	2 x 335	2x335
7.	Napięcie	kV	1; 1,1; 3,3	3,3
8.	Moc kombajnu	kW	750; 850	750
9.	Masa kombajnu	kg	~50000	49600

Źródło: [4]

Symulację przeprowadzono dla różnych wartości prędkości posuwu kombajnu zmieniających się w przedziale od 1-15 m/min, zmieniając wartość prędkości co 2 m/min.

Wartości współczynnika rozdziału mocy ciągników kombajnu oraz współczynników oporu ruchu przyjęto na podstawie badań [3]. Do badań wstępnych przyjęto kąty nachylenia podłużnego i poprzecznego równe 0°. Symulacje przeprowadzono dla czterech typów węgla o różnej urabialności. Podstawowe parametry charakteryzujące urabialność przedstawiono w tabeli 10.2.

**Tabela 10.2 Parametry węgla ujęte w badaniach**

Typ węgla	R <sub>c</sub> [MPa]	R <sub>r</sub> [MPa]	ψ [°]
I	10	0,5	70
II	20	1	60
III	30	2	60
IV	40	2,5	50

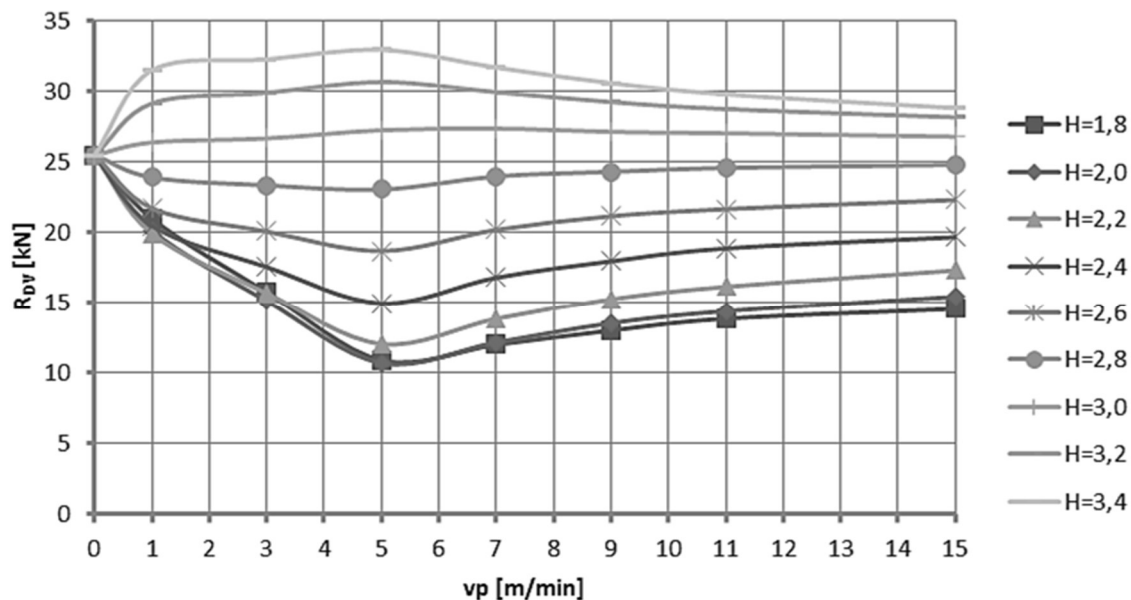
Wartości parametrów wytrzymałościowych, jak i kąt bocznego rozkruszenia dla poszczególnych węgli przyjęto na podstawie literatury [5].

## **10.5 ANALIZA WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW NA STATECZNOŚĆ KOMBAJNU ŚCIANOWEGO**

Celem symulacji było ustalenie wpływu prędkości posuwu kombajnu na zachowanie stateczności z uwzględnieniem: wysokości, nachylenia podłużnego i poprzecznego ściany, urabialności węgla w pokładzie oraz cech konstrukcyjnych organów urabiających.

Symulacje przeprowadzano wieloetapowo. W pierwszym etapie wyznaczono przebiegi obciążenia zredukowanego organu wyprzedzającego o zadanych: średnicy, zabiorze i układzie noży, w zależności od prędkości posuwu, dla wybranych do analizy typów węgla. W przypadku organu tylnego uwzględniano wysokość ściany. Symulację przeprowadzono z uwzględnieniem kombinacji przyjętych czynników wpływu.

W drugim etapie na podstawie uzyskanych wartości średniego zredukowanego obciążenia organów urabiających wyznaczano reakcje w punktach podparcia kombajnu oraz siłę posuwu dla wszystkich wariantów podparcia. Dla przykładu na potrzeby analizy utraty stateczności w stosunku do krawędzi wywrotu A-C rozpatrywano warianty podparcia w punktach A, C, D oraz A, B, C wyznaczając reakcje:  $R_{AV}$ ,  $R_{AH}$ ,  $R_{CV}$ ,  $R_{CH}$  i  $R_{DV}$  lub  $R_{AV}$ ,  $R_{AH}$ ,  $R_{CV}$ ,  $R_{CH}$  i  $R_{BV}$ . Ponieważ wartości reakcji  $R_{DV}$  wyliczonej z pierwszego przypadku, jak i  $R_{BV}$  – z drugiego, nie różniły się w dalszej części pracy zaprezentowano wyniki przypadku podparcia A, C, D.

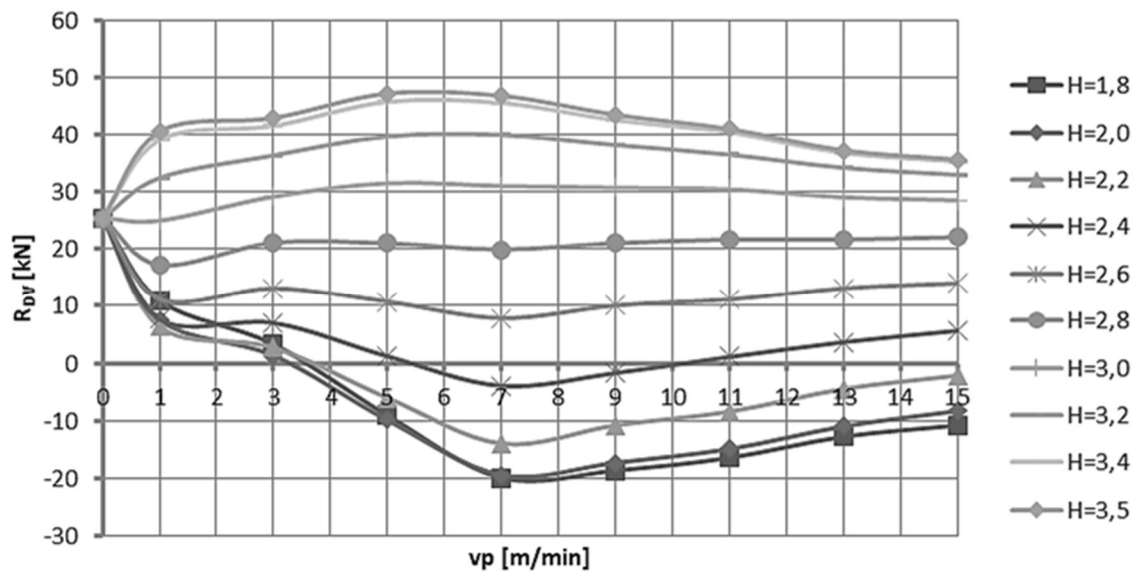


Rys. 10.5 Zależności reakcji  $R_{DV}$  od prędkości posuwu dla pierwszego typu węgla

Zmienność reakcji  $R_{DV}$  w rozpatrywanym zakresie prędkości posuwu w zależności od wysokości ściany dla węgla łatwo urabialnych (typ I) przedstawiono na rys. 10.5, natomiast dla węgla średnio urabialnych (typ II) na rys. 10.6. W przypadku urabiania węgla łatwo urabialnego w całym rozpatrywanym zakresie wysokości ściany i prędkości posuwu, nie dojdzie do utraty stateczności względem krawędzi podparcia A-C.

W przypadku węgla średnio urabialnych reakcja w punkcie D przyjmuje wartości ujemne w przedziale wysokości ściany od 1,8 m do 2,4 m, przy czym im wyższa jest wysokość ściany tym węższy zakres prędkości posuwu w którym dochodzi do utraty stateczności (rys. 10.6). Wynika to z faktu, że przy konwencjonalnym układzie organów urabiających (nadsiębierna praca organu

tylnego) wraz ze wzrostem ściany rośnie wysokość warstwy urabianej organem tylnym, co sprawia, że moment wywracający w stosunku do krawędzi A-C maleje.

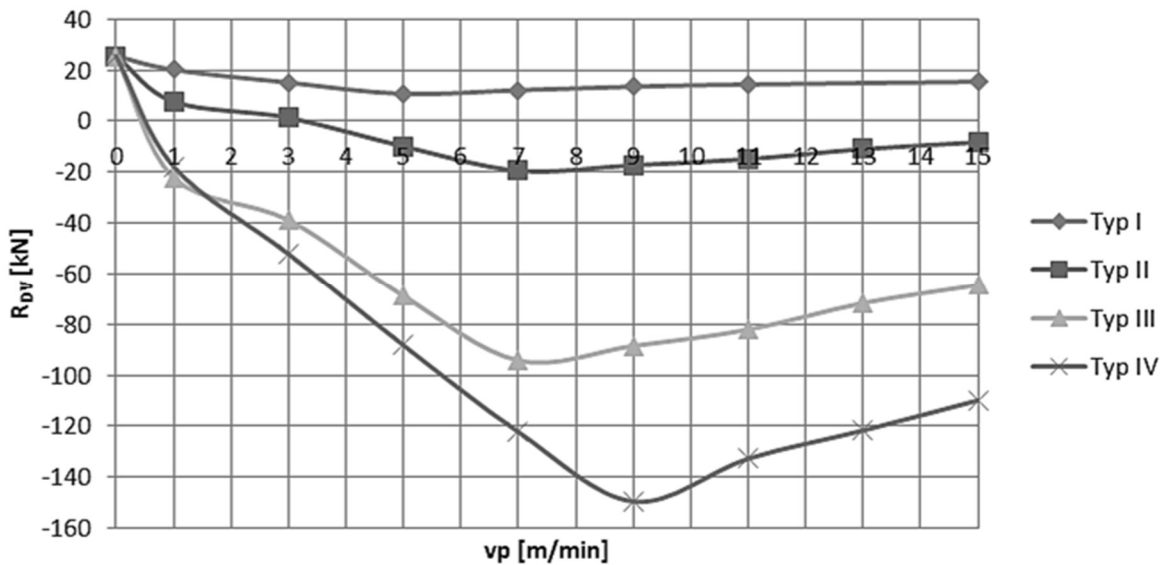


Rys. 10.6 Zależności reakcji  $R_{DV}$  od prędkości posuwu dla drugiego typu węgla

Wzrost wytrzymałości węgla powoduje znaczny wzrost różnicy pomiędzy maksymalną i minimalną wartością reakcji. W przypadku węgla pierwszego typu różnica ta wynosi ok. 25 kN, natomiast w przypadku drugiego typu już ok. 70 kN.

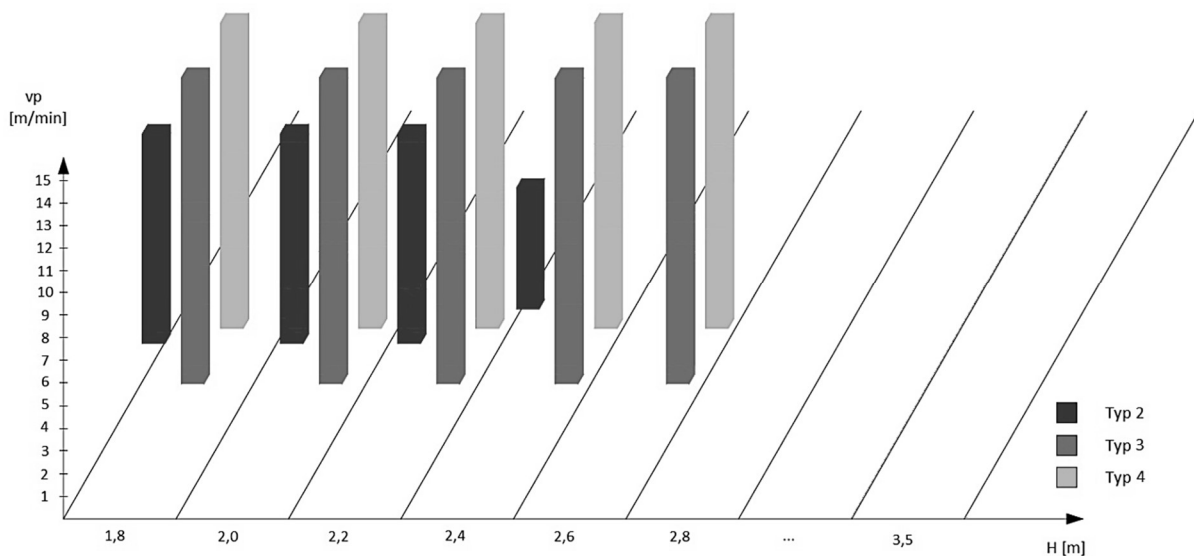
Kolejne badania przeprowadzono dla węgla trudno i bardzo trudno urabialnych wykazały, że wraz ze wzrostem parametrów wytrzymałościowych węgla wartość reakcji w punkcie D rośnie. Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem sił na każdym z noży wzrastają wartości zredukowanego obciążenia, co powoduje zwiększenie wartości reakcji w podporach. Prawidłowość powyższą potwierdza zmienność reakcji  $R_{DV}$  w ścianie o wysokości 2 m przy urabianiu węgla o różnej urabialności (rys. 10.7). Przy niewielkiej wysokości warstwy urabianej organem tylnym zwiększenie obciążenia zredukowanego obu organów, wynikającego ze zwiększonych oporów urabiania, skutkuje wzrostem momentu wywracającego w stosunku do krawędzi A-C. W przypadku węgla łatwo urabialnego nie dochodzi do utraty stateczności, przy urabianiu węgla średnio urabialnego utrata stateczności występuje przy prędkości większej od 3 m/min, a przy węglu trudno i bardzo trudno urabialnym już przy prędkości 1 m/min. Utrata stateczności przez kombajn może powodować zagłębienie się organu wyprzedzającego w strop, co prowadzi do zwiększenia energochłonności urabiania oraz zanieczyszczenia urobku skałą płoną.





Rys. 10.7 Wartość reakcji na płoście kombajnu w funkcji prędkości posuwu dla różnych typów węgla przy wysokości ściany równej 2m

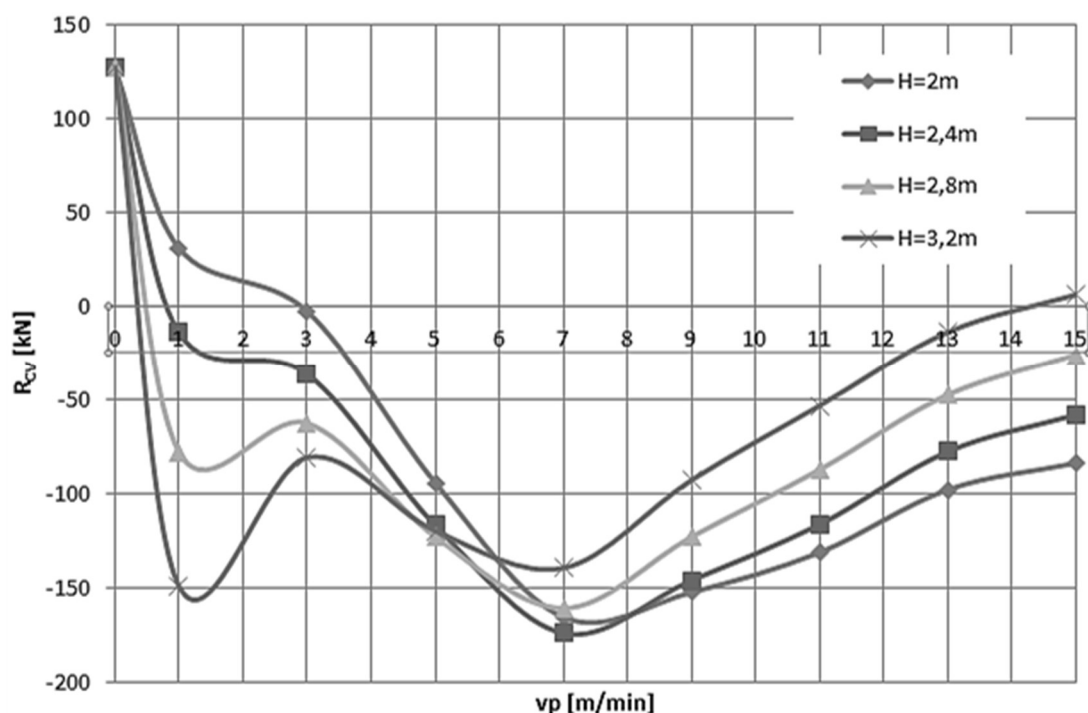
Zakres prędkości posuwu kombajnu, przy którym występuje utrata stateczności w zależności od urabialności węgla i wysokości ściany przedstawiono na rys. 10.8.



Rys. 10.8 Przedziały prędkości posuwu przy których doszło do utraty stateczności, w zależności od urabialności węgla i wysokości ściany

W przypadku węgla średnio urabialnego (słupki czerwone), wraz ze wzrostem wysokości ściany, zakres prędkości posuwu, przy której kombajn utracił stateczność zmniejsza się. Wynika to faktu, że począwszy od wysokości ściany 2 m wraz z wzrostem tej wysokości, tylny organ, urabiający nadsiębiernie, urabia warstwę przyspągową o coraz większej wysokości, co poprawia stateczność. Dla wysokości ściany większej niż 2,4 m kombajn nie traci stateczności.

Przy urabianiu trudno i bardzo trudno urabialnego (słupki niebieskie i zielone) węgla, kombajn traci stateczność już po przekroczeniu prędkości posuwu równej 0,5 m/min. Wynika to z faktu, że urabianie węgla o takich wartościach wytrzymałościowych generuje duże siły na organach urabiających, co przy małych wysokościach ściany powoduje utratę stateczności. Jednakże wraz ze wzrostem wysokości ściany, podobnie jak dla średnio urabialnego węgla, stateczność kombajnu poprawia się, i po przekroczeniu wysokości ściany 2,8 m nie odnotowano ujemnej reakcji na płoźie kombajnu.



Rys. 10.9 Wpływ prędkości posuwu na wartość reakcji w punkcie C w przypadku podparcia w punktach A, B, C, dla trzeciego typu węgla

Zaobserwowano jednak, że wraz ze wzrostem wysokości ściany, jak i ze wzrostem prędkości posuwu, maleje wartość reakcji na tylnym kole trakowym, która w konsekwencji może zmienić zwrot (rys. 10.9). Ujemna wartość tej reakcji powoduje zwiększenie oporów ruchu, a także szybsze zużywanie się podchwyty.

## 10.6 PODSUMOWANIE

Zaproponowana metoda analizy stateczności kombajnu ścianowego umożliwia ustalenie wpływu obciążenia czynnego kombajnu, wynikającego z realizacji procesu urabiania kalizny węglowej, oraz siły ciężkości na elementy prowadzenia kombajnu. Wykorzystanie programu „GeneSiS” umożliwia analizę wpływu takich czynników jak: warunki geologiczno-górnictwa, obejmujące urabialność węgla, wysokość, nachylenie podłużne i poprzeczne ściany, cechy geometryczne kombajnu, cechy konstrukcyjne organów urabiających.

Symulacja przeprowadzona dla kombajnu KSW-880E, wyposażonego w organy urabiające o średnicy 1800 mm i zabiorze 800 mm, wykazała, że stateczność kombajnu poprawia się, wraz ze wzrostem wysokości ściany. Wynika to z faktu, że tylny organ urabia nadsiębiernie warstwę węgla o większej wysokości, co sprawia, że zmniejsza się moment wywracający kombajn w stosunku do krawędzi wywrotu od strony zrobów. Ponadto, wzrost urabialności węgla powoduje zwiększenie zakresu prędkości posuwu, przy której kombajn traci stateczność w ścianie o określonej wysokości.

W przypadku węgla trudno i bardzo trudno urabialnych, przy zwiększaniu wysokości ściany, zwiększa się wartość dodatniej reakcji od strony czoła ściany, co wynika ze zmiany obciążenia czynnego kombajnu. Może wówczas dojść do utraty stateczności w stosunku do krawędzi wywrotu od strony czoła ściany w wyniku czego w płozie znajdującej się przy tylnym kole trakowym reakcja może zmienić zwrot. Powoduje to zwiększenie oporów ruchu w tej płozie wskutek obciążenia podchwytu.

#### LITERATURA

1. P. Cheluska. „Model matematyczny układu urabiania kombajnu ścianowego.” *Górnictwo i Geologia*, t. 1, z. 1, pp. 5-22, 2006.
2. M. Jaszczuk. *Ścianowe systemy mechanizacyjne*. Katowice: Wydawnictwo Naukowe Śląsk, 2007.
3. M. Jaszczuk. „Sprawozdanie merytoryczne z wykonanych badań przemysłowych i prac rozwojowych do raportu końcowego projektu badawczego NR09-0031-10 pt.: Wspomaganie komputerowe procesu optymalizacji cech konstrukcyjnych kombajnu ścianowego.” 2011. [niepublikowane]
4. Katalogi producenta kombajnu KOPEX-880E.
5. A. Kidybiński. *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Katowice: Wydawnictwo Naukowe Śląsk, 1982.
6. K. Krauze. *Urabianie skał kombajnami ścianowymi*. Katowice: Wydawnictwo Naukowe Śląsk, 2000.
7. „Maszyny dla górnictwa podziemnego. Ścianowe maszyny urabiające. Wymagania dotyczące bezpieczeństwa dla kombajnów ścianowych i zespołów strugowych.” PN-EN 1552:2005.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

**prof. dr hab. inż. Marek Jaszczuk**  
Politechnika Śląska  
Wydział Górnictwa i Geologii  
Instytut Mechanizacji Górnictwa  
ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska  
e-mail: e-mail: marek.jaszczuk@polsl.pl

**mgr inż. Jakub Królak**  
Politechnika Śląska  
Wydział Górnictwa i Geologii  
Instytut Mechanizacji Górnictwa  
ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska  
e-mail: : jakub.krolak@polsl.pl

## METODA BADANIA WPŁYWU UTRATY STATECZNOŚCI NA OPORY RUCHU KOMBAJNU ŚCIANOWEGO

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono autorską metodę badania stateczności kombajnu, w której analizuje się zwrot reakcji występujących w płozach kombajnu. Za pomocą programu GeneSiS (Generator Siatek Skrawania), opracowanego w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, wyznacza się wartości sił na każdym z noży, a następnie obciążenie to redukuje się do trzech sił oraz trzech momentów w wybranym układzie współrzędnych, stanowiących obciążenie czynne organów urabiających kombajnu. Na podstawie modelu przestrzennego kombajnu wyznacza się obciążenia bierne w postaci reakcji prostopadłych do płaszczyzny podparcia. Zaprezentowano wpływ wybranych czynników (wysokości ściany i prędkości posuwu) na stateczność kombajnu KSW-880E. Metoda ta pozwala na uwzględnienie takich czynników jak: wysokość i nachylenie ściany, urabialność węgla, średnica i zabiór organów urabiających.

**Słowa kluczowe:** kombajn ścianowy, stateczność, opory ruchu

## METHOD OF TESTING THE INFLUENCE OF UNSTABILITY ON RESISTANCE TO MOTION OF LONGWALL SHEARER

**Abstract:** In this paper there is presented original method of stability testing, which is based on sense of reactions in supports. Program called GeneSiS can calculate forces in every cutting pick, and reduce all the forces into three forces and three momentums in chosen co-ordinate system. These three reduced forces and three reduced momentums are active forces of longwall shearer drums. Reactions are calculated based on spatial model of longwall shearer. The article features the influence of chosen parameters (such as wall high and haulage speed) on stability of KSW-880E longwall shearer. This method allows to include features, such as: longwall height and inclination, cutability of coal, diameter and web of cutting drums.

**Key words:** longwall shearer, stability, resistance of motion