

**SCIENTIFIC
STUDIES**
Monographs

**PRACE
NAUKOWE**
Monografie

Leszek Chomacki

**Zastosowanie inteligencji
obliczeniowej sieci Bayesa do oceny
ryzyka powstania uszkodzeń
budynków na terenach górniczych**

Application of the computational intelligence
of the Bayesian network to the assessment
of the risk of damage to buildings in mining areas



Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa 2023

KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor naczelny
Z-cy redaktora naczelnego

Sekretarz
Członkowie

prof. dr hab. inż. LECH CZARNECKI
prof. dr inż. LESŁAW BRUNARSKI
dr hab. inż. JADWIGA FANGRAT, prof. instytutu
dr MICHAŁ GAJOWNIK
dr hab. inż. PAWEŁ LEWIŃSKI, prof. instytutu
mgr inż. JAN SIECZKOWSKI
dr inż. EWA SZEWCZAK
dr inż. SEBASTIAN WALL

Recenzenci:

prof dr hab. inż. ŁUKASZ DROBIEC
prof dr hab. inż. KRZYSZTOF TAJDUŚ

Redakcja
dr MICHAŁ GAJOWNIK

© Copyright by Instytut Techniki Budowlanej
Warszawa 2023

*Czteryście siedemdziesiąta czwarta pozycja
„Prac Naukowych ITB”*

ISBN 978-83-249-8649-1 (PDF)

Wydawca i Autorzy dołożyli wszelkich starań, aby publikowane informacje pochodziły z rzetelnych źródeł. Wydawca nie ponosi odpowiedzialności, ani też nie zaciąga zobowiązań w wyniku wykorzystania przez użytkowników treści niniejszej publikacji. W szczególności nie ponosi odpowiedzialności w stosunku do czytelników i/lub strony trzeciej za jakiegokolwiek poniesione straty, wydatki i szkody bezpośrednie i pośrednie, łącznie z utratą zysku i innych korzyści majątkowych, które mogły powstać lub być związane bezpośrednio lub pośrednio z treściami opublikowanymi, w tym ewentualnymi błędami lub pominięciami zawartymi w publikowanych materiałach.



Instytut Techniki Budowlanej

Dział Wydawnictw Naukowych

02-656 Warszawa, ul. Ksawerów 21, tel.: 22 843 35 19
tel.: 22 56 64 208, e-mail: wydawnictwa@itb.pl www.itb.pl

Spis treści

<i>Streszczenie</i>	5
<i>Summary</i>	6
Od Autora	7
1. Wprowadzenie	9
1.1. Budownictwo na terenach górniczych i oddziaływania górnicze ...	9
1.2. Wpływ eksploatacji górniczej na budynki	15
1.3. Ocena ryzyka powstania uszkodzeń	19
1.4. Najnowsze doświadczenia dotyczące powstawania uszkodzeń w budynkach na skutek eksploatacji górniczej	20
2. Problematyka uszkodzonych budynków poddanych wpływom górnictwem	27
2.1. Metody oceny możliwości powstania uszkodzeń budynków na terenach górniczych	27
2.2. Doświadczenia ze stosowania metod inteligencji obliczeniowej w budownictwie na terenach górniczych	36
2.3. Wnioski z analizy źródeł literaturowych	38
3. Charakterystyka utworzonej bazy danych	41
3.1. Uwagi ogólne	41
3.2. Charakterystyka badanej zabudowy	41
3.3. Uszkodzenia budynków	48
3.4. Oddziaływania górnicze w rejonie badanej zabudowy	50
4. Charakterystyka metod inteligencji obliczeniowej	53
4.1. Podstawy metodyczne dotyczące inteligencji obliczeniowej	53
4.2. Sieć Bayesa (BN – Bayesian Network)	54
5. Model oceny ryzyka powstania uszkodzeń jako sieć Bayesa	63
5.1. Informacje ogólne i przygotowanie danych do analiz	63
5.2. Interpretacja wyników oraz przyjęty sposób ich weryfikacji	65
5.3. Wyniki obliczeń otrzymane dla sieci Bayesa z wykorzystaniem różnych metod uczenia struktury sieci	67
5.4. Analiza wpływu zmiennych wejściowych na prognozowaną kategorię uszkodzeń	89

6. Warianty wykorzystania utworzonego modelu oceny ryzyka powstania uszkodzeń w budownictwie na terenach górniczych	95
6.1. Uwagi ogólne	95
6.2. Symulacja działania modelu do predykcji powstania uszkodzeń danej kategorii	95
6.3. Wykorzystanie sieci w przypadku diagnozy przyczyn zaobserwowanych uszkodzeń	99
6.4. Wykorzystanie sieci w przypadku niepełnych danych	100
7. Podsumowanie, wnioski oraz dalsze kierunki badań	105
Bibliografia	109
Załącznik 1. Zestawienie danych z podziałem na zmienne, ich stany i liczności w zbiorach	123
Załącznik 2. Tablice prawdopodobieństw warunkowych (CPT) dla struktury BN, metody uczenia TAN-CL i funkcji celu AIC	129

ZASTOSOWANIE INTELIGENCJI OBLICZENIOWEJ SIECI BAYESA DO OCENY RYZYKA POWSTANIA USZKODZEŃ BUDYNKÓW NA TERENACH GÓRNICZYCH

Streszczenie

Podziemna eksploatacja górnicza powoduje wstrząsy górniczne, a także deformacje powierzchni terenu, które w praktyce inżynierskiej opisuje się jako nieckę obniżeń. Jednym z istotnych wskaźników tej deformacji są odkształcenia poziome, które niejednokrotnie przyczyniają się do powstania uszkodzeń budynków murowanych na powierzchni. Dotychczas nie opracowano skutecznego i uniwersalnego narzędzia umożliwiającego ocenę ryzyka powstania uszkodzeń takich budynków.

Metody wykorzystujące inteligencję obliczeniową pozwalają na symulację skomplikowanych zjawisk w wielu dziedzinach nauki. Spośród dostępnych metod wybrano te, które dają sposobność na uzyskanie wyników ze wskazaniem prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia. Takie prawdopodobieństwo można interpretować jako ocenę ryzyka zdarzenia, którym w niniejszej monografii jest powstawanie uszkodzeń budynków.

Opisano kryteria wyboru grupy 207 budynków wytypowanych do przeprowadzenia badań. Utworzona baza danych o budynkach oraz wpływach eksploatacji górnicznej zawiera 26 zmiennych oraz 594 przypadki.

Przeprowadzono analizę danych z wykorzystaniem czterech metod inteligencji obliczeniowej. Najlepsze wyniki do zaproponowanych autorskich kryteriów oceny uzyskano dla modelu utworzonego z wykorzystaniem sieci Bayesa (BN). Zaprezentowano struktury działania różnych sieci BN oraz analizę wpływu zmiennych wejściowych na dokładność klasyfikacji uszkodzeń. Przeprowadzono symulację wykorzystania utworzonego modelu w trzech wariantach: prognozie powstania uszkodzeń w budynku, diagnozowaniu przyczyn uszkodzeń oraz przypadku dysponowania niepełną bazą danych.

W podsumowaniu przedstawiono informacje uzyskane za pomocą stworzonego modelu, podkreślono możliwość jego wykorzystania w ocenie ryzyka uszkodzeń budynków murowanych poddanych wpływom eksploatacji górnicznej, a także zaproponowano kierunki dalszych badań.

APPLICATION OF THE COMPUTATIONAL INTELLIGENCE OF THE BAYESIAN NETWORK TO THE ASSESSMENT OF THE RISK OF DAMAGE TO BUILDINGS IN MINING AREAS

Summary

Underground mining exploitation causes mining tremors as well as deformation of the ground surface, which in engineering practice is described as a depression basin. One of the most important indicators of this deformation are horizontal deformations, which often contribute with damages in buildings. So far, no effective and universal tool has been developed that would make it possible to assess the possibility of damages in such buildings.

Methods that use computational intelligence allow you to simulate complex phenomena in many fields of science. Among the available methods, the ones that allow to obtain results with the indication of the probability of the event occurrence have been selected. Such probability can be interpreted as an assessment of the risk of an event, which in this dissertation are damages in buildings.

The criteria for selecting a group of 207 buildings for research were described. The collected database of buildings and mining exploitation impacts contains 26 variables and 594 cases.

Data analysis was performed using 4 computational intelligence methods. The best results for the proposed original evaluation criteria were obtained for the model created with the Bayesian Network (BN). The structure of various BN network and the analysis of the influence of input variables on the state of damage were presented. A simulation of the created model usage was carried out in three variants: forecast of damage occurrence in the building, diagnosis of the causes of damage and the case of having an incomplete database.

The summary presents the information obtained with the use of the prepared model, the possibility of its use in the assessment of the risk of damage to buildings subject to mining exploitation and the directions of further research.

OD AUTORA

Monografię opracowano na podstawie rozprawy doktorskiej [1], z uwzględnieniem uwag recenzentów oraz dyskusji w trakcie jej publicznej obrony. W monografii szczególną uwagę poświęcono modelowi oceny ryzyka przygotowanemu z zastosowaniem sieci Bayesa (BN), który okazał się najbardziej perspektywiczny w prowadzonych badaniach. W pracy zredukowano natomiast informacje dotyczące pozostałych analizowanych metod inteligencji obliczeniowej.

Wykorzystując zapisy rozprawy, która stanowiła podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora nauk technicznych, chciałem przygotować praktyczne kompendium wiedzy poświęcone problematyce uszkodzania budynków na terenach górniczych. Wiedza ta jest wykorzystywana przeze mnie w praktyce zawodowej, a dzięki niniejszej monografii będzie mogła służyć projektantom, inżynierom lub służbom kopalnianym zajmującym się tematyką deformacji i uszkodzeń budynków na terenach górniczych.

Pragnę wyrazić podziękowania Dyrekcji Instytutu Techniki Budowlanej za pomoc, jaką otrzymałem w trakcie realizowania badań przedstawionych w niniejszej pracy oraz w przygotowaniu rozprawy doktorskiej.

Wielkie wyrazy wdzięczności kieruję w stronę promotora pracy – dr. hab. inż. Janusza Ruska, prof. AGH, który wprowadził mnie w tematykę wykorzystywania metod sztucznej inteligencji na terenach górniczych. Rady otrzymane od prof. J. Ruska okazały się bardzo wartościowe i pozwoliły na sprawne wykorzystanie wyników prowadzonych badań oraz napisanie rozprawy doktorskiej w 2020 r. Pragnę także podziękować recenzentom – prof. dr. hab. inż. Łukaszowi Drobcowi oraz prof. dr. hab. inż. Krzysztofowi Tajdusiowi – za szczegółową analizę pracy oraz wskazanie racjonalnych kierunków prowadzenia przyszłych badań.

Leszek Chomacki

1. WPROWADZENIE

1.1. Budownictwo na terenach górniczych i oddziaływania górnicze

1.1.1. Budownictwo na terenach górniczych

Światowy rozwój gospodarki w dużym stopniu uzależniony jest od wydobywania i wykorzystywania surowców energetycznych. Najbardziej popularne surowce energetyczne to ropa naftowa, gaz ziemny oraz węgiel kamienny i brunatny.

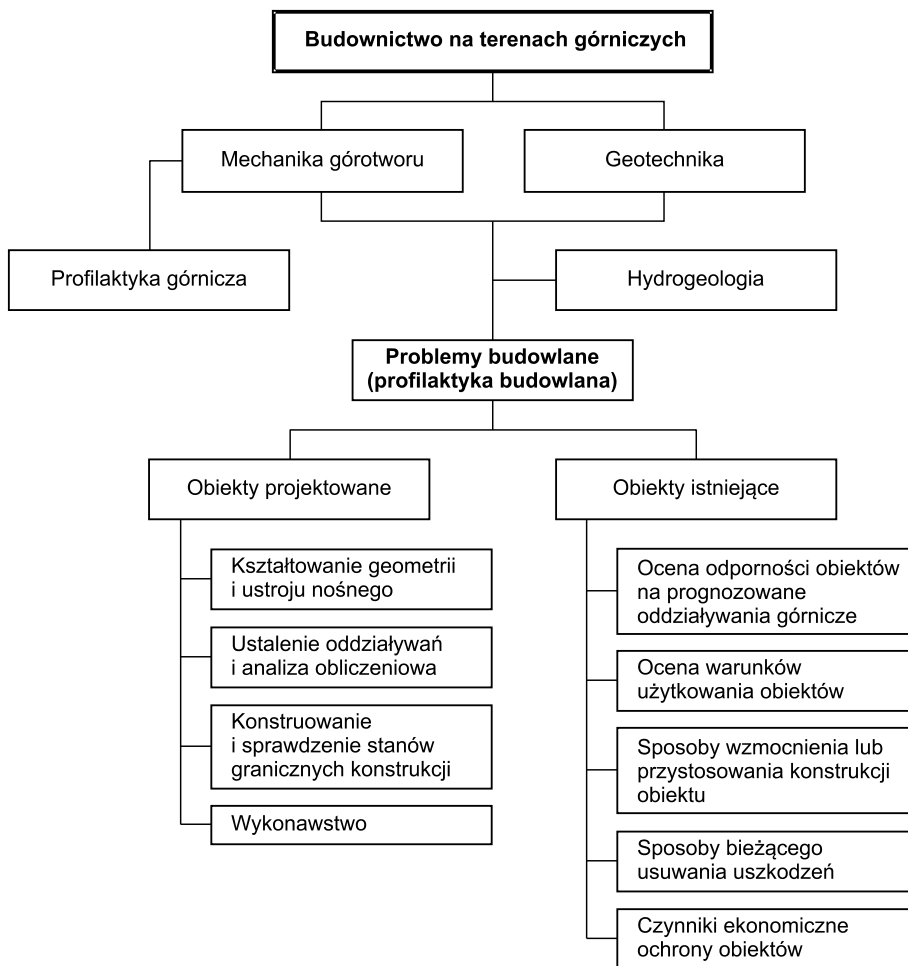
W Polsce powszechnie wykorzystywanym surowcem jest węgiel kamienny, co wynika z faktu występowania tutaj znacznych jego złóż, wynoszących 64 mld ton [2]. Węgiel kamienny wydobywany jest w rejonach Górnośląskiego i Lubelskiego Zagłębia Węglowego [2], a jego wydobycie w 2016 r. wyniosło 70 mln ton [3].

W latach przed II wojną światową eksploatacja węgla prowadzona była głównie na niewielkich głębokościach i w oddaleniu od zabudowy [4]. Po 1945 r., wraz z postępowaniem techniki, wydobycie prowadzone było na coraz większych głębokościach, a eksploatacja w zauważalnym stopniu zaczęła oddziaływać na obiekty budowlane. W celu ochrony istniejących budynków, w latach sześćdziesiątych XX w., sformułowano pojęcie „odporności obiektów budowlanych na wpływy eksploatacji górniczej” [5]. Właściwe stosowanie metod oceny odporności budynków na wpływ eksploatacji górniczej umożliwia prowadzenie wydobycia przy wystąpieniu akceptowalnych dla użytkowników uszkodzeń [6].

Obiekty budowlane projektowane do posadowienia na terenach górniczych i pogórniczych mogą być prawidłowo kształtowane i obliczane z wykorzystaniem wielu instrukcji wydanych przez ITB [7–11].

Schematyczne ujęcie zagadnień związanych z budownictwem na terenach górniczych znajduje się na rysunku 1.1.

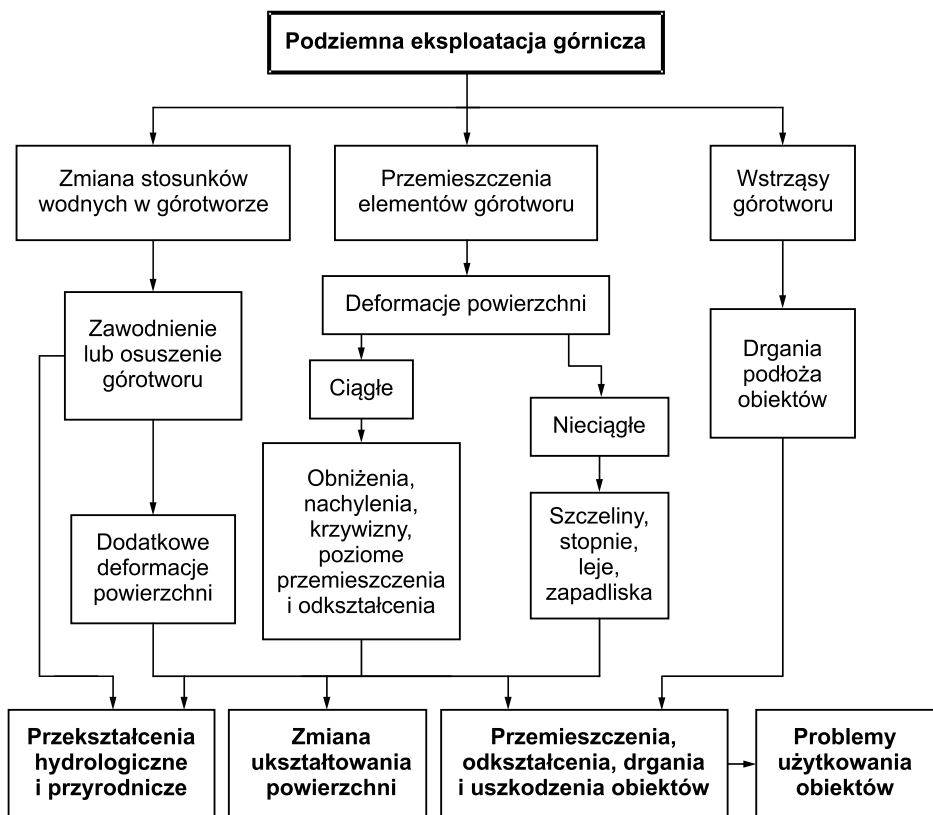
Z uwagi na powszechne stosowanie instrukcji ITB przez inżynierów budowlanych oraz wynikające z nich dobre doświadczenia, w niniejszej rozprawie skupiono się na obiektach już istniejących poddanych wpływom górniczym.



Rys. 1.1. Zagadnienia dotyczące budownictwa na terenach górniczych [12]

1.1.2. Oddziaływania górnicze

Obiekty budowlane zlokalizowane na terenach górniczych mogą być poddane wpływom dodatkowych obciążeń pochodzących od deformacji powierzchni lub drgań podłoża [13]. Obok dodatkowego wyężenia elementów konstrukcyjnych ustroju nośnego, eksploatacja górnicza może powodować również uciążliwości w użytkowaniu. Negatywne wpływy na powierzchni oraz w obiektach budowlanych, które mogą wystąpić w warunkach eksploatacji górniczej, przedstawiono schematycznie na rysunku 1.2.

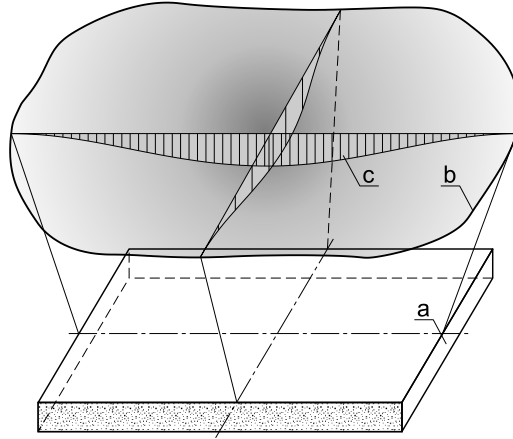


Rys. 1.2. Elementy kształtujące wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię [13, 14]

1.1.3. Ciągłe deformacje powierzchni – obniżeniowa niecka górnicza

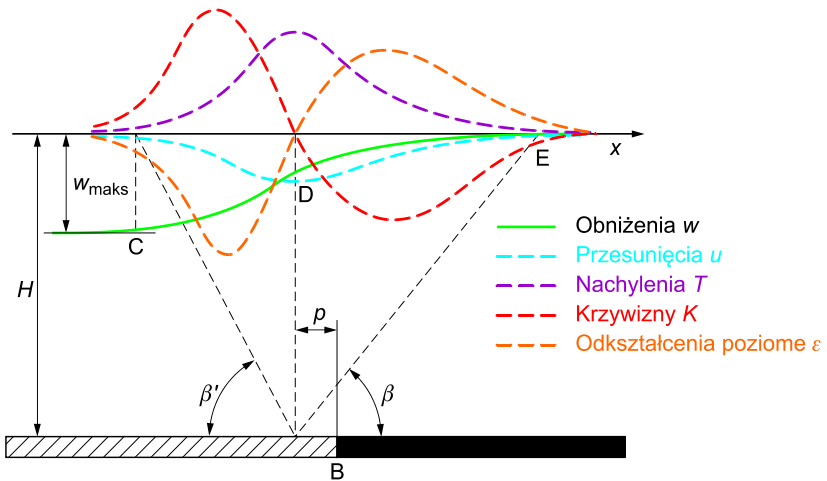
Najbardziej powszechnym skutkiem prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej są ciągłe deformacje powierzchni, które ujawniają się w postaci obniżeniowej niecki górniczej. Przykład regularnej niecki wywołanej eksploatacją przedstawiono na rysunku 1.3.

Do opisu niecki obniżeniowej wykorzystywane są wskaźniki deformacji, a wśród nich: obniżenie, nachylenia, krzywizny, poziome przemieszczenia i odkształcenia. Wartości wskaźników są związane z odległością od krawędzi eksploatacji. Wszystkie wskaźniki osiągają ekstremalne wartości w pobliżu krawędzi eksploatacji, z wyjątkiem obniżień, które są największe nad środkową częścią wybranego pola eksploatacyjnego.



Rys. 1.3. Niecka normalna (regularna) wywołana poziomym wyrobiskiem pokładu
 a – wyrobisko, b – niecka, c – linia obniżenia terenu
 (opracowanie własne na podstawie [15])

Profil przekroju niecki obniżeniowej wraz z przybliżonym przebiegiem opisujących ją wskaźników deformacji (w , u , T , K , ε) przedstawiono na rysunku 1.4.



Rys. 1.4. Przebieg wskaźników deformacji w rejonie krawędzi dużego pola eksploatacji według teorii Knothe'go
 p – obrzeże niecki, H – głębokość zalegania pokładu, β , β' – kąty wpływów,
 $w_{maks.}$ – maksymalne obniżenie, B, C, D, E – punkty charakterystyczne
 (opracowanie własne na podstawie [16, 17])

Przy prowadzonej obecnie eksploatacji górniczej, z uwagi na jej znaczne głębokości, wpływ krzywizny terenu jest coraz mniej wyraźny, rośnie natomiast znaczenie poziomych odkształceń terenu, co zostało zasygnalizowane w [18].

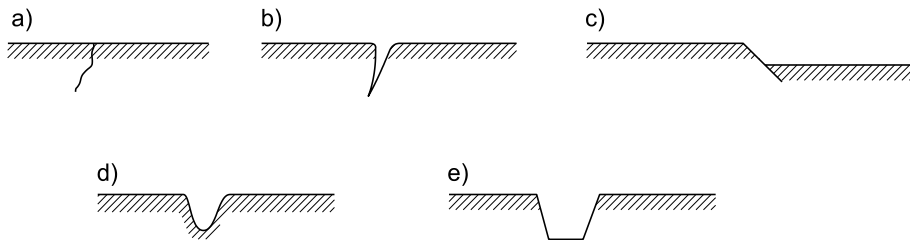
1.1.4. Nieciągłe deformacje powierzchni

Podziemna eksploatacja górnicza może również powodować powstanie nieciągłych deformacji terenu typu powierzchniowego i liniowego.

Wśród deformacji powierzchniowych można wyróżnić: zapadliska, osuwiska i tzw. nieciągłe deformacje lokalne, mające kształt mało rozległych i głębokich niecek obniżeń. Przykłady typów deformacji liniowych przedstawiono na rysunku 1.5.

Deformacje nieciągłe powstają zazwyczaj w sposób nagły, a proces ich uformowania trwa najczęściej od kilku minut do kilku godzin, rzadziej dni. Zazwyczaj przyczynami powstawania deformacji nieciągłych są [20]:

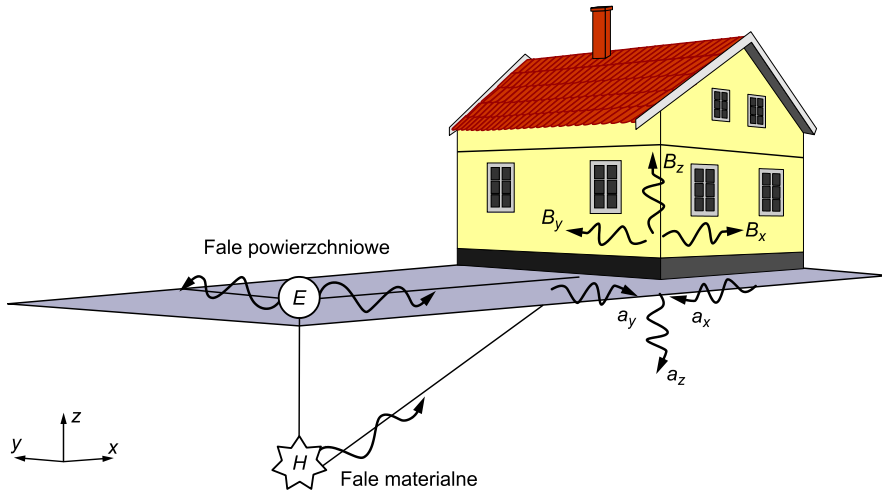
- ruchy górotworu wywołane płytką eksploatacją górniczą,
- aktywacja naturalnych uskoku tektonicznych przez prowadzoną eksploatację,
- aktywacja starych, głównie płytko zalegających wyrobisk górniczych lub zlikwidowanych szybów,
- nakładające się krawędzie eksploatacyjne w kilku pokładach,
- zmiany stosunków wodnych w starych zrobach/wyrobiskach.



Rys. 1.5. Rodzaje deformacji nieciągłych typu liniowego [19]
a) pęknięcie, b) szczelina, c) próg (uskok) terenowy, d) garb terenowy, e) rów

1.1.5. Wstrząsy górnicze

Wstrząsy górotworu powstałe na skutek prowadzonej eksploatacji górniczej (tzw. wstrząsy górnicze) wynikają z nagłego wyzwolenia się energii potencjalnej nagromadzonej w skałach górotworu i ujawniają się na powierzchni w postaci drgań podłoża [21, 22]. Uproszczony schemat oddziaływania drgań powierzchniowych na konstrukcję budynku przedstawiono na rysunku 1.6.



Rys. 1.6. Schemat działania drgań powierzchniowych na budynek
 H – hipocentrum, E – epicentrum, a – przyspieszenie drgań gruntu,
 B – siła bezwładności [23]

Intensywność wstrząsów zależy od [24]:

- właściwości fizyko-mechanicznych skał zalegających nad wybranym pokładem,
- głębokości zalegania skał,
- geometrii przestrzennej calizn (pokładów nienaruszonych przez roboty górnicze) i wybranych przestrzeni w górotworze,
- warunków geologiczno-górnich prowadzonych robót, a także (częściowo) od sposobu eksploatacji.

Ponadto wstrząsy podziemne mogą być wywołane robotami strzałowymi związanymi z prowadzoną eksploatacją górniczą.

1.1.6. Zmiana stosunków wodnych w podłożu

Eksploatacja górnicza niejednokrotnie ma również wpływ na zmianę stosunków wodnych. Obniżenia terenu mogą powodować pozorne podniesienie swobodnego poziomu lustra wody. Czasami na skutek prowadzonej eksploatacji górniczej dochodzi do drenażu wód powierzchniowych i podziemnych wód nadkładowych. Znane są również przypadki, gdy w efekcie stałego odwadniania górotworu, obserwowane obniżenia terenu górniczego sięgają znacznie poza granice eksploatacji złoża. Występują wtedy wielkopowierzchniowe niecki obniżeniowe [25].

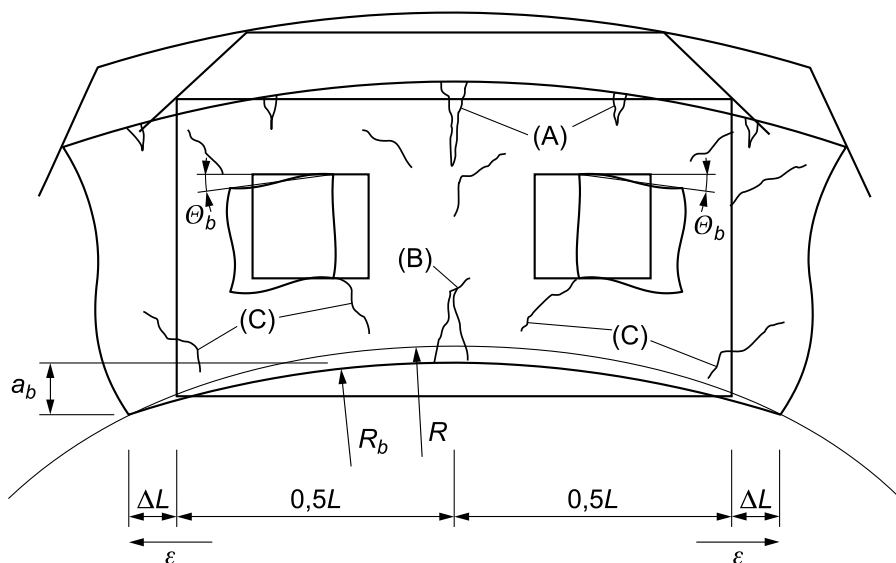
Wyżej wymienione oddziaływania górnicze mogą negatywnie wpływać na budynki znajdujące się na powierzchni terenu górniczego.

1.2. Wpływ eksploatacji górniczej na budynki

1.2.1. Uszkodzenia budynków

Opis wpływu oddziaływań górniczych na stan uszkodzeń budynków wykonano na podstawie monografii [12].

W przypadku usytuowania budynku na wypukłej części niecki górniczej, konstrukcja obiektu ulega wygięciu do strzałki a_b , wynikającej z promienia krzywizny budynku R_b (rys. 1.7). W górnych partiach ścian mogą wystąpić siły rozciągające, a w ich następstwie rysy oznaczone na rysunku 1.7 jako (A). Natomiast w dolnych partiach budynku na skutek poziomych, rozluźniających ruchów terenu ($\varepsilon > 0$), w fundamentach powstają siły rozciągające, co może powodować wystąpienie rys pionowych oznaczonych jako (B). Wystąpienie tych rys jest zależne od konstrukcji fundamentów obiektu i wynika ze zwiększenia długości konstrukcji o wartość ΔL .

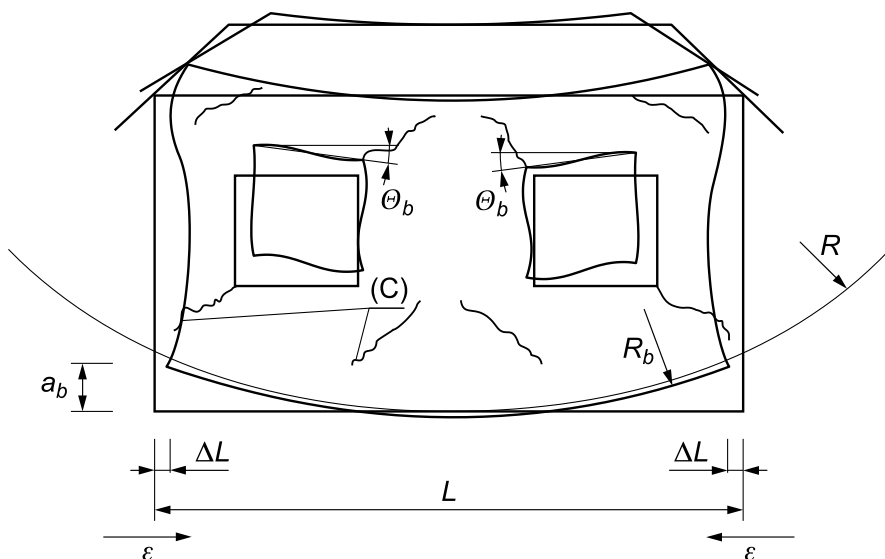


Rys. 1.7. Schemat deformacji i uszkodzeń ściany na wypukłej części niecki [12]

W ścianach na skutek naprężeń głównych mogą powstać także rysy ukośne, oznaczone na rysunku 1.7 jako (C), których przebieg wznosi się od środka budynku ku jego krawędziom. Intensywność rys ukośnych jest zależna głównie od odkształcenia postaciowego ścian θ_b [12].

Rozmiary i charakter zarysowań konstrukcji są zależne od sposobu jej przystosowania do przejmowania oddziaływań pochodzenia górniczego. Uszkodzenia ścian oraz innych niezbrojonych elementów konstrukcyjnych (np. ceglanych fundamentów, nadproży ceglanych) w budynkach niezabezpieczonych przed tymi oddziaływaniami są zazwyczaj dużo większe niż uszkodzenia w obiektach projektowanych na przejście wpływów górniczych.

Analogicznie można opisać stan ogólnej deformacji i uszkodzeń budynku położonego na wklęsłej części niecki (rys. 1.8). Na skutek wygięcia a_b konstrukcji ku dołowi układ rys ukośnych oznaczonych na rysunku 1.8 jako (C) ma przebieg wznoszący się od zewnętrznych krawędzi budynku ku środkowi. Krzywizna terenu ma w takich przypadkach mniejszy wpływ na ogólną deformację budynku i jego odkształcenie postaciowe Θ_b . W ścianie podlegającej oddziaływaniu wklęsłego obrzeża niecki dominujące są normalne siły ściskające, dlatego można uznać, że pracuje ona w bardziej korzystnych warunkach niż przy wystąpieniu oddziaływań wypukłej niecki [12].

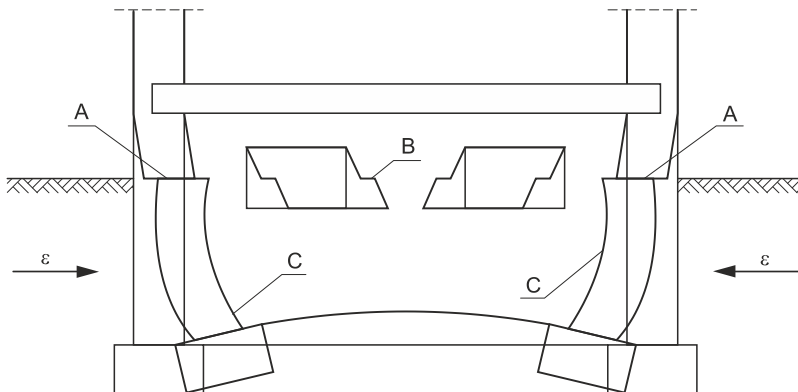


Rys. 1.8. Schemat deformacji i uszkodzeń ściany na wklęsłej części niecki [12]

We wklęsłej części niecki należy zwrócić uwagę na wpływ poziomych odkształceń gruntu, powodujących jego zagęszczenie ($\varepsilon < 0$). Występujące wtedy dodatkowe parcie gruntu sumuje się z parciem spoczynkowym i negatywnie oddziałuje na zewnętrzne, zagłębione elementy konstrukcji.

Efekt oddziaływań wynikających z zagęszczenia podłoża górniczego jest zauważalny szczególnie w obiektach znacznie zagłębionych w gruncie [12].

W budynkach o sztywnym schemacie konstrukcyjnym możliwy efekt poziomych odkształceń terenu górniczego $\varepsilon < 0$, zwiększających istniejące parcie na ściany zewnętrzne, jest przedstawiony schematycznie na rysunku 1.9. W takim przypadku występują głównie uszkodzenia ścian piwnicznych w postaci poziomego ścięcia ścian usytuowanych prostopadle do kierunku deformacji terenu, które oznaczono na rysunku 1.9 jako (A). Powszechnie również są ścięcia ścian w rejonie otworów okiennych w ścianach równoległych do kierunku odkształceń poziomych, które oznaczono jako (B). Mogą wystąpić także przemieszczenia części fundamentowych budynku do jego wnętrza, oznaczone jako (C). Doświadczenia wykazują, że tego rodzaju skutki mają miejsce głównie w budynkach niezabezpieczonych na wpływy eksploatacji górniczej, zwykle zagłębionych co najmniej 1,5 m poniżej poziomu terenu [26, 27]. Przy mniejszym zagłębieniu podobne skutki można obserwować w budynkach posadowionych w gruntach spoistych lub znajdujących się w niekorzystnej sytuacji górniczej, umożliwiającej sumowanie się poziomych ściskających odkształceń gruntu $\varepsilon < 0$ od eksploatacji kilku pokładów. Występujący efekt zależy od konstrukcji budynku oraz intensywności poziomych odkształceń terenu.



Rys. 1.9. Schemat deformacji budynku spowodowany parciem gruntu na ściany zewnętrzne [12]

W celu uniknięcia powstawania uszkodzeń oraz ochrony budynków sformułowano pojęcie „odporności obiektów budowlanych na wpływy eksploatacji górniczej” [5], wykorzystywane następnie w ocenie konstrukcji budynków położonych na terenach górniczych.

1.2.2. Ocena odporności

Odporność obiektów budowlanych na ciągłe deformacje powierzchni definiowana jest jako zdolność obiektów do przenoszenia krzywizn $K = R^{-1}$ i poziomych odkształceń powierzchni ε , przy zachowaniu bezpieczeństwa obiektów i zapewnieniu możliwości ich użytkowania zgodnie z przeznaczeniem, w warunkach co najwyżej małej uciążliwości [28]. Graniczne wartości wskaźników deformacji terenu dla kategorii terenu górniczego przedstawiono w tablicy 1.1.

Tablica 1.1. Kategorie terenu górniczego [28]

Kategoria	Graniczne wartości wskaźników deformacji terenu		
	nachylenie T [‰]	promień krzywizny R [km]	odkształcenie poziome ε [‰]
0	$T \leq 0,5$	$ R \geq 40$	$ \varepsilon \leq 0,3$
I	$0,5 < T \leq 2,5$	$40 > R \geq 20$	$0,3 < \varepsilon \leq 1,5$
II	$2,5 < T \leq 5$	$20 > R \geq 12$	$1,5 < \varepsilon \leq 3$
III	$5 < T \leq 10$	$12 > R \geq 6$	$3 < \varepsilon \leq 6$
IV	$10 < T \leq 15$	$6 > R \geq 4$	$6 < \varepsilon \leq 9$
V	$T > 15$	$ R < 4$	$ \varepsilon > 9$

Poziomy uciążliwości związane z użytkowaniem budynku i przypisane im efekty w budynku, z wyróżnieniem wychylenia, szerokości rys w ścianach oraz odkształcenia postaciowego ścian, zostały przedstawione w tablicy 1.2.

Tablica 1.2. Uciążliwość użytkowania budynków przy uwzględnieniu wartości efektów oddziaływań górniczych [28]

Efekty w budynku		Uciążliwość użytkowania			
		nieodczuwalna	mała	średnia	duża
Wychylenie	T_b [‰]	≤ 10	10 do 15	15 do 20	> 20
Szerokość rys w ścianach	a_w [mm]	≤ 1	1 do 3	3 do 8	> 8
Odształcenie postaciowe ścian	$\vartheta_b \cdot 10^{-3}$	≤ 1	1 do 2	2 do 3	> 3

W przypadku gdy odporność budynku jest niższa od prognozowanej kategorii wpływów górniczych, uznaje się taki budynek za nieodporny i zaleca się podjęcie przez przedsiębiorcę górniczego działań mających na celu dostosowanie konstrukcji obiektu do przejścia prognozowanych wpływów. Praktykowane jest również prowadzenie nadzorów budowlanych nad takimi budynkami, w trakcie których formułowane są zalecenia z zakresu profilaktyki budowlanej, mające na celu zminimalizowanie zagrożenia jakie niesie eksploatacja górnicza [29].

Zgodnie z [30] przed każdą eksploatacją górniczą wymagane jest wykonanie oceny odporności obiektów budowlanych stanowiących zabudowę powierzchni, na które oddziaływać będą wpływy górnicze. Do oceny odporności stosuje się obecnie metody przybliżone (w tym tzw. metodę punktową), ocenę eksperta oraz procedurę diagnostyczną [31].

Wyżej wymienione metody pozwalają na uzyskanie informacji o odporności obiektu. Niestety z ich pomocą nie można otrzymać informacji o intensywności potencjalnych uszkodzeń, jakie mogą wystąpić na skutek prowadzonej eksploatacji górniczej, co byłoby cenną informacją dla inżyniera oceniającego bezpieczeństwo obiektu. W związku z powyższym, zasadne jest naukowe opracowanie metody, która powinna pozwolić na uzyskanie informacji o ryzyku wystąpienia uszkodzeń w istniejących budynkach poddanych wpływom górniczym wraz z ilościową informacją o intensywności uszkodzeń.

1.3. Ocena ryzyka powstania uszkodzeń

Zgodnie z Eurokodem 1 [32] ryzyko definiuje się jako *miarę kombinacji (zwykle iloczyn) prawdopodobieństwa lub częstotliwości zdarzenia o zdefiniowanym zagrożeniu i wielkości konsekwencji zdarzenia*. Natomiast ocenę ryzyka definiuje się jako *porównanie wyników analizy ryzyka z kryteriami akceptacji ryzyka i innymi kryteriami decyzyjnymi*.

Zatem ocena ryzyka powstania uszkodzeń powinna skupiać się na prognozowaniu ilościowej miary, którą można byłoby odnieść do zakładanych kryteriów akceptacji ryzyka z uwzględnieniem prawdopodobieństwa. Kryterium akceptacji ryzyka może dotyczyć różnych sposobów klasyfikacji intensywności uszkodzeń w budynkach, jak te zaproponowane w [31] oraz [33], lub dotyczyć uciążliwości użytkowania (tabl. 1.2).

Z analizy literatury wynika, że narzędziami pozwalającymi na budowę modelu oceny ryzyka powstania uszkodzeń są zaawansowane narzędzia eksploracji danych, a w szczególności metody inteligencji obliczeniowej. Najważniejszym czynnikiem pozwalającym na ocenę ryzyka jest możliwość określenia prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia, jakim w analizowanym przypadku jest powstanie uszkodzeń. W obszarze metod inteli-

gencji obliczeniowej istnieje wiele takich, które pozwalają na uszczegółowienie wyników predykcji o wartość prawdopodobieństwa wystąpienia danego zdarzenia [34].

W ocenie ryzyka szczególnie ważne wydaje się uwzględnienie wielu zmiennych (kryteriów decyzyjnych) mogących mieć wpływ na powstawanie uszkodzeń w budynkach na skutek oddziaływań górniczych. Proces kształtowania się uszkodzeń w budynkach poddanych negatywnym wpływom deformującego się podłoża jest zależny od wielu czynników, takich jak: geometria budynku, zastosowane rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe, zabezpieczenia na wpływy górnicze, stan techniczny czy jakość utrzymania. Z rozeznania literaturowego wynika, że dostępne obecnie metody inteligencji obliczeniowej, na podstawie wielu zmiennych wejściowych, pozwalają na skuteczne przewidywanie zmiennej wyjściowej [35].

Dodatkową trudnością w obiektywnej ocenie ryzyka powstania uszkodzeń jest brak pewności co do wartości niektórych zmiennych, a także subiektywność ocen osób oceniających. Wskazane jest, aby model oceny ryzyka umożliwiał uwzględnianie niepewnych (przyjętych na podstawie doświadczenia) lub niepełnych (brakujących) danych wejściowych. Jest to wysoce pożądana cecha, która pozwala na powszechność stosowania takiego modelu [36]. Tę niewątpliwą zaletę posiadają m.in. metody wykorzystujące twierdzenie Bayesa, takie jak Naiwny Klasyfikator Bayesowski (NBC), czy sieć Bayesa (BN) [37, 38].

Ponadto, jak wynika z analizy literatury światowej [39] i krajowej [40, 41], w ostatnim czasie podejmuje się próby budowy modeli z wykorzystaniem inteligencji obliczeniowej, które pozwalają ocenić ryzyko powstania uszkodzeń w zależności od zmiennych wejściowych.

1.4. Najnowsze doświadczenia dotyczące powstawania uszkodzeń w budynkach na skutek eksploatacji górniczej

Od 2010 r. powstało wiele publikacji dotyczących uszkodzeń budynków poddanych wpływom eksploatacji górniczej, a także oddziaływań zblizonych do górniczych.

Badacze z Turcji opisali przypadek wpływu osiadań terenu górniczego na uszkodzenia budynków w zagłębiu węglowym Kozlu [42]. W omawianym przypadku osiadania terenu wynosiły do 7,1 m, a obszar oddziaływań obejmował powierzchnię 0,88 km². Odnotowano, że deformacje miały negatywny wpływ na wiele budynków murowanych. Znaczna część budynków została silnie uszkodzona, co spowodowało ich wyłączenie z dalszego użytkowania. We wnioskach autorzy raportu zalecili monitoring analizowanej zabudowy, przeprowadzenie obliczeń możliwych do wystąpienia osiadań, odpowiednie zabezpieczanie budynków oraz zastosowa-

nie profilaktyki górniczej w celu redukcji wielkości wpływów górniczych w dzielnicach mieszkaniowych.

Inny przypadek znacznych uszkodzeń budynków został zaobserwowany przez badaczy hiszpańskich [43, 44] w miejscowości La Unión. Osiedlenia terenu dochodziły do 0,5 m, a budynki dodatkowo poddawane były wpływom wstrząsów parasejsmicznych. Wpływy górnicze spowodowały uszkodzenia w 99 budynkach, których intensywność zwiększała się wraz z upływem czasu.

Obserwacja zachowania się konstrukcji murowanych poddanych wpływom górniczym była przedmiotem badań zaprezentowanych w [45]. Doświadczenia francuskie wskazały na możliwość powstania uszkodzeń w budynkach, co wynikało z analizy utworzonych modeli numerycznych obciążonych pionowymi przemieszczeniami. W efekcie wskazano miejsca występowania uszkodzeń oraz opisano charakter ich powstania wynikający z przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie konstrukcji murowej.

Ocena uszkodzeń budynków była przedmiotem analiz przeprowadzonych w [46, 47]. Porównano dostępne w literaturze metody oceny stanu uszkodzeń budynków poddanych wpływom górniczym i wskazano ich różnice. Dla wybranego miasta składającego się z ponad 1500 budynków przeprowadzono analizę uszkodzeń z wykorzystaniem wybranych 5 metod, które następnie porównano z obserwacjami. Sklasyfikowano metody pod kątem największej zgodności w analizowanym przypadku.

Natomiast w publikacji [48] autorzy opisali oryginalną analizę numeryczną wpływu krzywizny terenu górniczego na wyężenie konstrukcji ścian typowego budynku w Chinach. Uzyskane wartości naprężeń w elementach ściennych porównano z wytrzymałością muru, w efekcie czego otrzymano mapy naprężeń wskazujące rejony szczególnie narażone na wystąpienie uszkodzeń.

Wybrana eksploatacja górnicza prowadzona w wielu pokładach pod terenem zabudowanym została opisana również w [49]. Przedstawiono przykładowe uszkodzenia budynków oraz sposób ich klasyfikacji. Przeprowadzono analizy numeryczne zachowania się górotworu i porównano je z wynikami geodezyjnymi. Oceniono, że w zabudowie powierzchni mogą powstać nieznaczne uszkodzenia.

Nietypowy przykład powstania deformacji nieciągłej w formie zapadliśka, także na skutek prowadzonej eksploatacji górniczej, przedstawili badacze chińscy w [50]. W efekcie podziemnej eksploatacji węgla na powierzchni terenu zaobserwowano zapadliśko o wymiarach $83 \times 45 \times 9,5$ m, które uniemożliwiło ruch autostradowy. Rozpoznano warunki gruntowe i przeprowadzono badania modelowe, które z dużą dokładnością pokazały, że przyczyną tego zdarzenia była niewystarczająca wytrzymałość warstw

piaskowca. W podsumowaniu zalecono prowadzenie dalszej eksploatacji w tym rejonie w systemie z podsadzką [16], prowadzenie wydobywania ścianami o niższej wysokości, wybieranie pokładów kilkoma warstwami lub wydobywanie tylko części złoża.

Skutki, podobne do wyżej wymienionych efektów eksploatacji górniczej, a wynikające z tunelowania, zaobserwowali Holendrzy [51]. Przeprowadzili oni analizy numeryczne z wykorzystaniem zaawansowanych modeli materiałowych dla dwóch usytuowań budynku względem osiadań od tunelowania. Dzięki tym analizom zaobserwowano i opisano różne mechanizmy powstawania uszkodzeń konstrukcji murowanych poddanych wpływom osiadania podłoża gruntowego.

Tematyka wpływu eksploatacji górniczej na uszkodzenia budynków murowanych jest popularna zarówno wśród rodzimych autorów, jak i wśród autorów zagranicznych. Spośród najnowszych polskich publikacji w tej tematyce przywołano poniżej kilkanaście wybranych pozycji.

Znacznie uszkodzone budynki mieszkalne były przedmiotem rozważań opisanych w [52]. Scharakteryzowano warunki górnicze oraz liczne poważne uszkodzenia ścian budynków. W publikacji podjęto próbę numerycznej analizy przyczyn zaobserwowanych uszkodzeń, która wykazała, że decydujące znaczenie miały odkształcenia poziome o charakterze ściskania.

Natomiast w publikacji [53] przeprowadzone zostały obliczenia numeryczne ścian murowanych z zaawansowanymi parametrami materiałowymi umożliwiającymi analizę w zakresie sprężysto-plastycznym. Oceniono zachowanie się ścian pełnych oraz ścian osłabionych otworami. Ustalono miejsca występowania uszkodzeń i ich prawdopodobny przebieg.

Przedmiotem innych analiz był wybrany budynek znacznie uszkodzony na skutek wpływów górniczych [54]. Przeprowadzono obliczenia numeryczne i analityczne dla kilku wariantów obliczeniowych, uwzględniających wykonanie dodatkowych dylatacji w konstrukcji. W podsumowaniu, jako najlepszy sposób zabezpieczenia obiektu na wpływy górnicze, zaproponowano jego podział na 4 niezależne segmenty. Rozwiązanie to miało pozwolić na znaczną redukcję sił wewnętrznych, które mogły wystąpić w konstrukcji budynku.

Ocena wpływu działalności górniczej na budynek była również przedmiotem analizy przedstawionej w [55]. Wykonano geodezyjne pomiary deformacji budynku i terenu w jego sąsiedztwie w trakcie prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej. Analiza numeryczna zachowania się obiektów wskazała na miejsca, w których podwyższone są naprężenia w konstrukcji murowej ścian. Zwrócono uwagę na bardzo istotny czynnik w analizie ciągów zabudowy poddanych wpływom górniczym, jakim są dylatacje i ich szerokości.

Inny przykład budynku znacznie uszkodzonego na skutek deformacyjnych wpływów górniczych przedstawiono w [56]. Opisano sytuację górnictwem i stan uszkodzeń budynku oraz podjęto się oceny wpływu eksploatacji górnictwem na zaobserwowane spękania.

Natomiast w publikacji [27] opisano wpływ oddziaływań górniczych, głównie w postaci odkształceń poziomych, na stan uszkodzeń murowanych budynków mieszkalnych. Opisano i wskazano najbardziej narażone i najczęściej uszkodzane miejsca w budynkach. W celu usunięcia zaobserwowanych spękań zaproponowano działania o charakterze profilaktyki budowlanej.

Uszkodzone konstrukcje murowe były także przedmiotem artykułu [57]. Wskazano najbardziej charakterystyczne uszkodzenia spowodowane wpływami górniczymi. W celu naprawy spękań zaproponowano stosowanie polimerowego złącza podatnego, dla którego wykazano jego wysoką skuteczność.

Przedmiotem innych analiz zamieszczonych w publikacjach [58, 59] była również ocena zagrożenia budynków poddanych wpływom górniczym. W części 1. przeprowadzono przegląd krajowych i zagranicznych metod oceny możliwości uszkodzeń budynków. W części 2. dokonano analizy wyników uzyskiwanych różnymi metodami dla wybranej grupy budynków. Otrzymane wyniki porównano z rzeczywistymi danymi o uszkodzeniach i wskazano, które metody wykazały najwyższą skuteczność.

Również ocena zagrożenia budynków poddanych wpływom eksploatacji górnictwem została opisana w publikacji [60]. Autorzy dysponowali danymi dotyczącymi przemieszczeń, uzyskanymi z GIS (*Geographic Information System*), informacją o odporności 421 budynków, a także wiedzą o zgłaszanych uszkodzeniach. W publikacji przedstawiono ocenę zagrożenia wystąpienia uszkodzeń budynków wynikającą z ich zbyt małej odporności. Analizy przeprowadzono z uwzględnieniem czasu występowania uszkodzeń w budynkach. Wzięto również pod uwagę zagrożenie podtopieniem budynków, które mogło wystąpić w wyniku osiadania terenu górnictwem.

Inny przykład wykorzystania GIS został przedstawiony w [61]. Przeanalizowano wartości poszczególnych wskaźników deformacji górnictwem i ich usytuowanie względem zabudowy o charakterze mieszkalnym. Pozytywnie oceniono skuteczność tej metody w analizie wpływów górniczych i stwierdzono, że badane budynki nie powinny ulec uszkodzeniom o charakterze konstrukcyjnym.

Ciekawy przykład zminimalizowania negatywnego wpływu eksploatacji górnictwem na ważne obiekty budowlane opisano w [62], gdzie zaproponowano jedno z przykładowych rozwiązań o charakterze górniczym. Przeprowadzona analiza wykazała, że ograniczenie prędkości prowadzenia eks-

ploatacji górniczej pozwoliło na redukcję oddziaływania wpływów górniczych, w efekcie której na badanych obiektach wystąpiły tylko pojedyncze uszkodzenia o charakterze konstrukcyjnym.

Wieloletnie badania dotyczące wpływu wstrząsów górniczych na budynki zlokalizowane w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) zostały po raz kolejny zweryfikowane i opisane w skali GSIS-2017 [63]. Zaproponowano dodanie dwóch stopni intensywności drgań względem skali z 2012 r. Rozpatrzono wpływ wstrząsów na obiekty o konstrukcji murowej, szkieletowej i prefabrykowanej. Wskazano możliwość oceny odporności dynamicznej budynków, którą uwarunkowano spodziewanymi dopuszczalnymi skutkami widocznymi w uszkodzeniach obiektów.

Podobne badania prowadzone są w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM), a ich najnowsze wydanie to skala GSI-2004/18 [64]. Wśród podstawowych zmian można wymienić korekty odnoszące się do uogólnionych opisów uszkodzeń oraz korektę krzywych funkcji czasu trwania pomiędzy granicami poszczególnych stopni intensywności drgań.

Wpływ wstrząsów w GZW oraz LGOM na uszkodzenia budynków został opisany również w [65]. Przedstawiono tam charakterystyki obserwowanych wstrząsów. Oceniono szkodliwość wstrząsów, wykorzystując dostępne skale GSI i SWD [66]. Ukazano charakterystyczne uszkodzenia budynków murowanych na skutek wstrząsów pochodzenia górniczego. Wpływ wstrząsów górniczych i deformacji nieciągłych w formie uskoków był natomiast przedmiotem analizy w publikacji [67]. Przedstawiono przebieg i charakterystykę wybranych uskoków. Przywołano parametry wysokoenergetycznego wstrząsu z 18 kwietnia 2015 r. i zaobserwowane po wstrząsie uszkodzenia w budynkach. Dodatkowo przeprowadzono ocenę usytuowania budynków względem uskoków w stosunku do prędkości drgań gruntu.

Wyjątkowym rodzajem budynków murowanych poddanych wpływom górniczym, które zazwyczaj objęte są indywidualnym podejściem, są obiekty o charakterze sakralnym. Z uwagi na niską sztywność przestrzenną często ulegają one uszkodzeniom. W publikacjach [68, 69] opisano przypadek uszkodzonego kościoła, który z powodu planowanej eksploatacji górniczej miał być poddany dodatkowym wpływom górniczym. W związku z powyższym zaproponowano i zrealizowano dodatkowe zabezpieczenia konstrukcji sklepień. W publikacjach [70, 71] opisano przykład innego kościoła, w stosunku do którego istniała potrzeba przeanalizowania zaobserwowanych uszkodzeń. W celu zachowania bezpieczeństwa konstrukcji i użytkowników podczas prowadzenia kolejnych eksploatacji górniczych zaproponowano szereg działań zabezpieczających. Ponadto deformacje tego obiektu precyzyjnie przedstawiono w publikacji [72].

Wpływ 77-letniej eksploatacji górniczej, również na budynki sakralne, przedstawiono w [73]. Opisano tam narastanie wpływów górniczych na podstawie pomiarów i obliczeń teoretycznych. Przedstawiono liczne uszkodzenia obiektów i sposoby ich naprawy. Przykład kolejnego kościoła znacznie uszkodzonego i wychylonego na skutek wpływów górniczych przedstawiono w [74, 75]. Dokładny opis warunków górniczych oraz stanu uszkodzeń obiektu znajdujemy w [74]. W celu usunięcia wychylenia kościoła niezbędne było wykonanie dodatkowych wzmocnień konstrukcji, które zaproponowano w kilku wariantach [75]. Wykonano jedną z koncepcji wzmocnienia, a budynek został zrektyfikowany i naprawiony.

Wpływ prowadzonej eksploatacji górniczej w LGOM na budynek kościoła został także opisany w [76]. Obiekt zabezpieczono na wpływy górnicze, wyremontowano i objęto pomiarami geodezyjnymi. Przeanalizowano wpływ oddziaływań górniczych na kościół i jego stan uszkodzeń.

Wymienione powyżej najnowsze doświadczenia w zakresie powstawania uszkodzeń w budynkach murowanych poddanych wpływom górniczym niejednokrotnie wykorzystują opracowane wcześniej metody oceny możliwości powstania w nich uszkodzeń, które opisano w rozdziale 2.