

# Spis treści

<b>Streszczenie</b> .....	11
<b>Summary</b> .....	12
<b>1. Wprowadzenie</b> .....	13
1.1. Wstęp .....	13
1.2. Zawartość pracy.....	14
1.3. Uwagi terminologiczne.....	15
<b>2. Opis nieciągłego masywu skalnego na potrzeby modeli geomechanicznych</b> .....	19
2.1. Rodzaje i geneza nieciągłości w masywie skalnym .....	19
2.2. Opis nieciągłości i sieci nieciągłości .....	21
2.2.1. Ogólna metodyka badań nieciągłości.....	21
2.2.2. Orientacja nieciągłości.....	23
2.2.3. Miary zagęszczenia nieciągłości .....	24
2.2.4. Charakterystyka powierzchni nieciągłości .....	30
2.2.5. Tensor nieciągłości .....	35
2.3. Techniki pomiarowe w rozpoznaniu geometrii nieciągłości.....	37
2.3.1. Wstęp.....	37
2.3.2. Kompas geologiczny i pomiary orientacji na odsłonięciach.....	38
2.3.3. Pomiary zagęszczenia nieciągłości na odsłonięciach .....	40
2.3.4. Fotogrametria cyfrowa i laserowe skanowanie odsłoneń.....	45
2.3.5. Pomiary z rdzeni wiertniczych.....	49
2.3.6. Badanie ścian otworów metodami introskopowymi i penetrometrycznymi .....	51
2.3.7. Metody geofizyczne w rozpoznaniu nieciągłości.....	52
2.3.8. Geofizyka otworowa w rozpoznaniu nieciągłości .....	56
2.3.9. Błędy i obciążenia procesu pomiarowego i ich korekcja .....	59
2.4. Stochastyczne modele geometrii sieci nieciągłości.....	61
2.4.1. Wstęp.....	61
2.4.2. Wyznaczenie rejonu statystycznie jednorodnego.....	63
2.4.3. Wyodrębnienie zespołów nieciągłości .....	63
2.4.4. Rozkłady prawdopodobieństwa orientacji nieciągłości.....	65
2.4.5. Rozkłady prawdopodobieństwa odstępów nieciągłości.....	68
2.4.6. Rozkłady prawdopodobieństwa długości nieciągłości.....	69
2.4.7. Modele koncepcyjne kształtu powierzchni nieciągłości.....	70

2.5.	Mechaniczne modele nieciągłości.....	73
2.5.1.	Wstęp.....	73
2.5.2.	Kąty tarcia w modelach ścinania .....	74
2.5.3.	Deformacje nieciągłości .....	75
2.5.4.	Liniowy model wytrzymałości na ścinanie .....	78
2.5.5.	Przedziałami liniowy model wytrzymałości na ścinanie.....	80
2.5.6.	Kryterium Schneidera .....	82
2.5.7.	Kryterium Bartona (JRC-JCS) .....	82
2.5.8.	Kryterium Kulatilake .....	84
2.5.9.	Kryterium Grasselliego.....	85
2.5.10.	Model Cundalla i Harta.....	85
2.5.11.	Model Bartona-Bandisa .....	87
2.5.12.	Podsumowanie .....	91
<b>3.</b>	<b>Metody ośrodka dyskretnego w modelowaniu nieciągłego masywu skalnego ...</b>	<b>93</b>
3.1.	Wstęp .....	93
3.2.	Mechaniczna natura nieciągłego masywu skalnego a modele symulacyjne ...	95
3.3.	Klasyfikacja metod numerycznego modelowania nieciągłego masywu skalnego .....	97
3.4.	Odwzorowanie nieciągłości wprost w głównych metodach symulacyjnych...	101
3.5.	Rozwiązania jawne i niejawne w czasie .....	107
3.6.	Metody elementów dyskretnych .....	108
3.6.1.	Wstęp.....	108
3.6.2.	Metoda elementów odrębnych (DEM).....	111
3.6.2.1.	Schemat obliczeniowy DEM .....	112
3.6.2.2.	Identyfikacja kontaktu między blokami i oddziaływania bloków .....	113
3.6.2.3.	Prawa ruchu bloków odkształcalnych.....	115
3.6.2.4.	Modele konstytutywne bloków .....	116
3.6.2.5.	Podsumowanie .....	116
3.6.3.	Analiza Nieciągłych Deformacji (DDA) .....	118
3.6.3.1.	Schemat obliczeniowy .....	119
3.6.3.2.	Zapobieganie wzajemnej penetracji bloków i kontakt w DDA .....	120
3.6.3.3.	Inne właściwości DDA .....	121
3.6.3.4.	Porównanie DDA i DEM .....	122
3.6.4.	Metody cząstek dyskretnych i spójne modele cząstkowe .....	124
3.6.4.1.	Rozwój metod cząstek dyskretnych.....	125
3.6.4.2.	Schemat obliczeniowy .....	126
3.6.4.3.	Spójne modele cząstkowe dla skał.....	127
3.6.4.4.	Inne właściwości.....	129
3.7.	Teoria bloków i metody pokrewne .....	132
3.7.1.	Wstęp.....	132
3.7.2.	Analiza stateczności klinów skalnych.....	133
3.7.3.	Metoda Warburtona .....	136
3.7.3.1.	Możliwe sposoby i kierunki przemieszczenia bloku .....	136

3.7.3.2.	Stateczność bloków.....	138
3.7.3.3.	Podsumowanie .....	138
3.7.4.	Metoda Goodmana i Shi.....	139
3.7.4.1.	Podstawowe pojęcia.....	140
3.7.4.2.	Kryteria identyfikacji i podziału bloków na grupy.....	142
3.7.4.3.	Teoria bloków dla wyrobisk korytarzowych i tuneli .....	144
3.7.4.4.	Uwagi do metody Goodmana i Shi.....	148
3.7.4.5.	Podsumowanie .....	149
3.7.5.	Rozwinięcia teorii bloków i metody pokrewne.....	150
3.7.5.1.	Uogólnienie teorii bloków uwzględniające obroty bloków.....	150
3.7.5.2.	Metoda Lina .....	153
<b>4.</b>	<b>Podejście probabilistyczne w modelowaniu nieciągłego masywu skalnego .....</b>	<b>155</b>
4.1.	Wstęp .....	155
4.2.	Metody deterministyczne a metody probabilistyczne .....	157
4.3.	Przegląd metod probabilistycznych w mechanice skał.....	159
4.4.	Zastosowania metod probabilistycznych w mechanice skał.....	162
4.5.	Stochastyczne symulacje stateczności zboczy skalnych i symulacja Parka....	165
4.6.	Symulacja Chana .....	167
4.7.	Analiza probabilistyczna Hoergera .....	168
4.8.	Metoda Hatzora .....	170
4.9.	Modele geostatystyczne Younga .....	173
<b>5.</b>	<b>Metoda stochastycznej symulacji stateczności bloków (MSB) i stochastyczna metoda elementów odrębnych (SDEM) .....</b>	<b>176</b>
5.1.	Wstęp .....	176
5.2.	Metoda Monte Carlo .....	177
5.2.1.	Charakterystyka metody .....	177
5.2.2.	Uwagi o symulacji stochastycznej .....	179
5.2.3.	Stochastyczna, czyli jaka?.....	180
5.2.4.	Ilustracja metody Monte Carlo.....	183
5.2.5.	Dokładność metody Monte Carlo .....	185
5.2.6.	Liczność próby.....	187
5.3.	Specyfika masywu skalnego o strukturze blokowej .....	188
5.4.	Ogólny algorytm metodyki symulacyjnej obejmującej MSB i SDEM.....	190
5.5.	Stochastyczny model sieci nieciągłości (MSB i SDEM).....	191
5.6.	Konturowy wykres prawdopodobieństwa niestateczności (MSB i SDEM)....	194
5.7.	Inne statystyki wynikowe (MSB i SDEM) .....	197
5.8.	Minimalna liczba eksperymentów (MSB i SDEM).....	201
5.8.1.	Wstęp.....	201
5.8.2.	Dokładność estymacji wartości średniej i kwantyla wysokiego rzędu.....	201
5.8.3.	Dokładność estymacji prawdopodobieństwa niestateczności.....	203
5.9.	Weryfikacja modeli stochastycznych (MSB i SDEM).....	203
5.10.	Szczególne elementy symulacji MSB.....	204
5.10.1.	Wstęp.....	204
5.10.2.	Wyodrębnienie bloków przemieszczalnych .....	205

5.10.3.	Statyka bloków przemieszczalnych.....	207
5.10.4.	Kotwy w metodzie MSB.....	208
5.10.5.	Filtr kształtu bloków.....	209
5.10.6.	Filtr rozmiaru bloków.....	209
5.10.7.	Program MSB.....	210
5.11.	Szczególne elementy symulacji SDEM.....	211
5.11.1.	Wstęp.....	211
5.11.2.	Program 3DEC.....	212
5.11.3.	Specyfika stochastycznego modelu sieci nieciągłości w SDEM/3DEC.....	215
5.11.4.	Kotwy w metodzie SDEM/3DEC.....	216
5.11.5.	Konturowy wykres prawdopodobieństwa niestateczności dla SDEM/3DEC.....	217
<b>6.</b>	<b>Przykłady stochastycznej symulacji stateczności wyrobisk z zastosowaniem modeli bloków sztywnych (MSB) i odkształcalnych (SDEM).....</b>	<b>218</b>
6.1.	Probabilistyczna analiza stateczności tunelu metra w Nowym Jorku dla warunków rejonu stacji Manhattan i Central Park (MSB).....	218
6.1.1.	Wstęp.....	218
6.1.2.	Warunki geologiczne w rejonie stacji Manhattan.....	219
6.1.3.	Warunki geologiczne w rejonie stacji Central Park.....	222
6.1.4.	Plan obliczeń.....	224
6.1.5.	Stateczność tunelu nieobudowanego w rejonie stacji Manhattan.....	225
6.1.6.	Stateczność tunelu nieobudowanego o obróconej osi – rejon Manhattan.....	229
6.1.7.	Stateczność tunelu w obudowie kotwowej w rejonie stacji Manhattan.....	232
6.1.8.	Stateczność tunelu nieobudowanego w rejonie stacji Central Park....	236
6.1.9.	Podsumowanie.....	240
6.2.	Probabilistyczna analiza stateczności sztolni HRL Äspö (MSB).....	240
6.2.1.	Wstęp.....	240
6.2.2.	Dane geologiczne i przyjęte założenia.....	242
6.2.3.	Dane wejściowe.....	243
6.2.4.	Wybrane wyniki dla wariantu podstawowego.....	244
6.2.5.	Stateczność tunelu w obudowie kotwowej.....	249
6.2.6.	Wyniki analizy stateczności dla wariantów dodatkowych.....	249
6.2.7.	Uwagi dodatkowe.....	251
6.3.	Analiza porównawcza schematów kotwienia tunelu West Area Combined Sewer Overflow Storage pod Atlantą (MSB).....	251
6.3.1.	Wstęp.....	251
6.3.2.	Ogólny opis warunków geologicznych.....	252
6.3.3.	Dane geologiczne i dane do obliczeń.....	253
6.3.4.	Wyniki symulacji.....	255
6.3.5.	Podsumowanie wyników.....	266
6.4.	Stochastyczna symulacja stateczności komory podziemnego składowiska zużytego paliwa jądowego Central Lager Använt Bränsle (SDEM).....	267
6.4.1.	Wstęp.....	267

6.4.2.	Opis warunków geologicznych i parametrów nieciągłości w rejonie CLAB 2 .....	269
6.4.3.	Wspólne parametry modeli.....	271
6.4.4.	Parametry modeli dla poszczególnych serii symulacyjnych .....	275
6.4.5.	Wyniki .....	276
6.4.6.	Podsumowanie .....	283
6.5.	Zestawienie wyników stochastycznej symulacji stateczności komory nieobudowanej CLAB 2 z zastosowaniem SDEM i MSB .....	284
<b>7.</b>	<b>Podsumowanie .....</b>	<b>287</b>
<b>Literatura</b>	<b>.....</b>	<b>289</b>