



LECH WYSOKIŃSKI, *l.wysokinski@itb.pl*  
Instytut Techniki Budowlanej

## METODY PROGNOZOWANIA I ZABEZPIECZANIA OSUWISK

### THE METHODS OF LANDSLIDES PREDICTION AND THEIR PROTECTION

**Streszczenie** Referat omawia przyczyny, klasyfikację osuwisk, podaje przykłady osuwisk i szkód przez nie wywoływanych na świecie i w Polsce. Fala opadów atmosferycznych, która wystąpiła na wiosnę i w lecie 2010 r. spowodowała oprócz powodzi niespotykaną od wielu lat klęskę osuwisk w Polsce, Czechach, Słowacji. Referat podaje związki ze zjawiskami klimatycznymi, trzęsieniami ziemi, czynnikami antropogenicznymi. Podaje metody rejestracji i badań osuwisk oraz zasady projektowania geotechnicznego; Wskazuje zasady doboru zabezpieczeń naturalnych jak drenaże, przypory ziemne, wymiana gruntów zbrojenie materiałami naturalnymi, zabudowa biologiczna Metody konstrukcyjne jak: konstrukcje oporowe różnych typów – masywne, ażurowe, palościanki, kotwy, gwoździe, gabiony, ruszty, galerie drenażowe. Opisano też nowoczesne metody zabezpieczeń z udziałem geosyntetyków – siatki, maty przeciwerozyjne oraz do zbrojenia gruntu. Wskazano zalecenia odnośnie do służb budowlanych i projektantów oraz schemat postępowania w przypadku wystąpienia zagrożenia osuwiskowego.

**Abstract** The causes, classification and examples of landslides in the world and in Poland are presented in the paper. The significant increase in landslide occurrence was recorded in spring and summer 2010 in Poland, Czech Republic and Slovakia due to heavy rainfalls. The relation to climate and anthropogenic factors, earthquakes was indicated. Some methods of registering and investigation on landslides as well as geotechnical design guidelines are described. Also the guidelines for choosing the appropriate drainage system, retaining structures, soil improvement, reinforcement, biological methods are given. Such methods as: retaining walls of different types, openwork structures, anchors, nails, gabions, grids, drainage galleries, sheet pile walls are described including the newest methods of landslide protection with geosynthetics (grids, anti-corrosion mats). The recommendations in case of a landslide occurrence for designers and construction supervisors are given

### 1. Wstęp

Osuwiska należą do procesów przyrodniczych często prowadzących do klęsk żywiołowych podobnie jak powodzie, wybuchy wulkanów, trzęsienia ziemi, tsunami, tornada czy katastrofy kosmiczne (np. uderzenie meteorytu).

Przez klęskę żywiołową w sensie prawnym [1] rozumie się katastrofę naturalną lub awarię techniczną, której skutki zagrażają życiu i zdrowiu dużej liczby osób lub mieniu o wielkich rozmiarach.

Osuwiska są powszechną „chorobą naszej planety”, były zawsze i będą dopóki będą wystarczająco stromo nachylone stoki, siły grawitacji i czynniki klimatyczne. Proces osuwiskowy prowadzi do penepłeny, wyrównania powierzchni ziemi, czyli osiągnięcia trwałej równowagi mas gruntowych. Osuwiska występują na ziemi, obserwowane są też np. na Marsie, są na lądzie i pod powierzchnią wód zwłaszcza na szelfach kontynentów i mórz. Np. osuwisko podmorskie z norweskiego szelfu kontynentalnego Storegga, zapoczątkowane prawdopodobnie przez trzęsienie ziemi wywołało falę tsunami o wysokości ponad 30 m,

która zostawiła osady na terytorium Holandii i Szkocji na wysokości 25 m nad poziomem morza. Masy gruntów, które oddzieliły się od szelfu przebyły drogę ponad 1000 km i miały masę wielu miliardów metrów sześciennych. Ostatnia datowana faza tego osuwiska wystąpiła około 6100 r. p.n.e. [2].

W klasyfikacji klęsk żywiołowych i zagrożeń, które występują na świecie, osuwiska znajdują się za trzęsieniami ziemi, wybuchami wulkanów, powodzią i tsunami, i to zarówno w liczbie ofiar ludzkich jak i strat materialnych. Nie bagatelizując szkód, które powodują trzeba powiedzieć, że osuwiska to zjawiska, których nasilenie obserwuje się periodycznie. Są ściśle związane z klimatem, głównie opadami. Ludzkość ma długotrwałe doświadczenie życia z osuwiskami, choć nie potrafiła ich dotychczas jako klęsk żywiołowych opanować.

Ostatnie wielkie klęski osuwiskowe z lata 2010 w Chinach (rys. 1), w których łącznie było kilkanaście tysięcy ofiar śmiertelnych i styczniowe (2011) osuwiska i potoki błotne w Brazylii z sumą ok. 900 ofiar (rys. 2) [3] [4].



Rys. 1. Zniszczenia domów w Chinach (Hanyuan) przez osuwisko 28.07.2010 [3]



Rys. 2. Skutki osuwisk w Brazylii 12.01.2011 [4]

W obu przypadkach przyczyną były ogromne opady deszczów. Liczba ofiar jest tak duża, bo w Chinach osuwisko runęło na miasto Zongu (1250 ofiar) 15.08.2010, a w Brazylii wystąpiło w strefie zabudowanej zabudową willową.

## 2. Osuwiska w Polsce w 2010 r.

Fala opadów atmosferycznych, która wystąpiła na wiosnę i w lecie 2010 r. oprócz powodzi spowodowała niespotykaną od wielu lat klęskę osuwisk. Według może nieco przesadzonych doniesień (sprawozdań) administracji samorządowej w lecie po fali deszczów osuwiska wystąpiły w 107 gminach, w tym w większości w województwie małopolskim (53%), w rzeszowskim (31%), śląskim (15%). Ogółem według danych zgłoszonych do Głównego Urzędu Nadzoru Budowlanego powstało 1345 osuwisk, które uszkodziły 2269 budynków, w tym 560 w stopniu nie nadającym się do odbudowy czy remontu (rys. 3, 4). Można przypomnieć, że np. w roku 1970 powstało tylko na niżu w Polsce 2360 osuwisk. Powierzchnia obszarów wykazujących tendencję osuwiskową w tym czasie oceniona była na około 250 km<sup>2</sup> (Bażyński, Frankowski) [5]. Dane te opisują sytuację bez Karpat, gdzie liczbę czynnych i okresowo czynnych i zamarłych osuwisk szacowano na kilka tysięcy.



Rys. 3. Osuwisko w Milówce z lipca 2010 r.



Rys. 4. Osuwisko w Lanckoronie

Sporządzony we wrześniu 2010 r. raport pt. „Działanie resortu środowiska w zakresie systemu osłony przeciwoświwiskowej w Polsce [6] podaje:

„Osuwiska i tereny zagrożone osuwiskami występują przede wszystkim na obszarze Karpat co stanowi 10% powierzchni Polski (osuwiska karpackie stanowią 95% wszystkich osuwisk i terenów zagrożonych w Polsce), w strefie brzegowej Bałtyku oraz na stokach dolin rzek nizinnych. W 2005 r. liczbę osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami w Karpatach oceniono wstępnie na ponad 20 tysięcy. Prace prowadzone w latach 2008÷2010 w ramach Projektu SOPO (System Osłony Przeciwoświwiskowej) [5] pozwoliły te dane uszczegółowić na terenie wybranych gmin karpackich i dane te ekstrapolować na pozostały obszar Karpat [8]. Obecnie szacuje się, że liczba osuwisk w Karpatach może zawierać się w przedziale 50÷60 tysięcy. „Wskaźnik osuwiskowości” wyrażający wielkość obszaru objętego i zagrożonego osuwiskami w stosunku do powierzchni terenu ogółem jest w Karpatach szacowany na 30÷40%.”

Zmiana z 20 tys. na 60 tys. to potrojenie liczby osuwisk, nie podano [8] czy czynnych, czy tylko potencjalnie możliwych, a to wielka różnica, także ważne jest czy mogą to być osuwiska groźne dla ludzi czyli katastrofalne.

Fala osuwisk z 2010 roku w Polsce niewątpliwie bardzo wysoka i powodująca lokalnie wielkie nieszczęścia nie spowodowała np. utraty ani jednego życia ludzkiego, a to w skali międzynarodowej jest miernikiem wielkości klęski żywiołowej. W tym czasie na świecie było kilka osuwisk z dużą liczbą ofiar.

W Polsce w ostatnich 50. latach okresy obfitości osuwiskowej to 1964, 1967÷1968, 1978÷1979, 1997 głównie w Karpatach i 2010.

W lipcu 1997 r. w Beskidzie Wyspowym wystąpiły katastrofalne opady, powodując nienotowaną od wielu lat powódź oraz ruchy osuwiskowe. Zanotowano wówczas ponad 500 przypadków zagrożeń obiektów budowlanych. Powierzchnia zajęta przez osuwiska wahała się od kilku do ponad 100 ha. Wystąpiły również nietypowe dla tych obszarów sływy gruzowe i gruzowo-błotne zdzierające pokrywy zwietrzelinowe do litej skały, zasypując materiałem zabudowania mieszkalne i gospodarcze [9].

W latach 1997÷2002 na Pogórzu Rożnowskim odmłodzeniu uległy 83 osuwiska, co stanowi około 20% powierzchni osuwiskowej. W dorzeczu Łososiny w Beskidzie Wyspowym w tym samym czasie powstało 1300 osuwisk, z których 34% miało ściśle uwarunkowania antropogeniczne, a o lokalizacji wielu z pozostałych decydowały zarówno czynniki naturalne jak i antropogeniczne. W jednej gminie Laskowa ponad 40 budynków mieszkalnych zostało uszkodzonych a ok. 170 zabudowań położone jest w obrębie starych lub uaktywnionych osuwisk. Jest to skutkiem nieumiejętności rozpoznania przez inwestorów form osuwiskowych i wiedzy na temat ich odnawialności.

Wzrost zagrożeń osuwiskowych w ostatnich latach związany jest głównie z faktem zabudowy starych, nieaktywnych powierzchni osuwiskowych. Jest to wynikiem z jednej strony nieumiejętności rozpoznania przez inwestorów tych form, z drugiej zaś wykorzystywaniem stosunkowo płaskich obszarów pod zabudowę. Przez wiele setek lat znaczna część osuwisk w obszarach górskich była zasiedlona przez człowieka, ale budownictwo było drewniane, a tym samym lekkie, co stanowiło nieduże obciążenie mas koluwalnych, budynki drewniane były łatwiejsze do przebudowy w wyniku zniszczenia. W związku z rozwojem gospodarczym i dużymi walorami turystyczno-rekreacyjnymi obszarów górskich, stoki osuwiskowe zostały w dużym stopniu zabudowane wysokimi i ciężkimi budynkami, często podcinającymi zbocza.

Budować można nawet na terenach zagrożonych osuwiskami, ale pod określonymi warunkami. Administracyjne zakazy i wyłączenia wszystkich terenów osuwiskowych spod zabudowy, co można wyczytać z Planowanych kierunków działań [6] nie jest słuszne. Wykonanie inwestycji na osuwisku czy terenie osuwiskowym jest możliwe, jeśli jednocześnie jest to połączone z wzmocnieniem zbocza i likwidacją zagrożenia osuwiskowego. Kalkulacja ekonomiczna wskazuje, czy opłaca się inwestować w takie tereny, ze względu na koszt koniecznych zabezpieczeń. To samo dotyczy przebiegu dróg, które powinno się kształtować z uwzględnieniem oceny zagrożenia osuwiskowego.

Zapobieganie skutkom klęsk żywiołowych jest problemem wielkiej skali światowej. Rosnąca liczba ludności, konieczność zajmowania nowych terenów, dawniej uważanych jako trudniejsze do zagospodarowania, powoduje większy wpływ klęsk żywiołowych na ludzi.

Należy przypomnieć, że w styczniu 2005 r. odbyła się w Kobe „Druga Światowa Konferencja ds. Redukcji Skutków Katastrof Naturalnych” [10]. Jeden z wniosków tej konferencji to, że klęsk żywiołowych nie można uniknąć, lecz kompleksowa ocena ryzyka i wczesne ostrzeżenie wraz z metodami zapobiegania ich skutkom może zapobiec przekształceniu się zagrożenia w katastrofę naturalną. Oznacza to, że można podjąć działania, które mogą znacząco zmniejszyć liczbę ofiar śmiertelnych oraz straty gospodarcze. 90% klęsk żywiołowych na świecie związanych jest z pogodą, klimatem i wodą, czyli niezbędnymi elementami naszego życia, które, gdy wystąpią w nadmiarze, są zabójcze, jak każda przesada. Wymagania zrównoważonego rozwoju wymagają właściwej strategii i taktyki zapobiegania skutkom katastrof naturalnych.

„W dziesięcioleciu 1992-2001 klęski żywiołowe na świecie były powodem śmierci ponad 622 tys. osób, a 2 mld ludzi ucierpiało z ich powodu. Straty gospodarcze powstałe w wyniku katastrof pochodzenia hydrometeorologicznego oszacowano na 446 mld USD. Ekonomiczne skutki klęsk żywiołowych wykazują rosnącą tendencję w ostatnich kilku dekadach, przy czym skutki katastrof dotyczą w większym stopniu kraje rozwijające się” [10].

### 3. Klasyfikacja osuwisk

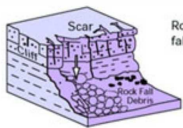
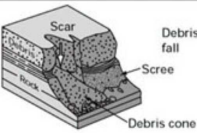
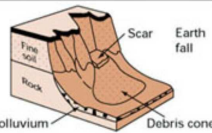
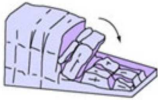
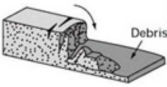
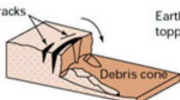
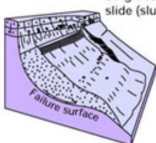
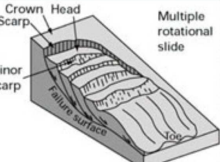
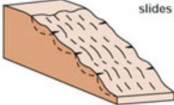
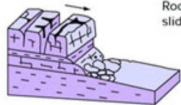
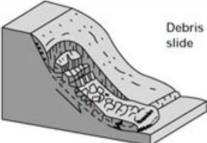
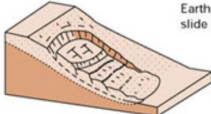
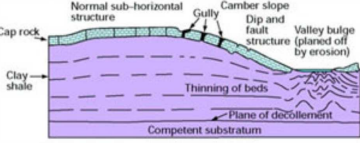
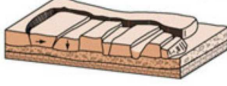
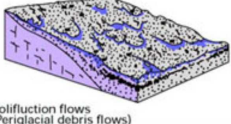
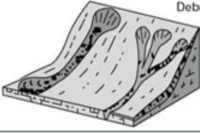

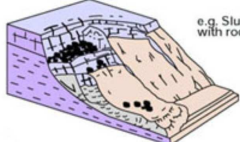
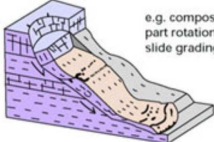
Osuwiska są zjawiskami złożonymi. Wspólną cechą tych zjawisk, które nazywane są też powierzchniowymi ruchami mas ziemnych jest przemieszczanie materiału w wyniku sił grawitacji z miejsc wyżej położonych do niżej leżących, zwykle przy udziale wody.

Ze względu na złożoność zjawiska powstało wiele klasyfikacji, które przyjmowały różne kryteria.

I tak można wymienić jako kryteria klasyfikacji:

- 1) rodzaj ruchu (swobodny lot, przesuw, spływ),
- 2) materiał (głazy, grunt, błoto),
- 3) aktywność (okresowa, ciągła, nieaktywne w momencie obserwacji),
- 4) prędkość przemieszczania się (gwałtowne, powolne),

- 5) charakterystyka morfologiczna (kąąt nachylenia zbocza, zawodnienie),
- 6) wiek (stare, wielokrotnie odnawialne),
- 7) położenie geograficzne i topograficzne,
- 8) rodzaj klimatu (suma opadów, temperatury itp.),
- 9) przyczyny wywołania ruchu (naturalne, trzęsienie ziemi, antropogeniczne, podcięcie).

		Material		
		SKAŁA	ZWIETRZELINA	GRUNT
OBRYWY FALLS		 Scar Rock fall Rock Fall Debris	 Scar Debris fall Scree Debris cone	 Scar Earth fall Colluvium Debris cone
		 Rock topple	 Debris topple Debris cone	 Cracks Earth topple Debris cone
ZSUWY SLIDES	ROTACYJNE ZEŚCINANIA ROTATIONAL	 Single rotational slide (slump) Failure surface	 Crown Head Scarp Multiple rotational slide Minor Scarp Failure surface	 Successive rotational slides
	PLASKIE STRUKTURALNE PLANAR	 Rock slide	 Debris slide	 Earth slide
ZEŚLIŻGI SPREADS	 Normal sub-horizontal structure Cap rock Clay shale Thinning of beds Plane of decollement Competent substratum Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge structure (planned off by erosion) e.g. cambering and valley bulging			 Earth spread
SPLYWY FLOWS	 Solifluction flows (Periglacial debris flows)	 Debris flow		 Earth flow (mud flow)
ZJAWISKA ZŁOŻONE COMPLEX	 e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		 e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe	

Rys. 5. Klasyfikacja typów przemieszczeń mas (popr. Varnes, 1978; DoE, 1990)  
Nazwy zgodnie z klasyfikacją Kleczkowskiego, 1955

W przypadku analizy osuwisk prawidłowe określenie typu przemieszczenia ma zasadnicze znaczenie. Pozwala na analizę obliczeniową zjawiska, bowiem znamy powierzchnię

poślizgu i postać ruchu. Rys. 5 pokazuje stosowaną obecnie powszechnie na świecie klasyfikację Varnesa 1978 [12].

Zaliczając do określonego typu badane osuwisko możemy od razu wyciągnąć liczne wnioski, w tym dotyczące powodowanego przez nie zagrożenia. W Polsce od ponad 50 lat stosujemy klasyfikację A. Kleczkowskiego [11]. Przedstawiona na rys. 5 klasyfikacja Varnesa [12] zgodna jest w ogólnych ramach ze stosowaną przez nas. Obie mają wspólne źródło, którym jest klasyfikacja Drogowego Biura Badawczego USA (1949) – prawdopodobnie pierwsza klasyfikacja Varnesa. W Polsce najbardziej znaczną grupę, ponad 60 procent, stanowią zsuwy strukturalne występujące we fliszu w Karpatach. Predyspozycją są tu warstwy łupkowe, konsekwentne układy warstw do zbocza, a także występowanie powierzchni tektonicznych.

Drugą grupą są osuwiska rotacyjne (ok. 30%), powierzchnia ścięcia ma kształt cylindryczny. Są tu osuwiska występujące w gruntach, z reguły ilastych, bardzo często na skarpach kształtowanych przez człowieka. Obrywy i spływy występują sporadycznie, nie częściej niż 10% liczebności.

Szukając charakterystycznych cech tych najczęściej występujących typów opracowano tablicę 1.

Dokładniejsze wydzielenia cech wymienionych typów znajdują się w publikacji [14].

Tablica 1. Cechy charakterystyczne typowych osuwisk występujących w Polsce

Nazwa	Kąt nachylenia zbocza	Prędkość przemieszczeń	Przyczyna	Predyspozycje
Zsuw strukturalny ok. 60%	kilka do kilkudziesięciu stopni	wolne do bardzo szybkich > 5 m/s	różnice wietrzenia, podcięcie, erozja	powierzchnie nieciągłości, warstwowanie (np. ity)
Osuwisko rotacyjne ok. 30%	kilkanaście do 90°	wolne do bardzo szybkich	podcięcie, nasycenie mas	litologia, parametry wytrzymałościowe
Spływ ok. 3%	20÷45°	bardzo szybki	opady, nasycenie mas, erozja wody	nieciągłości, litologia, rozdrobnienie
Obryw ok. 7%	45÷90°	gwałtowny	wietrzenie, podcięcie, wibracje	powierzchnie nieciągłości, spękania

Po ustaleniu typu zjawiska (klasyfikacja) należy określić przyczynę jego występowania. Przyczyny osuwisk generalnie można podzielić na powodujące zwiększenie obciążeń stoku lub zmniejszenie wytrzymałości materiałów go budujących. Często obie przyczyny występują razem.

Na zwiększenie obciążeń ma wpływ:

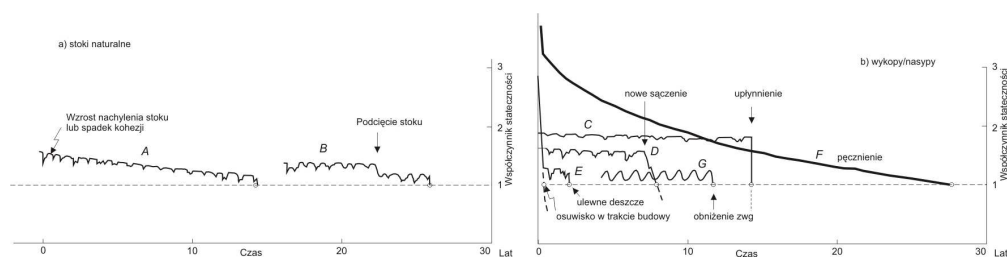
- podcięcie w dolnej części skarpy – naturalne (abrazja) lub sztuczne (wykop);
- dodatkowe obciążenie (budynek, nasyp);
- wstrząsy (trzęsienie ziemi, ruch pojazdów itp.);
- nasycenie wodą (zwiększony ciężar);
- inne.

Przyczynami zmniejszenia wytrzymałości skał lub gruntów tworzących zbocze są:

- nasycenie wodą (zmiana wytrzymałości);
- wysychanie, powstawanie szczelin wskutek skurczu;
- wietrzenie (powolny proces).

#### 4. Czynniki uczestniczące w procesie osuwiskowym

Mówimy „proces osuwiskowy” by podkreślić, że osuwisko osadzone jest w czasie. Można tu pokazać diagram (rys. 6) K. Terzagiego z 1950 r. [15] wskazujący zmiany stanu równowagi i aktywności osuwiska w czasie. W momencie, gdy na określony stok zaczyna intensywniej działać jeden lub kilka czynników (A, B, C, D), powodując zmniejszenie stateczności, następuje faza przygotowania osuwiska. Gdy działania tych czynników nie ustaje, względnie narasta, lokalnie powstają przekroczenia naprężeń w zboczu, związane ze zwiększonymi przemieszczeniami i występuje w tych miejscach lokalne ścięcia lub rozmywania z rozciąganiem. Powoduje to zmianę jakościową w charakterze procesu, maleje skokowo wytrzymałość podłoża, występuje szybkie narastanie deformacji, propagacja strefy plastycznej, w końcu ścięcie na powierzchni najniższej wytrzymałości i przemieszczenie, niekiedy bardzo gwałtowne bryły (masy) gruntu.



Rys. 6. Klasyczny schemat K. Terzagiego pokazujący zmniejszanie nośności zbocza i moment powstawania osuwiska [15]

Szczeliny występujące w miejscach przekroczenia wytrzymałości ułatwiają wnikanie wód opadowych. Powoduje to dalsze obniżenie parametrów wytrzymałościowych gruntów na skutek podwyższenia wilgotności, ciśnienia hydrostatycznego i hydrodynamicznego wody itp. oraz pociąga za sobą szybki wzrost liczby szczelin i ich rozszerzanie. Następuje łączenie szczelin i kształtuje się powierzchnia poślizgu, zaczyna się faza ruchu osuwiskowego. Obszar objęty naprężeniami granicznymi rozpoczyna szybki ruch. W niższych, bardziej płaskich odcinkach, dochodzi do zatrzymania mas gruntowych i następuje faza równowagi krótkotrwałej, która może być naruszona przy dalszym działaniu niekorzystnych czynników.

W czasie ruchu następuje zmiana poprzednich warunków równowagi mas ziemnych, kształtu zbocza, reżimu wód gruntowych itp. Prowadzi to do rozpoczęcia nowej fazy procesu, która może przebiegać inaczej. Po okresie chwilowej równowagi, gdy zmiany wywołane ruchem mas ziemnych wyłączyły niektóre czynniki dawniej działające, może rozpocząć się faza stabilizacji. Polega ona głównie na osiadaniu i konsolidacji mas gruntowych naruszonych przez osuwisko.

Osuwiska mogą mieć przebieg powtarzalny, czasem nawet wielokrotnie (np. co wiosną) lub występować jednorazowo. Czas trwania każdej z wymienionych faz może być różny i zależy od charakteru i intensywności działających czynników. W celu oceny stateczności każdy stok, skarpa, zbocze należy rozpatrywać jako miejsce możliwych ruchów osuwiskowych.

#### 5. Badania terenowe osuwisk

Do wykonania oceny i prognozy stateczności zbocza konieczny jest plan geodezyjny terenu i przekroje geologiczne przez zbocze.

Z powodu zmian sytuacyjno-wysokościowych terenu na skutek ruchu osuwiska, na ogół brak jest aktualnego planu terenu. Bardzo dużo informacji mogą dostarczyć opisy terenu sprzed powstania osuwiska. Konieczne jest przeprowadzenie wywiadów z mieszkańcami oraz poszukiwanie materiałów ikonograficznych z okresu przed wystąpieniem zjawiska. W zależności od wagi problemu należy uzupełnić potrzebne informacje o morfologii terenu metodami geodezyjnymi lub kartowania GPS. Zwłaszcza metoda naziemnego GPS jest szczególnie przydatna przy badaniach i ocenie zjawisk osuwiskowych. Jest ona szybka, pozwala automatycznie uzyskać obraz badanego zbocza oraz jego plan i przekroje w dowolnych miejscach i liczbie.

Ocena stateczności stoku wymaga określenia oraz zbadania warunków wodnych, klimatycznych i gruntowych.

Obliczeniowe poziomy wód powierzchniowych i gruntowych ustalone z obserwacji terenowych powinny zapewniać wybór najbardziej niekorzystnej sytuacji. Możliwość awarii drenów filtrów lub innych istniejących urządzeń wodnych także powinna być uwzględniona. W analizach, zaleca się rozważenie możliwości opróżnienia kanału lub zbiornika wodnego podczas konserwacji albo zniszczenia. W obliczeniach stanów granicznych użyteczności należy wykorzystać mniej niekorzystny, średni poziom wody lub ciśnienia wody w porach gruntu.

Dla skarp wzdłuż linii brzegowej najbardziej niesprzyjające warunki hydrauliczne to zazwyczaj szybkie obniżenie poziomu wody powierzchniowej uruchamiające ciśnienie spływowe (przy dużych różnicach poziomów wody). Przy wyznaczaniu projektowanego rozkładu ciśnienia wody w porach gruntów należy wziąć pod uwagę możliwy zakres anizotropii przepuszczalności i zmienności gruntów w warstwach.

Na zboczach naturalnych łatwym wskaźnikiem, na podstawie którego można wyciągnąć wnioski o ruchach powierzchni terenu, jest pokrycie szatą roślinną. Wyróżnia się tu:

- nieodkształcone drzewa powyżej 25 lat, wskazujące na zbocza martwe,
- drzewa przemieszczone, tzw. „pijany las”, wskazujące na słabą aktywność osuwiskową i pelzanie,
- przemieszczone rośliny zielne, krzewy i młode drzewa świadczące o niedawnej aktywności,
- roślinność wodną lub wodolubną, wskazującą na strefy wysięków i wypływów wód i silne zawodnienie zbocza.

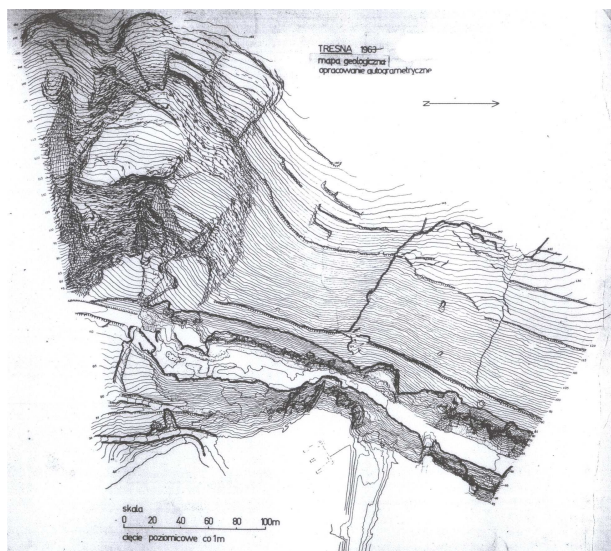
W warunkach klimatycznych oceniamy:

- ekspozycję skarpy, północna, południowa (jest istotne),
- pomiary opadów i ich rozkład,
- pomiary innych czynników klimatycznych mających wpływ na grunty (przemarzanie).

Należy podkreślić, że w badaniach osuwisk normalnie stosowane w geotechnice metody wierceń (nawet przy pełnym rdzeniowaniu) nie są zadowalające do określenia potencjalnych powierzchni poślizgu. Także preferowane obecnie inklinometry mają zwykle krótki czas życia, bo osuwisko je szybko niszczy. Ciągłe najlepszą metodą określania powierzchni poślizgu (która kiedyś wystąpiła i z wielkim prawdopodobieństwem będzie odnawialna) jest obserwacja i dobre materiały kartograficzne.

Rys. 7 pokazuje wykonany ze zdjęć naziemnych metodą fotogrametryczną plan zbocza. Podobne obrazy udaje się uzyskać z kartowania GPS w warunkach, gdy trudno jest zorganizować nalot i uzyskać dobre zdjęcia metodami geodezyjnymi.





Rys. 7. Tresna - mapa osuwisk na podstawie zdjęć fotogrametrii naziemnej S. Ostaficzuk (1969)

Ważna jest też kwerenda materiałów archiwalnych, starych planów, rycin itp. Rys. 8 pokazuje widok skarpy w Płocku z roku 1797 z charakterystycznymi wtedy osuwiskami. Osuwiska, jako zjawiska dynamiczne „żywe” zmieniają ciągle morfologię terenu i zawsze, kiedy podejmujemy jakiś problem inwestycyjny przy możliwości osuwisk musimy mieć aktualne materiały kartograficzne.



Rys. 8. Widok skarpy w Płocku w 1797 r.

Duże możliwości badań struktury wewnętrznej osuwisk dają metody geofizyczne, można tu wymienić nową metodę tomografii elektrooporowej (E.R.T.). Metoda ta łączy w sobie niskie koszty, szybkie procedury i wysoką rozdzielczość obrazu przewodności elektrycznej, która może przy znajomości ogólnej budowy geologicznej być interpretowana dla wykrycia powierzchni poślizgu (strefy niskiej oporności). Technologia ta może służyć jako wymagająca przy kompleksowym rozpoznaniu osuwisk (ale nie jako jedyna i samodzielna). Metodą wspomagającą jest też metoda sejsmiki inżynierskiej.

## 6. Metody analizy geotechnicznej zboczy

Celem działań geotechnicznych jest zawsze ocena bezpieczeństwa budowli. W przypadku stateczności zboczy mamy praktycznie jedyny w geotechnice przypadek, że łatwa jest weryfikacja naszych działań czy metod obliczeń. Osuwisko występuje przy obliczonym współczynniku stanu równowagi  $SF = 1$  lub niższej jego wartości. Mamy zatem możliwość weryfikacji wartości parametrów obliczeniowych i metod obliczeń widząc stok. W innych zadaniach geotechnicznych posadawiania obiektów takich możliwości weryfikacji z reguły nie mamy (obiekty stoją nie wiemy jaki jest zapas bezpieczeństwa).

Obliczenie stateczności zbocza (skarpy) jest zadaniem, które może być rozwiązane różnymi metodami. Stopień znajomości czynników, które należy uwzględnić w algorytmie obliczeniowym, jest często niejednakowy. Zadanie sprawdzenia stateczności rozwiązywane jest więc często metodami bardzo prostymi, ale dającymi dobre wyniki lub metodami dokładnymi w sensie teoretycznym – lecz z mało wiarygodnymi wynikami. Ocena możliwego zaangażowania osuwiskowego ustala się na podstawie jednej lub kilku metod, opierając się przeważnie na wyliczonym wskaźniku stanu równowagi ( $SF$ ).

Przy rozważaniu stanu równowagi statycznej i ogólnego przemieszczenia konstrukcji Eurokod 7 [16] zakłada najprostszą zasadę równowagi mas i wartości charakterystyczne gruntów:

$$E_{dst;d} \leq E_{stb;d} + T_d \quad (1)$$

$$E_{dst;d} = E \left\{ \gamma_F \cdot F_{rep}; \frac{x_k}{\gamma_M}; a_d \right\}_{dst} \quad (2)$$

$$E_{stb;d} = E \left\{ \gamma_F \cdot F_{rep}; \frac{x_k}{\gamma_M}; a_d \right\}_{stb} \quad (3)$$

$$SF = \frac{E_{stb;d} + T_d}{E_{dst;d}} \quad (\text{uzupełnienie autora}) \quad (4)$$

gdzie:

- $SF$  – (*safety factor*) współczynnik stanu równowagi
- $a_d$  – wartość obliczeniowa danych geometrycznych;
- $E_{dst;d}$  – wartość obliczeniowa skutku oddziaływań destabilizujących (wywracających);
- $E_{stb;d}$  – wartość obliczeniowa skutku oddziaływań stabilizujących (utrzymujących);
- $F_{rep}$  – wartość reprezentatywna oddziaływania;
- $T_d$  – wartość obliczeniowa całkowitego tarcia, jakie powstaje wokół bloku gruntu doznającego poślizgu lub części konstrukcji stykającej się z gruntem;
- $X_k$  – wartość charakterystyczna właściwości materiału;
- $\gamma_F$  – współczynnik częściowy do oddziaływania;
- $\gamma_M$  – współczynnik częściowy do parametru geotechnicznego (właściwości materiału) uwzględniający również niepewność modelu obliczeniowego.

Szacowanie zapasu bezpieczeństwa konstrukcji opiera się na teorii niezawodności. Ocena tę weryfikują występujące w praktyce katastrofy. Należy zwrócić uwagę, że w odróżnieniu od małej liczby katastrof konstrukcyjnych osuwiska są powszechne, zatem mamy wiele przypadków wystąpienia stanu granicznego, co zezwala na wyznaczenie rzeczywistych wartości parametrów materiałowych w momencie zniszczenia, zatem można ściślej określić współczynnik modelu, tj. porównać wynik obliczeń uzyskany z badań w stosunku do rzeczywistej zrealizowanej wytrzymałości materiału w chwili przemieszczenia na powierzchni ścienia (poślizgu).

Wartości obliczeniowe oddziaływań należy określać zgodnie z PN-EN 1990:2002 [16].

W Eurokodzie podawane są wartości uogólnionych oddziaływań:

- wartości  $A$  oznaczają obciążenia (*action*)
- wartości  $M$  oznaczają materiały (*material*)
- wartości  $R$  oznaczają opory gruntu (*resistance*)

Podejście 3., które w Polsce przyjęliśmy do sprawdzania stanu równowagi (stateczności), zakłada:

$$(A1^* \text{ lub } A2^+) + M2 + R3$$

\* do oddziaływań z konstrukcji

+ do oddziaływań geotechnicznych (parcie, ciężar gruntu)

$A1^*$ ,  $A2$ ,  $M2$ ,  $R3$  są to zestawy współczynników, które należy czytać z tabel w [16].

W zadaniach obciążeń stateczności w 3 podejściu wartości współczynników cząstkowych są to:

$$A2 = 1,0 \gamma_k$$

$$M2 = \gamma_m = \gamma_q = \varphi_c = 1,25$$

$$R3 = 1,0 \gamma_E \gamma_R$$

Prowadzi to do wniosku, że przy wartości  $SF = 1,25$  skarpe jako bezpieczną można akceptować

L. Wysokiński podaje, że powierzchnia poślizgu znaleziona dla każdego przypadku dokładnych obliczeń, odpowiadająca minimalnemu wskaźnikowi stanu równowagi, pozwala wnioskować o formie osuwiska i zasięgu strefy zagrożenia osuwiskowego. Wystąpienie osuwiska należy uznać za:

- bardzo mało prawdopodobne, gdy  $SF > 1,5$ ;
- mało prawdopodobne, gdy  $1,3 < SF < 1,5$ ;
- prawdopodobne, gdy  $1,0 < SF < 1,3$ ;
- bardzo prawdopodobne, gdy  $SF < 1,0$ ;

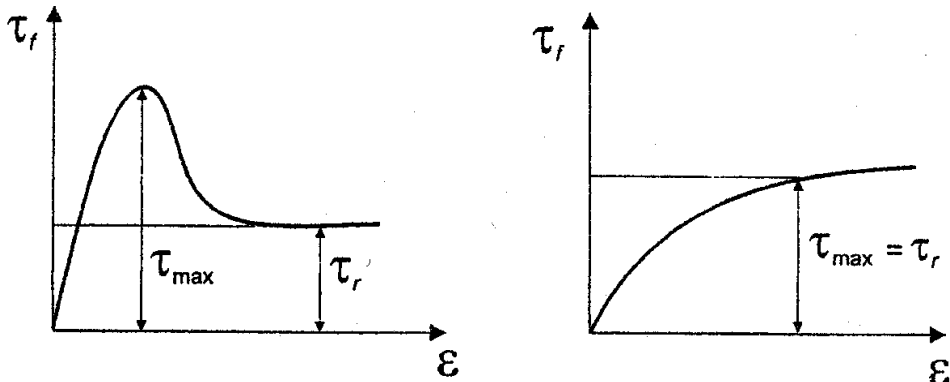
Zasięg strefy zagrożenia osuwiskowego należy ustalić w zależności od dokładności obliczeń i ważności problemu. Bezpieczne wartości wskaźnika stanu równowagi przy parametrach charakterystycznych należy przyjmować nie mniejsze niż  $SF = 1,3$ . Zasięg powierzchni poślizgu o wartości  $SF = 1,5$  można uznawać za zasięg strefy zagrożenia osuwiskowego terenu powyżej krawędzi skarpy.

## 6.1 Parametry gruntów

Określenie parametrów przy liczeniu osuwisk jest bardzo trudne, większość awarii i katastrof powstała na skutek błędnego określenia wytrzymałości gruntu. Zagadnienie to poruszał Z. Młynarek [17] w odniesieniu ogólnie do katastrof budowlanych. W przypadku osuwisk

sprawa jest bardziej złożona, są tego liczne przykłady, że o katastrofie decyduje milimetrowa warstewka słabego materiału lub częściowej powierzchnia nieciągłości, spękanie lub lustro tektoniczne, które nie sposób jest wykryć dostępnymi metodami. Stąd przy badaniu osuwisk jako charakterystyczną miarodajną wartość  $X_k$  często stosujemy laboratoryjnie wyznaczaną wytrzymałość rezydualną (resztkową)  $\tau_r$ .

Badania wytrzymałości rezydualnej  $\tau_r$  rys. 9) można przeprowadzać w aparacie skrzynkowym (przez kilkakrotne powtórzenie ścinania tej samej próbki) lub w aparacie pierścieniowym (Także wielokrotne ścinanie po wytworzonej powierzchni ścięcia w aparacie trójosiowym przy podnoszonym ciśnieniu bazowym  $\tau_3$  są modelem takich badań.



Rys. 9. Parametry wytrzymałościowe przyjmowane do obliczeń stateczności

Do liczbowej oceny zmniejszania wytrzymałości na ścinanie przy przejściu od maksymalnej do resztkowej można wykorzystać wskaźnik Bishopa  $I_B$ :

$$I_B = \frac{\tau_f - \tau_r}{\tau_r} \cdot 100 \quad (5)$$

Wskaźnik Bishopa ma tę zaletę, że wyraża bezpośrednio maksymalny procent zmniejszenia wytrzymałości, który może powstać wskutek postępującego zniszczenia struktury gruntu. Wartość  $I_B$  dla typowych gruntów Polski zmienia się w zakresie 10÷90% [14] i przykładowo wynosi dla:

- utworów lessopodobnych 10÷20%,
- glin zwałowych 30÷40%,
- gruntów rzeczno-zastoiskowych (mad) 40÷50%,
- iłów jurajskich 50÷60%,
- iłów plioceńskich 60÷70%,
- iłów mioceńskich 60÷90%.

Katastrofa ściany szczelinowej przy ul. Puławskiej (Europlex) w Warszawie z roku 1998 nastąpiła właśnie przy zlekceważeniu przez geotechnika austriackiego tej zależności w iłach plioceńskich (przyjął  $c = 100$  kPa, gdy katastrofa wystąpiła przy  $c = 37$  kPa).

Dokumentacje geotechniczne dla problemów drogowych z reguły nie uwzględniają tej zależności, stąd tyle osuwisk na drogach.

W literaturze niemieckiej [18] podawane są następujące wartości parametrów i wynikające z nich nachylenie skarp, wykopów i nasypów (tabl. 2).

Tablica 2. Wartości nominalne nachyleń skarpy dla gruntów spoistych i wartości parametrów ścinania [18]

Typ gruntów	Wysokość zbocza $h$ [m]	Nachylenie skarpy wykopu	Nachylenie skarpy nasypu	Wskaźnik plastyczności $I_p$ [%]	Ciężar objętościowy gruntu $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Parametry ścinania	
						Kąt tarcia $\varphi$ [°]	Spójność $c$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Pyły	0 do 3	1:1,25	1:1,6	<10	18	25	5
	3 do 6	1:1,6	1:2				
	6 do 9	1:1,75	1:2,2				
	9 do 12	1:1,9	1:2,3				
	12 do 15	1:2	1:2,4				
Gliny piaszczyste i pylaste	0 do 3	1:1,25	1:1,25	10 do 20	19	25	10
	3 do 6	1:1,25	1:1,6				
	6 do 9	1:1,4	1:1,8				
	9 do 12	1:1,6	1:1,9				
	12 do 15	1:1,7	1:2				
Gliny piaszczyste i pylaste zwięzłe	0 do 3	1:1,25	1:1,25	20 do 30	20	17,5	20
	3 do 6	1:1,25	1:1,7				
	6 do 9	1:1,25	1:2,1				
	9 do 12	1:1,7	1:2,4				
	12 do 15	1:1,2	1:2,5				
Iły	0 do 3	1:1,25	1:1,25	30	20	10	35
	3 do 6	1:1,25	1:1,4				
	6 do 9	1:1,25	1:2,6				
	9 do 12	1:1,5	1:3,2				
	12 do 15	1:1,2	1:3,5				

\* wartości spójności z gwiazdką stosuje się do obliczeń stateczności

## 6.2 Algorytmy obliczeniowe

Klasyczną metodą analizy osuwisk jest korzystanie z warunków statycznej równowagi. Istnieje kilkadziesiąt różnych metod analizy stateczności zboczy. W większości z nich analizuje się równowagę sił.

Wskaźnik stanu równowagi  $SF$  jest stosunkiem uogólnionej sumy sił utrzymujących, wywołanych tarcieniem i spójnością materiału Estb;d do sumy uogólnionych sił obciążenia  $E_{dst;d}$ , które wywołane są siłami grawitacyjnymi i siłami filtracji – patrz (4).

Dobór metody obliczeniowej pozwalającej na ocenę stateczności skarpy lub zbocza (a także budowli zlokalizowanej w sąsiedztwie skarpy) zależy od możliwej przewidywanej postaci deformacji zbocza czy skarpy (najczęściej sprowadza się to do ustalenia rzeczywistej lub prawdopodobnej powierzchni poślizgu).

Przy określaniu modelu zbocza zbudowanego ze skał lub gruntów, należy wziąć pod uwagę możliwe rodzaje osuwisk (patrz klasyfikacja rys. 5). Podczas wybierania metody obliczeniowej zaleca się uwzględnianie:

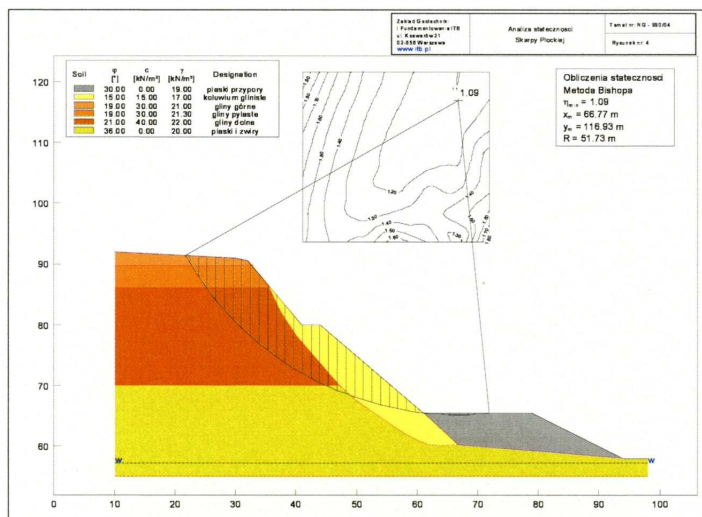
- warstwowania gruntu,
- występowania i nachylenia nieciągłości,
- filtracji i rozkładu ciśnień wody w zboczu,
- stateczności krótko- i długotrwałej,
- odkształceń zbocza od pełzania.

Zwykle przyjmuje się, że masa gruntu lub skały, biorąca udział w procesie osuwiskowym, jest ciałem sztywnym lub kilkoma ciałami sztywnymi (paski) poruszającymi się

równocześnie. Powierzchnie poślizgu lub powierzchnie kontaktu pomiędzy sztywnymi blokami mogą mieć różne kształty (m.in. płaski, cylindryczny) lub być bardziej skomplikowane.

Stosowane są też metody kinematyczne [19], probalistyczne [20][21], zbiorów rozmytych [22], sztucznych sieci neuronowych, algorytmów genetycznych. Metody te nie znajdują dotychczas szerszego zastosowania. Liczne dostępne programy komputerowe do obliczeń metodami klasycznymi Bishopa, Janbu, Felleniusa (i inne podobne algorytmy) pozwalają na szybkie, praktycznie dowolne modelowanie skarp. Wykonuje się to przez zmianę założeń (parametrów wytrzymałościowych, poziomów wód w zboczu) i analizę skutków dla stateczności tych zmian. Wykonanie kilkunastu schematów obliczeń przy różnych założeniach pozwala na ocenę możliwości zmian wartości współczynnika stanu równowagi, pozwala też określać na jaki czynnik wartość  $SF$  jest najbardziej wrażliwa.

Na rysunku 10 podane są przykładowo wyniki obliczeń wartości współczynnika stanu równowagi dla skarpy. Zwrócić należy uwagę na pole minimalnych wartości współczynnika stateczności. Pole to w podanym przykładzie, bliskie wartościom minimalnym, jest dość obszerne, co pozwala wnioskować o szerokim zakresie możliwych powierzchni poślizgu.



Rys. 10. Analiza stateczności Skarpy Płockiej (metoda Bishopa) programem [23]  $SF = 1,09$

W ostatnich 20. latach w związku z rozwojem możliwości obliczeniowych coraz szersze zastosowanie ma wykorzystanie metod MES w obliczeniach stateczności. Modelowanie programami do analizy stateczności MES (jest ich kilka), najszerszej w Polsce i Europie stosowany jest Plaxis [24] i Z-Soil [25].

Poniżej podajemy przykład obliczeń przy użyciu metody elementów skończonych (MES). Istnieje ona od 1968 r. i jest obecnie główną metodą obliczeń w geotechnice. Dotychczas dominowały zadania płaskie 2D, obecnie coraz częściej realizowane są modele przestrzenne 3D. W metodzie tej zakłada się warunki brzegowe podparcia modelu i dyskretyzuje się warstwy siatką. Obliczenia wykonuje się zwykle w oparciu o konstytutywny model gruntu Coulomba-Mohra, wykorzystując metodę proporcjonalnej redukcji parametrów wytrzymałościowych.

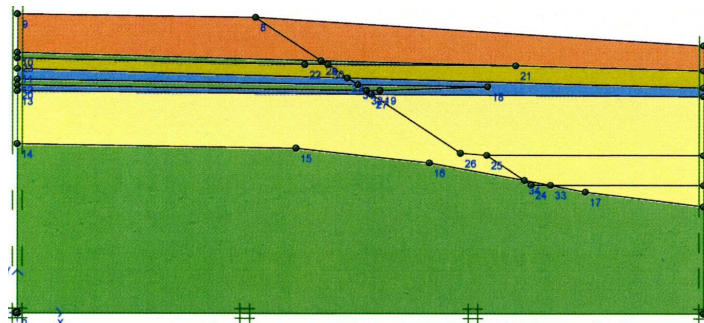
$$SF = \frac{c - \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi}{c_r - \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_r} \quad (6)$$

gdzie:

$SF$  – współczynnik bezpieczeństwa,

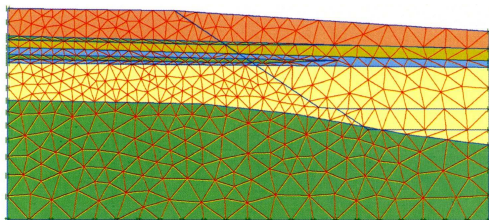
$c, \varphi$  – zmienne wartości spójności i kąta tarcia (zredukowane).

Obliczenia przeprowadza się metodą iteracyjną aż do ustabilizowania wyników. Przykład skarpy obliczonej programem Plaxis podano poniżej (rys. 11).

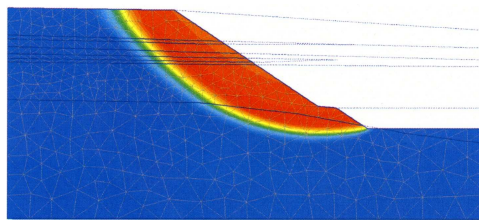


Rys. 11. Model geometrii skarpy przyjęty w obliczeniach

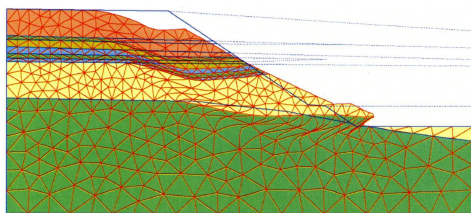
Rysunki 12, 13 i 14 przedstawiają kolejne fazy obliczeń i możliwości wizualizacji wyników, natomiast rys. 15 pokazuje wynik obliczeń stateczności wykonanych przy użyciu programu Plaxis.



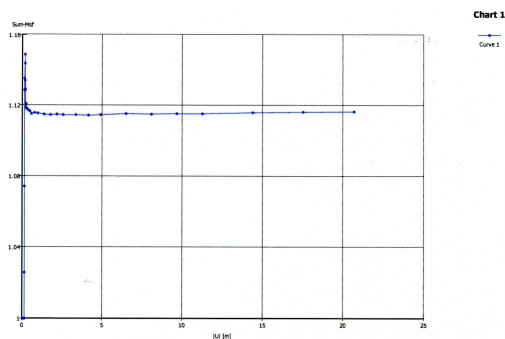
Rys. 12. Siatka elementów skończonych



Rys. 13. Zakres przemieszczeń punktów w skarpie

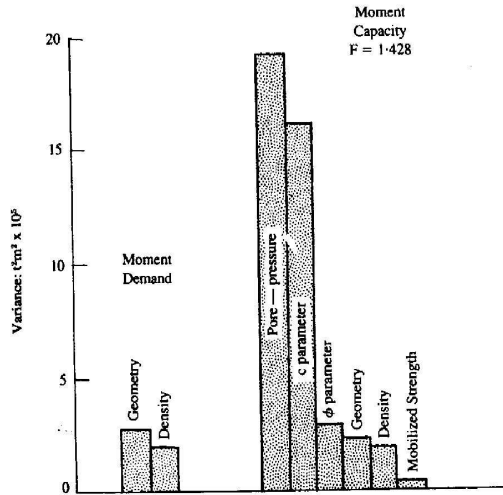


Rys. 14. Zdeformowana siatka elementów (skala przesadzona)



Rys. 15. Wynik obliczeń współczynnika bezpieczeństwa  $SF = 1,12$

Modelując wpływ zmian poziomów wody (ciśnienie porowe) oraz parametrów wytrzymałościowych ( $\varphi, c$ ) widzimy, że największy zwykle udział w zmianach wartości  $SF$  mają wahania wody w osuwisku i wartość spójności ( $c$ ) (patrz rys. 16).



Rys. 16. Udział różnych czynników w przedziałach ich zmienności na wartość  $SF$  – współczynnika stanu równowagi [26]

## 7. Kryterium przemieszczeń

Obserwacje przemieszczeń punktów na powierzchni stoków z pomiarów geodezyjnych oraz pomiary wewnątrz masywu uzyskiwane przez inklinometry dostarczają danych o prędkości przemieszczeń punktów w masywie zbocza. Zazwyczaj pomiary te dotyczą osuwisk lub zabezpieczonych osuwisk, które sprawdzają skuteczność realizacji zabezpieczeń. Danych dotyczących wstępnej fazy powstawania osuwiska jest mało. Pomiary zaczyna się zwykle, gdy istnieje już powierzchnia ścięcia, przy dużych przemieszczeniach osuwiska. Inklinometry dziś dostępne, ze względu na konstrukcję, niszczą się szybko i trzeba je ponownie zakładać. Problemy teoretyczne związane z przemieszczeniami są słabo poznane. Mamy tu do czynienia ze skomplikowanymi procesami reologicznymi.

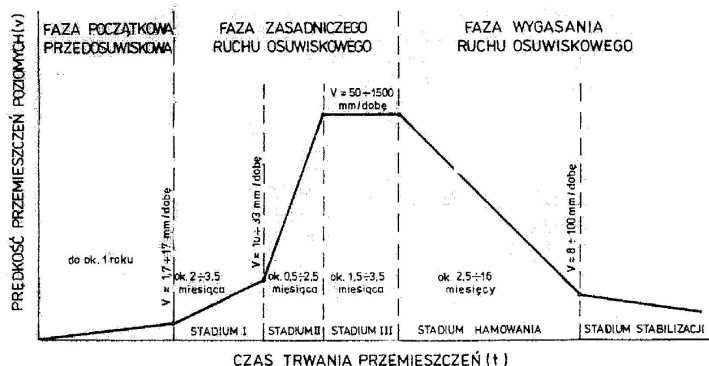
W roku 1975 L. Wysokiński [27] sformułował kryterium ocen dynamiki zboczy. Podaje ono dopuszczalne wartości przemieszczeń poziomych, których wystąpienie nie powoduje jeszcze wystąpienia osuwiska. Wartości te wynikają z obserwacji i doświadczenia.

Rozwiązanie zadania, z uwzględnieniem cech reologicznych materiałów tworzących zbocze, umożliwi w przyszłości poprzez analizę prędkości przemieszczeń ustalenie przypuszczalnych powierzchni poślizgu. Obecnie na podstawie istniejących teorii nie ma jeszcze możliwości zbudowania rozwiązania, na podstawie którego można by analizować łącznie proces odkształcenia i moment zniszczenia zbocza w chwili powstania osuwiska, niezależnie analizujemy proces odkształcenia i proces zniszczenia.

Metoda analizy pola przemieszczeń w masywie zbocza wymaga ustalenia kryterium przyjęcia rozwiązania. Kryterium to w zależności od celu badań i klasy obiektu jest różne. Przykładowo można stwierdzić, że dla obiektów budownictwa powszechnego wartość niebezpiecznej różnicy przemieszczeń poziomych na długości obiektu (średnio ok. 30 m) wynosi od 1÷3 cm, gdy dla skarpi w kopalni odkrywkowej wartością dopuszczalną może być nawet metr.

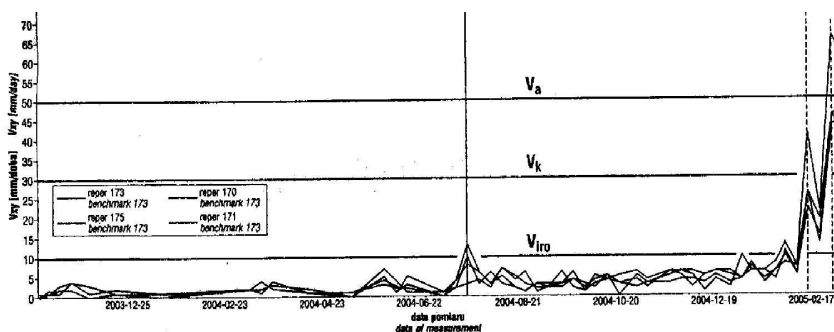
Duże doświadczenie w analizie przemieszczeń uzyskano w kopalni Bełchatów. Poniżej podajemy wyniki obserwacji osuwisk dokonywane przez zespół geologiczno-geotechniczny tej kopalni. Rysunek 17 podaje uogólnienie obserwacji z licznych osuwisk dotyczące prędkości przemieszczeń poziomych ( $V$ ).





Rys. 17. Prędkość przemieszczeń poziomych – wyniki obserwacji z osuwisk [28]

Zależności te można ustalić dla każdego analizowanego osuwiska (ma tu wpływ jego wielkość, materiał, kąt nachylenia stoku i inne). Analiza inklinometrów lub reperów założonych na powierzchni osuwiska pozwala kontrolować proces.



Rys. 18 Deformacje poziome w rozwoju osuwiska [28]

$V_a$  – prędkość alarmowa;  $V_k$  – prędkość krytyczna;  $V_{ito}$  – prędkość inicjująca ruch osuwiskowy

## 8. Zasady wyboru zabezpieczeń

W praktyce mamy dwa przypadki:

- zabezpieczamy (likwidujemy) osuwisko,
- projektujemy bezpieczne skarpy wykopu lub nasypu.

Zbocza wchodzi na ogół w zakres naszych zainteresowań dopiero wtedy, gdy na ich powierzchni lub w sąsiedztwie projektuje się jakąś inwestycję. Obecnie najczęściej jest to droga, lecz może być budynek, czy inny obiekt budowlany. Zdarza się, że obiekt już istnieje, a osuwisko powstaje w czasie budowy lub po jego wybudowaniu i zagraża bezpieczeństwu ludzi. Najczęściej występuje przypadek, że osuwisko pojawia się w czasie robót budowlanych i wymaga pilnego zabezpieczenia i likwidacji, by można było kontynuować budowę.

Z kolei projektowanie bezpiecznych skarpy wykopów przy założonych warunkach stateczności (wartości zapasu bezpieczeństwa  $SF > 1,3$  czy  $SF > 1,5$ ) wymaga ustalenia stanu początkowego stateczności, a po dobraniu konstrukcji wzmacniających wykazania na drodze obliczeń, że przyjęta metoda zabezpieczenia jest wystarczająca.

Projektując skarpy należy przy ustalaniu warunków projektowania i doborze oddziaływań brać pod uwagę możliwość wystąpienia ekstremalnych czynników meteorologicznych:

deszczy nawałnych, maksymalnych poziomów wód gruntowych i powierzchniowych, różnic temperatur, zjawisk sztormowych itp.

Eurokod 7 (PN-EN 1997.1) [16] podaje następujące oddziaływania, które należy uwzględnić w obliczeniach stateczności skarp: ciężar gruntu, skały, wody; ciśnienie wody gruntuwej; ciśnienie spływowe; obciążanie naziomu; usunięcie obciążenia (odciążenie) np. wykonanie wykopu; obciążenie pojazdami; przemieszczenia związane z peźaniem lub osiadaniem mas gruntowych; pęcznienie i skurcz spowodowane przez wpływy klimatyczne; zmiany wilgotności; rośliny; przyspieszenie od trzęsienia ziemi; wybuchów lub obciążeń dynamicznych; działanie zamarzania; siły od napinania. kotew, rozpór innych konstrukcji, które oddziałują na masy gruntu.

Rodzaj zabezpieczeń					
N	Naturalne	K	Konstrukcyjne	G	Geosyntetyczne
N1	rowy odprowadzające wodę. Niedopuszczenie do erozji i zawilgocenia	K1	konstrukcje oporowe masywne, mury kamienne	G1	ochrona przed erozją
N2	przypery z grubego kruszywa lub faszyny	K2	konstrukcje oporowe ażurowe, kaszyce, palościanki	G2	ochrona przed deformacjami powierzchniowymi
N3	zmiana kształtu zbocza na bardziej stateczne. Tarasowanie, podsypywanie w dolnej części	K3	kotwy, gwoździe	G3	drenaże i odwodnienia
N4	wymiana gruntów osuniętych na piaski, żwiry, kliniec	K4	gabiony	G4	siatki i ruszty jako zbrojenie
N5	zbrojenie wymiany gruntów naturalnych np. faszyna, kółki, bambus	K5	ruszty, siatki, przypery na powierzchni zbocza	G5	bariery i izolacje
N6	zabudowa biologiczna, obsiew, hydroobsiew	K6	drenaże poziome wiercone, wgłębne galerie odwodnieniowe i drenażowe		
N7	zabudowa biologiczna, darniowanie, darniowanie w kratę				
N8	zabudowa biologiczna, tarasowanie, nasadzenia gniazdowe				
N9	maty biologiczne, bawełniane, słomiane, kokosowe itp. z nasionami				

Rys. 19. Metody stabilizacji i zabezpieczeń stoków [14]

Prawidłowa interwencja w przypadku naruszenia stateczności zbocza powinna eliminować przyczyny, które wywołują zagrożenie. Podobnie w sytuacji projektowania należy rozpatrzyć wszystkie sytuacje i oddziaływania ekstremalne oraz ich koniunkcje, które mogą zaistnieć w czasie eksploatacji obiektu oraz fakt, czy projekt dotyczy wykonywania wykopów czy nasypów.

Pierwszą zasadą w działaniu dla poprawienia stateczności osuwiska jest uporządkowanie stosunków wodnych i eliminacja możliwości zawodnienia skarpy.

Wyboru zabezpieczenia należy dokonać uwzględniając warunki geologiczne, warunki wodne, wstrząsy, a także wysokość zbocza, możliwość dopływu wód z otoczenia (powierzchnia zlewni).

Zestawienie (rys. 19) pokazuje dostępne metody do stabilizacji i zabezpieczania stoków. Podzielono je na naturalne – wykorzystujące proste roboty ziemne i naturalne materiały;

konstrukcyjne – z wykorzystaniem żelbetonu, stali w budowie, oraz obecnie szeroko wykorzystywane – geosyntetyczne.

### 8.1 Metody naturalne

**N1** Najprostszym przykładem skutecznej ochrony stoków jest konstrukcja tarasów. Konstrukcje takie znane są od wieków na całym świecie. W zależności od klimatu tarasy mogą mieć różne kształty i wymiary. Tarasowanie stoku jest skuteczne przeciwko erozji, lawinom błotnym i śnieżnym.

W Polsce, mimo małej sumy opadów rocznych (500 – 1000 mm), przy występowaniu na powierzchni gruntów łatwo ulegających erozji (pyły, gliny), erozja nieosłoniętych gruntów jest bardzo szybka. Nawet niewielki jednorazowy opad 10 – 20 mm, przy zlewni kilkuset m<sup>2</sup> może spowodować rynny erozyjne o głębokości kilkunastu, kilkudziesięciu centymetrów.



Rys. 20. Przykład zabezpieczenia przed erozją skarpy, faszyna iglasta (nieporastająca) „martwa”

**N2** Pionowe rynny erozyjne z reguły zabezpiecza się wypełnieniem z grubego materiału kamiennego (klińca skał twardych). Rysunek 21 pokazuje system przypór drenażowych na skarpie zniszczonej uprzednio przez erozję i odbudowanej. Konstrukcje te w Polsce stosowane są od dawna i wykazują dużą skuteczność. Rozstaw przypór co 6 – 8 m. Często wykonuje się elementy łączące przypory w formie łuków lub odcinków prostych „sierżanty”.



Rys. 21. Przypory drenażowo-przeciwoerozyjne na skarpach wykopów głębokiego przekopu drogowego

**N3** Istotne dla stateczności zbocza, jeśli to możliwe, jest takie przebudowanie kształtu, by nowy profil był bardziej stateczny. Zwykle podsypanie zbocza w dolnej „podtrzymującej” części jest najprostszym działaniem zwiększającym stateczność. Podobny skutek może mieć usunięcie części mas gruntu z górnej części zbocza. Nie zawsze takie profilowanie jest możliwe ze względów funkcjonalnych, ale tam, gdzie to jest możliwe, jest zazwyczaj bardzo skuteczne. Przykładem poprawienia stateczności tą metodą jest skarpa Płocka (rys. 22). Wzdłuż ok. 2,5 km odcinka usypano przyporę ziemną, która poprawiła wartość współczynnika stanu równowagi o 2025%.



Rys. 22. Przypora z piasku u podnóża skarpy nadbudowywana zabezpieczeniem z udziałem geosyntetyków. Płock - realizacja 1988

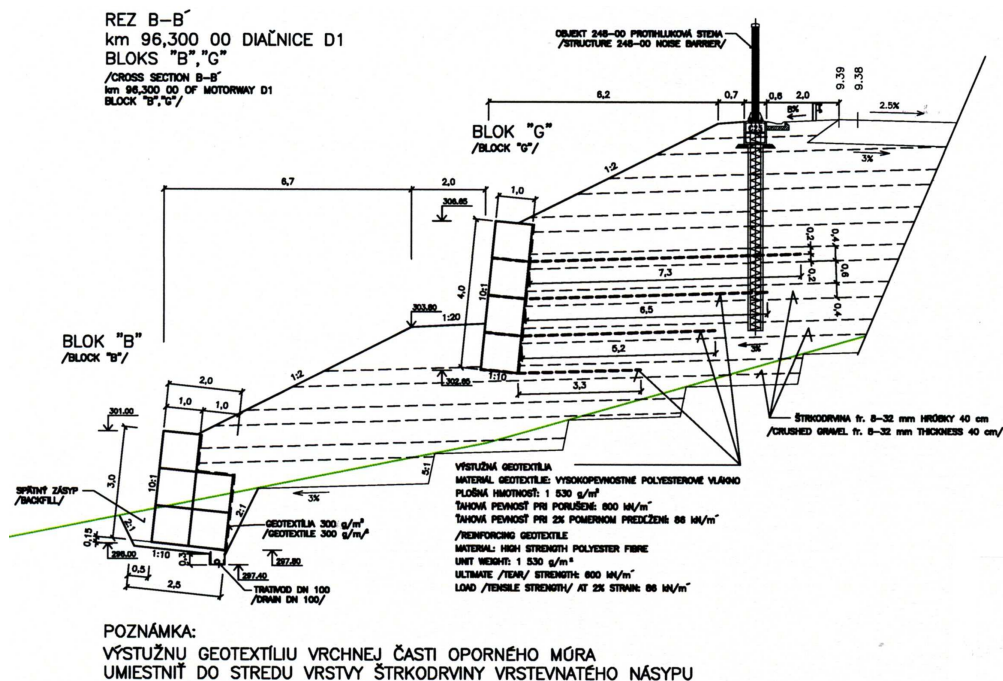
**N4** Wymiany gruntów dokonuje się na powierzchni skarp, które uległy zniszczeniu. Często grunt naturalny (przeważnie pylasty lub gliniasty) na powierzchni skarpy łatwo ulega destrukcji wskutek przemarzania, nasycania wodą, wysychania, zanim rozwinie się na nim szata roślinna. W takich przypadkach należy dokonać wymiany osuniętych gruntów na materiał o lepszych cechach mechanicznych.

Ze względu na gruby materiał, z którego wykonana jest plomba, zabezpieczenie to pełni również funkcje drenażowe. Rys. 23 pokazuje konstrukcję i wykonanie tego typu zabezpieczeń. Zabezpieczenie jest skuteczne np. na skarpach drogowych.



Rys. 23. Zbocze wykopu zniszczonego głęboką erozją zabezpieczone narzutem kamiennym

**N5** W sytuacji likwidacji osuwiska metodą wymiany gruntu, dla poprawienia wytrzymałości gruntu stosuje się wkładki „zbrojeniowe”. Materiałem naturalnym wkładek może być bambus, trzcina, kołki sosnowe, faszyna – jeśli mają to być materiały naturalne. Obecnie znacznie częściej, jeśli nie wyłącznie, stosuje się do zbrojenia gruntu materiały syntetyczne patrz **G4**.



Rys. 24. Przykład wymiany gruntów w osuwisku z zastosowaniem zbrojenia geosyntetycznego i gabionów

**N6** Zabudowa biologiczna zbocza, obsiew trawą, hydrosiew. Skuteczne zazielenienie skarp wymaga:

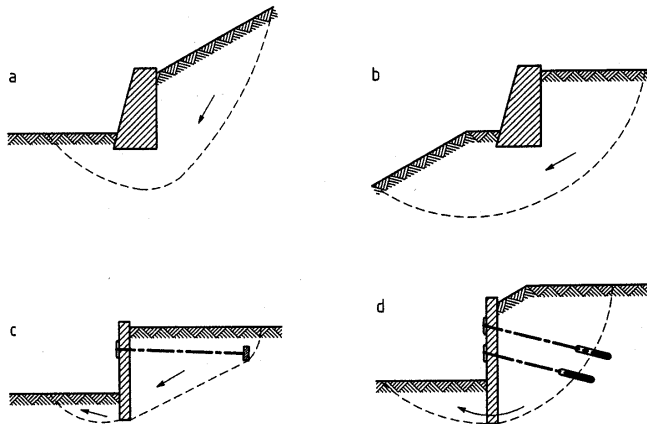
- dobrego przygotowania podłoża
- właściwego doboru roślin
- dobrania okresu wysiewu i wzrostu
- pielęgnacji roślin, zwłaszcza w pierwszym okresie.

**N7** Często, przy bardzo podatnym na erozję gruncie, zbocze chronić trzeba natychmiast po jego ukształtowaniu. W tym celu z materiałów naturalnych używa się gotowej darni zrolowanej i układanej na przygotowanym podglebiu. Darniowanie wykonuje się na całej powierzchni lub części, darniuje się w kratę.

**N8** Ważną czynnością przy zabudowie biologicznej, zwłaszcza przy nasadzeniach krzewów, jest stabilizowanie roślin na zboczu. Wykonuje się to przy kółkach lub płótkach faszynowych. Płotki te zapewniają stabilizację roślin i pozwalają im na ukorzenie się i wzrost. Gdy nie ma możliwości przygotowania całej powierzchni zbocza do zazielenienia – nie ma np. możliwości utrzymania gleby czy humusu na zboczu – wykonuje się nasadzenia gniazdowe.

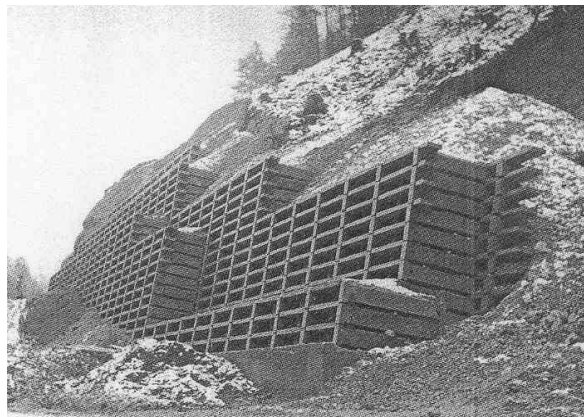
## 8.2 Zabezpieczenia konstrukcyjne

**K1** Konstrukcje tzn. ustroje nośne wykonane z trwałych materiałów, żelbetonu, betonu, stali można stosować jako zabezpieczenie stoków [16]. Rysunek 25 pokazuje przykłady możliwości przejścia powierzchni poślizgu pod konstrukcją oporową. Można wskazać wiele awarii, gdy projektant nie uwzględnił możliwości wystąpienia powierzchni poślizgu pod konstrukcją oporową. Najstarszymi konstrukcjami tego typu są mury kamienne, których niektóre przykłady sprzed kilku tysięcy lat dochowały się do dzisiaj. Wykonuje się je z trwałych materiałów – kamienia, betonu, żelbetonu, cegły, obecnie także z gabionów. Projektując te konstrukcje trzeba zapewnić, by powierzchnia poślizgu nie przechodziła poniżej ich podstawy i by pełniły istotną pozytywną funkcję statyczną w przyjmowaniu obciążeń ze zbocza i jego drenażu.



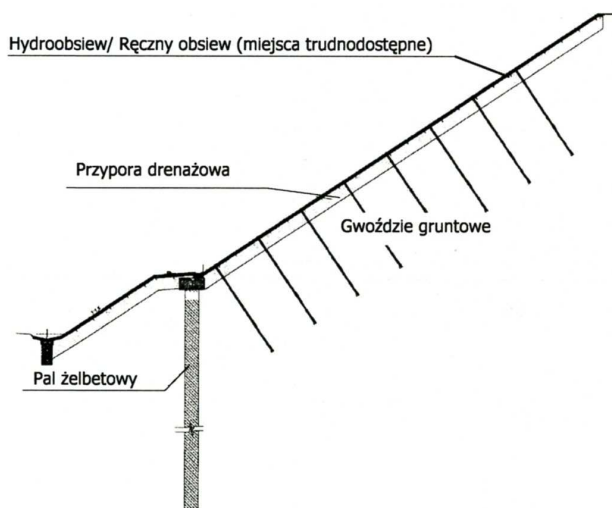
Rys. 25. Przykłady warunków granicznych utraty ogólnej stateczności konstrukcji oporowych [16]

**K2** Mury oporowe z prefabrykowanych elementów – drewnianych (stare konstrukcje), żelbetowych (obecnie) – wykonuje się jako konstrukcje ażurowe – kaszyce. Zaletą ich jest łatwość kształtowania, wykorzystanie oprócz elementów konstrukcyjnych miejscowego materiału (nasypu), którym zasypuje i wypełnia się przestrzenie między elementami nośnymi (rys. 26).



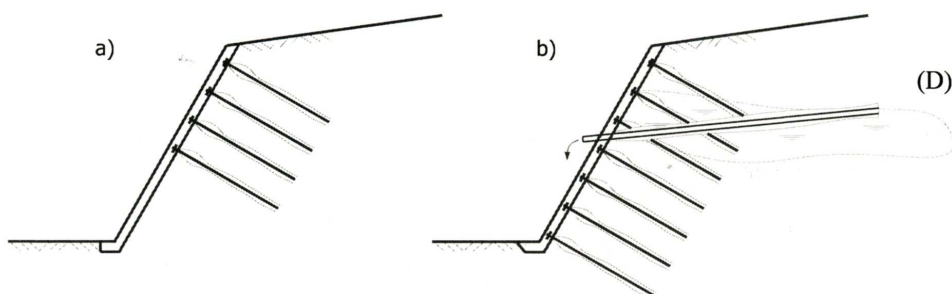
Rys. 26. Żelbetowa ściana oporowa z kaszyc

Innym typem konstrukcji ażurowych są palościanki (rys. 27). O ile kaszyce utrzymują odcinek nadziemny, to palościanki służą do wzmocnienia podziemnej części osuwiska i wzmocnienia powierzchni poślizgu. Ścinaną powierzchnię pali, która znajduje się w płaszczyźnie powierzchni poślizgu uwzględnia się w obliczeniach stateczności (opór złamania czy ścięcia pala). Stosuje się pale różnych typów, głównie wiercone. Wstrząsy wywołane wbijaniem pali mogą uruchomić osuwanie mas ziemnych, zatem należy ich unikać.



Rys. 27. Fragment zabezpieczenia głębokiego wykopu drogowego z palościanką. Pale  $\phi$  60 cm w odległościach co 1,80 m. Długość konstrukcji ok. 60 m, gwoździe gruntowe dł. 6 m

**K3** Kotwy i gwoździe są od niedawna stosowanymi typami wzmocnień, których wykonywanie umożliwił rozwój technologii w XX w. Są to elementy stalowe, trwałe, nierdzewne, wiotkie wprowadzone w grunt dla przyjmowania sił rozciągających. Kotwy pracują, gdy ich część nośna – buława zlokalizowana jest poza powierzchnią poślizgu tak, że może przenosić siły wrywające. Gwoździe pracują na wrywanie na całej długości, jednocześnie monolityzują bryłę gruntu.



Rys. 28. Konstrukcja zabezpieczenia skarpy gwoździami a) skarpy z osłoną betonową; b) skarpy z odwodnieniem głębokim drenem skarpowym (D)

Wielką zaletą technologii gwoździowania jest wykonywanie rzędów gwoździ w miarę pogłębiania wykopu. Daje to od razu efekt zabezpieczenia skarpy.

**K4** Gabiony są konstrukcją geotechniczną składającą się z powłoki wykonanej z kosza względnie materaca, wykonanego z trwałej siatki przeważnie stalowej ocynkowanej lub plastykowanej i wypełnienia kamiennego (Rys. 24).

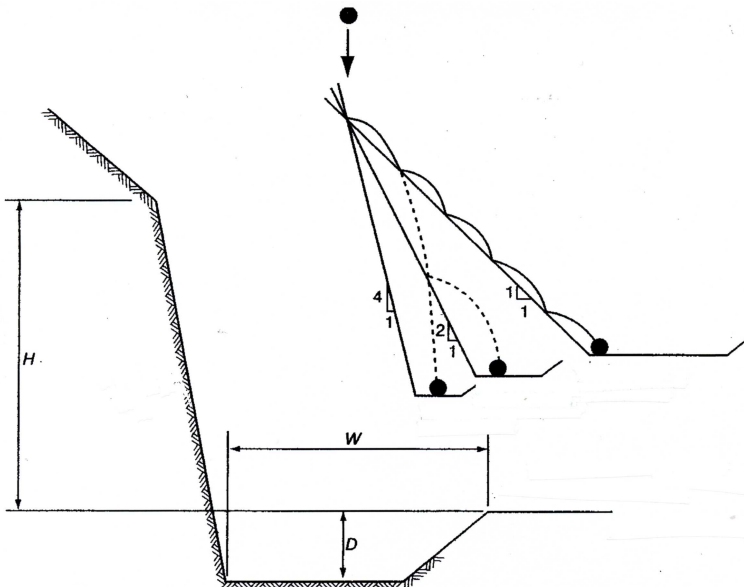
Typowe konstrukcje gabionowe spełniają te same funkcje co mury masywne, z tym, że mają dodatkowe zalety:

- podatność na odkształcenia – bez widocznych oznak przenoszą nawet kilkunantymetrowe nierówno mierne osiadania;
- wodoprzepuszczalność – ze względu na wykonanie z grubego kamienia konstrukcje gabionowe wyśmienicie oddają i przewodzą wodę. Nadają się do ochrony brzegów rzecznych i morskich;
- trwałość – druty gabionów sprawdzane są czy mają zadowalającą odporność na korozję, kamień jest sprawdzany na mrozoodporność i nasiąkliwość;
- łatwość montażu – gabiony wykonuje się bardzo prosto nawet przez przyuczonych pracowników.

Gabiony są przyjazne dla środowiska, nie wykazują negatywnego oddziaływania w trakcie budowy i użytkowania. Gabiony umożliwiają praktycznie dowolne kształtowanie zabezpieczeń.

Materace gabionowe o grubości ok. 30 cm są wykorzystywane do zabezpieczeń przeciwerozyjnych.

**K5** Stalowe siatki i kotwy, żelbetowe ruszty, przypory wykonane na powierzchni zbocza. Główną funkcją zabezpieczenia, tak jak w **N2** jest przeciwdziałanie zsuwaniu materiału z powierzchni. Stosuje się je na silnie nachylonych powierzchniach, na których trudno jest utrzymywać glebę. Przy zabezpieczaniu wykopów w zboczach skalnych obecnie stosuje się bardzo wytrzymałe siatki stalowe kotwione do zbocza gwoździami.

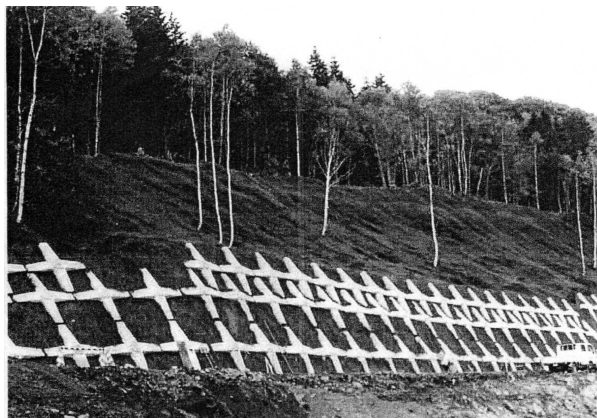


Rys. 29. Spadający głąz – schemat statyczny do analizy zabezpieczeń

Konstrukcje rusztów projektowane są o różnych rozpiętościach i wymiarach belki nawet o wysokości do 0,8 – 1,0 m przy szerokości 20 – 30 cm. Między elementami nośnymi



wykonanymi zgodnie ze spadkiem zbocza wykonuje się elementy (rygle) do utrzymywania mas ziemnych. Konstrukcje te stosowane są zwykle przy nachyleniach większych od 1:1. Niekiedy konstrukcje utrzymujące wykonane są jak na rys. 30, gdzie zakotwione w zboczu pale sprężone (kotwy) dociskają koźłowe ruszty żelbetowe.



Rys. 30. Zdjęcie ruszty żelbetowego łączącego głowice sprężonych pali żelbetowych

**K6** Galerie drenażowe, drenaże poziome. W przypadku, gdy zachodzi konieczność ciągłego obniżania poziomu wody gruntowej w skarpie przy jej dużym dopływie trzeba budować systemy drenażowe. W skrajnym przypadku są to galerie drenażowe budowane metodami odcinkowymi, tunelowymi, przeciskami. Systemy te lokalizować należy poza możliwą powierzchnię poślizgu na dopływie wód, by odciąć ich napływ do osuwiska.

### 8.3 Zabezpieczenia z wykorzystaniem geosyntetyków

W drugiej połowie XX wieku w wyniku rozwoju syntez chemicznych powstała nowa gałąź włókiennictwa produkująca tekstylia techniczne. Tekstylia te i inne produkty wykonane z tworzyw sztucznych – polimerów – znalazły bardzo szerokie zastosowanie w geotechnice. Powstała nazwa opisująca te produkty jako geosyntetyki. Materiały te obecnie stosuje się do poprawy parametrów fizykochemicznych gruntów, wzmocnień konstrukcyjnych skarp i zmiany wartości współczynnika filtracji wody, także wytwarzania barier wodoszczelnych, jako materiały izolacyjne i materiały rozdzielające warstwy gruntu.

Geosyntetykami są także wyroby będące kompozytami złożonymi z tworzyw sztucznych i innych materiałów np. piasku, betonu, bentonitu (maty). Produkty geosyntetyczne mogą być fabrycznie przygotowane, w większych lub mniejszych seriach, w zaprojektowany sposób do określonego wykorzystania. Pozwala to na dowolne kształtowanie materiałów i elementów budowlanych do projektu.

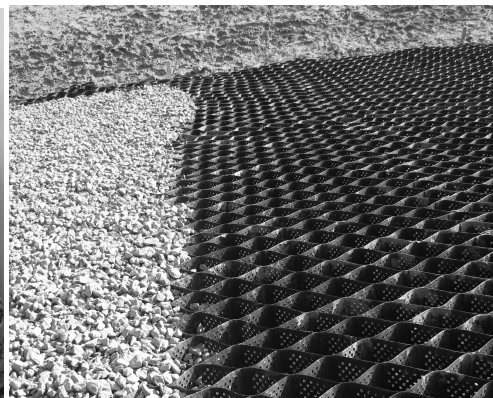
**G1** Ochrona przed erozją. W celu ochrony przed erozją powierzchni stoków zaprojektowane zostały specjalne materiały typu „runa” (rys. 31), które jako maty rozkłada się na zboczu.

**G2** Ochrona przed erozją i deformacjami powierzchniowymi – geokraty. Dla ochrony przed erozją, ale z funkcją zabezpieczenia powierzchni skarpy przed deformacjami stosuje się geokraty (rys. 32).

**G3** Bardzo istotną rolę w budownictwie ziemnym (nasypy, wykopy) spełniają najprostsze wyroby geosyntetyczne – jak włókniny, tkaniny, siatki. Powszechnie znajdują zastosowanie przy rozdzielaniu warstw gruntów o różnej granulacji oraz jako materiały filtracyjne i drenażowe. Z ich pomocą łatwo obecnie się wykonuje np. rowy odwadniające, drenaże itp.

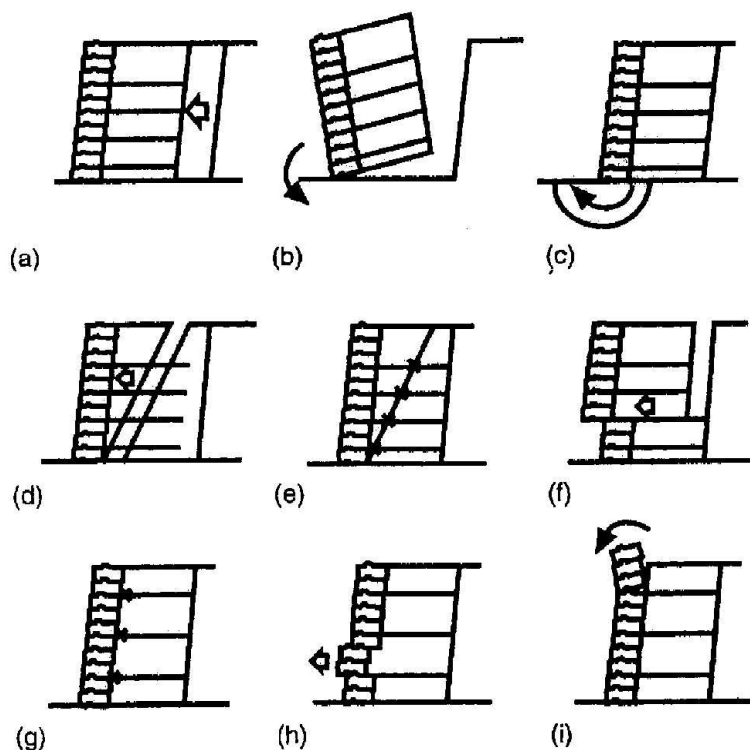


Rys. 31. Mata przeciwoerozyjna. Struktura materiału do ochrony przed erozją



Rys. 32. Geokrata wypełniana kruszywem

**G4** Zbrojenie gruntów. Zasadniczą funkcją geosyntetyków w zabezpieczaniu zboczy jest zbrojenie. Różne stany graniczne, które mogą wystąpić w konstrukcji zbrojonej pokazuje rys. 33.



Rys. 33. Stany graniczne konstrukcji z gruntu zbrojonego [18]

Liczne programy do obliczeń stateczności, które dostarczają dostawcy materiałów, pozwalają obliczyć liczbę, rozstaw wkładek oraz zalecany przez producentów typ materiału.

#### 8.4 Dobór metody zabezpieczenia do typu stoku, warunków geologicznych i nawodnienia

Pokazane zestawienie metod zabezpieczeń można uznać za niekompletne, bo są jeszcze inne metody wzmocnienia chemicznego, np. zabezpieczenie kościoła św. Anny w Warszawie w roku 47. dwudziestego wieku przy użyciu tzw. cebritacji.

To co odróżnia zabezpieczanie osuwisk od innych działań technicznych czy budowlanych to niepowtarzalność sytuacji i konieczność indywidualnego postępowania w każdym przypadku. Mimo tego można próbować pogrupować metody i warunki, by wskazywać możliwe rozwiązania.

Z całą pewnością można stwierdzić, że możliwości rozwiązań każdego przypadku jest kilka. Zwykle decyduje koszt. Można także stwierdzić, że liczne przypadki są rozwiązywane nieprawidłowo bo zabezpieczenie osuwisk jest nadzwyczaj trudne i walka z nimi trwa całe lata, a niekiedy nawet wieki.

Upraszczając sytuację można podać następujący schemat możliwych warunków (tabl. 3).

Tablica 3. Upraszczony schemat zboczy (patrz klasyfikacja Rys. 5) do wyboru typu zabezpieczeń

Lp.	Budowa geologiczna	Warunki wodne zbocza	
1.	Zbocza skalne	a	suche
		b	zawodnione
2.	Zbocza zwietrzelinowe	a	suche
		b	zawodnione
3.	Zbocza z gruntów spoistych	a	suche
		b	zawodnione
4.	Zbocza z gruntów piaszczystych	a	suche
		b	zawodnione

Dla bezpiecznego prowadzenia prac w chwili rozpoczynania inwestycji, gdy teren ma duże spadki i różnice wysokości, miejsce przyszłej budowy należy zaliczyć do jednej z poniższych grup aktywności:

- A – zbocze stateczne, bez śladów osuwisk i pełzania; wyklucza się osuwiska i powolne deformacje powierzchni terenu (pełzanie);
- B – zbocze stateczne, mogą wystąpić powolne deformacje powierzchni terenu – konieczne jest przygotowanie konstrukcji obiektu do ich przeniesienia;
- C – zbocze o potencjalnych możliwościach powstania osuwiska; zabudowa w strefie zagrożenia osuwiskowego wykluczona bez uprzedniego zabezpieczenia i stabilizacji zbocza;
- D – zbocze osuwiskowe, należy równoległe z zabudową dokonać pełnego zabezpieczenia i ustabilizowania zbocza.

Zagrożenie wzrasta z wysokością skarp.

Przy zabezpieczeniu skarp wykopów, np. drogowych, doboru metody dokonuje się uwzględniając poziomy występowania wód gruntowych, kąt nachylenia, wysokość gruntu, wartość współczynnika stanu równowagi po wykopaniu, bez zabezpieczeń. Zakładana wartość współczynnika  $SF$  po zabezpieczeniu powinna być wg obecnych przepisów  $SF > 1,5$ .

Większość osuwisk na drogach powstaje na skutek podcięcia zbocza, np. na drogach województwa rzeszowskiego na 100 osuwisk stwierdzono, że aż 98 z nich było „zaprojektowane” przez ludzi, z których tylko dwa odcinki dróg przecinały osuwiska czynne, których projektanci „nie zauważyli” lub zlekceważyli pozostałe w większości podcinają zbocze, a materiał z wykopu wykorzystują jako podparcie zbocza. Ten nasypywany materiał zwykle po pewnym czasie wyraźnie osiada i powoduje osuwisko w drodze.

Grupa aktywności		Metody stabilizacji				Przeważające warunki wodne
<b>A</b>	Zbocze stające bez pełzania śladów	N1	N6 G1			1a 2a 4a 3a
	Zbocze wymaga głównie zabudowy biologicznej i ochrony przed erozją					
<b>B</b>	Zbocze stające możliwe powolne deformacje typu "pijany las" na terenie	N1	K5	G2	N6 N7	2a 3a
	Przemieszczenia dotyczą warstw powierzchniowych	N2				
<b>C</b>	Ślady dawnych osuwisk możliwość uruchomienia osuwiska	N1	K3	G3	N6 N7	2a i b 3a i b
		K6	K5			
	Wzmoczona ostrożność, środki zabezpieczające w czasie budowy, eliminacja możliwych zagrożeń - przyczyn, ewentualne wzmocnienie konstrukcyjne	K7	G3	G4	N8	
<b>D</b>	Zbocze osuwiskowe	N1	K1	G4	N4	2b 3b
		K6	K2	G3	N8	
		K7	K3	G2	N7	
		K5		N6		
	Zabezpieczenie, wymiana lub zatrzymanie mas ziemnych		K4			

Rys. 34. Schemat doboru metody zabezpieczeń zbocza (patrz tablica 3 np. 3b – zbocze z gruntów spoiстых zawodnione)

Do tej grupy wywołanych przez człowieka należą też osuwiska poeksploatacyjne na ścianach wyrobisk: glinianek, żwirowni czy też większych kopalni odkrywkowych. Osuwiska powstają również w wadliwie zaprojektowanych bądź niewłaściwie odwodnionych przekopach drogowych i kolejowych. Najczęstszym błędem jest zbyt strome wyprofilowanie ścian wykopu.

Duże zagrożenie na niektórych terenach wykazujących tendencję do ruchów zboczy, powoduje niekontrolowana chaotyczna eksploatacja materiałów budowlanych (glin, piasków i żwirów, wapieni itp.). Bardzo groźne w skutkach i rozległe osuwiska powstają w wyniku wadliwego zainstalowania, uszkodzenia bądź braku konserwacji sieci melioracyjnej. Należy jeszcze wspomnieć o zaostrzeniu tendencji osuwiskowej w niektórych rejonach na skutek zniszczenia szaty roślinnej (wycięcie lasów).

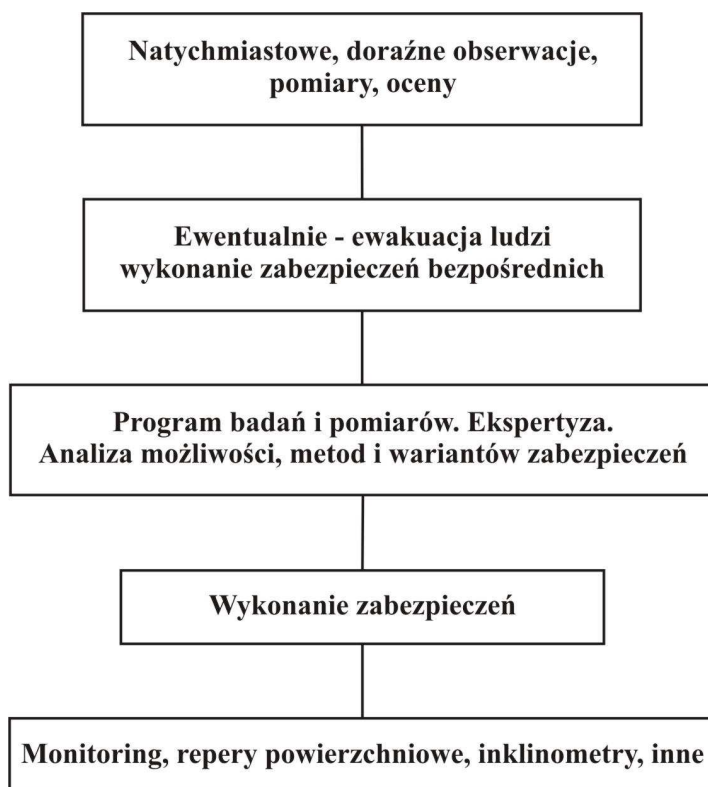
W zabezpieczeniach skarp należy zawsze stosować zabudowę biologiczną. Prawidłowo dobrana zieleń najlepiej chroni skarpe przed erozją, stabilizuje wilgotność, nie pozwala na przesuszenie, powstanie szczelin, wzmacnia powierzchnie przeciwdziałając małym lokalnym osuwiskom. Metody zabezpieczeń należy dobierać indywidualnie, dostosowując je do budowy geologicznej i stopnia wzmocnienia (przy zakładanej wartości koniecznej do spełnienia  $SF$ ).

### 8.5 Działanie w przypadku zagrożenia osuwiskowego

W przypadkach katastrof, awarii czy wyraźnych sygnałów zagrożenia osuwiskowego należy przestrzegać ostrożnych metod postępowania. Rozróżnić należy dwa typy postępowania w celu likwidacji zagrożenia:

- a. doraźne
- b. docelowe

W pierwszym etapie należy skoncentrować się na zabezpieczeniach natychmiastowych, których celem jest ograniczenie skutków zniszczeń i eliminację przyczyn (przeważnie ewakuacja, odcięcie dopływu wody). Dopiero po wykonaniu szczegółowego rozpoznania należy wskazywać metody pełnego zabezpieczenia.



Rys. 35. Schemat postępowania w przypadku zagrożenia osuwiskowego

Zagospodarowane tereny osuwiskowe należy monitorować prowadząc obserwację:

- poziomów wód gruntowych lub ciśnienia wody w porach gruntu, aby można było przeprowadzić analizę naprężeń efektywnych,
- pionowych i poziomych ruchów gruntu (reperów), żeby można było przewidzieć dalsze odkształcenia terenów,
- głębokości powierzchni poślizgu w powstałym osuwisku w celu wyprowadzenia parametrów wytrzymałościowych gruntu
- prędkości ruchów, aby ostrzec przed zbliżającym się niebezpieczeństwem. W takich przypadkach właściwy może być zdalny odczyt cyfrowy z inklinometrów lub reperów oraz zdalny system alarmowy.

## Literatura

1. Ustawa z dnia 18 kwietnia 2002 r. o stanie klęski żywiołowej (Dz. U. Nr 62, poz. 558).
2. Castleden R.: Największe katastrofy w dziejach świata, Bellona, Warszawa 2009.
3. internet (Landslides in China).
4. internet (Landslides in Brazil) Teresopolis.
5. Bazyński J., Frankowski Z.: Współczesne problemy kartografii geologiczno-inżynierskiej dla potrzeb zagospodarowania przestrzennego, Materiały II Sympozjum w Poznaniu, Wyd. WIND, Wrocław.
6. Ministerstwo Środowiska: Działania resortu środowiska w zakresie systemu osłony przeciwoświsiskowej w Polsce. Warszawa 8 września 2010.
7. Projekt SOPO: System Osłony Przeciwoświsiskowej. PIG 2009.
8. Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi. PIG, Warszawa 2008.
9. Bajger-Kowalska M.: Osuwiska w Małopolsce. Kraków, Konspekt 3/2005
10. World Conference on Disaster Reduction, Kobe, Japonia, 18-22 stycznia 2005 (źródło: <http://www.unisdr.org/wcdr/>).
11. Kleczkowski A.: Osuwiska i zjawiska pokrewne. Wyd. Geol., Warszawa 1955.
12. Varnes D.J.: Landslide Types and processes [in:] Turner A.K., Schuster R., (eds.) Landslides, Transportation Research Board, Special Report 247, 1996.
13. Varnes D.J.: Landslide Problems of Southwestern Colorado, U.S. Geolog. Survey Cir 31, 1949.
14. Wysokiński L.: Ocena stateczności skarp i zboczy. Wyd. ITB, Warszawa 2010.
15. Terzaghi K.: Mechanism of Landslides, Engineering Geology (Barkey) November 1950, przedruk z książki From Theory to practice in soil mechanics. N. York, J. Wiley 1960.
16. PN-EN 1997.1: Projektowanie geotechniczne. Część I: Zasady ogólne.
17. Młynarek Z.: Podłoże gruntowe a awaria budowlana. Materiały Konferencji XXIV Awarie Budowlane 2009.
18. Smolczyk U. (red.): Geotechnical Engineering Handbook, Ernst & Sohn, Berlin 2008.
19. Topolnicki M.: Zastosowanie metody kinematycznej do sprawdzania stateczności klifów morskich. Inżynieria Morska i Geotechnika 1994.
20. Knabe W., Przewłócki J.: Probalistyczna ocena stateczności zboczy. Archiwum Hydrotechniki Tom XXIX z. 3. Gdańsk 1982.
21. Przewłócki J.: Problemy stochastycznej mechaniki gruntów. Ocena niezawodności. Dolnośląskie Wyd. Eduk. Wrocław 2006.
22. Kacwicz M.: Fuzzy Slope Stability Method Matematical Geology Nr 8 1987.
23. GGU - Software. Stability Civil serve 2004.
24. PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses 2.D vers. 8 Red R.BJ.Brinkgreve Deft 2002.
25. Truty A.: Numerics in Geotechnics & Structures. Symp. Lozanna 2010, 25 Years ZSoil&Structures.PC.
26. Alonso: Contributions of Different Factors to Variance of Moments, Green Creek Slide, London 1977.
27. Wysokiński L.: Kryterium dynamiki zboczy. Biuletyn Instytutu Geologicznego Nr 324, 1980.
28. Czarnecki L., Jończyk W., Organiściak B., Wysokiński L.: Zagrożenia geotechniczne w wyrobisku górnym kopalni Bełchatów. ITB Warszawa 2007.