

Jarosław Przewłócki\*

orcid.org/0000-0001-5617-290X

Lestaw Zabuski\*\*

orcid.org/0000-0003-0270-4477

## Proaktywne podejście geotechniczne do zachowania dziedzictwa kulturowego i naturalnego: przypadek San Leo we Włoszech

### Proactive Geotechnical Approach to Preserve Cultural and Natural Heritage: The Case of the Town of San Leo in Italy

**Słowa kluczowe:** ochrona dziedzictwa, analiza stateczności, analiza wsteczna, DEM

**Keywords:** heritage protection, stability analysis, back analysis, DEM

#### Wprowadzenie

Miejsca Światowego Dziedzictwa (World Heritage Sites – WHS) są definiowane jako dziedzictwo kulturowe i naturalne, które obejmuje starożytne ruiny, historyczne miasta, budynki, pomniki (zamki, katedry, fortece), a także jeziora, lasy lub góry. Lista UNESCO, opracowana w 2007 r., zawiera 851 obiektów stanowiących część dziedzictwa kulturowego i naturalnego, które Komitet Światowego Dziedzictwa uznaje za posiadające wyjątkową uniwersalną wartość [Canuti et al. 2009, s. 401–433]. Należy do nich 660 obiektów kulturowych, 166 naturalnych oraz 25 mieszanych, z których 378 znajduje się w Europie. Przykładowo we Włoszech jest ich 41, w Hiszpanii 39, w Niemczech 32, we Francji 31. Zachowanie takiego dziedzictwa staje się coraz ważniejsze. Dotyczy to zwłaszcza krajów z jednej strony bogatych w świadectwa kultury, a z drugiej często nękanych klęskami żywiołowymi, takimi jak trzęsienia ziemi, aktywność wulkaniczna, nadmierne opady, susze, osuwiska itp. Znaczącym postępowaniem w tej dziedzinie była sesja naukowa „Zagrożenia naturalne i dziedzictwo kulturowe” w ramach Międzynarodowego Kongresu Geologicznego, który odbył się we Florencji

#### Introduction

World Heritage Sites (WHS) are defined as cultural and natural heritage that includes ancient ruins, historic cities, buildings, monuments (castles, cathedrals, fortresses) as well as lakes, forests or mountains. The UNESCO list, compiled in 2007, includes 851 sites that are part of the cultural and natural heritage that the World Heritage Committee considers to be of outstanding universal value [Canuti et al. 2009, pp. 401–433]. They include 660 cultural, 166 natural and 25 mixed sites, 378 of which are located in Europe. For example, there are 41 in Italy, 39 in Spain, 32 in Germany and 31 in France. Preservation of such heritage sites is becoming increasingly important. This applies mainly to countries, on the one hand, rich in cultural testimony, and on the other, often plagued by natural disasters such as earthquakes, volcanic activity, excessive precipitation, droughts, landslides, etc. A significant advance here was the academic session “Natural Hazards and Cultural Heritage” within the framework of the International Geological Congress held in Florence (Italy) in 1994 [The 32nd International Geological Congress 2004, pp. 1–175].

\* prof. dr hab. inż., Politechnika Gdańska, Wydział Architektury

\*\* dr hab. inż., Polska Akademia Nauk – Oddział w Gdańsku, Instytut Budownictwa Wodnego

\* Prof. D.Sc. Ph.D. Eng., Gdańsk University of Technology, Faculty of Architecture

\*\* D.Sc. Ph.D. Eng., Polish Academy of Sciences Gdańsk Branch, Institute of Hydro-Engineering

**Cytowanie / Citation:** Przewłócki J., Zabuski L. Proactive Geotechnical Approach to Preserve Cultural and Natural Heritage: The Case of the Town of San Leo in Italy. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2024, 79:

**Otrzymano / Received:** 26.01.2024 • **Zaakceptowano / Accepted:** 3.05.2024

**doi:** 10.48234/WK79LEO

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

(Włochy) w 2004 r. [The 32nd International Geological Congress 2004, s. 1–175].

W wielu krajach europejskich historyczne miasta, zamki lub kościoły budowano na szczytach gór i wzgórz, głównie ze względu na korzystne położenie strategiczne. Niestateczność ich zboczy może stać się szczególnie niebezpieczna, ponieważ zagrożone jest zarówno dziedzictwo historyczne, jak i przyrodnicze. Przykłady to m.in.: miasto Kruja w Albanii [Muceku, Korini 2014, s. 545–556], włoskie miasta, takie jak Craco (Basilicata), Orvieto (Umbria), Radicofani (Toskania), Civita di Bagnoregio (Lacjum) lub Pitigliano (Toskania) [Bonzano et al. 2008, s. 351–366; Bromhead et al. 2006, s. 273–274; Delmonaco et al. 2009, s. 1455–1459; Tapete et al. 2013, s. 176–189]. Inne przykłady to zamek Spiski na Słowacji [Vlcko et al. 2009, s. 1727–1740], zamek Giedymina w Wilnie na Litwie [Milkulėnas et al. 2016, s. 1–6], pałac Alhambra w Granadzie [Justo et al. 2008, s. 101–119], zamek San Salvador de Todea w Hiszpanii [Abad et al. 2022, s. 22–44], zamek Saracen we Włoszech [Mineo et al. 2021, s. 1–17], zamek Platamon w Grecji [Anthopoulou et al. 2006, s. 289–294], zamek w Sandomierzu w Polsce [Kulczykowski et al. 2017, s. 1–9] czy kościół św. Serwacego w Quedlinburgu w Niemczech [Siegesmund et al. 2011, s. 641–659]. Szereg zabytkowych miejsc i obiektów zlokalizowanych na podatnym na osuwiska polskim fliszu karpackim opisano m.in. w [Laskowicz, Mrozek 2015, s. 415–419; Zabuski, Przewłócki 2018, s. 1–10; Zabuski, Przewłócki 2019, s. 136–142].

Doskonałym przykładem w analizowanym przypadku jest miasto San Leo, znajdujące się w regionie Montefeltro (Włochy) i położone na wysokiej płycie skalnej ok. 100 m nad poziomem terenu. Znajdują się tam znaczące zabytki historyczne. Jest to interesujący przypadek ochrony dziedzictwa kulturowego i przyrodniczego, co wynika ze szczególnych cech geologicznych i geomorfologicznych podłoża górskiego. Ściany klifu (zbocza płyty) zostały na przestrzeni wieków dotknięte zjawiskami niestateczności. Powstało tam kilka dużych osuwisk, obrywów skalnych, spływów ziemnych i osuwisk złożonych. W związku z uszkodzeniami spowodowanymi obrywami skał dostęp do miasta był kilkakrotnie przenoszony. Ostatnie potężne osuwisko wystąpiło w roku 2014. Na szczęście miało ono miejsce w pewnej odległości od centrum miasta i jego najcenniejszych zabytków, nie powodując ich znacznego uszkodzenia. W celu oceny przyczyn powstania tego zjawiska przeprowadzono szereg analiz numerycznych [Donati et al. 2019, s. 1–31; Ghirelli et al. 2017, s. 281–286; Spreafico et al. 2013, s. 304–306; 2015, s. 23–27; 2016a, s. 2235–2251; 2016b, s. 1859–1866; 2017, s. 83–98; Benedetti et al. 2011, s. 529–537].

Wstępne analizy przeprowadzone m.in. przez autorów bieżącej pracy wykazały, że zagrożone są również strefy w sąsiadujących przekrojach. Biorąc pod uwagę bardzo duże znaczenie historyczne miasta San Leo i niszczycielskie skutki procesów osuwiskowych, ważne wydaje się przewidywanie zagrożeń wpływających na

In many European countries, historic cities, castles or churches were built on the tops of mountains and hills, mainly because of their favorable strategic location. The instability of their slopes can become particularly dangerous, as both historical and natural heritage are at risk of damage. Examples include the town of Kruja in Albania [Muceku, Korini 2014, pp. 545–556], Italian towns or villages, like Craco (Basilicata), Orvieto (Umbria), Radicofani (Tuscany), Civita di Bagnoregio (Lazio) or Pitigliano (Tuscany) [Bonzano et al. 2008, pp. 351–366; Bromhead et al. 2006, pp. 273–274; Delmonaco et al. 2009, pp. 1455–1459; Tapete et al. 2013, pp. 176–189]. Other examples include Spiš Castle in Slovakia [Vlcko et al. 2009, pp. 1727–1740], Gėdiminas's Castle in Vilnius in Lithuania [Milkulėnas et al. 2016, pp. 1–6], the Alhambra Palace in Granada [Justo et al. 2008, pp. 101–119] and the castle of San Salvador de Todea in Spain [Abad et al. 2022, pp. 22–44], the Saracen castle in Italy [Mineo et al. 2021, pp. 1–17], Platamon Castle in Greece [Anthopoulou et al. 2006, pp. 289–294], the castle in Sandomierz in Poland [Kulczykowski et al. 2017, pp. 1–9] or the St. Servatius Church in Quedlinburg in Germany [Siegesmund et al. 2011, pp. 641–659]. A number of historical sites and buildings located on the Polish Carpathian Flysch, which is prone to landslides, were described by [Laskowicz, Mrozek 2015, pp. 415–419; Zabuski, Przewłócki 2018, pp. 1–10; 2019, pp. 136–142].

One excellent example in the case under consideration is the town of San Leo, located in the Montefeltro region (Italy), at an elevation of about 100 m above ground level. There are a significant number of historical monuments here. This is also interesting case of natural heritage protection, which is due to the special geological and geomorphological features of the mountain substrate. The cliff walls (slopes of the slab) have been affected by instability phenomena over centuries. Several large landslides, rockfalls, earth flows, and compound landslides have occurred there. Due to the damage caused by rockfalls, access to the town has been relocated several times. The most recent massif landslide occurred in 2014. Fortunately, it took place at a distance from the town center and its most valuable monuments, without causing significant damage to them. A number of numerical analyses have been carried out to assess the causes of this phenomenon [Donati et al. 2019, pp. 1–31; Ghirelli et al. 2017, pp. 281–286; Spreafico et al. 2013, pp. 304–306; 2015, pp. 23–27; 2016a, pp. 2235–2251; 2016b, pp. 1859–1866; 2017, pp. 83–98; Benedetti et al. 2011, pp. 529–537].

Preliminary analyses carried out by the authors of this study have shown that zones in adjacent sections are also at risk. Given the very high historical importance of San Leo and the devastating effects of landslide processes, it seems important to anticipate risks affecting cultural or natural heritage, and to consider appropriate protective measures in advance. Such analysis can be considered a proactive approach, in which action is taken even before a small process indicating a

dziedzictwo kulturowe lub naturalne oraz rozważenie z wyprzedzeniem odpowiednich środków zabezpieczających. Taką analizę można uznać za podejście proaktywne, w którym działania są podejmowane, zanim choćby niewielki proces świadczący o możliwym zagrożeniu przekształci się w poważniejszy problem. Można to osiągnąć, wykonując analizy numeryczne oparte na wiarygodnych parametrach geomechanicznych, pozwalających ostatecznie na zaproponowanie odpowiednich środków zaradczych.

W artykule omówiono znaczenie dziedzictwa architektonicznego miasta i przeanalizowano procesy deformacji w kilku wytypowanych przekrojach geotechnicznych. Opisano charakter osuwiska z roku 2014, a także cechy geologiczne i geomorfologiczne powodujące zjawiska niestateczności zbroczy występujące w całym regionie. Przedstawiono przegląd osuwisk, które w przeszłości miały wpływ na miasto, wskazując, w jaki sposób zagrożenia naturalne mogą oddziaływać na historię regionu. Dla wybranych przekrojów przeprowadzono analizy numeryczne procesów deformacji przy użyciu metody elementów oddzielnych (*Distinct Element Method* – DEM).

Autorzy pracy podjęli się w pierwszej kolejności wyznaczenia parametrów skał i spękań za pomocą metody analizy wstecznej [Hoek, Bray 1974, s. 90–93], wykorzystując przekrój, w którym wystąpiło wspomniane wcześniej rozległe osuwisko. W celu weryfikacji metody uzyskane parametry zostały następnie zastosowane jako dane wyjściowe do analizy przekroju w jego bliskim sąsiedztwie. Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały, że sąsiednie strefy są również zagrożone, zwłaszcza ta w pobliżu twierdzy Rocca Fortezza. Zaproponowane proaktywne podejście, w którym na podstawie analizy stateczności i deformacji masywu skalnego przewiduje się zagrożenie dla miasta i twierdzy oraz zastosowanie *a priori* skutecznych środków zaradczych, można uznać za oryginalne i innowacyjne.

### Studium przypadku – miasto San Leo

San Leo, jedno z najpiękniejszych miast we Włoszech, obfituje w zabytki i posiada wartościowe dziedzictwo kulturowe. Leży w północnym regionie Apeninów Montefeltro na płycie skalnej o wymiarach 500×600 m (ok. 300 000 m<sup>2</sup>), wyniesionej 50÷120 m nad powierzchnię otaczającego terenu, na wysokości ok. 660 m n.p.m. (ryc. 1). Masyw skalny ograniczony jest bardzo stromymi, niekiedy pionowymi i przewieszonymi klifami.

Początki San Leo sięgają czasów starożytnych (III w. p.n.e.), kiedy to Rzymianie docenili strategiczne znaczenie tego miejsca, wznosząc tu jedną ze swoich fortec. Kiedyś nazywało się ono Monte Feltro (od Mons Feretrus) – nazwa związana jest z ważną rzymską wioską zbudowaną wokół świątyni poświęconej Jowiszowi Feretriuszowi. W San Leo mieszkało wiele intelektualnych i religijnych osobistości historycznych, takich

possible threat develops into a more serious problem. This can be achieved by performing numerical analyses based on reliable geomechanical parameters, which will finally allow appropriate countermeasures to be proposed.

This paper discusses the significance of the town's architectural heritage and analyzes deformation processes in several selected geotechnical sections. The nature of the 2014 landslide is described, as well as the geological and geomorphological features causing slope instability phenomena occurring throughout the region. An overview of landslides that have affected the town in the past is provided, indicating how natural hazards can affect the history of the region. Numerical analysis of deformation processes was carried out for selected cross-sections, using the Distinct Element Method (DEM).

The authors of this paper first determined rock and joints parameters using the back analysis method [Hoek, Bray 1974, pp. 90–93], using a cross-section where the previously mentioned extensive landslide had occurred. In order to validate the method, the parameters were then used as input data for the analysis of the cross-section in its close vicinity. The numerical analyses showed that neighboring zones were also at risk, especially the one near the Rocca Fortezza fortress. The proposed proactive approach, in which the threat to the town and the fortress is predicted based on the stability and deformation analysis of the rock massif and the application of *a priori* effective countermeasures, can be considered original and innovative.

### Case study – town of San Leo

San Leo is one of the most beautiful town in Italy. It is rich in historical monuments and has crucial cultural heritage. The town is located in the northern Apennine Mountain region of Montefeltro on a rock slab measuring 500 × 600 m (approx. 300,000 m<sup>2</sup>), elevated 50–120 m above the surface of the surrounding terrain, at an altitude of about 660 m a.s.l. (Fig. 1). The rock massif is surrounded by near-vertical and overhanging cliffs.

The origins of the town of San Leo date back to ancient times (third century BC), when the Romans appreciated the strategic value of the site by raising one of their fortresses here. It was once called Monte Feltro (from Mons Feretrus) – a name associated with an important Roman village built around a temple dedicated to Jupiter Feretrius. Many intellectual and religious historical personalities lived in the town of San Leo, such as Dante Alighieri, St. Francis of Assisi, whose figure is now found in the town's coat of arms, and Saint Leo (San Leone). For Dante, the town served as a model for his Purgatory which he described in the *Divine Comedy*. The name of the town was given by St. Leone. The town of San Leo was the capital of the Italian empire for two years—between 962 and 964 A.D. [Borgatti et al. 2015, pp. 387–394; Ghirelli et al. 2017, pp.



Ryc. 1. Miasto San Leo i twierdza Rocca Fortezza, 2015; autorem wszystkich fotografii jest L. Zabuski.  
 Fig. 1. The town of San Leo and Rocca Fortezza, 2015; all photos by L. Zabuski.

jak Dante Alighieri, św. Franciszek z Asyżu, którego postać znajduje się obecnie w herbie miasta, oraz św. Leon (San Leo). Dla Dantego miasto stanowiło wzór „czyścica”, który opisał w *Boskiej komedii*. Nazwa miasta została nadana przez św. Leona. Miasto było stolicą włoskiego imperium przez dwa lata – między 962 a 964 r. n.e. [Borgatti et al. 2015, s. 387–394; Ghirelli et al. 2017, s. 281–286; Spreafico et al. 2016a, s. 2235–2251; 2016b, s. 1859–1866; Benedetti et al. 2011, s. 529–537].

Kamienna forteca Rocca Fortezza (ryc. 1) została zbudowana na wysokiej skale, z wykorzystaniem murów starożytnej rzymskiej fortyfikacji z III stulecia n.e. Początkowo ten rzymski fort nie miał żadnych fortyfikacji, ponieważ masyw skalny, na którym został zbudowany, otaczają strome zbocza. Na przestrzeni wieków fort był wielokrotnie przebudowywany i rozbudowywany. Pojawienie się broni prochowej wymagało budowy nowej fortecy. Zadania tego podjął się w XV w. architekt Francesco di Giorgio Martini. Mury zostały lekko pochylone do wewnątrz i wzmocnione ziemią, tworząc wał obronny. Pozwoliło to na zmniejszenie siły uderzenia i penetracji kul armatnich. W strukturę fortu wbudowano trzy duże place do przetaczania ciężkich dział, a w każdym z głównych punktów wyznaczono stanowiska ogniowe. Twierdza wielokrotnie odpierała ataki najeźdźców z różnym skutkiem. Położenie na stromej skale umożliwiało dostrzeżenie niepożądanych przybyszów z dużej odległości.

Od 1527 r. do początku XX w. twierdza służyła jako zakład karny. Stała się więzieniem dla największych przestępców i najgorszych wrogów Watykanu, a najbardziej znanym był hrabia Cagliostro *alias* Giuseppe Balsamo. Oprócz sławy alchemika, uzdrowiciela i czarownika był uważany przez niektórych za oszusta i fałszerza. Za życia stał się ważną osobistością w krę-

281–286; Spreafico et al. 2016a, pp. 2235–2251; 2016b, pp. 1859–1866; Benedetti et al. 2011, pp. 529–537].

The Rocca Fortezza stone fortress (Fig. 1) was built on an uplifted high rock reusing the walls of an ancient Roman fort from the third century AD. Initially, this Roman fort had no fortifications, as the rock massif on which it is built is surrounded by steep slopes. The fort was remodeled and expanded many times over centuries. The use of gunpowder weapons necessitated the construction of a new fortress. Architect Francesco di Giorgio Martini began working on this in the fifteenth century. The walls were tilted slightly inward and reinforced with earth to form a defensive rampart. This reduced the impact force and penetration of cannonballs. Three large squares were built into the structure of the fortress for rolling heavy cannons, and artillery batteries were designated at each major point. The fortress repeatedly repelled attacks by invaders with varying results. Its location on the steep rock enabled unwanted visitors to be spotted from a long distance.

From 1527 until the early twentieth century, the fortress served as a penitentiary. It became a prison for the greatest criminals and the Vatican’s worst enemies, the most notorious of whom was Count Cagliostro, *alias* Giuseppe Balsano. He was considered by some to be a swindler and a counterfeiter, in addition to his fame as an alchemist, healer and sorcerer. During his life he became an important personality in Freemason circles and was imprisoned in the fortress for heresy. Cagliostro died of apoplexy after four years in his cell. Another notorious prisoner was Felice Orsini, an Italian revolutionary who tried to assassinate Napoleon III [Spreafico et al. 2016a, pp. 2235–2251]. During the Second World War, the Nazis, after capturing the fortress, set up an anti-aircraft defense battery there.



Ryc. 2: a) kościół parafialny Santa Maria Assunta; b) katedra św. Leona, 2015.  
 Fig. 2: a) Santa Maria Assunta parish church; b) St. Leo Cathedral (Cattedrale di San Leo), 2015.

gach masońskich i został uwieczniony w fortecy za herezję. Cagliostro zmarł na apopleksję po czterech latach spędzonych w celi. Więźniem o złej sławie był również Felice Orsini, włoski rewolucjonista, który próbował zamordować Napoleona III [Spreafico et al. 2016a, s. 2235–2251]. Podczas II wojny światowej naziści, po zdobyciu twierdzy, utworzyli w niej stanowisko obrony przeciwlotniczej.

W mieście liczącym nieco ponad 3000 mieszkańców znajdują się dwa średniowieczne kościoły. Starszy kościół parafialny Santa Maria Assunta został zbudowany w VII–IX w. (ryc. 2a). Jego kamienne ściany wzmocnione są masywnymi przyporami, a wnętrze podzielone na trzy nawy za pomocą kolumn i pilastrów. Nowsza jest romańska katedra św. Leona (Cattedrale di San Leo), zbudowana w XII–XIII w. (ryc. 2b). Ma formę krzyża łacińskiego, składającego się z dwóch naw oddzielonych kolumnami tworzącymi po każdej stronie siedem łuków.

Obecnie San Leo jest szczególnie interesujące turystycznie; w twierdzy znajduje się muzeum, w którym można zobaczyć m.in. pamiątki po masońskiej przeszłości, broje rycerskie, średniowieczne narzędzia walki i tortur czy armaty. W mieście znajdują się również renesansowe pałace – interesujący Palazzo Mediceo, zbudowany dla gubernatora San Leo i Montefeltro, który rządził w imieniu Republiki Florenckiej, a ponadto działa tam Diecezjalne Muzeum Sztuki Sakralnej (Museo d'Arte Sacra) i biuro informacji turystycznej.

### **Płyta skalna San Leo – charakterystyka geologii płyty i procesu osuwiskowego**

Płyta skalna, na której położone jest San Leo, jest zaburzona tektonicznie, częściowo zwietrzała. Masyw skalny płyty jest poprzecinany spękaniami, które ułożone są chaotycznie lub w regularnych systemach. Z punktu

The town, with a population of just over three thousand, has two medieval churches outside the fortress. The older parish church of Santa Maria Assunta was built between the seventh and ninth centuries (Fig. 2a). Its stone walls are reinforced by massive buttresses, and the interior is divided into three naves by columns and pilasters. Romanesque Cathedral of St. Leo (Cattedrale di San Leo) is more recent, built in the twelfth–thirteenth centuries (Fig. 2b). It has the form of a Latin cross, composed of two naves separated by columns forming seven arches on each side.

Nowadays, the town of San Leo is of particular tourist interest; the fortress houses a museum where visitors can see Freemason memorabilia, knightly armor, medieval instruments of warfare and torture or cannons. There are also Renaissance palaces in the town—the interesting Palazzo Mediceo, built for the governor of the town of San Leo and Montefeltro, who ruled on behalf of the Republic of Florence—and houses the Diocesan Museum of Religious Art (Museo d'Arte Sacra) and a tourist information office.

### **San Leo rock slab – characterization of slab geology and landslide process**

The rock slab on which the town of San Leo is located is tectonically disturbed and partially weathered. The rock massif of the slab is intersected by joints, which are arranged chaotically or in regular systems.

From the point of view of morphology, joints can be divided into: regular smooth joints, with a little roughness; irregular, discontinuous, of high roughness, slightly filled with material.

Depending on the orientation of joints in relation to the slab surface and cliff edges, they can locally significantly affect the formation and development of landslide processes.

widzenia morfologii spękania można podzielić na: regularne, gładkie, o małej chropowatości; nieregularne, nieciągłe, o dużej chropowatości, częściowo wypełnione zwietrzałym materiałem.

W zależności od orientacji spękań w stosunku do powierzchni płyty i brzegów klifu mogą one lokalnie w znaczącym stopniu wpływać na powstawanie i rozwój osuwisk.

Podłoże płyty na poziomie podstawy otaczającego terenu, ogólnie nachylone w kierunku zachodnim, zbudowane jest ze słabych łupków ilastych o niskich parametrach wytrzymałościowych [Tommasi, Rotonda 1995, s. 283–388]. Sytuacja ta powoduje poważne problemy związane ze statecznością płyty, wiążące się także z zachowaniem bardzo stromych ścian klifowych na obrzeżach. W ciągu kilku stuleci zaobserwowano tu liczne osuwiska, głównie w postaci obrywów skalnych i obwałów, a w mniejszym stopniu osuwisk i spływów błotnych lub gruzowych. Sporadycznie osuwiska występowały w wyniku osiadania słabego podłoża.

Ostatnie rozległe osuwisko skalne nastąpiło 27 lutego 2014 ok. 18:00. Zostało uznane we Włoszech za klęskę żywiołową. Około 300 000 m<sup>3</sup> skał oderwało się od niemal pionowego klifu i osunęło do doliny. Spowodowało to huk i wstrząs, który mieszkańcy ocenili początkowo jako trzęsienie ziemi. W wyniku fragmentacji materiału podczas procesu osuwiskowego powstała chmura pyłu. Szczęśliwie nikt nie został ranny, a osuwisko nie uszkodziło żadnej istotnej struktury. Stwierdzono, że wiele obiektów i zabytków znajdujących się na płycie było zagrożonych, w związku z czym ludność została tymczasowo ewakuowana. Słabe podłoże płyty jest jednym z czynników wywołujących osuwiska klifów, ale głównym czynnikiem są spękania, które dzielą masyw skalny na bloki. Są one zazwyczaj wypełnione materiałem wietrzeniowym o grubości 2÷5 mm. Głównymi składnikami tego materiału są węglan wapnia oraz glina, kwarc i skałki.

### Geotechniczna charakterystyka masywu skalnego

Cechy i parametry geotechniczne masywu skalnego podano w kilku publikacjach [np. Caturani et al. 1991, s. 853–858; D’Ambra et al. 2004, s. 103–113; Ribacchi, Tommasi 1988, s. 55–64]. Przedstawione w nich wyniki badań laboratoryjnych skał pochodzą z rdzeni wiertniczych pobranych w otworach badawczych wykonanych na płaskowyżu. Właściwości mechaniczne nienaruszonej skały (wapienia), której wychodnie widoczne są na południowo-wschodniej i północnej ścianie płyty, zostały zbadane na próbkach pobranych z otworów wiertniczych zlokalizowanych zarówno na płycie, jak i w obszarze jej podstawy. Ciężar objętościowy skał waha się od 22,0 do 26,7 kN/m<sup>3</sup>. Porowatość i szczelinowatość jest niska i w przypadku stosunkowo sztywnego masywu skalnego waha się od 3 do 11%. D’Ambra i współpracownicy [2004, s. 103–113] określili parametry litej nienaruszonej skały, ale nie podali parametrów spękań (z wyjątkiem sztywności na ścinanie  $k_s = 190 \div 270$  GPa/m). Parametry wytrzymałości na

The substrate of the slab at the level of the base of the surrounding land, generally sloping to the west, is composed of weak clay shale with low strength parameters [Tommasi, Rotonda 1995, pp. 283–388]. This situation causes serious stability problems for the slab, also involving the maintenance of very steep cliff walls on the edges. Numerous landslides have been observed here over several centuries, mainly in the form of rock-falls and collapses, and to a lesser extent mudslides and mudflows or debris flows. Occasionally, landslides have occurred as a result of subsidence of weak ground.

The most recent widespread rock slide occurred here on February 27, 2014, at around 6:00 p.m. It was declared a natural disaster in Italy. About 300,000 m<sup>3</sup> of rock broke away from a near-vertical cliff and slid into the valley. This caused a rumble and tremor that residents initially judged as an earthquake. The fragmentation of material during the landslide process resulted in a cloud of dust. Fortunately, no one was injured, and the landslide did not damage any significant structure. A number of structures and monuments situated on the slab were found to be at risk, so the inhabitants were temporarily evacuated. The weak slab substrate is one of the factors causing cliff landslides. However, the main triggers of landslide processes are joints that divide the rock massif into blocks. They are usually filled with weathering material 2–5 mm thick. The main components of this material are calcium carbonate, clay, quartz and feldspar.

### Geotechnical characterization of the rock massif

Geotechnical parameters of the rock massif are given in several publications [Caturani et al. 1991, pp. 853–858; D’Ambra et al. 2004, pp. 103–113; Ribacchi, Tommasi 1988, pp. 55–64]. The laboratory results presented therein were obtained from drill cores taken from the slab. The mechanical properties of the intact rock (limestone), outcrops of which are visible on the southeastern and northern faces of the slab, were tested on samples taken from boreholes located both on the slab and in the area of its base. The volumetric weight of the rock ranges from 22.0 to 26.7 kN/m<sup>3</sup>. Porosity and fracturing is low and ranges from 3 to 11% for a relatively rigid rock massif. D’Ambra and associates [2004, pp. 103–113] determined the parameters of solid rock, but the parameters of joints are missing (except for the tangential stiffness  $k_s = 190 \div 270$  GPa/m). The shear strength parameters of the clay shale in the lower part of the cliff massif are given in [Caturani et al. 1991, pp. 853–858; Ribacchi et al. 1988, pp. 27–36; Ribacchi, Tommasi 1988, pp. 55–64; Ribacchi, Tommasi 1989, pp. 85–90]. These report friction angle  $f = 10 \div 20^\circ$ , cohesion  $c = 5 \div 40$  kPa. These values are similar to those determined in [D’Ambra et al. 2004, p. 103–113]. In contrast to the relatively detailed description of geological properties, geotechnical properties are poorly investigated. This circumstance forces one to analyze different variants of deformation processes of the rock slab and to fol-

ściananie łupków ilastych w dolnej części masywu klifu zostały podane w publikacjach [Caturani et al. 1991, s. 853–858; Ribacchi et al. 1988, s. 27–36; Ribacchi, Tommasi 1988, s. 55–64; Ribacchi, Tommasi 1989, s. 85–90]. Według ich autorów kąt tarcia wewnętrznej jest rzędu  $\varphi = 10 \div 20^\circ$ , a spójność  $c = 5 \div 40$  kPa. Wartości te są zbliżone do wyznaczonych w [D'Ambra et al. 2004, s. 103–113], jednak rozrzut parametrów jest dość duży. W przeciwieństwie do szczegółowego opisu geologii, właściwości geotechniczne są słabo rozpoznane. Okoliczność ta zmusza do analizowania różnych wariantów procesów deformacji płyty skalnej oraz śledzenia i wyboru procesów, które są bliskie (lub identyczne) tym obserwowanym w rzeczywistości.

### **Cechy strukturalne i parametry masywu skalnego w badanych przekrojach geotechnicznych**

Do oceny stanu stateczności klifu i procesów deformacji wytypowano trzy przekroje (ryc. 3). Dwa z nich (A–A' i B–B') charakteryzują się zbliżonymi cechami, znacznie różniącymi się od trzeciego przekroju (C–C'). Rozpatrywane są zatem różne mechanizmy deformacji.

Opisane wcześniej rozległe osuwisko wystąpiło na północno-wschodniej ścianie klifu w przekroju A–A' (ryc. 4, 5b). Dla tego przekroju autorzy artykułu opracowali model geotechniczny i numeryczny i przeprowadzili symulację numeryczną procesów deformacji osuwiskowych. Określenie parametrów spękań, niezbędnych do spełnienia warunku równowagi granicznej, stało się możliwe dzięki zastosowaniu analizy wstecznej [Hrubesova, Mohyla 2014, s. 423–428; Spreafico et al. 2016a, s. 2235–2251]. Uzyskane na tej podstawie parametry geotechniczne przyjęto do analizy klifu w przekroju B–B', zlokalizowanego w niewielkiej odległości od przekroju A–A' (ryc. 5b). Uznano bowiem, że ze względu na podobieństwo morfologii ściany klifu również w tym przekroju istnieje możliwość rozwoju osuwiska, tj. możliwa jest utrata stateczności klifu. W bezpośrednim sąsiedztwie tego przekroju znajduje się linia energetyczna i linia wodociągowa doprowadzająca wodę do miasta, lokalizacja ta jest zatem ważna z ekonomicznego i społecznego punktu widzenia.

Trzeci analizowany przekrój C–C' widać na rycinie 6. Różni się on znacząco od dwóch pozostałych. Jest to niemal pionowa ściana, nad którą znajduje się twierdza Rocca Fortezza. Potencjalny obryw lub obwał skalny w tym miejscu może spowodować uszkodzenie lub zawalenie się twierdzy. Z uwagi na stosunkowo dużą odległość (tj.  $300 \div 400$  m) od przekroju A–A' i odmienną orientację przestrzenną klifu parametry geotechniczne podane w tabelach 1 i 2 dla tego przekroju nie są reprezentatywne. Dlatego analizę deformacji oparto m.in. na parametrach geotechnicznych, zestawionych w tabelach 3 i 4 [D'Ambra et al. 2004, s. 103–113]. W tym przypadku przeprowadzono szczegółową analizę numeryczną, obliczono współczynnik stateczności klifu i zaprojektowano inżynierskie środki zaradcze w postaci długich kotwi.

low and select processes that are close (or identical) to those observed in reality.

### **Structural features and parameters of the rock massif in the studied geotechnical sections**

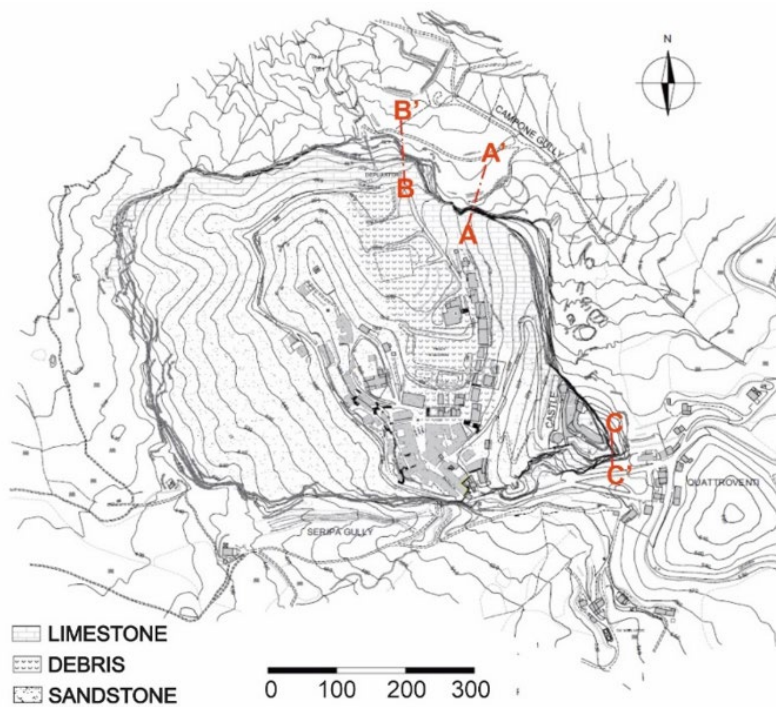
Three cross-sections were selected to evaluate the state of cliff stability and deformation processes (Fig. 3). Two of them (A–A' and B–B') are characterized by similar features, significantly different from the third cross-section (C–C'). Thus, different deformation mechanisms are considered.

The extensive landslide described earlier occurred on the northeastern face of the cliff in cross-section A–A' (Figures 4, 5b). For this cross-section, the authors of this study developed a geotechnical and numerical model and performed numerical simulation of landslide deformation processes. Determination of the joints parameters necessary to satisfy the boundary equilibrium condition became possible through the use of back analysis [Hrubesova, Mohyla 2014, pp. 423–428; Spreafico et al. 2016b, pp. 1859–1866]. The geotechnical parameters obtained on this basis were adopted for the analysis of the cliff in cross-section B–B', located a short distance from cross-section A–A' (Fig. 5b). This is because it was considered that due to the similarity of the morphology of the cliff wall, there is a possibility of landslide development in this cross-section as well, i.e. loss of cliff stability is possible. In the immediate vicinity of this cross-section are a power line and a water supply line bringing water to the town; the location is therefore economically and socially important.

The third C–C' cross-section analyzed is shown in Figure 6. It differs significantly from the other two. It is an almost vertical wall, above which is Rocca Fortezza. A potential rockfall or outburst at this location could cause damage or collapse of the fortress. Due to the relatively large distance (i.e.,  $300\text{--}400$  m) from section A–A' and the different spatial orientation of the cliff, the geotechnical parameters given in Tables 1 and 2 for this section are not representative. Therefore, the deformation analysis was carried out based, among other things, on geotechnical parameters summarized in Tables 3 and 4 [D'Ambra et al. 2004, pp. 103–113]. In this case, a detailed numerical analysis was carried out, the cliff stability factor was calculated, and engineering countermeasures in the form of long anchors were designed.

### **Numerical analysis of deformation processes: Principles of the 2D and 3D distinct element model**

The most advanced numerical analysis for the San Leo slab was performed by Spreafico and associates [2016a, pp. 2235–2251], who considered cliff deformation and stability using a spatial, three-dimensional (3D) model. However, in some cases, with relatively simple geological conditions, two-dimensional (2D) analysis can provide a reasonable representation of the problem and



Ryc. 3. Mapa geologiczna San Leo z zaznaczonymi przekrojami obliczeniowymi; [D'Ambra et al. 2004, s. 103–113] z modyfikacjami.

Fig. 3. Geological map of the town of San Leo with indicated cross-sections; [D'Ambra et al. 2004, pp. 103–113] with modifications.

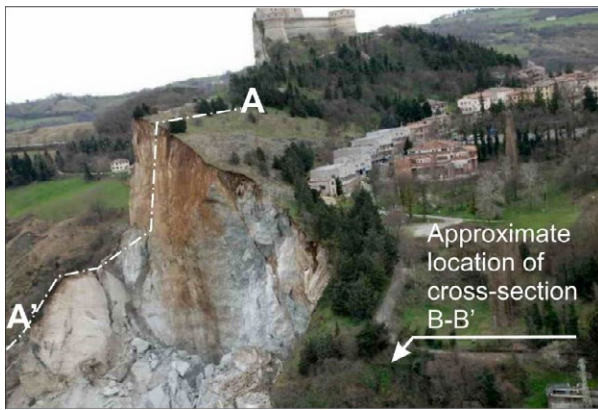
### Analiza numeryczna procesów deformacji. Zasady modelu elementów oddzielnych 2D i 3D

Najbardziej zaawansowana analiza numeryczna dla płyty San Leo została przeprowadzona przez Spreafico i współpracowników [2016a, s. 2235–2251], którzy rozważali deformację klifu i jego stateczność, stosując model przestrzenny, trójwymiarowy (3D). Jednak w niektórych przypadkach, przy stosunkowo prostych warunkach geologicznych, analizy dwuwymiarowe (2D) mogą zapewnić rozsądną reprezentację problemu i jego rozwiązanie. Wyniki 3D w większości takich przypadków są bardzo podobne do wyników analizy 2D. Geometria masywu może powodować zawyżanie wyników w niektórych analizach przeprowadzonych w 2D, ale generalnie zaniża wartości uzyskane w 3D [Chakraborty, Goswami 2016, s. 493–498; Doğan, Isik 2022, s. 626–632]. Szczególnie w przypadku zboczy o ograniczonej szerokości powierzchni poślizgu wyniki obliczeń w 2D mogą być poważnie niedoszacowane, zatem podejście to jest konserwatywne. Ponadto analiza 3D wymaga zwykle znacznie dłuższego czasu obliczeń i przewyżczenia trudności w gromadzeniu i opracowywaniu danych wejściowych. Tagliavini i współautorzy [2009, s. 323–337] stwierdzili, że analiza 2D jest preferowana w przypadku problemów prostych i dobrze zdefiniowanych, gdy badany obszar ma ograniczony zasięg. Z kolei analiza 3D jest preferowana dla obszarów o złożonej morfologii. Chen i współautorzy [2012, s. 427–541] wykazali, że w przypadku złożonych zboczy wykorzystanie wyników 2D jest

its solution. The 3D results in most such cases are very similar to those of the 2D analysis. The geometry of the massif may overestimate the results in some 2D analyses, but generally underestimates the values obtained in 3D [Chakraborty, Goswami 2016, pp. 493–498; Doğan, Isik 2022, pp. 626–632]. Especially for slopes with limited slip area width, 2D calculation results can be seriously underestimated, so this approach is conservative. In addition, 3D analysis usually requires much longer computation time and overcoming difficulties in collecting and compiling input data. Tagliavini and associates [2009, pp. 323–337] stated that 2D analysis is preferred for simple and well-defined problems when the area under study is limited. On the other hand, 3D analysis is preferred for areas with complex morphology. Chen and co-workers [2012, pp. 427–541] showed that for complex slopes, the use of 2D results is safer when deciding on prevention plans for the area. In this paper, the numerical analysis was conducted for a 2D model.

In order to assess the deformation state of the studied cliff in places where a landslide has occurred (cross-section A–A') or is potentially possible (cross-section B–B'), as well as in “critical” zones (cross-section C–C'), numerical analyzes of the deformation process were carried out using the Distinct Element Method (DEM). The DEM model is built from block-elements that contact each other with discontinuities (the term “interface” is used for discontinuities). Discontinuities are joints actually existing or artificially created for modeling purposes [Bandis et al. 1983, pp. 249–268;





Ryc. 4. Osuwisko w przekroju A–A' na północno-wschodniej ścianie San Leo, 2015.

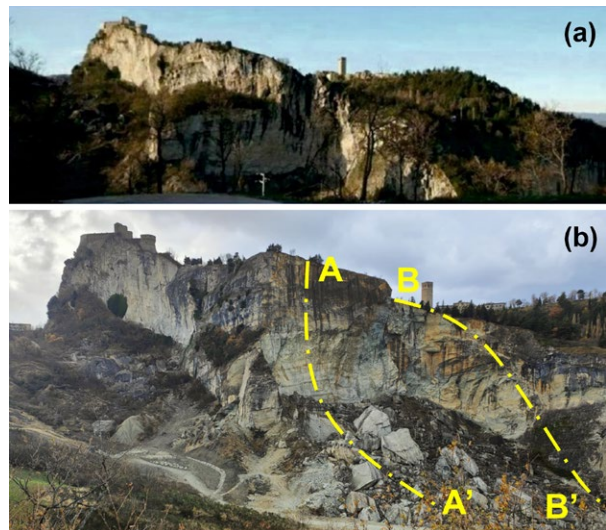
Fig. 4. Landslide in cross-section A–A' on the northeast face of the slab of San Leo, 2015.

bezpieczniejsze przy podejmowaniu decyzji o planach prewencyjnych dla danego obszaru. W artykule analizę numeryczną przeprowadzono dla modelu 2D.

Aby ocenić stan deformacji badanego klifu w miejscach, w których wystąpiło osuwisko (przekrój A–A') lub jest potencjalnie możliwe (przekrój B–B'), a także w strefach „krytycznych” (przekrój C–C'), przeprowadzono analizy numeryczne procesu deformacji przy zastosowaniu metody elementów oddzielnych (DEM). Model DEM zbudowany jest z bloków-elementów, które kontaktują się ze sobą wzdłuż nieciągłości (w przypadku nieciągłości stosuje się termin „interfejs”). „Nieciągłości” to spękania istniejące faktycznie lub sztucznie utworzone do celów modelowania [Bandis et al. 1983, s. 249–268; Cundall, Hart 1993, s. 231–261]. Spękania w masywie skalnym można uznać za „najsłabsze ogniwo w łańcuchu”, ponieważ ich parametry geomechaniczne są zwykle znacznie niższe niż parametry litej skały. Dlatego zniszczenie masywu skalnego następuje zazwyczaj w wyniku ścinania i/lub rozciągania rozdzielonych spękań. Blok zbudowany z litej nienaruszonej skały może się przemieszczać i deformować wskutek utraty kontaktu z otaczającym masywem.

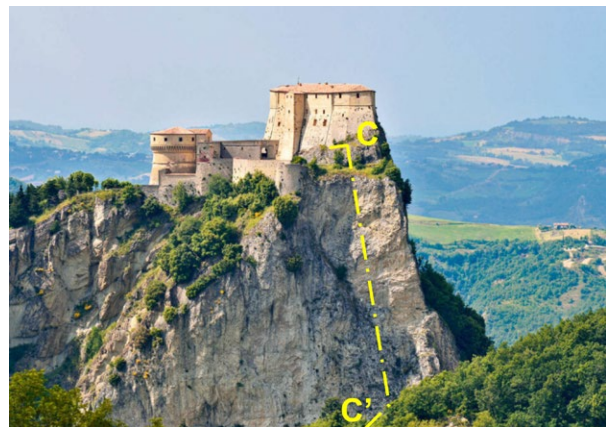
Stopień „realności” (wiarygodności) modelu zależy m.in. od wielkości bloków oddzielonych spękaniami i systemami spękań. Zbudowanie modelu uwzględniającego rzeczywiste wymiary bloków jest możliwe tylko w wyjątkowych przypadkach. Oznacza to, że model, w którym bloki mają wymiary rzeczywiste, można utworzyć tylko wtedy, gdy ich wymiary są stosunkowo duże w porównaniu do wielkości modelowanego obiektu [Havaej et al. 2014, s. 109–120]. W tym przypadku ważne jest, aby zachować kształt bloku, a tym samym właściwą zależność między rozstawem systemów spękań.

Podjęcie „nieciągłe” ma wiele zalet, jednak zdecydowana większość analiz procesów deformacji/zniszczenia wykorzystuje metody i modele oparte na mechanice ośrodków ciągłych, bez uwzględnienia spękań i ich właściwości. Opisane powyżej i zastosowane



Ryc. 5. Widok ściany północno-wschodniej i północnej: a) przed powstaniem osuwiska, b) po powstaniu osuwiska (zaznaczone przekroje A–A' i B–B'), 2015.

Fig. 5. View of the northeast and north wall: a) before, b) after the landslide in cross-section A–A' (marked cross-sections A–A' and B–B'), 2015.



Ryc. 6. Widok wschodniego klifu z zaznaczonym przekrojem C–C', 2015.

Fig. 6. View of eastern cliff with marked cross-section C–C', 2015.

Cundall, Hart 1993, pp. 231–261]. Joints in a rock massif can be considered the “weakest link in the chain” because their geomechanical parameters are usually much lower than those of solid rock. Therefore, the destruction of the rock massif usually occurs as a result of shearing and/or “stretching” of the separated joints. A block built of solid intact rock can move and deform due to loss of contact with the surrounding massif.

The degree of “reality” (reliability) of the model depends, among other things, on the size of blocks separated by joints and joint systems. Developing a model that takes into account the real dimensions of the blocks is possible only in exceptional cases. This means that a model in which the blocks have real dimensions can be built only if their dimensions are relatively large compared to the size of the object being modeled [Havaej et al. 2014, pp. 109–120]. In this case, it is important to maintain the shape of the

Rodzaj skały Kind of rock	Gęstość Density [t/m <sup>3</sup> ]	Moduł sprężystości objętościowej Bulk modulus K [GPa]	Moduł sprężystości postaciowej Shear modulus G [GPa]	Kąt tarcia wewnętrzny Angle of friction $\varphi$ [°]	Spójność Cohesion c [MPa]	Wytrzymałość na jedno- osiowe rozciąganie Uniaxial tension strength $s_t$ [MPa]
Wapień Rock slab	2.5	16.7	3.57	36	64	10
Łupek ilasty Clay shale	2.1	5.0	2.31	25	0.2	0.05

Tabela 1. Parametry geotechniczne masywu w przekrojach A–A' i B–B'.

Table 1. Geotechnical parameters of the massif in cross-sections A–A' and B–B'.

Nr	Spękania Joint	Przekrój Cross-section	Szywność normalna Normal stiffness [GPa/m]	Szywność styczna Shear stiffness [GPa/m]	Kąt tarcia wewnętrzny Angle of friction $\varphi_j$ [°]	Spójność Cohesion $c_j$ [kPa]	Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie Uniaxial tension strength $s_{tj}$ [kPa]
1	Spękania w wapieniu Joints in rock slab	A–A, B–B	147	147	18	176.5	29.4
2	Nieciągłość na kontakcie między wapieniem i łupkiem ilastym Discontinuity at the contact between the rock slab and the clay shale	B–B	500	20	15	50	10

Tabela 2. Parametry geotechniczne spękań w przekrojach A–A' i B–B'.

Table 2. Geotechnical parameters of joints in cross-sections A–A' and B–B'.

Rodzaj skały Kind of rock	Gęstość Density [t/m <sup>3</sup> ]	Moduł sprężystości objętościowej Bulk modulus K [GPa]	Moduł sprężystości postaciowej Shear modulus G [GPa]	Kąt tarcia wewnętrzny Angle of friction $\varphi$ [°]	Spójność Cohesion c [MPa]	Wytrzymałość na jedno- osiowe rozciąganie Uniaxial tension strength $s_t$ [MPa]
Wapień Limestone	2.29	8.33	4.17	36	4000	2000
Łupek ilasty Clay shale	2.10	2.50	0.536	22	150	50

Tabela 3. Parametry geotechniczne litej skały w przekroju C–C'.

Table 3. Geotechnical parameters of solid rock in cross-section C–C'.

Spękanie Joints	Przekrój Cross-section	Szywność nor- malna Normal stiffness [GPa/m]	Szywność styczna Shear stiffness [GPa/m]	Kąt tarcia wewnętrzny Angle of friction $\varphi_j$ [°]	Spójność Cohesion $c_j$ [kPa]	Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie Uniaxial tension strength $s_{tj}$ [kPa]
Spękania w wapieniu Joints in limestone	C	250	270	22	300	50

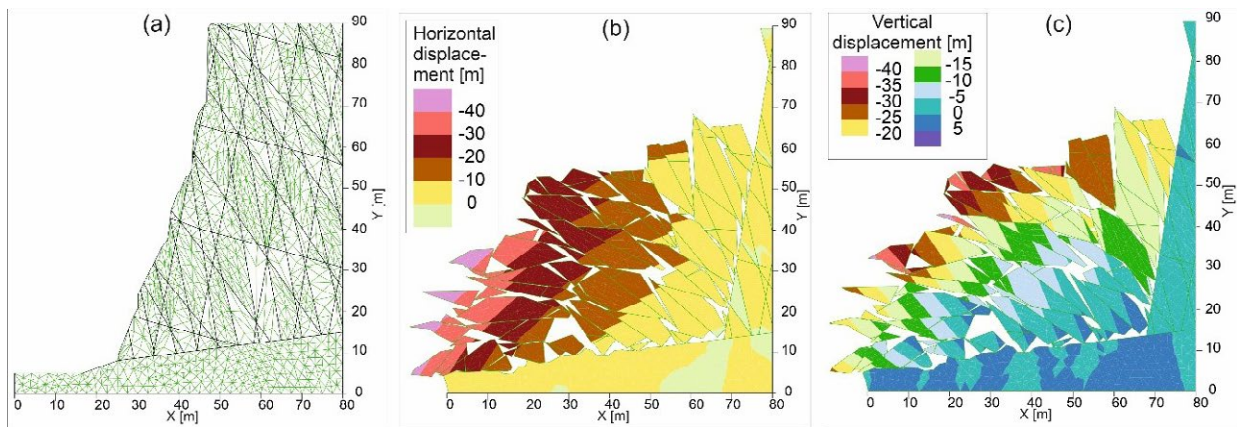
Tabela 4. Parametry geotechniczne spękań w przekroju C–C'.

Table 4. Geotechnical parameters of joints in cross-section C–C'.

tutaj podejście jest mało znane i raczej rzadko stosowane w praktyce. Taki stan rzeczy wynika m.in. z faktu, że istnieje niewiele modeli i programów komputerowych, które umożliwiają przeprowadzenie takich analiz. Jednym z nich jest Universal Distinct Element Code (UDEC) [Cundall 1971, s. 2–8]. Jest to obecnie bardzo zaawansowane narzędzie, pozwalające na wykonywanie skomplikowanych analiz złożonych układów geomechanicznych w układzie płaskim lub

block, and thus the correct relationship between the spacings of the joint systems.

The “discontinuous” approach has many advantages, but the vast majority of analyzes of deformation/destruction processes use methods and models based on the mechanics of continuous media, without taking into account joints and their properties. The approach described above is poorly known or even unknown. This is due, among other things, to the fact that there are few models and



Ryc. 7. Przekrój A–A': a) podział modelu na bloki skalne i strefę różnic skończonych, b) pole przemieszczenia poziomego, c) pole przemieszczenia pionowego w końcowej fazie symulacji procesu deformacji.

Fig 7. Section A–A': a) division of the model into rock blocks and finite difference zone, b) horizontal displacement field, c) vertical displacement field in the final stage of the simulation of the deformation process.

przestrzennym. Program UDEC pozwala na symulację praktycznie wszystkich możliwych mechanizmów deformacji, takich jak poślizg, osuwanie czy wypiętrzanie, z uwzględnieniem praw statyki i swobody ruchu bloków [Marcato et al. 2005, s. 87–92].

#### Geometria i parametry geotechniczne obiektu

Parametry zarówno oryginalnej płyty skalnej, jak i łupków ilastych oraz spękań, wyznaczone na podstawie analizy wstecznej przeprowadzonej przez autorów, podano w tabelach 1 i 2. W tabeli 1 zestawiono parametry masywu skalnego budującego zbocze klifu, natomiast parametry wytrzymałości na ścinanie spękań, przy których występuje stan równowagi granicznej, zamieszczono w tabeli 2. Założono, że parametry kontaktu na styku masywu osuwiska z leżącym poniżej iłem są identyczne. Ponieważ wyniki symulacji numerycznej procesu deformacji nie były zadowalające, parametry geomechaniczne wyznaczono metodą prób i błędów.

Tabele 3 i 4 zawierają parametry litej skały i spękań dla przekroju C–C' określone na podstawie [D'Ambra et al. 2004, s. 103–113].

#### Analiza procesu osuwiskowego w przekroju A–A'

Podział modelu masywu na bloki skalne (ryc. 7a) uwzględnia rzeczywisty rozstaw spękań i ich orientację przestrzenną w płaszczyźnie analizy [Zabuski, Marcato 2014, s. 308–316]. Podłoże skalne bryły składające się z łupków ilastych zamodelowano jako pojedynczy blok. Ze względu na brak pełnych danych nie uwzględniono zmian gęstości spękań wraz ze wzrostem odległości od krawędzi ściany.

Pola przemieszczenia poziomego i pionowego w końcowej fazie symulacji numerycznej przedstawiono na ryc. 7b i c. Przemieszczenie poziome w stosunku do pionowego w początkowej fazie procesu deformacji jest stosunkowo niewielkie, co oznacza, że na tym etapie dominuje obwał (ang. *toppling*). Jednak w później-

computer programs that allow such analyses to be carried out. One of them is the Universal Distinct Element Code (UDEC) program, and the author of its first version was Cundall [1971, pp. 2–8]. It is now a very advanced tool, allowing to perform complex analysis of complicated geomechanical systems in a plane or spatial state. UDEC practically allows simulation of all possible deformation mechanisms, such as a slippage, sliding or uplift, taking into account the laws of statics and freedom of motion of blocks [Marcato et al. 2005, pp. 87–92].

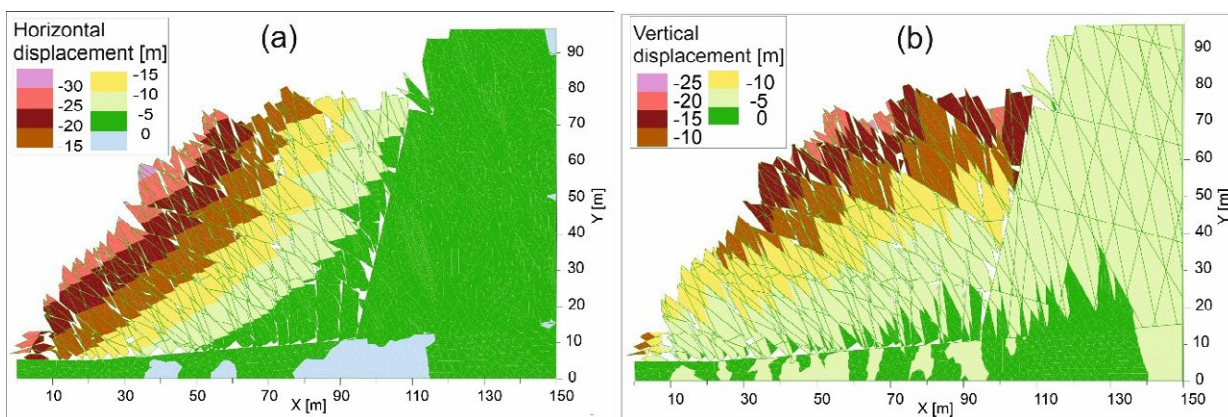
#### Geometry and geotechnical parameters of the site

The parameters of both the original rock slab, the clay shale and joints, as determined by the authors' back analysis, are given in Tables 1 and 2. The parameters of the rock massif that builds the cliff slope are summarized in Table 1, while the parameters of the shear strength of the joints, at which the boundary equilibrium condition occurs, are summarized in Table 2. It was assumed that the contact parameters at the interface between the landslide mass and the underlying clay are identical. Since the results of numerical simulation of the deformation process were not satisfactory, the geomechanical parameters were determined using the trial and error method.

Tables 3 and 4 contain the parameters of solid rock and joints for the C–C' section, determined by [D'Ambra et al. 2004, pp. 103–113].

#### Analysis of the landslide process in cross-section A–A'

The division of the massif model into rock blocks (Fig. 7a) takes into account the actual spacing of joints and their spatial orientation in the plane of analysis [Zabuski, Marcato 2014, pp. 308–316]. The bedrock solid consisting of clay shale was modeled as a single block. Due to the lack of complete data, changes in joint density with increasing distance from the wall edge were not considered.



Ryc. 8. Przekrój B–B': pole przemieszczenia: a) poziomego, b) pionowego, w końcowej fazie symulacji procesu deformacji.

Fig. 8. Cross-section B–B': displacement field a) horizontal, b) vertical, at the final stage of the simulation of the deformation process.

szych fazach symulacji inicjowane jest osuwisko i pole przemieszczenia poziomego przybiera formę zbliżoną do „klasycznego” osuwiska o (w przybliżeniu) kształcie kołowym (ryc. 7b). Przemieszczenie poziome dominuje nad pionowym i wynosi ok. 40 m, podczas gdy przemieszczenie pionowe, jedynie w rejonie niszy osuwiskowej, wynosi ok. 20÷25 m (ryc. 7c).

Symulacja została zakończona, gdy skrajny zakres przemieszczenia bloków przekroczył granicę modelu numerycznego (na lewo od  $X=0$ , ryc. 7b i c) [Itasca 2014, s. 1–73], mimo że stan równowagi nie został osiągnięty. Dalsza symulacja spowodowałaby wzrost przemieszczenia, a ostateczny kształt bryły osuwiskowej byłby podobny do widocznego na zdjęciach z rycin 4 i 5.

#### Analiza procesu osuwiskowego w przekroju B–B'

Założono, że parametry spękań w przekroju B–B' są takie same jak w przekroju A–A' (tab. 2). Przyjęto również, że ze względu na podobieństwo geometrii ściany klifu i właściwości geotechnicznych masywu mechanizm procesów osuwiskowych w obydwu przekrojach będzie podobny. Na rycinach 8a i b przedstawiono wyniki symulacji w postaci pól przemieszczenia odpowiednio poziomego i pionowego w końcowej fazie symulacji numerycznej. Przemieszczenie poziome wynosi ok. 30 m i dominuje nad przemieszczeniem pionowym, wynoszącym ok. 25 m; wynika to z osłabienia i poślizgu na kontakcie masywu skalnego z leżącymi poniżej łupkami ilastymi. Początkowa faza symulacji jest zdominowana przez obwał. Maksymalny kąt obrotu w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara wynosi 26,68°. Wraz ze wzrostem przemieszczenia obrót maleje, a w końcowym etapie symulacji maksymalny kąt obrotu bloków wynosi tylko 7,68°. Symulacja została zakończona analogicznie jak w przypadku przekroju A–A'.

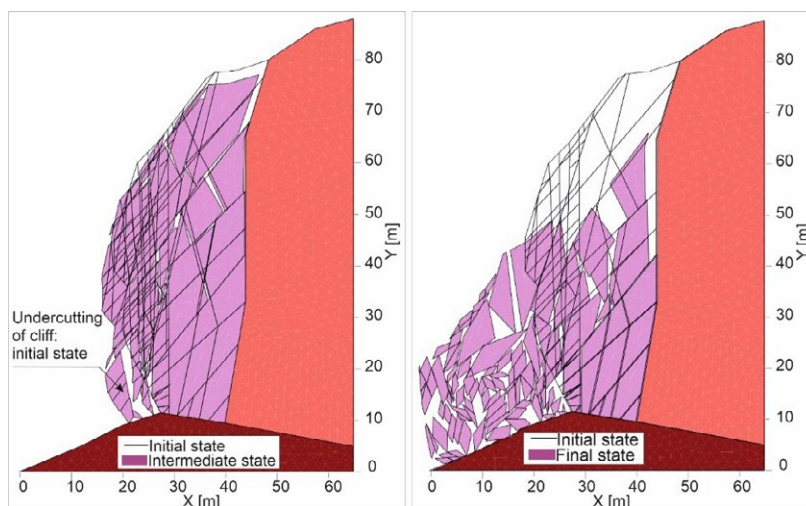
Wyniki obliczeń dla przekroju B–B' z parametrami określonymi metodą analizy wstecznej dla przekroju A–A' wykazują, że zbocze jest niestateczne. Nie jest to zgodne z rzeczywistością, gdyż ściana w tym przekroju jest stateczna. Dowodzi to, że właściwości masywu skalnego

The fields of horizontal and vertical displacement at the final stage of the numerical simulation are shown in Figures 7b and c. The horizontal versus vertical displacement at the initial phase of the deformation process is relatively small, indicating that toppling dominates here. However, in later stages of the simulation, a landslide is initiated, and the horizontal displacement field takes on a form similar to a “classic” landslide with an (approximately) circular shape (Fig. 7b). The horizontal displacement dominates the vertical one and is about 40 m, while the vertical displacement, only in the region of the landslide niche region, is about 20–25 m (Fig. 7c).

The simulation was terminated when the extreme range of block displacement exceeded the limit of the numerical model (to the left of  $X = 0$ , Fig. 7b and c) [Itasca 2014, pp. 1–73], although the equilibrium state was not reached. Further simulation would result in an increase in displacement, and the final shape of the landslide block would be similar to that seen in the images in Figures 4 and 5.

#### Analysis of the landslide process in the B–B' section

It was assumed that the joints parameters in cross-section B–B' are the same as in cross-section A–A' (Table 2). It was also assumed that due to the similarity of the geometry of the cliff wall and the geotechnical properties of the rock massif, the mechanism of landslide processes in both cross-sections would be similar. Figures 8a and b show the simulation results in the form of horizontal and vertical displacement fields, respectively, at the final stage of the numerical simulation. The horizontal displacement is about 30 m and dominates the vertical one, which is about 25 m; this is due to weakening and sliding at the contact between the rock massif and the underlying clay shale. The initial phase of the simulation is dominated by the toppling. The maximum angle of counterclockwise rotation is 26.68°. As the displacement increases, the rotation decreases, and in the final stage of the simulation the maximum



Ryc. 9. Przekrój C–C': osuwisko w pośrednim i końcowym stadium strefy zniszczenia na tle stanu początkowego.

Fig. 9. Cross-section C–C': landslide in the intermediate and final stages of the destruction zone against the initial condition.

są korzystniejsze niż masywu w osuwiskowym przekroju A–A'. Niemniej jednak, ze względu na podobieństwo przekrojów, potencjał osuwiskowy jest znaczny.

### Analiza stateczności klifu i proces deformacji w przekroju C–C'

Niemal pionowy klif w tym przekroju jest zagrożony obwałem lub obrywem. Intensywność (gęstość) spękań w masywie skalnym maleje w miarę oddalania się od powierzchni ściany. Zgodnie z tym strefa potencjalnego osuwiska została podzielona na silnie i średnio spękaną. Autorzy pracy [D'Ambra et al. 2004, s. 103–113] stwierdzili, że struktura i właściwości geomechaniczne klifu są niezwykle złożone, nie jest więc możliwe przeprowadzenie analizy stateczności klifu przy użyciu klasycznej metody równowagi granicznej. W przeciwieństwie do wniosku z tej pracy autorzy bieżącego artykułu przeprowadzili szczegółową i kompletną analizę stateczności klifu, uwzględniając również inżynierską metodę jego stabilizacji. Inicjacja zniszczenia masywu skalnego w strefie podstawy klifu i utrata jego stateczności może nastąpić wskutek naturalnego podcięcia. W konsekwencji cała ściana może utracić stateczność w wyniku stopniowego osuwania się bloków (ryc. 9). Warto wspomnieć, że D'Ambra i współpracownicy [2004, s. 103–113] wyciągnęli podobny wniosek, lecz ich analiza była ograniczona jedynie do symulacji początkowego etapu inicjacji osuwiska.

Aby uniknąć obwałenia i zniszczenia klifu, zaprojektowano jego wzmocnienie w postaci biernych kotew cementowych, zainstalowanych w otworach wiertniczych (ryc. 10a). Otwory powinny być stosunkowo długie ze względu na duży rozmiar ściany klifu (jej wysokość w tym regionie sięga prawie 100 m). Ostateczne parametry wynikowe kotew, tj. ich długość, rozstaw, średnicę, określono metodą prób i błędów oraz na podstawie analizy numerycznej.

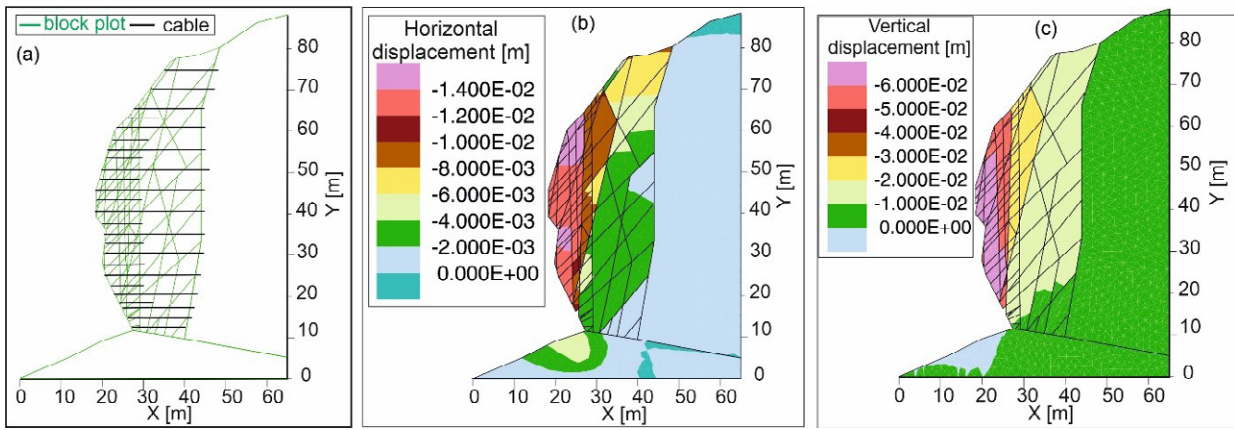
angle of block rotation is only 7.68°. The simulation ended similarly to the A–A' section.

The results of calculations for cross-section B–B', with the parameters determined by the back analysis method for cross-section A–A', show that the slope is unstable. This is not consistent with reality because the wall in this cross-section is stable. This proves that the properties of the rock massif are more favorable than those in the cross-section A–A'. Nevertheless, due to the similarity of the cross-sections, the landslide potential is significant.

### Stability analysis of cliff and deformation process in C–C' section

The near-vertical cliff in this section is at risk of collapse or overthrow. The intensity (density) of joints in the rock massif decreases as one moves away from the wall surface. Accordingly, the zone of a potential landslide was divided into highly and moderately jointed. D'Ambra and co-workers [2004, pp. 103–113] stated that the structure and geomechanical properties of the cliff are extremely complex, so it is not possible to analyze the stability of the cliff using the classical limit equilibrium method. In contrast to the conclusion, the authors of this paper performed a detailed and complete analysis of the stability of the cliff, also taking into account the engineering method of stabilizing it. The initiation of the destruction of the rock massif in the zone of the base of the cliff and the loss of its stability can occur as a result of natural undercutting. As a result, the entire wall may lose stability due to gradual sliding of the blocks (Figure 9). It is worth mentioning that D'Ambra and co-workers [2004, pp. 103–113] drew a similar conclusion, but their analysis was limited only to simulations of the initial stage of landslide initiation.

In order to avoid sagging and destruction to the cliff, it was designed to be reinforced with passive ce-



Ryc. 10. Przekrój C–C': a) rozmieszczenie kotew w przypadku masywu skalnego wzmocnionego, b) poziome pola przemieszczenia, c) pionowe pola przemieszczenia.

Fig. 10. Section C–C': a) arrangement of anchor in the case of reinforced rock massif, b) horizontal, c) vertical displacement field.

Właściwości stali (kotew): długość – zależy od geometrii ściany; średnica – 8 cm; ciężar jednostkowy [siła/objętość] – 8,0 kN/m<sup>3</sup>; moduł sprężystości Younga stali kotew – 21 GPa; granica plastyczności przy ścisnieniu – 300 MPa; granica plastyczności przy rozciąganiu – 200 MPa.

Właściwości zaprawy cementowej (iniektu): sztywność na ścinanie [siła/jednostka długości kotwy/przesunięcie] – 25 MN/m/m; wytrzymałość na ścinanie [siła/jednostka długości kotwy] – 1000 kN/m.

Długość poszczególnych kotew może być zmienna w zależności m.in. od kształtu powierzchni ściany klifu. Intensywność spękań jest większa w strefach przy powierzchni ściany, dlatego długość kotew w tych miejscach wynosi 7÷8 m. Długość dłuższych kotew jest również zmienna i może dochodzić do nawet 30 m (ryc. 10a). Rozstaw krótszych kotew jest w przybliżeniu równy 1,5×1,0 m, a dłuższych (4,5÷5)×1,0 m.

Znaczny zakres prac związanych z wierceniem otworów może budzić obawy dotyczące możliwych uszkodzeń klifu wskutek efektów dynamicznych w strefie wierceń. Jednakże wysoka wytrzymałość masywu skalnego praktycznie uniemożliwi powstawanie uszkodzeń, np. spękań wtórnych. Ponadto bardzo korzystnym efektem wpływającym na jakość masywu skalnego będzie tworzenie się mikropęknięć wokół wierconych otworów. Korzyść wynika z powstania strefy wzmocnionej poprzez iniekcję cementową i „sklejanie” ewentualnych mikropęknięć.

Warto zauważyć, że wzmocnienie klifu biernymi kotwami nie będzie miało wpływu na posadowienie twierdzy, a tym samym na jej spękania czy uszkodzenia. Z punktu widzenia ochrony konserwatorskiej istotne jest, aby proponowane rozwiązanie pozwalało na zachowanie walorów krajobrazowych, co nie byłoby możliwe przy wykorzystaniu innych rozwiązań, np. często stosowanej w takim przypadku palisady czy muru oporowego. Widoczne części kotew można bowiem zasłonić rodzimą skałą bądź roślinnością. Należy

ment anchors installed in boreholes (Fig. 10a). The boreholes should be relatively long due to the large size of the cliff wall (its height in this region reaches almost 100 m). The final resulting parameters of the anchors, i.e. their length, spacing, diameter, were determined by trial and error and numerical analysis.

Properties of steel (anchors): length – depends on the geometry of the wall; diameter – 8 cm; unit weight [force/volume] – 8.0 kN/m<sup>3</sup>; Young's modulus of elasticity – 21 GPa; compressive yield strength – 300 MPa; tensile yield strength – 200 MPa.

Properties of cement mortar (injection): shear stiffness [force/unit anchor length/slip] – 25 MN/m/m; shear strength [force/unit of anchor length] – 1,000 kN/m.

The length of particular anchors can vary depending on the shape of the cliff wall surface, among other factors. The intensity of joints is greater in zones near the wall surface, so the length of anchors in these areas is 7÷8 m. The length of the longer anchors is also variable and can reach up to 30 m (Fig. 10a). The spacing of the shorter anchors is approximately 1.5 × 1.0 m, and the longer anchors are (4.5÷5) × 1.0 m.

The considerable amount of work involved in drilling the boreholes may raise concerns about possible damage to the cliff due to dynamic effects in this zone. However, the high strength of the rock massif will prevent the occurrence of damage, e.g. secondary joints. In addition, a very beneficial effect affecting the quality of the rock massif will be the formation of micro-cracks around the drilled holes. The advantage comes from the formation of a reinforced zone by cement injection and the “gluing together” of any microcracks.

It is worth noting that the reinforcement of the cliff with passive anchors will not affect the foundation of the fortress, and thus its cracking or damage. From the conservation point of view, it is important that the proposed solution allows the preservation of landscape values, which would not be possible with other solu-

ponadto dodać, że w czasie wykonywania prac stabilizacyjnych niezbędny jest monitoring zachowania zarówno twierdzy, jak i jej bezpośredniego otoczenia.

We wszystkich przypadkach analizowanych pól deformacji po zastosowaniu środków zaradczych stan równowagi klifu został osiągnięty. Pozwoliło to na obliczenie współczynnika bezpieczeństwa, który wynosi  $F=1,23$ .

Ryciny 10b i c przedstawiają pola przemieszczenia poziomego i pionowego kotwionego masywu skalnego. Przemieszczenie pionowe jest ok. czterech razy większe niż przemieszczenie poziome. Przemieszczenia występują na stosunkowo niewielkich głębokościach. Jest to szczególnie widoczne w przypadku ryciny 10c. Znaczący jest tu wpływ dużego ciężaru kolumny klifu na odkształcenia kotew.

### Podsumowanie

Przeprowadzone w pracy symulacje ruchu osuwiska dla przekroju A–A' umożliwiły „rekonstrukcję” procesu deformacji, który wystąpił w rzeczywistości. Parametry geomechaniczne spękań odpowiadające stanowi równowagi granicznej wyznaczono za pomocą metody analizy wstecznej. Wykorzystując wyniki i wskazania otrzymane z analizy dla tego przekroju, przeprowadzono również analizę dla potencjalnego osuwiska w ważnym przekroju (B–B'), usytuowanym w niewielkiej odległości od A–A'. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość wystąpienia osuwiska także w pobliżu B–B'.

Przeanalizowano ponadto stateczność przekroju C–C', znajdującego się na niemal pionowej ścianie, usytuowanej bezpośrednio pod twierdzą. Wykazano potencjalną możliwość osunięcia się ściany klifu, a w konsekwencji jego obwałowania i zniszczenia twierdzy. Analiza przemieszczenia w przekroju położonym bezpośrednio pod twierdzą umożliwiła zaprojektowanie odpowiedniego zabezpieczenia konstrukcyjnego masywu skalnego w postaci biernych kotew cementowych. Rozwiązanie takie nie zaburza walorów krajobrazowych masywu skalnego, co jest istotne z punktu widzenia ochrony konserwatorskiej. Ważne jest obliczenie współczynnika stateczności zakotwionego klifu, który wynosi  $F=1,23$ .

Proaktywne podejście geotechniczne wydaje się uzasadnione w przypadku miasta San Leo, ze względu na jego bogate dziedzictwo kulturowe i naturalne. Podejście to umożliwi zrozumienie problemu w stanie przed wystąpieniem zagrożenia, pozwalając na identyfikowanie, w jaki sposób obiekt może ulec awarii w przyszłości, a także na zaplanowanie działań mających na celu zapobieżenie ewentualnym problemom. Cenne walory architektoniczne miasta wymagają starannej uwagi i troski, a jego przetrwanie jest ściśle związane z unikaniem problemów dotyczących stateczności skalnego masywu płyty i otoczenia. Położenie San Leo na stosunkowo smukłej skalnej płycie stwarza szczególnie niekorzystne warunki powiązane z procesami utraty

tions, such as the palisade or retaining wall commonly used in such cases. This is because the visible parts of the anchors can be covered up with native rock or vegetation. It should be added, moreover, that during the execution of stabilization work it is necessary to monitor the behavior of both the fortress and its immediate surroundings.

In all cases of the analyzed deformation fields, the equilibrium state of the cliff was reached after applying countermeasures. This allowed the computation of the factor of safety, which is  $F = 1.23$ .

Figures 10b and c show the fields of horizontal and vertical displacement of the anchored rock massif. The vertical displacement is about four times greater than the horizontal one. The displacements occur at relatively shallow depths. This is particularly evident in Figure 10c. The effect of the heavy weight of the cliff column on the deformation of the anchors is significant here.

### Conclusions

The landslide movement simulations carried out in this study for cross-section A–A' enabled the “reconstruction” of the deformation process that occurred in reality. The geomechanical parameters of the joints corresponding to the limit equilibrium state were determined using the back analysis method. Using the results and indications obtained from the analysis for this cross-section, an analysis was also carried out for a potential landslide in an important cross-section (B–B'), located a short distance from A–A'. The results obtained suggest that a landslide could also occur in the vicinity of B–B'.

In addition, the stability of the C–C' cross-section, located on a near-vertical wall situated directly below the fortress, was analyzed. The potential possibility of the cliff walls slipping and, consequently, of its collapse and the destruction of the fortress was demonstrated. Analysis of the displacement in the cross-section located directly under the fortress made it possible to design appropriate structural protection of the rock massif, in the form of passive cement anchors. Such a solution does not disturb the landscape value of the rock massif, which is important from a conservation point of view. It is important to compute the safety factor of the anchored cliff, which is  $F = 1.23$ .

The proactive geotechnical approach seems justified in the case of the town of San Leo, due to its rich cultural and natural heritage. This approach makes it possible to understand the problem in a pre-emergency state, allowing how the object may fail in the future, as well as to plan actions to prevent possible problems. The town's priceless architectural values require careful consideration and care, and its survival is closely linked to avoiding problems concerning the stability of the rock massif and the surrounding area. The location of San Leo on a relatively slender rock slab creates particularly unfavorable

stateczności otaczających go stromych zboczy. Ich postępujące niszczenie w wyniku ruchów osuwiskowych skutkuje zmniejszeniem rozmiarów płyty, na której zbudowane jest miasto, i stopniowo zwiększa niebezpieczeństwo uszkodzenia zabytkowych budynków. Można się spodziewać, że w dalszej przyszłości w sytuacji niezastosowania odpowiednich środków zaradczych mogą bezpowrotnie zniknąć cenne zabytki. Mimo że zabezpieczenie klifowego zbocza skalnego w analizowanym przypadku może być kosztowne, ratowanie tak wartościowego dziedzictwa kulturowego, jakim jest San Leo, powinno stanowić zadanie nadrzędne.

Zaproponowane w pracy proaktywne podejście geotechniczne może być stosowane w wielu innych przypadkach, gdy zagrożone jest dziedzictwo kulturowe i naturalne. Uzyskane wyniki mogą być pomocne w rozwiązywaniu praktycznych problemów, w tym w podejmowaniu decyzji społecznych i gospodarczych.

conditions associated with the processes of loss of stability of the surrounding steep slopes. Their progressive destruction by landslide movements results in a reduction in the size of the slab on which the town is built, and gradually increases the danger of damage to historic buildings. It can be expected that in the further future, in the absence of appropriate countermeasures, valuable monuments may disappear irretrievably. Although securing the cliff rock slope in the case under review may be costly, saving such a valuable cultural heritage as the town of San Leo should be an overriding task.

The proactive geotechnical approach proposed in the paper can be applied to many other cases where cultural and natural heritage is threatened. This study's results can be helpful in solving practical problems, including in social and economic decision-making.

## Bibliografia / References

### Opracowania / Secondary sources

- Abad Patricia Valle, Fernández Adolfo Fernández, Nóvoa Alba Antía Rodríguez, *Lost archaeological heritage: virtual reconstruction of the medieval castle of San Salvador de Todea*, „Virtual Archaeology Review” 2022, t. 3, nr 26.
- Anthopoulou Barbara, Panagopoulos Andreas, Karyotis Theodore, *The impact of land degradation on landscape in Northern Greece*, „Landslides” 2006, t. 3.
- Bandis Stavros, Lumdsen Alastair, Barton Nick Ryland, *Fundamentals of Rock Joint Deformation*, „International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts” 1983, t. 20.
- Benedetti Gianluca, Bernardi Matteo, Borgatti Lisa, Continelli Francesca, Ghirotti Monica, Guerra Cristiano, Landuzzi Alberto, Lucente Claudio Corrado, Marchi Gianfranco, *San Leo: centuries of coexistence with landslides*, [w:] *Landslide science and practice*, red. Claudio Margottini, Paolo Canuti, Kyoji Sassa, Heidelberg–Berlin 2011, t. 6.
- Borgatti Lisa, Guerra Cristiano, Nesci Olivia, Romeo Roberto Walter, Veneri Francesco, Landuzzi Alberto, Benedetti Gianluca, Marchi Gianfranco, Lucente Claudio Corrado, *The 27 February 2014 San Leo landslide (northern Italy)*, „Landslides” 2015, t. 12.
- Bozzano Francesca, Bretschneider Alberto, Martino Salvatore, *Stress-strain history from the geological evolution of the Orvieto and Radicofani cliff slopes (Italy)*, „Landslides” 2008, t. 5.
- Bromhead Edward, Canuti Paolo, Ibsen Maia Laura, *Landslides and cultural heritage*, „Landslides” 2006, t. 3.
- Canuti Paolo, Margottini Claudio, Fanti Riccardo, Bromhead Edwards, *Cultural Heritage and Landslides: Research for Risk Prevention and Conservation*, [w:] *Landslides – Disaster Risk Reduction*, red. Kyoji Sassa, Paolo Canuti, Berlin–Heidelberg 2009.
- Caturani Antonio, Ribacchi Renato, Tommasi Paolo, *The San Leo Cliff (Italy): stability conditions and remedial measures*, VIIth ISRM Congress, International Symposium on Rock Mechanics, Aachen 1991, t. 2.
- Chakraborty Arunav, Goswami Diganta, *State of the art: Three Dimensional (3D) Slope-Stability Analysis*, „International Journal of Geotechnical Engineering” 2016, t. 10, nr 5.
- Chen Guangqi, Zheng Lu, Zhang Yingbin, Wu Jian, *Numerical Simulation in Rockfall Analysis: A Close Comparison of 2-D and 3-D DDA*, „Rock Mechanics and Rock Engineering” 2012, t. 46.
- Cundall Peter, *A Computer Model for Simulating Progressive Large Movements in Blocky Rock Systems*, Rock Fracture Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics, Nancy 1971, t. 1.
- Cundall Peter, Hart Roger, *Numerical Modelling of Discontinuities*, [w:] *Comprehensive Rock Engineering*, red. John Hudson, Oxford–New York–Seoul–Tokyo 1993, t. 2.
- D’Ambra Sonia, Giglio Giovanni, Lembo-Fazio Albino, *Interventi di Sistemazione e Stabilizzazione della Rupe di San Leo (Arrangement and Stabilization of the San Leo Cliff)*, International Symposium INTERPRAEVENT 2004, Riva/Trent 2004.
- Delmonaco Giuseppe, Margottini Claudio, Spizzichino Daniele, *Low impact interventions for the preservation of Cultural Heritage: the dying town of Civita di Bagnoregio (Central Italy) and the killer landslide. In Protection of Historical Buildings*, PROHITECH 09, London 2009.
- Doğan Yalin Umur, Isik Nihat Sinan, *Comparison of 2D–3D limit equilibrium and finite element methods for the analysis of bi-planar rock slope failures*, [w:] *The Evolution of Geotechnics – 25 Years of Innovation*, red. Reginald Hammah, Thamer Jaocub, Alison McCuillan, John Curran, Boca Raton 2022.



- Donati Davide, Dough Stead, Elmo Davide, Borgatti Lisa, *Preliminary Investigation on the Role of Brittle Fracture in the Kinematics of the 2014 San Leo Landslide*, „Geosciences” 2019, t. 9, nr 256.
- Ghirelli Valentina Alena, Borgatti Lisa, Dellapasqua Mirko, Mandanici Emanuele, Spreafico Margherita Cecilia, Tini Maria Alessandra, Bitelli Gabriele, *Integration of geomatics techniques for digitizing highly relevant geological and cultural heritage sites: The case of San Leo (Italy)*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 26th International CIPA Symposium 2017, Ottawa 2017, t. 42(2)/W5.
- Havaej Mohsen, Stead Doug, Eberhardt Erik, Fisher Brendan, *Characterization of bi-planar and ploughing failure mechanisms in footwall slopes using numerical modelling*, „Engineering Geology” 2014, t. 178.
- Hoek Evert, Bray John, *Rock Slope Engineering*, London 1974.
- Hrubesova Eva, Mohyla Marek, *Back Analysis Methods in Geotechnical Engineering*, „Advanced Materials Research” 2014, t. 1020.
- Itasca Consulting Group, *FLAC 2D Manual*, Minneapolis 2014.
- Justo Jose Luis, Azañón Jose Miguel, Azor Antonio, Saura Juan, Durand Percy, Villalobos Miguel, Morales Antonio, Justo Enrique, *Neotectonics and slope stabilization at the Alhambra, Granada, Spain*, „Engineering Geology” 2008, t. 100.
- Kulczykowski Marek, Przewłócki Jarosław, Konarzewska Bogusława, *Application of Soil Nailing Technique for Protection and Preservation Historical Buildings*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 245 (WMCAUS), Praga 2017.
- Laskowicz Izabela, Mrozek Teresa, *Sacred Historical Heritage Affected by Landslides in the Polish Flysch Carpathians*, [w:] *Engineering Geology for Society and Territory*, red. Giorgio Lollino, Daniele Giordan, Cristian Marunteanu, Basiles Christaras, Iwasaki Yoshinori, Claudio Margottini, Cham 2015, t. 8.
- Marcato Gianluca, Silvano Sandro, Zabuski Lesław, *Modellazione di ammassi rocciosi instabili con il metodo degli elementi distinti*, „Giornale di Geologia Applicata” 2005, t. 2.
- Milkulėnas Vidas, Minkevičius Vytautas, Satkūnas Jonas, *Ljubljana Gediminas's Castle Hill (in Vilnius) case: slopes failure through historical times until present*, Proceedings of World Landslide Forum 4, May 29–June 2, 2016.
- Mineo Simone, Pappalardo Giovanna, Onorato Salvatore, *Geomechanical Characterization of a Rock Cliff Hosting a Cultural Heritage through Ground and UAV Rock Mass Surveys for its Sustainable Fruition*, „Sustainability” 2021, t. 13.
- Muceku Ylber, Korini Oltion, *Landslide and slope stability evaluation in the historical town of Kruja, Albania*, „Natural Hazards and Earth System Sciences” 2014, t. 14.
- Ribacchi Renato, Sciotti Mario, Tommasi Paolo, *Stability problems of some towns in central Italy: Geotechnical situations and remedial measures*, IAEG International Symposium on Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites, Athens 1988, t. 1.
- Ribacchi Renato, Tommasi Paolo, *Instability problems of the San Leo Cliff*, [w:] *Reading historical sites through geotechnical evidence*, ISSMFE TC19 and AGI 1989.
- Ribacchi Renato, Tommasi Paolo, *Preservation and protection of the historical town of San Leo (Italy)*, [w:] *Proceedings IAEG International Symposium on Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*, red. Paul Marinos, George Koukis, Athens 1988, t. 1.
- Siegesmund Siegfried, Friedel Carl-Heinz, Vogel Johannes, Mosch Stephan, Naumann Dirk, Peter Andreas, Giesen Hans, *Stability assessment of sandstones from the St. Servatius Church in Quedlinburg*, (UNESCO's World Heritage Site, Germany) Environmental Earth Sciences 2010, t. 63.
- Spreafico Margherita Cecilia, Bacenetti Marco, Borgatti Liza, Pellegrini Maurizio, Perotti Luigi, *Structural analysis of San Leo (RN, Italy) east and north cliffs using 3D point clouds*, European Geosciences Union General Assembly, Vienna 2013, t. 15.
- Spreafico Margherita Cecilia, Cervi Federico, Francioni Mirko, Stead Doug, Borgatti Lisa, *An investigation into the development of toppling at the edge of fractured rock plateaus using a numerical modelling approach*, „Geomorphology” 2017, t. 288.
- Spreafico Margherita Cecilia, Cervi Federico, Petronici Francesca, Borgatti Lisa, *Modelling groundwater and slope processes in a calcarenitic slab: The case of San Leo (northern Apennines)*, „Rendiconti Online Della Società Geologica Italia” 2015, t. 34.
- Spreafico Margherita Cecilia, Francioni Mirko, Cervi Federico, Stead Doug, Bitelli Gabriele, Ghirotti Monica, Girelli Valentina Alena, Lucente Claudio Corrado, Tini Maria Alessandra, Borgatti Lisa, *Back Analysis of the 2014 San Leo Landslide Using Combined Terrestrial Laser Scanning and 3D Distinct Element Modelling*, „Rock Mechanics and Rock Engineering” 2016a, t. 49.
- Spreafico Margherita Cecilia, Stead Doug, Borgatti Lisa, *How rock block shape can influence the kinematics and direction of slope displacement: Results from the San Leo rock plateau, Italy*, [w:] *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, London 2016b, t. 3.
- Tagliavini Fabrizio, Reichenbach Paola, Maragna Dafne, Guzzetti Fausto, Pasuto Alessandro, *Comparison of 2-D and 3-D computer models for the M. Salta rock fall, Vajont Valley, northern Italy*, „Geoinformatica” 2009, t. 13.
- Tapete Deodato, Casagli Nicola, Luzi Guido, Fanti Riccardo, Gigli Giovanni, Leva Davide, *Integrating radar and laser-based remote sensing techniques for monitoring structural deformation of archaeological monuments*, „Journal of Archaeological Sciences” 2013, t. 40.
- The 32nd International Geological Congress, Italy, August 20–28, 2004.

Tommasi Paolo, Rotonda Tatiana, *Analysis of deformations occurring at the edge of a rock cliff underneath a historical center*, VIIIth ISRM International Congress On Rock Mechanics, Tokyo 1995, t. 1.

Vlcko Jan, Greif Vladimir, Grof Vladimir, Jezny Michal, Petro Lubomir, Brcek Martin, *Rock displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia*, „Environmental Geology” 2009, t. 58.

Zabuski Lesław, Marcato Gianluca, *Analiza procesów deformacji zboczy z uwzględnieniem nieciągłego charakteru*

*masywu*, „Przegląd Geologiczny” 2014, t. 62, z. 6.

Zabuski Lesław, Przewłócki Jarosław, *Analiza stateczności i stabilizacji zbocza osuwiskowego na trasie linii kolejowej w Świnnej Porębie*, „Inżynieria Morska i Geotechnika” 2019, nr 3.

Zabuski Lesław, Przewłócki Jarosław, *Stability analysis of a road scarp in the Carpathian Mountains and methods of its protection*, World Multidisciplinary Civil Engineering–Architecture–Urban Planning Symposium (WMCAUS), Prag 2018.

---

## Streszczenie

Artykuł dotyczy miasta San Leo, znanego z atrakcyjnych zabytków historycznych, zwłaszcza twierdzy Rocca Fortezza stanowiącej architektoniczne arcydzieło. Jest ona położona na wysokiej skale, której zbocza od setek lat ulegały procesom osuwiskowym. Najpoważniejsze osuwisko miało miejsce w 2014. Aby uniknąć potencjalnej katastrofy i zapewnić bezpieczeństwo miastu, w pracy przeprowadzono analizę proaktywną, polegającą na przewidywaniu problemu i podejmowaniu działań w celu zminimalizowania możliwych trudności związanych ze statecznością obiektów. Parametry geomechaniczne określono metodą analizy wstecznej dla przekroju, w którym wystąpiło ostatnie rozległe osuwisko. Obliczenia numeryczne wykonano przy użyciu metody elementów oddzielnych (DEM). Dla wyznaczonych parametrów przeprowadzono analizę stateczności i deformacji w przekroju potencjalnie niekorzystnym. Ponadto przeanalizowano przekrój klifu znajdujący się bezpośrednio pod twierdzą, dla którego zaproponowano środki stabilizujące.

## Abstract

The paper is about the town of San Leo, known for its attractive historical monuments, especially the Rocca Fortezza fortress, which is an architectural masterpiece. It is situated on a high rock, the slopes of which have been subject to landslide processes for hundreds of years. The most serious one occurred in 2014. In order to avoid a potential catastrophe and ensure the safety of the city, the study conducted a proactive analysis, which consists of anticipating the problem and taking appropriate measures to minimize unforeseen difficulties. Geomechanical parameters were determined using the back analysis method for a cross-section located in the vicinity of the city, where the last extensive landslide occurred. Numerical calculations were performed using the distinct element method (DEM). A stability and deformation analysis was carried out for the determined parameters in a potentially unfavorable cross-section located nearby. In addition, a cross-section of the cliff directly below the fortress was analyzed, for which countermeasures were proposed.