

## Podatność osuwiskowa obszaru Krakowa

Sylwester Kamieniarz<sup>1</sup>



Landslide susceptibility of Kraków city area. *Prz. Geol.*, 70: 701–712; doi: 10.7306/2022.24

*A b s t r a c t.* Due to the differentiation of landslides in Kraków city area, an artificial neural network method (multilayer perceptron) was used to determine the landslide susceptibility (LS). The calculations were performed in the *r.landslide* module. The network learning was carried out on the basis of 8 thematic layers (slopes, slope exposure, absolute height, relative height, convergence index, surface lithology, sub-Quaternary lithology, distance from tectonic discontinuities). For modelling, 434 points representing landslides and the same number of points of locations without landslides were used. Among the set of points, 70% was allocated to the training phase, 15% to the validation phase, and 15% to the test phase. In order to assess the network performance, based on the results of the test phase, a confusion matrix was made. Approximately 22% of the city's area is susceptible to landslide occurrence ( $LS > 0.05$ ). It overlaps existing landslides and cover areas where they have not occurred yet. The greatest number of areas susceptible to landslide occurrence is located in districts X (54% of the district area) and VII (47%). There are also the most susceptible areas ( $LS > 0.95$ ). The sensitivity analysis implemented in the module showed that among the thematic layers used for modelling the slopes, convergence index, distance from tectonic discontinuities and sub-Quaternary lithology have the greatest impact on the landslide susceptibility.

**Keywords:** landslides, landslide susceptibility, artificial neural networks, Kraków city area

Badania osuwisk na terenach miast historycznych należą do zadań trudnych (Rycio, 2020). W przypadku Krakowa pierwsze problemy pojawiają się już na etapie ich identyfikacji. Świadczy o tym chociażby liczba dotychczas wykonanych rejestrów osuwisk (Brzozowska, Brzozowski, 1970; Chowaniec i in., 2005, 2006, 2007; Wójcik, 2011, 2012; Kamieniarz i in., 2018). Rozbieżności w interpretacjach są spowodowane głównie intensywnymi i wieloetapowymi przekształceniami antropogenicznymi terenu miasta, które z jednej strony prowadzą do zacierania pierwotnych granic osuwisk, a z drugiej mogą tworzyć formy pozornie je przypominające. Złożoność problemu wynika również ze zróżnicowania obszaru pod względem budowy geologicznej i rzeźby terenu, co skutkuje występowaniem odmiennych typów osuwisk.

Prowadzone już od ponad 65 lat badania osuwisk na obszarze Krakowa sprowadzały się głównie do wyznaczenia ich zasięgu przestrzennego oraz określenia podstawowych parametrów, a w kilku przypadkach również do monitoringu wielkości i dynamiki przemieszczeń (Alexandrowicz, 1956; Wójcik i in., 2019). W świetle intensywnie postępującej urbanizacji terenu Krakowa samo rozpoznanie osuwiska i heurystyczna ocena zagrożenia są niewystarczające, a metody deterministyczne (np. obliczenia stateczności stoku, monitoring instrumentalny) są z reguły ograniczone do pojedynczych osuwisk lub zboczy. W związku z planowaniem nowych inwestycji budowlanych padają pytania, ze strony administracji samorządowej, dotyczące wprowadzania zaleceń i ograniczeń dla obszarów osuwiskowych oraz ich zasadności. Przedmiotem dyskusji są najczęściej dwa główne problemy: czy osuwisko już istniejące może się uaktywnić, jaka jest możliwość wystąpienia nowego osuwiska w obrębie danego zbocza?

Pokazuje to, że istnieje potrzeba opracowania dodatkowych narzędzi, które w sposób kompleksowy i możliwie obiektywny będą pomagały w odpowiedzi na tego typu

pytania i służyły (w określonym zakresie) jako wsparcie dla organów administracji samorządowej. Jednym z takich narzędzi jest mapa podatności osuwiskowej.

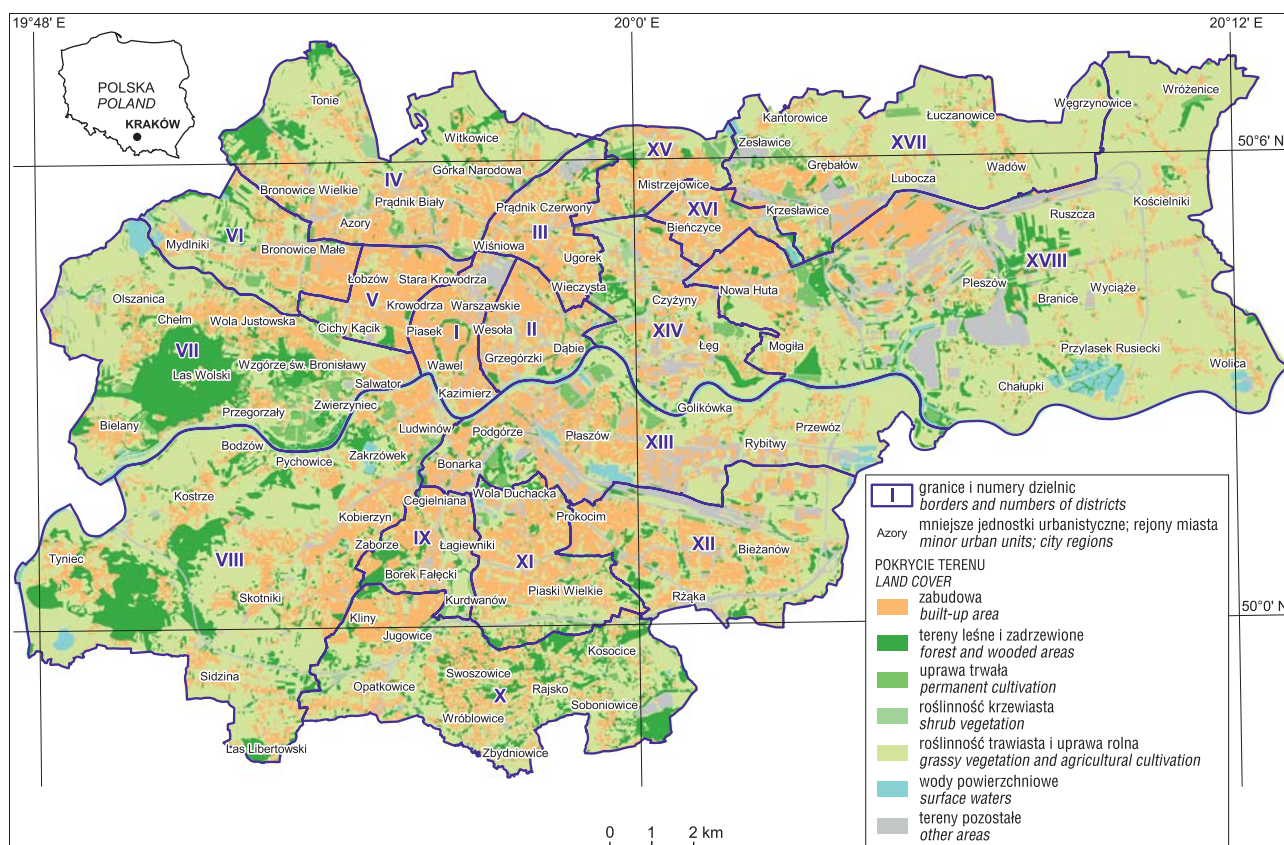
Podatność osuwiskowa (*landslide susceptibility*, LS) określa możliwość wystąpienia osuwiska w danym miejscu ze względu na istniejące tam warunki środowiskowe (Brabb, 1984). Jest wyłącznie wskazaniem, gdzie może wystąpić osuwisko, bez określenia w jakim czasie dojdzie do zdarzenia. Istnieją różne metody wyznaczania podatności osuwiskowej oraz ich klasyfikacji. W literaturze jest dostępnych wiele pozycji, które w sposób syntetyczny opisują te zagadnienia (np. Soeters, van Westen, 1996; Reichenbach i in., 2018).

Celem pracy jest wyznaczenie podatności osuwiskowej obszaru Krakowa przy użyciu sztucznych sieci neuronowych i wskazanie czynników środowiskowych, które mają na nią największy wpływ. W ramach przeprowadzonych badań przetestowano metodę dotychczas niestosowaną w Polsce do tego typu zadań, na obszarze mocno zurbanizowanym, o zróżnicowanej budowie geologicznej i rzeźbie terenu.

### CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Obszar badań wyznaczają granice administracyjne Krakowa (ryc. 1). Jego powierzchnia wynosi 326,85 km<sup>2</sup> i jest zamieszkiwany przez 782 100 mieszkańców (stan na 31.12.2021r.; <https://krakow.stat.gov.pl/>), co czyni go drugim co do wielkości i liczby ludności miastem w Polsce. W jego skład wchodzi 18 dzielnic (ryc. 1). Pod względem pokrycia terenu przeważają tereny z roślinnością trawiastą i uprawą rolną (48%; na podstawie Bazy Danych Obiektów Ogólnogeograficznych, BDOO; <http://geoportal.gov.pl/>; stan na 2015 r.). Zabudowa zajmuje ponad 27% powierzchni miasta, a tereny leśne i zadrzewione 11%.

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Centrum Geozagrożeń, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków; [skam@pgi.gov.pl](mailto:skam@pgi.gov.pl); ORCID: 0000-0002-8662-0491



**Ryc. 1.** Podział administracyjny i pokrycie terenu Krakowa (na podstawie BDOO; <http://geoportal.gov.pl>)  
**Fig. 1.** Administrative division and land cover of Kraków (based on BDOO; <http://geoportal.gov.pl>)

### Zarys budowy geologicznej

Kraków znajduje się na obszarze czterech jednostek tektonicznych: monokliny śląsko-krakowskiej w części zachodniej i północno-zachodniej, niecki miechowskiej w części północnej, zapadliska przedkarpacciego zajmującego przeważającą część obszaru miasta i Karpat zewnętrznych na południu (Rutkowski, 1989; Żyto i in., 1989). Podłoże mezozoiczne odsłania się w obrębie zrębów rozdzielonych rowami (ryc. 2). Im bliżej nasunięcia karpacciego, tym jego strop zalega głębiej. Wschodnia część miasta jest na ogół w całości przykryta osadami zapadliska przedkarpacciego. Najstarszymi elewowanymi utworami mezozoicznego podłoża są górnourajskie wapienie skaliste i uławiczone (Dżużyński, 1951; Rutkowski, 1989, 1992; Matyszkiewicz, 1993). Odsłaniają się one w zachodniej i centralnej części miasta (ryc. 2). Ich miąższość przekracza 230 m. Osady kredy górnej, reprezentowane głównie przez margle (lokalnie również wapienie i zlepieńce), tworzą zręby w północnej części miasta lub występują w postaci izolowanych płatów na utworach górnej jury (ryc. 2). Miąższość tego kompleksu dochodzi do ok. 30 m (Rutkowski, 1993).

Zapadlisko przedkarpaccie jest wypełnione utworami ilasto-piaszczystymi miocenu środkowego. W rejonie Krakowa można je podzielić na trzy kompleksy: podewaporatowy (warstwy skawińskie), ewaporatowy (warstwy wielkie) i nadewaporatowy (warstwy chodenickie, warstwy grabowieckie, piaski z Rajską, warstwy jarosławskie; ryc. 2). Pod względem tektonicznym w zapadlisku wyróżniane są dwie jednostki: autochtoniczna i allochtoniczna (Poborski, Skoczylas-Ciszewska, 1963; Oszczyppo, 2006).

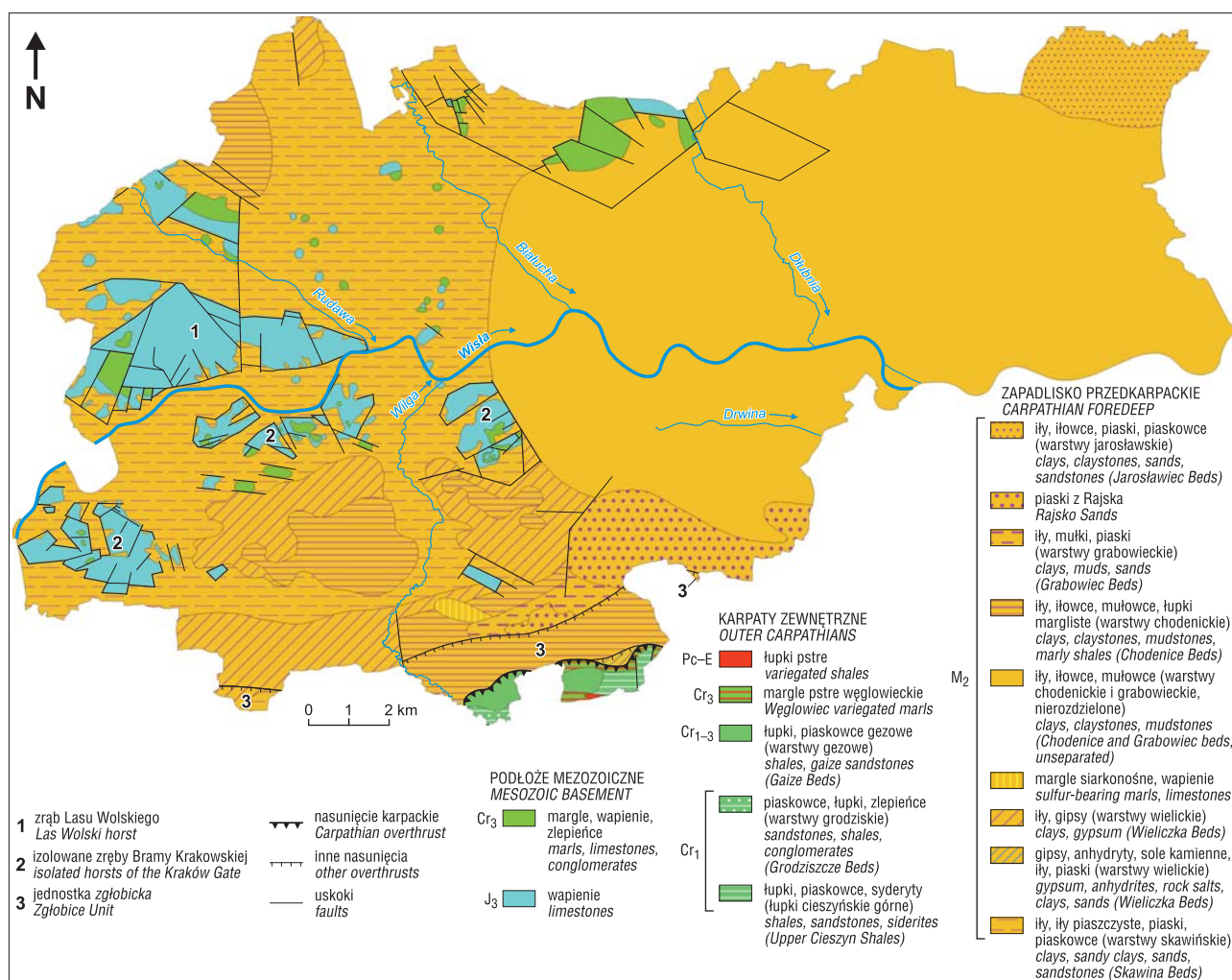
Ta druga, zwana również jednostką zgłębicką, stanowi wąski (do ok. 1,5 km) pas przemieszczonych i silnie zaburzonych tektonicznie osadów miocenu występujący bezpośrednio przed nasunięciem karpacciego (ryc. 2; Żyto i in., 1989). Miąższość utworów zapadliska przedkarpacciego na terenie Krakowa jest zmienna i waha się od kilku metrów – w rejonach elewacji podłoża mezozoicznego, do kilkuset metrów (~500 m) w części wschodniej i południowo-wschodniej.

Karpaty zewnętrzne na obszarze badań są reprezentowane przez łupki, piaskowce i margle (głównie kredowe) należące do płaszczowiny podśląskiej, które zostały nasunięte na osady zapadliska przedkarpacciego (ryc. 2; Żyto i in., 1989; Paul i in., 2016; Wójcik, 2017). Warstwy zapadają na południe lub południowy wschód pod kątem 23–35°. Miąższość jednostki podśląskiej w rejonie Krakowa dochodzi do ok. 300 m.

Utwory podłoża mezozoicznego, zapadliska przedkarpacciego i Karpat są w większości przykryte różnej miąższości osadami zdeponowanymi w okresie zlodowaceń plejstocenijskich oraz holocenijskimi aluwiami i nasypami (ryc. 3). Te ostatnie na terenie Krakowa występują dość powszechnie. Największy obszar ich występowania znajduje się we wschodniej części miasta, w rejonie Nowej Huty.

### Osuwiska

Osuwiska na terenie Krakowa koncentrują się w kilkunastu rejonach i są zróżnicowane pod względem gęstości występowania, typu i wielkości (ryc. 4; Wójcik, 2015; Wójcik i in., 2019). Najwięcej z nich znajduje się w po-



**Ryc. 2.** Szkic geologiczny Krakowa – odkryty (Kmietowicz-Drathowa, 1966; Rutkowski, 1993; Paul i in., 1996; Wójcik, 2007; Burtan, Wójcik, 2017; Wójcik, Lewandowski, 2021; Kamieniarz, 2021)

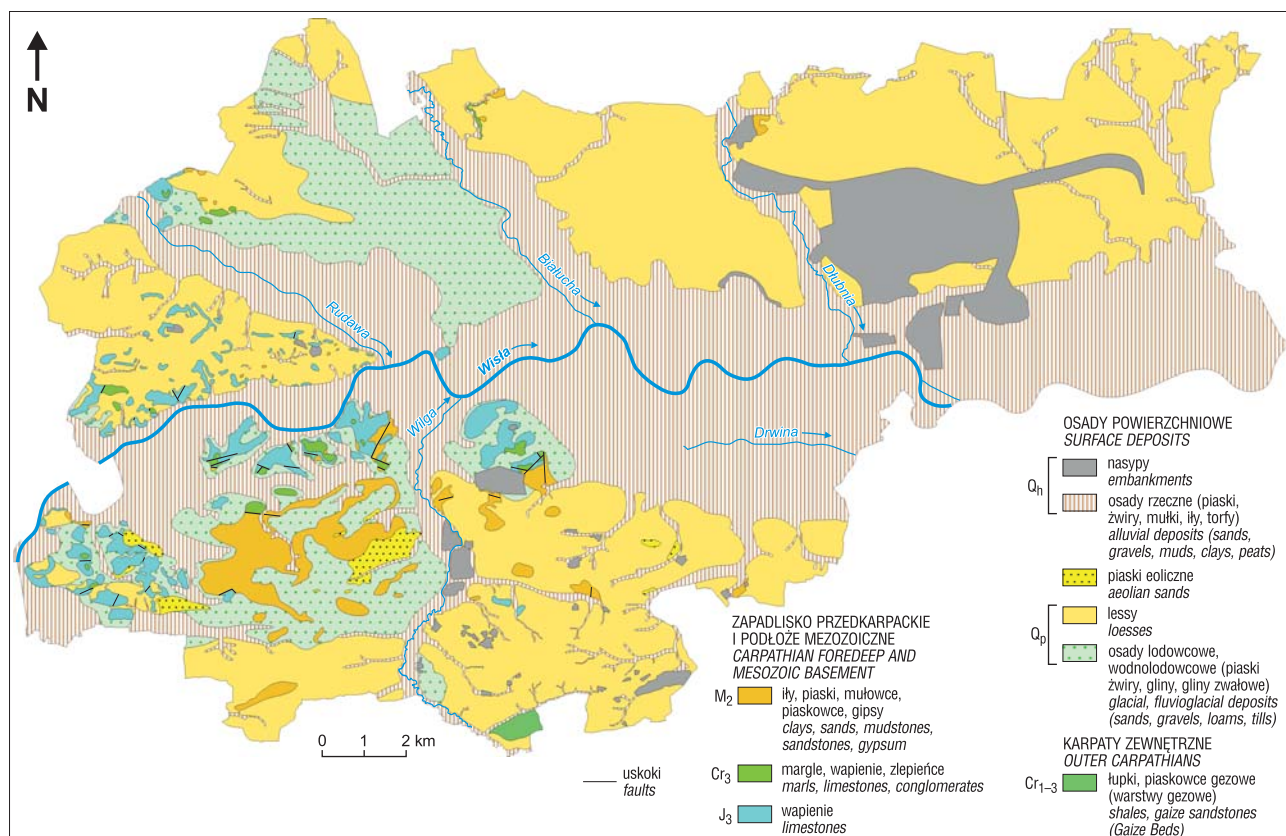
**Fig. 2.** Geological sketch-map of Kraków – uncovered (Kmietowicz-Drathowa, 1966; Rutkowski, 1993; Paul i in., 1996; Wójcik, 2007; Burtan, Wójcik, 2017; Wójcik, Lewandowski, 2021; Kamieniarz, 2021)

łudniowej części miasta, na obszarze Zbydniowic, Wróblowic, Rajska, Soboniowic i Kosocic, a także w okolicach Lasu Libertowskiego. Jest to związane głównie z nasunięciem karpackim i strefą zaburzonych tektonicznie iłów mioceńskich (ryc. 2, 4). Spośród typów osuwisk dominują zsuwy rotacyjne (*sensu* Dikau i in., 1996). Przeprowadzone dotychczas analizy rdzeni wiertniczych z kilkunastu osuwisk wykazały miąższości koluwiów nieprzekraczające 15 m (np. Jaskólski i in., 2011). Jednak na podstawie parametrów morfometrycznych szacuje się, że w przypadku największych form ich głębokość może dochodzić do 30 m (Wójcik i in., 2019).

Kolejne duże nagromadzenie osuwisk znajduje się w zachodniej części miasta, na północ od Wisły, na zrębie Lasu Wolskiego (ryc. 2, 4). Tak liczne występowanie stosunkowo dużych osuwisk jest związane przede wszystkim z utworami ilastymi miocenu, które w postaci niewielkich zatok sięgają wyższych partii zrębu (ryc. 2; Rutkowski, 1992; Felisiak i in., 2005). Osuwiska te w górnych częściach (a także mniejsze osuwiska w wyższych partiach zrębu) są zazwyczaj zsuwami translacyjnymi (wzdłuż granicy wapień-zwierzczelina, ił, less), a w środkowych i dolnych zsuwami rotacyjnymi w obrębie iłów (Wójcik, 2015). Miąższości

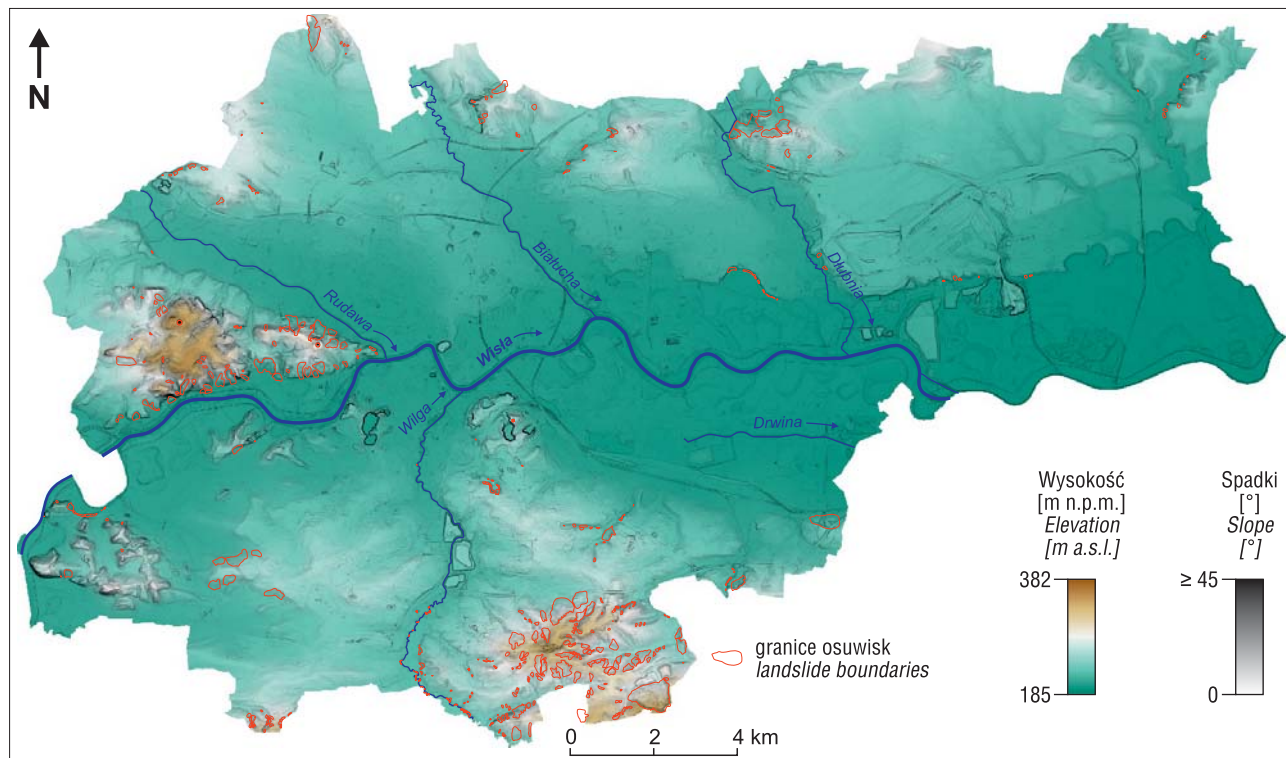
koluwiów największych osuwisk osiągają 7–13 m na południowej stronie zrębu. W części północno-wschodniej dochodzą nawet do 28 m (np. Jaskólski i in., 2013).

Na pozostałym obszarze miasta osuwiska tworzą mniejsze skupiska. Koncentrują się one w okolicach Tyńca, Bodzowa, Witkowic, Mistrzejowic, Mydlnik, Bronowic Małych, Skotnik, Piasków Wielkich, Bieżanowa, Toni, Zesławic, Kościelnik, Wróżeńic, a także wzdłuż skarpy tarasu wiślanego na odcinku pomiędzy Nową Hutą a Branicami (ryc. 1, 4). W pierwszych pięciu lokalizacjach osuwiska są związane z krawędziami morfologicznymi elewacji podłoża mezozoicznego, a ich uwarunkowania geologiczne są podobne jak w przypadku form zlokalizowanych w rejonie zrębu Lasu Wolskiego. Miąższość koluwiów zsuwów translacyjnych jest szacowana na 3–6 m, w przypadku zsuwów rotacyjnych dochodzi ona do 8–10 m. Oprócz tego w północno-zachodniej części Tyńca udokumentowano dwa obrywy (Alexandrowicz, 1956; Kamieniarz i in., 2018). Osuwiska w pozostałych lokalizacjach to głównie zsuwy rotacyjne. Większe formy obejmują autochtoniczne utwory miocenu zapadliska przedkarpackiego (np. w rejonie Skotnik, Toni, Zesławic; ryc. 1, 4). Ich głębokość dochodzi do 15–17 m (Wójcik i in., 2019).



Ryc. 3. Szkic geologiczny Krakowa – zakryty (Rutkowski, 1992; Felisiak i in., 2005; Wójcik, 2007, 2017; Gradziński, Gradziński, 2015; Paul i in., 2016; Wójcik, Lewandowski, 2020; Kamieniarz, 2021)

Fig. 3. Geological sketch-map of Kraków – covered (Rutkowski, 1992; Felisiak i in., 2005; Wójcik, 2007, 2017; Gradziński, Gradziński, 2015; Paul i in., 2016; Wójcik, Lewandowski, 2020; Kamieniarz, 2021)



Ryc. 4. Rozmieszczenie osuwisk na terenie Krakowa (Kamieniarz i in., 2018; Kamieniarz, 2021)

Fig. 4. Distribution of landslides in Kraków area (Kamieniarz i in., 2018; Kamieniarz, 2021)

## METODYKA BADAŃ

Do analiz wybrano wszystkie typy osuwisk. W celu zapewnienia procedowania złożonych, często nieliniowych interakcji pomiędzy zmiennymi wejściowymi, obliczenia przeprowadzono przy użyciu sztucznych sieci neuronowych. Na świecie metody te są wykorzystywane do badań podatności osuwiskowej od początku XXI w. (Lee i in., 2001, 2003; Ermini i in., 2005). W Polsce jest to pierwsza taka próba.

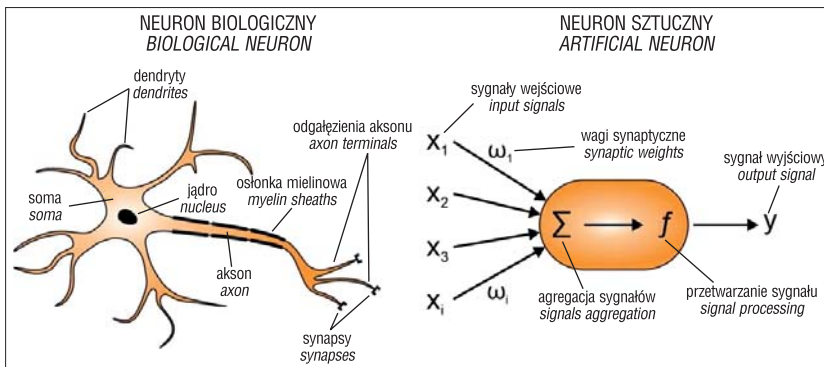
### Sztuczne sieci neuronowe – wprowadzenie

Sztuczne sieci neuronowe (*Artificial Neural Networks*, ANN) to algorytm lub urządzenie techniczne, którego działanie jest w pewnym stopniu wzorowane na działaniu sieci biologicznych komórek nerwowych (Tadeusiewicz, 1993). Składają się zazwyczaj z siatki połączonych ze sobą elementów – neuronów, z których każdy posiada określoną liczbę wejść, ale zawsze jedno wyjście. W neuronach biologicznych bodźce wejściowe są przekazywane poprzez synapsy (ryc. 5). We wnętrzu danej komórki nerwowej następuje agregacja wszystkich otrzymanych sygnałów wejściowych i wyznaczenie sygnału wyjściowego, który następnie jest odprowadzany za pomocą aksonu. Jego odgałęzienia łączą się z dendrytami i somą innych komó-

rek, tworząc kolejne synapsy. Podobnie jest w przypadku neuronu sztucznego. Dla każdej wartości sygnału wejściowego jest przypisana waga synaptyczna, która określa jego „istotność” (ryc. 5). Wewnątrz neuronu w pierwszej kolejności następuje agregacja otrzymanych sygnałów wejściowych i wag. Utworzony w ten sposób sygnał sumarycznego pobudzenia jest następnie przetwarzany za pomocą funkcji aktywacji, która określa sposób obliczania wartości sygnału na wyjściu neuronu (ryc. 5). Sygnały wyjściowe z poszczególnych neuronów są połączone z wejściami innych neuronów, tworząc sieć. Jednak w przeciwieństwie do systemów biologicznych, architektura tych połączeń jest określana w sposób arbitralny. Zależność pomiędzy wejściami a wyjściem jest modyfikowana dla każdego neuronu z osobna podczas procesu uczenia, który polega na iteracyjnym dostosowaniu parametrów sieci (głównie wartości wag synaptycznych) w taki sposób, aby jak najlepiej rozwiązywała ona określone zadanie (Tadeusiewicz, Szaleniec, 2015).

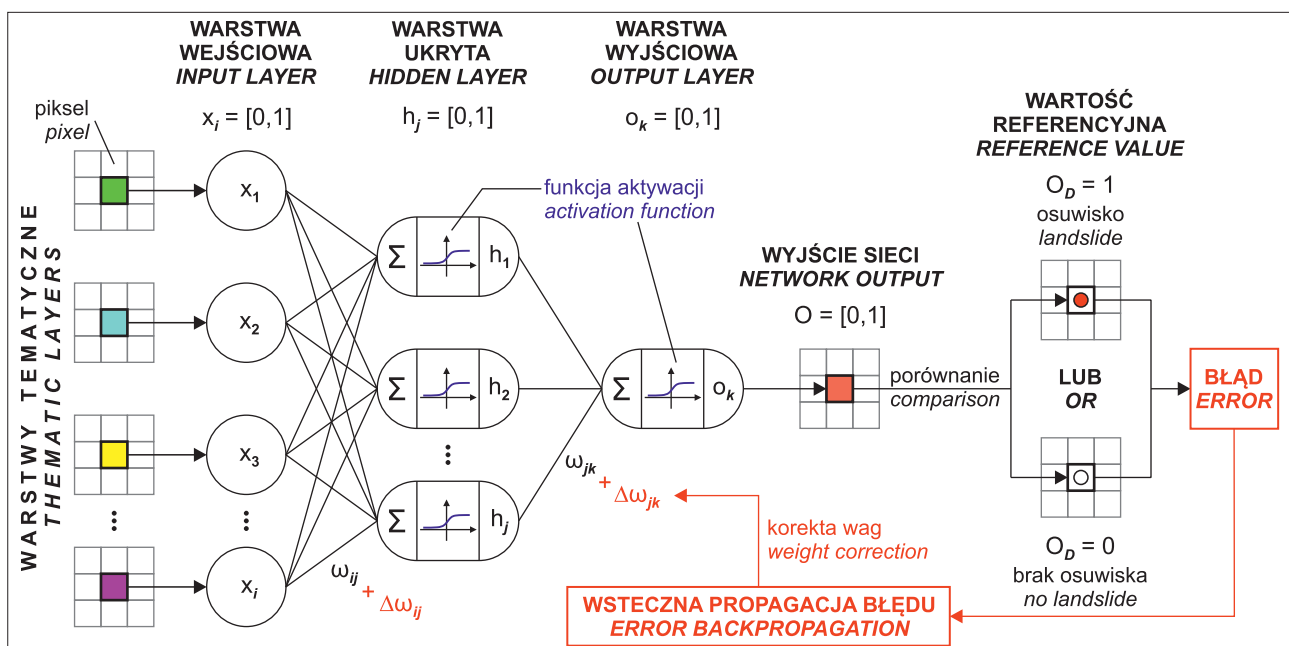
### Architektura i zasada działania ANN

Do obliczeń podatności osuwiskowej Krakowa wykorzystano moduł *r. landslide* (Bragagnolo, 2019b), który opracowano na bazie wielowarstwowego perceptronu z wykorzystaniem trzech warstw neuronów: wejściowej,



←

Ryc. 5. Budowa neuronu biologicznego i sztucznego (na podstawie Tadeusiewicza, 1993)  
Fig. 5. Structure of a biological and artificial neuron (based on Tadeusiewicz, 1993)



Ryc. 6. Architektura ANN  
Fig. 6. ANN architecture

ukrytej i wyjściowej (ryc. 6). Narzędzie używa dwóch typów danych wejściowych. Pierwszym z nich są warstwy tematyczne w postaci rastrowej, reprezentujące parametry środowiskowe warunkujące występowanie osuwisk ( $x_i$ ; ryc. 6). Drugim typem danych wejściowych jest zbiór współrzędnych punktów reprezentujących osuwiska oraz punktów, w których one nie występują. Są to informacje konieczne, aby umożliwić ANN poznanie kombinacji parametrów środowiskowych, które są charakterystyczne zarówno dla osuwisk, jak i dla obszarów, gdzie one nie występują (Bragagnolo i in., 2019b). Punktom osuwiskowym przypisana jest wartość referencyjna równa 1, a punktom nieosuwiskowym wartość referencyjna 0 ( $O_D$ ; ryc. 6).

Proces uczenia sieci neuronowej składa się z fazy treningu, walidacji i testu. Warstwy tematyczne biorą jednakowo udział we wszystkich fazach. Ze zbioru punktów osuwiskowych i nieosuwiskowych są natomiast wydzielane podzbiory przeznaczone osobno do treningu, walidacji i testów. Podział ten jest przeprowadzany automatycznie, na zasadzie wyboru losowego, po uprzednim określeniu proporcji punktów w poszczególnych podzbiórach. W momencie rozpoczęcia fazy treningu wartości początkowe wag synaptycznych ( $\omega_{ij}$ ,  $\omega_{jk}$ ; ryc. 6) są nadawane automatycznie w sposób losowy. Wartości na wyjściu neuronów w warstwie ukrytej i wyjściowej ( $h_j$ ,  $o_k$ ; ryc. 6) są obliczane z wykorzystaniem sigmoidalnej funkcji aktywacji. Błąd otrzymany w wyniku porównania zbioru wartości na wyjściu sieci ( $O$ ) ze zbiorem wartości referencyjnych ( $O_D$ ) jest minimalizowany w kolejnych epokach (iteracjach) poprzez korekty wartości wag synaptycznych ( $\Delta\omega_{ij}$ ,  $\Delta\omega_{jk}$ ) za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów (ryc. 6; Werbos, 1974).

Równoległe do treningu jest prowadzona faza walidacji, w której dokonuje się ocena zdolności sieci do generalizacji wyników uczenia przy wykorzystaniu podzbioru walidacyjnego punktów osuwiskowych i nieosuwiskowych. Jeżeli wartości błędów obliczone na podzbiórze treningowym oraz wartości błędów wyznaczone dla podzbioru walidacyjnego tendencyjnie maleją, algorytm uczący pozwala na przeprowadzenie kolejnej epoki, gdyż sieć jest wówczas jeszcze „niedouczona”. Proces ten trwa do momentu, kiedy wartość błędów walidacyjnego osiągnie minimum. Dzieje się tak dlatego, że często w kolejnych epokach błąd treningu nadal maleje, natomiast błąd walidacji zaczyna wzrastać, co prowadzi do zjawiska „przeuczenia sieci”. W takich sytuacjach uczenie jest przerywane (tzw. wczesne zatrzymanie), a sieć odzyskuje wartości wag synaptycznych z epoki poprzedzającej początek wzrostu błędów walidacji (Tadeusiewicz, Szaleniec, 2015). Po przeprowadzeniu fazy treningu i walidacji program wykonuje jednorazowe, dodatkowe sprawdzenie działania sieci pod względem dokładności i zdolności do generalizacji wyników przy wykorzystaniu podzbioru testowego punktów osuwiskowych i nieosuwiskowych (faza testu). Wynikowa powierzchnia podatności osuwiskowej jest generowana na podstawie wartości pochodzących z warstwy wyjściowej sieci.

Po nauczeniu ANN dodatkowo jest przeprowadzana analiza wrażliwości (*sensitivity analysis*) warstw tematycznych. Proces ten przebiega w oparciu o metodę próbkowania „jeden na raz” (*one-at-a-time*; Saltelli i in., 2008) i polega na zakłócaniu wartości jednej warstwy tematycznej, przy jednoczesnym utrzymywaniu stałych (nominal-

nych) wartości w pozostałych warstwach. W rezultacie generowane są wykresy, które dostarczają informacji o wpływie zmian wartości poszczególnych warstw tematycznych na podatność osuwiskową. Im większy zakres odpowiedzi wyjściowych, tym dany parametr środowiskowy ma większy wpływ na wynik końcowy i odwrotnie.

### Dane wejściowe modelu

Na potrzeby utworzenia punktów reprezentujących lokalizacje osuwisk wykorzystano zbiór 434 osuwisk (Kamieniarz i in., 2018; Kamieniarz, 2021). Z poligonów zasięgów wygenerowano centroidy, które następnie poddano kontroli reprezentatywności względem poszczególnych osuwisk. W uzasadnionych przypadkach (np. kiedy centroid wypadł na drodze lub budynku) przeprowadzono korektę ich lokalizacji. Następnie utworzono 434 losowe punkty reprezentujące lokalizacje bez osuwisk.

Dla obszaru badań przygotowano 8 warstw tematycznych: spadki terenu, ekspozycja zboczy, wysokość bezwzględna, wysokość względna, indeks zbieżności, utwory powierzchniowe, utwory podłoża podczwartorzędowego, odległość od nieciągłości tektonicznych. Jako podstawę obliczeniową dla pierwszych pięciu wykorzystano numeryczny model terenu w siatce  $10 \times 10$  m, utworzony na podstawie danych pozyskanych z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii (<https://www.gov.pl/web/gugik>). Warstwy dotyczące litologii reprezentują zmienne dyskretne (skategoryzowane), a pozostałe zmienne ciągłe. Wszystkie mapy przygotowano w rozdzielczości piksela równej 10 m.

**Spadki terenu** są jednym z podstawowych czynników warunkujących występowanie osuwisk (Margielewski, 2001; Corominas i in., 2014). Parametr ten można zdefiniować jako stosunek różnicy wysokości bezwzględnych dwóch punktów na powierzchni terenu do odległości pomiędzy nimi, wyrażany najczęściej w stopniach. Wraz ze zwiększaniem wartości nachylenia wzrastają siły ścinające w górotworze, co przy osiągnięciu stanów granicznych danego ośrodka skalnego prowadzi do aktywacji osuwisk. Spadki wpływają również na szybkość i odległość przemieszczenia materiału koluwalnego oraz na prędkość przepływu wód powierzchniowych i gruntowych, a w konsekwencji na wilgotność podłoża, ciśnienie kapilarne oraz rozkład stref nasyconych i nienasyconych (Bragagnolo i in., 2019b; Çellek, 2020).

**Ekspozycja zboczy** jest najczęściej wyrażana jako azymut nachylenia stoku liczony od północy geograficznej ( $0-360^\circ$ ). Wpływa na natężenie promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni terenu oraz reguluje efekty związane z działalnością wiatru. Pośrednio warunkuje również inne czynniki, tj. opady atmosferyczne, szatę roślinną, wilgotność podłoża, czas zalegania pokrywy śnieżnej czy grubość warstwy glebowej. Wpływ ekspozycji zboczy na występowanie osuwisk nie jest jednoznacznie określony. Ogólnie na półkuli północnej, w środkowych i wyższych szerokościach geograficznych najbardziej podatne na osuwanie są stoki północne i północno zachodnie, z uwagi na ich większe zacienienie oraz wilgotność (Carra i in., 1991; Lineback Gritzner i in., 2001).

Kolejną warstwą wykorzystaną do analiz jest **wysokość bezwzględna**. Podobnie jak w przypadku ekspozycji zboczy, wpływ tego parametru na występowanie osuwisk

jest dyskusyjny. Generalnie im większa wysokość nad poziomem morza, tym wyższe opady atmosferyczne<sup>2</sup> oraz intensywność cykli zamrażania i rozmrażania, co stwarza warunki sprzyjające tworzeniu się osuwisk. Istnieje jednak wiele prac, w których stwierdzono trend odwrotny, wiążący się zazwyczaj z ingerencją pozostałych czynników (Mrozek, 2013), lub wykazano niewielki wpływ tego parametru na występowanie osuwisk (Lineback Gritzner i in., 2001).

**Wysokość względna** przedstawia lokalne różnice wysokości między szczytem grzbietu a dnem doliny, w ramach określonej ekspozycji (Anbalagan, 1992). Różnice wysokości, obok spadków, są drugim podstawowym czynnikiem warunkującym występowanie osuwisk (Margielewski, 2001). Porównując dwa zbocza o identycznych parametrach geomechanicznych i geometrycznych, ale o różnych wysokościach względnych, stwierdza się, że stok wyższy jest na ogół bardziej podatny na osuwanie (Gökceoglu, Aksoy, 1996). Tym niemniej wpływ tego czynnika w skali danego obszaru może być różny.

Parametrem geomorfologicznym powszechnie wykorzystywanym przy modelowaniu podatności osuwiskowej jest krzywizna powierzchni terenu. Wyróżnia się głównie krzywiznę profilową (wertrykalną) i planarną. Ta pierwsza jest określana w kierunku zapadania zbocza wzdłuż linii utworzonej przez przecięcie płaszczyzny pionowej z powierzchnią terenu. Wpływa na rozkład naprężeń tensyjnych i kompresyjnych w masywie skalnym. Krzywizna planarna jest krzywizną linii utworzonej przez przecięcie płaszczyzny poziomej z powierzchnią terenu. Kontroluje kierunki ruchu materiału skalnego oraz wód powierzchniowych (Carson, Kirkby, 1972). W celu określenia krzywizny powierzchni terenu opracowano **indeks zbieżności** (*convergence index*, CI), który łączy ze sobą zarówno wertrykalną, jak i planarną krzywiznę terenu (Köthe, Lehmeier, 1994).

Litologia skał determinuje m.in. takie parametry jak: wytrzymałość na ścinanie, przepuszczalność czy odporność na wietrzenie chemiczne i fizyczne, wpływając tym samym na stateczność zbocza (Varnes, 1984). Z uwagi na fakt, iż w obrębie Krakowa występują zarówno osuwiska rozwinięte w osadach czwartorzędowych, jak i formy obejmujące utwory starsze, wydzielono dwie warstwy litologiczne. Przy ustalaniu poszczególnych klas kierowano się kryteriami ilościowymi (powierzchnia zajmowanego obszaru), tektonicznymi, genetycznymi lub wiekowymi. W warstwie **utwory powierzchniowe** ustalono 6 klas. W miejscach wychodni utworów czwartorzędowych utworzono dodatkową, wspólną klasę, ponieważ rastry wykorzystywane do obliczeń nie mogą mieć obszarów bez wartości. **Utwory podłoża podczwartorzędowego** przedstawiono w postaci 7 klas. W przypadku miocenu zapadliśka przedkarpackiego zamiast kategoryzacji *stricte* litostratygraficznej przyjęto podział na serię allochtoniczną i autochtoniczną. Pozwala on na wyodrębnienie osadów litologicznie podobnych lecz o różnym zaangażowaniu tektonicznym. Znajduje to również uzasadnienie w obli-

zeniach statystycznych. Pod względem zajmowanej powierzchni więcej osuwisk znajduje się w obrębie utworów miocenu autochtonicznego (53%) niż miocenu allochtonicznego (17%). Porównanie wskaźnika osuwiskowości powierzchniowej<sup>3</sup> obu klas wskazuje, że dla miocenu allochtonicznego ma on znacznie większą wartość (11,29%) niż dla miocenu autochtonicznego (0,97%). W przypadku utworów Karpat zewnętrznych do jednej klasy zaliczono paleoceńsko-eoceńskie łupki pstre oraz górnokredowe margle pstre węglowiece, gdyż są to osady o zbliżonej litologii. Warstwy geozew i łupki cieszyńskie górne ujęto wspólnie, z uwagi na dominację osadów ilastych i marglistych w obu wydzieleniach.

Ostatnim parametrem wykorzystanym do analiz podatności osuwiskowej Krakowa jest **odległość od nieciągłości tektonicznych**. Osuwiska wykazują na ogół większą tendencję do powstawania w pobliżu stref dyslokacyjnych (Sikora, 2018). Strefy te charakteryzują się zwiększoną dezintegracją materiału skalnego, co ułatwia infiltrację wód w głąb masywu skalnego (van Westen i in., 2008).

### Parametry ANN

Proces uczenia sieci neuronowej przeprowadzono z wykorzystaniem trybu wsadowego, który umożliwia wygenerowanie zbioru sieci neuronowych o różnej liczbie neuronów w warstwie ukrytej i zestawach wartości początkowych wag synaptycznych, a następnie wybór wariantu o najniższej wartości błędów walidacyjnych. Minimalną liczbę neuronów w warstwie ukrytej ustalono na 4. Wartość ta reprezentuje połowę przedziału pomiędzy liczbą elementów w warstwie wejściowej i wyjściowej. Maksymalną liczbę neuronów ukrytych określono na 17, wykorzystując kryterium Hecht-Nielsen'a (1987):

$$N_H \leq 2N_I + 1$$

gdzie:

$N_H$  – jest liczbą neuronów w warstwie ukrytej,

$N_I$  – odpowiada liczbie elementów w warstwie wejściowej.

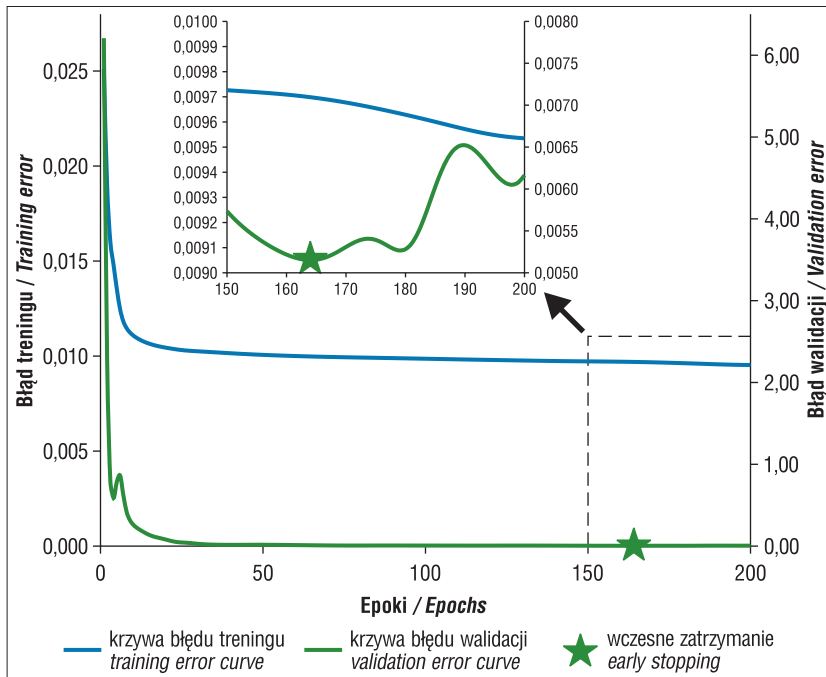
Pozostałe parametry sieci ustawiono w sposób następujący:

- ilość zestawów wartości początkowych wag synaptycznych: 1;
- współczynnik uczenia: 0,6;
- liczba epok: 200;
- procent punktów osuwiskowych i nieosuwiskowych przeznaczonych do treningu, walidacji i testów: 0,7; 0,15; 0,15.

Spośród wygenerowanych 14 sieci neuronowych najlepsze rezultaty uzyskano dla wariantu zawierającego 5 neuronów w warstwie ukrytej. W 164 epoki otrzymano minimalny błąd walidacji równy 0,005152 (ryc. 7). Przyjmuje się, że dla wartości wyjściowych sieci znormalizowanych do przedziału [0,1] błąd na poziomie 0,005 jest dopuszczalny (Vahidnia i in., 2009).

<sup>2</sup> Zależność ta występuje tylko do określonej wysokości, powyżej której zaznacza się gradient odwrotny (tzw. inwersja opadowa). W warunkach polskich zjawisko inwersji opadowej jest spotykane w Tatrach powyżej wysokości 1700–1800 m n.p.m. (Gieysztor, 1961).

<sup>3</sup> Stosunek łącznej powierzchni osuwisk występujących w danej klasie do powierzchni analizowanej klasy jest wyrażany w procentach (na podstawie Bobera, 1984).



Ryc. 7. Ewolucja błędów w kolejnych epokach procesu uczenia  
 Fig. 7. Errors evolution in subsequent epochs of the learning process

pozytywne (*True Positive*, TP). Z kolei błędy poniżej  $-0,5$  są interpretowane jako klasyfikacje fałszywie negatywne (*False Negative*, FN), a powyżej  $0,5$  jako klasyfikacje fałszywie pozytywne (*False Positive*, FP). Wyniki testu przedstawiono w postaci macierzy błędów (ryc. 8). Łącznie uzyskano 126 (tj. 96%) poprawnych klasyfikacji (prawdziwie pozytywnych i prawdziwie negatywnych). Dwa przypadki zaklasyfikowano jako fałszywie pozytywne, a trzy jako fałszywie negatywne. Świadczy to o bardzo dobrej wydajności sieci.

		KLASA RZECZYWISTA ACTUAL CLASS	
		osuwisko landslide	brak osuwiska no landslide
KLASA PREDYKOWANA PREDICTED CLASS	osuwisko landslide	<b>TP</b> 62 (47,3%)	<b>FP</b> 2 (1,5%)
	brak osuwiska no landslide	<b>FN</b> 3 (2,3%)	<b>TN</b> 64 (48,9%)

Ryc. 8. Macierz błędów dla fazy testu sieci neuronowej  
 Fig. 8. Confusion matrix for test phase results

### Ocena wydajności ANN

Test sieci neuronowej przeprowadzono na podstawie zbioru 131 punktów (67 osuwiskowych i 64 nieosuwiskowych). W rezultacie otrzymano różnice (błędy) pomiędzy wartościami na wyjściu sieci a odpowiedziami wzorcowymi. Wśród tych ostatnich wartości przypisane punktom osuwiskom (1) są traktowane jako pozytywne, a punktom nieosuwiskowym (0) jako negatywne. Z kolei wartości większe niż  $0,5$  na wyjściu sieci są uznawane jako pozytywne, a mniejsze lub równe  $0,5$  jako negatywne (Bragagnolo i in., 2019a, b). Uwzględniając powyższe, wartości błędów w przedziale od  $-0,5$  włącznie do  $0$  oznaczają klasyfikacje prawdziwie negatywne (*True Negative*, TN), a w zakresie od  $0$  do  $0,5$  włącznie klasyfikacje prawdziwie

### Klasy podatności

Pomimo tego, że utworzona powierzchnia podatności zawiera wartości liczbowe z przedziału  $[0,1]$ , są one jedynie pewnym przybliżeniem tego, czy dane kombinacje wartości czynników środowiskowych w poszczególnych pikselach są lub nie są charakterystyczne dla osuwisk. Dlatego istotną kwestią jest właściwe ustalenie klas podatności i ich przedziałów wartości. W artykule wykorzystano metodę zaproponowaną przez Bragagnolo i in. (2019a). Na podstawie poligonów wszystkich osuwisk utworzono raster  $10 \times 10$  m. Z pikseli osuwiskowych wygenerowano centroidy, do których przyporządkowano wartości z utworzonej powierzchni podatności i uporządkowano od największych do najmniejszych. Następnie odliczono kolejno 40, 35, 20 i 5% punktów. Analizując wartości graniczne dla poszczególnych przedziałów procentowych wraz z histogramem rastra podatności, ustalono następujące klasy:  $LS > 0,95$  wysoka;  $LS = 0,50-0,95$  średnia;  $LS = 0,05-0,50$  niska;  $LS \leq 0,05$  nieistotna.

### WYNIKI

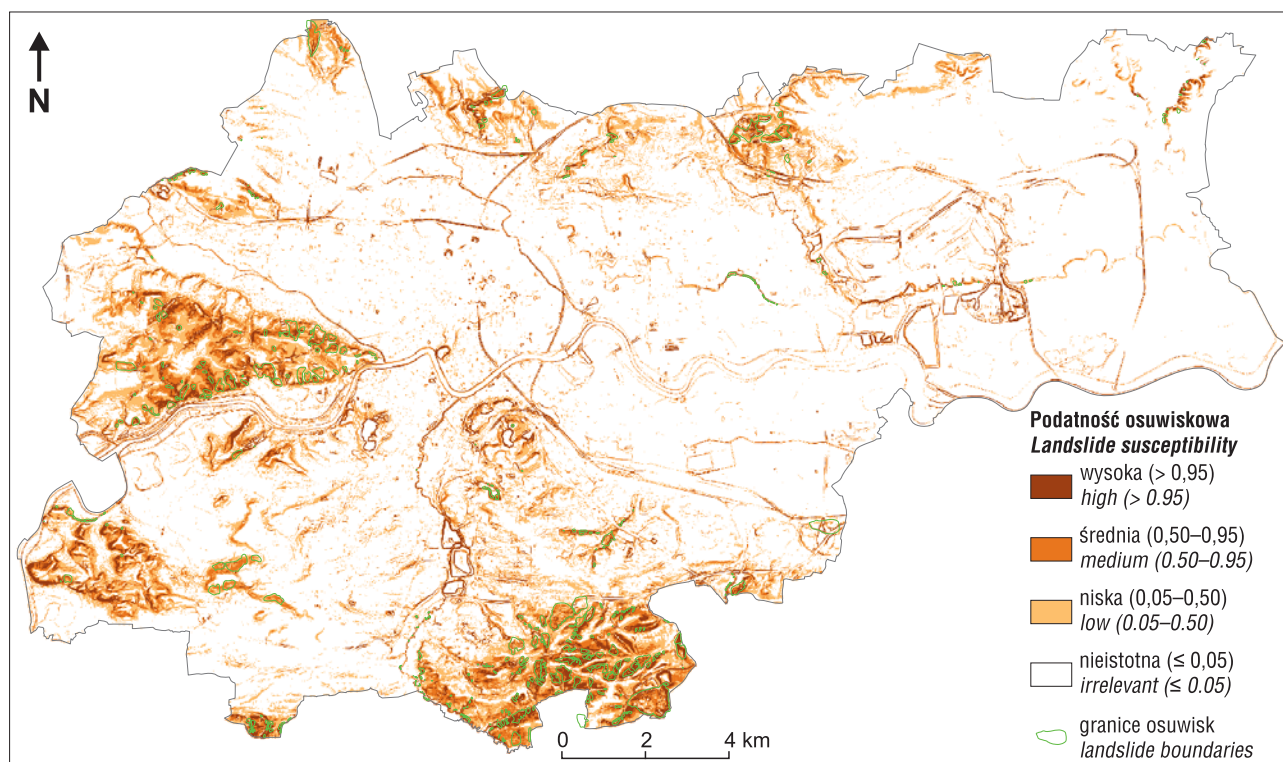
Obszary podatne na osuwanie ( $LS > 0,05$ ) stanowią ok. 22% terenu Krakowa i pokrywają się z obszarami występowania osuwisk (tab. 1; ryc. 9). Obserwuje się również rejonny zaklasyfikowane przez sieć jako podatne, a w których dotychczas nie wystąpiły osuwiska (np. pas pomiędzy Kantorowicami a Łuczanicami, w północnej części miasta). W ujęciu administracyjnym najwięcej terenów podatnych na osuwanie znajduje się głównie we wschodniej części dzielnicy X (tab. 1; ryc. 9). Zajmują one ponad 54% powierzchni dzielnicy, z czego 13,6% to obszary o wysokiej podatności. Dużo terenów podatnych występuje również w dzielnicy VII, a najmniej w dzielnicy V (tab. 1; ryc. 9).

Wyniki analizy wrażliwości pokazują, że spośród wykorzystanych warstw tematycznych największy wpływ na podatność osuwiskową Krakowa mają spadki terenu (ryc. 10A). W zależności od wartości tego parametru,

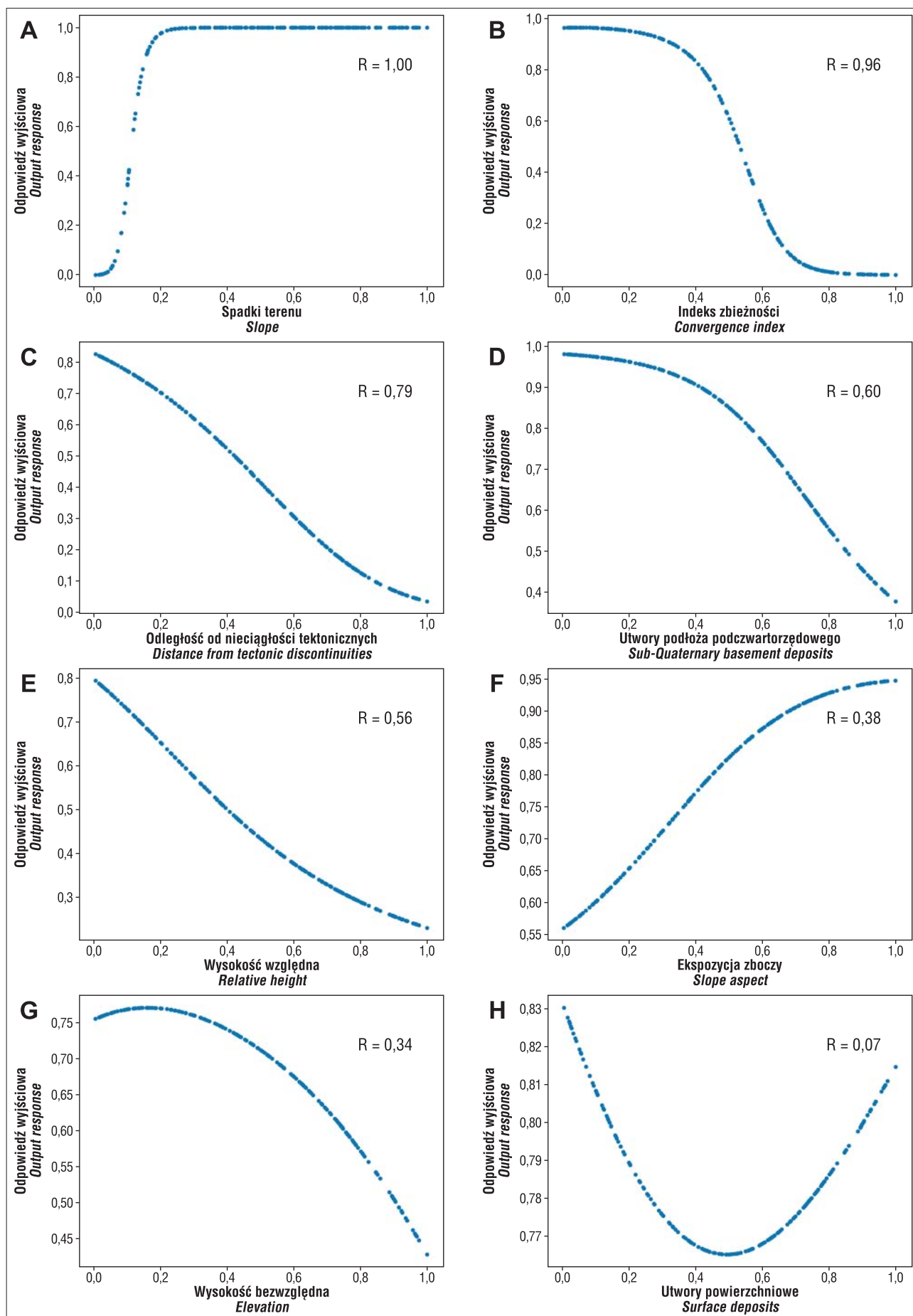


**Tab. 1.** Zestawienie udziałów powierzchniowych i procentowych poszczególnych klas podatności w ujęciu administracyjnym  
**Table 1.** Juxtaposition of the surface and percentage shares of individual susceptibility classes in administrative terms

Nr dzielnicy District No.	Klasa podatności <i>Susceptibility class</i>								Obszary podatne na osuwanie ( $LS > 0,05$ ) <i>Susceptible areas</i> ( $LS > 0,05$ )	
	nieistotna ( $LS \leq 0,05$ ) <i>irrelevant</i> ( $LS \leq 0,05$ )		niska ( $LS = 0,05-0,50$ ) <i>low</i> ( $LS = 0,05-0,50$ )		średnia ( $LS = 0,50-0,95$ ) <i>medium</i> ( $LS = 0,50-0,95$ )		wysoka ( $LS > 0,95$ ) <i>high</i> ( $LS > 0,95$ )		[km <sup>2</sup> ]	[%]
	[km <sup>2</sup> ]	[%]	[km <sup>2</sup> ]	[%]	[km <sup>2</sup> ]	[%]	[km <sup>2</sup> ]	[%]		
I	4,98	89,44	0,37	6,57	0,11	2,02	0,11	1,96	0,59	10,56
II	5,22	89,12	0,30	5,11	0,16	2,70	0,18	3,06	0,64	10,88
III	5,44	84,78	0,63	9,79	0,23	3,58	0,12	1,85	0,98	15,22
IV	19,18	80,95	2,83	11,95	1,08	4,55	0,61	2,56	4,51	19,05
V	5,15	96,32	0,14	2,55	0,04	0,70	0,02	0,43	0,20	3,68
VI	7,55	78,93	1,31	13,65	0,46	4,83	0,25	2,58	2,02	21,07
VII	15,04	52,51	7,56	26,39	4,06	14,18	1,98	6,92	13,60	47,49
VIII	34,39	73,65	7,43	15,91	3,18	6,81	1,69	3,63	12,30	26,35
IX	4,37	76,11	0,75	13,14	0,27	4,69	0,35	6,06	1,37	23,89
X	11,05	45,74	5,64	23,36	4,12	17,05	3,35	13,85	13,11	54,25
XI	7,06	66,19	2,63	24,62	0,70	6,58	0,28	2,61	3,61	33,81
XII	15,06	82,22	2,14	11,66	0,72	3,94	0,40	2,19	3,26	17,78
XIII	22,29	88,05	1,71	6,75	0,76	2,98	0,56	2,21	3,02	11,95
XIV	11,32	92,55	0,60	4,92	0,22	1,79	0,09	0,74	0,91	7,45
XV	3,88	70,73	1,29	23,51	0,24	4,40	0,07	1,36	1,60	29,27
XVI	3,33	90,21	0,26	7,14	0,06	1,72	0,03	0,93	0,36	9,79
XVII	19,62	82,36	2,75	11,52	1,00	4,21	0,45	1,90	4,20	17,64
XVIII	60,13	92,15	2,46	3,76	1,36	2,08	1,31	2,01	5,12	7,85
Ogółem Total	255,05	78,13	40,78	12,49	18,77	5,75	11,86	3,63	71,40	21,87



**Ryc. 9.** Podatność osuwiskowa obszaru miasta Krakowa  
**Fig. 9.** Landslide susceptibility of Kraków city area



Ryc. 10. Wyniki analizy wrażliwości  
 Fig. 10. Sensitivity analysis results

podatność może zmieniać się w całym swym zakresie ( $R = 1,00$ ). Największy jej wzrost obserwuje się w przedziale wartości znormalizowanych ok. 0,05–0,2 (co odpowiada spadkom rzędzu 3–13°). Duży wpływ na wynik końcowy ma również indeks zbieżności ( $R = 0,96$ ; ryc. 10B). Szczególnie podatne są obszary wklęsłe (do ok. 0,4;  $CI \sim -17$ ). W strefie przejściowej pomiędzy terenami wklęsłymi, jednostajnie nachylonymi i wypukłymi (do ok. 0,7;  $CI \sim 38$ ) następuje wyraźny spadek wartości wyjściowych. Z kolei najmniejszy wpływ na podatność mają powierzchnie wypukłe. Istotnym parametrem jest także odległość od nieciągłości tektonicznych ( $R = 0,79$ ; ryc. 10C). Wraz z oddalaniem się od stref uskoków i nasunięć podatność osuwiskowa maleje. Znaczący wpływ na wynik końcowy mają utwory podłoża podczwartorzędowego ( $R = 0,60$ ; ryc. 10D). Do klas zwiększających podatność należą utwory miocenu allochtonicznego (0,0), margle pstry węglowieckie i łupki pstry (~0,17) oraz warstwy gezwone i łupki cieszyńskie górne (~0,33). Natomiast od warstw grodziskich (~0,5), przez miocen autochtoniczny (~0,67), utwory kredy górnej (~0,84), aż do utworów jury górnej (1,0) obserwuje się stopniowe zmniejszanie podatności. Kolejnym parametrem jest wysokość względna ( $R = 0,56$ ; ryc. 10E). Wraz ze wzrostem wysokości względnej zbocza podatność maleje. Należy przypomnieć, że ponad 54% osuwisk na terenie Krakowa obejmuje dolne części zboczy. Zmiany ekspozycji mają 38% wpływu na wynik końcowy (ryc. 10F). Najbardziej podatne są stoki o orientacji północno-zachodniej (0,82–0,94; 293–338°) i północnej (0,94–1,0; 338–360°). W przypadku wysokości bezwzględnej ( $R = 0,34$ ; ryc. 10G) obserwuje się niewielki wzrost podatności w przedziale wartości znormalizowanych 0,0–0,15 (185–215 m n.p.m.), po czym następuje jej stopniowy spadek wraz ze zwiększaniem się rzędnych terenu. Spośród wykorzystanych warstw tematycznych najmniejszy wpływ mają utwory powierzchniowe ( $R = 0,07$ ; ryc. 10H). Obniżanie się wartości podatności następuje od nasypów (0,0), przez osady den dolin rzecznych (0,2), do piasków eolicznych (0,4). Natomiast lessy i gliny lessopodobne (0,6), osady rzeczne, lodowcowe i wodnolodowcowe (0,8) oraz wychodne utworów podczwartorzędowych (1,0) przyczyniają się do wzrostu podatności.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania wykazały, że ponad 1/5 powierzchni miasta to tereny podatne na osuwanie. Najwięcej z nich znajduje się w jego południowej części, na wschód od rzeki Wilgi oraz w obrębie zrębu Lasu Wolskiego. Tam też występuje największy obszarów o wysokiej podatności ( $LS > 0,95$ ); jest to zgodne w kontekście rozmieszczenia i ilości osuwisk na terenie Krakowa. Analiza wrażliwości wykazała, że spośród warstw geosrodowiskowych wykorzystanych do modelowania największy wpływ na podatność osuwiskową mają spadki terenu, krzywizna powierzchni terenu (indeks zbieżności), odległość od nieciągłości tektonicznych oraz litologia podłoża podczwartorzędowego. Niskie wartości zakresu odpowiedzi wyjściowych w przypadku utworów powierzchniowych mogą być spowodowane korelacją z inną warstwą (prawdopodobnie z wysokością bezwzględną lub względną). Wpływ zmian wartości poszczególnych parametrów środowiskowych na podatność wpisuje się w uwarunkowania występowania osuwisk na terenie miasta. W większości są one również zgodne z trendami obserwowanymi na świecie.

Uzyskana mapa podatności osuwiskowej może być wykorzystywana w planowaniu przestrzennym przy wyborach korytarzy pod infrastrukturę (np. drogową, kolejową, sieci technicznych), wyznaczaniu ogólnych kierunków zabudowy miejskiej oraz określaniu zaleceń związanych z posadowieniem nowych obiektów budowlanych. Z uwagi na skalę opracowania oraz obowiązujące przepisy prawne (Rozporządzenie, 2020) nie może ona stanowić podstawy do wykluczania danych obszarów z zabudowy. W realizowanym obecnie *Programie Ochrony Środowiska dla Miasta Krakowa na lata 2020–2030*, jednym z zadań dotyczących zapobiegania ruchom masowym ziemi i ich skutkom jest opracowanie koncepcji odwodnienia obszarów osuwiskowych oraz terenów zagrożonych (Lewicki i in., 2021). Opracowana mapa podatności osuwiskowej może posłużyć do wytypowania rejonów, w których tego typu inwestycje powinny zostać zrealizowane.

Autor składa serdeczne podziękowania Recenzentom za cenne uwagi i sugestie dotyczące artykułu oraz J.M.V. Grzybowskiemu i L. Bragagnolo z Federalnego Uniwersytetu Fronteira Sul w Brazylii za konsultacje dotyczące modułu *r.landslide*.

## LITERATURA

- ALEXANDROWICZ S.W. 1956 – Stary obryw skalny w Tyńcu koło Krakowa. *Biul. Inst. Geol.*, 108: 5–16.
- ANBALAGAN R. 1992 – Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Eng. Geol.*, 32: 269–277.
- BOBER L. 1984 – Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną regionu. *Biul. Inst. Geol.*, 340: 115–158.
- BRABB E.E. 1984 – Innovative Approaches to Landslide Hazard Mapping. *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, Toronto, 1: 307–324.
- BRAGAGNOLO L., da SILVA R.V., GRZYBOWSKI J.M.V. 2019a – Artificial neural network ensembles applied to the mapping of landslide susceptibility. *Catena*, 184: 104240.
- BRAGAGNOLO L., da SILVA R.V., GRZYBOWSKI J.M.V. 2019b – Landslide susceptibility mapping with *r.landslide*: A free open-source GIS-integrated tool based on Artificial Neural Networks. *Environ. Model. Softw.*, 123: 104565.
- BRZOZOWSKA C., BRZOZOWSKI J. 1970 – Rejestracja osuwisk w powiecie krakowskim, woj. krakowskie. Przedsiębiorstwo Geologiczno-Fizjograficzne i Geodezyjne Budownictwa „Geoprojekt” w Krakowie. *Nar. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol.*, Kraków.
- BURTAN J., WÓJCIK A. 2017 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Wieliczka (997). *Państw. Inst. Geol.*, Warszawa.
- CARRARA A., CARDINALI M., DETTI R., GUZZETTI F., PASQUI V., REICHENBACH P. 1991 – GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 16: 427–445.
- CARRARA A., CARDINALI M., GUZZETTI F. 1992 – Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC Journal*, 2: 172–183.
- CARSON M.A., KIRKBY M.J. 1972 – *Hillslope Form and Process*. Cambridge University Press, London.
- ÇELLEK S. 2020 – Effect of the Slope Angle and Its Classification on Landslide. *NHESS Discussion*: 1–23.
- CHOWANIEC J., FREIWALD P., NESCIERUK P., PATORSKI R. 2005 – Inwentaryzacja wraz z udokumentowaniem terenów zagrożonych ruchami masowymi oraz terenów, na których ruchy te występują w obrębie dzielnic I–VII, m. Krakowa. *Państw. Inst. Geol.*, Kraków.
- CHOWANIEC J., FREIWALD P., NESCIERUK P., PATORSKI R. 2006 – Inwentaryzacja wraz z udokumentowaniem terenów zagrożonych ruchami masowymi oraz terenów, na których ruchy te występują w obrębie dzielnic VIII–XIII, m. Krakowa. *Państw. Inst. Geol.*, Kraków.
- CHOWANIEC J., FREIWALD P., NESCIERUK P., PATORSKI R. 2007 – Inwentaryzacja wraz z udokumentowaniem terenów zagrożonych ruchami masowymi oraz terenów, na których ruchy te występują w obrębie dzielnic XIV–XVIII, m. Krakowa. *Państw. Inst. Geol.*, Kraków.
- COROMINAS J., VAN WESTEN C.J., FRATTINI P., CASCINI L., MALET J.-P., FOTOPOULOU S., CATANI F., VAN DEN ECKHAUT M., MAVROULI O., AGLIARDI F. 2014 – Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 73 (2): 209–263.

- DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L., IBSEN M.-L. 1996 – Landslide recognition. Identification, movements and causes. Wiley, Chichester: 1–11.
- DŻUŁYŃSKI S. 1951 – Powstanie wapieni skalistych jury krakowskiej. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 21 (1): 125–180.
- ERMINI L., CATANIF., CASAGLI N. 2005 – Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorph.*, 66: 327–343.
- FELISIAK I., MATYSZKIEWICZ J., SOKOŁOWSKI T. 2005 – Teaching of geological mapping at Geological Mapping Department, AGH University of Science and Technology, Kraków. Detailed geological map of Las Wolski and św. Bronisława Hill. *Prz. Geol.*, 53 (10/2): 899–902.
- GIEYSZTOR I. 1961 – Studia hydrologiczne nad potokami tatrzańskimi: opady i wpływ na obszarze zlewni Białki i Potoku Kościeliskiego. *Pr. Geogr. IG PAN*, 26: 19–30.
- GÖKCEOĞLU C., AKSOY H. 1996 – Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Eng. Geol.*, 44 (1–4): 147–161.
- GRADZIŃSKI M., GRADZIŃSKI R. 2015 – 1. Budowa geologiczna. [W:] Baścik M., Degórska B. (red.), Środowisko przyrodnicze Krakowa. Zasoby – Ochrona – Kształtowanie. IGiGP UJ, Kraków: 23–33.
- HECHT-NIELSEN R. 1987 – Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. [W:] Caudill M., Butler C. (red.), Proceedings of IEEE First International Conference on Neural Networks, vol. III. SOS Printing, San Diego: 11–14.
- <http://geoportal.gov.pl> (dostęp: 18.05.2022 r.).
- <https://krakow.stat.gov.pl/> (dostęp: 18.05.2022 r.).
- <https://www.gov.pl/web/gugik> (dostęp: 18.05.2022 r.).
- JASKÓLSKI Z., KOS J., BORATYN J., FORYŚ M., BARTOSZ L., BAKAJ M. 2013 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla realizacji przedsięwzięcia pn. „Wykonanie badań prac geologicznych w okolicach Wzgórza św. Bronisławy w rejonie ulicy Sawickiego w Krakowie”. PG S.A., Kraków. *Pow. Arch. Geol.*, Kraków.
- JASKÓLSKI Z., KOS J., FORYŚ M., BARTOSZ L. 2011 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla stabilizacji osuwiska przy ulicy Sawickich w Krakowie. PG S.A., Kraków. *Pow. Arch. Geol.*, Kraków.
- KAMIENIARZ S. 2021 – Przewidywanie zagrożenia osuwiskowego miasta Krakowa z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i metod geostatystycznych. Rozprawa doktorska. *Nar. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol.*, Warszawa.
- KAMIENIARZ S., WÓDKA M., WÓJCIK A. 2018 – Mapa osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000, pow. Kraków miasto, woj. Małopolskie. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KMIETOWICZ-DRATHOWA I. 1966 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski (bez utworów czwartorzędowych) w skali 1 : 50 000, ark. Kraków (M 34-64 D), wydanie tymczasowe. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- KÖTHE R., LEHMEIER F. 1994 – SARA System zur Automatischen Relief-Analyse, Benutzerhandbuch. Georg-August-Universität, Göttingen.
- LEE C.F., YE H., YEUNG M.R., SHAN X., CHEN G. 2001 – AIGIS-based methodology for natural terrain landslide susceptibility mapping in Hong Kong. *Episodes*, 24: 150–179.
- LEE S., RYU J.-H., LEE M.-J., WON J.-S. 2003 – Landslide susceptibility analysis using artificial neural network at Boun, Korea. *Env. Geol.*, 44: 820–833.
- LEWICKI P., LEWICKI S., LEWICKI Z., BINKIEWICZ P., BODZOJ Ł., GOLEC N., KASPERCZYK L., STADNIK K., STOBINSKA M., TOKARSKA M., WALECZEK W. 2021 – Program ochrony środowiska dla Miasta Krakowa na lata 2020–2030 (projekt), tom I. LEMITOR Ochrona Środowiska, Wrocław.
- LINEBACK GRITZNER M., MARCUS W.A., ASPINALL R., CUSTER S.G. 2001 – Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology*, 37: 149–165.
- MARGIELEWSKI W. 2001 – O strukturalnych uwarunkowaniach rozwoju głębokich osuwisk – implikacje dla Karpat fliszowych. *Prz. Geol.*, 49 (6): 515–524.
- MATYSZKIEWICZ J. 1993 – Budowa geologiczna, A. Stratygrafia, 1. Jura. [W:] Rutkowski J., *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Kraków (973)*. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MROZEK T. 2013 – Zagrożenie i ryzyko osuwiskowe w rejonie Szymbarku (Beskid Niski). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 199: 1–40.
- OSZCZYPKO N. 2006 – Powstanie i rozwój polskiej części zapadliska przedkarpackiego. *Prz. Geol.*, 54 (5): 396–403.
- PAUL Z., RĄCZKOWSKI W., RYŁKO W., WÓJCIK A. 2016 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Myślenice (996). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PAUL Z., RĄCZKOWSKI W., RYŁKO W., WÓJCIK A. 1996 – *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Myślenice (996)*. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- POBORSKI J., SKOCZYLAS-CISZEWSKA K. 1963 – O miocenie w strefie nasunięcia karpackiego w okolicy Wieliczki i Bochni. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 33 (3): 339–349.
- REICHENBACH P., ROSSI M., MALAMUD B.D., MIHIR M., GUZZETTI F. 2018 – A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Sci. Rev.*, 180: 60–91.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 4 grudnia 2020 r. w sprawie informacji dotyczących ruchów masowych ziemi. *Dz.U.* z 2020 r. poz. 2270.
- RUTKOWSKI J. 1989 – Budowa geologiczna regionu Krakowa. *Prz. Geol.*, 37 (6): 302–308.
- RUTKOWSKI J. 1992 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Kraków (973). *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- RUTKOWSKI J. 1993 – *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Kraków (973)*. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- RYCIO E. 2020 – Trudności w wyznaczaniu osuwisk na obszarach historycznych i zurbanizowanych na Przykładzie Twierdzy Przemyśl. *Prz. Geol.*, 68 (12): 902–914.
- SALTELLI A., RATTO M., ANDRES T., CAMPOLONGO F., CARIBONI J., GATELLI D., SAISANA M., TARANTOLA S. 2008 – *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Wiley, Chichester.
- SIKORA R. 2018 – Structural control on the initiation and development of the Biała Wisielka Landslide Complex (Silesian Beskid, Outer Carpathians, Southern Poland). *Geol., Geoph., Envir.*, 44 (1): 31–48.
- SOETERS R., VAN WESTEN C.J. 1996 – Slope instability recognition, analysis, and zonation. [W:] Turner A.K., Schuster R.L. (red.), *Landslides: investigation and mitigation*. TRB Spec. Rep., 247: 129–177.
- TADEUSIEWICZ R. 1993 – *Sieci Neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa.
- TADEUSIEWICZ R., SZALENIEC M. 2015 – *Leksykon sieci neuronowych*. *Wyd. Fund. „Projekt Nauka”*, Wrocław.
- VAHIDNIA M.H., ALESHEIKH A.A., ALIMOHAMMADI A., HOSSEINALI F. 2009 – Design and Development of an Intelligent Extension for Mapping Landslide Susceptibility Using Artificial Neural Network. [W:] Gervasi O., Taniar D., Murgante B., Laganà A., Mun Y., Gavrilova M.L. (red.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2009*, Seoul, Korea, June 29–July 2, 2009, Proceedings, Part I Scanning. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 17–32.
- VAN WESTEN C.J., CASTELLANOS E., KURIAKOSE S. 2008 – Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Eng. Geol.*, 102 (3–4): 112–131.
- VARNES D.J. 1984 – *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. UNESCO, Paryż.
- WERBOS P. 1974 – Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. Committee on Applied Mathematics, Harvard University, Cambridge, MA.
- WÓJCIK A. 2011 – Mapy dokumentacyjne osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000, miasto Kraków, dzielnice I–VII oraz X–XI. Państw. Inst. Geol., Kraków.
- WÓJCIK A. 2012 – Mapy dokumentacyjne osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000 miasto Kraków, dzielnice VIII–IX oraz XII–XVIII. Państw. Inst. Geol., Kraków.
- WÓJCIK A. 2015 – 13. Procesy osuwiskowe. [W:] Baścik M., Degórska B. (red.), *Środowisko przyrodnicze Krakowa. Zasoby – Ochrona – Kształtowanie*. IGiGP UJ, Kraków: 219–221.
- WÓJCIK A. 2017 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Wieliczka (997). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WÓJCIK A. (red.), KAMIENIARZ S., WÓDKA M., BIAJGO A., JANECZEK A., WALATEK M. 2019 – *Atlas osuwisk miasta Krakowa*. UMK Wyd. Kształt. Środ. Wydawnictwo „Kartogram”, Bolechowice.
- WÓJCIK A. 2007 – *Mapy środowiska przyrodniczego, Budowa geologiczna*. [W:] Jędrzychowski I. (red.), *Atlas Kampusu 600-lecia Odnowienia Uniwersytetu Jagiellońskiego*. IGiGP UJ, Kraków.
- WÓJCIK A., LEWANDOWSKI J. 2020 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Niepołomice (974), reambulacja. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WÓJCIK A., LEWANDOWSKI J. 2021 – *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Niepołomice (974), reambulacja*. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- ŻYTKO K., ZAJĄC R., GUCIK S., RYŁKO W., OSZCZYPKO N., GARLICKA I., NEMČOK J., ELIÁŠ M., MENČIK E., STRÁNIK Z. 1989 – Map of the tectonic elements of the Western Outer Carpathians and their foreland, Table III. [W:] Poprawa D., Nemčok J. (red.), *Geological atlas of the western outer Carpathians and their foreland*. *Wyd. Geol.*, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 13.06.2021 r.  
Akceptowano do druku 2.08.2022 r.