

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 173, 2023, 57–85

doi: 10.4467/20833113PG.23.019.19231

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Komisja Geograficzna, Polska Akademia Umiejętności

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

ZMIENNOŚĆ TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI GLEBY W PAŚMIE POŁONINY WETLIŃSKIEJ (BIESZCZADY ZACHODNIE)

Karolina Mostowik , *Agnieszka Kafel*, *Marta Kisiel* ,
Agnieszka Kozioł, *Dominika Paruch*, *Eliza Płaczkowska* ,
Bartłomiej Rzonca , *Janusz Siwek* , *Jakub Słotwiński*,
Mateusz Stolarczyk

The variability of soil temperature and moisture across the Połonina Wetlińska Range (the Western Bieszczady Mountains)

Abstract: The purpose of the research was to define the variability of soil temperature and moisture in three profiles in the Połonina Wetlińska Range in the period 23/11/2020–19/11/2021 and to assess the relationship between these parameters and meteorological conditions. Soil temperature and moisture loggers were situated at two depths (20 cm & 45 cm). Research has shown a higher soil temperature at a subsurface depth between the end of April and August. The soil temperature was strongly correlated with the air temperature in the warm half-year. The highest average soil temperature was observed for the southern slope (7,5°C at both depths). In the cold half-year, low variability of soil temperature, the the insulating role of snow cover, and the lack of soil freezing were discovered. The annual average volumetric soil moisture of the soils studied ranged from 42% to 53% at a depth of 20 cm, and from 39% to 44% at a depth of 45 cm. Among the soils studied, those represented by the lower clay fraction content, the lower bulk density, and the higher organic matter content were characterised by the higher volumetric moisture. An increase in soil moisture, mainly driven by infiltration of rainwater and melting snow, may also be caused by lateral throughflow. Generally, soil moisture was dependent on

the previous precipitation totals. Additionally, in the cold half-year, higher soil moisture was related to higher air temperature, whereas in the warm half-year, this relation was opposite. The research revealed a lower variability of soil moisture in profiles located within a forest glade on the northern slope than at the profile located within a meadow, on the southern slope of the Połonina Wetlińska. The variability in soil moisture was lowest during the winter months in the highest elevated profile close to the ridge, whereas the highest variability was observed during the summer on the southern slope. Furthermore, in the warm half-year, evapotranspiration was an important factor resulting in a greater variability of soil moisture at shallower depths of the studied profiles. The higher soil retention capacity in the upper part of the Bieszczady Mountains ranges may affect a more effective recharge of groundwater reservoirs, which feed springs located in the upper part of the slopes

Keywords: volumetric soil moisture, soil texture, meteorological conditions, correlation, Carpathians

Zarys treści: W pracy określono zmienność temperatury i wilgotności gleb brunatnych na trzech stanowiskach w paśmie Połoniny Wetlińskiej i związek tych parametrów z warunkami meteorologicznymi. Badania prowadzono na dwóch głębokościach (20 cm i 45 cm) w okresie od 23.11.2020 r. do 19.11.2021 r. Badania wykazały występowanie wyższej temperatury gleby od końca kwietnia do sierpnia w przypowierzchniowej części analizowanych gleb oraz jej silną zależność od temperatury powietrza w półroczu ciepłym i najwyższą średnią temperaturę na stanowisku eksponowanym w kierunku południowym (7,5°C na obu głębokościach). W półroczu chłodnym wykazano mniejszą zmienność temperatury gleby, izolujące działanie pokrywy śnieżnej i brak przemarzania gleb w badanych lokalizacjach. Średnie roczne wartości wilgotności objętościowej badanych gleb mieściły się w zakresie 42–53% na głębokości 20 cm i 39–44% na głębokości 45 cm. Wyższe wartości wilgotności objętościowej cechowały te spośród badanych gleb, które charakteryzują się mniejszym udziałem frakcji ilowej, mniejszą gęstością objętościową i wyższą zawartością materii organicznej. Na wzrost wilgotności gleb, poza infiltracją wody opadowej i roztopowej, wpływać może również dostawa wód spływu śródpokrywowego. Wilgotność analizowanych gleb była zależna od sumy opadów w okresie poprzedzającym. W półroczu chłodnym wyższej wilgotności dodatkowo sprzyjała wyższa temperatura powietrza, natomiast w półroczu ciepłym odwrotnie – niższa. W pracy udokumentowano mniejszą zmienność wilgotności gleb na dwóch polanach śródleśnych na stoku północnym Połoniny Wetlińskiej względem stanowiska na otwartej przestrzeni na stoku południowym. Zmienność wilgotności była najmniejsza w okresie zimowym w najwyższej położonym stanowisku blisko grzbietu, a największa w okresie letnim na stoku południowym. Ponadto, w półroczu ciepłym ewapotranspiracja stanowiła ważny czynnik, wpływający na większą dynamikę zmian wilgotności objętościowej gleb w płytszej części badanych profili. Większe zdolności retencyjne gleb w górnych częściach bieszczadzskich pasm górskich mogą wpływać na efektywniejsze zasilanie zbiorników wód podziemnych, które następnie są drenowane przez wysoko położone źródła.

Słowa kluczowe: wilgotność objętościowa gleb, skład granulometryczny, warunki meteorologiczne, korelacja, Karpaty

Wstęp

Temperatura i wilgotność gleby są pochodną wielu czynników, z których najważniejszymi są temperatura powietrza, opady, typ gleby i roślinność (James i in. 2003, Legates i in. 2011; Mahmood i in. 2012; Feng, Liu 2015; Dincă i in. 2018). Aktualne warunki termiczno-wilgotnościowe decydują m.in. o wielkości ewapotranspiracji oraz możliwości formowania się spływu śródpokrywowego i powierzchniowego (Robock i in. 2000; Vereecken i in. 2008; Legates i in. 2011). Jednocześnie zmiany wilgotności i temperatury gleby w dłuższych okresach mogą być dobrym wskaźnikiem zmieniających się warunków klimatycznych i ich wpływu na elementy bilansu wodnego (Braganza i in. 2004; Bryś 2008; Somorowska 2008; Bai i in. 2014). W związku z intensyfikacją susz atmosferycznych w ostatnich latach w Europie, w tym w Polsce (Boczoń i in. 2016; Pińskwar i in. 2020; Büntgen i in. 2021), więcej uwagi poświęca się ich następstwom – suszy glebowej (rolniczej) i hydrologicznej (Zhang i in. 2005; Somorowska 2008; Bai i in. 2014; Wang i in. 2018).

Zmiany warunków klimatycznych w Karpatach (Wypych i in. 2018; Mostowik i in. 2019b; Tomczyk i in. 2021), w tym szczególnie wzrost temperatury, mogą wpływać znacząco na wilgotność gleby m.in. poprzez skrócenie okresu przemarzania gruntu, efektywniejszą infiltrację opadów zimą oraz zwiększone parowanie w okresie wegetacyjnym. Każda z tych zmian może potencjalnie wpływać na pozostałe składowe bilansu wodnego w zlewniach Karpat Zewnętrznych, które cechują się szybkim formowaniem się odpływu rzeczno i małymi zdolnościami retencyjnymi podłoża (Chełmicki i in. 1998/1999). Prawidłowości te wymagają jednak wciąż lepszego rozpoznania znaczenia zasobów wodnych gleb, ich związku z opadami atmosferycznymi oraz stanem wód. W badaniach wilgotności gleb na stokach Beskidu Niskiego (stacja IGiPZ PAN w Szymbarku) przeprowadzonych w okresie od lipca 2005 r. do lipca 2006 r. (z wyłączeniem okresu zimowego) wykazano większą korelację wilgotności gleby w danym dniu ze średnim dobowym opadem niż z sumą opadów w okresie poprzedzającym, ujemną korelację wilgotności gleby z temperaturą gleby oraz bezpośrednio oddziaływanie opadu do głębokości 30–40 cm (Bochenek 2006). Wilgotność gleby może też być dobrym wskaźnikiem trudno mierzalnych źródeł dostawy wody, pochodzącej np. z opadów poziomych i osadów, a także wskaźnikiem dynamiki dostawy wód pochodzących z topnienia śniegu.

Ze względu na szczegółowe rozpoznanie wybranych aspektów obiegu wody w paśmie Połoniny Wetlińskiej (Plenzler i in. 2010; Płaczkowska i in. 2018; Mostowik i in. 2019a, 2021), obszar ten stanowi dobry poligon do rozszerzenia badań nad mechanizmem krążenia wody w obszarze gór średnich o podłożu fliszowym. Przesłankami świadczącymi o silnie zróżnicowanej retencji glebowej na tym obszarze są m.in. duże rozbieżności w zasobach wodnych małych zlewni (Rzonca i in. 2016; Plenzler i in. 2010; Mostowik i in. 2019a), różne mechanizmy zasilania wydajnych źródeł, w tym

różne czasy reakcji wydajności źródeł na opady (Płaczkowska i in. 2018; Mostowik i in. 2021) oraz potencjalnie duże zróżnicowanie dróg spływu śródpokrywowego w rozbudowanej sieci kanałów sufozcyjnych (Bernatek-Jakiel i in. 2017). Jedynie informacje o retencji glebowej w Bieszczadach pochodzą z okresowych pomiarów na torfowiskach w dolinie Sanu i Wołosatego i dotyczą tylko sezonu wegetacyjnego (Łajczak i in. 2010; Stolarczyk i in. 2017).

Prowadzony od 2007 r. monitoring hydrologiczny w Bieszczadach Zachodnich został w 2020 r. uzupełniony o stanowiska do ciągłej rejestracji wilgotności i temperatury gleb. W niniejszej pracy zostały zaprezentowane wyniki wstępnego rozpoznania warunków termiczno-wilgotnościowych gleb pasma Połoniny Wetlińskiej. Celem pracy było: 1) określenie sezonowej zmienności wilgotności i temperatury gleby na różnych głębokościach i stanowiskach oraz 2) zidentyfikowanie związku tych parametrów z warunkami meteorologicznymi, tj. opadami atmosferycznymi i temperaturą powietrza.

Obszar badań

Obszarem badań jest pasmo Połoniny Wetlińskiej, położone na terenie Bieszczadzkiego Parku Narodowego i należące do mezoregionu Bieszczadów Zachodnich w Karpatach Zewnętrznych (Solon i in. 2018). Bieszczady charakteryzują się budową fliszową i wyróżnia się tutaj dwie jednostki strukturalne: śląską i nasuniętą na nią od południa jednostkę dukielską (Haczewski i in. 2007). W paśmie Połoniny Wetlińskiej odsłaniają się skały jednostki śląskiej, w tym głównie grubo- i średnioławicowe piaskowce otryckie, przewarstwione pakietami łupków, które tworzą strefę grzbietową i stok północno-wschodni (Malata i in. 2014). Na południowo-zachodnim stoku Połoniny Wetlińskiej występują silnie zdeformowane cienkoławicowe piaskowce i łupki warstw menilitowych, przejściowych oraz krośnieńskich (Rubinkiewicz, Tomaszczyk 2016). W ogólnych charakterystykach hydrogeologicznych skał fliszowych Karpat Zewnętrznych wskazuje się na niewielkie zdolności tych skał do retencionowania wody (Jokiel 1994; Chowaniec 1998/1999). Niski współczynnik filtracji, niewielka porowatość aktywna, gęsta sieć drenażu powierzchniowego oraz strome stoki determinują szybki spływ powierzchniowy, a w konsekwencji mały potencjał zasobności zbiorników wód podziemnych (Chowaniec i in. 1983; Płaczkowska i in. 2015).

Wykształcenie gleb w Bieszczadach wyraźnie nawiązuje do rzeźby terenu i cech litologicznych podłoża oraz wynika z właściwości pokryw stokowych. Na terenie Bieszczadzkiego Parku Narodowego najczęściej występują gleby brunatne, pokrywające 85–90% jego powierzchni. Pozostałe 15% stanowią litosole, regosole dystroficzne i eutroficzne, rankery, gleby glejowe, gleby organiczno-mineralne i torfowe oraz mady (Skiba 1999). Na stokach o umiarkowanym nachyleniu dominują gleby brunatne, nieorganiczne, natomiast na wierzchołkach występują rankery brunatne

lub biellicowe (Musielok i in. 2021), gleby inicjalne oraz słabo wykształcone takie jak litosole i regosole (Skiba 1999). Gleby Połoniny Wetlińskiej mają charakter typowo górski – cechują się płytkimi profilami, dużą szkieletowością, znaczną ilością materii organicznej oraz dużą miąższością poziomów próchnicznych (Kacprzak, Skiba 2001; Musielok i in. 2019). Udział części szkieletowych w poziomach A i B wynosi najczęściej kilkanaście procent, a na stromych stokach i w strefach grzbietowych może dochodzić do 50% (Kacprzak, Skiba 2001; Musielok i in. 2021).

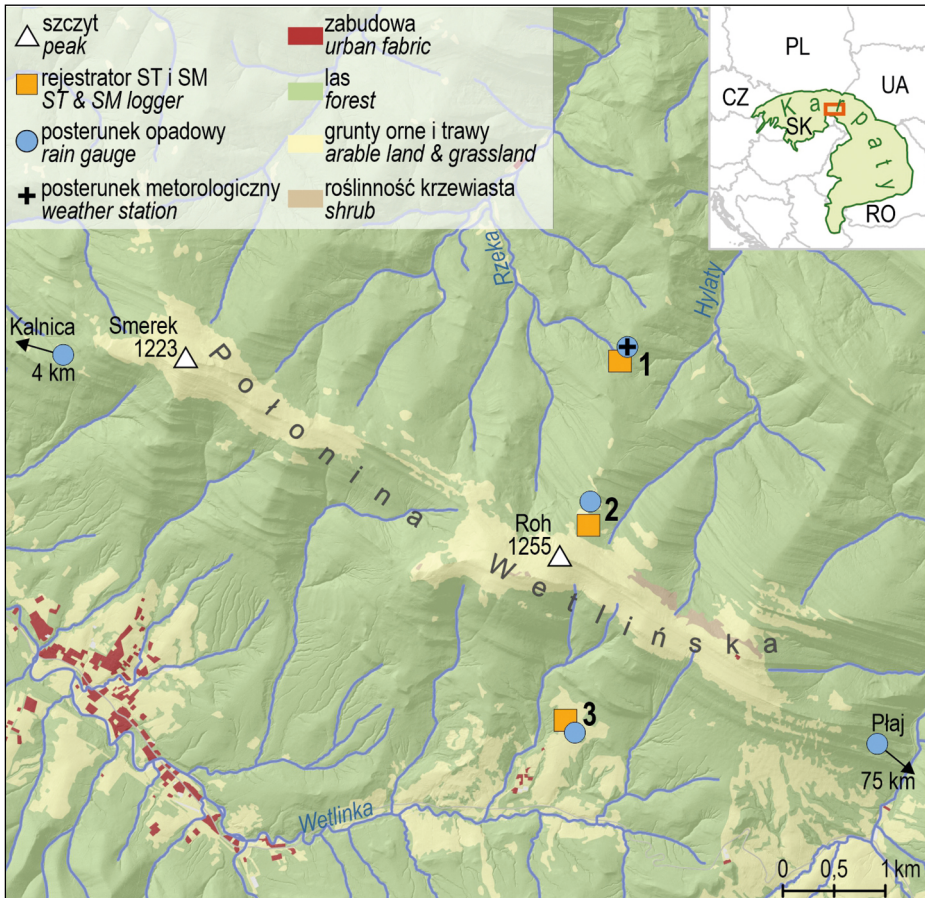
Badany obszar znajduje się pod wpływem klimatu górskiego o cechach kontynentalnych, gdzie dominują średnie roczne temperatury powietrza w zakresie 4–6°C, w najwyższych partiach osiągając 3–4°C (Michna, Paczos 1972; Nowosad 1995). Należy jednak podkreślić, że w związku z obserwowanym wzrostem temperatury powietrza, granice tych pięter ulegają przesunięciu (Wypych i in. 2018). Roczna suma opadów atmosferycznych w Bieszczadach Zachodnich jest zależna od wysokości bezwzględnej i orografii – wynosi od 1000 mm w dnach dolin do prawdopodobnie ok. 1600 mm w strefach grzbietowych (Cebulak i in. 2008; Laszczak i in. 2011; Waclawczyk i in. 2021). Duże znaczenie w kształtowaniu opadów ma ekspozycja – najwięcej opadów otrzymują stoki południowo-zachodnie (Nowosad, Wereski 2016). Długość zalegania pokrywy śnieżnej w bieszczadzkich dolinach wynosi 90–100 dni (Nowosad 1994). W pasmach górskich Bieszczadów dominuje piętro regla dolnego z buczyną karpacką, borem jodłowo-świerkowym i jaworzyną, a powyżej górnej granicy lasu występuje subalpejskie piętro połonin z m.in. traworoślami i borówczyskami (Winnicki, Zemanek 2003).

Dane i metody badań

Pomiary wilgotności i temperatury gleby prowadzono w okresie od 23.11.2020 r. do 19.11.2021 r. na trzech stanowiskach (ryc.1, tab. 1). Na stanowiskach nr 1 i 3 występują ziołorośla typu łąkowego (łąka mietlicowa), przy czym stanowisko nr 1 jest niewielką śródleśną polaną (Michalik i in. 2016). Stanowisko nr 2 jest zlokalizowane na większej śródleśnej polanie położonej na bocznym grzbiecie Połoniny Wetlińskiej, gdzie dominują ziołorośla szczawiu alpejskiego (Michalik i in. 2016). Na każdym stanowisku pomiar wykonywany był na dwóch głębokościach: 20 i 45 cm. Do pomiarów wykorzystane zostały rejestratory przenikalności elektrycznej gleby typu TDT (*Time Domain Transmissometry*), model TMS-4 firmy TOMST (Wild i in. 2019), który zapisywał dane w interwałach 15-minutowych. W badanym obszarze pośrednie metody pomiaru wilgotności stanowią jedyny sposób monitorowania zmian wilgotności z wysoką rozdzielczością czasową.

Skład granulometryczny gleby oznaczono w każdym stanowisku na czterech głębokościach wykorzystując metodę areometryczną Casagrande'a w modyfikacji

Prószczyńskiego. Podgrupę granulometryczną określono zgodnie z klasyfikacją uziarnienia gleb PTG 2008 (Polskie... 2009). Oznaczenie węgla całkowitego wykonano metodą chromatografii gazowej za pomocą analizatora elementarnego CHNS (vario MICRO cube, Elementar), a ponieważ badane gleby nie zawierały węglanów, oznaczoną zawartość węgla całkowitego uznano za zawartość węgla organicznego.



Ryc. 1. Sieć pomiarowa w paśmie Połoniny Wetlińskiej na tle pokrycia terenu (na podstawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych); ST – temperatura gleby, SM – wilgotność gleby
Fig. 1. The measuring network across the Połonina Wetlińska Massif with landcover data in the background (based on the National Database of Topographic Objects); ST – soil temperature, SM – soil moisture

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

Tab. 1. Charakterystyka stanowisk pomiaru wilgotności i temperatury gleby
Table 1. Characteristics of soil moisture and temperature stations

Charakterystyka stanowiska Station characteristics	Stanowisko Station		
	nr/no. 1	nr/no. 2	nr/no. 3
Wysokość bezwzględna [m n.p.m] Elevation [m.a.s.l.]	830	1102	830
Pokrycie terenu Landcover	ziołorośla typu łąkowego Molinio-Arrhenatheretea	wysokogórskie traworośla i ziołorośla Betulo-Adenostyletea	ziołorośla typu łąkowego Molinio-Arrhenatheretea
Forma terenu Relief	grzbiet ridge	stok slope	stok slope
Podtyp gleby* Subtype of soil**	brunatna właściwa gruntowo-glejowa Gleyic Dystric Cambisol Siltic	brunatna kwaśna typowa Dystric Cambisol Siltic	brunatna właściwa gruntowo-glejowa Gleyic Dystric Cambisol Siltic

*Kabała i in. 2019, **IUSS... 2015

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

Gęstość objętościową gleb (ρ , $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), przewodność hydrauliczną gleby w warunkach pełnego nasycenia (K_{sat} , $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) oraz maksymalne nasycenie gleby (Sat_{max} , %) obliczono przy użyciu modelu zawartego w oprogramowaniu *Soil Water Characteristics 6.02* firmowanego przez Departament Rolnictwa USA oraz Washington State University (Saxton, Rawls 2006). Model ten wykorzystuje dane dotyczące składu granulometrycznego gleb oraz zawartości węgla organicznego.

Wzorcowe krzywe kalibracyjne dostępne w narzędziu TMS Calibr firmy TOMST zostały wykorzystane do przeliczenia surowych danych (impulsów elektromagnetycznych) na wilgotność objętościową gleby, % v/v (Wild i in. 2019). Wybór odpowiedniej krzywej wzorcowej odbywa się w sposób zautomatyzowany na podstawie wprowadzonych wartości składu granulometrycznego badanej gleby. Dodatkowo wykonano korektę krzywej, modyfikując parametr c funkcji kwadratowej o wartość wynikającą z różnicy między maksymalną odnotowaną chwilową wilgotnością objętościową a maksymalnym nasyceniem gleby (Sat_{max} , %). Potencjalne źródła niepewności w określeniu wilgotności objętościowej, szacowane przez firmę TOMST na $\leq 5\%$, są związane z dokładnością rejestratorów, reprezentatywnością próbki gleby pobranej do analizy składu granulometrycznego oraz udziałem części szkieletowych, który nie jest uwzględniany w obliczeniach. Należy zwrócić uwagę, że w związku

ze zróżnicowanym składem granulometrycznym i porowatością gleb na badanych stanowiskach, ta sama wartość wilgotności objętościowej gleby oznacza inny stopień wypełnienia przestrzeni porowej na różnych stanowiskach. Jednocześnie, wartość błędu oszacowania wartości wilgotności objętościowej jest w przybliżeniu stała dla sensora zainstalowanego w jednym konkretnym punkcie, co nadal umożliwia analizę porównawczą dynamiki zmian wilgotności pomiędzy stanowiskami.

W opracowaniu uwzględniono temperaturę powietrza (dokładność $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, rozdzielczość $0,02^{\circ}\text{C}$) mierzoną co 30 min automatycznie za pomocą rejestratora Onset S-THB-M008 umieszczonego w osłonie radiacyjnej na wysokości 2 m n.p.t. na posterunku meteorologicznym nr 1 (ryc. 1). Opady atmosferyczne mierzono od kwietnia do listopada 2021 r. przy użyciu trzech automatycznych deszczomierzy Pronamic z rejestratorami Odyssey o rozdzielczości 0,2 mm. Były one zlokalizowane w pobliżu punktów pomiaru wilgotności gleby (ryc. 1). Do pełnej charakterystyki warunków pluwialnych uwzględniono dane o dobowej sumie opadów i miąższości pokrywy śnieżnej z odległego o 4 km posterunku IMGW-PIB w Kalnicy (577 m n.p.m.). Dodatkowo wykorzystano dane o miąższości pokrywy śnieżnej ze stacji Płaj na Połoninie Borżawskiej (1330 m n.p.m., Ukraina), położonej w odległości 75 km na południowy wschód od Połoniny Wetlińskiej (Weather archive...). Pomimo dużej odległości od obszaru badań, wobec braku bliższych stacji pomiarowych zlokalizowanych w strefie grzbietowej, dane z Płaja stanowią najlepsze przybliżenie warunków meteorologicznych połonin, szczególnie w zakresie charakterystyki występowania pokrywy śnieżnej. Warunki meteorologiczne w okresie badań zostały przedstawione na tle średnich wieloletnich sum opadów w Kalnicy oraz temperatury powietrza i charakterystyk pokrywy śnieżnej w Lesku (Dane pomiarowo-obszernic...; Waclawczyk i in. 2021; Mostowik 2022).

Średnie dobowe wartości wilgotności i temperatury gleby oraz temperatury powietrza zostały obliczone jako średnie rzeczywiste ze wszystkich pomiarów w danej dobie (06–06 UTC). W charakterystykach sezonowych za zimę przyjęto okres od 23.11.2020 do 28.02.2021, za wiosnę 1.03.2021–31.05.2021, za lato 1.06.2021–31.08.2021, za jesień 1.09.2021–19.11.2021. W ocenie związków statystycznych między parametrami meteorologicznymi a temperaturą i wilgotnością gleby posłużono się współczynnikiem nieparametrycznej korelacji rang Spearmana, zakładając istotność statystyczną na poziomie $\alpha \leq 0,05$.

Wyniki

Charakterystyka warunków meteorologicznych w okresie badań

W badanym okresie średnia temperatura powietrza na posterunku nr 1 wyniosła $6,5^{\circ}\text{C}$ (tab. 2). Najcieplejszym miesiącem był lipiec ze średnią temperaturą powietrza

Tab. 2. Warunki meteorologiczne w okresie badań na posterunku meteorologicznym nr 1 (temperatura powietrza) i w Kalnicy (opad)

Table 2. Meteorological background of the studied period at the weather station no. 1 (air temperature) and in Kalnica (precipitation)

Parametry meteorologiczne Meteorological parameters		Rok Year	Zima Winter	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn
Temperatura powietrza Air temperature [°C]	średnia average	6,5	-1,8	4,1	16,5	7,7
	max	24,6	9,2	19,1	24,6	17,6
	min	-16,2	-16,2	-7,0	7,3	1,7
Suma opadów atmosferycznych Total precipitation [mm]		1119,4	311,9	249,5	408,6	149,4

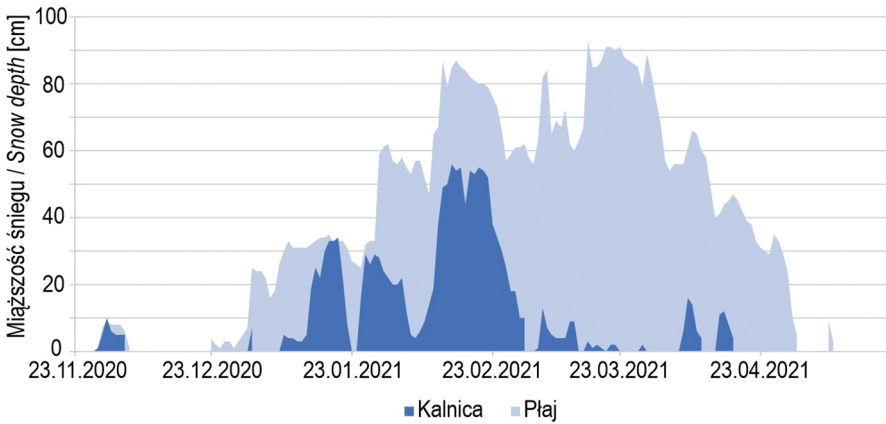
Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

18,8°C, a najchłodniejszym – styczeń –3,4°C. Przez 91 dni średnia dobowa temperatura powietrza była niższa od 0°C. Na stacji synoptycznej w Lesku temperatura powietrza w tym okresie wyniosła 8,2°C i była nieznacznie wyższa od średniej wieloletniej 8,1°C (Dane pomiarowo-obszaryjne...; Mostowik 2022).

Roczna suma opadów atmosferycznych na stacji w Kalnicy wyniosła 1119,4 mm (tab. 2). Wartość ta stanowi 99,5% średniej z wielolecia (Wacławczyk i in. 2021), wskazując na przeciętne warunki pluwiálne okresu badań. Najwyższą sumę opadów w Kalnicy odnotowano w sierpniu (184,7 mm), a najbardziej suchy był październik – w tym miesiącu opad wyniósł jedynie 2,1 mm. W okresie od maja do listopada 2021 r. najwyższą sumę opadów zmierzono na najwyższym położonym posterunku nr 2 (847,4 mm), a na pozostałych posterunkach sumy te wyniosły 823,6 mm (nr 1), 723,4 mm (nr 3) oraz 663,6 mm (Kalnica).

W badanym okresie pokrywa śnieżna pojawiła się po raz pierwszy pod koniec listopada, a ostatni dzień z pokrywą śnieżną w Kalnicy wystąpił 17 kwietnia, na Płaju zaś 9 maja (ryc. 2). Największą miąższość pokrywy śnieżnej na stacji w Kalnicy odnotowano 14 lutego – 56 cm, na Płaju 16 marca – 93 cm (ryc. 2). W badanym okresie pokrywa śnieżna utrzymywała się na stacji w Kalnicy przez 85 dni, a na stacji Płaj przez 141 dni, przy czym najdłuższy okres ciągłego zalegania pokrywy śnieżnej wynosił odpowiednio 37 i 130 dni. Liczba dni z pokrywą śnieżną w badanym okresie na stacji w Lesku była niższa o 10 dni od średniej wieloletniej wynoszącej 82 dni, przy jednocześnie większej miąższości maksymalnej śniegu, wynoszącej 48 cm w lutym 2021 r. względem średniej wieloletniej wartości 37 cm (Dane pomiarowo-obszaryjne...; Mostowik 2022).



Ryc. 2. Miąższość pokrywy śnieżnej w Kalnicy i na Płaju w okresie 23.11.2020–22.05.2021

Fig. 2. The snow cover depth in the period from 23.11.2020 to 22.05.2021 at Kalnica and Płaj stations

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

Charakterystyka badanych gleb

Analiza uziarnienia badanych gleb wykazała występowanie części szkieletowych poniżej głębokości 10 cm, gdzie ich udział wynosi od 5% na głębokości 10–20 cm na stanowiskach 1 i 3 do 52% na głębokości 40–50 cm na najwyższym położonym stanowisku nr 2. W częściach ziemistych dominuje frakcja pyłowa, której największy udział wykazano na stanowisku nr 2 (tab. 3). Podobieństwo składu granulometrycznego prezentują stanowiska nr 1 i 3, przy czym na stanowisku nr 3 jest nieco więcej frakcji piaskowej, głównie kosztem pyłowej. Na stanowisku nr 2 zawartość węgla organicznego na poszczególnych głębokościach jest ok. 2–4 razy większa niż w pozostałych stanowiskach (tab. 3).

Gęstość objętościowa badanych gleb, określona na podstawie składu granulometrycznego i zawartości węgla organicznego, jest najwyższa na głębokości 40–20 cm na stanowisku nr 3 – $1,46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a najniższa na głębokości 10–5 cm na stanowisku nr 2 – $0,78 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (tab. 3). Z kolei przewodność hydrauliczna gleb jest wyraźnie wyższa na stanowisku nr 2 w stosunku do stanowisk 1 i 3 i maleje wraz z głębokością od $104 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ do $17 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (ryc. 3). Spadek przewodności hydraulicznej z głębokością na stanowiskach nr 1 i 3 nie jest tak znaczący, a jego wartości są niższe i mieszczą się w zakresie odpowiednio $3\text{--}18$ i $3\text{--}33 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (ryc. 3). Podobne zróżnicowanie w profilach poszczególnych stanowisk dotyczy maksymalnego nasycenia gleby (ryc. 3).

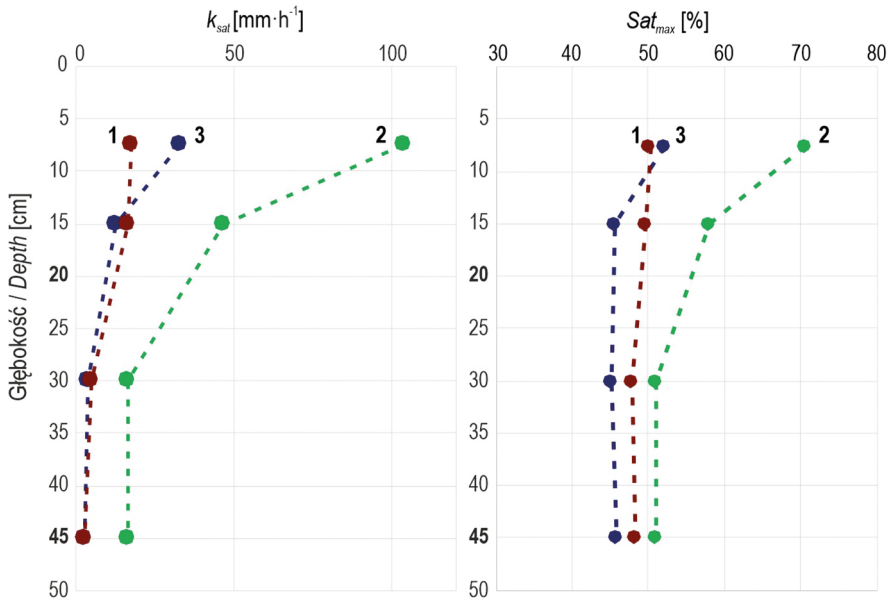
Tab. 3. Gęstość objętościowa, uziarnienie i zawartość węgla organicznego w badanych glebach
 Table 3. Bulk density, soil texture and total organic carbon in studied soils

Głębokość Depth [cm]	Stanowisko Station								
	nr/no. 1			nr/no. 2			nr/no. 3		
	gęstość objętościowa / bulk density [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]								
5-10	1,32			0,78			1,27		
10-20	1,34			1,11			1,44		
20-40	1,40			1,30			1,46		
40-50	1,37			1,30			1,43		
	zawartość węgla organicznego / total organic carbon [%]								
5-10	2,99			8,36			3,81		
10-20	2,78			4,84			1,94		
20-40	1,36			3,11			0,80		
40-50	0,94			2,59			0,63		
	części szkieletowe / particles > 2 mm [%]								
5-10	0			0			0		
10-20	5			12			5		
20-40	21			32			10		
40-50	31			52			24		
	skład granulometryczny / soil texture [%]								
	piasek sand	pył silt	ił clay	piasek sand	pył silt	ił clay	piasek sand	pył silt	ił clay
5-10	15	70	15	17	75	8	24	65	11
10-20	13	73	14	12	81	7	22	62	16
20-40	10	64	26	11	73	16	14	59	27
40-50	8	56	36	11	73	16	13	55	32
	podgrupa granulometryczna* / texture class**								
5-10	pył ilasty / silt loam			pył gliniasty / silt loam			pył gliniasty / silt loam		
10-20	pył ilasty / silt loam			pył zwykły / silt			pył ilasty / silt loam		
20-40	pył ilasty / silt loam			pył ilasty / silt loam			pył ilasty / silt loam		
40-50	głina piaszczysto-ilasta sandy clay loam			pył ilasty / silt loam			głina piaszczysto-ilasta sandy clay loam		

*Polskie... 2008; **USDA... 2004

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.



Ryc. 3. Przewodność hydrauliczna (k_{sat}) i maksymalne nasycenie gleby (Sat_{max}) w badanych profilach (1, 2, 3)

Fig. 3. The saturated soil hydraulic conductivity (k_{sat}) and soil saturation (Sat_{max}) in studied soil profiles (1, 2 & 3)

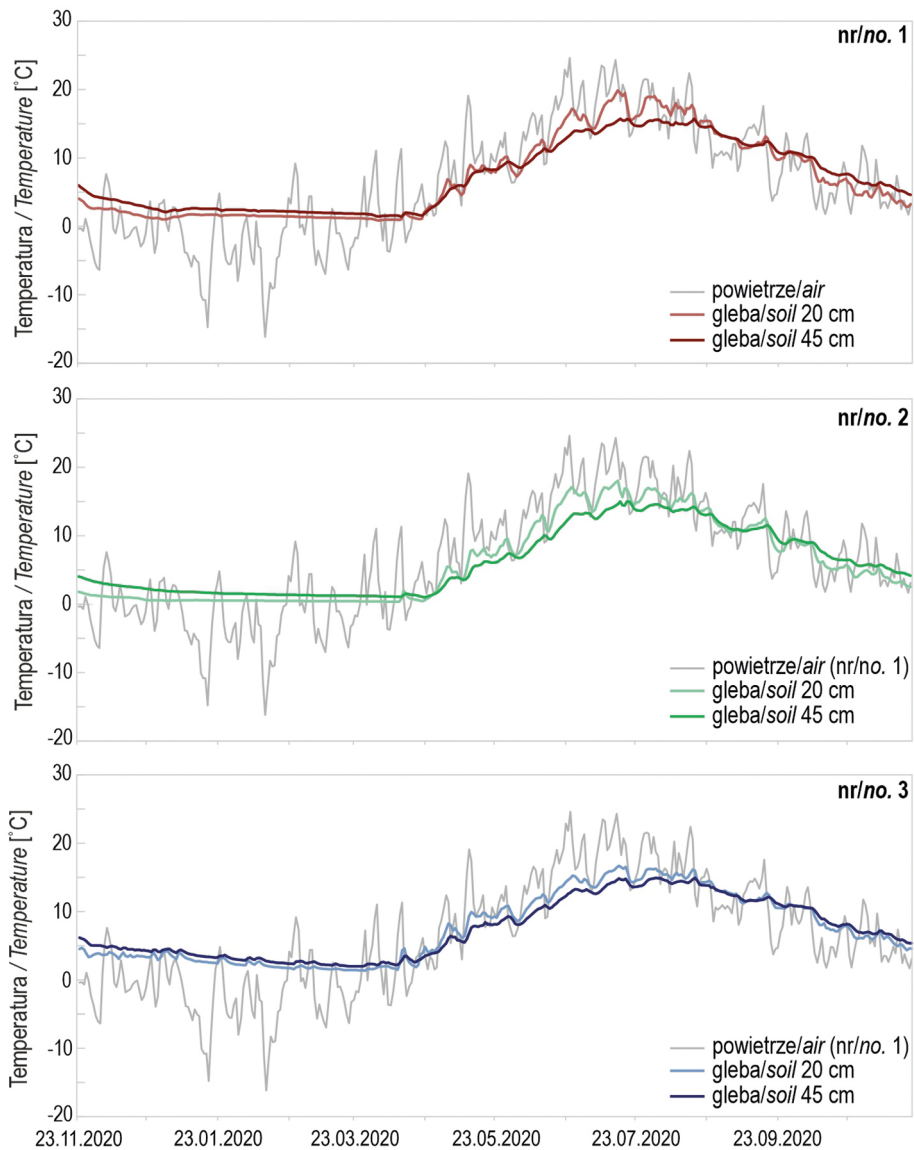
Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

Temperatura gleby

Średnia roczna temperatura gleby na głębokości 20 cm wyniosła od 6,1°C na najwyższym położonym stanowisku nr 2 do 7,5°C na stanowisku nr 3, a na głębokości 45 cm były to wartości odpowiednio 6,2°C i 7,5°C. We wszystkich punktach pomiarowych od końca kwietnia do sierpnia temperatura gleby na głębokości 20 cm była wyższa niż na 45 cm, a w pozostałej części roku zależność ta była odwrotna (ryc. 4). Temperatura gleby na głębokości 20 cm cechowała się większą zmiennością niż na 45 cm. Najniższą średnią dobową temperaturę gleby na głębokości 20 cm na wszystkich posterunkach zarejestrowano na przełomie marca i kwietnia – od 0,4°C (nr 2) do 1,4°C (nr 3). Najwyższą temperaturę gleby osiągały w lipcu z maksymalną średnią dobową wartością 19,9°C (20 cm) na stanowisku nr 1 (ryc. 4).

W ujęciu sezonowym najwyższą temperaturę gleby zimą, wiosną i jesienią zarejestrowano na stanowisku nr 3, natomiast latem najwyższe wartości występowały



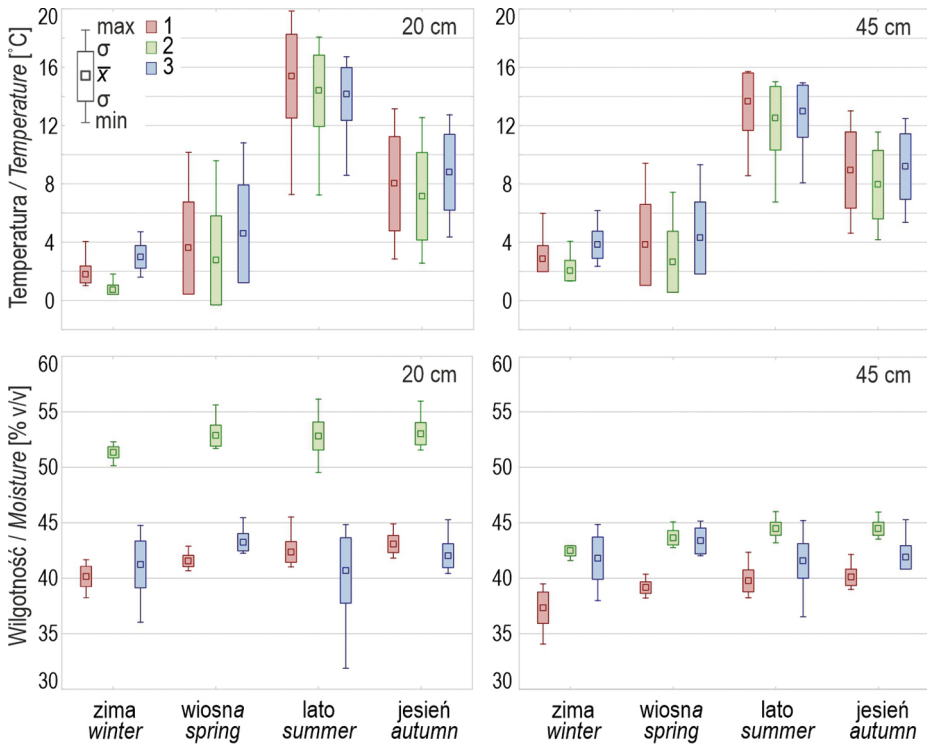
Ryc. 4. Przebieg średniej dobowej temperatury gleby (stanowiska nr 1, 2, 3) na różnych głębokościach (20 i 45 cm) i temperatury powietrza (posterunek 1)

Fig. 4. Average daily soil temperature (stations no. 1, 2 & 3) at different depths (20 & 45 cm) and air temperature (weather station no. 1)

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

na stanowisku nr 1 (ryc. 5). Średnia sezonowa temperatura gleby na głębokości 20 cm wyniosła od 0,7°C zimą (nr 2) do 15,4°C latem (nr 1), a na głębokości 45 cm odpowiednio od 2,1°C do 13,6°C (ryc. 5). Najmniejszą zmienność temperatury obserwowano zimą, szczególnie na najwyższym położonym stanowisku nr 2. Przejściowe okresy – wiosna i jesień – cechowały się natomiast największymi wartościami odchylenia standardowego (ryc. 5).



Ryc. 5. Sezonowe charakterystyki temperatury i wilgotności gleby na poszczególnych stanowiskach (1, 2, 3) i głębokościach (20 cm i 45 cm); \bar{x} – średnia, σ – odchylenie standardowe
Fig. 5. Seasonal characteristics of soil temperature and moisture at different stations (1, 2 & 3) and depths (20 cm & 45 cm); \bar{x} – mean, σ – standard deviation

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

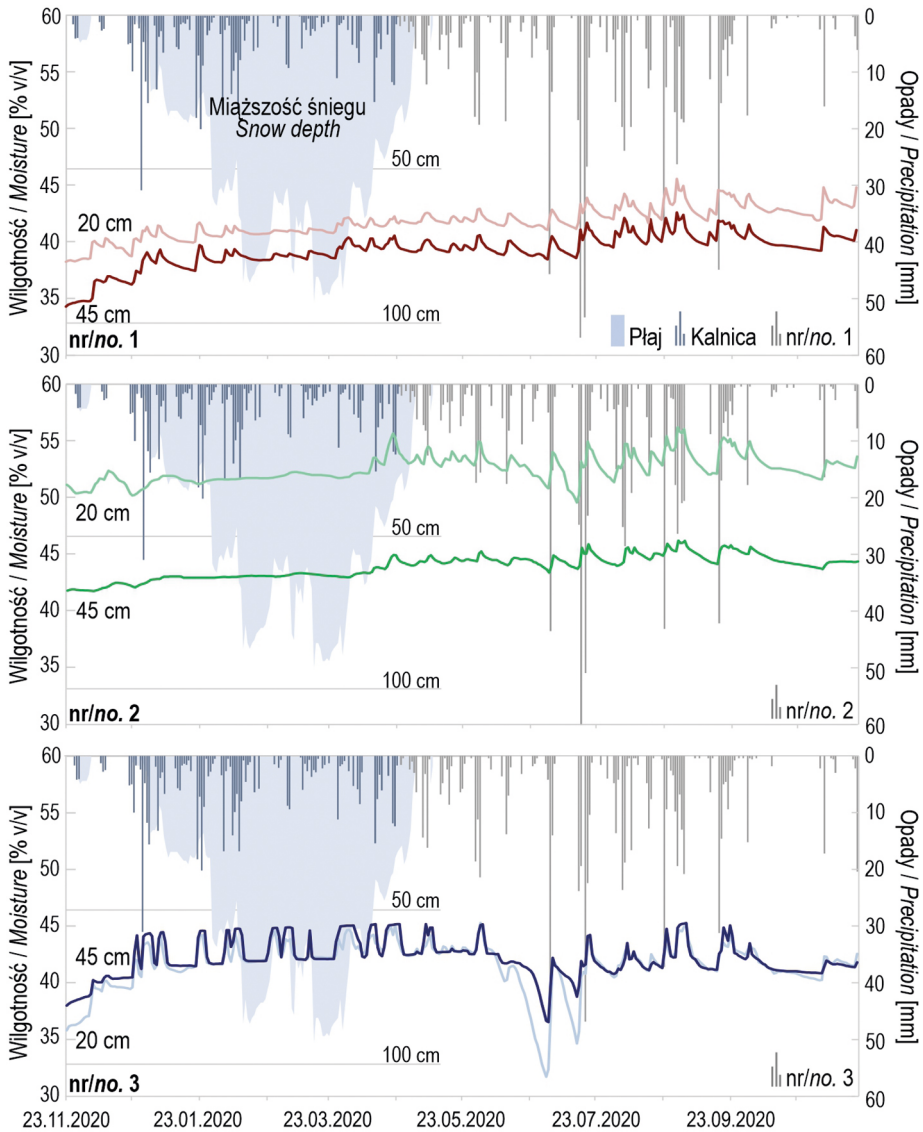
Wilgotność gleby

Średnia roczna wilgotność objętościowa gleby na głębokości 20 cm wyniosła 41,7% (stanowisko nr 1), 52,5% (nr 2) i 41,8% (nr 3). Z kolei na głębokości 45 cm były to wartości odpowiednio 39,1% v/v, 43,8% v/v, 42,2% v/v (ryc. 6). Zmienność wilgotności gleby w ciągu roku była zasadniczo niewielka – największą odnotowano na stanowisku nr 3 na głębokości 20 cm, gdzie zakres średnich dobowych wartości wynosił 31,9–45,4% v/v. Stanowisko nr 3 cechowało się, szczególnie zimą i wiosną, występowaniem kilkudniowych okresów utrzymujących się wysokich wartości wilgotności na głębokości 45 cm (ok. 45% v/v), świadczące o warunkach całkowitego wysycenia przestrzeni porowej gleb (ryc. 6). Na stanowisku nr 3 wystąpiły najmniejsze różnice między wilgotnością objętościową gleby na badanych głębokościach, a nieznacznie wyższe wartości tej wilgotności występowały w głębszej części profilu, szczególnie w okresie suchym (ryc. 6). Na stanowiskach nr 1 i 2 wyższe wartości wilgotności objętościowej występowały w płytszej części profilu (ryc. 6). Najwyższa wilgotność objętościowa występowała na głębokości 20 cm na stanowisku nr 2, gdzie gleba cechuje się najniższą gęstością objętościową, niewielką zawartością frakcji ilowej oraz najwyższą zawartością węgla organicznego (ryc. 6, tab. 3).

W ujęciu sezonowym najwyższa średnia wilgotność gleby przypadająca na różne pory roku na różnych stanowiskach, przy czym zmienność wilgotności w obrębie i pomiędzy porami roku była niewielka (ryc. 5). Na stanowisku nr 1 najwyższą średnią sezonową wilgotność gleby odnotowano jesienią, na stanowisku nr 3 wiosną, a na stanowisku nr 2 różnice między średnimi wiosny, lata i jesieni były nieznaczne. Z kolei najniższa średnia sezonowa wilgotność na stanowiskach nr 1 i 2 wystąpiła zimą, a na stanowisku nr 3 latem (ryc. 5). Największą zmienność wilgotności na wszystkich stanowiskach obserwowano w miesiącach letnich, ze szczególnie wyraźnym spadkiem w ciepłym i suchym okresie od czerwca do lipca na głębokości 20 cm (ryc. 6).

Związki pomiędzy temperaturą i wilgotnością gruntu a parametrami meteorologicznymi

Analizując współczynniki korelacji między parametrami meteorologicznymi (średnia dobowa temperatura powietrza, suma opadów z 10 poprzedzających dni) a charakterystykami gleby (średnia dobowa wilgotność, średnia dobowa temperatura) można zauważyć wyraźnie większą siłę związku między tymi parametrami w półroczu ciepłym w stosunku do półroczu chłodnego (tab. 4, tab. 5). Pomiędzy temperaturą powietrza a wilgotnością i temperaturą gleby na obu głębokościach w półroczu chłodnym dominowała słaba dodatnia korelacja lub brak korelacji. Zaznaczyła się również istotna statystycznie zależność, że im wyższa suma opadów z 10 dni poprzedzających tym większa wilgotność gleby. Jednak zależność ta nie była silna, $r \approx 0,4$ (tab. 4).



Ryc. 6. Przebieg średniej dobowej wilgotności gleby na poszczególnych stanowiskach (1, 2, 3) i głębokościach (20 i 45 cm) na tle miąższości pokrywy śnieżnej na Płaju i dobowych sum opadów atmosferycznych. Opady atmosferyczne z posterunków własnych (maj–listopad) uzupełniono danymi z posterunku Kalnica (listopad–kwiecień)

Fig. 6. Average daily soil moisture and daily precipitation totals at different stations (1, 2 & 3) and depths (20 & 45 cm) in relation to the snow cover depth at Płaj station and daily precipitation totals. Precipitation totals from own rain gauges (May–Nov.) were supplemented with the Kalnica rain gauge data (Nov.–Apr.)

Źródło: opracowanie własne. / Source: own elaboration.

Tab. 4. Współczynniki korelacji rangowej obliczone między wilgotnością gleby a parametrami meteorologicznymi w półroczu chłodnym i ciepłym. Współczynniki korelacji istotne statystycznie ($p \leq 0,05$) zostały pogrubione.

Table 4. Rank correlation coefficients calculated between soil moisture and meteorological parameters in a cold- and warm half-year. Statistically significant correlation coefficients ($p \leq 0.05$) are indicated in bold.

Parametr / Parameter		Wilgotność gleby / Soil moisture			
		półrocze chłodne cold half-year		półrocze ciepłe warm half-year	
		20 cm	45 cm	20 cm	45 cm
Suma opadów z 10 dni 10-days total precipitation	nr/no. 1	0,41	0,42	0,32	0,49
	nr/no. 2	0,15	0,35	0,60	0,69
	nr/no. 3	0,38	0,41	0,57	0,58
Temperatura powietrza (nr 1) Air temperature (no. 1)	nr/no. 1	0,41	0,32	-0,47	-0,27
	nr/no. 2	0,17	0,09	-0,32	-0,06
	nr/no. 3	0,47	0,42	-0,37	-0,29

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

W półroczu ciepłym dodatni związek między sumą opadów z 10 dni a wilgotnością gleby miał średnią siłę na prawie wszystkich stanowiskach pomiarowych. W ciepłej połowie roku zaobserwowano również odwrotną zależność między temperaturą powietrza i wilgotnością gleby, a siła tego związku była słaba lub średnia. Wyjątkiem było stanowisko nr 2 na głębokości 45 cm, gdzie zależność ta nie występowała.

Związek między wilgotnością gleby a temperaturą gleby był bardziej skomplikowany, a jego występowanie i siła zależały od głębokości, na której wykonywany był pomiar (tab. 5). Zarówno w półroczu chłodnym, jak i ciepłym na głębokości 20 cm dominował słaby ujemny związek tych parametrów. Silna korelacja występowała z reguły między temperaturą gleby a wilgotnością gleby na głębokości 45 cm w półroczu chłodnym, przy czym im wyższa temperatura gleby tym mniejsza wilgotność. W półroczu ciepłym na głębokości 45 cm związek między wilgotnością gleby a temperaturą gleby był co prawda istotny statystycznie, ale słaby. Związek ten był dodatni na stanowiskach nr 1 i 2, a na stanowisku nr 3 ujemny. W ciepłej połowie roku występowała silna dodatnia korelacja między temperaturą powietrza a temperaturą gleby na wszystkich stanowiskach (tab. 5).

Tab. 5. Współczynniki korelacji rangowej obliczone między temperaturą i wilgotnością gleby oraz między temperaturą powietrza i gleby w półroczu chłodnym i ciepłym. Współczynniki korelacji istotne statystycznie ($p \leq 0,05$) zostały pogrubione.

Table 5. Rank correlation coefficients calculated between soil temperature, soil moisture, and air temperature in a cold- and warm half-year. Statistically significant correlation coefficients ($p \leq 0,05$) are indicated in bold.

Parametr / Parameter		Temperatura gleby / Soil temperature			
		półrocze chłodne cold half-year		półrocze ciepłe warm half-year	
		20 cm	45 cm	20 cm	45 cm
Wilgotność gleby Soil moisture		nr/no. 1			
	20 cm	-0,51	-	-0,14	-
	45 cm	-	-0,80	-	0,21
		nr/no. 2			
	20 cm	-0,30	-	-0,18	-
	45 cm	-	-0,80	-	0,23
		nr/no. 3			
	20 cm	-0,31	-	-0,23	-
	45 cm	-	-0,47	-	-0,20
Temperatura powietrza (nr 1) Air temperature (no. 1)	nr/no. 1	-0,15	-0,16	0,83	0,73
	nr/no. 2	0,04	-0,12	0,85	0,71
	nr/no. 3	0,18	0,06	0,84	0,72

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

Dyskusja

Warunki termiczne gleb

Isolująca rola pokrywy śnieżnej zimą i wczesną wiosną wpłynęła na niewielką zmienność temperatury gleby w tym okresie we wszystkich analizowanych stanowiskach i na jej słaby związek z temperaturą powietrza. Podobne zależności w miesiącach zimowych zostały udokumentowane w glebach na stokach w zlewni Kościeliskiego Potoku w Tatrach (Siwek 2020, 2021), a także w innych obszarach o znaczącej roli retencji wody w pokrywie śnieżnej (Mellander i in. 2005; Zhang i in. 2005). Dotychczas, zahamowanie procesu infiltracji wskutek zamarznięcia gruntu

i znikome zasilanie wód podziemnych w miesiącach zimowych było wskazywane jako typowa cecha obiegu wody w obszarach górskich Karpat (Jokiel 1994). Natomiast niniejsze badania wykazały brak przemarzania gleby nawet blisko grzbietu pasma Połoniny Wetlińskiej na wysokości 1100 m n.p.m., co umożliwia powolną infiltrację wody z topniejącej pokrywy śnieżnej i zasilanie zbiorników wód podziemnych w okresie zimowym. W związku z ocieplającym się klimatem, zmianą wysokości pięter klimatycznych, wcześniejszym występowaniem roztopów i zmianą części opadów ze śnieżnych na deszczowe (Blöschl i in. 2017; Wypych i in. 2018; Mostowik i in. 2019b) w obszarach górskich może dochodzić do zmiany warunków infiltracji w okresie zimowym. W obszarach, gdzie prowadzony jest wieloletni monitoring temperatury gleby, badania wskazują na jej wyraźny wzrost w nawiązaniu do wzrostu temperatury powietrza (Braganza i in. 2004; Bryś 2008; Bai i in. 2014). Przeprowadzone w tej pracy analizy, a także wyniki innych badań (Siwek 2020, 2021), wskazują, że w Karpatach, co najmniej do wysokości 1100 m n.p.m., zjawisko przemarzania gruntu może współcześnie w ogóle nie występować.

W półroczu ciepłym temperatura badanych gleb wyraźnie zależy od temperatury powietrza, szczególnie w przypowierzchniowej części profilu glebowego. Taką prawidłowość potwierdza wiele szczegółowych analiz dotyczących warunków termicznych gleb południowej Polski (Bryś 2008; Ciaranek 2013; Wojkowski, Skowera 2017; Siwek 2021). Na wszystkich analizowanych stanowiskach oraz głębokościach współczynnik korelacji między temperaturą gleby i powietrza przyjmuje bardzo podobne wartości, co wynika z lokalizacji stanowisk na otwartej przestrzeni porośniętej niską roślinnością. Nie można natomiast wskazać wyraźnych zależności między temperaturą i wilgotnością badanych gleb w półroczu ciepłym, choć w innych obszarach, np. w glebach brunatnych na stokach Beskidu Niskiego, udokumentowano ujemną korelację tych parametrów (Bochenek 2006). Z kolei ujemna korelacja temperatury i wilgotności gleby na badanych stanowiskach w półroczu chłodnym wynika ze spadającej po ciepłym okresie temperatury gleby i z rosnącej wilgotności wskutek większych opadów, mniejszego parowania i infiltracji wody z pokrywy śnieżnej.

Przeprowadzone w paśmie Połoniny Wetlińskiej badania potwierdzają ogólne związki temperatury gleby z parametrami meteorologicznymi, w tym temperaturą, promieniowaniem słonecznym i ewapotranspiracją, obserwowanymi w innych obszarach Polski (Michalska, Nidzgorska-Lencewicz 2005). Pewien wyjątek stanowi temperatura gleby na stanowiskach 1 i 3 w okresie letnim. W badaniach termiki gleb w Tatrach wykazano w okresie letnim wyższą temperaturę gleby na stokach o ekspozycji południowej względem ekspozycji północnej. Również związki temperatury gleby z temperaturą powietrza były wyraźnie silniejsze na stokach o ekspozycji południowej względem północnej (Siwek 2021). W badanych glebach, pomimo południowej ekspozycji stoku stanowiska nr 3, temperatura gleby latem była tam niższa niż na stanowisku 1, zlokalizowanym na środkowej polanie na stoku północnym. Różnica

ta może wynikać z 1) odmiennych zdolności buforujących roślinności występującej na omawianych stanowiskach, 2) odmiennego bilansu promieniowania cieplnego w odsłoniętym obszarze (nr 3) względem polany śródleśnej (nr 1) (Hashimoto, Suzuki 2004; Hu i in. 2013; Siwek 2021) oraz 3) modyfikacji termiki gleby na stoku wskutek dopływu chłodniejszych wód spływu śródpokrywowego oraz płytko zalegających wód podziemnych (Vargas Zeppetello i in. 2019). Warto również zauważyć, że stanowisko nr 3 jest położone blisko dna dużej doliny (Wetliny), co także może wpływać na temperaturę powietrza i gleby. Dokładniejsze rozpoznanie przyczyn zróżnicowania warunków gleb wymaga jednak rozszerzenia sieci pomiarowej z uwzględnieniem m.in. ekspozycji oraz pokrycia terenu.

Warunki wilgotnościowe gleb

Aktualne i poprzedzające warunki meteorologiczne determinują wilgotność badanych gleb w paśmie Połoniny Wetlińskiej, choć złożoność tych związków powoduje brak silnych korelacji pomiędzy poszczególnymi parametrami (opady, temperatura powietrza) a wilgotnością gleby. W półroczu chłodnym powszechna jest prawidłowość, że większej wilgotności gleb na badanych stanowiskach sprzyjają wyższe sumy opadów w okresie poprzedzającym i wyższa temperatura powietrza, powodująca topnienie pokrywy śnieżnej. Z kolei do wzrostu wilgotności gleby w półroczu ciepłym przyczyniają się większe opady i niższa temperatura powietrza towarzysząca np. przechodzeniu frontów atmosferycznych. Należy również podkreślić, że związki temperatury powietrza z wilgotnością badanych gleb były silniejsze na głębokości 20 cm, natomiast współczynniki korelacji sum opadów i wilgotności gleby miały wyższe wartości na głębokości 45 cm. Podobne zależności zostały opisane dla gleby leśnej w Karpatach Rumuńskich (1054 m n.p.m., stanowisko Predeal); przy czym po wykonaniu korelacji krzyżowej wilgotności gleby z opadami i temperaturą w dniach poprzedzających, związki te już nie były tak jednoznaczne (Dincă i in. 2018). W badaniach wilgotności gleb na Wielkich Równinach w USA wykazano najsilniejszy wzrost wilgotności na głębokości 10 cm i 25 cm od jednego do 10 dni po opadzie, natomiast głębiej związki między opadem i wilgotnością nie były wyraźnie widoczne (Mahmood i in. 2012). W tych badaniach wskazano również na silny związek wilgotności gleby z maksymalną temperaturą powietrza (Mahmood i in. 2012).

Zróżnicowane w profilu pionowym właściwości gleb (skład granulometryczny, gęstość, porowatość, zawartość materii organicznej) decydują o odmiennych zdolnościach filtracyjnych i retencyjnych poszczególnych poziomów glebowych. Skutkuje to dużym zróżnicowaniem wilgotności względnej i brakiem powtarzalnego schematu zmiany wilgotności w profilu pionowym (Mahmood i in. 2012; Sun i in. 2015; Dincă i in. 2018), choć w niektórych regionach jest zauważana prawidłowość wzrostu wilgotności objętościowej wraz z głębokością (James i in. 2003; Bochenek 2006) lub jej

spadek (Wiekenkamp i in. 2020). Powszechnie wskazuje się na dodatnią korelację zawartości wody w glebie z porowatością, udziałem frakcji piaskowej i pyłowej oraz zawartością węgla organicznego; odwrotne zależności dotyczą udziału frakcji ilowej oraz gęstości całkowitej (Sun i in. 2015; Dincă i in. 2018).

W badaniach gleb ekosystemów połoninowych, leśnych i łąkowych Bieszczadzkiego Parku Narodowego (Skiba i in. 1995) wykazano następujące ich właściwości: 1) gęstość właściwa od 2,49 do 2,77 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 2) gęstość objętościowa od 0,71 do 1,49 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 3) porowatość od 0,46 do 0,70 $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ oraz 4) pełna pojemność wodna od 0,47 do 0,69 $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ($pF=0,0$). Gleby porolne na obszarze dawnej wsi Caryńskie w Bieszczadach cechują się gęstością objętościową w zakresie 0,90–1,13 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ na głębokości 5–10 cm (Drewnik i in. 2010). Z kolei w górnych partiach bieszczadzskich pasm górskich gęstość objętościowa przypowierzchniowej (0-5 cm) części gleb wynosi od 0,3 do 1,2 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, przy średniej wartości 0,6 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Drewnik i in. 2019). Zgodnie z wcześniej przedstawionymi prawidłowościami, wyższe wartości pełnej pojemności wodnej występują w glebach o większej zawartości materii organicznej, mniejszej gęstości objętościowej i wyższej porowatości (Skiba i in. 1995). Analizowane w tej pracy właściwości gleb stanowisk nr 1, 2 i 3 mieszczą się w zakresie wartości przedstawionych dla gleb Bieszczadzkiego Parku Narodowego, wskazując na właściwe obliczenie wilgotności objętościowej gleb i poprawną parametryzację krzywych kalibracyjnych, pomimo nieuwzględnienia udziału części szkieletowych w kalibracji czujników. Ponadto, wskazana w części metodycznej dokładność obliczenia wilgotności objętościowej gleb na podstawie rejestratorów TMS-4 (błąd $\leq 5\%$), nie wpływa na samą ocenę dynamiki zmian wilgotności na danym stanowisku, gdyż wskazana przez producenta dokładność samego urządzenia może generować błędy maksymalnie do 1,5%.

Badane w pracy gleby brunatne właściwe gruntowo-glejowe o podobnym składzie granulometrycznym i przewodności hydraulicznej (stanowiska nr 1 i 3) cechują się podobnymi średnimi wartościami wilgotności objętościowej gleb na głębokości 20 cm, natomiast różnią się dynamiką przebiegu tej wilgotności w ciągu roku. Podobieństwo gęstości objętościowej i wartości maksymalnego nasycenia gleby w profilu pionowym stanowiska nr 3 skutkuje niewielkimi różnicami wilgotności gleby na głębokościach 20 i 45 cm, przy nieznacznie wyższych wartościach w głębszej części profilu. Na głębokości 45 cm na stanowisku nr 3, szczególnie w półroczu chłodnym, widoczne są kilkudniowe okresy utrzymujących się wysokich wartości wilgotności gleby (ok. 45% v/v). Wskazują one na maksymalną saturację gleby oraz płytkie zaleganie zwierciadła wód gruntowych w tych okresach, co może wynikać nie tylko z infiltracji wód opadowych i roztopowych, ale i z lateralnego dopływu wód z górnej, bardziej stromej części stoku (McGlynn, McDonnell 2003). W szczegółowych analizach zróżnicowania przestrzennego wilgotności gleb oraz mechanizmów przemieszczania się wody w glebie lokalne występowanie wysokich wartości wilgotności gleby jest związane

najczęściej ze znaczącym zróżnicowaniem składu granulometrycznego poziomów glebowych (w tym obecnością nieprzepuszczalnych poziomów typu *fragipan*), odmiennymi parametrami filtracji, występowaniem ścieżek spływu preferencyjnego i mikrorzeźbą podłoża skalnego (McGlynn, McDonnell 2003; McDaniel i in. 2008; Hardie i in. 2012, Wickenkamp i in. 2016). Odmienne niż w przypadku stanowiska nr 3, w glebach stanowisk nr 1 i 2 wyższa wilgotność objętościowa jest typowa dla płytszej części profilu i nie obserwowano w badanym roku dłuższych okresów pełnego nasycenia gleby wodą.

Największe zdolności retencyjne ma gleba na najwyższym położonym stanowisku nr 2, gdzie wysokie wartości wilgotności objętościowej (>50%), szczególnie w płytkiej części profilu, wynikają z wysokiej porowatości gleby, na którą wpływają niska zawartość frakcji ilowej, wysoka zawartość materii organicznej i niska gęstość objętościowa tej gleby. Skład granulometryczny gleb w strefach grzbietowych bieszczadzskich pasm, zdominowany przez frakcję pyłową i piaskową, wraz z niską gęstością objętościową płytkiej części profilu mogą wpływać na większą zdolność infiltracyjną gleb (Skiba i in. 1995; Kacprzak, Skiba 2001; Drewnik i in. 2019; Musielok i in. 2019, 2021), która przekłada się na skuteczne zasilanie płytkich zbiorników wód podziemnych. Te z kolei są drenowane przez wysoko położone, wydajne źródła, np. w paśmie Połoniny Wetlińskiej (Płaczkowska i in. 2018; Mostowik i in. 2021). Dodatkowo należy zauważyć, że wyraźnie niższe zdolności infiltracyjne w głębszej części gleby na stanowisku nr 2 wskazują na możliwość występowania śródpokrywowego spływu lateralnego w płytkiej strefie do 20–25 cm. W glebach o zróżnicowanej przepuszczalności poszczególnych poziomów glebowych lub płytko zalegającym podłożu skalnym spływ lateralny po warstwie słabiej przepuszczalnej pełni znaczącą rolę w obiegu wody na stoku (McGlynn, McDonnell 2003; Hardie i in. 2012).

Badane gleby na śródleśnych polanach na północnym stoku Połoniny Wetlińskiej (nr 1 i 2) cechują się mniejszą zmiennością wilgotności w ciągu roku w porównaniu z glebą na otwartej przestrzeni na stoku południowym (nr 3). Podobna prawidłowość została wykazana również w innych obszarach, szczególnie w badaniach porównawczych gleb leśnych i pozbawionych roślinności (James i in. 2003; Wang i in. 2018). W obszarach górskich zmienność wilgotności gruntu nawiązuje również do wysokości bezwzględnej obszaru i jest mniejsza w wyżej położonych stanowiskach (Dincă i in. 2018), co również potwierdza się w badanym obszarze. Najwyżej położone stanowisko nr 2 cechuje się najmniejszą zmiennością wilgotności w okresie zimowym, co wynika z trwale zalegającej i miększej pokrywy śnieżnej w górnej części pasma Połoniny Wetlińskiej, porównywalnej z warunkami przedstawionymi w pracy dla stacji na Płaju (ryc. 6). Z kolei największa zmienność wilgotności występuje w okresie letnim na stanowisku nr 3, zlokalizowanym na stoku o południowej ekspozycji na wysokości 830 m n.p.m. Większa wilgotność gleby na stanowiskach nr 1 i 2 w drugiej połowie roku jest najpewniej związana zarówno z warunkami pluwialnymi badanego okresu,

jak i z odmiennymi warunkami ewapotranspiracji na polanach śródleśnych na stoku północnym względem lokalizacji stanowiska nr 3 – łąki eksponowanej w kierunku południowym. Większe parowanie oraz pobór wody przez roślinny wpływają na większą dynamikę zmian w płytszej części gleby, co było obserwowane szczególnie w półroczu ciepłym we wszystkich badanych stanowiskach.

Podsumowanie

Roczne pomiary wilgotności i temperatury gleby o wysokiej rozdzielczości czasowej pozwoliły na określenie podstawowej zmienności tych parametrów na wybranych stanowiskach w paśmie Połoniny Wetlińskiej oraz na zidentyfikowanie ich związku z parametrami meteorologicznymi. W półroczu ciepłym temperatura badanych gleb silnie zależy od temperatury powietrza i od końca kwietnia do sierpnia jest wyższa w przypowierzchniowej części analizowanych profili. W półroczu chłodnym wykazano mniejszą zmienność temperatury gleby oraz brak zależności od temperatury powietrza, co zapewne wynika z izolującej roli pokrywy śnieżnej, istotnej w kształtowaniu obiegu wody w paśmie Połoniny Wetlińskiej. W czasie chłodnego półroczia, szczególnie w głębszej części badanych profili, niższa temperatura gleby jest związana z jej większą wilgotnością. Wilgotność badanych gleb pasma Połoniny Wetlińskiej w ciągu całego roku zależy od sumy opadów w okresie poprzedzającym; w półroczu chłodnym jest dodatnio skorelowana z temperaturą powietrza, a w półroczu ciepłym spada ze wzrostem temperatury powietrza.

Najwyższa temperatura gleby występuje przez większą część roku na stanowisku eksponowanym w kierunku południowym. Wyjątek stanowi okres letni, kiedy niższa – względem badanych gleb na stoku północnym – temperatura może wynikać ze stopnia wypełnienia przestrzeni porowej wodą, odmiennych zdolności buforujących roślinności, a także różnic w bilansie promieniowania. Pełne rozpoznanie przyczyn zróżnicowania warunków termicznych gleb wymaga jednak rozszerzenia sieci pomiarowej.

Średnie roczne wartości wilgotności objętościowej badanych gleb mieściły się w zakresie %53–42 na głębokości 20 cm i %44–39 na głębokości 45 cm. Wilgotność badanych gleb na polanach śródleśnych Połoniny Wetlińskiej cechuje się mniejszą zmiennością w ciągu roku niż gleba na stanowisku zlokalizowanym na otwartej przestrzeni. Ponadto, zmienność wilgotności jest najmniejsza w okresie zimowym na wysoko położonym stanowisku (blisko grzbietu Połoniny Wetlińskiej), a największa w okresie letnim w badanej glebie na stoku południowym. W półroczu ciepłym ewapotranspiracja stanowi ważny czynnik, wpływający na większą dynamikę zmian wilgotności objętościowej gleb w płytszej części badanych profili.

Więszymi zdolnościami retencyjnymi cechują się te spośród badanych gleb, które charakteryzują się mniejszym udziałem frakcji iłowej, mniejszą gęstością objętościową i wyższą zawartością materii organicznej. W badanym obszarze takie cechy dotyczą najczęściej gleb położonych w górnej części masywów, które reprezentuje również stanowisko nr 2, tuż poniżej grzbietu Połoniny Wetlińskiej. Większa porowatość takich gleb wpływa na efektywniejszą infiltrację i w konsekwencji zasilanie zbiorników wód podziemnych. Na wzrost wilgotności gleb, poza infiltracją wody opadowej i roztopowej, wpływać może również dostawa wód spływu śródpokrywowego. Zjawisko to prawdopodobnie zachodzi na stanowisku nr 3, gdzie występują kilkudniowe okresy z utrzymującymi się maksymalnymi możliwymi wartościami wilgotności objętościowej.

Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę kontynuacji prowadzonych obserwacji wilgotności i temperatury gleb. Planowana jest w związku z tym rozbudowa obecnej sieci monitoringu, która powinna pozwolić na lepsze zrozumienie czynników warunkujących współczesną dynamikę zmian wilgotności gleby w obszarach górskich.

Informacja o finansowaniu badań i podziękowania – zaanonimizowane w ramach procedury redakcyjnej

Literatura

- Bai Y., Scott T.A., Min Q., 2014, *Climate change implications of soil temperature in the Mojave Desert, USA*, *Frontiers of Earth Science*, 8(2), 302–308.
- Bernatek-Jakiel A., Jakiel M., Krzemień K., 2017, *Piping dynamics in mid-altitude mountains under a temperate climate: Bieszczady Mountains, eastern Carpathians*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 9, 1419–1433.
- Blöschl G., Hall J., Parajka J. i in., 2017, *Changing climate shifts timing of European floods*, *Science*, 357(6351), 588–590.
- Bochenek W., 2006, *Dynamika i wpływ czynników kształtujących wilgotność karpaccich fliszowych pokryw stokowych na przykładzie stoku doświadczalnego IGiPZ PAN w Szymbarku*, *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 7, 39–47.
- Boczoń A., Kowalska A., Dudzińska M., Wróbel M., 2016, *Drought in Polish Forests in 2015*, *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(5), 1857–1862.
- Braganza K., Karoly D. J., Arblaster J. M., 2004, *Diurnal temperature range as an index of global climate change during the twentieth century*, *Geophysical Research Letters*, 31(13), L13217.
- Bryś K., 2008, *Wieloletni wpływ pokrywy roślinnej na termikę gleby*, *Acta Agrophysica*, 12(1), 39–53.
- Büntgen U., Urban O., Krusic P. i in., 2021, *Recent European drought extremes beyond Common Era background variability*, *Nature Geoscience*, 14, 190–196.

- Cebulak E., Limanówka D., Malota A. i in., 2008, *Przebieg i skutki ulew w dorzeczu górnego Sanu w dniu 26 lipca 2005 r.*, Materiały Badawcze IMGW, Seria Meteorologia, 40.
- Chełmicki W., Skąpski R., Soja R., 1998/1999, *Reżim hydrologiczny rzek karpackich w Polsce*, Folia Geographica ser. Geographica-Physica, 29–30, 67–80.
- Chowaniec J., 1998/1999, *Wody podziemne polskich Karpat Fliszowych*, Folia Geographica. Series Geographica-Physica, 29–30, 113–133.
- Chowaniec J., Oszczytko N., Witek K., 1983, *Hydrogeologiczne cechy warstw krosieńskich centralnej depresji karpackiej*, Kwartalnik Geologiczny, 27, 797–810.
- Ciaranek D., 2013, *Wpływ warunków pogodowych na przebieg temperatury gleby w Ogrodzie Botanicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie*, Prace Geograficzne, 133, 77–99.
- Dincă L., Badea O., Guiman G., i in., 2018, *Monitoring of soil moisture in long-term ecological research (LTER) sites of Romanian*, Carpathians Annals of Forest Research, 61(2), 171–188.
- Drewnik M., Kacprzak A., Maziarka N., 2010, *Właściwości gleb porolnych na obszarze dawnej wsi Caryńskie*, Roczniki Bieszczadzkie, 18, 205–216.
- Drewnik M., Musielok Ł., Prędko R., i in., 2019, *Degradation and renaturalization of soils affected by tourist activity in the Bieszczady Mountains (South East Poland)*, Land Degradation & Development, 30(6), 670–682.
- Feng H., Liu Y., 2015, *Combined effects of precipitation and air temperature on soil moisture in different land covers in a humid basin*, Journal of Hydrology, 531, 1129–1140.
- Haczewski G., Kukulak J., Bąk K., 2007, *Budowa geologiczna i rzeźba Bieszczadzkiego Parku Narodowego*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej, Kraków.
- Hardie M.A., Doyle R.B., Cotching W.E., Lisson S., 2012, *Subsurface lateral flow in texture-contrast (duplex) soils and catchments with shallow bedrock*, Applied and Environmental Soil Science, 2012.
- Hashimoto S., Suzuki M., 2004, *The impact of forest clear-cutting on soil temperature: a comparison between before and after cutting, and between clear-cut and control sites*, Journal of Forest Research, 9, 2, 125–132.
- Hu G., Liu H., Anenkhonov O.A. i in., 2013, *Forest buffers soil temperature and postpones soil thaw as indicated by a three-year large-scale soil temperature monitoring in the forest-steppe ecotone in Inner Asia*, Global and Planetary Change, 104, 1–6.
- IUSS Working Group WRB, 2015, *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports, 106, FAO, Rome.
- James S.E., Pärtel M., Wilson S.D., Peltzer D.A., 2003, *Temporal heterogeneity of soil moisture in grassland and forest*, Journal of Ecology, 91(2), 234–239.
- Jokić P., 1994, *Zasoby, odnawialność i odpływ wód podziemnych strefy aktywnej wymiany wody w Polsce*, Acta Geographica Lodziensia, 236, 66–67.
- Kabała C., Charzyński P., Chodorowski J., i in., 2019, *Systematyka gleb Polski*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław.

- Kacprzak A., Skiba M., 2001, *Uziarnienie i skład mineralny gleby jako wskaźniki genezy utworów macierzystych gleb w katenie Małej Rawki (Bieszczady Zachodnie)*, Roczniki Bieszczadzkie, 9, 169–181.
- Laszczak E., Ziótkowski L., Siwek J., 2011, *Opady i pokrywa śnieżna*, [w:] B. Rzonca, J. Siwek (red.), *Hydrologia Bieszczadów. Zlewnie Sanu i Solinki do Jeziora Solińskiego*, IGiGP UJ, Kraków, 21–30.
- Legates D.R., Mahmood R., Levina D. F., 2011, *Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography*, Progress in Physical Geography, 35, 1, 65–86.
- Łajczak A., Dumnicka E., Galas J., 2010, *Plan ochrony Bieszczadzkiego Parku Narodowego. Operat ochrony zasobów przyrody nieożywionej. Warunki wodne*, Krameko, Kraków.
- Mahmood R., Littell A., Hubbard K.G., You J., 2012, *Observed data-based assessment of relationships among soil moisture at various depths, precipitation, and temperature*, Applied Geography, 34, 255–264.
- Malata T., Jankowski L., Żyto K., 2014, *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski. Arkusz 1066 – Lutowiska*, PIG–PIB, Warszawa.
- McDaniel A., Regan M.P., Brooks E. i in., 2008, *Linking fragipans, perched water tables, and catchment-scale hydrological processes*, Catena, 73, 2, 166–173.
- McGlynn B.L., McDonnell J.J., 2003, *Quantifying the relative contributions of riparian and hillslope zones to catchment runoff*, Water Resources Research, 39, 11, 1310.
- Mellander E., Laudon H., Bishop K., 2005, *Modelling variability of snow depths and soil temperatures in Scots pine stands*, Agricultural and Forest Meteorology, 33, 109–118.
- Michalik S., Denisiuk Z., Dubiel E. i in., 2016, *Zbiorowiska roślinne Bieszczadzkiego Parku Narodowego (mapa)*, [w:] A. Górecki, B. Zemanek (red.), *Bieszczadzki Park Narodowy – 40 lat ochrony*, Bieszczadzki Park Narodowy, Ustrzyki Górne.
- Michalska B., Nidzgorska-Lencewicz J., 2005, *Elementy meteorologiczne kształtujące temperaturę gleby nieporośniętej i pod żytem w stacji agrometeorologicznej w Lipkach*, Acta Agrophysica, 6(2), 425–441.
- Michna E., Paczos S., 1972, *Zarys klimatu Bieszczadów Zachodnich*, Ossolineum. Wrocław–Warszawa.
- Mostowik K., 2022, *Obieg wody w małych zlewniach w Bieszczadach Zachodnich na przykładzie pasma Połoniny Wetlińskiej*, Praca doktorska, Arch. IGiGP UJ, Kraków.
- Mostowik K., Jastrzębska B., Kowalik K., 2019a, *Odpyły podziemny ze zlewni elementarnych w Bieszczadach*, Roczniki Bieszczadzkie, 27, 367–387.
- Mostowik K., Krzyczman D., Płaczkowska E., 2021, *Spring recharge and groundwater flow patterns in flysch aquifer in the Połonina Wetlińska Massif in the Carpathian Mountains*, Journal of Mountain Science, 18(4), 819–833.
- Mostowik K., Siwek J., Kisiel M., 2019b, *Runoff trends in a changing climate in the Eastern Carpathians (Bieszczady Mountains, Poland)*, Catena, 182, 104174.

- Musielok Ł., Drewnik M., Szymański W. i in., 2021, *Conditions favoring local podzolization in soils developed from flysch regolith – A case study from the Bieszczady Mountains in southeastern Poland*, Geoderma, 381, 114667.
- Musielok Ł., Drewnik M., Szymański W., Stolarczyk M., 2019, *Classification of mountain soils in a subalpine zone – a case study from the Bieszczady Mountains (SE Poland)*, Soil Science Annual, 70, 170–177.
- Nowosad M., 1994, *Zarys charakterystyki pokrywy śnieżnej w Bieszczadach*, Annales UMCS, 49(14), 197–215.
- Nowosad M., 1995, *Zarys klimatu Bieszczadzkiego Parku Narodowego i jego otuliny w świetle dotychczasowych badań*, Roczniki Bieszczadzkie, 4, 163–183.
- Nowosad M., Wereski S., 2016, *Warunki klimatyczne*, [w:] A. Górecki, B. Zemanek (red.), *Bieszczadzki Park Narodowy – 40 lat ochrony*, Bieszczadzki Park Narodowy, Ustrzyki Górne, 31–38.
- Pińskwar I., Choryński A., Kundzewicz Z.W., 2020, *Severe Drought in the Spring of 2020 in Poland—More of the Same?*, Agronomy, 10(11), 1646.
- Plenzler J., Bajorek J., Jaśkowiec B. i in. 2010, *Specific base flow in the High Bieszczady Mountains*, Przegląd Geologiczny, 58(12), 1147–1151.
- Płaczkowska E., Górnik M., Mocior E. i in., 2015, *Spatial distribution of channel heads in the Polish Flysch Carpathians*, Catena, 127, 240–249.
- Płaczkowska E., Siwek J., Maciejczyk K. i in., 2018, *Groundwater capacity of a flysch-type aquifer feeding springs in the Outer Eastern Carpathians (Poland)*, Hydrology Research, 49(6), 1946–1959.
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, 2009, *Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008*, Roczniki Gleboznawcze, 60(2), 5–16.
- Robock A., Vinnikov K.Y., Srinivasan G. i in., 2000, *The global soil moisture data bank*, Bulletin of the American Meteorological Society, 81(6), 1281–1300.
- Rubinkiewicz J., Tomaszczyk M., 2016, *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, Arkusz Wetlina*, PIG–PIB, Warszawa.
- Rzonca B., Siwek J., Zawilo M. i in., 2016, *Niżówka w Bieszczadach w 2015 roku*, Roczniki Bieszczadzkie, 24, 263–279.
- Saxton K.E., Rawls W.J., 2006, *Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions*, Soil Science Society of America Journal, 70, 1569–1578.
- Siwek J.P., 2020, *Effects of hurricane-driven deforestation and reforestation on diurnal soil temperature changes in the Tatra Mountains in southern Poland*, Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus, 19(3), 59–71.
- Siwek J.P., 2021, *Effects of forest disturbance on seasonal soil temperature changes in the Tatra Mountains in southern Poland*, Central European Forestry Journal, 67, 35–44.
- Skiba S., 1999, *Charakterystyka pokrywy glebowej Bieszczadzkiego Parku Narodowego*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 467, 21–23.
- Skiba S., Szmuc R., Zaleski T., 1995, *Wstępna charakterystyka właściwości wodnych gleb Bieszczadzkiego Parku Narodowego*, Roczniki Bieszczadzkie, 4, 117–122.

- Solon J., Borzyszkowski J., Bidłasik M. i in., 2018, *Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data*, *Geographia Polonica*, 91(2), 143–170.
- Somorowska U., 2008, *Dynamika glebowych zasobów wodnych w Polsce współcześnie i w przyszłości*, *Przegląd Geofizyczny*, 2, 155–165.
- Stolarczyk M., Gus M., Jelonkiewicz Ł., 2017, *Zmiany we właściwościach chemicznych gleb torfowych wskutek odwodnienia na przykładzie Tarnawy Wyższej (Bieszczady Zachodnie)*, *Roczniki Bieszczadzkie*, 25, 387–402.
- Sun F., Lü Y., Wang J. i in., 2015, *Soil moisture dynamics of typical ecosystems in response to precipitation: A monitoring-based analysis of hydrological service in the Qilian Mountains*, *Catena*, 129, 63–75.
- Tomczyk A.M., Bednorz E., Szyga-Pluta K., 2021, *Changes in Air Temperature and Snow Cover in Winter in Poland*, *Atmosphere*, 12(1), 68.
- USDA NRCS, 2004, *Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42*, U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Lincoln.
- Vargas Zeppetello L., Battisti D.S., Baker M. B., 2019, *The origin of soil moisture evaporation “regimes”*. *Journal of Climate*, 32(20), 6939–6960.
- Vereecken H., Huisman J.A., Bogena H., 2008, *On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review*, *Water Resources Research*, 44(4), W00D06.
- Wacławczyk P., Mostowik K., Rzonca B., 2021, *Bilans wodny wybranych zlewni w Bieszczadach w latach 1989–2018*, *Roczniki Bieszczadzkie*, 29, 121–142.
- Wang Y., Yang J., Chen Y. i in., 2018, *The spatiotemporal response of soil moisture to precipitation and temperature changes in an arid region, China*, *Remote Sensing*, 10, 468.
- Wickenkamp I., Huisman J. A., Bogena H.R. i in., 2016, *Changes in measured spatiotemporal patterns of hydrological response after partial deforestation in a headwater catchment*, *Journal of Hydrology*, 534, 139–149.
- Wickenkamp I., Huisman J.A., Bogena H.R., Vereecken, H., 2020, *Effects of deforestation on water flow in the vadose zone*, *Water*, 12, (1), 35, 1–16.
- Wild J., Kopecky M., Macek M. i in., 2019, *Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement*, *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 40–47.
- Winnicki T., Zemanek B., 2003, *Przyroda Bieszczadzkiego Parku Narodowego*, Bieszczadzki Park Narodowy, Ustrzyki Dolne.
- Wojkowski J., Skowera B., 2017, *Związek temperatury gleby z temperaturą powietrza w warunkach jurajskiej doliny rzecznej*. *Inżynieria Ekologiczna*, 18, 1, 18–26.
- Wypych A., Ustrnul Z., Schmatz D., 2018, *Long-term variability of air temperature and precipitation conditions in the Polish Carpathians*, *Journal of Mountain Science*, 15(2), 237–253.
- Zhang Y., Chen W., Smith S.L. i in., 2005, *Soil temperature in Canada during the twentieth century: Complex responses to atmospheric climate change*, *Journal of Geophysical Research*, 110, D03112.

Źródła internetowe:

Dane pomiarowo-observacyjne IMGW-PIB, https://dane.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_observacyjne/ (dostęp: 5.10.2022).

Weather archive in Play, Raspisaniye Pogodi Ltd, https://rp5.ua/Weather_archive_in_Play (dostęp: 31.01.2022).

Karolina Mostowik ORCID: 0000-0003-2945-5909, Agnieszka Kafel, Agnieszka Kozioł, Dominika Paruch, Bartłomiej Rzonca ORCID: 0000-0002-8938-1457, Janusz Świątek ORCID: 0000-0003-1636-1524, Jakub Storwiński, Mateusz Stolarczyk ORCID: 0000-0001-8317-2315
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków
mostowik.karolina@gmail.com

Marta Kisiel
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Nauk Geologicznych
ul. Gronostajowa 3a, 30-387 Kraków
Polska Akademia Nauk
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
ul. Św. Jana 22, 31-018 Kraków
ORCID: 0000-0002-2358-9597

Plączkowska Eliza
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Polska Akademia Nauk
ul. Św. Jana 22, 31-018 Kraków
ORCID:0000-0001-7993-6706

