INSTYTUT AGROFIZYKI
IM. BOHDANA DOBRZAŃSKIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Rafał Mazur

DEFORMACJA POWIERZCHNI GLEBY W WYNIKU UDERZENIA KROPLI WODY

Deformation of soil surface as a result of water drop impact

Rozprawa doktorska
Doctoral thesis

Rozprawa doktorska przygotowana pod kierunkiem
Promotora: dr hab. Magdaleny Ryżak prof. IA PAN
oraz
Promotora pomocniczego: dr hab. inż. Agaty Sochan

© Rafał Mazur
Lublin 2026

OŚWIADCZENIE PROMOTORA ROZPRAWY

Oświadczam, że niniejsza rozprawa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data 15.06.2026 Podpis promotora rozprawy Magdalena Ryżak

OŚWIADCZENIE PROMOTORA POMOCNICZEGO ROZPRAWY

Oświadczam, że niniejsza rozprawa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data 15.06.2026 Podpis promotora pomocniczego rozprawy Agata Sochan

OŚWIADCZENIE AUTORA ROZPRAWY

Świadomy odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza rozprawa jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data 15.06.2026 Podpis autora rozprawy Rafał Nowak

Pragnę serdecznie podziękować dr hab. Magdalenie Ryżak
za okazaną życzliwość, ogromną wyrozumiałość i cenne rady,
które pomogły mi zrealizować tę pracę.

Dziękuję dr hab. inż. Agacie Sochan
za nieocenioną pomoc, czas poświęcony na konsultacje
i okazane wsparcie, zwłaszcza w tych najtrudniejszych momentach.

Dziękuję dr inż. Michałowi Beczkowi
za setki godzin wspólnej pracy w laboratorium,
już nigdy nie spojrzymy na kroplę w ten sam sposób.

Swoje podziękowania kieruję również w stronę
prof. dr hab. Andrzeja Bieganowskiego
za nieustające próby wpłynięcia na mój romantyczny sposób myślenia
o nauce i skierowanie go na bardziej pragmatyczne tory.

W szczególny sposób chciałbym podziękować mojej Żonie Weronice
za ogromną cierpliwość, wyrozumiałość i nieustające wsparcie.
Przepraszam za wszystkie noce, które spędziłem przed komputerem.
Wiem, że przeszłaś tę drogę razem ze mną.

Dziękuję.

Prace wchodzące w cykl rozprawy doktorskiej powstały w ramach realizacji dwóch projektów badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki.

SONATA BIS

„*Opracowanie bilansu energetycznego pierwszej fazy erozji wodnej - rozbryzgu*”

Sonata Bis 4, 2014/14/E/ST10/00851

PRELUDIUM

„*Wpływ temperatury gleby na zjawisko rozbryzgu (splash erosion)”*

Preludium 19, 2020/37/N/ST10/03363

Streszczenie

Gleba stanowi powierzchniową warstwę litosfery, pełniąc przy tym wiele istotnych funkcji. Uczestniczy w obiegu wody w przyrodzie, wpływa na regulację klimatu oraz stwarza odpowiednie warunki do wzrostu roślin. Jednym z głównych zagrożeń i przyczyn degradacji gleby jest erozja wodna.

Początkowym etapem erozji powodowanej opadem deszczu jest zjawisko rozbryzgu, które polega na oderwaniu i przemieszczeniu cząstek gleby wskutek uderzenia kropli. Badania dotyczące rozbryzgu koncentrują się w głównej mierze na określeniu ilości przemieszczonego materiału oraz charakterystyce wybitych cząstek, odnosząc uzyskane rezultaty do czynników wpływających na przebieg zjawiska np. energii kropli czy parametrów gleby. Skutki uderzenia kropli obejmują również deformację powierzchni gleby. W przeciwieństwie do zagadnień dotyczących masy erodowanego materiału, kratery powstające w wyniku rozbryzgu były stosunkowo rzadko uwzględniane w dotychczasowych badaniach.

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej, bazującej na cyklu powiązanych tematycznie artykułów, było wypełnienie luki w dotychczasowym stanie wiedzy poprzez pogłębienie opisu deformacji powierzchni gleby powodowanej uderzeniem pojedynczej kropli wody w kontekście erozji rozbryzgowej.

Zakres metod pomiarowych wykorzystanych w badaniach umożliwił wieloaspektową charakterystykę kształtu kraterów oraz analizę procesu deformacji. Pomiary uwzględniały fotografowanie i skanowanie próbek, rejestrację zjawiska rozbryzgu za pomocą szybkich kamer oraz zastosowanie mikrotomografii komputerowej. Możliwości, wyzwania i perspektywy rozwoju metod pomiaru kraterów zostały przedstawione w pracy przeglądowej (**P1**), stanowiącej wstęp do części eksperymentalnej niniejszej rozprawy.

Materiały wykorzystane w badaniach były zróżnicowane i dostosowane do realizowanych celów cząstkowych. Obejmowały one szklane kulki, które służyły jako uproszczony model gleby (**P2**) oraz pięć materiałów glebowych o zróżnicowanym rozkładzie granulometrycznym (**P3**, **P4**). Prace przeprowadzone na złożach modelowych umożliwiły analizę przemieszczania tworzących je elementów w zależności od ich początkowej lokalizacji względem miejsca uderzenia kropli. Eksperymenty uwzględniały wykorzystanie złóż suchych i nasyconych. W złożach suchych określono trzy rodzaje przemieszczeń tj. przesunięcie w obrębie materiału zwilżonego przez kroplę, wybicie oraz przesuniecie w obrębie wału otaczającego krater. W złożach nasyconych wyróżniono dwa typy przemieszczeń tj. przemieszenie wewnątrz deformacji i wybicie. Uderzenie kropli powodowało wybijanie większej ilość szklanych kulek ze złóż suchych, przy czym pokonywały one mniejsze odległości niż kulki wybite ze złóż nasyconych. Przemieszczenie kulek było zależne od ich początkowej lokalizacji i sposobu deformacji obszaru, z którego pochodziły. Obecność wody w złożach wyraźnie wpłynęła na morfologię oraz wielkość deformacji. Kratery powstające na złożach suchych były większe,

a w ich wnętrzu powstawał agregat zbudowany z materiału połączonego wodą z kropli (wyniki przedstawiono w pracy **P2**).

Kolejnym celem cząstkowym, zrealizowanym w ramach publikacji **P3**, było określenie wpływu początkowej wilgotności i rozkładu granulometrycznego gleby, a także energii kropli na kształt i rozmiar powstających kraterów. Pomiary wykonano za pomocą skanera powierzchni 3D, wyznaczając głębokość, średnicę, kolistość i objętość kraterów. Czynnikiem mającym największy wpływ na deformacje była wilgotność, której wzrost skutkował zwiększeniem rozmiaru formowanych kraterów. Rozkład granulometryczny wpływał na kolistość kraterów, która była większa dla materiałów o większej zawartości frakcji pyłowej. Zwiększenie energii kropli powodowało wzrost średnich wartości mierzonych wielkości, choć nie w każdym przypadku zmiany te były istotne statystycznie.

Trzecia praca badawcza (**P4**) dotyczyła wpływu temperatury na rozmiar kraterów. Przeprowadzone eksperymenty uwzględniały trzy materiały glebowe, dwie początkowe wilgotności oraz trzy warianty termiczne. Pomiary wykonano za pomocą skanera powierzchni. Charakterystyka kraterów uwzględniała ich głębokość, średnicę równoważną, objętość oraz bezwymiarowy parametr α (stosunek głębokości do średnicy). Wpływ temperatury wiązał się w głównej mierze z jej interakcją z innymi czynnikami i występował w pyle gliniastym, gdzie wraz ze wzrostem temperatury kratery stawały się szersze, lecz płytsze oraz w piasku gliniastym, gdzie temperatura prowadziła do wystąpienia statystycznie istotnych różnic w średnicy i objętości kraterów powstających przy różnych wilgotnościach. Należy jednak zauważyć, że efekt wywierany przez temperaturę był znacznie mniejszy od wpływu wilgotności, czy rozkładu granulometrycznego, a w przypadku materiału o rozkładzie gliny piaszczystej nie został zaobserwowany.

Prezentowana rozprawa doktorska stanowi uzupełnienie wiedzy w zakresie fizycznego opisu zjawiska rozbryzgu, a w szczególności deformacji powierzchni gleby po uderzeniu kropli. Wyniki przeprowadzonych badań są ważne dla zrozumienia mechanizmów transportu bakterii, grzybów i zanieczyszczeń przenoszonych wraz z przemieszczanymi cząstkami gleby. Potencjalne zastosowanie rezultatów analiz kraterów obejmuje również ich implementację do modeli erozji w celu lepszego przewidywania skali aktualnych i przyszłych zjawisk.

Słowa kluczowe: erozja gleby, zjawisko rozbryzgu, deformacja powierzchni, krater, skanowanie 3D

Abstract

Soil forms the surface layer of the lithosphere and performs many vital functions. It contributes to the natural water cycle, regulates the climate, and provides suitable conditions for plant growth. One of the main threats driving its degradation is water erosion.

The initial stage of rainfall-induced erosion is the splash phenomenon, which involves the detachment and displacement of soil particles via raindrop impact. Research on splash erosion focuses primarily on determining the quantity of displaced material and the characteristics of ejected particles, relating the results to factors influencing the phenomenon, such as the energy of the raindrops or soil parameters. However, the drop impact also includes the deformation of the soil surface. In contrast to issues concerning the mass of eroded material, craters formed as a result of the splash phenomenon have received comparatively little attention in previous studies.

The aim of this doctoral thesis, which is based on a series of thematically related articles, was to fill a gap in the current state of knowledge by providing a detailed description of soil surface deformation caused by the impact of a single water drop in the context of splash erosion.

The range of measurement methods employed in the study enabled a multifaceted characterisation of crater morphology and an analysis of the underlying deformation process. The measurements comprised sample photography and 3D scanning, high-speed video recording of the splash phenomenon, and computed microtomography analysis. The possibilities, challenges, and development prospects for crater measurement methods were presented in a review paper (**P1**), which serves as an introduction to the experimental part of this thesis.

The materials used in the study were selected according to the specific objectives. These included glass beads, which served as a simplified soil model (**P2**), and five distinct soils with varying particle size distributions (**P3, P4**). The work carried out on the model beds enabled an analysis of the displacement of their elements depending on their initial location relative to the point of drop impact. The experiments involved the use of both dry and saturated beds. In the dry deposits, three types of displacement were identified, i.e. displacement inside the surface area wetted with a falling drop of water, ejection, and placement on the crater rim. In saturated deposits, two types of displacement were distinguished, i.e. displacement inside the deformation and ejection. The impact of the drop ejected a greater number of glass beads from the dry beds, although they travelled over shorter distances compared to those ejected from the saturated beds. The displacement of the beads depended on their initial location and the type of deformation in the area from which they originated. The presence of water within the deposits clearly influenced the morphology and extent of the deformation. Specifically, the craters formed on the dry beds were larger, and an aggregate consisting of material bound by water from the drops was formed within them (results presented in paper **P2**).

Another specific objective, addressed as part of publication **P3**, was to determine the influence of the soil's initial moisture content, particle size distribution, and drop energy on the morphology and size of formed craters. Measurements were taken using a 3D surface scanner to determine crater depth, equivalent diameter, circularity, and volume. A factor exerting the greatest influence on deformation was the moisture content, where higher moisture levels resulted in larger craters. The particle size distribution influenced crater circularity, which was greater for materials with a higher silt fraction content. An increase in drop energy led to an increase in the mean values of the measured parameters, although these changes were not statistically significant in every case.

The third research paper (**P4**) examined the effect of temperature on crater size. The experiments involved three soils, two initial moisture contents, and three temperature variants. Measurements were taken using a surface scanner. The crater characteristics included depth, equivalent diameter, volume, and the dimensionless parameter α (the depth-to-diameter ratio). The effect of temperature resulted mainly from its interaction with other factors. In silty loam, the increasing temperatures resulted in wider but shallower craters. In loamy sand, the temperature variations led to statistically significant differences in the diameter and volume of craters formed at different moisture contents. However, it should be noted that the effect of temperature was significantly smaller than that of moisture content or particle size distribution, and it was not observed in the sandy loam.

The doctoral thesis contributes to the development of knowledge regarding the physical description of the splash phenomenon, focusing in particular on the deformation of the soil surface caused by drop impact. The results are important for understanding the mechanisms by which bacteria, fungi, and contaminants are transported along with displaced soil particles. Additionally, the potential application of the crater analysis results includes their incorporation into erosion models to better predict the scale of current and future soil loss.

Keywords: soil erosion, splash phenomenon, surface deformation, crater, 3D scanning

Spis treści

Lista publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej 11

1. Wstęp 13

1.1. Zjawisko rozbryzgu a deformacja powierzchni gleby 13

1.2. Pomiar i charakterystyka kraterów 16

1.3. Czynniki warunkujące przebieg zjawiska rozbryzgu i deformację powierzchni gleby pod wpływem uderzenia kropli wody 19

2. Cel i hipotezy rozprawy doktorskiej 21

3. Materiały i metody 22

3.1. Złoża modelowe oraz próbki glebowe 22

3.2. Układ dozowania kropli 25

3.3. Metody pomiarowe 26

3.3.1. Metodyka pomiaru – złoża modelowe 27

3.3.2. Metodyka pomiaru – próbki glebowe 28

4. Omówienie wyników i treści publikacji 31

4.1. Publikacja P.1 31

4.2. Publikacja P.2 33

4.2.1. Przemieszczenie powierzchniowych elementów złoża 33

4.2.2. Przemieszczenie elementów z różnych warstw złoża 36

4.2.3. Analiza morfologii deformacji przy pomocy mikrotomografii 36

4.2.4. Deformacja a przemieszczenie elementów złoża 37

4.3. Publikacja P.3 38

4.4. Publikacja P.4 42

5. Podsumowanie i wnioski 48

6. Bibliografia 49

7. Publikacje 56

7.1. Tekst publikacji P.1 56
7.2. Tekst publikacji P.2 72
7.3. Tekst publikacji P.3 84
7.4. Tekst publikacji P.4 91
8. Oświadczenia współautorów 101

Lista publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej

Niniejsza rozprawa doktorska obejmuje cykl czterech, powiązanych tematycznie publikacji, ujętych wspólnym tytułem:

„Deformacja powierzchni gleby w wyniku uderzenia kropli wody”

P.1: Praca przeglądowa

Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. ***Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods***. SENSORS 2023, 23(1), 121. DOI 10.3390/s23010121.

Impact Factor (2023): 3,4; Punktacja MEiN (w roku wydania): 100 punktów.

Indywidualny wkład w powstanie pracy obejmował m.in.: i) współopracowanie koncepcji pracy; ii) zebranie i opracowanie danych literaturowych wykorzystanych w pracy przeglądowej; iii) przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu; iv) współudział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu.

P.2: Oryginalna praca badawcza

Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Marciszuk K., Beczek M., Lamorski K., Bieganowski A. ***Surface deformation and displacement of bed elements during splash – Model tests.*** CATENA 2020, 185, 104277.DOI:10.1016/j.catena.2019.104277.

Impact Factor (2020): 5,198; Punktacja MNiSW (w roku wydania):140 punktów.

Indywidualny wkład w powstanie pracy obejmował m.in.: i) współopracowanie koncepcji pracy; ii) współudział w określeniu zakresu przeprowadzonych badań; iii) przygotowywanie złóż do analiz; iv) wykonanie pomiarów; v) opracowanie, analizę i interpretację wyników; vi) przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu; vii) współudział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu.

P.3: Oryginalna praca badawcza

Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Przysucha B., Bieganowski A. ***Soil Deformation after One Water-Drop Impact—The Effect of Texture and Soil Moisture Content.*** GEODERMA 2022, 417, 115838. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115838.

Impact Factor (2022): 6,1; Punktacja MEiN (w roku wydania): 200 punktów.

Indywidualny wkład w powstanie pracy obejmował m.in.: i) współopracowanie koncepcji pracy; ii) współudział w określeniu zakresu przeprowadzonych badań; iii) przygotowanie złóż do analiz; iv) wykonanie pomiarów; v) opracowanie, analizę i interpretację wyników; vi) przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu; vii) współudział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu.

P.4: Oryginalna praca badawcza

Mazur M., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. ***The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content.*** CATENA 2025, 255, 109005. DOI: 10.1016/j.catena.2025.109005

Impact Factor (2024): 5,7; Punktacja MNiSW (w roku wydania): 140 punktów.

Indywidualny wkład w powstanie pracy obejmował m.in.: i) współopracowanie koncepcji pracy; ii) współudział w określeniu zakresu przeprowadzonych badań; iii) przygotowanie złóż do analiz; iv) wykonanie pomiarów; v) opracowanie, analizę i interpretację wyników; vi) przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu; vii) współudział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu.

Powyższe prace powstały w ramach realizacji projektów badawczych:

1) NCN Sonata Bis 4, 2014/14/E/ST10/00851 pt. „*Opracowanie bilansu energetycznego pierwszej fazy erozji wodnej- rozbryzgu*”, realizowanego w latach 2015-2019, którego kierownikiem była dr hab. Magdalena Ryżak prof. IA PAN, a w którym mgr inż. Rafał Mazur był zatrudniony jako wykonawca.
2) NCN Preludium 19, 2020/37/N/ST10/03363 pt. „*Wpływ temperatury gleby na zjawisko rozbryzgu (splash erosion)*”, realizowanego w latach 2021-2025, którego kierownikiem był mgr inż. Rafał Mazur, a opiekunem naukowym dr hab. Magdalena Ryżak prof. IA PAN.

1. Wstęp

1.1. Zjawisko rozbryzgu a deformacja powierzchni gleby

Gleba stanowi jeden z kluczowych elementów otaczającego nas świata. Można ją zdefiniować jako naturalną, powierzchniową warstwę litosfery ukształtowaną z materiału macierzystego pod wpływem czynników i procesów glebotwórczych. Funkcje pełnione przez glebę obejmują m.in. retencjonowanie wody w ramach cyklu hydrologicznego, regulację wymiany gazów cieplarnianych, zapewnienie habitatu dla zwierząt i mikroorganizmów, stanowienie rezerwuaru węgla i innych pierwiastków niezbędnych do wzrostu roślin, co znajduje swoje odzwierciedlenie w rolnictwie i produkcji żywności. Dodatkowo warto zaznaczyć jej rolę w kształtowaniu walorów estetycznych krajobrazów naturalnych. Mając na uwadze różnice między czasem wymaganym do wytworzenia nowej warstwy gleby i tempem procesów powodujących jej niszczenie, glebę należy spostrzegać jako zasób warunkowo odnawialny, który w kontekście długości życia ludzkiego pokolenia pełni funkcję zasobu nieodnawialnego, praktycznie niemożliwego do pełnej regeneracji po poważnej degradacji. Podkreśla to potrzebę objęcia gleby szczególną ochroną oraz prowadzenia monitoringu niekorzystnych dla niej procesów.

Erozja gleby została wskazana jako jedno z ośmiu głównych zagrożeń wymienionych w założeniach strategii ochrony gleb sporządzonych przez Komisję Europejską (COM (2002) 179). Czynniki powodujące erozję wiążą się z działaniem wody, wiatru, ruchów masowych, czy przemieszczaniem lodowców. Erozja wodna, która wraz z erozją wietrzną odpowiada za największe straty, prowadzi do degradacji gleby poprzez odspojenie i przemieszczenie cząstek glebowych, które zostają następnie akumulowane w nowej lokalizacji (Borrelli i in., 2020). W ekstremalnych sytuacjach proces ten może skutkować niszczeniem całych profili glebowych. W roku 2010 szacowane roczne straty gleby spowodowane erozją na terenie Unii Europejskiej wynosiły 970 Mt (Panagos i in., 2015). Przewiduje się, że w okresie od roku 2016 do 2050 zmiany klimatyczne mogą przyczynić się do wzrostu strat o dodatkowe 13-22,5% (Panagos i in., 2021). W przypadku Polski ryzyko wystąpienia erozji wodnej dotyczy około 30% obszaru kraju, z czego dla 17% poziom ryzyka mieści się w zakresie od średniego do bardzo wysokiego. Roczne straty gleby w Polsce szacowane są na 14 Mt, za co w znacznej mierze odpowiada erozja terenów położonych na południu i południowym wschodzie kraju (Marcinkowski i in., 2022).

Opierając się na mechanizmach, skali i specyfice zjawisk, możliwe jest wyróżnienie kilku rodzajów erozji wodnej, do których należą m.in.:

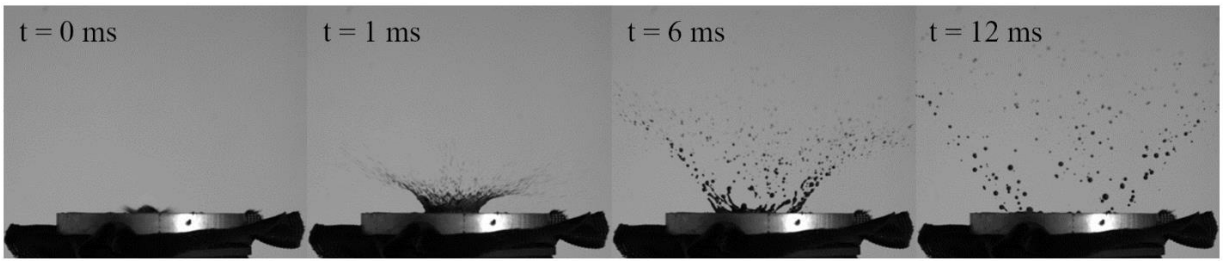
- rozbryzg, tj. odspojenie i przemieszczenie cząstek gleby w wyniku uderzenia kropli deszczu lub ziaren gradu (Angulo-Martínez i in., 2012).
- erozja powierzchniowa (Rys. 1A), tj. równomierne zmywanie wierzchniej warstwy gleby w wyniku działania spływu powierzchniowego na stokach (Gliński i in., 2011).
- erozja żłobinowa (Rys. 1B), tj. formowanie płytkich, podłużnych żłobin w górnych poziomach profilu glebowego w wyniku działania płynącej po stoku wody i niesionych przez nią cząstek. Ukształtowane formy erozyjne mogą zostać usunięte dzięki zastosowaniu standardowych praktyk rolniczych, np. orki (Ketema i Dwarakish, 2019).
- erozja wąwozowa (Rys. 1C), tj. powstawanie liniowych ubytków gleby o znacznym zagłębieniu, powodowanych działaniem skoncentrowanych strug wody podczas spływu powierzchniowego. Ukształtowane formy erozyjne charakteryzują się podatnością na dalszy rozwój i wielkością uniemożliwiającą ich łatwe usunięcie przy użyciu standardowych praktyk rolniczych (Anderson i in., 2021).
- erozja podziemna, tj. formowanie pustych przestrzeni i kanałów pod powierzchnią terenu wskutek m.in. wypłukiwania cząstek gleby i minerałów z głębszych warstw profilu przez przemieszczającą się wodę. Grozi powstawaniem zapadlisk (Bernatek-Jakiel i Poesen, 2018).



Rys. 1. Rodzaje erozji: A) powierzchniowa (Foto: A. Bieganowski), B) żłobinowa (Foto: zdjęcie własne), C) wąwozowa (Józefaciuk i Józefaciuk, 1996).

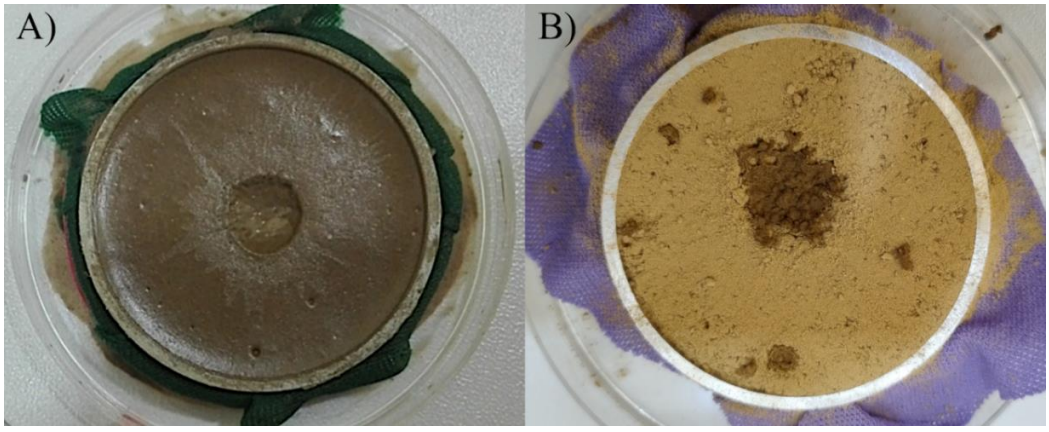
Niniejsze opracowanie oraz badania stanowiące jego podstawę koncentrują się na analizie wybranych aspektów pierwszego z wyżej wymienionych procesów – erozji rozbryzgowej (Rys. 2). Rozbryzg wiąże się z początkowym etapem erozji wodnej wywoływanej opadem atmosferycznym (Rejman, 2006). Cząstki gleby ulegające przemieszczeniu po uderzeniu kropli

transportowane są na niewielkie odległości, które z reguły nie przekraczają kilku – kilkudziesięciu centymetrów, choć w pewnych warunkach mogą sięgać nawet kilku metrów (Erpul i in., 2009). Wybity materiał składa się z mieszaniny fazy stałej i wody, ich wzajemny stosunek zależy od rozkładu granulometrycznego oraz wilgotności erodowanej gleby (Beczek i in., 2019).



Rys. 2. Sekwencja czasowa prezentująca przebieg zjawiska rozbryzgu na glebie o wilgotności bliskiej nasyceniu (Foto: zdjęcia własne).

Poza wybiciem materiału glebowego na zjawisko rozbryzgu składają się podprocesy powiązane z niszczeniem agregatów glebowych, lokalnym zagęszczeniem gleby, czy też kluczową dla niniejszej rozprawy doktorskiej deformacją powierzchni tj. **powstawaniem kraterów** (Rys. 3). Główny element deformacji stanowi zagłębienie formowane w miejscu uderzenia kropli. Zagłębienie to może być częściowo lub całkowicie otoczone wałem utworzonym z przemieszczonego materiału (Beczek i in., 2018). W przypadku suchej gleby wnętrze krateru jest dodatkowo wypełnione materiałem zwilżonym przez kroplę, który odróżnia się od reszty deformacji. W związku z niewielkimi rozmiarami kraterów powstających w wyniku rozbryzgu podstawowe wielkości służące do ich opisu tj. średnica i głębokość mierzone są najczęściej w milimetrach (Ghadiri, 2004; Delon i in., 2011; Katsuragi, 2011; Zhang i in., 2015; Sochan i in., 2023).



Rys. 3. Krater po uderzeniu kropli wody: A) przykład deformacji powierzchni wilgotnej próbki glebowej, B) przykład deformacji powierzchni suchej próbki glebowej (Foto: zdjęcia własne).

Znaczenie kraterów w procesie erozji wodnej można rozpatrywać w kilku aspektach. Po pierwsze, kratery są jedną z najwcześniejszych zmian zachodzących na powierzchni terenu w wyniku opadu atmosferycznego. W związku z powyższym gleba usunięta z ich wnętrza i obrzeży zasila materiał przemieszczany w początkowych etapach erozji (Marzen i Iserloh, 2021). Formowanie kraterów jest ważnym elementem bilansu energetycznego zjawiska rozbryzgu, mając tym samym istotny wpływ na jego przebieg (Ghadiri, 2004; Horabik i in., 2018). Powstawanie kraterów wiąże się z lokalnym zagęszczeniem gleby mogącym inicjować proces jej uszczelnienia, który prowadzi do uruchomienia spływu powierzchniowego i kolejnych etapów erozji wodnej (Terry, 1998; Vaezi i in., 2017). Ponadto deformacja powierzchni przez kroplę jest powiązana z rozprzestrzenianiem się zanieczyszczeń i mikroorganizmów – w tym patogenów (Monaghan i Hutchison, 2012). Laburda i in. (2021) wskazali natomiast, że analiza zmian ukształtowania powierzchni gleby powodowanych opadem atmosferycznym (prowadzona z wykorzystaniem fotogrametrii), może stanowić metodę monitoringu erozji rozbryzgowej. W szerszym kontekście analiza kształtu kraterów utrwalonych w skamielinach stanowi źródło informacji o środowisku panującym w minionych epokach geologicznych (Kavanagh i Goldblatt, 2015).

Dotychczasowe badania erozji gleby, w tym badania dotyczące zjawiska rozbryzgu, stosunkowo rzadko podejmowały temat morfologii i procesu powstawania kraterów. Taki stan rzeczy wynikał po części ze specyfiki tego typu deformacji tj. ich niewielkich rozmiarów, podatności na uszkodzenie w czasie pomiaru oraz dużej dynamiki zjawisk związanych z ich formowaniem. Rozwój aparatury i technologii pomiarowych pozwolił pokonać powyższe ograniczenia, stwarzając możliwości uzupełnienia dotychczasowych luk w stanie wiedzy. Zmiana zachodząca na przestrzeni lat dotyczyła głównie rezygnacji z manualnych metod pomiaru, w miejsce których pojawiły się znacznie dokładniejsze metody bezdotykowe, takie jak skanery i profilometry. Zwięzłe omówienie technik pomiarowych zamieszczono w następnym rozdziale, natomiast ich szczegółową charakterystykę przedstawiono w pracy **P1**.

1.2. Pomiar i charakterystyka kraterów

Zgodnie z przeglądem literatury sposób pomiaru deformacji był ściśle związany z zakresem oraz założeniami poszczególnych prac badawczych. Tym samym, właściwe omówienie metodycznych aspektów pomiaru kraterów należy rozpocząć od przedstawienia zróżnicowania dotychczasowych eksperymentów. Jedna z podstawowych różnic dotyczyła wykorzystywanych kropli, ich wielkości oraz wysokości swobodnego spadku. Kwestia ta

wiązała się również z rodzajem użytej cieczy, najczęściej była to woda, choć w części prac stosowano także roztwory etanolu lub glicerolu (Katsuragi, 2011). Istotną różnicą była liczba kropli uwzględnionych w eksperymentach. Część badań skupiała się na efektach uderzenia pojedynczej kropli (Ghadiri, 2004; Wyser i in., 2019; Sochan i in., 2023), inne dotyczyły sekwencji kropel padających jedna po drugiej w to samo miejsce (Terry, 1998; X. Li i in., 2024), a kolejne analizowały zmiany powierzchni powodowane przez krople rzeczywistego opadu (Laburda i in., 2021). Dodatkowo w literaturze przedmiotu analizowano rozbryzg na złożach przygotowanych z różnych materiałów. Część autorów wykorzystała w badaniach materiały służące jako uproszczony model gleby. Rozwiązanie to pozwalało ograniczyć niepewności pomiarowe związane ze skomplikowaną budową gleby, która wynika ze złożonego układu przestrzennego tworzących ją ziaren fazy stałej, roztworu glebowego i powietrza, znacznych różnić w kształcie i wielkości cząstek mineralnych, czy też obecności związków organicznych. Najczęściej stosowany w tym celu był piasek (Delon i in., 2011; Long i in., 2014; Wyser i in., 2019) oraz szklane kulki o rozkładzie granulometrycznym odpowiadającym frakcji piasku (Katsuragi, 2011; Nefzaoui i Skurtys, 2012). Dotychczasowe prace można dodatkowo podzielić ze względu na charakter i miejsce realizacji badań, wyróżniając eksperymenty prowadzone w laboratorium (S.-C. Zhao i in., 2015; Beczek i in., 2018; Zhang i in., 2024), pomiary wykonywane na polu (Laburda i in., 2021) oraz badania z wykorzystaniem metod numerycznych i symulacji komputerowych (Horabik i in., 2018).

Postęp technologiczny był głównym czynnikiem warunkującym zmiany zachodzące w metodach pomiaru kraterów na przestrzeni lat. Najprostsze z metod oparte były na jakościowej ocenie wizualnej (Moss i Green, 1987) lub bezpośrednim pomiarze suwmiarką (Ghadiri, 2004). Nowoczesne techniki bazują na pomiarze bezdotykowym, który wyklucza ryzyko manualnego uszkodzenia kraterów, zapewniając przy tym znaczną precyzję i dokładność pomiaru. Podstawową metodą bezdotykową jest analiza zdjęć deformacji, która pozwala określić średnice kraterów (Delon i in., 2011). Najczęściej pomiary tego typu pełnią jednak funkcję uzupełniającą względem bardziej zaawansowanych technik (Marston i in., 2010; Ahn i in., 2013). Analiza obrazu znajduje zastosowanie również w badaniach zakładających użycie szybkich kamer (Beczek i in. 2020). Nagrania zarejestrowane tymi urządzeniami stanowią źródło informacji o dynamice procesu formowania kraterów (Delon i in., 2011; de Jong i in., 2017). Aparaturą dedykowaną do pomiaru głębokości i objętości kraterów są profilometry (Katsuragi, 2010) oraz skanery powierzchni (Wyser i in., 2019). Najbardziej zaawansowane metody analiz deformacji zakładają wykorzystanie tomografii komputerowej (Beczek i in., 2018). W ujęciu ogólnym postęp zachodzący na

przestrzeni lat wpłynął w głównej mierze na rozwój metod pozwalających analizować proces powstawania deformacji (szybkie profilometry, szybkie kamery) oraz możliwość precyzyjnego i bezkontaktowego określania objętości kraterów.

Wśród wielkości służących do charakterystyki morfologii kraterów, najczęściej wyznaczana jest ich średnica. Użyto jej do opisu deformacji powstających na złożu piasku już w pracy Mihara i in. (1950), będącej jednym z pierwszych opracowań dotyczących kraterów formowanych po uderzeniu kropli wody. Stosunkowo łatwy pomiar sprawił, że przez lata średnica była podstawową wielkością charakteryzującą kratery, przy czym dokładność gromadzonych wyników rosła wraz z wdrażaniem nowych technologii. Kwestie pomiaru prezentują się odmiennie w przypadku kolejnego istotnego parametru, jakim jest głębokość. Niewielkie zagłębienie kraterów, często oscylujące około milimetra, oraz wysoka podatność na uszkodzenia w ramach manualnego pomiaru sprawiają, że poprawne określenie tej wielkości wymaga wykorzystania zaawansowanych metod bezdotykowych. Analogiczne trudności pomiarowe występują w przypadku objętości kraterów, której wyznaczenie jest istotne dla oszacowania ilości materiału usuniętego z miejsca uderzenia kropli. W większości dotychczasowych prac określenie objętości bazowało na wykorzystaniu wzoru na objętość odcinka kuli. Obliczenia te uwzględniały wartości głębokości i średnicy, uzyskane z przekroju deformacji, przy jednoczesnym założeniu regularnego kształtu zagłębienia (Beczek i in., 2018; Ghadiri, 2004). W rzeczywistości jednak wnętrza kraterów są nieregularne, a zastosowane w obliczeniach wartości głębokości i średnicy mogły być niereprezentatywne. W konsekwencji rezultaty uzyskane powyższą metodą obciążone są trudnymi do oszacowania błędami. Wykorzystanie skanerów 3D, profilometrów czy fotogrametrii umożliwia oparcie pomiarów na cyfrowych modelach deformacji pozwalających na przeprowadzenie precyzyjnych analiz.

W części prac opis kraterów został rozszerzony o dodatkowe wielkości obejmujące m.in. nachylenie ścian (de Jong i in., 2017), pole powierzchni deformacji (Ghadiri 2004; Ahn i in., 2013) czy objętość materiału zdeponowanego dookoła zagłębienia (Wyser i in., 2019). Oprócz samej morfologii kraterów w literaturze analizowany był również proces ich powstawania. Badania tego typu skupiały się na analizie zmian kształtu kraterów w czasie (Mihara i in., 1950; Al-Durrah i Bradford 1982; Katsuragi, 2010), określeniu ich chwilowych wymiarów (Delon i in., 2011; Zhang i in., 2015), czasu potrzebnego do osiągnięcia stabilnego kształtu (Long i in. 2015) oraz opisie zjawisk towarzyszących procesowi deformacji, takich jak wtórne przemieszczenie materiału ze ścian krateru do jego wnętrza (de Jong i in., 2017).

Do charakterystyki kraterów wykorzystywane są również wielkości bezwymiarowe, które ułatwiają porównywanie rezultatów badań mimo ich rozbieżności wynikających ze

zróżnicowania wariantów eksperymentalnych. Przykładami takich wielkości jest parametr α, opisujący stosunek głębokości kraterów do ich średnicy (de Jong i in., 2017) oraz bezwymiarowa średnica kraterów, oparta na zależności między średnicą krateru i średnicą padającej kropli (Zhang i in., 2015). Dodatkowo liczni autorzy dokładają starań, aby opracować i udoskonalić prawa skalowania oraz modele matematyczne opisujące zależności poszczególnych wymiarów kraterów od m.in. liczby Webera, liczby Reynoldsa lub energii i właściwości ogólnie pojętych impaktorów, które w części prac obejmowały oprócz kropli również ciała stałe (Katsuragi 2010; Zhang i in., 2015; R. Zhao i in., 2015; Lardier i in., 2019).

1.3. Czynniki warunkujące przebieg zjawiska rozbryzgu i deformację powierzchni gleby pod wpływem uderzenia kropli wody

Wymiary i kształt kraterów powstających w wyniku uderzeniu kropli zależą w bezpośredni sposób od przebiegu zjawiska rozbryzgu, w ramach którego dochodzi do ich formowania. Czynniki wpływające na rozbryzg można podzielić na dwie główne grupy. Pierwsza z nich dotyczy parametrów padającej kropli, druga charakterystyki materiału narażonego na rozbryzg. W kontekście kropli znaczenie ma jej średnica, a tym samym masa oraz prędkość. Wymienione wielkości wpływają na energię kropli w chwili kontaktu z powierzchnią gleby. Analizy uderzenia pojedynczych kropli i ich sekwencji wskazują, że wzrost energii przekłada się na wzrost masy przemieszczanego materiału oraz pokonywanego przez niego dystansu, a także wymiarów powstających kraterów (Ghadiri 2004; Delon i in., 2011; Fernández-Raga i in., 2017; Beczek i in., 2018; Lv i in., 2023). Czynniki dotyczące charakterystyki materiału obejmują głównie właściwości gleby określające jej podatność na erozję. W tym kontekście badania rozbryzgu rozpatrywały m.in. rozkład granulometryczny (Furbish i in., 2007; Hamlett i in., 2013; Wei i in., 2015), hydrofobowość (Fox i in., 2007; Ahn i in., 2013; Sochan i in., 2023), wilgotność (Ryżak i in., 2015; Zambon i in., 2021), zagęszczenie (Ekwue i Seepersad, 2015), trwałość agregatów glebowych (Xiao i in., 2017; H. Li i in., 2024), oraz cechy odnoszące się do terenu, takie jak jego nachylenie (Erpul i in., 2008; Kijowska-Strugała i Kiszka, 2018; Beczek i in., 2024) czy okrywę roślinną (Parlak i Ozaslan Parlak, 2010; Ghahramani i in., 2011; Ma i in., 2014). Działania mające na celu utrzymanie okrywy roślinnej gleby należą do podstawowych praktyk ochrony terenu przed erozją wodną. Dotyczy to ograniczenia zarówno zjawiska rozbryzgu, jak i kolejnych etapów erozji związanych ze spływem powierzchniowym. W przypadku gleby odkrytej, na przebieg zjawiska rozbryzgu

wpływa kombinacja czynników, przy szczególnym znaczeniu wilgotności, zagęszczenia, rozkładu granulometrycznego oraz nachylenia terenu.

Dotychczasowe badania pozwoliły przeanalizować związek rozbryzgu z szeregiem czynników, przy czym w większości prac zakres zrealizowanych pomiarów ograniczał się do charakterystyki przemieszczonego materiału glebowego. W wielu przypadkach zagadnienia dotyczące deformacji powierzchni gleby nie zostały poruszone lub zostały opisane wyłącznie jakościowo. Tym samym, wskazywane w literaturze trendy nie dostarczały informacji o wpływie badanych czynników na formowane w ramach rozbryzgu kratery. W badaniach skupionych na kraterach powszechne są natomiast uproszczenia wynikające z dotychczasowych ograniczeń technicznych. Ich przykładem jest wspomniane wcześniej sporadyczne wykorzystywanie materiału glebowego, który zastępowany był złożami szklanych kulek lub piasku. Inna kwestia dotyczy energii kropli użytych w doświadczeniach. W związku z trudnościami w zapewnieniu wystarczającej wysokości swobodnego spadku, która w badaniach rzadko przekraczała 3 m, energia i prędkość kropli często istotnie odbiegały od wartości granicznych, osiąganych w czasie naturalnego opadu. Dodatkowo pomiary kraterów, w tym ich objętości, bazowały na dwuwymiarowych obrazach deformacji, tj. przekrojach, które nie zapewniały reprezentatywności gromadzonych danych.

Luka w stanie wiedzy o deformacji powierzchni gleby towarzyszącej zjawisku rozbryzgu stanowiła podstawę do realizacji badań ujętych w niniejszej rozprawie. Podjęte prace obejmowały opis deformacji powierzchni i przemieszczenia elementów złóż modelowych (szklanych kulek) oraz charakterystykę kraterów formowanych na próbkach przygotowanych z materiału glebowego. Dodatkowo w badaniach uwzględniono analizę potencjalnego wpływu zmian klimatu na zjawisko rozbryzgu poprzez porównanie wymiarów kraterów powstających w różnych warunkach termicznych.

2. Cel i hipotezy rozprawy doktorskiej

Celem niniejszej rozprawy jest opis deformacji powierzchni gleby w wyniku uderzenia pojedynczej kropli wody w kontekście początkowego etapu erozji wodnej – zjawiska rozbryzgu.

Cel główny został zrealizowany w ramach następujących celów cząstkowych:

C1. Określenie sposobu przemieszczenia (wybicie, przesunięcie) elementów złoża modelowego (stanowiącego uproszczony układ glebowy) po uderzeniu kropli wody w zależności od ich początkowego położenia.

C2. Określenie wpływu rozkładu granulometrycznego oraz wilgotności początkowej gleb na wielkość i kształt kraterów powstających w wyniku uderzenia kropli o różnej energii kinetycznej.

C3. Określenie wzajemnego wpływu temperatury, wilgotności oraz tekstury gleb na wielkość i kształt kraterów powstających w wyniku uderzenia kropli.

Podejmując realizację powyższych celów, przyjęto następujące hipotezy badawcze:

H1. Sposób przemieszczenia elementów modelowego złoża w wyniku uderzenia kropli wody zależy od ich początkowej lokalizacji i zmienia się wraz z wilgotnością próbki.

H2. Wpływ początkowej wilgotności gleby oraz energii kropli na zmianę morfologicznych cech kraterów powstających w wyniku rozbryzgu jest zależny od rozkładu granulometrycznego materiału glebowego.

H3. Warunki termiczne, w których dochodzi do rozbryzgu, wpływają na deformację powierzchni gleby po uderzeniu kropli.

3. Materiały i metody

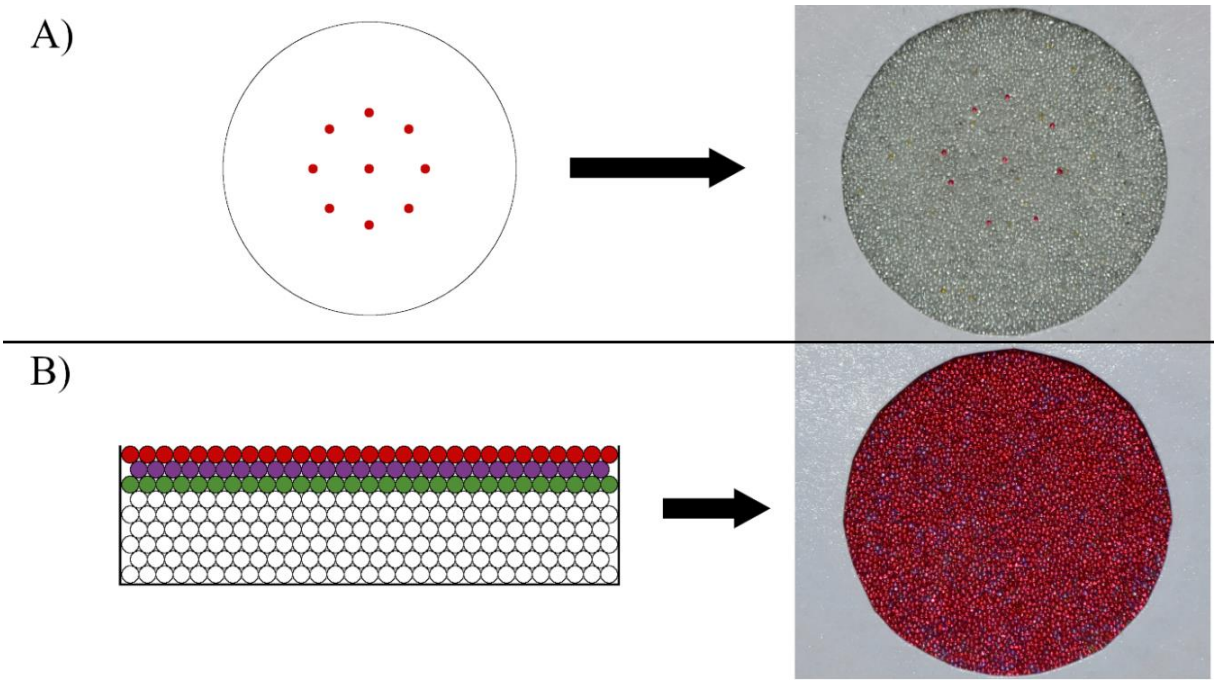
Cykl publikacji prezentowany w niniejszej rozprawie otwiera praca **P1**, w której przedstawiono przegląd metod pomiaru kraterów powstających w wyniku uderzenia kropli. Zakres pracy przeglądowej wykracza poza techniki i urządzenia wykorzystane w publikacjach badawczych cyklu (**P2-P4**). Rozwiązanie takie pozwoliło osadzić temat rozprawy w szerszym kontekście, bazującym na kompleksowym ukazaniu aktualnego stanu wiedzy na temat pomiarów deformacji powodowanych zjawiskiem rozbryzgu. Zagadnienia poruszone w pracy **P1** obejmowały ponadto charakterystykę dotychczasowych badań, która uwzględniała kwestie wykorzystywanych materiałów, zakresu prowadzonych pomiarów i wyznaczanych parametrów oraz omówienie perspektyw rozwoju metod pomiarowych. W związku z powyższym, w niniejszym rozdziale przedstawiono jedynie najważniejsze informacje dotyczące zakresów pomiarowych oraz metod wykorzystanych przez autora w pracach badawczych **P2–P4**.

3.1. Złoża modelowe oraz próbki glebowe

W zależności od realizowanego celu w badaniach wykorzystano złoża modelowe (publikacja **P2**) lub próbki przygotowane z materiału glebowego (publikacja **P3** i **P4**). Zestawienie wariantów eksperymentalnych uwzględnionych w poszczególnych publikacjach podsumowano w tabeli 1 na końcu podrozdziału.

Złoża modelowe użyte w publikacji **P2** przygotowano z przeźroczystych szklanych kulek (szkło wapniowo-sodowe) o średnicy 0,425–0,600 mm (Sigma, USA). Wymiary kulek mieściły się w zakresie średnic ziaren frakcji granulometrycznych piasku grubego i średniego. Rozmiar elementów tworzących złoża pozwalał na ich manualną aranżację poprzez umieszczenie w wybranych miejscach kulek, nazwanych markerami, które wyróżniały się pod względem barwy (Efco, Niemcy). Wykorzystanie markerów umożliwiło analizę przemieszczenia elementów złoża po uderzeniu kropli. Pomiary wykonane piknometrem wykazały brak istotnych statystycznie różnic w gęstości kulek o różnej barwie, średnia wartość tego parametru wynosiła 2,49 $g \cdot cm^{-3}$. Dodatkowo pomiary wstępne wykluczyły występowanie różnic w zjawisku rozbryzgu między złożami wykonanymi z kulek o różnym kolorze (co mogłoby potencjalnie wynikać z wpływu zawartych w nich barwników, różnic w hydrofobowości, czy chropowatości powierzchni). Próbki ze złożami modelowymi przygotowano w aluminiowych pierścieniach o średnicy wewnętrznej równej 36 mm i wysokości wynoszącej 10 mm. Dno pierścieni zabezpieczono szyfonem.

Pomiary przeprowadzone w ramach publikacji **P2** uwzględniały dwa typy złóż modelowych. Na powierzchni pierwszych z nich (złoża proste) przygotowano regularne geometryczne wzory zawierające od 7 do 25 markerów (Rys. 4A). Złoża te zostały przygotowane w wariancie nasyconym i suchym. Powierzchnię drugiego typu złóż stanowiły trzy monowarstwy kulek tj. różniące się barwą trzy pojedyncze warstwy szklanych kulek (Rys. 4B). Ze względu na kwestie techniczne złoża te uwzględniały wyłącznie wariant suchy.



Rys. 4. Przykłady złóż modelowych przygotowanych ze szklanych kulek: A) schemat koncentrycznego wzoru z markerów na powierzchni złoża prostego oraz zdjęcie złoża przed uderzeniem kropli, B) schemat prezentujący koncepcyjny układ monowarstw na powierzchni złoża oraz zdjęcie złoża przed uderzeniem kropli (Foto: zdjęcia własne).

W **publikacjach P3 i P4** wykorzystano złoża przygotowane z materiału glebowego. Próbki glebowe pobrano z głębokości 5-15 cm z terenów narażonych na erozję wodną, które były użytkowane rolniczo. W **publikacji P3** wykorzystano gleby sklasyfikowane zgodnie z World Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2015) jako Haplic Luvisol (piasek gliniasty, miejsce poboru: Wysoczyzna Polanowska), Rendzic Leptosol (glina piaszczysta, miejsce poboru: Wyżyna Częstochowska), Nudiargic Luvisol (pył gliniasty, miejsce poboru: Wyżyna Miechowska). Gleby użyte w **publikacji P4** sklasyfikowano na podstawie tego samego klucza jako Haplic Luvisol (piasek gliniasty, miejsce poboru: Wysoczyzna Polanowska), Nudiargic Luvisol (glina piaszczysta, miejsce poboru: Wzgórza Trzebnickie), Dystric Cambisol (pył gliniasty, miejsce poboru: Wyniosłość Giełczewska). W obu publikacjach gleby dobrano w sposób zapewniający ich zróżnicowanie pod względem rozkładu granulometrycznego.

Przed rozpoczęciem pomiarów zebrany materiał został powietrznie wysuszony, a następnie przesiany przez sito o średnicy oczek 2 mm w celu usunięcia części szkieletowych i resztek roślinnych. Rozkład granulometryczny gleb zmierzono metodą dyfrakcji laserowej przy pomocy Mastersizera 2000 (Malvern, UK). W przypadku **publikacji P3** złoża zostały przygotowane w trzech wariantach wilgotnościowych, które odpowiadały potencjałowi wody glebowej równemu: i) 0,1 kPa (gleba nasycona), ii) 1 kPa (gleba bliska nasyceniu) oraz iii) 16 kPa (gleba o wilgotności odpowiadającej polowej pojemności wodnej). W przypadku **publikacji P4** uwzględnione warianty próbek obejmowały dwie wilgotności odpowiadające potencjałowi wody glebowej równemu 1 kPa i 16 kPa. Aby zmniejszyć ryzyko błędu ludzkiego i różnic w gęstości próbek wynikającej z ręcznego sposobu ich przygotowania, materiał glebowy był umieszczany wewnątrz aluminiowego pierścienia wyłącznie przez jedną osobę. Średnica wewnętrzna i wysokość pierścieni wykorzystanych w ramach **publikacji P3** wynosiła odpowiednio 36 mm i 10 mm. W **publikacji P4** złoża przygotowano w pierścieniach o wewnętrznej średnicy równej 56 mm i wysokości 10 mm. Zmiana rozmiaru pierścieni wynikała z kwestii technicznych i pozwoliła zmniejszyć liczbę nieudanych doświadczeń (tj. wykluczanych z dalszej analizy przypadków uderzenia kropli w pobliżu krawędzi pierścienia, co zaburzało przebieg zjawiska rozbryzgu i deformację) przy swobodnym spadku kropli z 7 metrów. W celu ograniczenia wpływu lokalnych nierówności i różnic w wilgotności na kształt kraterów, przed pomiarem powierzchnię gleby delikatnie wyrównywano linijką.

Prace zrealizowane w ramach **publikacji P4** obejmowały dodatkowo trzy warianty termiczne eksperymentów. Każdy z wariantów uwzględniał inną wartość temperatury gleby, powietrza w laboratorium oraz wody tworzącej spadające krople. Różnice w temperaturach kropli, gleby i powietrza w ramach poszczególnych wariantów wynikały z ich zróżnicowania podczas naturalnych opadów deszczu. Dobrane wartości temperatur nawiązywały po części do warunków panujących podczas opadów występujących w różnych porach roku w klimacie umiarkowanym, w tym ekstremalnych temperatur związanych ze zmianami klimatycznymi. Po części miały one natomiast zapewnić możliwie duże zróżnicowanie rozpatrywanych wariantów, co było istotne w kontekście wstępnego charakteru analiz wpływu temperatury na deformacje powierzchni gleby w wyniku zjawiska rozbryzgu. Pierwszy wariant termiczny odnosił się do opadów deszczu, które mogą wystąpić zimą/wiosną (temperatura powietrza: 10 °C; temperatura kropli: 5 °C; temperatura gleby: 5 °C), wariant drugi odnosił się do opadów deszczu, mogących wystąpić późną wiosną/latem (temperatura powietrza: 20 °C; temperatura kropli: 15 °C; temperatura gleby: 20 °C), a wariant trzeci odnosił się do opadów w ekstremalnie

wysokich temperaturach (temperatura powietrza: 30 °C; temperatura kropli: 25 °C; temperatura gleby: 40 °C).

Tab.1. Podsumowanie wariantów eksperymentalnych uwzględnionych w publikacjach **P2-4**, na bazie charakterystyki wykorzystanych materiałów i kropli.

Publikacja	Charakterystyka materiału i kropli				
	Rodzaj materiału	Rozkład granulometryczny	Potencjał wody glebowej	Śr. kropli [mm]	Wys. spadku kropli [m]
P1	Praca przeglądowa				
P2	Materiał modelowy	Szklane kulki o średnicach w zakresie 0,425 – 0,6 mm	Wariant powietrznie suchy: złoża proste i monowarstwy 0,1 kPa: złoża proste	4,2	1,5
P3	Materiał glebowy (wykorzystano trzy gleby zróżnicowane pod względem rozkładu granulometrycznego)	Piasek gliniasty Piasek: 81% Pył: 17% Ił: 2% Glina piaszczysta Piasek: 53% Pył: 42% Ił: 5% Pył gliniasty Piasek: 14% Pył: 78% Ił: 8%	0,1 kPa; 1 kPa; 16 kPa	4,2	1,5; 7
P4	Materiał glebowy (wykorzystano trzy gleby zróżnicowane pod względem rozkładu granulometrycznego)	Piasek gliniasty Piasek: 81% Pył: 17% Ił: 2% Glina piaszczysta Piasek: 58% Pył: 38% Ił: 4% Pył gliniasty Piasek: 26% Pył: 68% Ił: 6%	1 kPa; 16 kPa; Obie wartości uwzględniono w trzech wariantach termicznych	4,3	7

3.2. Układ dozowania kropli

Wykorzystany w eksperymentach system dozowania kropli bazował na pompie perystaltycznej i był wypełniany wodą destylowaną. W **publikacji P2** wykorzystano krople o średnicy 4,2 mm spadające swobodnie z wysokości 1,5 metra, których energia w momencie uderzenia w złoże wynosiła 0,49 mJ. Krople użyte w **publikacji P3** miały identyczną średnicę, przy czym w doświadczeniach uwzględniono dwie wysokości swobodnego spadku: 1,5 m i 7 m. Energia kropli spadających z większej wysokości wynosiła 1,35 mJ. W **publikacji**

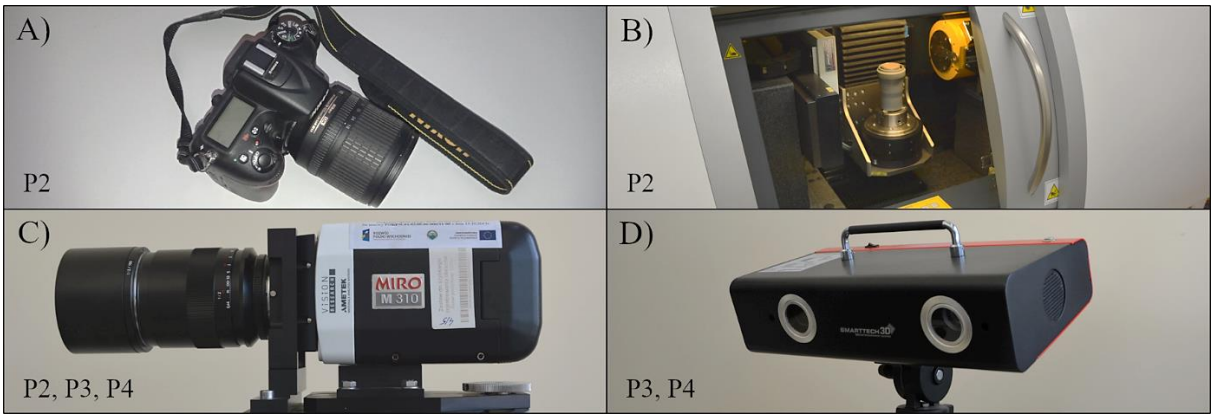


Rys. 5. Winda służąca do modyfikacji wysokości swobodnego spadku kropli (Foto: zdjęcie własne).

P4 wykorzystano krople o średnicy 4,3 mm, które dozowano z wysokości 7 m, co przekładało się na energię równą 1,4 mJ. Swobodny spadek z wysokości 7 metrów pozwolił osiągnąć ponad 90% prędkości granicznej charakteryzującej opad naturalny o analogicznym rozmiarze kropli (Epema i Riezebos 1983). Zmiana wysokości, z jakiej spuszczano krople, była możliwa dzięki użyciu windy stanowiącej wyposażenie Laboratorium Erozji Gleby Instytutu Agrofizyki Polskiej Akademii Nauk (Rys. 5). Wytypowany rozmiar kropli nawiązywał do deszczy nawalnych, jak również kropli formowanych na liściach roślin w czasie opadu podkoronowego (ang. throughfall). Stała średnica kropli została zapewniona dzięki wykorzystaniu szklanych kapilar stanowiących końcowy element układu dozującego. Moment uderzenia kropli w złoża rejestrowano szybką kamerą ustawioną na wysokości krawędzi próbki. Zgromadzone nagrania pozwoliły na określenie energii, średnicy i prędkość kropli. W badaniach uwzględniono wyłącznie próbki trafione w sposób centralny przez pojedynczą kroplę tj. takie, w przypadku których deformacja powierzchni nie została zakłócona przez krawędź pierścienia.

3.3. Metody pomiarowe

Dobór technik pomiarowych wykorzystanych w badaniach wynikał w bezpośredni sposób z powiązanych z nimi celów cząstkowych. Mając na uwadze czytelność pracy, opis zastosowanej metodyki został podzielony na dwa podrozdziały. Pierwszy z nich dotyczy eksperymentów przeprowadzonych na złożach modelowych (**P2**), drugi eksperymentów na próbkach przygotowanych z materiału glebowego (**P3 i P4**). Na rysunku 6 przedstawiono zestawienie aparatury pomiarowej wraz z oznaczeniem publikacji, w których była używana.



Rys. 6. Zestawienie aparatury pomiarowej wykorzystanej w badaniach: A) aparat cyfrowy Nikon D7100 (**P2**), B) mikrotomograf GE Nanotom 180S (**P2**), C) szybka kamera Phantom Miro 310 (**P2, P3, P4**), D) skaner powierzchni Scan3D UNIVERSE 10 Mpix (**P3, P4**) (Foto: zdjęcia własne).

3.3.1. Metodyka pomiaru – złoża modelowe

Cel cząstkowy realizowany w ramach **publikacji P2** dotyczył charakterystyki wybranych aspektów przemieszczenia elementów złóż modelowych oraz deformacji powierzchni w wyniku uderzenia kropli. Zasadnicza część prac polegała na analizie zdjęć złóż wykonanych aparatem Nikon D7100, którą przeprowadzono przy pomocy programu GIMP. Pomiary uzupełniono o nagrania zarejestrowane szybką kamerą Phantom Miro 310 (Vision Research, USA) umieszczoną nad próbką. Zgromadzone filmy pozwalały na dodatkową weryfikację przemieszczenia markerów w przypadku występowania trudności w interpretacji fotografii. Nagrania wykonano z rozdzielczością czasową wynoszącą 3268 klatek na sekundę przy rozdzielczości obrazu równej 1280×800 pikseli.

Złoża proste (próbki, na powierzchni których przygotowano regularne wzory ułożone z kolorowych kulek – markerów) pozwoliły na określenie przemieszczenia markerów w zależności od ich początkowej odległości od miejsca uderzenia kropli. Analiza zgromadzonych zdjęć zakładała porównanie pozycji markerów przed i po wystąpieniu rozbryzgu, co umożliwiło pomiar pokonanego przez nie dystansu. Początkowe lokalizacje markerów przypisano do obszarów mających postać współosiowych pierścieni o szerokości 1 mm, wyznaczonych wokół środka miejsca uderzenia kropli. Dla każdego z obszarów obliczono średnie przemieszczenie kulek, które początkowo znajdowały się w jego obrębie. Łącznie przeanalizowano rozbryzg na 23 suchych złożach prostych, co dostarczyło informacji o przemieszczeniu 370 markerów oraz na 10 nasyconych złożach prostych, co dostarczyło informacji o przemieszczeniu 237 markerów. Aby zapewnić zatrzymanie kulek wybitych poza złoże w miejscu ich lądowania i zapobiec dodatkowemu przemieszczeniu w wyniku toczenia

wykorzystano arkusze papieru samoprzylepnego. Kartki miały centralnie wykonany otwór o średnicy 35 mm i były umieszczane na wysokości powierzchni próbek. Za ruch uznawano przemieszczenie wynoszące co najmniej 0,3 mm, co odpowiadało w przybliżeniu promieniowi szklanych kulek użytych w badaniach.

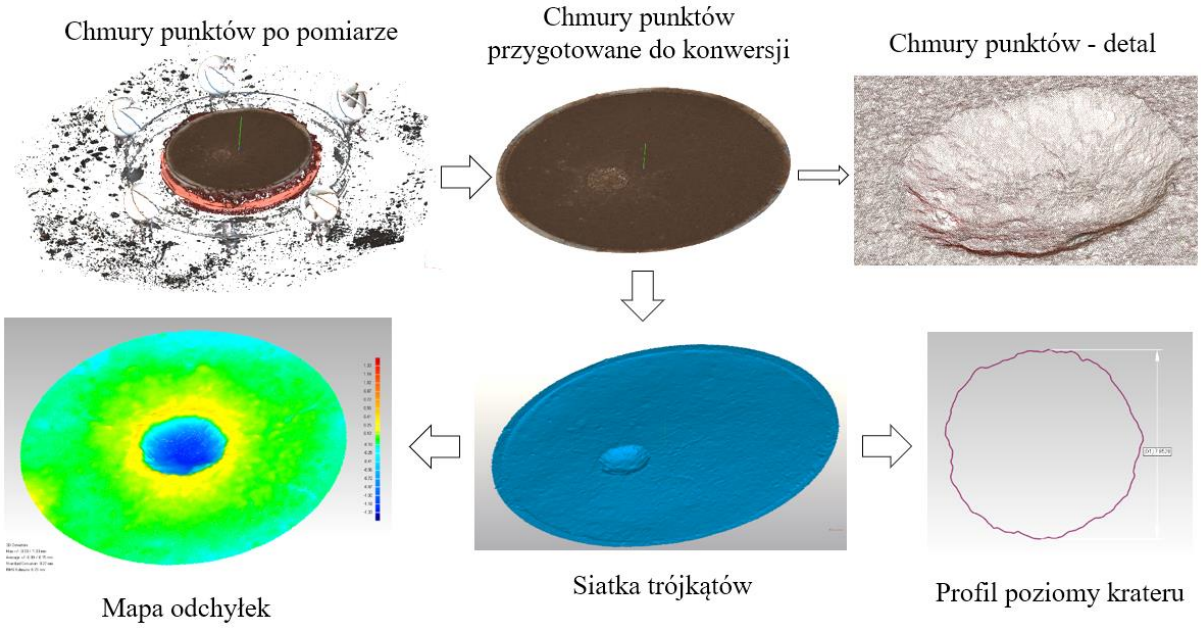
Złoża z monowarstwami pozwoliły na analizę przemieszczania kulek w odniesieniu do początkowej głębokości, na której się znajdowały. Dzięki zróżnicowaniu kolorów warstw przy powierzchni możliwe było wskazanie pochodzenia kulek wybitych poza złoże, jak również określenie procentowego udziału elementów z poszczególnych warstw w obrębie obszarów zdeformowanych przez kroplę. W przeprowadzonych pomiarach ponownie wykorzystano papier samoprzylepny. Powierzchnia próbek była fotografowana, a analiza zdjęć wykonana w programie GIMP. Eksperymenty przeprowadzono w 3 powtórzeniach.

Analizy uzupełniono o szczegółowy opis morfologii kraterów, który bazował na zdjęciach próbek oraz przekrojach deformacji uzyskanych dzięki wykorzystaniu mikrotomografu GE Nanotom 180S (E Sensing & Inspection Technologies GmbH, Niemcy). Pomiary z użyciem mikrotomografu przeprowadzono zarówno na złożach w wariancie suchym, jak i nasyconym. Przygotowana charakterystyka uwzględniała określenie wymiarów niecki powstającej w środku deformacji, wysokości i szerokości wału formowanego na obrzeżu kraterów, a w przypadku złóż suchych także średnicy obszaru materiału zwilżonego przez kroplę.

Informacje o dystansie pokonanym przez markery przedstawiono za pomocą wartości średnich i odchyleń standardowych. Wymiary kraterów powstających na próbkach suchych i nasyconych porównano za pomocą analizy statystycznej bazującej na teście t-Studenta o poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$.

3.3.2. Metodyka pomiaru – próbki glebowe

Badania ujęte w **publikacjach P3 i P4** zostały oparte na analizie skanów 3D kraterów formowanych na powierzchni próbek glebowych. Procedura wykonania skanów i obróbki uzyskanych obrazów była taka same w przypadku obu publikacji (Rys. 7). W czasie eksperymentów próbki z materiałem glebowym umieszczano pod układem dozującym, który znajdował się na platformie windy. Położenie platformy modyfikowano w zależności od założonej wysokości swobodnego spadku kropli (1,5 lub 7 metrów).



Rys. 7. Sekwencja analizy obrazów kraterów uzyskanych przy pomocy skanera powierzchni (Foto: zdjęcie własne).

Po uderzeniu kropli złoże umieszczano na stoliku obrotowym współpracującym ze skanerem powierzchni Scan3D UNIVERSE 10 Mpix (Smarttech, Polska), wykorzystującym technologię skanowania białym światłem strukturalnym LED. Wymiary objętości pomiarowej urządzenia były równe 150×100×90 mm, próbkowanie wynosiło 655 punktów·mm^{-1}, a odległość między punktami 0,039 mm. Sekwencja światła emitowana w czasie pomiaru odbijała się od powierzchni próbki, po czym była rejestrowana przez detektor. Dzięki analizie odbicia oprogramowanie urządzenia generowało chmurę punktów odzwierciedlającą geometrię zdeformowanej powierzchni. Pomiar pojedynczej próbki zakładał rejestrację 6 chmur punktów, między którymi złoże było obracane o 60 stopni. Zarejestrowane chmury poddawano obróbce mającej na celu ich wzajemną kalibrację i usunięcie błędów pomiarowych (niepoprawnie wygenerowanych punktów), po czym były konwertowane do postaci siatek trójkątów. Rejestrację, obróbkę i konwersję chmur punktów przeprowadzono przy pomocy programu Smarttech3D measure (Smarttech, Polska).

Analiza siatek trójkątów została wykonana w programie Geomagic Control 2015 (3D Systems, USA). Bazując na obszarach nieobjętych deformacją, dla każdej próbki wyznaczono powierzchnię referencyjną nawiązującą do stanu złoża przed uderzeniem kropli. Porównanie siatki trójkątów (obejmującej obszar deformacji) z powierzchnią referencyjną pozwoliło wygenerować mapę odchyłek oraz wyznaczyć maksymalną głębokość krateru. Następnie wyodrębniono nieckę krateru od reszty złoża i określono objętość zagłębienia powstałego w miejscu uderzenia kropli. Dodatkowo dla każdego krateru wykonano przekrój na

poziomie płaszczyzny referencyjnej (przekrój poziomy górnej krawędzi krateru), który wykorzystywano w programie ImageJ (National Institute of Health, USA), do pomiaru średnicy równoważnej oraz w przypadku **publikacji P3** kolistości (Wzór 1 i 2). W **publikacji P4** kolistość została zastąpiona, występującym w literaturze bezwymiarowym współczynnikiem kształtu α, określanym przez stosunek głębokości krateru do jego średnicy (Wzór 3).

$$Kolistość: C = \frac{4\pi P}{O^2} \quad (1)$$

$$Średnica\ równoważna: d_r = \sqrt{\frac{4P}{\pi}} \quad (2)$$

$$Parametr\ alfa: \alpha = \frac{h}{d_r} \quad (3)$$

Gdzie: P – powierzchnia przekroju krateru na poziomie powierzchni referencyjnej [mm^2]; O – obwód przekroju krateru na poziomie powierzchni referencyjnej [mm]; h – głębokość krateru [mm].

Publikacja P3 obejmowała 16 wariantów eksperymentu (trzy gleby różniące się rozkładem granulometrycznym, trzy wilgotności początkowe złóż, dwie energie kropli), dla każdego wariantu wykonano 10 powtórzeń. Badania przeprowadzone w **publikacji P4** również uwzględniały 16 wariantów eksperymentu (trzy gleby różniące się rozkładem granulometrycznym, dwie wilgotności początkowe złóż, trzy warianty termiczne), dla każdego wykonano 10 powtórzeń.

Dane zgromadzone w ramach **publikacji P3 i P4** poddano analizie statystycznej w programie Statistica 13.1 (TIBCO Software Inc., USA). Normalność rozkładów wyników podzielonych na grupy zgodne z wariantami przeprowadzonych eksperymentów zweryfikowano za pomocą testu Shapiro-Wilka. Do określenia wpływu poszczególnych czynników i ich wzajemnych interakcji na mierzone wielkości zastosowano wieloczynnikową analizę wariancji (ANOVA). W celu identyfikacji statystycznie istotnych różnic występujących między wynikami uzyskanymi dla rozpatrywanych wariantów eksperymentalnych użyto testu post-hoc Tukeya (przy poziomie istotności 0,05). Dodatkowo w **publikacji P3** określono wartości współczynnika ω^2, które zinterpretowano w oparciu o skalę Cohena, co pozwoliło oszacować miarę efektu i znaczenie uwzględnionych czynników na analizowany zbiór danych (Keren i Lewis, 1979; Cohen, 1988).

4. Omówienie wyników i treści publikacji

4.1. Publikacja P.1

Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods

W pracy przedstawiono przegląd metod pomiarowych umożliwiających analizę kształtu oraz procesu formowania kraterów powstających po uderzeniu kropli. Wśród omówionych metod uwzględniono (i) pomiar manualny (tj. wykorzystanie suwmiarki, linijki itp.), (ii) fotografię, (iii) obrazowanie z dużą prędkością, (iv) profilometrię, (v) skanowanie przestrzenne (tj. skanery 3D, fotogrametrię) oraz (vi) tomografię komputerową. Opis technik obejmował informacje o ich zaletach i wadach, zakresie oraz dokładności pozyskiwanych danych, przebiegu i czasochłonności pomiarów oraz kosztowności aparatury. Wyniki uzyskiwane dzięki wykorzystaniu metod ujętych w pracy podzielono na trzy grupy (i) wielkości statyczne – dotyczące finalnego, stabilnego kształtu krateru, (ii) wielkości dynamiczne – charakteryzujące zmiany kształtu krateru w procesie jego formowania oraz (iii) parametry bezwymiarowe – stanowiące najczęściej relację między kilkoma wielkościami np. stosunek średnicy krateru do średnicy padającej kropli.

Ponadto w artykule przedstawiono zestawienie dotychczasowych prac naukowych podejmujących temat deformacji powierzchni w wyniku uderzenia kropli. Przegląd badań świadczył o istotnym wpływie rozwoju technologicznego na zakres wykorzystywanej aparatury. Trendy obserwowane na przestrzeni lat wskazują na postępujące ograniczanie metod manualnych i jakościowych na rzecz coraz dokładniejszych metod bezdotykowych. W kolejnych pracach widoczne było stopniowe poszerzanie zakresu analizowanych aspektów deformacji. Wśród wielkości opisujących kształt kraterów coraz częściej występowały parametry nawiązujące do przebiegu procesu ich formowania. Zmianie ulegał również charakter i sposób przygotowania materiału wykorzystywanego w złożach, a także metody dozowania kropli, co pozwalało na coraz wierniejsze odwzorowanie zjawisk będących przedmiotem badań.

Rozwinięciem kwestii zmian w zakresie realizowanych prac i metodycznych aspektach badań było wskazanie zagadnień wymagających dalszych analiz oraz przewidywanych kierunków rozwoju aparatury pomiarowej. Wśród aktualnych zagadnień badawczych wyszczególniono mechanizmy działające w początkowej fazie formowania kraterów, zmiany zagęszczenia gleby w miejscu uderzenia kropli oraz analizy początkowego położenia, zakresu i sposobu przemieszczenia materiału poruszanego w obrębie deformacji. Odnośnie rozwoju

aparatury poruszono kwestie powiązane z eliminacją aktualnych ograniczeń urządzeń (np. trudności ze skanowaniem ciemnych, wilgotnych powierzchni), zwiększeniem rozdzielczości czasowej pomiarów wykonywanych profilometrami, a także stopniowym adaptowaniem technik pomiarowych używanych w laboratoriach do pomiarów polowych.

Wśród praktycznych sposobów wykorzystania rezultatów badań nad kraterami podkreślono możliwość ich implementacji w modelach erozyjnych celem lepszego przewidywania skali i przebiegu zjawisk. Wdrożenie wyników w tym zakresie ma szczególne znaczenie w kontekście początkowych etapów opadu oraz szacowania strat gleby przed uruchomieniem spływu powierzchniowego. Zaznaczono, że charakterystyka deformacji może stanowić metodę monitorowania erozji rozbryzgowej, stanowiąc alternatywę dla metod opartych na kubkach rozbryzgowych. Dodatkowo wskazano znaczenie badań w kontekście analiz dotyczących transportu zanieczyszczeń i patogenów przenoszonych w wyniku zjawiska rozbryzgu.

Wykonany przegląd literatury podkreślił rolę rozwoju metod pomiarowych w kontekście sukcesywnego poszerzania wiedzy na temat kraterów. Użycie technik bezdotykowych umożliwiło stopniową rezygnację z uproszczeń przyjmowanych we wcześniejszych pracach. Zgodnie z treścią artykułu przeglądowego przyszłe badania mające na uwadze erozyjny aspekt deformacji powinny w miarę możliwości uwzględniać wykorzystanie kropli o prędkości zbliżonej do wartości końcowych osiąganych przez naturalny opad. W przypadku pomiarów objętości kraterów wskazane jest natomiast bazowanie na ich trójwymiarowych obrazach, a nie wzorach opartych na wartościach pozyskanych z przekrojów. Istotne jest również częstsze uwzględnienie w prowadzonych pracach materiałów glebowych.

Zagadnienia przedstawione w pracy przeglądowej stanowiły podstawę dla części badawczej niniejszej rozprawy. Dotyczyło to zarówno metodycznych aspektów pomiaru deformacji powstających po uderzeniu kropli, jak i kwestii aktualnych zagadnień badawczych, wśród których uwzględniono m.in. przemieszczenia materiału w czasie formowania krateru oraz potencjalny wpływ zmian klimatycznych (odzwierciedlonych przez temperaturę) na deformację powierzchni w początkowym etapie erozji wodnej. W ramach prac badawczych wchodzących w skład rozprawy podejmowano wysiłki mające na celu coraz lepsze odwzorowanie analizowanego zjawiska poprzez stopniową rezygnację z uproszczeń spotykanych w literaturze. Tym samym do przygotowania próbek użytych w pracach **P3** i **P4** wykorzystano materiał glebowy, objętości kraterów określono na podstawie ich cyfrowego odwzorowania przy pomocy siatek trójkątów, a energię użytych kropli zbliżono do wartości osiąganych przez krople w czasie naturalnego opadu.

4.2. Publikacja P.2

Surface deformation and displacement of bed elements during splash – Model tests

Mechanizmem stojącym u podstaw powstawania kraterów jest przemieszczenie materiału znajdującego się na powierzchni deformowanych złóż tj. gleby, piasku, lub innych ośrodków sypkich. Charakterystyka ruchu materiału i określenie jego związku z deformacją powierzchni stanowiły cel badawczy pracy **P2**, który zrealizowano przy użyciu złóż modelowych przygotowanych ze szklanych kulek. Wykorzystanie złóż prostych pozwoliło określić przemieszczenie powierzchniowych elementów próbek w zależności od ich początkowej lokalizacji względem miejsca uderzenia kropli. Złoża z monowarstwami umożliwiły analizę ruchu kulek znajdujących się w warstwach podpowierzchniowych i pochodzenia kulek zatrzymanych w obrębie zdeformowanych obszarów. Prace wykonane przy pomocy mikrotomografu pozwoliły na pomiar morfologii kraterów oraz finalne powiązanie poszczególnych obszarów deformacji ze wskazanymi wcześniej sposobami przemieszczenia.

4.2.1. Przemieszczenie powierzchniowych elementów złoża

Sposoby przemieszczenia markerów umieszczonych na powierzchni złóż prostych w wariancie suchym podzielono na trzy grupy: i) przesunięcie w obrębie materiału zwilżonego przez kroplę, ii) wybicie, iii) przesunięcie w obrębie wału. Wyniki pomiarów dla poszczególnych rodzajów przemieszczeń przedstawiono w tabeli 2.

Tab.2. Charakterystyka sposobów przemieszczenia markerów po uderzeniu kropli w złoża proste w wariancie suchym.

Wielkości charakteryzujące sposoby przemieszczenia	Przesunięcie w obrębie materiału zwilżonego	Wybicie	Przesunięcie w obrębie wału
Zasięg występowania w odniesieniu do odległości od centralnego miejsca uderzenia kropli*	Od 0 do 6 mm	Od 4 do 8 mm	Od 5 do 13 mm
Największy pokonywany dystans**	2,37 mm (± 0,35 mm)	66,03 mm (± 30,51mm)	5,87 mm (± 0,61 mm)
Początkowa lokalizacja markerów przemieszonych na największą odległość	2 mm	4 mm	6 mm

* Początkowe położenie przemieszczonych kulek określono względem środka uderzenia kropli poprzez przyporządkowanie ich do obszarów utworzonych w wyniku podziału powierzchni próbki na pierścienie o szerokości 1 mm.

** Wartość stanowi średnią dla wszystkich kulek zlokalizowanych w obszarze (pierścieniu) określającym ich początkowe położenie. W nawiasach podano odchylenie standardowe.

Przesunięcie w obrębie materiału zwilżonego następowało w bezpośrednim otoczeniu miejsca uderzenia kropli. Obszar zajmowany przez materiał zwilżony i połączony wodą z kropli ulegał rozszerzeniu w wyniku impetu uderzenia, a następnie kurczył się w związku z działaniem napięcia powierzchniowego. Wybicie kulek wiązało się z wyrzuceniem ich w powietrze i przemieszczeniem poza obszar deformacji, przy czym pokonywane przez nie dystanse wykazywały znaczne zróżnicowanie. Przesunięcie w obrębie wału dotyczyło markerów przemieszczanych na krawędź deformacji, co obejmowało ruch polegający na ich sunięciu po powierzchni, jak i wybiciu na niewielkie wysokości. Pierwsze markery pozostające w spoczynku obserwowano w odległości 10 mm od centrum uderzenia kropli.

W przypadku nasyconego wariantu złóż prostych woda wypełniająca pory między szklanymi kulkami zapobiegała powstawaniu wewnątrz krateru skupiska cząstek zwilżonych przez kroplę (analogicznie do przykładu kraterów przedstawionych na Rys. 3). Ze względu na odmienny kształt deformacji, tj. prostszą budową krateru, przemieszczenie markerów w tym wariancie zostało podzielone na dwie grupy: i) przemieszenie w obrębie deformacji, ii) wybicie. Wyniki pomiarów sposobów przemieszczeń wyróżnionych w nasyconym wariancie złóż prostych przedstawiono w tabeli 3.

Tab.3. Charakterystyka sposobów przemieszczenia markerów po uderzeniu kropli w złoża proste w wariancie nasyconym.

Wielkości charakteryzujące sposoby przemieszczenia	Przesunięcie w obrębie deformacji	Wybicie
Zasięg występowania w odniesieniu do odległości od centralnego miejsca uderzenia kropli*	Od 0 do 9 mm	Od 2 do 5 mm
Największy pokonywany dystans**	4,43 mm (± 1,13 mm)	92,80 mm (± 36,80 mm)
Początkowa lokalizacja markerów przemieszonych na największą odległość	3 mm	3 mm

* Początkowe położenie przemieszczonych kulek określono względem środka uderzenia kropli poprzez przyporządkowanie ich do obszarów utworzonych w wyniku podziału powierzchni próbki na pierścienie o szerokości 1 mm.

** Wartość stanowi średnią dla wszystkich kulek zlokalizowanych w obszarze (pierścieniu) określającym ich początkowe położenie. W nawiasach podano odchylenie standardowe.

Przemieszczenie w obrębie deformacji dotyczyło zarówno kulek znajdujących się bezpośrednio pod padającą kroplą, które w wyniku uderzenia zostały wciśnięte głębiej w złoże, jak również markerów, które zostały przesunięte na krawędź krateru, tworząc wał. Wybicie, analogicznie jak w przypadku złóż suchych, wiązało się ze znacznymi przemieszczeniami o dużym zróżnicowaniu, skutkującymi wyrzuceniem markerów poza obszar zdeformowany. Pierwsze nieprzemieszczone elementy złoża stwierdzono na odległości 6 mm od centrum uderzenia kropli.

Niezależnie od wilgotności złoża, trendy charakteryzujące ruch tworzących je elementów były zbliżone: markery znajdujące się najbliżej miejsca uderzenia przemieszczały się na niewielkie odległości; kulki z wąskiego obszaru znajdującego się nieco dalej były wybijane na znaczne dystanse; przemieszczenie elementów złoża poza obszarem wybicia stopniowo malało, aż do całkowitego zaniku ruchu. Co istotne, niektóre z początkowych lokalizacji wiązały się z jednoczesnym wystąpieniem dwóch, a nawet trzech rodzajów przemieszczeń. Przykładowo, w przypadku markerów zlokalizowanych w odległości 5 mm od centrum uderzenia w wariancie suchym stwierdzono wystąpienie każdego z trzech obserwowanych sposobów przemieszczenia. Wskazuje to na stopniową zmianę dominującego typu ruchu wraz ze zmianą odległości od punktu uderzenia kropli, oraz związek przemieszczenia markerów ze sposobami deformacji obszarów, w których były początkowo zlokalizowane (co zostało opisane dokładniej w dalszej części wyników). Należy zauważyć, że kulki, które po wybiciu przebyły największe odległości, pochodziły ze stosunkowo niewielkiego obszaru próbki, a zasięgi występowania poszczególnych typów przemieszczeń były zależne od parametrów podłoża, w tym przypadku od wilgotności.

Porównanie wyników eksperymentów przeprowadzonych na złożach suchych i nasyconych pozwoliło ocenić wpływ obecności wody w porach przygotowanych próbek na przemieszczenie materiału. Liczba kulek wybitych po uderzeniu kropli była większa w przypadku złóż suchych, co świadczyło o ich podatności na inicjację ruchu. Jednocześnie to kulki wybijane ze złóż nasyconych pokonywały większe odległości. Sugeruje to, że obecność wody w porach wpływała na sposób propagacji energii padającej kropli oraz mechanizm wybicia materiału. Równocześnie, wśród materiału wybitego ze złóż nasyconych obserwowano występowanie agregatów tj. niewielkich grup kulek połączonych znajdującą się między nimi wodę.

4.2.2. Przemieszczenie elementów z różnych warstw złoża

Wykorzystanie złóż modelowych zawierających monowarstwy pozwoliło uzupełnić analizę ruchu materiału o informacje dotyczące głębokości, z jakiej pochodziły wybijane kulki. Przeprowadzone pomiary skupiały się tym samym na elementach złóż przemieszczonych na największe odległości, które zostały zatrzymane na papierze samoprzylepnym. Zgodnie z uzyskanymi rezultatami 97% wybitych kulek pochodziło z warstwy powierzchniowej. Mimo niedokładności wynikających z manualnego przygotowania monowarstw uzyskany wynik był nadal jednoznaczny w kontekście pochodzenia najdalej przemieszczonego materiału.

Dodatkowo, użycie próbek z monowarstwami umożliwiło wstępną ilościową charakterystykę deformacji. Przeprowadzone pomiary skupiały się na obszarach, w obrębie których dochodziło do wymieszania/odsłonięcia materiału pochodzącego z różnej głębokości/warstw. W oparciu o powyższe założenie wskazano dwa charakterystyczne obszary deformacji: opisaną wcześniej powierzchnię zwilżoną i tak zwany obszar odsłonięty zlokalizowany między materiałem zwilżonym i wałem otaczającym krater. Geneza obszaru odsłoniętego wiązała się z dwoma mechanizmami: i) zmianą powierzchni obszaru zajmowanego przez materiał zwilżony, który po osiągnięciu maksymalnego rozmiaru ulegał skurczeniu w wyniku działania napięcia powierzchniowego wody pochodzącej z kropli; ii) wybiciem elementów złoża, które były początkowo zlokalizowane w obrębie tego obszaru.

Wyznaczone obszary zostały przeanalizowane pod kątem ich wielkości i pochodzenia zatrzymanych w nich elementów. Powierzchnia materiału zwilżonego wynosiła 96,72 mm² (SD = 2,90 mm²), pole powierzchni odsłoniętej była nieco większa, tj. 124,93 mm² (SD = 7,13 mm²). Procentowy udział kulek zatrzymanych w materiale zwilżonym był mocno zróżnicowany, największy udział stanowiły kulki z pierwszej – 56,7% (SD = 14,1%) i drugiej warstwy – 29,9% (SD = 13,1%). W przypadku obszaru odsłoniętego udział elementów pochodzących z pierwszej warstwy był znacznie mniejszy, wynosząc 10,5% (SD = 3,6%), dominującą część stanowiły kulki z drugiej – 67,7% (SD = 5,7%) i trzeciej warstwy – 18,8% (SD = 9,6%). Uzyskane wyniki stanowiły dodatkowe potwierdzenie związku początkowej lokalizacji i zachodzącej w jej obrębie deformacji ze sposobami i dystans przemieszczenia materiału złoża.

4.2.3. Analiza morfologii deformacji przy pomocy mikrotomografii

Skanowanie złóż przy pomocy mikrotomografu pozwoliło uzyskać dokładne informacje o morfologii deformacji, zarówno w kontekście składających się na nie obszarów jak i ich wielkości. Analizę wykonano na bazie przekrojów próbek w wariacie suchym i nasyconym,

potwierdzając przy tym wcześniejsze obserwacje. W złożach suchych wewnątrz krateru formowany był wyodrębniony od reszty próbki obszar zwilżony przez kroplę. Po obu stronach materiału zwilżonego widoczne były zagłębienia tworzące tak zwaną fosę (odpowiadała ona obszarowi odsłoniętemu z eksperymentów przeprowadzonych na złożach z monowarstwami). Całość deformacji była otoczona spiętrzonym materiałem tworzącym wał. Krater formowany na złożach nasyconych miał znacznie prostszą budowę, składając się z centralnego zagłębienia i otaczającego go wału.

Analizy deformacji przeprowadzone w ramach pracy **P2** dowiodły, że kratery powstające na złożach suchych były większe od tych formowanych na złożach nasyconych. Średnica kraterów na złożach suchych wynosiła 19,48 mm (SD = 0,46 mm) i była istotnie statystycznie różna od wartości odnotowanej dla próbek nasyconych, która wynosiła 14,16 mm (SD = 0,52 mm). Najgłębszy punkt deformacji formowanej na złożu suchym występował w obrębie fosy. Zagłębienie to wyniosło 1,57 mm (SD = 0,07 mm) i było istotnie większe od maksymalnych głębokości obserwowanych w złożach nasyconych tj. 1,22 mm (SD = 0,05 mm).

Różnice w wielkości i kształcie deformacji na złożach suchych i nasyconych można wyjaśnić wpływem wody na gęstość próbek (efekt zastąpienia powietrza w porach między kulkami przez wodę) oraz działaniem jej napięcia powierzchniowego i lepkości. Obecność wody ograniczała penetrację złoża przez kroplę oraz uniemożliwiała wyodrębnienie zwilżonego przez nią materiału od reszty próbki. Finalnie skutkowało to zróżnicowaniem deformacji w analizowanych wariantach i wpływało na sposób przemieszczenia materiału w ramach rozbryzgu.

4.2.4. Deformacja a przemieszczenie elementów złoża

Zestawienie wyników badań przeprowadzonych na złożach prostych, złożach z monowarstwami i analiz zrealizowanych za pomocą mikrotomografu pozwoliło wykazać bezpośredni związek przemieszczenia elementów złoża z deformacjami zachodzącymi na jego powierzchni. Przekroje próbek oraz doświadczenia ze złożami zawierającymi monowarstwy wskazują, że miejsce, z którego pochodził materiał wybity na największą odległość, było związane z najsilniejszą deformacją. W przypadku złóż suchych kluczowa była krawędź obszaru zwilżonego przez kroplę. Jej gwałtowne rozszerzenie po uderzeniu i następujące później kurczenie powodowało znaczną deformację powierzchni (powstawanie fosy) oraz wyrzucenie kulek poza obszar złoża. Dodatkowo krawędź obszaru zwilżonego materiału była związana ze zmianą dominującego sposobu przemieszczenia (jednoczesne występowanie trzech sposobów przemieszczenia elementów złoża w tym obszarze). Podobną sytuację

zaobserwowano w przypadku złóż nasyconych. Maksymalną wartość przemieszczenia stwierdzono dla kulek zlokalizowanych w odległości 2–4 mm od geometrycznego środka uderzenia kropli, czyli w obszarze formowania wewnętrznych ścian krateru.

Publikacja P2 pozwoliła zrealizować **cel C1** i pozytywnie zweryfikowała **hipotezę H1**.

4.3. Publikacja P.3

Soil Deformation after One Water-Drop Impact — The Effect of Texture and Soil Moisture

Badania zawarte w publikacji **P3** stanowiły kontynuację analiz wpływu wilgotności złoża na wielkość i kształt deformacji powstającej w wyniku zjawiska rozbryzgu. W eksperymentach uwzględniono trzy warianty wilgotności początkowej próbek, które przygotowano z materiałów glebowych różniących się pod względem rozkładu granulometrycznego. Ponadto prace obejmowały dwie wysokości swobodnego spadku kropli, w tym wysokość (7 metrów) pozwalającą uzyskać prędkości zbliżone do wartości końcowych naturalnego opadu deszczu. Pomiary wykonano skanerem powierzchni, określając głębokość, średnicę równoważną, kolistość i objętość formowanych kraterów.

Użycie skanera pozwoliło zrezygnować ze spotykanej w literaturze przedmiotu uproszczonej metody wyznaczania objętości kraterów, która polegała na wykorzystaniu wzoru na odcinek kuli przy uwzględnieniu wartości głębokości i średnicy uzyskanych z przekrojów. Porównanie rezultatów ze skanera z wynikami dodatkowych obliczeń opartych na powyższym wzorze wykazało, że uproszczona metoda powodowała średnie zawyżenie rozmiarów kraterów o około 23%. Źródłem różnic był rzeczywisty kształt kraterów, który odbiegał od odcinka kuli. Nieregularność powstałych deformacji wiązała się z: i) asymetrią krateru, im bardziej wartość kolistości odbiegała od 1, tym bardziej obrys krawędzi różnił się od okręgu, oraz ii) budową wnętrza kraterów, ukształtowanie ścian i dna zagłębienia różniło się od gładkiego wnętrza założonych odcinków kuli.

Mając na uwadze przejrzystość pracy, w niniejszym rozdziale ograniczono się do przytoczenia najważniejszych wyników, które wybrano z kompletu danych zawartych w publikacji **P3**. Prezentowane rezultaty obejmują skrajne wartości wielkości użytych do charakterystyki kraterów formowanych na każdej z gleb, wraz z informacjami o wariancie eksperymentu, w którym zostały stwierdzone (wilgotność próbki i wysokość spadania kropli). Wybrane dane przedstawiono w tabeli 4.

Tab.4. Maksymalne i minimalne wartości wielkości charakteryzujących kratery (głębokość, średnica zastępcza, kolistość, objętość) uformowane na próbkach przygotowanych z materiałów glebowych o zróżnicowanym rozkładzie granulometrycznym.

Parametry kraterów		Gleby					
		Piasek gliniasty		Glina piaszczysta		Pył gliniasty	
		Wartość	Wariant*	Wartość	Wariant	Wartość	Wariant
Głębokość [mm]	Min	0,40 (± 0,03)	1,5m pF2,2	**0,14 (± 0,03)**	**1,5m pF2,2**	0,33 (± 0,01)	1,5m pF2,2
	Max	1,30 (± 0,06)	7m pF0	**2,48 (± 0,13)**	**7m pF0**	1,83 (± 0,05)	1,5m pF0
Średnica zastępcza [mm]	Min	6,97 (± 0,14)	1,5m pF2,2	**4,45 (± 0,27)**	**1,5m pF2,2**	6,96 (± 0,15)	7m pF2,2
	Max	11,47 (± 0,23)	7m pF0	10,41 (± 0,24)	7m pF0	**11,78 (± 0,26)**	**7m pF0**
Kolistość [-]	Min	**0,27 (± 0,02)**	**1,5m pF2,2**	0,39 (± 0,04)	1,5m pF2,2	0,52 (± 0,04)	1,5m pF2,2
	Max	0,63 (± 0,02)	7m pF0	0,69 (± 0,04)	7m pF0	**0,80 (± 0,01)**	**7m pF0**
Objętość [mm^3]	Min	5,19 (± 0,60)	1,5m pF2,2	**0,97 (± 0,27)**	**1,5m pF2,2**	4,80 (± 0,25)	1,5m pF2,2
	Max	51,60 (± 1,93)	7m pF0	**103,40 (± 6,42)**	**7m pF0**	85,91 (± 10,12)	7m pF0

W nawiasach podano wartości błędu standardowego (SE).
Kolorami zaznaczono warianty, w których uzyskano minimalną (zielony) i maksymalną (żółty) wartość wyznaczanych parametrów dla wszystkich gleb.
* Skróty użyte do opisu wariantów eksperymentu odnoszą się do wysokości swobodnego spadku kropli i potencjału wody glebowej odpowiadającego początkowej wilgotności próbek.

Uderzenie kropli powodowało deformację powierzchni gleby we wszystkich rozważanych wariantach. Kształty i rozmiary kraterów były zależne od wilgotności początkowej, rozkładu granulometrycznego materiałów oraz energii kropli. Ogólne trendy wskazują, że wraz ze wzrostem wilgotności próbek oraz energii kropli rosły wartości wyznaczanych wielkości. Rozkład granulometryczny materiałów warunkował ich podatność na deformację oraz stopień zmian tej podatności przy różnych wilgotnościach. Wśród wyników przedstawionych w Tab.4 pięć skrajnych wartości występowało na złożach przygotowanych z gliny piaszczystej (maksymalna głębokość i objętość oraz minimalna głębokość, średnica i objętość), dwie skrajne wartości występowały na złożach z pyłu gliniastego (maksymalna średnica równoważna i kolistość), jedną skrajną wartość zanotowano na piasku gliniastym (minimalną kolistość). Ekstrema występujące w przypadku gliny piaszczystej wskazują, że spośród wszystkich badanych materiałów charakteryzowała się ona największą zmiennością podatności na deformację w zależności od początkowej wilgotności. Odwrotny trend obserwowano dla piasku

gliniastego, w przypadku którego zmiana objętości kraterów wynikająca ze wzrostu wilgotności początkowej była najmniejsza.

Analiza statystyczna wyników zawartych w publikacji **P2** potwierdziła powyższe stwierdzenia. Zgodnie z estymatorem ω^2 służącym do oszacowania efektu poszczególnych czynników kluczowe znaczenie dla deformacji próbek miała ich wilgotność. Wpływała ona w dużym stopniu na głębokość, średnicę i objętość kraterów oraz w średnim na ich kolistość. Rozkład granulometryczny materiałów oddziaływał na kolistość kraterów (poziom efektu sklasyfikowano jako średni). Wartości współczynnika ω^2 nie wskazywały na istotny efekt energii kropli, jednak analizy obejmujące test post-hoc Tukeya wykazały, że różnice w energii padających kropli powodowały występowanie istotnych statystycznie różnic między częścią uwzględnionych wariantów eksperymentu. Dyskusja ujęta w dalszej części pracy została oparta na rozpatrzeniu indywidualnego wpływu każdego z czynników.

Niezależnie od materiału glebowego wielkości charakteryzujące kratery były najmniejsze przy najniższej uwzględnionej wilgotności próbek (odpowiadającej potencjałowi wody glebowej równemu 16 kPa). W wariantach tych spójność i tarcie między cząstkami gleby były wystarczająco wysokie, aby przeciwdziałać przemieszczeniu materiału w wyniku uderzenia kropli. Otrzymane rezultaty były zgodne z pracą Takita i Sumita (2013), którzy badali zależność między wilgotnością złoża piasku a rozmiarem powstających na nim kraterów. Początkowy wzrost wilgotności użytych przez nich złóż (począwszy od złoża suchego) wiązał się ze zmniejszeniem wymiarów kraterów. Jednak po przekroczeniu wartości granicznej (>70% nasycenia) następowało odwrócenie obserwowanego trendu, tj. dalszy wzrost wilgotności skutkował wzrostem rozmiaru kraterów. Sugeruje to, że uwzględniona w pracy **P3** wilgotność odpowiadająca potencjałowi wody glebowej równemu 16 kPa była bliska wspomnianej wartości granicznej. Ghadiri (2004), który analizował deformację powierzchni złóż przygotowanych m.in. z piasku i materiału glebowego, jako jeden z głównych czynników determinujących wielkość formowanych kraterów wskazał wytrzymałość na ścinanie. W tym samym kontekście Zhang i in. (2015) podkreślili znaczenie wytrzymałości na ściskanie. Powyższe kwestie wiążą się w bezpośredni sposób ze zmianą grubości warstwy wody dookoła ziaren gleby przy różnych wilgotnościach. Warstwa ta wpływa na spójność gleby, a tym samym łatwość przemieszczania materiału po uderzeniu kropli. Tym samym, istotny efekt wilgotności na wyniki uzyskane w publikacji **P3** można tłumaczyć jej wpływem na mechaniczne właściwości użytych materiałów glebowych.

Wielkością podlegającą największym zmianom ze względu na rozkład granulometryczny materiału była kolistość. Kratery o najbardziej regularnym kształcie powstawały na glebie

o największej zawartości pyły i iłu. Dodatkowo wartość kolistości wzrastała wraz z wilgotnością i energią kropli. Mały rozmiar ziaren i wysoka wilgotność gleby ułatwiały równomierne oddziaływanie kropli, prowadząc do wybicia materiału z obszarów znajdujących się w podobnej odległości od punktu uderzenia. Bardziej zróżnicowany rozkład granulometryczny i większy udział cząstek piasku (cechujących się większym rozmiarem oraz znacznie większą masą niż cząstki pyłu, a tym samym wymagających większej energii do przesunięcia) przekładały się na mniejszą kolistość w przypadku piasku gliniastego i gliny piaszczystej.

Zmiany w wielkości kraterów, powodowane modyfikacją energii kropli i wilgotnością próbek, były inne dla każdej z wykorzystanych gleb. Analiza objętości kraterów (dokładniej, różnic między maksymalną i minimalną wartością objętości dla każdej gleby) wykazała, że zakres czynników uwzględniony w eksperymentach miał najmniejszy wpływ na rozmiary deformacji na piasku gliniastym, który był materiałem zawierającym najwięcej frakcji piaskowej. W przypadku gliny piaszczystej, o najbardziej zróżnicowanym rozkładzie granulometrycznym, trend był przeciwny – kratery powstałe na tej glebie wyróżniały się największą zmiennością. Wpływ analizowanych czynników na zmianę podatność gleb na erozję, jest tym samym widoczne już na jej początkowym etapie.

Wzrost energii użytych kropli powodował wzrost średnich wartości niemal wszystkich mierzonych wielkości, co przekładało się jednak na występowanie statystycznie istotnych różnic jedynie w części przypadków. Można przypuszczać, że wpływ pozostałych czynników był wystarczający, aby ograniczyć znaczenie zmian energii. Założenie to potwierdzała wartość współczynnika ω^2, zgodnie z którą efekt wywierany na wyznaczane parametry przez energię kropli był najmniejszy spośród wszystkich badanych czynników. Należy jednak zaznaczyć, że de Jong i in. (2017) oraz Delona i in. (2011) wykazali zależność między energią kropli a wielkością i kształtem kraterów analizowanych w ich badaniach. Pomiary przeprowadzone w powyższych pracach zakładały użycie suchych złóż piasku i szklanych kulek co utrudniało ich porównanie z rezultatami przedstawionymi w pracy **P3**, nie wpływając mimo wszystko na dostrzeżenie kwestii kluczowej tj. szerokiego zakresu energii kinetycznej kropli, które powodują wystąpienie zjawiska rozbryzgu. Proces ten wiąże się bowiem z efektem uderzenia kropli formowanych na powierzchni liści, które spadają z kilku centymetrów, jak i tych spadających z chmur w wyniku naturalnego opadu. Istotną rolę odgrywa także zróżnicowanie ich średnic, które przekładają się na masę. Powyższe kwestie podkreślają, że mimo niewielkiego znaczenia energii kropli na rezultaty zgromadzone w ramach pracy **P3**, czynnik ten jest istotny w kontekście analizowanego zjawiska i nie należy go bagatelizować.

Podsumowując, czynnikiem o największym wpływie na wyznaczone wielkości była wilgotność początkowa próbek. Tekstura gleby miała największy wpływ na kolistość przekrojów poprzecznych kraterów. Gleba zawierająca największą ilość frakcji piasku wykazywała najmniejszy wzrost podatności na deformację powodowany zmianami analizowanych czynników. Wzrost energii uderzających kropli przekładał się na wzrost średniej wartości mierzonych parametrów w większości wariantów. Jego wpływ w porównaniu do innych czynników był jednak niewielki i skutkował wystąpieniem statystycznie istotnymi różnicami tylko w niektórych przypadkach, co może wynikać z wykorzystania kropli o stosunkowo dużym rozmiarze.

Publikacja P3 pozwoliła zrealizować **cel C2** i pozytywnie zweryfikowała **hipotezę H2**.

4.4. Publikacja P.4

The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content

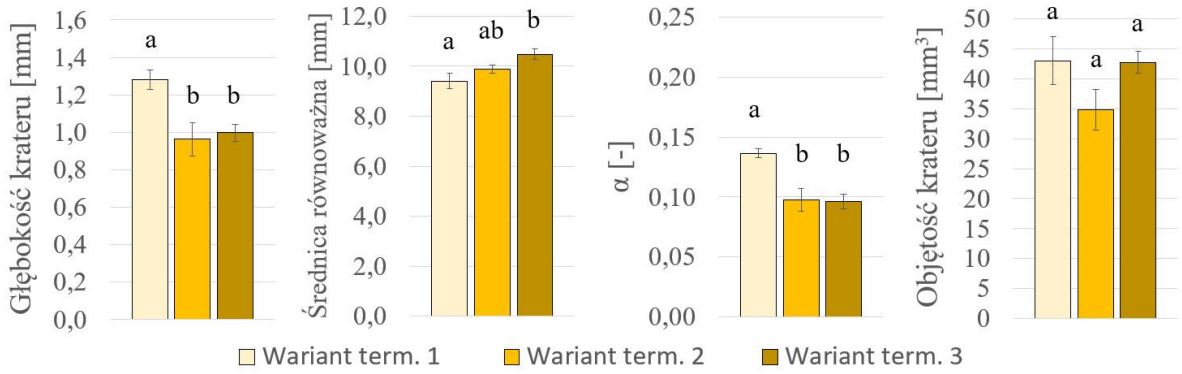
Badania przeprowadzone w pracy **P4** stanowiły rozwinięcie zagadnień ujętych w publikacji **P2**, w ramach której analizowano wpływ obecności wody w złożu na rozbryzg i związaną z nim deformację, oraz w pracy **P3**, w której dowiedziono, że znaczenie wilgotności materiału dla deformacji powstającej w wyniku rozbryzgu jest zależne od rozkładu granulometrycznego gleby. Celem pracy **P4** była weryfikacja, czy temperatura gleby, kropli i powietrza (różnicowana w ramach uwzględnionych wariantów termicznych) i związane z nią zmiany lepkości oraz napięcia powierzchniowego wody (obecnej w próbkach glebowych i kroplach) wpływają na morfologię deformacji powstających w wyniku zjawiska rozbryzgu. W pracy wykorzystano trzy materiały glebowe zróżnicowane pod względem rozkładu granulometrycznego, które przygotowano w dwóch wariantach początkowej wilgotności.

W ramach badań dokonano pomiaru czterech wielkości opisujących morfologię kraterów: głębokości, średnicy zastępczej, parametru α (stosunku głębokości do średnicy), oraz objętości. Rezultaty wieloczynnikowej analizy wariancji wykazały, że wszystkie mierzone wielkości były zależne od wilgotności, rozkładu granulometrycznego gleb oraz interakcji tych dwóch czynników. W większości przypadków wzrost wilgotności prowadził do wzrostu analizowanych parametrów. Dla wszystkich gleb najmniejsze wartości wyznaczanych wielkości odnotowano przy wilgotności odpowiadającej potencjałowi wody glebowej

równemu 16 kPa, natomiast największe przy wilgotności odpowiadającej potencjałowi wody glebowej wynoszącemu 1 kPa. Uzyskane wyniki były tym samym zbieżne z badaniami przeprowadzonymi w pracy **P3**.

Zgodnie z wynikami przeprowadzonych analiz statystycznych bezpośredni wpływ warunków termicznych uwzględnionych w eksperymentach był ograniczony i co należy podkreślić znacznie mniejszy, niż wpływ wilgotności i rozkładu granulometrycznego. Wpływ temperatury jako pojedynczego czynnika obserwowano wyłącznie w przypadku średnic kraterów. Dla wszystkich mierzonych wielkości stwierdzono jednak występowanie przynajmniej jednego istotnego statystycznie efektu interakcji temperatury z pozostałymi czynnikami, tj. i) temperatury w połączeniu z rozkładem granulometrycznym, ii) temperatury w połączeniu z wilgotnością lub iii) łącznego wpływu temperatury, rozkładu granulometrycznego i wilgotności. Oznacza to, że temperatura mogła modyfikować efekt innych czynników, powodując jego wzmocnienie lub osłabienie, co stanowiło podstawę do przeprowadzenia testów post-hoc w celu szczegółowej analizy zaobserwowanych interakcji.

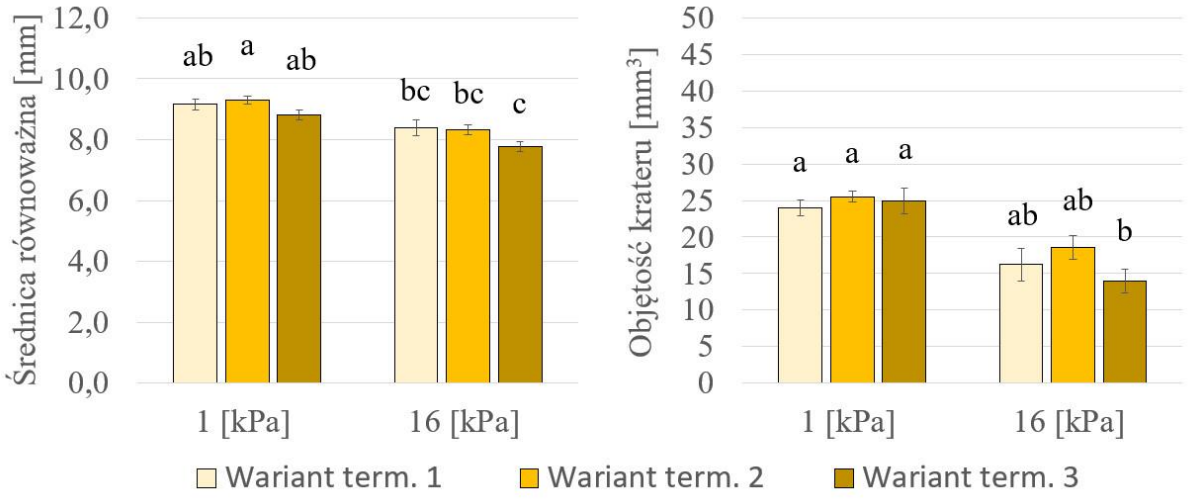
W dalszej części pracy skupiono się na rezultatach, które miały kluczowe znaczenie dla określenia oddziaływania temperatury na deformacje. Zmiany w morfologii kraterów wynikające z uwzględnionych wariantów termicznych stwierdzono w przypadku pyłu gliniastego i piasku gliniastego. Dla trzeciego materiału glebowego – gliny piaszczystej nie odnotowano wpływu temperatury, a zróżnicowanie wielkości powstających na nim deformacji było w pełni związane ze zmianami początkowej wilgotności użytych próbek.



Rys. 8. Wielkości charakteryzujące kratery formowane na pyle gliniastym przy wilgotności odpowiadającej potencjałowi wody glebowej równemu 1 kPa (za pomocą wąsów przedstawiono błąd standardowy, SE). Litery umieszczone na rysunku odpowiadają wynikom testu post-hoc Tukeya ($p < 0,05$) przeprowadzonego na komplecie danych, wskazując istotne statystycznie różnice między poszczególnymi wariantami eksperymentu.

Rezultaty pomiarów przeprowadzonych na pyle gliniastym, wskazują, że przy wilgotności odpowiadającej potencjałowi wody glebowej równemu 1 kPa (stan bliski nasyceniu) uwzględnione warianty termiczne powodowały występowanie istotnych statystycznie różnic w kształcie deformacji (Rys. 8). Kratery powstające przy najniższych temperaturach (wariant term. 1) miały większą głębokość, niż kratery formowane w dwóch pozostałych wariatach. Dodatkowo ich średnica zastępcza była istotnie statystycznie mniejsza niż średnica kraterów formowanych w wariancie najcieplejszym (wariant term. 3). Wpływ temperatury na kształt deformcji został wyraźnie odzwierciedlony w wartościach parametru α. Wynikające z temperatury zmiany w budowie kraterów nie wpłynęły jednak w istotny sposób na ich objętość.

W przypadku piasku gliniastego temperatura rzutowała na występowanie istotnych statystycznie różnic w średnicy równoważnej i objętości kraterów między rozpatrywanymi wariantami wilgotności (Rys. 9). Opisane różnice stwierdzono w wariacie termicznym obejmującym najwyższe temperatury (wariant term. 3). Natomiast w wariancie z najniższymi temperaturami (wariant term. 1) zmiana wilgotności nie skutkowała wystąpieniem istotnych różnic w żadnej z powyższych wielkości. Omówione prawidłowości wskazują na efekt interakcji temperatury i wilgotności w piasku gliniastym.



Rys. 9. Średnica równoważna i objętość kraterów formowanych na piasku gliniastym przy wilgotności odpowiadającej potencjałowi wody glebowej równemu 1 kPa oraz 16 kPa (za pomocą wąsów przedstawiono błąd standardowy, SE). Litery umieszczone na rysunku odpowiadają wynikom testu post-hoc Tukeya ($p < 0,05$) przeprowadzonego na komplecie danych, wskazując istotne statystycznie różnice między poszczególnymi wariantami eksperymentu.

Temperatura gleb uwzględniona w wariantach termicznych mieściła się w przedziale od 5 do 40 °C, co odpowiadało zmniejszeniu lepkości wody obecnej w porach wykorzystanego materiału o 57% (z 1,519 mPa·s do 0,653 mPa·s) oraz napięcia powierzchniowego o 7% (z 0,0749 $N \cdot m^{-1}$ do 0,0696 $N \cdot m^{-1}$) (Dinçer i Zamfirescu, 2016). Zmiana powyższych wartości została wskazana jako jeden z głównych powodów obserwowanych różnic w kształcie kraterów w zależności od temperatury.

Różnice we właściwościach wody mogły przekładać się m.in. na zmiany w procesie formowania kraterów. De Jong i in. (2017) opisali zjawisko „avalanche", które polega na przemieszczeniu materiału ze ścian krateru do jego wnętrza na końcowym etapie deformacji. W jego wyniku stabilny kształt osiągnięty przez krater ma większą średnicę i mniejszą głębokość niż jego przejściowa, niestabilna forma bezpośrednio po uderzeniu kropli. Porównanie obserwacji przeprowadzonych przez de Jong i in. (2017) z wynikami uzyskanymi w ramach publikacji **P4**, wskazywało na występowanie analogicznych zmian w wymiarach kraterów pod wpływem wariantów termicznych w przypadku próbek pyłu gliniastego przy wilgotności odpowiadającej potencjałowi wody glebowej wynoszącemu 1 kPa (Rys. 8). Kratery formowane w ramach 2 i 3 wariantu termicznego miały większe średnice i mniejsze głębokości niż kratery powstające w wariacie 1. Sugeruje to, że zmiany lepkości wody wynikające z warunków termicznych wpływały na intensywność zjawiska „avalanche" na pyle gliniastym. Można zatem przypuszczać, że drobne cząstki należące do frakcji pyłowej stanowiące większość składu pyłu gliniastego, wykazują większą podatność na przemieszczenie w większych temperaturach. W przeprowadzonych eksperymentów skutkowało to ich powrotem do wnętrza krateru, wzrostem średnicy i zmniejszeniem głębokości. W przypadku gleb o zbliżonym rozkładzie granulometrycznym, zlokalizowanych na stokach obserwowany wzrost mobilności cząstek należących do frakcji pyłu może dodatkowo wpływać na moment inicjacji spływu powierzchniowego.

Przyczyny wpływu temperatury na deformacje powstające na piasku gliniastym (Rys. 9) zdają się być odmienne i prawdopodobnie były związane z dużym udziałem frakcji piasku w tym materiale, wynoszącym 81,6%. Można przypuszczać, że spadek lepkości wody powodowany wzrostem temperatury utrudnił przemieszczenia ziaren piasku, których masa jest znacznie większa niż frakcji pyłowej dominującej w składzie wcześniej opisanego pyłu gliniastego. W tym kontekście warto zauważyć, że mimo braku istotnych statystycznie różnic między wariantami termicznymi kratery o najmniejszej średnicy powstawały na piasku gliniastym właśnie w przypadku najwyższych temperatur.

Próbki pyłu gliniastego przy wilgotności odpowiadającej potencjałowi wody glebowej wynoszącemu 1 kPa, dla których obserwowano najwyraźniejszy wpływ temperatury, charakteryzowały się najwyższą masową zawartością wody (33%) spośród wszystkich uwzględnionych wariantów. Sugeruje to, że efekt temperatury może być bardziej zauważalny w glebach o znacznych zdolnościach retencji wody przy wilgotnościach zbliżonych do nasycenia. Istotny jest również rozkład porów wypełnionych wodą. Kwestia ta była przypuszczalnie przyczyną braku wpływu temperatury w przypadku gliny piaszczystej. Zróżnicowany rozkład granulometryczny tego materiału determinował rozmieszczenie i wielkość porów wypełnionych wodą (pory między dużymi ziarnami mogły być wypełnione mniejszymi cząstkami), wpływając dodatkowo na dużą liczbę kontaktów między ziarnami. Układ taki sprzyjał wzrostowi spójności gleby, a tym samym odporności na odkształcenia, co mogło równoważyć efekt zmian właściwości wody powodowany temperaturą.

Ilość materiału glebowego przemieszczanego podczas zjawiska rozbryzgu zależy od mechanicznego oddziaływania padającej kropli, jak i procesów związanych z rozpadem agregatów glebowych pod wpływem kontaktu z wodą (H. Li i in., 2024). Badania prowadzone w ramach pracy **P4** nie koncentrowały się na stabilności agregatów glebowych, warto jednak wziąć pod uwagę, że mechanizmy związane z ich rozpadem, a także ich zależność od temperatury, wilgotności i rozkładu granulometrycznego gleby mogły mieć wpływ na badane deformacje. Li i in. (2022) wykazali, że wzrost temperatury kropli zwiększał znaczenia rozpadu wodnego agregatów, zapewniając więcej materiału podatnego na przemieszczenie. Rezultaty pracy **P4** nie wykazały jednak, aby rozpatrywany zakres temperatur przekładał się na zwiększenie objętości formowanych kraterów. Dowdeswell-Downey i in. (2023) stwierdzili natomiast, że wzrost temperatury powodował zwiększenie stabilności agregatów w glebie gliniastej, co może częściowo tłumaczyć brak wpływu temperatury na kratery formowane na próbkach gliny piaszczystej.

Zgromadzone wyniki warto odnieść do relacji temperatury i procesów erozyjnych ujętych w szerszej perspektywie. Znaczna część rocznych strat gleby powodowanych erozją wodną wiąże się z występowaniem opadów nawalnych. Ich częstotliwość i intensywność są pośrednio powiązane z wpływem temperatury oraz efektem wywieranym przez globalne ocieplenie na dynamikę cyklu hydrologicznego (Guo i in., 2019; Borrelli i in., 2020; Chapman i in., 2021). Ponadto zmiany zachodzące w klimacie powodują modyfikację rocznego profilu opadów. Gleba pozbawiona pokrywy śnieżnej i roślinnej jest narażona na coraz częstsze opady deszczu zachodzące w okresie zimowym (Li i Fang, 2016; Aygün i in., 2021; Łupikasza i Małarzewski, 2023). W konsekwencji może to prowadzić do zmian w bilansie strat gleby w okresie zimowo-

wiosennym, co powinno znaleźć odzwierciedlenie w modelach erozji i strategiach mających na celu ograniczanie tych zjawisk.

Podsumowując, bezpośredni wpływ uwzględnionego zakresu temperatur na kratery formowane w wyniku rozbryzgu był ograniczony. Większy efekt na uzyskane rezultaty miała natomiast interakcja temperatury z pozostałymi czynnikami, tj. rozkładem granulometrycznym materiałów glebowych i wilgotnością. Zgodnie z powyższym, oddziaływanie temperatury na deformacje powiązane z początkowym etapem erozji wodnej występuje jedynie w części gleb i staje się najbardziej wyraźne przy wilgotnościach zbliżonych do stanu nasycenia.

Publikacja P4 pozwoliła zrealizować **cel C3** i częściowo zweryfikowała **hipotezę H3**.

5. Podsumowanie i wnioski

Zgromadzone wyniki potwierdziły w całości dwie pierwsze hipotezy badawcze (**H1** i **H2**) oraz częściowo hipotezę **H3**. Szczegółowe podsumowanie dotyczące poszczególnych etapów podjętych prac zawarto w załączonych publikacjach. Kluczowe wnioski, oparte na rezultatach badań przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy, można natomiast wyrazić następująco:

1. Obecność wody w porach złoża wpływała na wielkość i kształt powstających kraterów, a także na sposób i dystans przemieszczenia elementów złoża oraz wielkość obszaru, w obrębie którego dochodziło do przemieszczeń.
2. Analiza deformacji złóż przygotowanych z materiału glebowego wykazała wpływ rozkładu granulometrycznego, wilgotności początkowej i energii kropli na morfologię kraterów. Dominujący wpływ na wielkości charakteryzujące kratery miała wilgotność, której wzrost powodował powstawanie kraterów o większych rozmiarach.
3. Wpływ wilgotności i energii padającej kropli na kratery był wyraźniejszy w materiałach glebowych zawierających większą ilość drobnych cząstek należących do frakcji pyłowej. W przypadku materiału charakteryzującego się dominującym udziałem frakcji piaskowej wielkość deformacji zmieniała się w najmniejszym stopniu.
4. Wpływ temperatury na deformację wynikał z jej interakcji z pozostałymi czynnikami, tj. z wilgotnością i rozkładem granulometrycznym. Najbardziej podatna na oddziaływanie temperatury była gleba o dominującym udziale frakcji pyłowej przy wilgotności zbliżonej do nasycenia (odpowiadającej potencjałowi wody glebowej wynoszącemu 1 kPa).
5. Rozszerzenie modeli erozyjnych o bezpośredni wpływ temperatury na początkowe etapy erozji może, w przypadku części gleb, przyczynić się do podniesienia dokładności prowadzonych analiz.

Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do rozwoju modeli wykorzystywanych w prognozowaniu erozji wodnej gleb, a także stanowić punkt wyjścia do dalszych badań nad powiązaniami rozbryzgu z kolejnymi etapami tego procesu. Ponadto zgromadzone dane mogą znaleźć zastosowanie w ocenie podatności gleb na erozję w początkowych fazach opadu deszczu oraz w badaniach dotyczących mechanizmów transportu mikroorganizmów i zanieczyszczeń glebowych.

6. Bibliografia

Ahn S., Doerr S.H., Douglas P., Bryant R., Hamlett C.A.E., McHale G., Newton M.I., Shirtcliffe N.J. (2013). Effects of hydrophobicity on splash erosion of model soil particles by a single water drop impact. Earth Surface Processes And Landforms 38, 1225–1233. https://doi.org/10.1002/esp.3364

Al-Durrah M.M., Bradford J.M. (1982). The Mechanism of Raindrop Splash on Soil Surfaces. Soil Science Society Of America Journal 46, 1086–1090. https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050040x

Anderson R.L., RowntreeK.M., Le Roux J.J. (2021). An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion. Catena 206, 105482. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105482

Angulo-Martínez M., Beguería S., Navas A., Machín J. (2012). Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain. Geomorphology 175–176, 38–44. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.016

Aygün O., Kinnard C., Campeau S. (2021). Responses of soil erosion to warming and wetting in a cold Canadian agricultural catchment. Catena 201, 105184. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105184

Beczek M., Ryżak M., Lamorski K., Sochan A., Mazur R., Bieganowski A. (2018). Application of X-ray computed microtomography to soil craters formed by raindrop splash. Geomorphology 303, 357–361. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.019

Beczek M., Ryżak M., Sochan A., Mazur R., Bieganowski A. (2019). The mass ratio of splashed particles during raindrop splash phenomenon on soil surface. Geoderma 347, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.028

Beczek M., Ryżak M., Sochan A., Mazur R., Polakowski C., Hess D., Bieganowski A. (2020). Methodological aspects of using high-speed cameras to quantify soil splash phenomenon. Geoderma 378, 114592. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114592

Beczek M., Mazur R., Beczek T., Ryżak M., Sochan A., Gibała K., Polakowski C., Bieganowski A. (2024). The effect of slope incline on the characteristics of particles ejected during the soil splash phenomenon, Geoderma 441, 116757. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116757

Bernatek-Jakiel A., Poesen J. (2018). Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. Earth-Science Rev. 185, 1107–1128. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006

Borrelli P., Robinson D.A., Panagos P., Lugato E., Yang J.E., Alewell C., Wuepper D., Montanarella L., Ballabio C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 117, 21994–22001. https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117

Chapman S., Birch C.E., Galdos M.V., Pope E., Davie J., Bradshaw C., Eze S., Marsham J.H., (2021). Assessing the impact of climate change on soil erosion in East Africa using a convection-permitting climate model. Environ. Res. Lett. 16, 084006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac10e1

Cohen, J., 1988. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd Edition. Routledge, New York. https://doi.org/10.4324/9780203771587

de Jong, R., Zhao, S.-C., van der Meer, D. (2017). Crater formation during raindrop impacton sand. Physical Review E95, 042901. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.042901

Delon G., Terwagne D., Dorbolo S., Vandewalle N., Caps H. (2011). Impact of liquiddroplets on granular media. Physical Review E 84, 046320. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.046320

Dinçer I., Zamfirescu C. (2016). Drying phenomena: theory and applications. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

Dowdeswell-Downey E., Grabowski R.C., Rickson R.J. (2023). Do temperature and moisture conditions impact soil microbiology and aggregate stability? J Soils Sediments 23, 3706–3719. https://doi.org/10.1007/s11368-023-03628-2

Ekwue E.I., Seepersad D. (2015). Effect of soil type, peat, and compaction effort on soil strength and splash detachment rates. Biosystems Engineering 136, 140–148. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.06.004

Epema G., Riezebos H.T. (1983). Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. Catena Supplement 4, 1–17.

Erpul G., Gabriels D., Cornelis W.M., Samray H.N., Guzelordu T. (2008). Sand detachment under rains with varying angle of incidence. CATENA 72, 413–422. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.008

Erpul G., Gabriels D., Cornelis W.M., Samray H., Guzelordu T. (2009). Sand transport under increased lateral jetting of raindrops induced by wind. Geomorphology 104, 191–202. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.012

Fernández-Raga M., Palencia C., Keesstra S., Jordán A., Fraile R., Angulo-Martínez M., Cerdà A. (2017). Splash erosion: A review with unanswered questions. Earth-Science Reviews, 171, 463-477. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.009

Fox D.M., Darboux F., Carrega P. (2007). Effects of fire-induced water repellency on soil aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. Hydrological Processes 21, 2377–2384. https://doi.org/10.1002/hyp.6758

Furbish, D.J., Hamner K.K., Schmeeckle M., Borosund M.N., Mudd S.M. (2007). Rain splash of dry sand revealed by high-speed imaging and sticky paper splash targets. Journal Of Geophysical Research: Earth Surface 112, F01001. https://doi.org/10.1029/2006JF000498

Ghadiri H. (2004). Crater formation in soils by raindrop impact. Earth Surface Processes And Landforms 29(1), 77–89. https://doi.org/10.1002/esp.1014

Ghahramani A., Ishikawa Y., Gomi T., Shiraki K., Miyata, S. (2011). Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope: A plot-scale study. Catena 85, 34–47. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.11.005

Gliński J., Horabik J., Lipiec J. (2011). Encyclopedia of Agrophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht

Guo Y., Peng C., Zhu Q., Wang M., Wang H., Peng S., He H. (2019). Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: Model applications, limitations and future challenges. J. Environ. Manage. 250, 109403. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109403

Hamlett C.A.E., Atherton S., Shirtcliffe N.J., McHale, G., Ahn S., Doerr, S.H., Bryant R., Newton M.I. (2013). Transitions of water-drop impact behaviour on hydrophobic and hydrophilic particles. European Journal Of Soil Science 64, 324–333. https://doi.org/10.1111/ejss.12003

Horabik J., Sochan A., Beczek M., Mazur R., Ryżak M., Parafiniuk P., Kobyłka R., Bieganowski A. (2018). Discrete element method simulations and experimental study of interactions in 3D granular bedding during low-velocity impact. Powder Technology 340, 52–67. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.004

IUSS Working Group WRB (2015). World reference base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, update 2015. ed. FAO, Rzym

Józefaciuk A., Józefaciuk C. (1996). Mechanizm i wskazówki metodyczne badania procesów erozji. Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa

Katsuragi H. (2010). Morphology Scaling of Drop Impact onto a Granular Layer. Phys. Rev. Lett. 104, 218001. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.218001

Katsuragi H. (2011). Length and Time Scales of a Liquid Drop Impact and Penetration into a Granular Layer. Journal of Fluid Mechanics 675, 552–573. https://doi.org/10.1017/jfm.2011.31

Kavanagh L., Goldblatt C. (2015). Using raindrops to constrain past atmospheric density. Earth and Planetary Science Letters 413, 51–58. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.12.032

Ketema A., Dwarakish G.S. (2019). Water erosion assessment methods: a review. ISH Journal of Hydraulic Engineering 27(4), 1–8. https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1567398

Keren, G., Lewis, C. (1979). Partial omega squared for ANOVA designs. Educ. Psychol. Meas. 39 (1), 119–128. https://doi.org/10.1177/001316447903900116

Kijowska-Strugała M., Kiszka K. (2018). Environmental factors affecting splash erosion in the mountain area (the Western Polish Carpathians). Landform Analysis 36, 97–111. http://dx.doi.org/10.12657/landfana.036.009

Komunikat Komisji Europejskiej do Rady Europy, Parlamentu Europejskiego, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego oraz Komitetu ds. Regionów. W kierunku strategii tematycznej ochrony gleby, COM (2002) 179, 16.04.2002, Bruksela.

Laburda T., Krása J., Zumr D., Devátý J., Vrána M., Zambon N., Johannsen L.L., Klik A., Strauss P., Dostál T. (2021). SfM-MVS Photogrammetry for Splash Erosion Monitoring under Natural Rainfall. Earth Surf. Process. Landf, 46, 1067–1082. https://doi.org/10.1002/esp.5087

Lardier N., Roudier P., Clothier B., Willmott G.R. (2019). High-speed photography of water drop impacts on sand and soil. Eur. J. Soil Sci. 70, 245–256. https://doi.org/10.1111/ejss.12737

Li Z., Fang H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: a review. Earth Sci. Rev. 163, 94–117. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004

Li H., Gu J., Liu G., Abd Elbasit M.A.M., Hu F., Zou T., Wang L., Zhang Q., Guo Z. (2022). Effects of raindrop temperature on the contributions of slaking and mechanical striking to aggregate disintegration during splash erosion. Soil Tillage Res. 224, 105518. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105518

Li, H., Zhang, Q., Wu, J., Zou, H., Xia, X., Dan, C., Liu, C., Guo, Z., Zhang, Y., Liu, G. (2024). Response of soil aggregate disintegration to antecedent moisture during splash erosion. Catena 234, 107633. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107633

Li X., Fan H., Xie F., Lei B., Ren G. (2024). The role of soil dispersivity and initial moisture content in splash erosion: Findings from consecutive single-drop splash tests. Biosystems Engineering 243, 27–41. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.05.001

Long E.J., Hargrave G.K., Cooper J.R., Kitchener B.G.B., Parsons A.J., Hewett C.J.M, Wainwright J. (2014). Experimental investigation into the impact of a liquid droplet onto a granular bed using three-dimensional, time-resolved, particle tracking. Physical Review E 89, 032201. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.032201

Lv L., Li Y., Zhou C. (2023). Mechanistic analysis of splash erosion on loess by single raindrop impact: Interaction of soil compaction, water content, and raindrop energy. Biosystems Engineering 236, 238–247. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.11.001

Łupikasza E.B., Małarzewski Ł. (2023). Trends in the indices of precipitation phases under current warming in Poland, 1966–2020. Adv. Clim. Chang. Res. 14, 97–115. https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.11.012

Ma B., Yu X., Ma F., Li Z., Wu F. (2014). Effects Of Crop Canopies On Rain Splash Detachment. PLoS ONE 9 (7), e99717. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099717

Marcinkowski P., Szporak-Wasilewska S., Kardel I. (2022). Assessment of soil erosion under long-term projections of climate change in Poland. J. Hydrol. 607, 127468. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127468

Marston J.O., Thoroddsen S.T., Ng W.K., Tan R.B.H. (2010). Experimental Study of Liquid Drop Impact onto a Powder Surface. Powder Technology 203, 223–236. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.05.012

Marzen M., Iserloh, T. (2021). Chapter 15 - Processes of raindrop splash and effects on soil erosion. In Precipitation, Rodrigo-Comino J. Elsevier, 351–371. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822699- 5.00013-6

Mihara Y., Tani N., Yabuki M., Hagihara M. (1950). Studies on the soil-erosive force of precipitation. J. Agric. Meteorol. 6, 9–12. https://doi.org/10.2480/agrmet.6.9

Monaghan J.M., Hutchison, M.L. (2012). Distribution and decline of human pathogenic bacteria in soil after application in irrigation water and the potential for soil-splash-mediated dispersal onto fresh produce. Journal Of Applied Microbiology, 112(5), 1007–1019. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05269.x

Moss A., Green T. (1987). Erosive effects of the large water drops (gravity drops) that fall from plants. Soil Res. 25 (1), 9–20. https://doi.org/10.1071/SR9870009

Nefzaoui E., Skurtys O. (2012). Impact of a Liquid Drop on a Granular Medium: Inertia, Viscosity and Surface Tension Effects on the Drop Deformation. Exp. Therm. Fluid Sci. 41, 43–50. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.05.001

Panagos P., Borrelli P., Poesen, J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. Environmental Science & Policy 54, 438–447. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012

Panagos P., Ballabio C., Himics M., Scarpa S., Matthews F., Bogonos M., Poesen J., Borrelli P. (2021). Projections of soil loss by water erosion in Europe by 2050. Environmental Science & Policy 124, 380–392. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.012

Parlak M., Ozaslan Parlak A. (2010). Measurement of splash erosion in different cover crops. Turkish Journal Of Field Crops, 15(2), 169–173.

Rejman J. (2006). Wpływ erozji wodnej i uprawowej na przekształcenie gleb i stoków lessowych. Acta Agrophysica136 (3), 1-106.

Ryżak M., Bieganowski A., Polakowski C. (2015). Effect of soil moisture content on the splash phenomenon reproducibility. PLoS ONE 10(3), e0119269. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119269

Sochan A., Beczek M., Mazur R., Polakowski C., Ryżak M., Bieganowski A. (2023). Splash erosion and surface deformation following a drop impact on the soil with different hydrophobicity levels and moisture content. PLoS ONE 18(5), e028561. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285611

Takita, H., Sumita, I. (2013). Low-velocity impact cratering experiments in a wet sand target. Phys. Rev. E 88, 022203. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.022203

Terry, J.T. (1998). A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. Aust. J. Soil Res. 36, 525–542. https://doi.org/10.1071/S97078

Vaezi A.R., Ahmadi M., Cerdà A. (2017). Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. Science of The Total Environment 583, 382-392. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.078

Wei Y., Wu X., Cai C. (2015). Splash erosion of clay–sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure. Catena 135, 254–262. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.003

Wyser E., Carrea D., Jaboyedoff M., Pudasaini S.P. (2019). Cratering response during droplet impacts on granular beds. Eur Phys J E Soft Matter 42(8):111. https://doi.org/10.1140/epje/i2019-11877-8

Xiao H., Liu G., Abd Elbasit, M.A.M., Zhang X.C., Liu P.L., Zheng F.L., Zhang J.Q., Hu F.N. (2017). Effects of slaking and mechanical breakdown on disaggregation and splash erosion. Eur. J. Soil Sci. 68, 797–805. https://doi.org/10.1111/ejss.12482

Zambon N., Johannsen L.L., Strauss P., Dostal T., Zumr D., Cochrane T.A., Klik, A. (2021). Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. Catena 196, 104827. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104827

Zhang Q., Gao M., Zhao R., Cheng X. (2015). Scaling of liquid-drop impact craters in wet granular media. Physical Review E 92, 042205. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.042205

Zhang W., Katsuragi H., Yamamoto K. (2024). Drop impact on wet granular beds: effects of water-content on cratering. Soft Matter 20, 6120-6130. https://doi.org/10.1039/D4SM00386A

Zhao S.-C., de Jong R., van der Meer D. (2015). Raindrop impact on sand: a dynamic explanation of crater morphologies. Soft Matter 11, 6562–6568. https://doi.org/10.1039/C5SM00957J

Zhao R., Zhang Q., Tjugito H., Cheng X. (2015). Granular impact cratering by liquid drops: Understanding raindrop imprints through an analogy to asteroid strikes. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 112 (2), 342–347. https://doi.org/10.1073/pnas.1419271112

7. Publikacje

7.1. Tekst publikacji P.1

sensors

MDPI

Review

Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods

Rafał Mazur, Magdalena Ryżak *, Agata Sochan, Michał Beczek, Cezary Polakowski and Andrzej Bieganowski

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, Poland
* Correspondence: m.ryzak@ipan.lublin.pl

Abstract: Water erosion is an unfavorable phenomenon causing soil degradation. One of the factors causing water erosion is heavy or prolonged rainfall, the first effect of which is the deformation of the soil surface and the formation of microcraters. This paper presents an overview of research methods allowing the study of microcraters as well as the process of their formation. A tabular summary of work on the measurements of various quantities describing the craters is presented. The said quantities are divided into three groups: (i) static quantities, (ii) dynamic quantities, and (iii) dimensionless parameters. The most important measurement methods used to study crater properties, such as (i) basic manual measurement methods, (ii) photography, (iii) high-speed imaging, (iv) profilometers, (v) 3D surface modelling, and (vi) computed tomography (CT) and its possibilities and limitations are discussed. The main challenges and prospects of research on soil surface deformation are also presented.

Keywords: soil erosion; splash erosion; crater; soil surface deformation; drop impact

check for updates

Citation: Mazur, R.; Ryżak, M.; Sochan, A.; Beczek, M.; Polakowski, C.; Bieganowski, A. Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods. *Sensors* **2023**, *23*, 121. https://doi.org/10.3390/s23010121

Academic Editor: Somsubhra Chakraborty

Received: 16 November 2022
Revised: 15 December 2022
Accepted: 20 December 2022
Published: 23 December 2022

Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Soil is an important part of the biosphere, enabling plant growth and providing habitats for numerous animals and bacteria [1–3]. Owing to its retention properties, soil plays an important role in the natural water cycle [4–6]. Furthermore, the processes occurring in soil are crucial for the biogeochemical cycle of many other chemical substances and elements [7–10] and for climate regulation [11]. It is a complex three-phase system (water-air-solids) of great importance to the environment, while at the same time it is highly exposed to various types of deterioration, both mechanical and chemical. One of the processes that can cause physical soil degradation is erosion. Various types of erosion can be distinguished, including water erosion and wind erosion [12]. Water, which on the one hand is essential for human life and the functioning of the environment, can also cause a lot of damage [13,14]. Water erosion can cause changes to the soil surface on several different scales: from splashes during the impact of raindrops to surface runoff during snowmelt or intense rainfall. The rate of the erosion phenomenon is determined by many soil properties, such as texture, aggregate size and stability, and soil moisture [15–17].

Water erosion takes many forms, ranging from the impact of a single raindrop through sheet and rill erosion to the formation of deep gullies. The nature of the erosion phenomena affects the way they are studied. Erosion research has been carried out on a large scale, including the study of mass transport and processes in entire catchments [18–22]. On the other hand, with the development of measurement techniques, the scope of possible micro-scale laboratory tests has also increased. This type of research is usually carried out using rainfall simulators or single drops, and it focuses on, among other things, the splash phenomenon, i.e., the first stage of water erosion [23–28].

Terry [29] distinguished five main splash subprocesses: aggregate breakdown, cratering, splashing, splash saltation, and splash creep. One of the splash effects is the deformation of the soil's surface. The craters created by the drops are the result of the

ejection, shifting and compaction of the soil at the impact area. Crater formation absorbs a significant amount of falling droplet energy, accounting for an important part in the energy balance of the splash phenomenon [30,31]. In a broader context, the study of craters may be important in determining soil erodibility, modelling the course of water erosion processes, analyzing the effect of precipitation on surface sealing and changes in soil infiltration parameters, the relationship of craters to the ejection of soil particles, and thus the transport of bacteria and pathogens. However, the small scale of the deformation (the dimensions of the craters are defined in millimeters) and the high dynamics of the phenomenon, complicate the investigation. Overcoming the above difficulties is possible by implementing modern measurement methods and being aware of their advantages and disadvantages.

The aim of this work was to provide an overview of the research methods allowing the study of the microcraters as well as the process of their formation. The advantages and limitations of the described methods are discussed, the prospects for further research and the possible directions for the development of measurement systems are outlined.

2. Review of Work Focusing on Soil Deformation by the Splash Phenomenon

Information from Katsuragi [31], Marzen and Iserloh [32], and Zhao et al. [33], showed how varied the shapes of craters can be after drop impact (Figure 1).

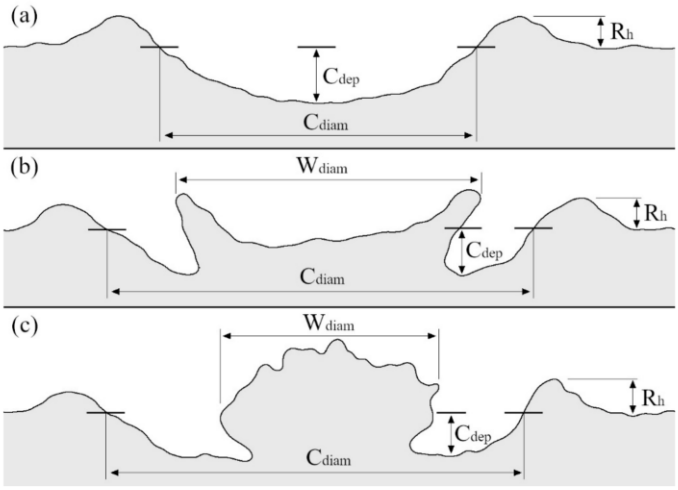


Figure 1. Illustrative diagrams showing examples of crater cross sections ((**a**)–simple crater; (**b**)–crater with spread liquid-grain residues; (**c**)–crater with aggregate liquid-grain residues), with example quantities used to characterise their morphology (C_{dep}–depth of the crater; C_{diam}–diameter of the crater; R_h–height of the rim; W_{diam}–diameter of the moistened volume of the deposit material).

Craters, characterized by the simplest structure, are formed by a small cavity (with a shape simplistically resembling a hemisphere), which may be surrounded by displaced material forming a rim (Figure 1a). Such deformations are most often observed in moist deposits, which relates their morphology to the interaction of the drops with the water in the pores of the sample. The regularity and depth of the cavity, as well as the height of the rim, depend on the parameters of the deposit, e.g., moisture content, compaction, slope, particle size distribution and the energy of the drops.

Craters formed on dry materials take on more complex shapes (Figure 1b,c). The outer element of the deformation is the rim, but the central part of the cavity is occupied by a form composed of bed grains that were wetted and "glued" by water from the drop. Various nomenclatures were used to name this wetted sample material: nucleus

structure granule nucleus [34], liquid-grain residues [35], and granule [36]. Another term that functions in the literature is liquid marble; this phrase refers to a residue of the drop surrounded by hydrophobic deposit grains that impede the mixing of the liquid with the sample material [37,38]. Craters and the moistened material can have different sizes, circularity, and shapes [33,39], which depend on the aforementioned drop energy and deposit parameters.

Difficulties related to the monitoring of crater development arise for several reasons: (i) the sizes of the craters created by the impact of a water droplet is very small (in the order of millimeters); (ii) the process of crater formation is very fast (the time for the deformation to reach its final shape is measured in fractions of a second); and (iii) the displacement process involves two-phase materials (soil particles from the sample and droplets from the broken drop and/or from wet soil).

The abovementioned difficulties can be solved (at least to some extent) by using measuring instruments/systems that are appropriate to the specificity of the measurement. These instruments/systems allow the determination of quantities which can be divided into three groups: (i) static quantities–relating to the dimensions of the crater (such as the depth and diameter of the craters expressed in units of length); (ii) dynamic quantities–making it possible to characterize the process of deformation (such as time taken to achieve the final crater geometry and if its observation is possible, or the stages of reaching this final form expressed in units of time); and (iii) dimensionless parameters–which most often are relative values, i.e., they are the ratio of two or more quantities (for example the ratio of crater depth to its diameter), and then the collected information can be presented more universally, allowing a comparison of results from even strongly differing experiments. Taking into account the topic of this article, which focuses on measurement methods, the issues discussed further in the article relate to the first two groups of quantities.

Regarding the first group, such as the depth and diameter of microcraters (Table 1), it should be emphasized that the results often depend on the methodology adopted for the measurement. For example, crater diameter can be measured based on the rim-to-rim diameter or at the level of the surface before the drop impact–see Figure 1. For both measurements different results will be obtained, therefore, in publications describing the size of the craters, it is necessary to clearly define what the authors mean by a given term. Other static quantities often used to characterize emerging craters are the inclination of the crater walls, the dimensions of the rims around the impact point, the dimensions of the wetted volume of the deposited material, and the crater surface area or crater volume. For a better understanding of the discussed quantities, some of them were shown in Figure 1.

Concerning the group describing the dynamics of crater formation, it includes, among others, the time of achieving the final crater geometry, the time of reaching the crater's maximum diameter, and the dynamic of change in dimensions, such as the depth or slope of the walls at different stages of the deformation process.

Table 1 provides a summary of the works, which take into account the measurement of craters formed after the drop impact. The broader problems of the listed works were mostly related to issues of soil erosion or the mechanics of powdery materials. In the case of microcraters, it was the main research subject or appeared as a complement to the main theme. Some works used soil [40,41], others used materials that could serve as a soil model, i.e., sand [42] or glass beads [39,43]. Differences between experiments also relate to the size of the drops or the height of their fall, resulting in energy changes at the moment of impact [30,44]. The above issues affect the deformation shape and the spectrum of determined quantities.

A factor that could affect the scope of the determined quantities was often the limitations of the measurement equipment, reducing some of the research to qualitative observations. The carrying out of quantitative observations has been facilitated by the spread of advanced measurement techniques (such as high-speed cameras), which have had a significant impact on the increase in the number of publications on crater formation after drop impact (the vast majority of the papers included in Table 1 are from the last 15 years).

Table 1. Overview of the work involving measurement and analysis of craters after drop impact [1].

Authors	Measuring Method	Measuring Scope						Complementary Description of Measuring Scope
		Qualitative Description of Craters	Diameter of Crater	Depth of Crater	Volume of Crater	Dynamics of Crater Formation	Additional Quantities	
Mihara et al., 1950 [45]	Photography, high-speed photography		X	X	X	X		
Al-Durrah and Bradford, 1982 [40]	High-speed recording	X						Qualitative description of the craters (diameter and depth) and analysis of the mechanism of crater formation
Moss and Green, 1987 [46]	Qualitative observations	X						Qualitative description of craters as complementary information to the main measurements
Terry, 1990 [47]	Qualitative observations	X						Qualitative description of craters as complementary information to the main measurements
Terry, 1998 [29]	Qualitative observations, photography	X						Qualitative description of crater morphology, analysis of the mechanism of crater formation, images of cratering
Ghadiri, 2004 [30]	Surface profiler, basic research methods		X	X	X		X	Additional calculation of crater area, visualisation of the craters' diversity of shape
Furbish et al., 2007 [48]	High-speed recording						X	Information about the occurrence of craters during the experiments; description of the mechanism related to the formation of craters
Katsuragi, 2010 [49]	High-speed recording, profilometry, 3D surface modelling		X	X		X	X	Mechanism of crater formation, presentation of the shape of craters on profiles and 3D height maps; supplementary dimensionless parameters describing the crater
Marston et al., 2010 [34]	Photography, high-speed recording		X				X	Mechanics of crater formation, analysis of the material moistened by the drop
Delon et al., 2011 [43]	Photography, high-speed recording		X			X	X	Measurement of the diameter of the material wetted by the drop; changes of the crater size during drop impact
Emady et al., 2011 [50]	Photography, high-speed recording					X	X	Analysis of the mechanism of crater formation and the shape of the material moistened by the drop
Katsuragi, 2011 [39]	High-speed recording, profilometry, 3D surface modelling		X	X		X	X	Information on the morphology of the craters; presentation of the shape (depth, diameters) of craters on profiles and 3D height maps; supplementary dimensionless parameters describing the crater
Nefzaoui and Skurtys, 2012 [44]	Photography, high-speed recording		X			X	X	Mechanics of crater formation and description of the material wetted by the drops (including dimensionless coefficients)
Ahn et al., 2013 [23]	Photography, high-speed recording						X	Area, circularity and roundness of wetted perimeters generated by a drop impact
Emady et al., 2013 [36]	Photography, high-speed recording						X	Analysis of the mechanism of crater formation and the shape of the material wetted by the drop
Long et al., 2014 [42]	High-speed recording, profilometry (photogrammetry), 3D surface modelling		X	X		X	X	Mechanics and crater formation, information on rim height and dimensionless parameters for crater description

Table 1. *Cont.*

Authors	Measuring Method	Measuring Scope						Complementary Description of Measuring Scope
		Qualitative Description of Craters	Diameter of Crater	Depth of Crater	Volume of Crater	Dynamics of Crater Formation	Additional Quantities	
Ryżak et al., 2015 [51]	High-speed recording	X						Notes on crater occurrence as supplementary information to the main experiments
Zhang et al., 2015 [52]	High-speed recording, profilometry, 3D surface modelling		X			X	X	Mechanics of crater formation, dimensionless parameters describing the crater
Zhao et al., 2015 [53]	High-speed recording, profilometry		X	X		X	X	Mechanics of crater formation, size of granular residues, dimensionless parameter (aspect ratio α equal to depth to diameter ratio)
Zhao et al., 2015 [33]	Photography, high-speed recording, profilometry			X		X	X	Mechanics of crater formation
Supakar et al., 2016 [37]	High-speed recording						X	Considering the importance of craters in the context of the formation of liquid marbles
De Jong et al., 2017 [35]	Photography, high-speed recording, profilometry, 3D surface modelling		X	X	X	X	X	Dimensionless parameters related to diameter, depth and volume of transient and final crater, slope of crater wall
Beczek et al., 2018 [41]	Profilometry (microtomography)		X	X	X		X	Crater aspect ratio α equal to depth to diameter ratio, height of the rim
Lardier et al., 2019 [54]	High-speed recording, 3D surface modelling		X			X		Mechanics of crater formation, dimensionless parameters
Matsuda et al., 2019 [55]	High-speed recording		X			X		Dynamics of the crater formation process after the impact of hydrogel spheres
Padmanathan et al., 2019 [38]	Photography, high-speed recording						X	Investigating the importance of craters in the context of the formation of liquid marbles
Wyser et al., 2019 [56]	High-speed recording, profilometry, 3D surface modelling		X	X	X	X	X	Mechanics of crater formation, distributions of deposited volume; presentation of diameters, depths of craters and rims heights on profiles; dimensionless parameters
Matsuda et al., 2020 [57]	Photography, high-speed recording					X	X	Analysis of the origin of material displaced within the crater; dynamics of the crater formation process after the impact of hydrogel spheres
Mazur et al., 2020 [58]	High-speed recording, profilometry		X	X		X	X	Analysis of the origin of material displaced within the crater; shape of the material wetted by the drop; rim size, mechanics of crater formation
De Jong et al., 2021 [59]	High-speed recording, profilometry		X	X	X			Dimensionless parameters related to diameter, depth and volume of crater
Mazur et al., 2022 [60]	3D surface modelling		X	X	X		X	Circularity of crater

[1] For simplicity of overview, all analyses based on profiles regardless of the method of obtaining them (profilometers, photogrammetry, 3d scanners, microtomography) have been called profilometry. The mark "X" indicates the papers in which these quantities were measured.

3. Crater Measurement Methods

Advances in technology have allowed for the use of new devices with increasing accuracy, and extended the measurement possibilities in crater research. The currently used methods were divided into groups and described below. The criterion for division was the type of raw data acquired in the measurement and the scope of information that can be obtained after their analysis (Figure 2).

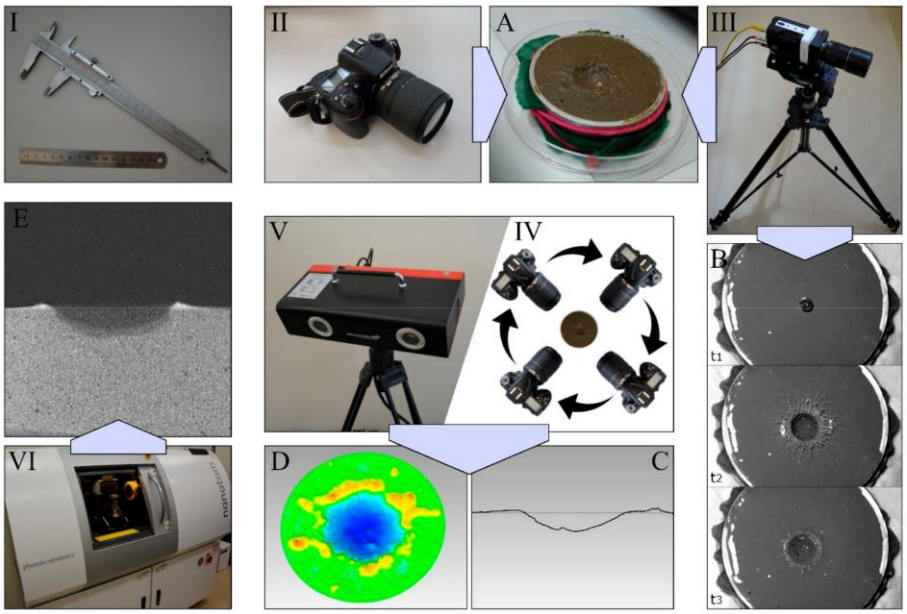


Figure 2. Measurement equipment and methods of analysing data acquired with its help. Measurement equipment: (**I**)–basic manual measurement methods using, among others, a ruler or calliper; (**II**)–camera; (**III**)–high-speed camera; (**IV**)–devices making it possible to record images for photogrammetry (e.g., cameras); (**V**)–surface scanners and profilometers; (**VI**)–computed tomograph. Data analysis methods: (**A**)–photo analysis; (**B**)–record analysis; (**C**)–profile analysis; (**D**)–3D surface model analysis; (**E**)–tomographic image analysis.

3.1. Basic Measurement Methods

Many early studies on craters formed after a drop impact were based on qualitative analysis. Terry [29] reported that on rip-ploughed soil the craters were narrow and deep, while on the other hand, with burned soil, the craters were shallow and wide. Al-Durrah and Bradford [40], found that cavities formed on more compacted samples had a smaller volume than those formed on loose samples, which was due to smaller depths of deformation. In Ryżak et al. [51], information on craters, complementing the main theme of the study, was the confirmation of their occurrence.

The most basic method for a quantitative analysis of craters involves using a ruler or calliper. With their help, the diameter and depth of the deformation can be determined [30]. The small size of the craters formed after a drop impact makes it difficult to consider such measurement as accurate; moreover, the manual nature of the method causes a high risk of damaging the craters.

Another way to measure deformation is to carry out experiments that analyse the phenomenon based on properly prepared beds formed from several layers differing in colour. This approach may provide information about the displacement of the bed elements

located at particular areas and make it possible to estimate the depth of bed penetration by the drop. Atherton et al. [61] prepared beds of glass beads with layers varying in wettability and color and analyzed their interaction with the drops, after impact. In the work of Mazur et al. [58], deposits of glass beads of different colours were used to analyze, among other things, their displacement and the origin of the particles forming the area wetted by the drop. The downside of the method is the difficulty in determining the accuracy of deposit preparation (for example, thickness of layers), limitations due to the size of the beads, as well as the amount of work required to prepare a single sample. Additionally, the use of soil in samples of this type can raise significant problems concerning the technical issues of preparing the deposits, but also the substantive justification for their use.

3.2. Photography

Photo analysis requires capturing a clear image of the surface deformed by the drop impact using any device that allows it, such as a camera. The measurements in question focused on the final shape of the craters (the high-speed imaging technique used to analyse the dynamics of cratering was considered in the next section). To minimize the inaccuracy of the dimensions presented in the images, the device used should be positioned over the crater, as perpendicular as possible. Analysis of the collected data can be carried out in any graphics program with the option to measure the distance between two points in a photograph.

Ellison [62] and Mazurak, and Mosher [63], used photographs of samples to present the results of experiments on sample surface change after precipitation. The work of Katsuragi [49], Geißler et al. [64], and Tarasenko et al. [65] shows that today photographs are also commonly used in a similar way. The images can be the basis for analyzing and describing the morphology of the deformation, helping to determine the regularity of the craters, the shape of the wetted material and the presence of rims. For example, Ahn et al. [23] and Mazur et al. [58] used photographs to analyze the area and shape of sample material wetted by drops. However, in most cases, analysis of photographs has served to determine the diameter of the craters, usually making it possible to determine the approximate width of the rim; such measurements were made, e.g., in the works of Delon et al. [43] and Matsuda et al. [55].

The advantage of photo-based analysis is its simplicity. Images of craters are recorded quickly, and measurements can be made in both laboratory and field conditions. There are a large number of programs that allow work to be conducted on the collected data, and the processing is also not complicated in most cases. To ensure the quality of the data, it is worth using equipment that guarantees the high resolution and acuity of the recorded images. Furthermore, by eliminating the need for equipment to be in contact with the surface of the samples during measurements, analysis based on photos removes the risk of damaging the craters. The method can be useful in studies involving a large number of repetitions or variants, where only the static quantities of the craters are determined.

The major disadvantage of photographic analysis is the limitation of the information obtained. Noticeable is the inability to determine the depth of the investigated deformations. An additional problem can be the time-consuming aspect of the research when the processing of images in a program is done manually. The difficulties in precisely determining the edges of craters and rims can also complicate analysis.

3.3. High-Speed Imaging

A development of the measurement method based on photography is the analysis of videos, which are, in practice, sequences of consecutive images. High-speed cameras are used to record dynamic phenomena, such as the splash phenomenon. The positioning of the camera should make it possible to observe the process of deformation and determine the intended quantities, which usually means placing the equipment as perpendicular as possible to the surface of the sample, over the drop impact point. Parameters determining the quality of recordings include the number of frames captured per second and the associated exposure time (the higher the number of frames and lower the exposure time,

the more precisely moving objects are captured), the depth of field (which determines the size of the area in which the image is sharp) and the resolution of the records.

The popularity of high-speed cameras is partly due to the development of recording and processing techniques, which are now fully computerized. The recordings can be processed in programs dedicated to a specific type of device, or they can be extracted as frames and analysed by commonly available graphics programs. Before the availability of modern technical solutions, an analysis of the collected data was more difficult–in Ghadiri [30], the use of high-speed cameras to describe the impact of a drop on a water target involved projecting a sequence of successive images onto graph paper and outlining the contours of the analyzed shapes (described as corona and crater).

Based on recordings from high-speed cameras, it is possible to obtain data on the dynamics and course of the cratering phenomenon [40,44,53,56]. Some works used single images or short sequences of images taken by the method of high-speed photography as an independent object of analysis or a way of presenting successive stages of the studied process [42,43,45,49,54]. The quantities determined based on the films include, among others, the time of crater formation and the change in its diameter over time, which was considered in the work of Delon et al. [43], Nefzaoui and Skurtys [44], Zhao et al. [53], and Mazur et al. [58]. The course of the wetting of deposit material by drops can also be the subject of research [36,38,50,54]. Camera measurements provide insight into the movement of bed material [42,48] and the formation of the rim [39,44,49].

In addition, high-speed camera recordings make it possible to precisely define the place of drop impact, which can affect the results of experiments that take into account the use of samples with irregular, rough surfaces. The use of additional cameras whose optical axes are at the level of the sample makes it possible to extend the analysis of craters by monitoring the parameters of the falling drop (information regarding the trajectory of particles ejected by splash or the process of corona formation may also be an added value). Referring to Range and Feuillebois [66], for low heights, i.e., several dozen centimetres, the law of conservation of energy can be used to estimate the drop velocity, but for greater heights the drag caused by air becomes so significant that it is worthwhile to use high-speed cameras or other devices to monitor the velocity of the drop immediately before it impacts the sample.

Measurements taken with high-speed cameras also have limitations. The main disadvantage is the inability to determine the depth of the craters. Appropriate equipment for the stand can also be a problem, mainly the total cost of cameras, lighting and software. Note the difficulty of using cameras in the field; these devices are so far mostly laboratory equipment.

3.4. Profilometry

As stated above, the main limitation of the methods based on photos and recordings is the inability to determine crater depth and rim height. On the other hand, the use of a ruler or calliper is associated with low precision and the risk of damaging the deformations, resulting in errors affecting the obtained results. These complications have led to a search for a way to measure crater depth with non-contact methods and high accuracy. An example of a device that makes it possible to obtain the desired results is a laser profilometer, with which one can obtain the deformation profile, i.e., a two-dimensional depiction of the interior of the crater. During the measurement, the laser beam emitted by the device is pointed at the target, and the way it is reflected provides information about the structure of the investigated surface. The results are obtained based on the interference of the measurement beam with a reference beam of known optical path or the reflection angle of the measurement beam (trigonometric triangulation). The advantages of laser profilometers are high accuracy, resolution and the speed of measurement. Profilometers can be used in both laboratory and field research. An analysis of the results is usually performed in programs dedicated to specific devices.

Another method of obtaining profiles was presented in the works of Zhao et al. [33] and De Jong et al. [35]. Information about the shape of the deformation was based on an analysis of recordings made with high-speed cameras on which the distortion of laser

beams projected onto the sample during the impact of the drop was recorded. To obtain the profiles, one can use the measurement methods standardly applied to prepare a 3D model of the deformation, which are discussed later. The issue determining the use of the full capabilities of these techniques or being limited to a single profile interpretation is the scope of information relevant to the user.

Profile analyses were used to determine the depths and diameters of the craters in the works of Ghadiri [30], Long et al. [42], Beczek et al. [41], and Mazur et al. [58]; they also found application in determining the heights of the rims [41] and the slope of the crater walls [35]. In the aforementioned works by Zhao et al. [33] and De Jong et al. [35], through the additional use of high-speed cameras, the dynamics of the craters' shape changes after the drop impact were determined, allowing insight into the process of their formation. De Jong et al. [35] also investigated a process called avalanche (the displacement of deposit grains from the rim and walls of the crater to its center), the occurrence of which can affect the final diameter and depth of craters.

The main disadvantage with measurements based on crater profiles lies in conducting analyses of three-dimensional objects (which craters are) based on their two-dimensional, often single depiction. The use of a single profile does not provide a chance to accurately determine the volume of craters, thereby comparing it with, for example, the volume of a drop. Admittedly, there are known attempts to calculate the volume of craters based on their depth and diameter obtained from profiles using the hemisphere formula [30,41]. However, using the above equation results in an overestimation of the crater's volume [60]. In addition, without a complete picture of deformation, it is difficult to be certain of carrying out the profile through key points, i.e., those where the crater is deepest, the diameter representative, and where the rim reaches its greatest height. Another problem related to the limitations of the method (at least for some of the devices) relates to the difficulty of making a profile of craters of a more complicated shape, in the center of which is an irregular material wetted by the drop, obstructing access of the laser beam to part of the deformation (Figure 1b,c).

3.5. 3D Surface Modelling

Measurement methods that involve making digital 3D models of craters are most often based on structured light scanning, laser scanning, or photogrammetry. The 3D models can also be built from profiles arranged side-by-side made with profilometers [30,39,49].

In the case of photogrammetry (called structure from motion), the preparation of a 3D model assumes using a set of images of the examined object. Photographs should be taken from different angles and merged in software dedicated for this purpose. Photogrammetry measurements do not require any specialized equipment. The images can be taken with a camera, as in the work of Long et al. [42] and Laburda et al. [67], or be frames cut from a video, as in Vinci et al. [68,69]. For measurements outside the laboratory, one should consider using equipment that provides shade from sunlight and uniform artificial lighting. Photographs that form the basis of the method must be of good quality and high resolution (the self-timer function, for example, can be helpful in order to exclude the shaking of the device that occurs during manual shooting, thus ensuring better quality of the recorded data). The processing of images can be facilitated by placing markers on or near the object to help identify characteristic points, a method that is related to the crucial phase of the process referred to as image rectification, which consists of projecting the pictures onto a common plane.

3D scanners are devices designed to create digital models of objects. The resolution of measurements made with 3D scanners can be as high as a few dozen micrometres, and in addition, the measurement time is usually tens of seconds. This type of equipment is based on laser scanning technology or structured light scanning. In the case of laser scanners, the object is illuminated by a red or blue laser beam(s). Structured light scanners (using white, blue or green light) project a pattern onto the examined object, usually consisting of a series of stripes of varying width which change their position during the measurement. Both

types of devices measure based on the way the emitted light is reflected from the tested object, usually by the angle of reflection registered by the detector [70–73]. Scanners can be in stationary form (set on a tripod, working together with a rotary table that changes the position of the sample during the measurement) or hand-held.

The possibilities offered by analysing 3D models are similar, regardless of the method used to obtain them. The preliminary result of the measurement is usually a point cloud (or several point clouds, when capturing the details of the deformation requires repeating the measurement from different sides) representing the geometry of the studied object. The point cloud requires further processing depending on the equipment and software used. Processing may include removing measurement errors, the calibration of several point clouds with each other and their final merging and transformation into a triangular mesh model on which proper crater dimension analyses can be conducted. 3D model analyses may involve the application of reference surfaces that provide a comparison point for deformation [72]. A reference surface can be a 3D scan of the sample surface before the drop impact or an artificially imposed surface on the model to represent the level of the sample before the deformation.

The accuracy of the resulting model depends on the technique and equipment used. Aguilar et al. [74] compared the applicability of photogrammetry and surface scanners in the context of soil relief measurements under field conditions. It was found that both methods allowed the fast generation of digital models providing good accuracy, which was, however, better with the laser scanner, which enabled the imaging of small aggregates and the spaces between them. 3D models provide the opportunity to determine the highest and lowest points within the entire deformation (not just in a single two-dimensional profile)–as was done in the work of Mazur et al. [60]–or to present the surface roughness within the entire crater [35,39,42,49,52]. In addition, it is possible to measure the diameter, the circularity and volume of craters, the quantities that characterize the rim, including the volume of material that forms it, and determine the dimensions of the material wetted by the drop if such element is present and measurable [56,60]. In the case of Laburda et al. [67], the use of photogrammetry made it possible to determine the change in level and roughness of soil samples after natural precipitation. 3D scanners were also used to describe the surface after simulated rainfall [75] and assess soil loss due to erosion [76].

It should be noted that, regardless of the technology, scanners have a problem when it comes to measuring transparent surfaces (a similar problem can occur with moist soil samples) or objects exposed to strong illumination, such as sunlight [70,73]. Although, a change in the wavelength emitted by modern lasers makes illumination a decreasing problem. For some scanners, measurement complications can occur with objects whose colour is close to black [77]. A potential problem may also be the limited measurement volume of the equipment, which in the case of larger samples may require combining several scans. As with profilometers, measurements can be hampered by the more complex shape of the crater (Figure 1b,c), where it can be difficult to acquire data on parts of the deformation area.

3.6. Computed Tomography (CT)

Computed tomography scanning is a measurement technique that involves generating images of the interior of objects with the use of X-ray radiation. Depending on the physical properties of the sample material (especially its density), the radiation emitted by the X-ray source in the device is absorbed to a greater or lesser degree, and the part that passes through the sample is recorded with detectors placed behind the studied object [78–80]. The sample image is obtained by using mathematical algorithms incorporated into the device's software.

Computed tomography allows the determination of static qualities, characterizing craters with the highest accuracy among the methods mentioned herein. The advantage of tomography is that one can obtain cross-sections of samples, making it possible to analyze the arrangement of material inside the sample (not, as in the case of profiles, only on the surface).

Beczek et al. [41] described the use of X-ray microtomography to determine the diameter, the depth of crater and the height of the rim formed on soil samples after the impact of a single drop. The same methodology was applied by Mazur et al. [58] in a study of the splash phenomenon on beds of glass beads. In both cases, measurements were based on cross sections of prepared samples. Yang et al. [81] used synchrotron-based X-ray microcomputed tomography to study porosity changes in a soil sample caused by drop impact.

The design of the measuring equipment is such that computed tomography research can only be performed in the laboratory, and the size of the analyzed samples is limited [82]. The cost of purchasing and exploiting the apparatus can be another obstacle to using the technique. A disadvantage of using the method is the need to transport the samples to the tomograph, which can affect the bed arrangement after the drop impact. A rather long scanning time, in the order of several minutes [41], can also be a complication, affecting the changes in the arrangement of the sample caused by evaporation of water.

4. Potential Use of Crater Measurement Methods in Water Erosion Research

Water erosion occurs in many forms such as splash, sheet, rill and interrill erosion, gully erosion, bank erosion, or snowmelt erosion [83], differing in the mechanism of formation and the scale of the phenomenon. Due to the widely varying size scales, measuring each of the above-mentioned phenomena requires the selection of appropriate measurement tools. Some of the methods described earlier as methods for the measurement of craters find their application in the wider range of water erosion studies.

As Kinnell (2005) [83] points out, erosion is a process that involves the detachment of soil material from the surface of the soil matrix followed by the subsequent transport of the detached material away from the initial location. To quantify this transported soil material, high-speed cameras are successfully used to determine the angle of ejection; ejection velocity; range (displacement); and maximum height to which the soil particles have risen [84] These experiments, due to the requirements for adequate lighting and system calibration, are mainly carried out under laboratory conditions using single drops of simulated precipitation.

While high-speed cameras are successfully used in splash erosion studies and can also be used in the analysis of surface runoff, they have limitations in field experiments resulting from their small field of observation and the need to mount them and ensure appropriate lighting. These limitations do not apply when analyses of photo sequences taken with hand-held or drone-mounted cameras and/or ultralight aircraft are used. Both the height from which the photos are taken and their frequency will depend on what exactly is to be observed. In any case, modern software for image analysis allows for obtaining a large amount of data useful for interpreting the phenomenon of water erosion.

The microtomograph is another method used to measure soil erosion processes. Due to the "layered" imaging and cross-sectioning of the sample, it is possible to analyse the compaction of the sample that occurs as a result of droplet impact. This method can be used to estimate the energy that has been expended in compacting the soil at the point of impact of the drop. The application of this technique has certain limitations, mainly related to the size of the sample itself as well as the need to place it in the apparatus, which makes it impossible to carry out measurements under field conditions.

Another measurement method used for microcraters that can also be used for erosion measurements is the 3D surface scanner. The scanners used today are suitable for measuring both small and large objects. They come in the form of portable devices that can successfully scan the change in soil surface after rainfall under field conditions. With their use, it is possible to describe the course of splash, sheet, rill and interrill erosion, or even gully erosion. Similar applications can also be found with profilometers, which are suitable for characterising surface changes on a larger scale.

The applications of the crater measurement methods reported here represent only part of the methods developed over the years to measure particular forms of erosion. The information

about the possibilities of using the described methods in the context of erosion aspects beyond craters caused by drop impacts was intended to broaden awareness of their versatility.

5. Challenges and Prospects

There are many differences between the measurement methods described in this paper. They refer to the scope and resolution of the acquired data, the character of the measurements, including the time required or method of execution, and finally the cost of the equipment. Considering that equipment choice is one of the first decisions made in planning research, it is important that such decisions be made consciously based on the study objectives, the range of quantities to determine and taking into account all the advantages and disadvantages of the available methods.

One aspect of the development of measurement methods is to solve problems arising from their limitations. In the case of methods for crater measurement, such limitations apply mostly to surface scanners and more specifically to problems caused by inadequate lighting or the type of study surfaces (e.g., measuring craters on moist, dark-colored soils). Considering the growing possibilities of the new devices, it can be concluded that these problems have been recognized and are gradually being solved. For profilometers, the development prospects can be seen in the increasing speed of measurements. Sufficiently advanced devices could provide capabilities analogous to the set-ups used by Zhao et al. [33] or de Jong et al. [35], based on the simultaneous use of a high-speed camera and a laser beam. This makes it possible to simplify similar measurements (even by automating the processing results), and thus could provide easier insight into the change in the linear dimensions of the crater in the process of its formation.

Implementing promising new measurement techniques such as 3D microscopy or high-speed 3D shape measurement, can also be a way to facilitate measurements or expand their scope [73,85,86]. Regarding the first one, 3D microscopes take a sequence of measurements creating–using the device's software–a 3D image of the sample resembling the result of the use of a scanner. High accuracy and a significant level of measurement automatization appear to be important advantages. The limited sample size associated with the design of the microscopes and the need to use the technology only in the laboratory can be a problem. Regarding high-speed 3D shape measurement, it is a technique that requires further development, but in the long term it may enable the creation of 3D models showing the changes in the morphology of craters occurring in the process of their formation.

A different, important issue, is the adaptation of equipment for field studies. The appropriate construction of equipment could facilitate measurements outside the laboratory, contributing to an increase in the number of works, including field studies.

Current research questions about craters are, among others, related to the beginning of their formation process, and include questions about soil compaction at the point of the drop impact, an analysis of the origin of the ejected material, and the initial position of the material forming the rim. Although these topics were addressed in the works of Mazur et al. [58], de Jong et al. [35], and Katsuragi [39], these studies were conducted on model deposits, mainly glass beads, which reflected in the deficit of works dealing with the above issues in the context of soil.

The potential application of the results from crater analyses includes implementing them into erosion models to better predict the magnitude of the phenomenon, especially in the early stages of precipitation. Data about soil susceptibility to deformation due to drop impact may additionally be an appropriate supplement to erodibility information. The methods presented herein may find application in monitoring splash erosion after natural precipitation, facilitating the calculation of crater volumes, or serving as a proxy for the amount of splashed material. Following Laburda et al. [67], surface deformation analysis using photogrammetry can provide an alternative to conventional measurement methods using standard splash cup. On the other hand, the results of the field measurements of craters could help determine how accurately the trends observed under controlled laboratory conditions translate into results obtained on undisturbed soil after natural precipitation.

Author Contributions: Conceptualization, R.M., M.R. and A.S.; methodology, R.M., M.R., A.S., M.B., C.P. and A.B.; investigation R.M.; resources, R.M., M.R., A.S., M.B., C.P. and A.B.; writing—original draft preparation, R.M.; writing—review and editing, R.M., M.R., A.S., M.B., C.P. and A.B.; visualization, R.M.; supervision, M.R. and A.S.; project administration, M.R. and M.R.; funding acquisition, R.M. and A.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was partially supported by: (a) the National Science Centre, Poland within the framework of project no. 2020/37/N/ ST10/03363; (b) Statutory Research of Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Bahram, M.; Hildebrand, F.; Forslund, S.K.; Anderson, J.L.; Soudzilovskaia, N.A.; Bodegom, P.M.; Bengtsson-Palme, J.; Anslan, S.; Coelho, L.P.; Harend, H.; et al. Structure and Function of the Global Topsoil Microbiome. *Nature* **2018**, *560*, 233–237. [CrossRef] [PubMed]
2. Kuźniar, A.; Banach, A.; Stępniewska, Z.; Frąc, M.; Oszust, K.; Gryta, A.; Kłos, M.; Wolińska, A. Community-Level Physiological Profiles of Microorganisms Inhabiting Soil Contaminated with Heavy Metals. *Int. Agrophysics* **2018**, *32*, 101–109. [CrossRef]
3. Walkiewicz, A.; Brzezińska, M.; Bieganowski, A.; Sas-Paszt, L.; Frąc, M. Early Response of Soil Microbial Biomass and Activity to Biofertilizer Application in Degraded Brunic Arenosol and Abruptic Luvisol of Contrasting Textures. *Agronomy* **2020**, *10*, 1347. [CrossRef]
4. Assouline, S.; Rouault, Y. Modeling the Relationships between Particle and Pore Size Distributions in Multicomponent Sphere Packs: Application to the Water Retention Curve. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* **1997**, *127*, 201–210. [CrossRef]
5. Lamorski, K.; Pastuszka, T.; Krzyszczak, J.; Sławiński, C.; Witkowska-Walczak, B. Soil Water Dynamic Modeling Using the Physical and Support Vector Machine Methods. *Vadose Zone J.* **2013**, *12*, 1–12. [CrossRef]
6. Voltz, M.; Dagès, C.; Prévot, L.; Bruand, A. Soils and Regulation of the Hydrological Cycle. In *Soils as a Key Component of the Critical Zone 1*; Berthelin, J., Valentin, C., Munch, J.C., Eds.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2018; pp. 59–80. ISBN 978-1-119-43806-9.
7. Smith, P.; Cotrufo, M.F.; Rumpel, C.; Paustian, K.; Kuikman, P.J.; Elliott, J.A.; McDowell, R.; Griffiths, R.I.; Asakawa, S.; Bustamante, M.; et al. Biogeochemical Cycles and Biodiversity as Key Drivers of Ecosystem Services Provided by Soils. *SOIL* **2015**, *1*, 665–685. [CrossRef]
8. Doetterl, S.; Berhe, A.A.; Nadeu, E.; Wang, Z.; Sommer, M.; Fiener, P. Erosion, Deposition and Soil Carbon: A Review of Process-Level Controls, Experimental Tools and Models to Address C Cycling in Dynamic Landscapes. *Earth-Sci. Rev.* **2016**, *154*, 102–122. [CrossRef]
9. Berhe, A.A.; Barnes, R.T.; Six, J.; Marín-Spiotta, E. Role of Soil Erosion in Biogeochemical Cycling of Essential Elements: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **2018**, *46*, 521–548. [CrossRef]
10. Watros, A.; Lipińska, H.; Lipiński, W.; Tkaczyk, P.; Krzyszczak, J.; Baranowski, P. Mineral Nitrogen Content in Hydrographic Areas of Poland Depending on Land Use. *Int. Agrophys.* **2019**, *33*, 481–491. [CrossRef]
11. Lal, R.; Monger, C.; Nave, L.; Smith, P. The Role of Soil in Regulation of Climate. *Phil. Trans. R. Soc. B* **2021**, *376*, 20210084. [CrossRef]
12. Guerrero, R.; Valenzuela, J.L.; Torres, J.L.; Lozano, J.; Asensio, C. Soil Wind Erosion Characterization in South-Eastern Spain Using Traditional Methods in Front of an Innovative Type of Dust Collector. *Int. Agrophys.* **2020**, *34*, 503–510. [CrossRef] [PubMed]
13. Šarapatka, B.; Bednář, M. Assessment of Potential Soil Degradation on Agricultural Land in the Czech Republic. *J. Environ. Qual.* **2015**, *44*, 154–161. [CrossRef] [PubMed]
14. Mocek-Płóciniak, A.; Skowrońska, M. Water—An Important Element Not Only of the Soil Environment. *Soil Sci. Ann.* **2021**, *72*, 134620. [CrossRef]
15. Choo, H.; Park, K.-H.; Won, J.; Burns, S.E. Resistance of Coarse-Grained Particles against Raindrop Splash and Its Relation with Splash Erosion. *Soil Tillage Res.* **2018**, *184*, 1–10. [CrossRef]
16. Szypłowska, A.; Lewandowski, A.; Jones, S.B.; Sabouroux, P.; Szerement, J.; Kafarski, M.; Wilczek, A.; Skierucha, W. Impact of Soil Salinity, Texture and Measurement Frequency on the Relations between Soil Moisture and 20 MHz–3 GHz Dielectric Permittivity Spectrum for Soils of Medium Texture. *J. Hydrol.* **2019**, *579*, 124155. [CrossRef]
17. Jozefaciuk, G.; Adamczuk, A.; Skic, K.; Boguta, P. New Method for Quantifying Water Stability of Soil Aggregates from Air Bubbling after Immersion. *Measurement* **2020**, *155*, 107569. [CrossRef]
18. Cantón, Y.; Solé-Benet, A.; de Vente, J.; Boix-Fayos, C.; Calvo-Cases, A.; Asensio, C.; Puigdefábregas, J. A Review of Runoff Generation and Soil Erosion across Scales in Semiarid South-Eastern Spain. *J. Arid. Environ.* **2011**, *75*, 1254–1261. [CrossRef]

19. de Vente, J.; Poesen, J.; Verstraeten, G.; Govers, G.; Vanmaercke, M.; Van Rompaey, A.; Arabkhedri, M.; Boix-Fayos, C. Predicting Soil Erosion and Sediment Yield at Regional Scales: Where Do We Stand? *Earth-Sci. Rev.* **2013**, *127*, 16–29. [CrossRef]
20. Prasuhn, V.; Liniger, H.; Gisler, S.; Herweg, K.; Candinas, A.; Clément, J.-P. A High-Resolution Soil Erosion Risk Map of Switzerland as Strategic Policy Support System. *Land Use Policy* **2013**, *32*, 281–291. [CrossRef]
21. Haddad, S.; Bouhadef, M. Contribution to Runoff Erosion of Earthen Channels. *pjss* **2018**, *51*, 313. [CrossRef]
22. Kathwas, A.K.; Patel, N. Geomorphic Control on Soil Erosion—A Case Study in the Subarnarekha Basin, India. *pjss* **2021**, *54*, 1–24. [CrossRef]
23. Ahn, S.; Doerr, S.H.; Douglas, P.; Bryant, R.; Hamlett, C.A.E.; McHale, G.; Newton, M.I.; Shirtcliffe, N.J. Effects of Hydrophobicity on Splash Erosion of Model Soil Particles by a Single Water Drop Impact: Splash erosion of hydrophobic particles by a single water drop impact. *Earth Surf. Process. Landf.* **2013**, *38*, 1225–1233. [CrossRef]
24. Fernández-Raga, M.; Palencia, C.; Keesstra, S.; Jordán, A.; Fraile, R.; Angulo-Martínez, M.; Cerdà, A. Splash Erosion: A Review with Unanswered Questions. *Earth-Sci. Rev.* **2017**, *171*, 463–477. [CrossRef]
25. Hardy, R.A.; James, M.R.; Pates, J.M.; Quinton, J.N. Using Real Time Particle Tracking to Understand Soil Particle Movements during Rainfall Events. *Catena* **2017**, *150*, 32–38. [CrossRef]
26. Sachs, E.; Sarah, P. Effect of Raindrop Temperatures on Soil Runoff and Erosion in Dry and Wet Soils. A Laboratory Experiment: Effect of Rain Temperature on Interrill Flow and Erosion. *Land Degrad. Develop.* **2017**, *28*, 1549–1556. [CrossRef]
27. Zambon, N.; Johannsen, L.L.; Strauss, P.; Dostal, T.; Zumr, D.; Cochrane, T.A.; Klik, A. Splash Erosion Affected by Initial Soil Moisture and Surface Conditions under Simulated Rainfall. *Catena* **2021**, *196*, 104827. [CrossRef]
28. Beczek, M.; Ryżak, M.; Mazur, R.; Sochan, A.; Polakowski, C.; Bieganowski, A. Influence of Slope Incline on the Ejection of Two-Phase Soil Splashed Material. *PLoS ONE* **2022**, *17*, e0262203. [CrossRef]
29. Terry, J.P. A Rainsplash Component Analysis to Define Mechanisms of Soil Detachment and Transportation. *Soil Res.* **1998**, *36*, 525–542. [CrossRef]
30. Ghadiri, H. Crater Formation in Soils by Raindrop Impact. *Earth Surf. Process. Landf.* **2004**, *29*, 77–89. [CrossRef]
31. Katsuragi, H. *Physics of Soft Impact and Cratering*; Lecture Notes in Physics; Springer: Tokyo, Japan, 2016; Volume 910, ISBN 978-4-431-55647-3.
32. Marzen, M.; Iserloh, T. Processes of Raindrop Splash and Effects on Soil Erosion. In *Precipitation*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021; pp. 351–371. ISBN 978-0-12-822699-5.
33. Zhao, S.C.; de Jong, R.; van der Meer, D. Raindrop Impact on Sand: A Dynamic Explanation of Crater Morphologies. *Soft Matter* **2015**, *11*, 6562–6568. [CrossRef]
34. Marston, J.O.; Thoroddsen, S.T.; Ng, W.K.; Tan, R.B.H. Experimental Study of Liquid Drop Impact onto a Powder Surface. *Powder Technol.* **2010**, *203*, 223–236. [CrossRef]
35. de Jong, R.; Zhao, S.C.; van der Meer, D. Crater Formation during Raindrop Impact on Sand. *Phys. Rev. E* **2017**, *95*, 042901. [CrossRef] [PubMed]
36. Emady, H.N.; Kayrak-Talay, D.; Litster, J.D. A Regime Map for Granule Formation by Drop Impact on Powder Beds. *AIChE J* **2013**, *59*, 96–107. [CrossRef]
37. Supakar, T.; Moradiafrapoli, M.; Christopher, G.F.; Marston, J.O. Spreading, Encapsulation and Transition to Arrested Shapes during Drop Impact onto Hydrophobic Powders. *J. Colloid Interface Sci.* **2016**, *468*, 10–20. [CrossRef] [PubMed]
38. Padmanathan, A.M.D.; Ravi, A.S.; Choudhary, H.; Varanakkottu, S.N.; Dalvi, S.V. Predictive Framework for the Spreading of Liquid Drops and the Formation of Liquid Marbles on Hydrophobic Particle Bed. *Langmuir* **2019**, *35*, 6657–6668. [CrossRef]
39. Katsuragi, H. Length and Time Scales of a Liquid Drop Impact and Penetration into a Granular Layer. *J. Fluid Mech.* **2011**, *675*, 552–573. [CrossRef]
40. Al-Durrah, M.M.; Bradford, J.M. The Mechanism of Raindrop Splash on Soil Surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1982**, *46*, 1086–1090. [CrossRef]
41. Beczek, M.; Ryżak, M.; Lamorski, K.; Sochan, A.; Mazur, R.; Bieganowski, A. Application of X-Ray Computed Microtomography to Soil Craters Formed by Raindrop Splash. *Geomorphology* **2018**, *303*, 357–361. [CrossRef]
42. Long, E.J.; Hargrave, G.K.; Cooper, J.R.; Kitchener, B.G.B.; Parsons, A.J.; Hewett, C.J.M.; Wainwright, J. Experimental Investigation into the Impact of a Liquid Droplet onto a Granular Bed Using Three-Dimensional, Time-Resolved, Particle Tracking. *Phys. Rev. E* **2014**, *89*, 032201. [CrossRef]
43. Delon, G.; Terwagne, D.; Dorbolo, S.; Vandewalle, N.; Caps, H. Impact of Liquid Droplets on Granular Media. *Phys. Rev. E* **2011**, *84*, 046320. [CrossRef]
44. Nefzaoui, E.; Skurtys, O. Impact of a Liquid Drop on a Granular Medium: Inertia, Viscosity and Surface Tension Effects on the Drop Deformation. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2012**, *41*, 43–50. [CrossRef]
45. Mihara, Y.; Tani, N.; Yabuki, M.; Hagihara, M. Studies on the Soil-Erosive Force of Precipitation. *J. Agric. Meteorol.* **1950**, *6*, 9–12. [CrossRef]
46. Moss, A.; Green, T. Erosive Effects of the Large Water Drops (Gravity Drops) That Fall from Plants. *Soil Res.* **1987**, *25*, 9–20. [CrossRef]
47. Terry, J.P. Splash Detachment Tests on Hydrophobic versus Wettable Soils. *Swans. Geogr.* **1990**, *27*, 71–83.
48. Furbish, D.J.; Hamner, K.K.; Schmeeckle, M.; Borosund, M.N.; Mudd, S.M. Rain Splash of Dry Sand Revealed by High-Speed Imaging and Sticky Paper Splash Targets. *J. Geophys. Res.* **2007**, *112*, F01001. [CrossRef]

49. Katsuragi, H. Morphology Scaling of Drop Impact onto a Granular Layer. *Phys. Rev. Lett.* **2010**, *104*, 218001. [CrossRef]
50. Emady, H.N.; Kayrak-Talay, D.; Schwerin, W.C.; Litster, J.D. Granule Formation Mechanisms and Morphology from Single Drop Impact on Powder Beds. *Powder Technol.* **2011**, *212*, 69–79. [CrossRef]
51. Ryżak, M.; Bieganowski, A.; Polakowski, C. Effect of Soil Moisture Content on the Splash Phenomenon Reproducibility. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0119269. [CrossRef]
52. Zhang, Q.; Gao, M.; Zhao, R.; Cheng, X. Scaling of Liquid-Drop Impact Craters in Wet Granular Media. *Phys. Rev. E* **2015**, *92*, 042205. [CrossRef]
53. Zhao, R.; Zhang, Q.; Tjugito, H.; Cheng, X. Granular Impact Cratering by Liquid Drops: Understanding Raindrop Imprints through an Analogy to Asteroid Strikes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2015**, *112*, 342–347. [CrossRef]
54. Lardier, N.; Roudier, P.; Clothier, B.; Willmott, G.R. High-speed Photography of Water Drop Impacts on Sand and Soil. *Eur. J. Soil Sci.* **2019**, *70*, 245–256. [CrossRef]
55. Matsuda, Y.; Fukui, S.; Kamiya, R.; Yamaguchi, H.; Niimi, T. Impact Cratering on a Granular Bed by Hydrogel Spheres Having Intermediate Property between Solid and Liquid. *Phys. Rev. E* **2019**, *99*, 032906. [CrossRef] [PubMed]
56. Wyser, E.; Carrea, D.; Jaboyedoff, M.; Pudasaini, S.P. Cratering Response during Droplet Impacts on Granular Beds. *Eur. Phys. J. E* **2019**, *42*, 1–11. [CrossRef]
57. Matsuda, Y.; Kamiya, R.; Yamaguchi, H.; Uchiyama, T. Dynamics of Impact Cratering on Granular Bed by Hydrogel Sphere. *Phys. Fluids* **2020**, *32*, 067112. [CrossRef]
58. Mazur, R.; Ryżak, M.; Sochan, A.; Marciszuk, K.; Beczek, M.; Lamorski, K.; Bieganowski, A. Surface Deformation and Displacement of Bed Elements during Splash—Model Tests. *Catena* **2020**, *185*, 104277. [CrossRef]
59. de Jong, R.; Zhao, S.C.; Garcia-Gonzalez, D.; Verduijn, G.; van der Meer, D. Impact Cratering in Sand: Comparing Solid and Liquid Intruders. *Soft Matter* **2021**, *17*, 120–125. [CrossRef] [PubMed]
60. Mazur, R.; Ryżak, M.; Sochan, A.; Beczek, M.; Polakowski, C.; Przysucha, B.; Bieganowski, A. Soil Deformation after One Water-Drop Impact—The Effect of Texture and Soil Moisture Content. *Geoderma* **2022**, *417*, 115838. [CrossRef]
61. Atherton, S.; Polak, D.; Hamlett, C.A.E.; Shirtcliffe, N.J.; McHale, G.; Ahn, S.; Doerr, S.H.; Bryant, R.; Newton, M.I. Drop Impact Behaviour on Alternately Hydrophobic and Hydrophilic Layered Bead Packs. *Chem. Eng. Res. Des.* **2016**, *110*, 200–208. [CrossRef]
62. Ellison, W.D. Some Effects of Raindrops and Surface-Flow on Soil Erosion and Infiltration. *Trans. AGU* **1945**, *26*, 415–429. [CrossRef]
63. Mazurak, A.P.; Mosher, P.N. Detachment of Soil Particles in Simulated Rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1968**, *32*, 716–719. [CrossRef]
64. Geißler, C.; Kühn, P.; Böhnke, M.; Bruelheide, H.; Shi, X.; Scholten, T. Splash Erosion Potential under Tree Canopies in Subtropical SE China. *Catena* **2012**, *91*, 85–93. [CrossRef]
65. Tarasenko, I.; Bielders, C.L.; Guevara, A.; Delmelle, P. Surface Crusting of Volcanic Ash Deposits under Simulated Rainfall. *Bull. Volcanol* **2019**, *81*, 1–16. [CrossRef]
66. Range, K.; Feuillebois, F. Influence of Surface Roughness on Liquid Drop Impact. *J. Colloid Interface Sci.* **1998**, *203*, 16–30. [CrossRef]
67. Laburda, T.; Krása, J.; Zumr, D.; Devátý, J.; Vrána, M.; Zambon, N.; Johannsen, L.L.; Klik, A.; Strauss, P.; Dostál, T. SfM-MVS Photogrammetry for Splash Erosion Monitoring under Natural Rainfall. *Earth Surf. Process. Landf.* **2021**, *46*, 1067–1082. [CrossRef]
68. Vinci, A.; Todisco, F.; Brigante, R.; Mannocchi, F.; Radicioni, F. A Smartphone Camera for the Structure from Motion Reconstruction for Measuring Soil Surface Variations and Soil Loss Due to Erosion. *Hydrol. Res.* **2017**, *48*, 673–685. [CrossRef]
69. Vinci, A.; Todisco, F.; Vergni, L.; Torri, D. A Comparative Evaluation of Random Roughness Indices by Rainfall Simulator and Photogrammetry. *Catena* **2020**, *188*, 104468. [CrossRef]
70. Moons, T.; Van Gool, L.; Vergauwen, M. 3D Reconstruction from Multiple Images Part 1: Principles. *FNT Comput. Graph. Vis.* **2008**, *4*, 287–404. [CrossRef]
71. Geng, J. Structured-Light 3D Surface Imaging: A Tutorial. *Adv. Opt. Photon.* **2011**, *3*, 128–160. [CrossRef]
72. Pears, N.; Liu, Y.; Bunting, P. *3D Imaging, Analysis and Applications*; Springer: London, UK, 2012; ISBN 978-1-4471-4062-7.
73. Harding, K. *Handbook of Optical Dimensional Metrology*; Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2013; ISBN 978-1-4398-5482-2.
74. Aguilar, M.A.; Aguilar, F.J.; Negreiros, J. Off-the-Shelf Laser Scanning and Close-Range Digital Photogrammetry for Measuring Agricultural Soils Microrelief. *Biosyst. Eng.* **2009**, *103*, 504–517. [CrossRef]
75. Zumr, D.; Mützenberg, D.V.; Neumann, M.; Jeřábek, J.; Laburda, T.; Kavka, P.; Johannsen, L.L.; Zambon, N.; Klik, A.; Strauss, P.; et al. Experimental Setup for Splash Erosion Monitoring—Study of Silty Loam Splash Characteristics. *Sustainability* **2019**, *12*, 157. [CrossRef]
76. Wang, P.; Jin, X.; Li, S. Application of Handheld 3D Scanner in Quantitative Study of Slope Soil Erosion. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2018**, *170*, 022178. [CrossRef]
77. Zaimovic-Uzunovic, N.; Lemes, S. Influences Of Surface Parameters On Laser 3d Scanning. In Proceedings of the IMEKO International Symposium on Measurement and Quality Control, Osaka, Japan, 5–9 September 2010; pp. D024–D026.
78. Ketcham, R.A.; Carlson, W.D. Acquisition, Optimization and Interpretation of X-Ray Computed Tomographic Imagery: Applications to the Geosciences. *Comput. Geosci.* **2001**, *27*, 381–400. [CrossRef]
79. Mees, F.; Swennen, R.; Geet, M.V.; Jacobs, P. Applications of X-Ray Computed Tomography in the Geosciences. *SP* **2003**, *215*, 1–6. [CrossRef]
80. Taina, I.A.; Heck, R.J.; Elliot, T.R. Application of X-Ray Computed Tomography to Soil Science: A Literature Review. *Can. J. Soil. Sci.* **2008**, *88*, 1–19. [CrossRef]

81. Yang, M.; Fu, Y.; Li, G.; Ren, Y.; Li, Z.; Ma, G. Microcharacteristics of Soil Pores after Raindrop Action. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2020**, *84*, 1693–1704. [CrossRef]
82. Kaestner, A.; Lehmann, E.; Stampanoni, M. Imaging and Image Processing in Porous Media Research. *Adv. Water Resour.* **2008**, *31*, 1174–1187. [CrossRef]
83. Kinnell, P.I.A. Raindrop impact—Induced erosion processes and prediction—A review. *Hydrol. Process.* **2005**, *19*, 2815–2844. [CrossRef]
84. Beczek, M.; Ryżak, M.; Sochan, A.; Mazur, R.; Polakowski, C.; Hess, D.; Bieganowski, A. Methodological apects of using high-speed cameras to quantify soil splash phenomenon. *Geoderma* **2020**, *378*, 114592. [CrossRef]
85. Zhang, S. High-Speed 3D Shape Measurement with Structured Light Methods: A Review. *Opt. Lasers Eng.* **2018**, *106*, 119–131. [CrossRef]
86. Huang, X.; Zhang, Y.; Xiong, Z. High-Speed Structured Light Based 3D Scanning Using an Event Camera. *Opt. Express* **2021**, *29*, 35864–35876. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

7.2. Tekst publikacji P.2

Catena 185 (2020) 104277

Contents lists available at ScienceDirect

Catena

journal homepage: www.elsevier.com/locate/catena

Surface deformation and displacement of bed elements during splash – Model tests

Rafał Mazur*, Magdalena Ryżak, Agata Sochan, Karolina Marciszuk, Michał Beczek, Krzysztof Lamorski, Andrzej Bieganowski

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:
Soil erosion
Splash
Raindrop impact
Particle tracing
Crater

ABSTRACT

The phenomenon of splash is connected with soil erosion, occurs commonly, and has a complex nature. The study presents the results of research in which glass beads (dry and saturated beds) with a diameter size range of 0.425–0.6 mm were used as a soil model. Patterns and layers of glass particles (beads), distinguished by their colour were placed on the surface of the samples. Displacements of the marked beads were used for the analysis of movement caused by splash. The measurements were supplemented with recordings made with high-speed cameras and photographs from an X-ray microtomograph. Three types of displacement for dry bed elements were distinguished: (i) displacement inside the surface area wetted with a falling drop of water, (ii) ejection and (iii) placement on the crater rim, as well as two types of displacement for elements from saturated beds: (i) displacement inside the deformation and (ii) ejection. The distance travelled by the beads was related to the specificity their displacement, which was associated with the initial location of the beads on the sample surface. In the case of dry beds, glass beads with an initial location equal to 14 mm or more from the centre of the drop impact were not moved. In the case of saturated beds, this distance was about 10 mm. More than 95% of the beads ejected from dry beds came from the surface layer of the sample. All the measurement methods applied show that the deformations of the dry bed surfaces were greater and more diversified than those of the saturated beds. The results presented in the study are important for understanding the mechanisms of transport of bacteria, fungi, and pollutants transferred with ejected soil particles during splash. The results can also be used for a physical description of the phenomenon for the computer modelling of both splash and water erosion.

1. Introduction

The impact of water drops on the soil surface is the first stage of water erosion, known as splash (Fernández-Raga et al., 2017). Splash is a complex and dynamic phenomenon consisting of a number of processes, such as displacement of soil particles (Terry, 1998), formation of a crater (De Jong et al., 2017), and propagation of a mechanical wave (Korbiel et al., 2015). Given the prevalence of this process and the link with other soil erosion processes, splash has become the subject of many scientific studies (Ahn et al., 2013; Ekwue and Seepersad, 2015; Erpul et al., 2008; Fox et al., 2007; Furbish et al., 2007; Goebes et al., 2014; Kijowska-Strugała and Kiszka, 2019; Long et al., 2014; Marzen et al., 2015; Sadeghi et al., 2017; Szewrański, 2009; Wei et al., 2015; Zhao et al., 2015, Żmuda et al., 2009).

Splash studies have been carried out using various measurement techniques, depending on the aim and place of implementation (field or laboratory tests). The weight of the detached material was measured using splash cups or a special splash tray (Geißler et al., 2012; Ghahramani et al., 2011; Ma et al., 2014; Nanko et al., 2008; Quansah, 1981). Adhesive paper sheets were used to determine the distance and number of ejected particles (Ahn et al., 2013; Furbish et al., 2007). The shape of the deformation formed after the impact of the drops was studied by laser scanning of the surface and by microtomography (Beczek et al., 2018; Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2015). The movement of particles during precipitation was observed with the use of fluorescent substances (Hardy et al., 2017). The equipment commonly used in recent years includes high-speed cameras, which allow analysis of the dynamics of the phenomenon and determination of the trajectories and other parameters of the ejected particles (Ghadiri, 2004; Long et al., 2014; Zhao et al., 2015).

Due to the complex nature of the phenomenon, some studies were carried out on model systems such as glass beads (Ahn et al., 2013; Atherton et al., 2016; De Jong et al., 2017; Delon et al., 2011; Zhang et al., 2015) or sand (Erpul et al., 2008; Furbish et al., 2007; Long et al.,

* Corresponding author.
E-mail address: r.mazur@ipan.lublin.pl (R. Mazur).

https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104277
Received 15 November 2018; Received in revised form 30 August 2019; Accepted 17 September 2019
Available online 18 November 2019
0341-8162/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

2014). There are also studies using soil material (Beczek et al., 2017; Bu et al., 2014; Fu et al., 2017; Moghadam et al., 2015; Vaezi et al., 2017).

One of determinants of the process of splash is precipitation. Various factors were taken into account in the work on splash erosion efficiency, including rainfall intensity (Quansah, 1981; Sadeghi et al., 2017), the size and energy of falling drops (Ghadiri, 2004; Goebes et al., 2014; Pietravalle et al., 2001), and the impact of wind (Erpul et al., 2008) or slope gradients (Brodowski, 2013; Erpul et al., 2008; Quansah, 1981). Since the splash phenomenon is influenced by soil properties, the studies took into account granulometric distribution (Furbish et al., 2007; Hamlett et al., 2013; Katsuragi, 2010; Wei et al., 2015), surface sealing (Bu et al., 2014), sample density (Ekwue and Seepersad, 2015), initial moisture content (Ryżak et al., 2015; Zhang et al., 2015), roughness (Marzen et al., 2016), and surface water repellence (Ahn et al., 2013; Fox et al., 2007; Hamlett et al., 2013; Jordán et al., 2016; Lowe et al., 2017).

The soil surface becomes deformed by the impact of drops. The resulting deformations were described by determining their diameter or volume (Delon et al., 2011; Ghadiri, 2004; Nefzaoui and Skurtys, 2012) and by indicating the shape and depth of the crater (Beczek et al., 2018). Although the shapes of craters after the splash were measured, there was often no possibility of determining where the displaced particles came from, (i.e., the distance from the point of impact of the water droplets and the depth), especially for those that travelled the shortest distances. The aim of this work was to analyse the various ways that elements of the beds moved, taking into account their initial locations, and to analyse the deformation of the sample surfaces after the impact of drops.

2. Materials and methods

Beads with diameters ranging from 0.425 mm to 0.6 mm, made of sodium-calcium quartz glass, were used in the study. The size of the beads made it possible to use them as a soil-modelling material, simultaneously allowing manual laying of patterns (using different bead colours) on the surface of the samples and preparation of a second type of bed in which whole layers were composed of beads of a selected colour. Sigma transparent beads (USA) and coloured Efco beads (Germany) were used in the study. The density of the glass from which the two types of beads were made was practically the same. Measurements taken with a pictometer have shown that the average density in each case was 2.49 $g \cdot cm^{-3}$. The beads were poured into aluminium rings with an inner diameter of 36 mm and a height of 10 mm. The rings filled with beads were covered with a sheet of self-adhesive paper (a 35-mm diameter hole was cut in the middle of each sheet), so that the surface of the paper was on the level of the surface of the beads. An appropriate size of the hole was determined so as not to disturb the course of the phenomenon. Self-adhesive paper was used to stop the beads ejected during the splash at their landing sites. The droplet-forming system consisted of a peristaltic pump and a capillary ensuring a constant droplet diameter of 4.2 mm (standard deviation (SD) = 0.02). All measurements were taken with regard to the splash caused by a single drop of distilled water falling freely from a height of 1.5 m.

Prior to the analysis of deformations and displacements, the splash phenomenon in the dry and saturated beds was recorded with three synchronized Phantom Miro 310 cameras (Vision Research, USA). Two cameras were at the sample level and one recorded the phenomenon from above (Fig. 1a). The angle between the cameras at the sample level was 90°. The recording rate was 3260 frames per second.

In the first stage of the work, the relation between the method and distance of bead displacements and their initial positions (in relation to the place of impact of the drops) was investigated. For this purpose, coloured beads, which created regular concentric patterns on the outline of a circle, a cross, or a star, were placed on a bed of transparent beads (Fig. 1b). The aim of the second stage of the research was to answer questions regarding the area of interaction of water droplets with the bed and the depth (layer) from which the beads were ejected. For this purpose, two independent measuring techniques were used, i.e., monitoring of the displacements of the beads from the coloured layers (Fig. 1c) based on an analysis of photos and X-ray microtomography.

The following terms are used in this paper:

- Bed deformation area, understood as the area from which the beads are displaced.
- Wetted area, referring to the area over which the beads have been wetted and bound by water from a drop impact (Fig. 4a).
- Moat, i.e., the area which includes the depression between the wetted surface and the rim (Fig. 4a).
- Exposed surface, i.e., the area from which most of the beads from the surface layer of the bed have been removed. This area includes the moat and the adjacent part of the rim (Fig. 2b).

A change in the bead location of at least 0.3 mm (approximately the radius of the beads) was considered the displacement. Three types of displacement were determined for the dry beds: displacement inside the wetted surface, ejection (where the bead was moved outside the deformation area), and placement on the rim (where the bead was not stopped inside the wetted surface, but the displacement was too small to regard it as leaving the deformation area). In the case of the saturated deposits, analogous division into two groups was adopted: displacement inside the deformation and ejection.

2.1. Analysis of the displacements of individual beads

Precise placement of the beads in the pattern on the surface was not necessary, because the displacement, i.e., the end position in relation to the initial position, was analysed. The pattern beads were gently pressed into the surface of the bed in the top layer. The number of coloured beads used as markers was so limited that it was possible to determine their final location after the splash (Fig. 2a).

Measurements were carried out on dry and fully saturated deposits. The arrangement of the beads before and after the impact of the drops was photographed using a Nikon D7100 camera. The displacement of the beads was determined based on the image analysis performed in GIMP. The images of the beds before and after the impact of the drops were superimposed on each other. Displacements were measured with an accuracy of 0.1 mm. In the case of the dry beds, 23 splash repetitions were carried out, and the displacement of 370 marked (coloured) beads was analysed. The measurements carried out in the saturated beds were based on the analysis of the displacement of 237 beads over 10 repetitions of the splash. In the dry beds, the marked beads were located at a distance of 1–17 mm, measured from the centre of the impact of the water drops. In turn, the distances in the saturated beds were from 1 mm to 12 mm. This arrangement was the result of preliminary measurements, which were used to determine the range of motion caused by the impact of the drops.

2.2. Analysis of the displacements of beads arranged in layers

In order to answer the question about the area deformed by the impact of the water drop and the ways in which beads from different depths move, research was carried out on dry beds in which the three outer layers were composed of beads of different colours (each layer in a different colour). These measurements were carried out in three repetitions.

The use of layers of coloured beads allowed the determination of:

- the area of the wetted surface and its composition,
- the area of the exposed surface and its composition,
- the bed layer from which beads were initially ejected onto a sheet of

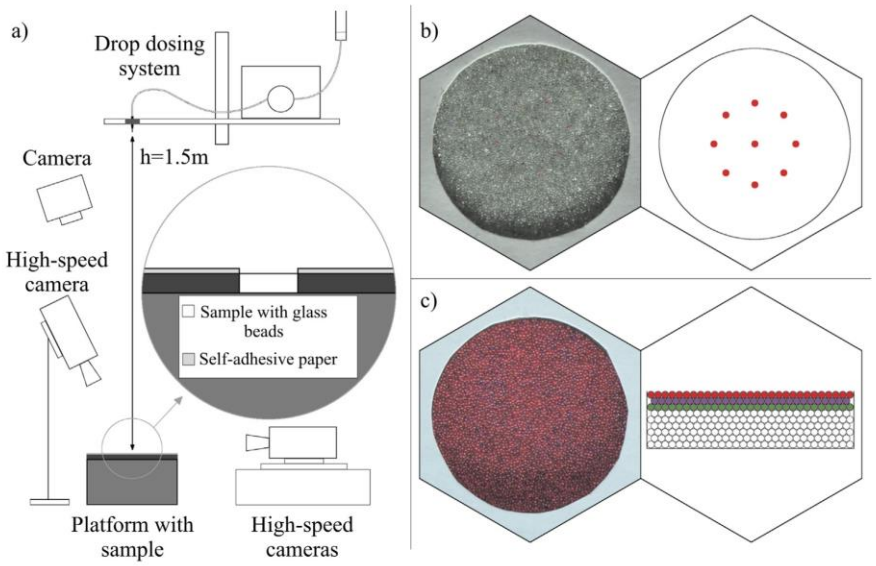


Fig. 1. Experimental set-up: (a) diagram of the measuring stand and (b) example of bed containing the pattern (photo plus scheme), (c) example of bed with layers of beads of the same colour (photo plus scheme). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

self-adhesive paper.

2.3. Analysis of deformation using microtomography

The examination of splashes on beds containing the layers of coloured beads allowed a preliminary analysis of the deformation. X-ray computational microtomography (CT) was used to obtain a more accurate measurement of the sample surfaces. The CT analyses were carried out using a GE Nanotom 180S device (GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Niels-Bohr-Str. 7, 31315 Wunstorf, Germany) at the IA PAS microtomography facility. The voxel size for these scans was 20 μm. The parameters of the X-ray source included a tungsten X-ray source exit window, cathode current 250 μA, and voltage 110 kV. A Cu 0.2-mm exit filter was used for X-ray filtering. For each scan, 1200 2D images of the rotated specimen were registered. Based on the registered images, a 3D reconstruction was made (phoenix datos|x v.2 software). To reduce noise, the 3D volume was filtered twice using a median filter with a kernel diameter equal to three pixels. The filtered reconstructed volume was then used for analyses of the crater geometry.

At this stage of the research, beds of colourless beads were used. The measurements were carried out with three repetitions for the dry and saturated beds. For both sample variants, the deformation was analysed based on cross sections (Fig. 11) taken through the place of impact of the drops (three per sample; cross sections were selected so that the angles between them were 60 degrees) and projections seen from above. The parameters determined from the microtomographs are presented schematically in Fig. 3a for the dry bed and Fig. 3b for the saturated bed.

3. Results

The analysis of the obtained results showed that the splash phenomenon proceeded differently in the dry bed and the saturated bed. This is because the deposit underneath the falling droplet was wetted in the dry beds. In this case, three types of displacement were distinguished: (i) a slight displacement of the beads inside the wetted surface, (ii) ejection, causing the beads to be moved outside the deformation area, and (iii) placement on the rim. Since there was no wetting in the saturated bed (the bed was fully saturated before the impact of the drops), the division in this case included two groups of displacements: (i) displacement inside the deformation (in the crater or on the rim) and (ii) ejection.

3.1. Dynamics of splash phenomenon on dry and saturated beds

The analysis carried out by recording the phenomenon with high-speed cameras allowed determination of the dynamics and the course of the observed phenomenon. In the case of an impact of a water drop on the surface of a dry bed, part of its volume was splashed, i.e., it was ejected in the form of small droplets. However, most of the water penetrated the bed, filling the pores between the beads. In the early phase of deformation, the wetted area expanded for about 7 ms until the maximum surface area was reached, and then began to shrink as a result of surface tension. The time interval between the maximum size of the wetted area and the end of the shrinkage of this area was about 25 ms. Between the edge of the wetted area and the rim, a recess was formed, which was called the moat – the darker ring in Fig. 4a. This cavity was part of the crater, inside which a wetted area was formed. The whole was enclosed by a rim formed on the edges of the area affected by the impact of the drops.

In the case of impact of the drops on the surface of the saturated bed, the course of the phenomenon seems to be less complex. Due to the presence of water in the sample, there was no wetting of the surface, only formation of a crater. As in the case of the dry samples, a rim was formed from the displaced beads around the point of impact of the drop (Fig. 4b). The beads in the saturated beds were more frequently ejected in the form of aggregates (this phenomenon was sporadic in the case of the dry beds). The beads from the saturated beds, which travelled the greatest distance, were ejected from an area closer to the point of impact of the drops, and the distance travelled by them was greater than

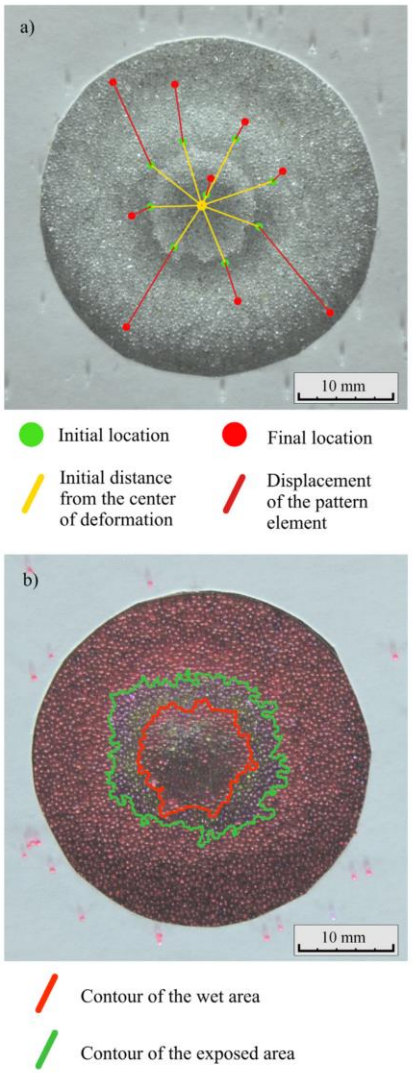


Fig. 2. Analysis of samples in the GIMP program: (a) bed containing the pattern, (b) bed with layers of beads of the same colour. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

in the case of the dry beds. It was also observed that, in the saturated beds, fewer beads were ejected at short distances, i.e., located near the edges of the holes cut out in the sheets of self-adhesive paper. The latter qualitative observations are detailed in the following analyses.

3.2. Distances of displacement of deposit elements depending on the initial position

To analyse the relationship between the distance of displacement and the initial position of the beads, the initial position of the displaced beads in relation to the centre of the impact of the drops was determined by allocating them to areas created by dividing the area of the sample into 1-mm-wide rings. For each of the rings, the average displacement of beads that were initially located within it was calculated. Fig. 5 shows schematically the results obtained for the dry and saturated beds.

The results show three characteristic areas around the place of impact of the drops with different values of average bead displacement.

- The central area, in which the beads were moved only slightly. The radius of this area was approximately 3 mm in the case of the dry beds and 1 mm in the case of the saturated beds.
- The area from which the beads were moved at the furthest distance. This area formed a ring. In the dry beds, the ring had an internal diameter of approximately 4 mm and an external diameter of approximately 8 mm. In the saturated beds, the analogous parameters were approximately 2 mm and approximately 4 mm. The maximum average displacement was 11 mm in the dry beds and 75 mm in the saturated beds. The bead ejected at the furthest distance from the dry beds travelled a distance of 135.9 mm. In the case of the wet beds, this maximum distance was 295.9 mm.
- The third designated area was again characterized by slight displacements, up to a maximum of 2 mm in the dry beds and up to 3 mm in the wet beds. In both cases, there is a tendency for the displacements further away from the centre of deformation to take smaller values. The range of this area ended at a distance of about 13 mm in the dry beds and at a distance of about 9 mm in the saturated beds. The movement of the beads completely vanished at a distance of 14 mm from the point of impact of the drops in the dry beds and a distance of 10 mm in the saturated beds.

3.3. Distances of displacement of bed elements depending on their type of movement

The previous section presents the average distances over which the beads were transported, without taking into account the type of movement associated with their displacement. The observations made with the high-speed cameras and the analysis of the displacements of the marked beads allowed identification of the movement causing the change in the position of individual beads. In general, the beads displaced inside the wetted area (dry beds) or located directly underneath the falling droplet (saturated beds) were moved only slightly. The further away they were from the impact centre of the drops, the more frequently the beads were ejected. This was observed to the next characteristic distance, at which most of the beads were moved to form a rim. A quantitative presentation of the results obtained is given in Figs. 6 and 8. Due to the different displacement distances, the results are presented in separate graphs with different scales, making it easier to analyse the data.

The analysis of the results of measurements in the dry beds (Fig. 6a–c) demonstrated that the distances over which the beads were transported depended on the method of displacement. Beads that moved as a result of ejection were transferred the furthest, while those located in the wetted area (0–6 mm) and the area of motion decay (10–13 mm) were moved along the smallest distances. The displacement analysis (Fig. 6a–c) shows that there was a maximum in each case. In the wet area, the beads located 2 mm from the centre of impact of the drops moved the furthest. Their averaged displacement was 2.37 mm (SD = 0.35 mm). The beads detached from the surface of the beds as a result of ejection were transferred much further: those located initially at a distance of 4 mm were displaced on average by 66.03 mm (SD = 30.51 mm). In the case of movement associated with rim formation, the greatest displacements occurred 6 mm from the centre, with an average value of 5.87 mm (SD = 0.61 mm). It should be noted that the patterns of marked (coloured) beads helped to demonstrate that the areas of occurrence of the different modes of displacement overlapped.

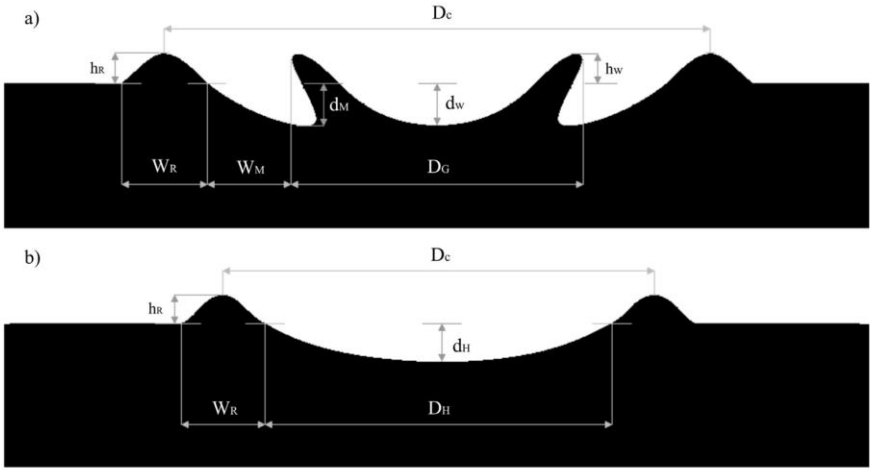


Fig. 3. Diagram of deformation with parameters measured by the microtomograph for (a) the dry sample and (b) the saturated sample, where h_R is the rim height, h_W is the wetted area height, d_M is the moat depth, d_W is the wetted area depth, d_H is the hole depth, W_R is the rim width, W_M is the moat width, D_G is the diameter of the wetted area, D_H is the diameter of the hole, and Dc is the diameter of the crater.

The data obtained in the experiment allowed estimation of the contribution of beads moved in a particular way in particular areas, determined on the basis of the initial positions of the beads. The results of the analysis are presented in Fig. 7.

Both Figs. 6 and 7 show that the change in the way the beads were moved extended over several millimetres in each case. In other words, beads located in border areas could be moved in different ways. Beads located up to 3 mm from the impact centre of the drops were only displaced within the wetted area. Single beads located at 4 mm could be ejected. Less than half of the beads at 5 mm from the centre were displaced inside the wetted area, and most of the others were ejected. At this distance, the first beads placed on the rim appeared. Further increases in the distance from the centre (up to 9 mm) resulted in an increase in the proportion of beads forming the rim and a decrease in the proportion of beads ejected in the splash. No ejected beads were noted at 9 mm, while some beads had not been moved at 10 mm.

An analogous analysis was conducted for the saturated beds. As already mentioned, two methods of displacement were distinguished in this case – displacement inside the deformation and ejection due to splash (Fig. 8a and b).

As in the dry beds, it was possible to observe a maximum for each type of displacement. Among the beads moved inside the deformation, the largest distance was travelled by those located 3 mm from the centre of the splash. The average value of their displacements was 4.43 mm (SD = 1.13 mm). In addition, in the case of ejection, the beads located at a distance of 3 mm from the centre of the splash were moved the furthest. Their average displacement was 92.80 mm (SD = 36.80 mm). Beads in the saturated beds were ejected from 2 mm to 5 mm from the point of impact of the drops, while the first non-transferred beads were noted at 6 mm. An overview of the percentage participation of the different types of displacement depending on the initial location is presented in Fig. 9.

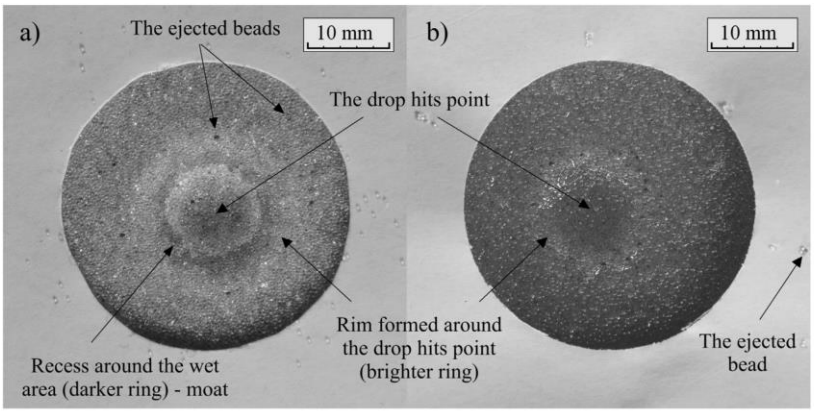


Fig. 4. View of surface deformation after the impact of a water drop: (a) deformation of the dry bed, (b) deformation of the saturated bed.

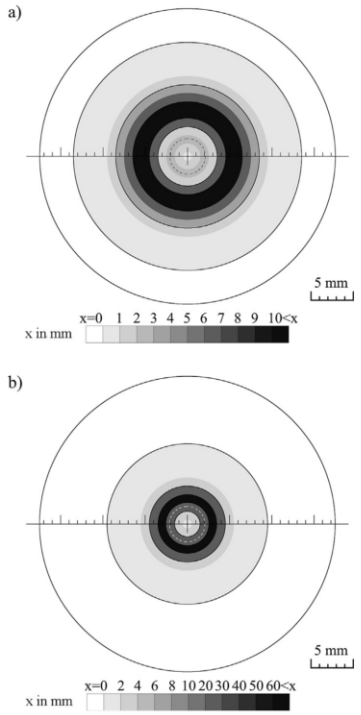


Fig. 5. Average distances over which the beads were displaced depending on their initial position for: (a) the dry bed, (b) the saturated bed. The outer circle in the drawing shows the size of the aluminium rings in which the beds were prepared. X represents the average displacement of beads in millimetres, also indicated by shades of grey.

3.4. Range of bed deformation

The results presented so far allowed characterization of the movement of beads located at different distances from the centre of impact of the drops. However, they did not allow determination of the bed surface deformation. The first method for obtaining information about the extent of changes and their depth was the analysis for the dry bed with three layers composed of beads of different colours, below which there were base layers composed of transparent beads.

The results indicate that the average wetted area was 96.72 mm^2 (SD = 2.90 mm^2). The average exposed area was slightly larger, i.e. 124.93 mm^2 (SD = 7.13 mm^2). The percentage of beads from each of the layers in both areas is shown in Fig. 10.

The use of the self-adhesive paper sheets in combination with samples containing layers of beads of the same colour allowed analysis of the origins of the bed elements ejected at the greatest distances. The layer from which the beads came was determined based on their colour. While interpreting these results, it should be recalled that the diameter of the hole cut in the sheets was 35 mm; therefore, the self-adhesive paper analysis included only the portion of the beads that were moved to positions outside the cut hole. The analysis of the results showed that the beads were initially located between 4 and 8 mm from the centre of deformation (Fig. 6b) and that almost all the beads (97%) that were stopped on the adhesive paper came from the first (top) layer of the deposit.

Much more precise information about the depth and shape of the

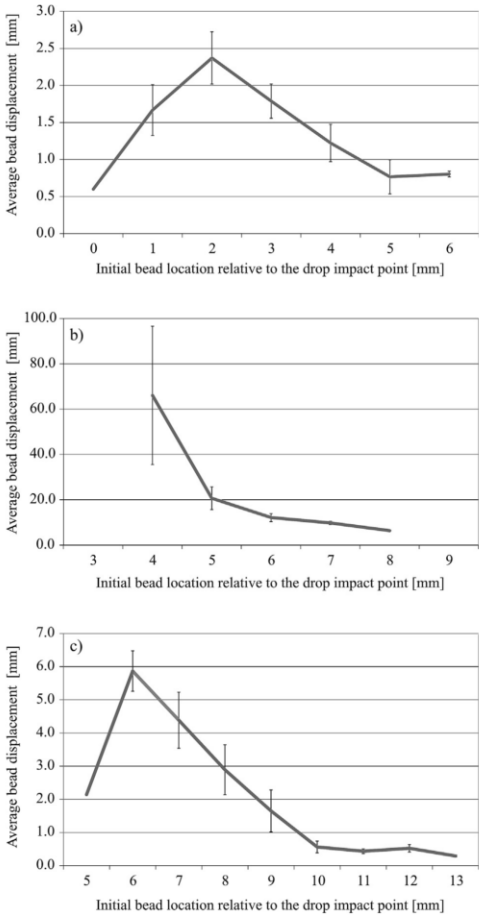


Fig. 6. Average displacements of beads from the dry bed depending on the initial position, for: (a) beads displaced in the wet area, (b) ejected beads, and (c) beads placed on the rim. The vertical lines denote standard deviations.

deformation was obtained using microtomography scanning. Examples of cross sections for the dry and saturated beds are presented in Fig. 11.

Comparison of the cross sections of the beds (Fig. 11) shows differences in the shape of the deformations formed on the saturated and dry surfaces. In the dry bed (Fig. 11a), a wetted area was formed in the central part. Cavities forming a moat were visible on both sides of the area wetted by the drop. The moat was an element of the crater made of dry beads, inside which the wetted area was located. In the saturated bed (Fig. 11b), the main part of the crater was a hole formed after the impact of the drop.

The results of measurements made via microtomography are presented in Fig. 12. Statistically significant differences were found between the width of the hollow formed on the saturated beds of 11.54 mm (SD = 0.68 mm) and the width of the wetted area formed on the dry beds of 10.49 mm (SD = 0.25 mm). The moat, which is a characteristic deformation of the dry beds, had a width of 3.19 mm (SD = 0.28 mm). In both types of beds, the impact of drops caused the formation of a rim, which was slightly smaller in the case of the

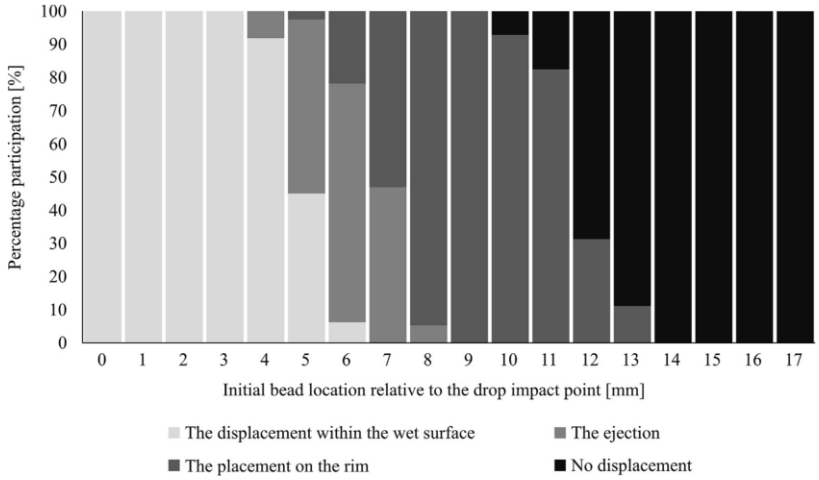


Fig. 7. Percentage of beads with different types of displacement in areas defined based on their initial location. Results for the dry beds.

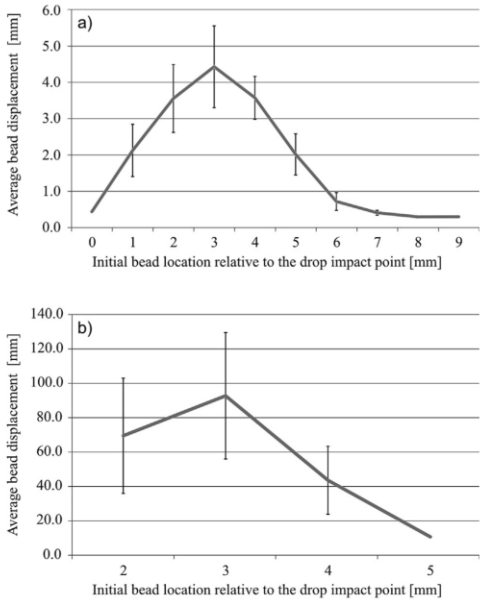


Fig. 8. Average displacements of beads from the saturated beds depending on the initial position, for: (a) beads displaced in the deformation, (b) ejected beads. The vertical lines denote standard deviations.

saturated bed. However, this difference was not statistically significant. The width of the crater in the dry beds was 19.48 mm (SD = 0.46 mm). It was clearly greater than in the saturated beds, where it was 14.16 mm (SD = 0.52 mm).

In both tested systems, the height of the rim exhibited comparable values of about 0.8 mm (Fig. 12b). It should be noted that the standard deviation of the rim height was clearly greater in the case of the saturated beds. The average depth of the holes formed in the saturated beds was 1.22 mm (SD = 0.05 mm), i.e. slightly less than the depth of the wetted areas, which was 1.48 mm (SD = 0.07 mm) in the dry beds. However, there was a statistically significant difference between the depth of the hole and the depth of the moat, as the latter was 1.57 mm (SD = 0.07 mm). The height of the wetted area, which occurred only in the dry beds, had an average value of about 1 mm.

4. Discussion

Regardless of whether the droplet hit the surface of the dry or saturated bed, the same scheme of displacements was observed: the beads closest to the point of impact were displaced over short distances. The beads from the next area were ejected over long distances, after which the values of displacements decreased again (Fig. 5). In addition, some initial locations were associated with the simultaneous occurrence of two, or even three, types of displacement (Figs. 7 and 9). In other words, the initial location of an element of the bed influences the value of its displacement due to the probability of a specific method of displacement.

The analysis of the movement of single particles during the splash phenomenon is a fairly new issue, and therefore it is difficult to find studies in which the authors conducted similar experiments. The study by Hardy et al. (2017) is the closest thematically, although it describes the displacement resulting from several minutes of precipitation rather than the impact of one drop. The authors suggest that soil particles are displaced in stop-hop-roll-repeat cycles. The tracked particles were sand grains coated with a fluorescent substance. The stop-hop-roll-repeat sequence shows some similarities to the division of displacement types used in this work. Hop refers to the sudden ejection and displacement of grains over long distances. Roll includes movements related to the formation of the crater and the displacement of sand along with flowing water. The analysis of motion during precipitation was connected with the occurrence of rest periods of particles, called the stop phase. In addition, it was noted that displacement of soil particles over long distances usually required a large number of cycles.

4.1. Analysis of the phenomenon in the area close to the drop impact point

The impact of the drop on the bed caused deformation of the bed. In the dry beds, a wetted area was formed inside the crater, composed of beads combined with water from the drops. Considering the size of the

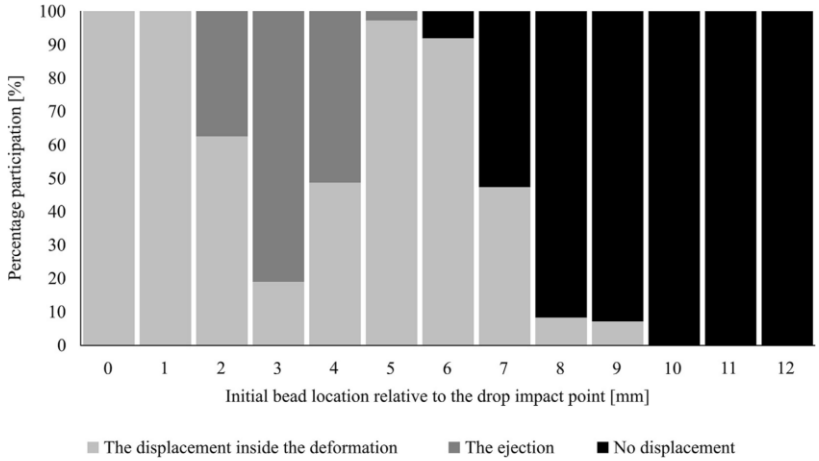


Fig. 9. Percentage of beads with different types of displacement in areas defined based on their initial location. Results for the saturated beds.

wetted area (Fig. 12a) and the average values of dislocations related to the displacement of beads inside the wetted area (Fig. 6a), it can be stated that the results obtained by both independent methods (splash analysis on glass beads using coloured beads and computer micro-tomography) are to a large extent convergent. The wetted area was enclosed by a moat, i.e., a hollow separating it from the rim (Figs. 3a and 11a). The crater in the saturated beds was different, consisting only of a hole and the surrounding rim. In general, a larger crater was formed in the dry beds. Taking into account the results reported by Beczek et al. (2018), where an increase in moisture was associated with an increase in the crater size, the smaller deformation in the case of the saturated samples may give an impression of inconsistency. However, it should be noted that the dry samples were not included in these studies, and the water present in the samples was "sticking" the solid-phase particles together, mitigating their displacement. In this research, the absence of water in the dry bed caused a reduction in cohesion forces, which resulted in greater deformations. These differences may also be a result of the fact that soil samples were tested (to be precise Haplic Luvisol (Siltic) soil) in the study of Beczek et al. (2018), while the present study was based on model systems of glass beads. As indicated by the comparison of the present results with those reported by Beczek et al. (2018), the differences in the results obtained for the saturated samples at the same kinetic energy of the falling water drop confirmed the influence of the shape and size of solid-phase particles on the deformation. It should be noted that the course of the splash on the soil was also influenced by the content of organic carbon and soil texture. The soil samples were characterized by a greater crater depth (the depth was about 2 mm in the soil and about 1.2 mm in the glass beads), while the beds of glass beads had a greater crater width (soil samples about 8 mm, glass beads 14 mm). The reduced depth may be related to the susceptibility of glass beads (taking into account their regular shapes) to avalanches. This phenomenon takes place in the final stage of formation of the crater walls and is associated with the sliding of beads from the highest points of the rim. This aspect of the splash phenomenon was discussed in the work by De Jong et al. (2017). In addition, the regular shapes of the beads meant that the energy losses

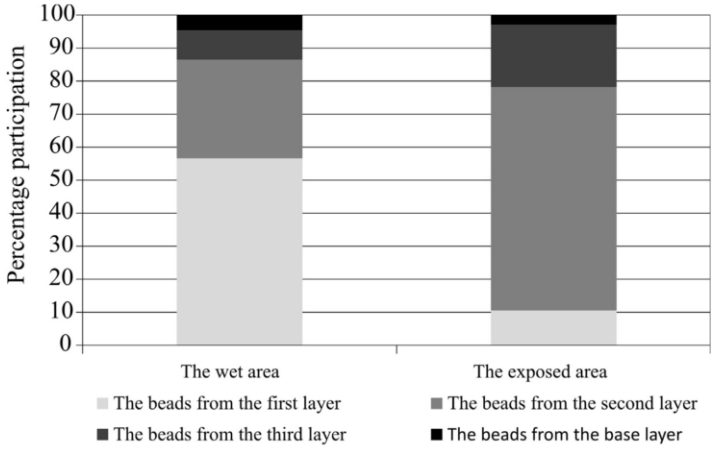


Fig. 10. Percentage of beads from each of the layers of the dry bed in the wetted and exposed areas.

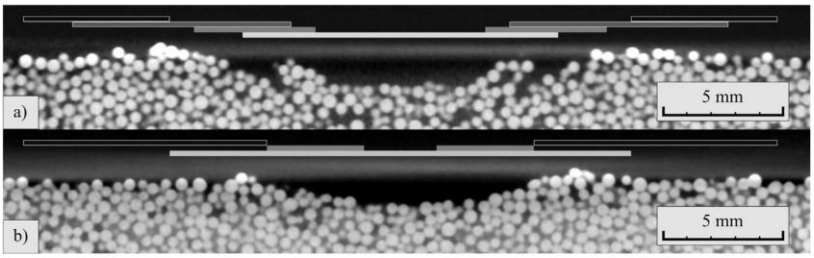


Fig. 11. Examples of deformation cross sections prepared using microtomography: (a) dry bed, (b) saturated bed. The lines above the cross sections represent the areas of occurrence of the different types of bead displacements shown in Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 and Fig. 8.

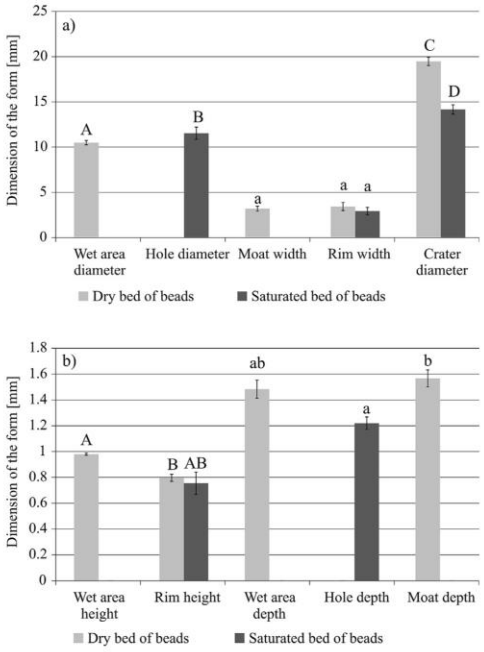


Fig. 12. Dimensions characterizing (a) the width of deformation, (b) the depth and height of deformation resulting from the impact of the drop on the surfaces of the dry and saturated beds. The vertical lines denote standard deviations. The symbols above the columns indicate statistically significant differences between the measured values based on a Student's *t*-test at significance level $\alpha = 0.05$. The size of the letters indicates the comparison for different groups of parameters (diameter or width on a) and height or depth on b)).

from friction between them were smaller and they did not catch each other (which could happen in the soil samples). Hence, the craters in the bead beds had a larger diameter than in the soil. The results presented in this study seem to be in harmony with the work conducted by Takita and Sumita (2013), who considered the impact of a wide range of deposit moisture values (sand in their case) on the size of the crater. The largest crater size was observed for dry samples. An increase in moisture caused a reduction of the deformation on the surface, up to a boundary value, after which the size of the crater began to grow again.

The differences in the size and shape of deformation (in the dry and saturated beds) and the nature of the displacement of beads stopped inside the wetted area (in the dry beds) can be explained by the action of the surface tension of water. The surface tension reduced the penetration of water deep into the bed, which resulted in the formation of a clearly visible circular wetted area on the surface of the samples (Fig. 4a). In the work of Ahn et al. (2013), the wetted area formed after the impact of a drop on beds of hydrophobic and hydrophilic beads was measured and found to be 50 mm^2 (SD = 2 mm^2) and 68 mm^2 (SD = 3 mm^2) respectively. Both values are smaller than the wetted area obtained in this study, i.e., 96.72 mm^2 (SD = 2.90 mm^2). Although Ahn et al. (2013) used droplets with a similar size (diameter of 4 mm) and deposits of beads sized 0.35 mm < d < 0.4 mm, which were smaller than in this study, the free-fall height of the drop was much smaller (0.4 m) and hence the kinetic energy was smaller. This explains the differences between the results. An interesting issue is the shape of the wetted area in both variants. In the hydrophilic beads, it was regular and similar to the value shown in the present results. In the hydrophobic beads, the shape of the wetted area was much more distorted.

Two aspects of the reduction of movement in beads stopped inside the wetted area can be considered. In the central part of the wetted area, the pressure generated by the drop pushes the beads into the deposit, limiting their movement to the sides. For beads displaced to the edge of the wetted area, the surface tension of the water acts to bond the wetted part of the deposit and prevent the beads from being ejected. This can be confirmed by the fact that the first beads knocked out of the dry beds were ejected at a distance of 4 mm (Figs. 6b and 7). The first beads from the saturated beds (where the surface tension resulting from the presence of water in the bed alleviates the effect of surface tension caused by the contact of the drops with the bed, with no backward movement of the beads as a result of the final stage of the wetted area formation) were ejected from a distance of only 2 mm (Figs. 8b and 9). Additionally, there was a decrease in the average values of bead displacements inside the wetted area, along with the approach of their initial location towards the edge of the wetted surface (Fig. 6a). The initial growth and subsequent shrinkage of the wetted area observed on the recordings from the high-speed cameras also seems to confirm this hypothesis. Moreover, the deformation composition obtained from the splash analyses on the beds with the coloured layers seems to be another supporting argument (Fig. 10). The percentage of beads from the first layer was much higher in the wetted area than in the exposed area. The result suggests an influence of a factor countering the displacement of beads out of the wetted area. This role is assigned to the surface tension of the water from the drops.

The absence of the form characteristic of the dry beds (Figs. 4a and 11a) in the case of the saturated samples (Fig. 4b and 11b) cannot be surprising. The water filled all the free spaces between the beads, and thus there was no effect of surface tension at the water/air boundary inside the deposit.

The issue of dry bed deformation was studied by Delon et al. (2011). The authors measured the times characterizing the changes (time of growth and time of shrinkage) in the wetted area. The results obtained

by them are similar to the results in this study. They associated the recession of the drops with capillary forces and its ending with the impregnation of sand. The relationship between the Weber number and the ratio of the maximum crater diameter to the droplet diameter presented by Delon et al. (2011) is better suited to dry than to moist beds from the point of view of the results from this work. The Weber number was also related to the shape of the crater, which was described by the ratio of the diameter of the wetted area to the diameter of the crater (which was named in the article D_{final} – maximum area disturbed by the droplet and D_{max} – diameter of the large crater). The initial increase in the Weber number was related to an increase in the differences between the two sizes, and thus an increase in the area called the moat. After exceeding the boundary value of the Weber number (about 200), the difference between the diameters began to decrease.

4.2. Analysis of the phenomenon in the area of bead ejection

The beads retained on the self-adhesive paper (measurements on beds with coloured layers) indicated that the elements ejected at the greatest distances came mainly from the surface layer of the beds. Taking into account the defects of hand-made layers, the result of 97% is still unambiguous. Additionally, this information is compatible with the data from the analysis of the exposed area, as elements from the surface layer of the deposit accounted for only 10.5% of this area (Fig. 10). The location of the exposed area coincides with the initial positions of the ejected beads, located above the cross section of the sample in Fig. 11a. This means that the elements of the surface layer of the bed were the most likely to be ejected, and the process was associated with a strong deformation of the surface. A similar situation was observed in the case of the saturated beds. The maximum average displacement value was obtained for the beads at a distance of 2–4 mm from the geometric centre of the impact of the water drops. At this point, the inner walls of the crater began.

The analysis of the results revealed that the beads were ejected from a relatively narrow area of the sample, especially in the case of beads displaced at the longest distance. The average displacements of beads ejected from the dry beds exceeded 20 mm for an area 4–5 mm from the centre of the impact of the drops (Fig. 6b). The maximum value of the average displacement in the saturated beds was reached closer to the centre of the deformation (Fig. 8b), i.e., at a distance of 2–3 mm. However, in this case, the ejected beads covered a greater distance than the beads from the dry beds. The differences can be explained by the wetting of the dry beds. In the dry beds, the surface tension of water from the drops prevented the beads from being ejected from a distance of 2–3 mm, holding them in the wetted area. The energy transferred to beads located further away (4–5 mm) in the dry beds was smaller, hence the shorter distances over which they were displaced after being ejected. The lower energy transferred to these beads was the result of two simultaneously occurring phenomena:

- Energy reduction in subsequent collisions of beads in the bed. Less energy was transferred further from the centre of the impact of the droplet.
- In the dry bed wetted by a drop, the water entering the pores caused a change in the geometrical arrangement of the deposit (thickening), hence part of the energy of the falling droplet was dispersed. In the saturated bed, assuming the incompressibility of water, the density of the bed was much higher, thus most of the energy could be used as the energy of bead ejection.

Long et al. (2014) analysed the movement of particles which they divided into two groups: type “a” (characterized by low ejection angles and high speeds) and type “b” (larger angles of ejection and lower speeds). Their b-type particles were ejected from areas between 1 mm and 10 mm (mostly from the 3–7 mm) from the drop impact point. They covered a distance of up to 120 mm, although the vast majority did not move further than 40 mm from the drop impact centre. These data, despite the difference in the drop sizes and grain diameters, are close to the results presented in this paper. Ahn et al. (2013) have demonstrated that the majority of splashed particles land between 1 and 2 cm from the point of impact of the drops, and only a few are transported over longer distances. Similarly, in the present measurements, many of the beads fell inside the ring of the deposit.

Furbish et al. (2007) described the mechanism of particle ejection from the surface layer of the sample as a result of particle-particle collisions. The distances to which the particles were ejected were related to the diameter of the sand grains and their number to the size of the impacting drops. They also noticed that, for a certain ratio of drop size to grain size of the bed, the momentum transferred to the deposit is negligible, and the drop infiltrates the deposit without splashing. Furbish et al. reported that 883 grains were ejected after the impact of four drops with a diameter of 4 mm on a 0.35-mm-grain-diameter deposit. In turn, 136 grains were ejected in the case of the impact of 10 drops with the same diameter on a 0.84-mm-grain-diameter deposit. This gives 220.75 and 13.6 grains per drop, respectively. In our case, the average number of beads ejected onto the sheet of self-adhesive paper was 43.33 (SD = 6.17) for the beds with monolayers.

Zhang et al. (2015) investigated the influence of humidity on the particle splash. They reported that even a small amount of moisture in the deposit creates liquid bridges between points of contact of granular particles, which then induce cohesive forces, thus reducing the number of particles ejected. According to their reports, an increase in moisture makes the retreat of liquid marble (wet area) more difficult. Despite the use of beads with a much smaller diameter, the maximum wetted area was reached after a similar time as in the measurements presented in this study.

4.3. Analysis of the phenomenon in the area of rim formation

The rim is the last (measuring from the centre of the impact of the water drops) element of deformation formed on the bed surface. Rim formation requires displacement of beads leading to their accumulation and a fall of beads ejected over short distances. The observations made with the use of the high-speed cameras indicate that the latter mechanism is more important in the case of dry beds.

Based on microtomography scans, it was found that both the average width and the average height of the rim were larger in the dry beds, but the differences were not statistically significant (Fig. 12). However, in the case of the dry samples, the rim was easier to observe, due to the presence of the moat around the wetted area (Fig. 4a). In the case of the saturated samples, the rim was formed closer to the drop impact point. The distance of the rim from the centre of the saturated beds was limited by the influence of the surface tension of water. Water from the beds attempted to achieve minimized volume, (i.e., as far as possible in the glass beads to achieve a spherical shape), influencing the size of the deformation.

5. Conclusions

The presented work shows investigations of the displacement of elements of dry and saturated (with water) beds made of glass beads and the deformation of the bed surfaces induced by the splash phenomenon. The experiments were carried out with a wide range of measurement methods: patterns and layers made of marked (coloured) beads and the use of high-speed cameras and microtomography. The average bead displacements calculated for the different areas, taking into account their initial positions with an accuracy of 1 mm, allowed identification of general trends valid for both types of samples. The classification of displacements according to the covered distance, the nature of the movement, and the region of occurrence facilitated a more detailed analysis of the phenomenon. In the dry beds, the following phenomena were observed.

- Displacement inside the wetted area due to expansion and shrinking of the area wetted by the falling drop. This type of displacement was characterized by small movements limited by the surface tension of the water. The highest displacements were noted for beads located at a distance of 2 mm from the point of impact of the drops, with an average value of 2.37 mm (SD = 0.35 mm).
- Ejection of the beads outside the deformation area. This movement included sudden large displacements with very different values. The longest distance was covered by beads originally located at a distance of 4 mm from the centre of the splash, and the average value of the displacements was 66.03 mm (SD = 30.51 mm). It should be emphasized that the vast majority of the ejected beads were initially located in the surface layer of the beds.
- Placement on the rim. In the case of this displacement, the beads were shifted along the deposit. Some of them were ejected to a small height and subsequently fell onto the formed rim. The maximum average displacement, i.e. 5.87 mm (SD = 0.61 mm), was observed for deposit elements located 6 mm from the drop impact point.

This classification was not applicable in the case of the saturated beds, which showed a different shape of deformation and different behaviour of the deposit after the impact of the drops. Given the influence of water filling the pores between the beads, the deformation was called the moat, and the wetted area did not form on the surface of the sample. In other words, it was impossible to identify the boundary between the direct interaction of water drops in the crater formation process and the indirect interaction in the rim formation process. In the saturated beds, the following distinction was therefore made.

- Displacement inside the deformation, which includes both the beads pushed deep into the beds by drop impact directly above them and those moved onto the rim. The maximum value of average displacement, i.e. 4.43 mm (SD = 1.13 mm), was recorded for beads located about 3 mm from the centre of the splash.
- Beads ejected from the deformation area, analogous to the displacement type occurring in dry beds. A maximum average ejection distance of 92.80 mm (SD = 36.80 mm) was observed for elements located approximately 3 mm from the drop impact centre. The comparison of the results with those for the dry beds showed that the elements of the saturated beds covered longer distances. Furthermore, a portion of the ejected beads was in the form of aggregates linked by water.

It should be noted that the areas of occurrence of the above-mentioned types of displacements, (i.e., the initial positions of the elements moved in a given way) overlapped. This leads to the conclusion that the initial locations of the beads moved as a result of the splash did not unambiguously determine the displacement type, but rather influenced it via the change in the probability of occurrence of displacement types. Moreover, this probability depended on the parameters of the beds, in this case the moisture. It should be noted that the beads travelling the longest distances after ejection came from a relatively narrow area of the sample.

A phenomenon that affects the displacement of dry bed elements in direct contact with the impacting drops is the deposit wetting. The analysis of the images from the high-speed cameras showed the expansion of the wet area and its subsequent shrinkage resulting from the effect of surface tension. This resulted in creation of forms that were not observed in the saturated beds, i.e., the so-called moat and wetted area, the depths of which were comparable. The subsurface layers of the beads in the moat area were exposed, mainly those from the second and third layers. The analysis of the wetted area composition indicated a significant proportion of beads from the first layer. It was combined with the influence of water surface tension. The comparison of the deformations caused by the drop impact in both investigated bed types showed that those occurring in the saturated beds had a smaller diameter, although the depths of the crater in the saturated beds and the wetted area in the dry beds were similar. Furthermore, the microtomography scans of bead displacements indicate that the place from which the beads were ejected was associated with the strongest deformation of the beds.

The results presented in the study are basic research aimed at supplementing the existing descriptions of crater formation and particle transport due to soil splash. They are important for understanding the mechanisms of transport of bacteria, fungi, and pollutants transferred with ejected soil particles during splash. The results can also be used for a physical description of the phenomenon for the computer modelling of both splash and water erosion.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

Funding: This work was partially supported by (a) National Science Centre, Poland, in the frame of project no. 2014/14/E/ST10/00851; (b) Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Poland, in the frame of statutory research.

References

Ahn, S., Doerr, S.H., Douglas, P., Bryant, R., Hamlett, C.A.E., McHale, G., Newton, M.I., Shirtcliffe, N.J., 2013. Effects of hydrophobicity on splash erosion of model soil particles by a single water drop impact. Earth Surf. Process. Landf. 38, 1225–1233. https://doi.org/10.1002/esp.3364.

Atherton, S., Polak, D., Hamlett, C.A.E., Shirtcliffe, N.J., McHale, G., Ahn, S., Doerr, S.H., Bryant, R., Newton, M.I., 2016. Drop impact behaviour on alternately hydrophobic and hydrophilic layered bead packs. Chem. Eng. Res. Des. 110, 200–208. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.011.

Beczek, M., Ryżak, M., Lamorski, K., Sochan, A., Mazur, R., Bieganowski, A., 2018. Application of X-ray computed microtomography to soil craters formed by raindrop splash. Geomorphology 303, 357–361. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.019.

Beczek, M., Ryżak, M., Sochan, A., Mazur, R., Polakowski, C., Bieganowski, A., 2017. The differences in crown formation during the splash on the thin water layers formed on the saturated soil surface and model surface. PLoS ONE 12 (7), e0181974. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181974.

Brodowski, R., 2013. Soil detachment caused by divided rain power from raindrop parts splashed downward on a sloping surface. Catena 105, 52–61. https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.01.006.

Bu, C., Wu, S., Yang, K., 2014. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils. Int. J. Sediment Res. 29, 491–501. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60062-7.

De Jong, R., Zhao, S.C., Van Der Meer, D., 2017. Crater formation during raindrop impact on sand. Phys. Rev. E 95, 042901. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.042901.

Delon, G., Terwagne, D., Dorbolo, S., Vandewalle, N., Caps, H., 2011. Impact of liquid droplets on granular media. Phys. Rev. E 84, 046320. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.046320.

Ekwue, E.I., Seepersad, D., 2015. Effect of soil type, peat, and compaction effort on soil strength and splash detachment rates. Biosyst. Eng. 136, 140–148. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.06.004.

Erpul, G., Gabriels, D., Cornelis, W.M., Samray, H.N., Guzelordu, T., 2008. Sand detachment under rains with varying angle of incidence. Catena 72, 413–422. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.008.

Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordán, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M., Cerdà, A., 2017. Splash erosion: a review with unanswered questions. Earth-Sci. Rev. 171, 463–477. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.009.

Fox, D.M., Darboux, F., Carrega, P., 2007. Effects of fire-induced water repellency on soil aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. Hydrol. Process. 21, 2377–2384. https://doi.org/10.1002/hyp.6758.

Fu, Y., Li, G., Zheng, T., Li, B., Zhang, T., 2017. Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action. Catena 150, 154–160. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.021.

Furbish, D.J., Hamner, K.K., Schmeeckle, M., Borosund, M.N., Mudd, S.M., 2007. Rain splash of dry sand revealed by high-speed imaging and sticky paper splash targets. J. Geophys. Res. 112, F01001. https://doi.org/10.1029/2006JF000498.

Geißler, C., Kühn, P., Böhnke, M., Bruelheide, H., Shi, X., Scholten, T., 2012. Splash erosion potential under tree canopies in subtropical SE China. Catena 91, 85–93. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.10.009.

Ghadiri, H., 2004. Crater formation in soils by raindrop impact. Earth Surf. Process.

Landf. 29, 77–89. https://doi.org/10.1002/esp.1014.
Ghahramani, A., Ishikawa, Y., Gomi, T., Shiraki, K., Miyata, S., 2011. Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope A plot-scale study. Catena 85, 34–47. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.11.005.
Goebes, P., Seitz, S., Geißler, C., Lassu, T., Peters, P., Seeger, M., Nadrowski, K., Scholten, T., 2014. Momentum or kinetic energy – how do substrate properties influence the calculation of rainfall erosivity? J. Hydrol. 517, 310–316. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.031.
Hamlett, C.A.E., Atherton, S., Shirtcliffe, N.J., McHale, G., Ahn, S., Doerr, S.H., Bryant, R., Newton, M.I., 2013. Transitions of water-drop impact behaviour on hydrophobic and hydrophilic particles. Eur. J. Soil Sci. 64, 324–333. https://doi.org/10.1111/ejss.12003.
Hardy, R.A., James, M.R., Pates, J.M., Quinton, J.N., 2017. Using real time particle tracking to understand soil particle movements during rainfall events. Catena 150, 32–38. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.005.
Jordán, A., Zavala, L.M., Granged, A.J.P., Gordillo-Rivero, A.J., García-Moreno, J., Pereira, P., Bárcenas-Moreno, G., de Celis, R., Jiménez-Compán, E., Alanís, N., 2016. Wettability of ash conditions splash erosion and runoff rates in the post-fire. Sci. Total Environ. 572, 1261–1268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.140.
Katsuragi, H., 2010. Morphology scaling of drop impact onto a granular layer. Phys. Rev. Lett. 104, 218001. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett. 104.218001.
Kijowska-Strugała, M., Kiszka, K., 2019. Environmental factors affecting splash erosion in the mountain area (the Western Polish Carpathians). Landf. Anal. 36, 97–111. https://doi.org/10.12657/landfana.036.009.
Korbiel, T., Ryżak, M., Przech, D., Lamorski, K., Bieganowski, A., 2015. A system for recording the dynamics of the water drop's impact on a surface. Meas. Control 48, 149–156. https://doi.org/10.1177/0020294015572667.
Long, E.J., Hargrave, G.K., Cooper, J.R., Kitchener, B.G.B., Parsons, A.J., Hewett, C.J.M., Wainwright, J., 2014. Experimental investigation into the impact of a liquid droplet onto a granular bed using three-dimensional, time-resolved particle tracking. Phys. Rev. E 89, 032201. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.032201.
Lowe, M.A., McGrath, G., Mathes, F., Leopold, M., 2017. Evaluation of surfactant effectiveness on water repellent soils using electrical resistivity tomography. Agr. Water Manage. 181, 56–65. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.013.
Ma, B., Yu, X., Ma, F., Li, Z., Wu, F., 2014. Effects of crop canopies on rain splash detachment. PLoS ONE 9 (7), e99717. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099717.
Marzen, M., Iserloh, T., de Lima, J.L.M.P., Ries, J.B., 2016. The effect of rain, wind-driven rain and wind on particle transport under controlled laboratory conditions. Catena 145, 47–55. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.018.
Marzen, M., Iserloh, T., Casper, M.C., Ries, J.B., 2015. Quantification of particle detachment by rain splash and wind-driven rain splash. Catena 127, 135–141. https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.023.
Moghadam, B.K., Jabarifar, M., Bagheri, M., Shahbazi, E., 2015. Effects of land use change on soil splash erosion in the semi-arid region of Iran. Geoderma 241–242, 210–220. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.025.
Nanko, K., Mizugaki, S., Onda, Y., 2008. Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities. Catena 72, 348–361. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.002.
Nefzaoui, E., Skurtys, O., 2012. Impact of a liquid drop on a granular medium Inertia, viscosity and surface tension effects on the drop deformation. Exp. Therm. Fluid Sci. 41, 43–50. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.007.
Pietravalle, S., van den Bosch, F., Welham, S.J., Parker, S.R., Lovell, D.J., 2001. Modelling of rain splash trajectories and prediction of rain splash height. Agric. For. Meteorol. 109, 171–185. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00267-2.
Quansah, C., 1981. The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport. J. Soil Sci. 32, 215–224. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1981.tb01701.x.
Ryżak, M., Bieganowski, A., Polakowski, C., 2015. Effect of soil moisture content on the splash phenomenon reproducibility. PLoS ONE 10 (3), e0119269. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119269.
Sadeghi, S.H., Harchegani, M.K., Asadi, H., 2017. Variability of particle size distributions of upwarddownward splashed materials in different rainfall intensities and slopes. Geoderma 290, 100–106. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.007.
Szewrański, S., 2009. Raindrop Splash as the Form of Loess Soils Erosion. Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Wrocław (in Polish).
Takita, H., Sumita, I., 2013. Low-velocity impact cratering experiments in a wet sand target. Phys. Rev. E 88, 022203. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.022203.
Terry, J.T., 1998. A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. Aust. J. Soil Res. 36, 525–542. https://doi.org/10.1071/S97078.
Vaezi, A.R., Ahmadi, M., Cerdà, A., 2017. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. Sci. Total Environ. 583, 382–392. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.078.
Wei, Y., Wu, X., Cai, C., 2015. Splash erosion of clay–sand mixtures and its relationship with soil physical properties: the effects of particle size distribution on soil structure. Catena 135, 254–262. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.003.
Zhang, Q., Gao, M., Zhao, R., Cheng, X., 2015. Scaling of liquid-drop impact craters in wet granular media. Phys. Rev. E 92, 042205. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.042205.
Zhao, S.C., de Jong, R., van der Meer, D., 2015. Raindrop impact on sand: a dynamic explanation of crater morphologies. Soft Matter 11, 6562–6568. https://doi.org/10.1039/C5SM00957J.
Żmuda, R., Szewrański, S., Kowalczyk, T., Szarawarski, Ł., Kuriata, M., 2009. Landscape alteration in view of soil protection from water erosion - an example of the Mielnica watershed. J. Water Land Dev. 13, 161–175. https://doi.org/10.2478/v10025-010-0026-5.

7.3. Tekst publikacji P.3

Geoderma 417 (2022) 115838

Contents lists available at ScienceDirect

Geoderma

journal homepage: www.elsevier.com/locate/geoderma

Soil deformation after one water-drop impact – The effect of texture and soil moisture content

Rafał Mazur [a], Magdalena Ryżak [a,*], Agata Sochan [a], Michał Beczek [a], Cezary Polakowski [a], Bartosz Przysucha [b], Andrzej Bieganowski [a]

[a] Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, Poland
[b] Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin, Poland

ARTICLE INFO

Handling Editor: Morgan Cristine L.S.

Keywords:
Soil erosion
Splash
Raindrop impact
Crater
3D scanner

ABSTRACT

The splash phenomenon (being the first stage of water erosion) is caused by the drops' impact on the soil surface, resulting in the displacement of soil particles and the creation of a deformation – a small-sized crater. The aim of this research was to analyse the effect of the drops' impact energy, the initial moisture content, and the texture of the soils used (loamy sand, sandy loam, silty loam) on the size of the formed craters. Measurements were made using a 3D surface scanner to determine the depth and volume of craters along with the equivalent diameter and circularity of their top cross-sections. In each of the experiment variants, the impact of the drops resulted in changes on the soil surface. Moisture content was the factor with the highest influence on crater formation (increase in moisture resulted in an increase in the size of the craters). The highest circularity was observed in craters formed on silty loam, which had the largest amount of silt content among the investigated soils. Increasing the drop energy resulted in an increase in the average values of the measured quantities, but only in a few cases were these changes statistically significant. The conducted research demonstrates the utility of surface scanners in accurately measuring soil deformation after drop impact. In addition, the acquired results can support the development of erosion models, increase the knowledge regarding the splash phenomenon, and help to make further steps in linking the splash to subsequent stages of water erosion.

1. Introduction

The Earth's environment is exposed to many different factors that can cause its devastation. Erosion associated with the degradation of soil– the surface layer of the lithosphere, is one of such threat. Erosion resulting, e.g., from the action of water, wind, and mass movements causes damage to landforms. In addition to such phenomena as gully formation or the transport of massive amounts of soil material by rivers, the process that precedes erosion and occurs on a much smaller scale (splash erosion) must first be considered to gain a complete overview of erosion.

The splash phenomenon is the first stage of water erosion, involving the interactions of individual raindrops with the soil surface. The impact of these drops causes detachment and displacement of soil particles and also results in surface deformation. The course of the splash phenomenon is the subject of much scientific research, the results of which may allow for better understanding, prediction, and prevention of processes that contribute to soil degradation.

The course and magnitude of these splashes are influenced by factors such as slope (Erpul et al., 2008; Quansah, 1981), vegetative cover (Ghahramani et al., 2011; Ma et al., 2014; Parlak and Özaslan Parlak, 2010), precipitation energy and intensity (Fernández-Raga et al., 2010; Goebes et al., 2014; Sadeghi et al., 2017), soil wettability (Ahn et al., 2013; Fox et al., 2007; Hamlett et al., 2013), particle size distribution (Furbish et al., 2007; Wei et al., 2015), moisture content (Ryżak et al., 2015; Zambon et al., 2021), and compaction (Ekwue and Seepersad, 2015) of soil. To date, most studies on the splash phenomenon have been focused on describing the mass of displaced soil. On a laboratory or small field scale, this was accomplished by using special containers – splash cups – to capture the ejected material (Beczek et al., 2019; Fernández-Raga et al., 2019). However, the methods mentioned above allow only analyses of the results of the splash erosion. A new possibility is given by the use of high-speed cameras, which allow measurement of the dynamics, i.e., the velocity and trajectory of ejected particles

* Corresponding author.
E-mail address: m.ryzak@ipan.lublin.pl (M. Ryżak).

https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115838
Received 30 August 2021; Received in revised form 23 February 2022; Accepted 16 March 2022
Available online 19 March 2022
0016-7061/© 2022 Elsevier B.V. All rights reserved.

(Beczek et al., 2020; Long et al., 2014). In another method presented by Hardy et al. (2017), the authors used fluorescent substances to determine the displacement of soil material during a simulated rainfall event.

Generally, the splash phenomenon is accompanied by deformation of the soil surface, and a so-called crater is formed. The crater is usually formed by a cavity surrounded by piled-up material forming a rim (Beczek et al., 2018; Ghadiri, 2004). Some metrics used to evaluate craters are geometrical measures of diameter and depth (Beczek et al., 2018; Delon et al., 2011). In some works, the presented results were supplemented with parameters based on the ratio of the crater depth to its diameter (de Jong et al., 2017) or the ratio of the crater diameter to the diameter of the falling drop (Zhang et al., 2015). Additionally, attempts to calculate crater volumes were made in several other papers (Beczek et al., 2018; Ghadiri, 2004). Quantities that sometimes complement the aforementioned description of deformation are information about the angles of the crater walls (de Jong et al., 2017) and the dimensions of the formed rim (Long et al., 2014).

Results presented by Delon et al. (2011), Nefzaoui and Skurtys (2012), and Beczek et al. (2018) indicated that an increase in a drop's impact energy resulted in an increase in the size of the formed crater. Takita and Sumita (2013) as well as Beczek et al. (2018) reported that the susceptibility of a deposit to deformation is related to its moisture content. According to research by de Jong et al. (2017) into the process of crater formation, the dimensions reached by craters depend on various packing densities, and the final shape of the deformation is related to the occurrence of a phenomenon called avalanche (namely, the movement of material from the crater walls into the crater cavity).

With the development of measurement technology, new devices are emerging that can be used in the analysis of the splash and the characteristics of the formed craters. Examples include laser profilometers (Zhang et al., 2015), surface scanners (Wyser et al., 2019), or microtomography (Beczek et al., 2018). At the same time, in existing devices, measurements are being made with increasing precision and within an increasing measurement range.

Taking into account that crater formation is a complicated process, some of the work aimed at describing this phenomenon was carried out on model deposits – usually glass beads (de Jong et al., 2017; Katsuragi, 2011; Mazur et al., 2020; Nefzaoui and Skurtys, 2012; Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2015a,b). There is less work done, however, on more complex deposits like sand (Delon et al., 2011; Lardier et al., 2019; Long et al., 2014; Wyser et al., 2019) or soil (Beczek et al., 2018; Ghadiri, 2004; Lardier et al., 2019; Terry, 1998). Therefore, further research involving soil material is needed to fully understand and describe the course of the splash and crater formation.

A review of the literature leads to the conclusion that there are still many aspects to crater formation that require a deeper understanding/description. Wanting to fill, at least in part, this gap, the aim of this study was to determine the effect of varying initial moisture content and texture of soils as well as the impact energy of a single drop on the degree of surface deformation (shape and size of the resulting crater).

2. Materials and methods

Three soils with varying textures were used in the research, being loamy sand, sandy loam, and silty loam. To remove the skeleton part, the soil material was air-dried and sieved through a sieve with a mesh diameter of 2 mm.

Particle size distribution was measured by the laser diffraction method using a Mastersizer 2000 (Malvern, UK) with a Hydro G dispersion unit. The following settings were applied: pump speed – 1750 rpm, stirrer speed – 700 rpm. Measurements were carried out in water dispersion. The duration of a single measurement was 60 s (30 s for red light and 30 s for blue light). Mie theory with a refractive index – 1.52 and an absorption index – 0.1 was used to calculate particle size distribution. The soil aggregates were destroyed by ultrasounds at maximum power (35 W) in 4 min (Bieganowski et al., 2018).

Total organic carbon and inorganic carbon content were measured with a TOC VCPH analyser coupled with an SSM5000 solid sample combustion unit (Shimadzu, Japan) (Chua and Tokura, 2004). The characteristics of the investigated soils are shown in Table 1.

The samples used in the study were differentiated in terms of initial moisture content taking into account three variants corresponding to a pressure head equal to 0.1 kPa (fully saturated soil), 1.0 kPa (near saturation), and 16 kPa (soil with moisture content close to field capacity). This pressure head was obtained by mixing air dry soil samples with the proper amount of water (determined in previous measurements on ceramic plates placed in pressure chambers). The moistened soil material was placed in aluminium rings with a height of 10 mm and an inner diameter of 36 mm. The bottoms of the rings were secured with fabric chiffon to prevent the sample from falling out. The soil surface was gently smoothed with a ruler. Some samples were dried at 110 °C and weighed to determine the bulk density for each soil variant (Table 1). The prepared samples were placed on a previously levelled laboratory table. The measurements included water drops with a diameter of 4.2 mm and final kinetic energy of 0.49 mJ (when the drop falls from 1.5 m) and 1.35 mJ (when the drop falls from 7 m). A height of 1.5 m was chosen because it can be related to the throughfall phenomenon, i.e., the water drop falling from tree leaves. The free fall from a height of 7 m, which was included to approximate the parameters of the used drops to the real precipitation, allowed the drop to achieve more than 90% of the terminal velocity obtained by raindrops of this size. The energy of the drops before hitting the samples was determined based on their mass and velocity, which was quantified through recordings made with high-speed cameras. A constant drop size was provided by a glass capillary placed at the end of a dispensing system controlled by a peristaltic pump. For each variant of the experiment, 10 replications were performed (which were understood as the impact of one drop per one undisturbed sample).

A Scan3D UNIVERSE 10 Mpix surface scanner (Smarttech 3d, Poland) with sampling of 655 points·mm^{-2} (0.039 mm between points) was used to measure the shape of the craters. Additionally, the measuring equipment included a rotary table on which samples were placed (the scanner-table system was positioned to place the sample in the centre of the scanner measuring volume) and a computer with Smarttech3D measure software (Smarttech, Poland) for recording and working on point clouds. To carry out the scan, a projection system built into the scanner illuminated the sample with a series of time-varying parallel stripes of white light. The way the light reflected off the sample was registered by the detector and then interpreted by the software, which created a point cloud reflecting the geometry of the sample. A single measurement consisted of 6 scans, between which the sample placed on the rotary table was automatically turned by 60° – the overall scanning time per sample was approximately 2 min. For each sample, a set of point clouds was obtained, which were subjected to removal of noise, fitted together, and converted to triangular mesh. Subsequent work on the converted files was carried out in Geomagic Control 2015 (3D Systems, USA). The maximum crater depth and crater volume were determined by comparing the 3D model of the sample with the surface determined from points undisturbed by the impact of the drop, representing the level of the surface before the splash. Next, cross sections of the crater were determined at the level of the same reference surface. The crater contour image obtained from the cross-section was entered into ImageJ (National Institute of Health, USA), where the circularity (Eq. (1)) and the equivalent diameter (Eq. (2)) of the crater at the level of the reference surface were calculated. A visualization of the determined quantities is shown in Fig. 1.

$$Circularity = \frac{4\pi A}{P^2} \tag{1}$$

$$Equivalent\ diameter = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{2}$$

Table 1
Characteristics of the soil materials.

Soil Unit According to WRB*	Soil texture	Particle size distribution [% vol.]			TOC [%]	IOC [%]	Bulk density [g/cm3] for moisture corresponding to a pressure head equal to:		
		Sand (2–0.05 mm)	Silt (0.002–0.05 mm)	Clay < 0.002 mm			0.1 kPa	1 kPa	16 kPa
Haplic Luvisol	Loamy sand	81.59	16.60	1.81	0.80	0.00	1.65 ± 0.03	1.77 ± 0.01	1.76 ± 0.02
Rendzic Leptosol	Sandy loam	53.49	41.60	4.91	1.73	0.67	1.35 ± 0.05	1.41 ± 0.01	1.55 ± 0.02
Nudiargic Luvisol	Silty loam	14.56	77.61	7.83	0.79	0.00	1.27 ± 0.01	1.41 ± 0.02	1.62 ± 0.01

TOC – total organic carbon; IOC – inorganic carbon; *World Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2015); bulk density results include mean values and standard errors.

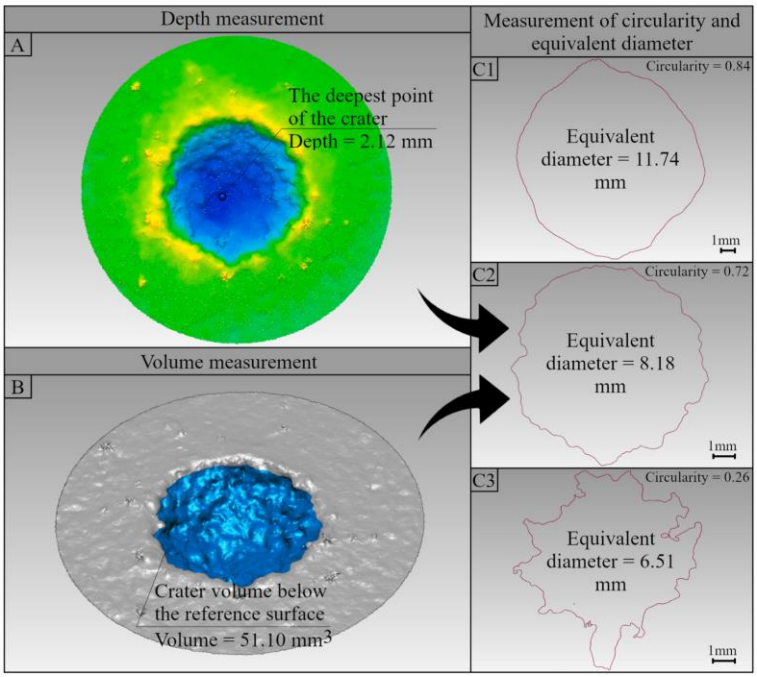


Fig. 1. Examples of analysed crater quantities: A – depth of crater; B – volume of crater; C – sample cross-sections with different circularity: C1 – silty loam at a pressure head equal to 0.1 kPa and the drop falling from 7 m; C2 – sandy loam at a pressure head equal to 1 kPa and the drop falling from 7 m; C3 – loamy sand at a pressure head equal to 16 kPa and the drop falling from 1.5 m.

where: A – crater cross-sectional area at the level of the reference surface (m^2); P – crater cross-sectional perimeter at the level of the reference surface (m).

The following software was used to conduct the described analyses: i) for scan registration and collection of points' cloud – Smarttech3D measure (Smarttech, Poland), ii) on the analysis of triangular meshes–Geomagic Control 2015 (3D Systems, USA), iii) for determination of circularity and equivalent diameter – ImageJ (National Institute of Health, USA).

Statistica 13.1 (TIBCO Software Inc., USA) software was used for statistical analyses. The normality of the distributions in all analysed groups (which were distinguished according to the initial moisture content and texture of the soils, the drops' impact energy, and the measured quantities of the craters) was verified using the Shapiro-Wilk test. The Bartlett's test was used for analysis of equality of variances. Multi-factor ANOVA was used to determine the effects of individual factors and combinations of factors on the quantities studied. The calculated values of ω^2 (Eq. (3)), which is a measure of the size of an effect and determines how much difference is caused by a given factor in the set of values under consideration (Keren and Lewis, 1979), were interpreted based on Cohen's scale (Cohen, 1988). Depending on the value of the parameter ω^2, the strengths of the effect were assigned to one of four groups: < 0.1 – very small or none, 0.1 to 0.3 – small, 0.3 to 0.5 – medium, 0.5 to 1 – large. The term very little or none refers to factors whose effect on the results according to the above scale was none or so small that it is basically negligible. Tukey's test (at a significance level of 0.05) was used to determine statistically significant differences between the results from each experimental variant.

$$\omega^2 = \frac{SS_{treat} - df^* MS_{error}}{SS_{total} + MS_{error}} \quad (3)$$

where: SS_{treat} – sum of squares for a factor, effect; df – number of degrees of freedom for a factor, effect; MS_{error} – mean square for the errors; SS_{total} – sum of squares for the model.

3. Results

The results are presented in Fig. 2, and the analysis of the effect of each factor on the measured quantities in Table 2.

Craters formed on sandy loam, with moisture content corresponding to a pressure head of 0.1 kPa and a drop energy of 1.35 mJ had the greatest depth (Fig. 2A), averaging 2.48 mm (±0.13 mm), and the greatest volume (Fig. 2D), averaging 103.40 mm^3 (±6.42 mm^3). The craters with the smallest depth and volume were recorded for the same soil (sandy loam) at a moisture content corresponding to a pressure head equal to 16 kPa and drop energy of 0.49 mJ – the average depth was 0.14 mm (±0.03 mm), and the average volume was 0.97 mm^3 (±0.27 mm^3). In addition, the smallest equivalent diameters (Fig. 2B) were also obtained for this variant, with an average value of 4.45 mm (±0.27 mm). Craters with the largest equivalent diameter averaging 11.78 mm (±0.26 mm) and the largest circularity (Fig. 2C) averaging 0.80 (±0.01) were formed on silty loam samples at a moisture content equivalent to a pressure head equal to 0.1 kPa and drop energy of 1.35 mJ. In contrast, craters characterized by the smallest circularity, with a mean value equal to 0.27 (±0.02) were found on loamy sand for a pressure head equal to 16 kPa and drop energy of 0.49 mJ.

Analysing the relationships shown in Fig. 2, it can be seen that, in general, as the moisture content of the samples increased, the values of the determined quantities also increased. Based on the data in Table 2, it can be concluded that the moisture content factor was decisive (in three cases, the influence was determined as "large" and in one case as "medium"). The texture had a significant (at the level classified as "medium") effect on crater circularity. None of the other factors (drop energy or the combination of tested factors) had a significant effect on the measured quantities.

4. Discussion

4.1. Crater volume

To the best of the authors' knowledge, in the previous research, the volume of craters formed after the impact of water drops on the soil surface was calculated based on the depth and diameter of the deformation. Such calculations assumed that the crater shape is a hemisphere cap (Ghadiri 2004; Beczek et al. 2018). With the results of the actual crater volumes obtained from the recorded scans, we made a comparison with the volumes calculated according to the works cited above (the diameters and depths determined by the scanner measurements were entered into the appropriate formulas). These calculations were found to overestimate the crater volume by an average of about 23%.

The source of these discrepancies was the shape of the craters, which deviated from the cap of the hemisphere. The irregularity of the resulting deformations can be linked to i) irregularity of the crater edge (confirmed by circularity – Fig. 2C); the more the circularity value deviates from 1, the more the crater outline on the surface differs from the circle, and ii) actual formation of the craters' interior; the irregular shape of the walls and bottom of the craters differed from the smooth interior of the hemispheres.

4.2. Influence of initial soil moisture on deformation

Before discussing the influence of the initial moisture content on cratering, it should be noted that the presented research assumed work on samples with a structure less complicated than in the undisturbed soil. This is related to the preliminary nature of the study, the use of limited-volume samples, the procedure for pre-treating the soil, i.e., sieving it through a sieve, and the method for preparing samples with specified moisture content. This means that the analysis of the effect of soil aggregate stability or the slaking effect (Xiao et al., 2017, 2018) on the results is beyond the scope of this paper.

The drop impact caused deformations of the soil surface in all considered variants of the experiment. The shapes and sizes of the craters varied with the changes in the initial moisture content of the samples, the particle size distribution of the soils, and the energy of the drops. However, as previously mentioned, among the analysed factors, it was the initial moisture content of the samples that had the greatest influence on the determined quantities (Fig. 2 and Table 2).

The volumes and depths of the craters formed in soils with the lowest moisture content (corresponding to a pressure head equal to 16 kPa) were the smallest and did not differ statistically significantly for either variant of drop energy. Therefore, one can conclude that in the above cases, cohesion and friction between soil particles were sufficiently high to significantly counteract the movement of particles due to drop impact. These results confirmed our previous work where, for Haplic Luvisol (Siltic) soil samples, craters with the smallest volume were obtained at analogous moisture contents (corresponding to a pressure head equal to 16 kPa), and their diameters did not vary for the considered drop energy variants (Beczek et al., 2018). However, the effect of the drop energy on the craters' diameters formed in the cited experiment was more pronounced for samples with higher moisture content. In Zhang et al. (2015), the authors motivated the limitation of the saturation range they analysed (they conducted the study in very dry samples, where saturation values did not exceed 1%) by the yield stress of the bed (in the case of the cited work, it was related to the resistance of the deposit to non-reversible deformation due to mechanical stress), which prevented the drop from causing surface deformation. With the increase in the moisture, the dimensions of the craters formed in their experiment gradually decreased. Takita and Sumita (2013) investigated the relationship between bed moisture content (sand with a grain diameter of 0.204 ± 0.002 mm) and the size of craters formed after the impact of a stainless steel sphere (spheres were dropped from heights ranging from 78 to 1690 mm). Despite the differences between the steel impactor and the drop, it should be noted that according to the above work, the increase in the bed moisture content (starting from a completely dry bed) was first associated with a decrease in, amongst others, the crater diameter, while after exceeding the limiting moisture content (saturation >70%), the trend was reversed, i.e., with the increase in moisture content beyond this saturation point, the size of the craters increased. Taking into account the cited works, it can be assumed that the moisture content considered in our experiments corresponding to the pressure head equal to 16 kPa was close to the mentioned limiting value, above which the dimensions of the craters followed an increasing trend.

The research conducted by Ghadiri (2004) included an analysis of craters formed on dry or saturated sand beds and soils. The author indicated the shear strength of a target as one of the main factors determining the size of formed craters. In contrast, Zhang et al. (2015) emphasized the importance of compressive stresses for impact cratering. The information presented in both cited works is in agreement with our observation that, probably, the changes in the mechanical properties of the beds, which may have been caused by a decrease in the soil cohesion and the formation of a water layer on the surface of the grains of material used, which facilitated their movement, were the reasons for the significant influence of moisture on the obtained results.

4.3. Influence of soil texture on deformation

The soil texture affected the circularity of the crater cross-sections. The most regular craters were formed on soil with the highest silt and clay content. Moreover, the circularity value increased with the initial moisture content and the drop energy. Presumably, the small grain size and high moisture content of the samples facilitated the uniform

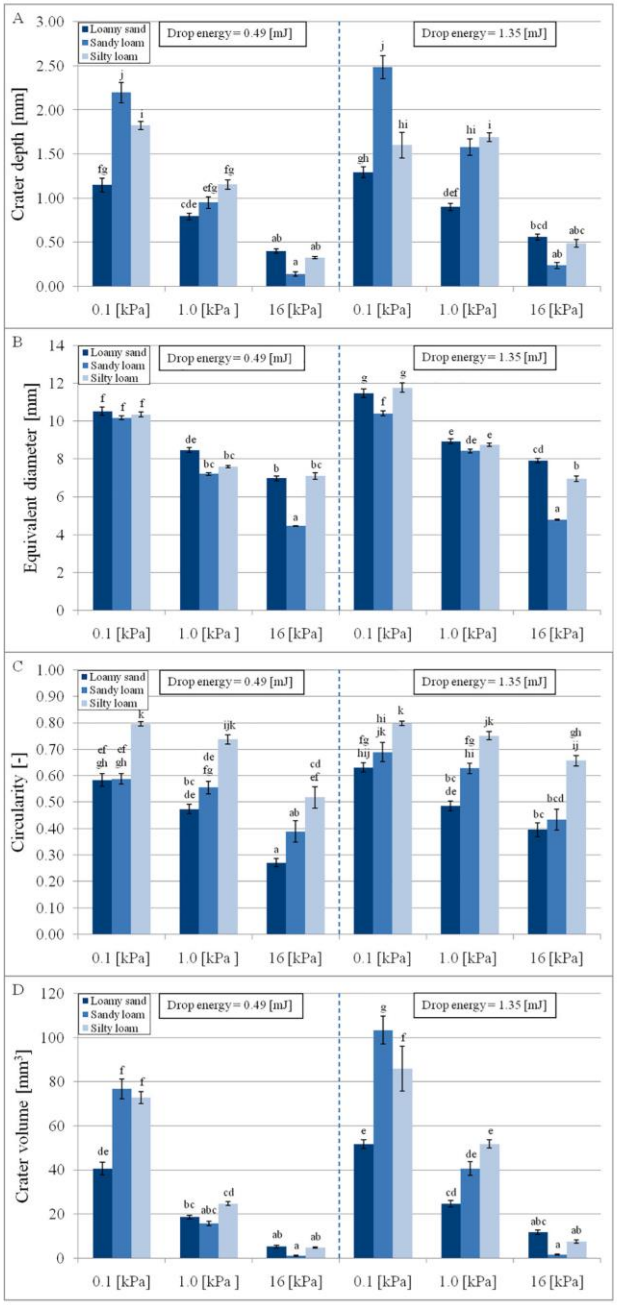


Fig. 2. Average values of the determined quantities: A – depth of craters; B – equivalent diameter; C – circularity; D – volume of craters. Bars indicate standard errors. The results of Tukey's post-hoc test are shown by the letters above the bars.

Table 2
Effects of individual factors and their combinations on the determined quantities based on the values of the ω^2 coefficient and its interpretation according to Cohen's scale.

Crater quantity	Effect size for:						
	Texture	Moisture	Drop energy	Texture/Moisture	Texture/Drop energy	Moisture/Drop energy	Texture/Moisture/Drop energy
Depth	0.070 Very small or none	0.732 Large	0.024 Very small or none	0.136 Small	0.003 Very small or none	0.012 Very small or none	0.011 Very small or none
Equivalent diameter	0.099 Very small or none	0.804 Large	0.032 Very small or none	0.047 Very small or none	0.000 Very small or none	0.003 Very small or none	0.009 Very small or none
Circularity	0.454 Medium	0.454 Medium	0.044 Very small or none	0.006 Very small or none	−0.002 Very small or none	0.007 Very small or none	0.009 Very small or none
Crater volume	0.052 Very small or none	0.787 Large	0.045 Very small or none	0.085 Very small or none	0.003 Very small or none	0.012 Very small or none	0.006 Very small or none

influence of drop energy, thereby ejecting particles from areas occurring at similar distances from the impact point. The lower circularity of the craters formed on loamy sand and sandy loam may have been due to the relatively high variation in the size (mass) of the grains. This, in turn, affected the value of the force required to move them, and also the fact that the ejection of one large grain increased the irregularity of the contour.

The effect of grain size on the drop behaviour after impact on the beds was also noted in the work of Delon et al. (2011). According to their results, at a sufficiently large grain size, the energy delivered by the drop was not enough to displace them. An issue that seems interesting but is beyond the scope of this work is whether the irregular shape of the craters is related to the occurrence of preferred particle ejection directions during splashes?

The extreme crater volume results for sandy loam may have been partly related to the presence of inorganic carbon and higher organic carbon content in this soil (compared with the other used soils). As shown by Li et al. (2021), organic carbon content affects the ability of soil to resist mechanical striking and slaking. The interpretation of the potential effect of inorganic carbon is more complicated. As demonstrated in studies conducted by Yadav and Girdhar (1981) and Aziz and Karim (2016), the presence of carbonates has the effect of increasing the stability of aggregates, consequently resulting in higher soil resistance to erosion. However, the results presented by Saedi et al. (2016) show an opposite effect of carbonates, i.e., enhancement of the splash.

4.4. Influence of different moisture contents and drop energies on the deformation susceptibility of used soils

Modifying the drop impact energy and sample moisture changed the deformation resistance of each soil to varying degrees. Based on the volume of the craters (more precisely, the difference between the max and min value of the volume for each soil), it was noted that the range of considered factors had the lowest effect on changing the deformations formed on loamy sand, which is the material containing the most sand fraction. The opposite trend was characteristic of the sandy loam – craters formed on this soil were distinguished by the greatest variability. Comparison of maximum (103.40 $mm^3 \pm 6.42$ mm^3) and minimum (0.97 $mm^3 \pm 0.27$ mm^3) values indicated that the results differed by more than 100-fold. These results highlight the effect of the considered factors on the soil deformation and the change in their susceptibility to erosion.

4.5. Influence of drop energy on deformation

Considering the ω^2 coefficient (Table 2), with the included variants of the experiment, the drop energy had the lowest influence on the determined values among all the analysed factors. Although the change of the drop's energy resulted in an increase of the average value of almost all quantities, statistically significant differences caused by the change of the drop's free fall height were observed in only a small number of cases (Fig. 2). Thus, it can be assumed that the influence of other factors was enough to overshadow the effect of the drop energy.

De Jong et al. (2017) reported that the sizes and shapes of the deformations were significantly dependent on drop energy. A similar observation was made in the work of Delon et al. (2011). However, both works used beds prepared from dry sand or glass beads, and the energies of the used drops were smaller than in our study (due to the lower diameters and velocities). Moreover, taking into account the differences in the shape of craters formed on dry samples (the cavity is filled by material wetted by the drops, all surrounded by a rim) and wet samples (the empty cavity surrounded by a rim), which were discussed in Mazur et al. (2020), it is difficult to compare the effect of the drop's energy considered in the above works with our results.

5. Conclusions

The presented study was conducted to determine the effect of drop energy on the surface deformation of soil samples varied by texture and initial moisture content. Measurements were made using a surface scanner, and craters were characterized based on their depth, volume, equivalent diameter, and circularity of the cross-sections.

Based on the results and statistical analysis, the moisture content of the samples was the factor with the highest influence on the determined quantities.

The soil texture had the highest influence on the circularity of crater cross-sections. Lower sand fraction content resulted in increasing circularity. However, for the soil containing the highest amount of sand fraction – loamy sand, the lowest increase in crater volume due to changes in the analysed factors was recorded.

The increase in energy of the impacting drops, modified by the height of their free fall, translates into an increase in the average value of the measured parameters in most variants. Nonetheless, the effect was quite small, resulting in statistically significant differences in only some cases.

The resulting data can support the development of erosion models (being a step towards the quantitative description of soil susceptibility to

deformation caused by the impact of the drops) and increase the state of knowledge about the common yet complex process that is the splash. Furthermore, the presented analyses may provide a further step in physically describing the splash effects and relating this phenomenon to subsequent stages of water erosion.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

Funding: This work was partially supported by: a) the National Science Centre, Poland within the framework of project no. 2020/37/N/ST10/03363; b) Statutory Research of Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences and c) Fund for Science and Research of Lublin University of Technology.

References

Ahn, S., Doerr, S.H., Douglas, P., Bryant, R., Hamlett, C.A.E., McHale, G., Newton, M.I., Shirtcliffe, N.J., 2013. Effects of hydrophobicity on splash erosion of model soil particles by a single water drop impact. Earth Surf. Process. Landforms 38, 1225–1233. https://doi.org/10.1002/esp.3364.

Aziz, S.A., Karim, S.M., 2016. The effect of some soil physical and chemical properties on soil aggregate stability in different locations in Sulaimani and Halabja Governorate. Open J. Soil Sci. 6, 81–88. https://doi.org/10.4236/ojss.2016.64009.

Beczek, M., Ryżak, M., Lamorski, K., Sochan, A., Mazur, R., Bieganowski, A., 2018. Application of X-ray computed microtomography to soil craters formed by raindrop splash. Geomorphology 303, 357–361. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.019.

Beczek, M., Ryżak, M., Sochan, A., Mazur, R., Bieganowski, A., 2019. The mass ratio of splashed particles during raindrop splash phenomenon on soil surface. Geoderma 347, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.028.

Beczek, M., Ryżak, M., Sochan, A., Mazur, R., Polakowski, C., Hess, D., Bieganowski, A., 2020. Methodological aspects of using high-speed cameras to quantify soil splash phenomenon. Geoderma 378, 114592. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114592.

Bieganowski, A., Ryżak, M., Sochan, A., Barna, G., Hernádi, H., Beczek, M., Polakowski, C., Makó, A., 2018. Laser Diffractometry in the Measurements of Soil and Sediment Particle Size Distribution, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 215–279. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.04.003.

Chua, A.M., Tokura, T., 2004. Total Organic Carbon in soil. Customer Support Centre, Shimadzu (Asia Pacific), Pte. Ltd. Introduction.

Cohen, J., 1988. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd Edition. Routledge, New York. https://doi.org/10.4324/9780203771587.

de Jong, R., Zhao, S.-C., van der Meer, D., 2017. Crater formation during raindrop impact on sand. Phys. Rev. E 95, 042901. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.042901.

Delon, G., Terwagne, D., Dorbolo, S., Vandewalle, N., Caps, H., 2011. Impact of liquid droplets on granular media. Phys. Rev. E 84, 046320. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.046320.

Ekwue, E.I., Seepersad, D., 2015. Effect of soil type, peat, and compaction effort on soil strength and splash detachment rates. Biosyst. Eng. 136, 140–148. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.06.004.

Erpul, G., Gabriels, D., Cornelis, W.M., Samray, H.N., Guzelordu, T., 2008. Sand detachment under rains with varying angle of incidence. Catena 72, 413–422. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.008.

Fernández-Raga, M., Campo, J., Rodrigo-Comino, J., Keesstra, S.D., 2019. Comparative analysis of splash erosion devices for rainfall simulation experiments: A laboratory study. Water 11, 1228. https://doi.org/10.3390/w11061228.

Fernández-Raga, M., Fraile, R., Keizer, J.J., Varela Teijeiro, M.E., Castro, A., Palencia, C., Calvo, A.I., Koenders, J., Da Costa Marques, R.L., 2010. The kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: An application to splash erosion. Atmos. Res. 96 (2-3), 225–240.

Fox, D.M., Darboux, F., Carrega, P., 2007. Effects of fire-induced water repellency on soil aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. Hydrol. Process. 21, 2377–2384. https://doi.org/10.1002/hyp.6758.

Furbish, D.J., Hamner, K.K., Schmeeckle, M., Borosund, M.N., Mudd, S.M., 2007. Rain splash of dry sand revealed by high-speed imaging and sticky paper splash targets. J. Geophys. Res. 112, F01001. https://doi.org/10.1029/2006JF000498.

Ghadiri, H., 2004. Crater formation in soils by raindrop impact. Earth Surf. Process. Landforms 29, 77–89. https://doi.org/10.1002/esp.1014.

Ghahramani, A., Ishikawa, Y., Gomi, T., Shiraki, K., Miyata, S., 2011. Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope: A plot-scale study. Catena 85, 34–47. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.11.005.

Goebes, P., Seitz, S., Geißler, C., Lassu, T., Peters, P., Seeger, M., Nadrowski, K., Scholten, T., 2014. Momentum or kinetic energy – How do substrate properties influence the calculation of rainfall erosivity? J. Hydrol. 517, 310–316. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.031.

Hamlett, C.A.E., Atherton, S., Shirtcliffe, N.J., McHale, G., Ahn, S., Doerr, S.H., Bryant, R., Newton, M.I., 2013. Transitions of water-drop impact behaviour on hydrophobic and hydrophilic particles. Eur. J. Soil Sci. 64, 324–333. https://doi.org/10.1111/ejss.12003.

Hardy, R.A., James, M.R., Pates, J.M., Quinton, J.N., 2017. Using real time particle tracking to understand soil particle movements during rainfall events. Catena 150, 32–38. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.005.

Katsuragi, H., 2011. Length and time scales of a liquid drop impact and penetration into a granular layer. J. Fluid Mech. 675, 552–573. https://doi.org/10.1017/jfm.2011.31.

Keren, G., Lewis, C., 1979. Partial omega squared for ANOVA designs. Educ. Psychol. Meas. 39 (1), 119–128. https://doi.org/10.1177/001316447903900116.

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 No. 106. FAO, Rome, Italy. ISBN 978–92–5–108369–7.

Lardier, N., Roudier, P., Clothier, B., Willmott, G.R., 2019. High-speed photography of water drop impacts on sand and soil. Eur. J. Soil Sci. 70, 245–256. https://doi.org/10.1111/ejss.12737.

Li, H., Liu, G., Gu, J.u., Chen, H., Shi, H., Abd Elbasit, M.A.M., Hu, F., 2021. Response of soil aggregate disintegration to the different content of organic carbon and its fractions during splash erosion. Hydrol. Process. 35 (2).

Long, E.J., Hargrave, G.K., Cooper, J.R., Kitchener, B.G.B., Parsons, A.J., Hewett, C.J.M., Wainwright, J., 2014. Experimental investigation into the impact of a liquid droplet onto a granular bed using three-dimensional, time-resolved, particle tracking. Phys. Rev. E 89, 032201. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.032201.

Ma, B., Yu, X., Ma, F., Li, Z., Wu, F., 2014. Effects of Crop canopies on rain splash detachment. PLoS ONE 9, e99717. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099717.

Mazur, R., Ryżak, M., Sochan, A., Marciszuk, K., Beczek, M., Lamorski, K., Bieganowski, A., 2020. Surface deformation and displacement of bed elements during splash – Model tests. Catena 185, 104277. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104277.

Nefzaoui, E., Skurtys, O., 2012. Impact of a liquid drop on a granular medium: Inertia, viscosity and surface tension effects on the drop deformation. Exp. Therm. Fluid Sci. 41, 43–50. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.007.

Parlak, M., Özaslan Parlak, A., 2010. Measurement of splash erosion in different cover crops. Turk. J. Field Crops 15, 169–173.

Quansah, C., 1981. The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport. J. Soil Sci. 32, 215–224. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1981.tb01701.x.

Ryżak, M., Bieganowski, A., Polakowski, C., 2015. Effect of soil moisture content on the splash phenomenon reproducibility. PLoS ONE 10, e0119269. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119269.

Sadeghi, S.H., Kiani Harchegani, M., Asadi, H., 2017. Variability of particle size distributions of upward/downward splashed materials in different rainfall intensities and slopes. Geoderma 290, 100–106. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.007.

Saedi, T., Shorafa, M., Gorji, M., Khalili Moghadam, B., 2016. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran: a laboratory study. Geoderma 271, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.008.

Takita, H., Sumita, I., 2013. Low-velocity impact cratering experiments in a wet sand target. Phys. Rev. E 88, 022203. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.022203.

Terry, J.P., 1998. A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. Soil Res. 36, 525. https://doi.org/10.1071/S97078.

Wei, Y., Wu, X., Cai, C., 2015. Splash erosion of clay–sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure. Catena 135, 254–262. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.003.

Wyser, E., Carrea, D., Jaboyedoff, M., Pudasaini, S.P., 2019. Cratering response during droplet impacts on granular beds. Eur. Phys. J. E 42, 111. https://doi.org/10.1140/epje/i2019-11877-8.

Xiao, H., Liu, G., Abd Elbasit, M.A.M., Zhang, X.C., Liu, P.L., Zheng, F.L., Zhang, J.Q., Hu, F.N., 2017. Effects of slaking and mechanical breakdown on disaggregation and splash erosion: Effects of splash erosion on aggregate breakdown. Eur. J. Soil Sci. 68, 797–805. https://doi.org/10.1111/ejss.12482.

Xiao, H., Liu, G., Zhang, Q., Fenli, Z., Zhang, X., Liu, P., Zhang, J., Hu, F., Abd Elbasit, M. A.M., 2018. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess plateau of China. Soil Tillage Res. 178, 150–158. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.026.

Yadav, J.S.P., Girdhar, I.K., 1981. The effect of different magnesium–calcium ratios and sodium adsorption values of leaching water on the properties of calcareous soils versus non-calcareous soils. Soil Sci. 131, 194–198.

Zambon, N., Johannsen, L.L., Strauss, P., Dostal, T., Zumr, D., Cochrane, T.A., Klik, A., 2021. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. Catena 196, 104827. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104827.

Zhang, Q., Gao, M., Zhao, R., Cheng, X., 2015. Scaling of liquid-drop impact craters in wet granular media. Phys. Rev. E 92, 042205. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.042205.

Zhao, R., Zhang, Q., Tjugito, H., Cheng, X., 2015a. Granular impact cratering by liquid drops: Understanding raindrop imprints through an analogy to asteroid strikes. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 112, 342–347. https://doi.org/10.1073/pnas.1419271112.

Zhao, S.-C., de Jong, R., van der Meer, D., 2015b. Raindrop impact on sand: a dynamic explanation of crater morphologies. Soft Matter 11, 6562–6568. https://doi.org/10.1039/C5SM00957J.

7.4. Tekst publikacji P.4

Catena 255 (2025) 109005

Contents lists available at ScienceDirect

Catena

journal homepage: www.elsevier.com/locate/catena

The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content

Rafał Mazur, Magdalena Ryżak, Agata Sochan, Michał Beczek, Cezary Polakowski, Andrzej Bieganowski *

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:
Splash erosion
Raindrop impact
Crater
Global warming

ABSTRACT

The splash phenomenon occurs when water drops hit the soil surface, making it the initial stage of most types of soil erosion caused by water. An effect of this phenomenon, in addition to the detachment and displacement of soil particles, is also the deformation of the soil surface. Climate change (including the occurrence of periods of very high temperatures) can affect the intensity of soil erosion processes. The aim of this work is to determine the influence of selected temperature conditions on soil surface deformation caused by the splash phenomenon at the initial stage of erosion. The goal was achieved by measuring the morphology of craters formed by the impact of a single drop. The research included the use of three soils varying in particle size distribution: loamy sand, sandy loam, and silty loam. Additionally, the work took into account two variants of initial soil moisture and three temperature conditions (including various temperatures of soil, air, and drop-forming water). The measurements were taken with a 3D scanner, determining depth, equivalent diameter, volume of the craters, and a dimensionless parameter α (depth-to-diameter ratio). Temperature effects were observed in silty loam, where craters became wider (from average diameter of 9.41 ± 0.31 to 10.47 ± 0.21 mm for pF = 1) but shallower (from average depth of 1.28 ± 0.05 to 1.00 ± 0.05 mm for pF = 1) with increasing temperature, and in loamy sand, where temperature influenced the differences in diameter and volume of craters formed between varying moisture conditions. The differences in crater morphology could be due to the influence of temperature on the viscosity and surface tension of water, which may have led to a change in susceptibility to deformation. The results provide an opportunity to better understand the evolution of erosion in the context of different thermal conditions and thus in some perspective on the impact of climate change.

1. Introduction

Soil erosion is one of the main causes of soil degradation. The process involves the detachment and displacement of material from a damaged soil profile, followed by its final accumulation in a new location. Examples of the erosion's effects include reduced fertility of agricultural land, disruption of the water cycle by decreased retention, or the destruction of animal and plant habitats (Amundson et al., 2015; Pimentel, 2006). Among the number of factors that can cause erosion, i.e. water, wind, freeze–thaw, and tillage, Sartori et al. (2024) assessed soil loss induced by water erosion as a key threat to land degradation worldwide. Factors important to the course of water erosion include vegetation cover, slope angle and length, particle size distribution, soil moisture or compaction, and rainfall erosivity (Beczek et al., 2024; Huffman et al., 2013; Panagos et al., 2015; Zachar, 1982). Ongoing climate change prompts the consideration of another factor – temperature.

Of the wide range of processes accompanying climate change, it appears that alternating periods of drought and heavy rain may have the greatest impact on erosion (Rendana et al., 2024; Trnka et al., 2016; Vasquez et al., 2024; Zhao et al., 2024). Research on these aspects is reflected in models describing soil erosion caused by water (Aygün et al., 2021; Borrelli et al., 2020; Chapman et al., 2021; Ciampalini et al., 2020; Dash and Maity, 2023; Guo et al., 2019; Li and Fang, 2016; Marcinkowski et al., 2022; Vinaya Kumar and Mahantesh, 2021). However, most of these studies focus on the macro scale, i.e. they describe the erosion phenomenon at the scale of countries, catchments, or experimental fields.

Much less work focuses on the smaller scale. This area of research is mainly conducted using rainfall simulators (Rončević et al., 2023).

* Corresponding author at: Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, Poland.
E-mail address: a.bieganowski@ipan.lublin.pl (A. Bieganowski).

https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109005
Received 9 December 2024; Received in revised form 24 March 2025; Accepted 27 March 2025
0341-8162/© 2025 Elsevier B.V. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

Sachs and Sarah (2017a, 2017b) analysed surface runoff at different precipitation temperatures and initial soil moisture contents. As shown by the above authors, an increase in simulated rainfall temperature from 2 to 20 °C resulted in a threefold increase in the sediment yield in loamy soil that had previously been wetted to field capacity. The role of temperature has also been analysed in the context of the stability of soil aggregates and the mechanisms that cause their breakdown. Dowdeswell-Downey et al. (2023) reported that an increase in temperature increased the stability of soil aggregates in clay soil, which was not observed in the sandy loam soil where the moisture content was important, an increase which resulted in a decrease in aggregate stability. Li et al. (2022) indicated that an increase in temperature of drops enhanced the slaking process, i.e. the disintegration of aggregates under the influence of their contact with water, thus increasing the amount of material susceptible to displacement through erosion. The aforementioned works indicate that temperature, in addition to indirectly influencing erosion (e.g. the occurrence of heavy rains), can also affect the course of erosion processes directly, and this issue requires further research.

Relatively few works are also devoted to research of the initial phase of water erosion – i.e. the effect caused by a single drop hitting the soil surface. This area of study is commonly referred to as splash erosion (Fernández-Raga et al., 2017; Laburda et al., 2021; Marzen and Iserloh, 2021). Splash erosion basically includes two groups of processes: displacement of soil particles (Legout et al., 2025) and deformation of the soil in the immediate vicinity of the place where the drop hits (Mazur et al., 2022).

Soil deformation caused by the hitting drop is usually called a crater (Katsuragi, 2016; Long et al., 2014). Its formation is an important part of the splash energy balance, consuming between 5 and 22 % of the drop energy (Ghadiri, 2004), and the analysis of craters is crucial to better understand splash and its relation to other erosion stages. The importance of crater research can be emphasised by the following two issues: i) craters are formed by the detachment of soil material that is displaced by the splash phenomenon and susceptible to further transport by subsequent erosion stages – this raises the question about the relationship of craters with the susceptibility to erosion and the amount of ejected material, ii) the size of craters is due not only to the loss of soil but also to the compaction and sealing of the surface at the drop impact point, contributing to the formation of a water layer that reduces splash and triggers surface runoff – this relates to the effect of craters not only on splash but also on other erosion stages (Zambon et al., 2021). Among other things, crater studies focus on determining the significance of selected bed properties (e.g. moisture content, compaction, particle size distribution) or drop parameters (e.g. size, energy) on surface deformation. Sochan et al. (2023) analysed the change in surface properties of the soil, including its temperature-induced hydrophobicity (in the context of fire) and its subsequent effect on splash and surface deformation as a result of drop impact. The craters are mainly described by the geometrical parameters, i.e. diameter, depth, volume (Delon et al., 2011; Ghadiri, 2004; X. Li et al., 2024; Lv et al., 2023; Mazur et al., 2022; R. Zhao et al., 2015) obtained by various measurement techniques like a 3D scanner, profilometers, or computed tomography (Beczek et al., 2018; Katsuragi, 2010; Wyser et al., 2019; Zhang et al., 2015; S.C. Zhao et al., 2015).

One of the effects of climate change observed worldwide is the increasing frequency of extreme weather events in recent years (Furtak and Wolińska, 2023). This is manifested, among other things, by increasingly frequent and longer episodes of extreme temperature (Perkins-Kirkpatrick et al., 2024). In the context of erosion processes, it is therefore relevant to ask whether the temperature influences soil deformation after drop hitting the soil surface and, if so, to what extent it is significant. The reasons for establishing these studies mainly concern the influence of temperature on the viscosity and surface tension of water present in both the soil and the drop (Dinçer and Zamfirescu, 2016; Haynes, 2014; Kestin et al., 1978; Vargaftik et al., 1983). We hypothesised that changes in these water properties in a drop may result in easier or more difficult breakup of the drop, which in turn causes greater or smaller force acting on soil particles in the immediate vicinity of the drop impact. In turn, changes in the properties of water in the soil may result in a smaller or larger cohesive strength of the substrate and, therefore, in easier or more difficult detachment of soil particles from the surface and greater or smaller surface deformation upon the impact. Moreover, to the best of the authors' knowledge, there are no studies focusing on the influence of temperature on the deformation caused by a single drop during the splash phenomenon.

The aim of this study was to determine the effect of selected temperature conditions on surface deformations (craters) formed by drop impact on soils with varying texture and moisture content. The considered thermal variants took into account changes in the temperature of the soil, the water forming the drops, and the air. A deeper understanding of the deformation process will result in a better understanding of splash and its relationship to other erosion stages, e.g. surface runoff.

2. Materials and methods

The study included three soils classified according to the IUSS Working Group WRB (2015) as Haplic Luvisol (54°20′N, 17°02′E; altitude 71.9 m; average annual rainfall around 700 mm), Nudiargic Luvisol (51°19′N, 17°00′E; altitude 201.1 m; average annual rainfall around 550 mm), and Dystric Cambisol (51°02′N, 22°36′E; altitude 256.6 m; average annual rainfall around 600 mm) (Falarz, 2021). A map with the soil sampling locations is shown in Fig. 1. Soil samples were collected from a depth of 5–15 cm. The selection of soil material was based on the following criteria: origin from areas threatened by surface water erosion, diversity of texture, and similar organic carbon content. The particle size distribution of the soils was measured using the laser diffraction method on a Mastersizer 2000 device (Malvern, UK), according to settings provided by Sochan et al. (2012). Total organic carbon content and the absence of inorganic carbon were measured using a TOC VCPH analyser coupled with an SSM5000 solid sample combustor (Shimadzu, Japan) (Chua and Tokura, 2004). The basic properties of the soils used in the study are presented in Table 1.

After collection from the field, the soil material was air-dried and sieved through a 2 mm mesh. The initial moisture variants assumed in the experiment corresponded to a pressure head of 16 kPa (field capacity; pF = 2.2) and 1 kPa (near saturation conditions; pF = 1). The gravimetric water content for each soil corresponding to the selected

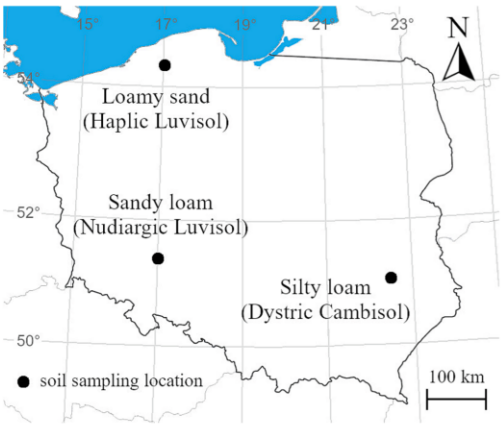


Fig. 1. Map of Poland with marked soil sampling locations.

Table 1
Characteristics of the soil materials.

Soil Unit According to WRB*	Soil texture	Particle size distribution [% vol.]			TOC [%]	IOC [%]	Gravimetric water content [%]	
		Sand 2–0.05 mm	Silt 0.002–0.05 mm	Clay < 0.002 mm			For press. head = 1 [kPa]	For press. head = 16 [kPa]
Dystric Cambisol	Silty loam	25.96	68.03	6.01	0.80	0.00	33.00	24.44
Nudiargic Luvisol	Sandy loam	58.21	37.99	3.80	0.75	0.00	21.49	18.76
Haplic Luvisol	Loamy sand	81.59	16.60	1.81	0.80	0.00	18.97	16.91

* World Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2015); TOC – total organic carbon; IOC – inorganic carbon

pressure head is shown in Table 1. The moisture levels were achieved by adding an appropriate amount of water to the weighed dry soil material based on previously determined water retention curves. The soil and water were mixed and placed in aluminium rings with an internal diameter of 56 mm and a height of 10 mm. The soil material was placed inside the ring by one person to reduce human error and variation in densities resulting from the manual method of preparation. The soil surface in the rings was gently levelled with a ruler to avoid the influence of local irregularities on crater formation. The soil, the water added to the soil, aluminium rings, and other accessories required for sample preparation were stored in an incubator with cooling option, so that the temperature of the individual elements was compatible with the thermal variant being realised (Table 2). The water for drop formation was stored in another incubator if necessary.

Three thermal variants were considered involving the temperature of the soil, the air in the laboratory, and the water forming the falling drops (Table 2). The temperatures were chosen to refer to the conditions of natural rainfall occurring in different seasons in the temperate climate, which is also found in Poland, wherefrom the soils used in the study originated (Falarz, 2021). Variant 1 referred to rainfall that may occur in winter/spring, variant 2 referred to rainfall that could occur in late spring/summer, and variant 3 referred to precipitation on hot summer days and high temperatures that can be linked to global warming. The differences in the drop, soil, and air temperatures within a single thermal variant are related to the fact that they are also not the same during natural rainfall. This concerns in particular the initial phase of rainfall, which is important for this work since soil erosion occurring at the beginning of rainfall is caused by the splash phenomenon preceding surface runoff. The minimum temperatures were chosen to ensure the liquid state of the water forming the drops and that contained in the soil (no locally freezing processes). Maximum drop temperatures of 25 °C were set based on temperatures reached by natural rain, which are associated with the wet bulb temperature (Anderson et al., 1998; Gosnell et al., 1995; Kincaid and Longley, 1989). The air temperature was set to 5 degrees warmer than the water from which the drops were formed. The choice of air temperature also took into account the wet bulb temperature occurring at around 55–65 % air humidity, which was maintained in the laboratory during the experiments. The soil temperatures reflected the influences of changes in air temperature and solar heating of the surface during particular seasons, resulting in increasing differences in temperature between the soil and the drops in warmer variants. The maximum soil temperature was based on data showing that this value can exceed 40 °C for the surface in summer (O'Brien and Hatfield, 2020).

Laboratory conditions were controlled by a heating and air-conditioning system. Furthermore, measurements in thermal variant 1 were carried out in winter by pre-cooling the room, while measurements in thermal variant 3 were carried out in summer. The conditions were additionally monitored with a set of independently working instruments, including a thermohygrobarometer LB-706B (LAB-EL, Poland) and traditional indoor thermometer to ensure that the temperature difference did not exceed 2 degrees from the assumed values.

Table 2
Characteristics of the thermal variants of the experiment.

Thermal variant	Temperature of soil [°C]	Temperature of the drop forming water [°C]	Temperature of air [°C]
Variant 1	5	5	10
Variant 2	20	15	20
Variant 3	40	25	30

The accepted deviation from the assumed values was 2 °C.

The experiments included drops with a diameter of 4.3 mm (standard error, SE ± 0.02 mm) that fell freely from a height of 7 m (Fig. 2). The velocity of the impacting drop was 8.31 $m{\cdot}s^{-1}$ (SE ± 0.02 $m{\cdot}s^{-1}$), which was approximately 93 % of the terminal velocity (according to Epema and Riezebos (1983)), while its kinetic energy was 1.40 mJ (SE ± 0.02 mJ). A Phantom Miro 310 high-speed camera set (Vision Research, USA) was used to monitor drop diameter and impact velocity. According to the high-speed camera measurements, the considered temperature range did not result in differences in drop energy between the thermal variants of the experiment (supplementary Table S1). The crater measurements focused on the effect of a single-drop impact. After the single drop impact, the sample was scanned using a Scan3D UNIVERSE 10 Mpix (Smarttech 3d, Poland) with sampling of 655 $points{\cdot}mm^{-2}$ (0.039 mm between points) (Fig. 2). Only central impacts of single drops were included in the study, i.e. craters undisturbed by the edge of the ring or previous impacts of other drops. For each combination of experimental conditions (three soils, two initial moisture levels, three thermal variants), 10 samples were analysed, resulting in a total of 180 repetitions.

The scan of each sample included six point clouds reflecting its geometry. Between the acquisition of consecutive clouds, the ring with soil was rotated by 60° using a rotary table that cooperated with the scanner. The collected data was pre-processed by removing measurement errors, calibrating the clouds to each other, and generating triangle meshes. Smarttech3D Measure software (Smarttech, Poland) was used to register and process the point clouds. Measurements on the triangle meshes, including the determination of the depth and volume of the craters, were carried out in the Geomagic Control 2015 software (3D Systems, USA). In addition, based on cross-sections of the craters taken at the level of the reference surface (understood as the sample surface before the drop impact), the *equivalent diameter* of the craters (Eq. (1) was determined using ImageJ software (National Institute of Health, USA). The obtained results were used to calculate the dimensionless parameter α (Eq. (2), which is the shape factor of the craters determined by the ratio of their depth to diameter. Fig. 3 shows the data processing flow chart, while Fig. 4 shows complementary visualisations of the specific steps.. The adopted measurement procedures were based on the methodology presented in Mazur et al. (2022).

$$Equivalent\ diameter = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{h}{d} \tag{2}$$

where: A – crater cross-sectional area at the level of the reference surface (mm^2); h – depth of the crater (mm); d – diameter of the crater (mm)

Statistical analysis was performed using Statistica 13.1 software (TIBCO Software Inc., USA). The normality of the data distribution was verified with the Shapiro-Wilk test. Multi-factor ANOVA and Tukey's

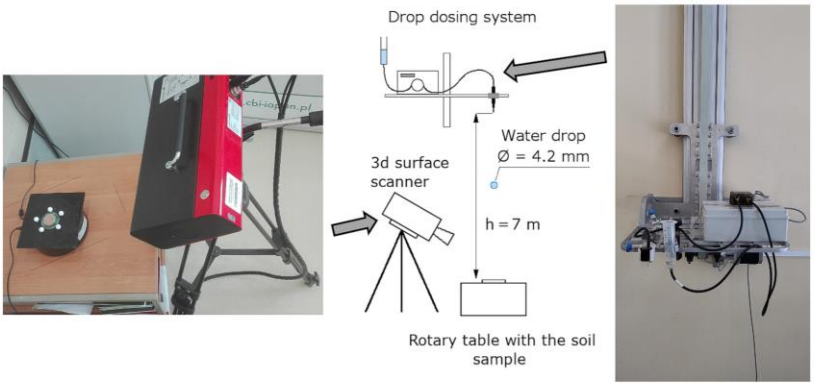


Fig. 2. Diagram of the measuring stand with a picture of the surface scanner (left) and the drop dispensing system (right).

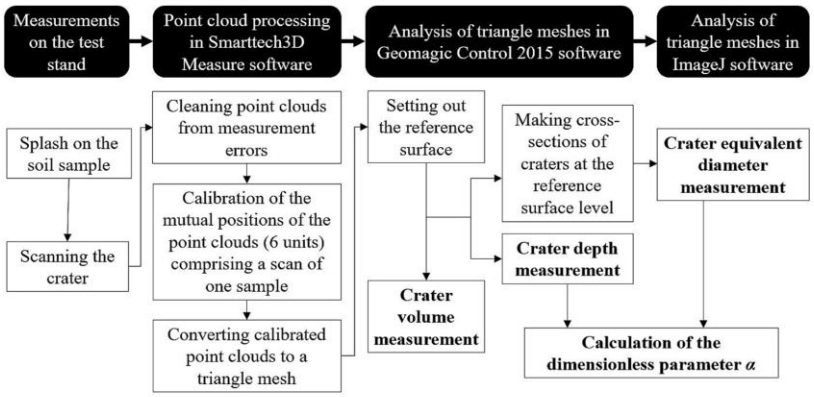


Fig. 3. Flow chart of data processing.

post-hoc test (for an assumed statistical significance level of 0.05) were used to determine the presence of statistically significant differences between the results obtained from the investigated variants.

3. Results

The craters formed by the impact of the drop were characterised by four quantities: depth, equivalent diameter, α parameter, and volume. According to the results of the multi-factor ANOVA (Table 3), an individual effect of temperature was only present for crater diameters (value below the statistical significance level of 0.05). However, for each measured crater quantity, a statistically significant interaction of temperature with other factors was found, i.e. i) texture combined with temperature, ii) moisture combined with temperature, and iii) a combined effect of texture, moisture, and temperature. Temperature may therefore have influenced the effect of the other factors by strengthening or weakening them, which formed the basis for performing post-hoc tests to further investigate the found interactions. The average values of the measured quantities, standard errors, and post-hoc test results are shown in Fig. 5.

The influence of temperature on the morphology of craters was observed for silty loam and loamy sand (Fig. 5). In the case of silty loam, statistically significant differences were found in the shape of the craters (expressed by depth, equivalent diameter, and α parameter) formed under the different thermal variants at a moisture content corresponding to a pressure head equal to 1 kPa. For this soil, craters in thermal variant 1 (low temperatures) were characterised by greater depth and smaller diameter than those formed in the other thermal variants (Fig. 5A, B). This clearly influenced the value of the α parameter (Fig. 5C), but did not translate into differences in crater volume (Fig. 5D). The highest values of three quantities describing the craters formed on the silty loam were recorded in thermal variant 1 and at moisture content corresponding to a pressure head equal to 1 kPa; these were depth (1.28 ± 0.05 mm), parameter α (0.136 ± 0.004), and volume (43.00 ± 4.04 mm^3). The largest diameter value (10.47 ± 0.21 mm) was noted at the same moisture content but in the 3rd thermal variant. On the other hand, the smallest values of the three quantities were found at moisture content corresponding to a pressure head equal to 16 kPa in the 1st thermal variant; these were depth (0.44 ± 0.04 mm), diameter (6.87 ± 0.15 mm), and volume (7.61 ± 0.99 mm^3). The smallest value of the dimensionless α parameter (0.06 ± 0.005) for craters formed on the silty loam was found for the corresponding moisture content in the 3rd thermal variation.

In the case of loamy sand, no direct effect of temperature on crater morphology was observed (i.e. no statistically significant differences between thermal variants at a particular moisture content). However,

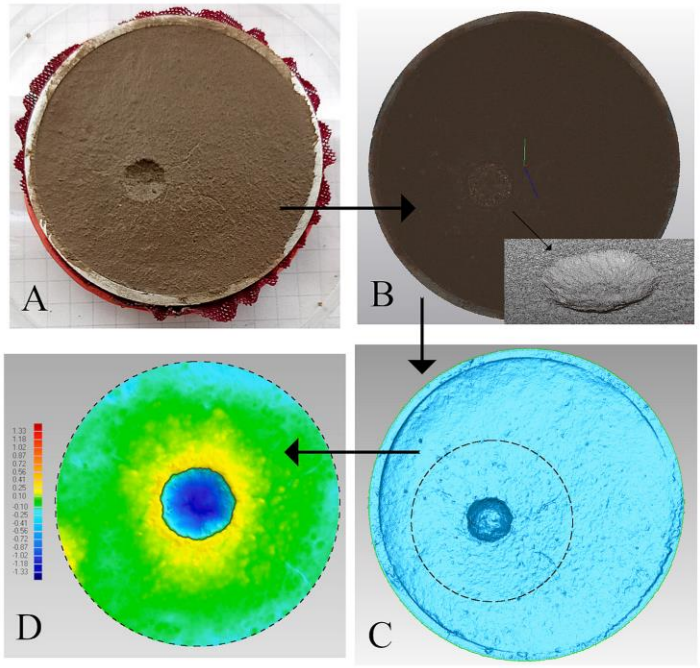


Fig. 4. Steps in processing data obtained with the Smarttech3D scanner during crater morphology measurements: A – soil sample with a crater after a drop impact; B ¬ calibrated point clouds with detail; C – triangle mesh of the crater; D – height map of the area around the crater marked by the circle on the triangle grid (crater depth measurement).

Table 3
Results of a multi-factor ANOVA (for an assumed statistical significance level of 0.05) presenting the significance of the effects of individual factors and their interactions on the values of the measured quantities characterising the craters. Factors and combinations of factors with a statistically significant effect on the results are shown in italic, and those in bold indicate statistically significant variants where temperature was present.

Factors	P-value for:			
	Crater depth	Equivalent diameter	α	Crater volume
Texture	*< 0.001*	*< 0.001*	*< 0.001*	*< 0.001*
Moisture	*< 0.001*	*< 0.001*	*< 0.001*	*< 0.001*
Temperature	0.301	***0.008***	0.354	0.368
Texture*Moisture	*< 0.001*	*< 0.001*	*< 0.001*	*< 0.001*
Texture*Temperature	0.053	***< 0.001***	***0.020***	***0.023***
Moisture*Temperature	0.061	0.158	***0.006***	0.373
Texture*Moisture*Temperature	***0.031***	0.812	***0.030***	0.050

temperature did influence deformation through its interaction with soil moisture content. According to the obtained results, depending on the thermal variant, changes in moisture content either resulted in statistically significant differences in some of the measured parameters or did not. In thermal variant 3 (high temperatures), statistically significant differences were found in the equivalent diameter (Fig. 5B) and volume (Fig. 5D) of craters formed at different soil moisture content. In contrast, at lower temperatures, differences related to changes in moisture content were not significant (for the diameter, the difference also occurred in thermal variant 2). The highest average values of the diameter (9.31 ± 0.13 mm) and volume (25.53 ± 0.70 mm3) of the craters on the loamy sand were found in thermal variant 2 at moisture content corresponding to a pressure head equal to 1 kPa, while the highest values of depth (0.83 ± 0.03 mm) and α-factor (0.094 ± 0.003) were observed at the same moisture content in thermal variant 3. The smallest values of the three quantities were found at moisture content corresponding to a pressure head equal to 16 kPa in thermal variant 3; these were depth (0.65 ± 0.04 mm), diameter (7.77 ± 0.16 mm), and volume (13.95 ± 1.64 mm3). The smallest value of the dimensionless α parameter (0.08 ± 0.005) for craters formed on the loamy sand was found for the corresponding moisture content in the 1st thermal variation.

For sandy loam, there was neither a direct effect of temperature on the morphology of the craters (no statistically significant differences between thermal variants at a particular moisture content), nor an indirect effect of temperature through interaction with moisture content (no effect of temperature variants on statistically significant differences caused by changes in soil moisture content). Differences in the values of the quantities describing the craters formed on this soil were attributed to the influence of moisture content. The highest average values of the three quantities describing the craters formed on the sandy loam were recorded in the 2nd thermal variant and at moisture content corresponding to a pressure head equal to 1 kPa; these were depth (1.30 ± 0.03 mm), diameter (7.95 ± 0.06 mm) and volume (33.20 ± 1.11 mm3). The highest value of the α parameter (0.174 ± 0.017) was noted at the same moisture content but in the 3rd thermal variant. The smallest values off all determined quantities, i.e. depth (0.48 ± 0.03 mm), diameter (6.05 ± 0.12 mm), the dimensionless α parameter (0.079 ± 0.004), and volume (6.20 ± 0.61 mm3), were found for the sandy loam at moisture content corresponding to a pressure head equal to 16 kPa in

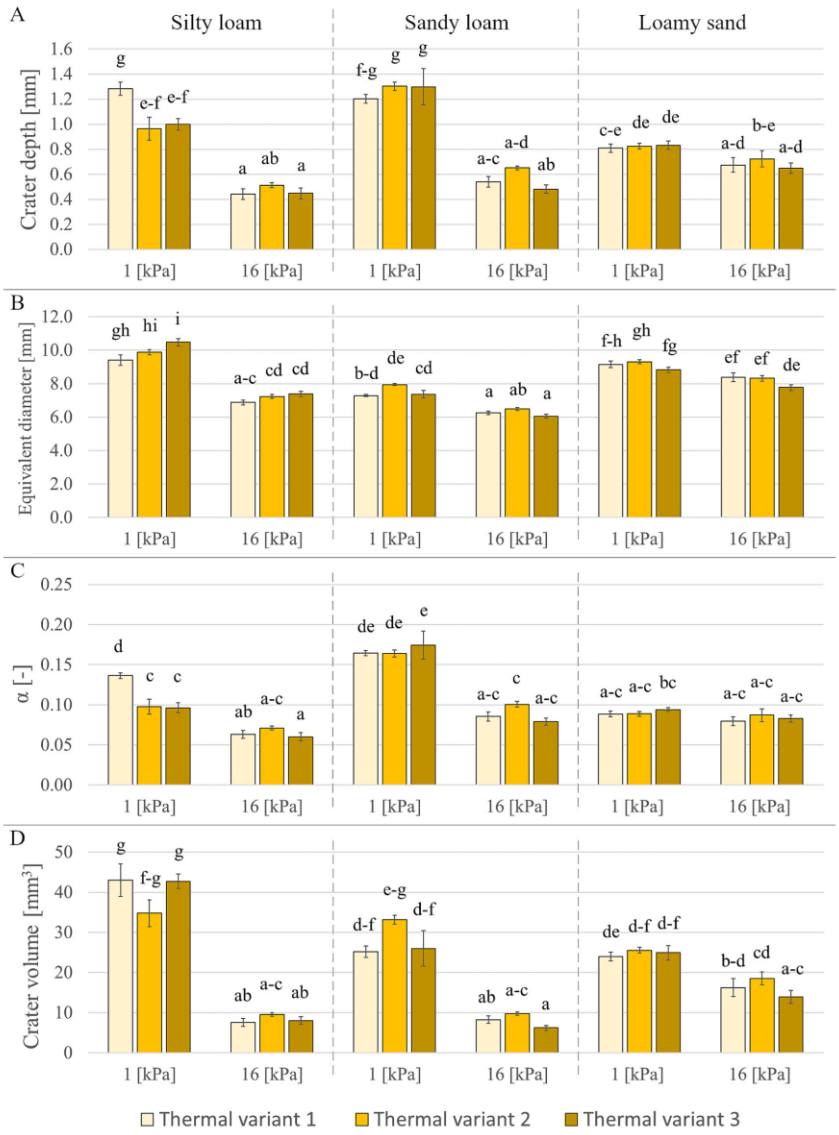


Fig. 5. Average values of the determined quantities: A – depth of craters; B – equivalent diameter; C – depth to diameter ratio; D – volume of craters. Bars indicate standard errors. The results of Tukey's post-hoc test are shown by the letters above the bars. The statistical test for each quantity involved comparing all variants with each other – the same letters indicate no statistically significant differences within individual quantities. Variant results belonging to three or more groups have been marked with ranges, for example a-c.

the 3rd thermal variant.

In general, in most cases, an increase in soil moisture translated into an increase in the depth, diameter, α parameter, and volume of craters (Fig. 5). For each soils, the lowest values of the determined quantities were found at the moisture content corresponding to a pressure head equal to 16 kPa and the highest values were noted at the moisture content corresponding to a pressure head equal to 1 kPa. However, the soils were distinguished by their varying susceptibility to deformation and responses to moisture changes, as illustrated by the volume of the craters. Silty loam was characterised by the largest crater volumes, and the change in crater volume between the considered moisture contents was the greatest for this material (Fig. 5D). In contrast, loamy sand showed the smallest changes in crater volume, as well as in other measured quantities – there were no statistically significant changes in

the values for crater depth or the α parameter for this soil (Fig. 5A, C). Sandy loam was characterised by the smallest values of crater diameters and the highest values of α (Fig. 5B, 2C). This meant that the craters formed on this material were the deepest relative to their diameters.

4. Discussion

Temperature directly affects the surface tension and viscosity of water (Kestin et al., 1978; Vargaftik et al., 1983). However, it can also have an indirect effect – by changing the solubility of chemical compounds (e.g. mineral salts, organic matter, or gases), which depends on the type of soil. In the context of a splash, water not only forms the drops that cause the phenomenon but is also present in the moist, degraded soil. These facts provided the basis for the hypothesis that temperature could also influence the splash phenomenon and soil surface deformation. The analyses carried out showed that the direct influence of selected temperature conditions on the craters was limited. Instead, temperature seems to play a role in potential modulation of the effect of other factors; therefore, its interaction with the soil texture and moisture content appears to be important for the micro-deformation of the soil surface during the early stages of erosion (Fig. 5). To better understand the observed relations, it is worth analysing the changes caused by the thermal variants included in the research.

The first aspect associated with the different temperature conditions is their effect on the properties of the water contained in the soil sample. An increase in temperature from 5 to 40 °C, corresponding to the temperature range of the prepared samples, results in a 57 % decrease in the viscosity of the pore-filling water (from 1.519 mPa·s to 0.653 mPa·s) and a 7 % decrease in its surface tension (from 0.0749 $N{\cdot}m^{-1}$ to 0.0696 $N{\cdot}m^{-1}$) (Dinçer and Zamfirescu, 2016). Consequently, the amount of water contained in the soil pores could be (in specific conditions) relevant to the appearance of temperature effects on surface deformation, indirectly affecting certain soil properties, e.g. cohesion. The collected results seem to partly confirm this assumption. The effect of selected temperature conditions on crater morphology was observed for silty loam at a moisture content corresponding to a pressure head equal to 1 kPa. The samples in this condition had the highest gravimetric water content of all included variants, equal to 33 %. Furthermore, for silty loam, the change in gravimetric water content between moisture variants was the greatest (Table 1). The effect of temperature can be more noticeable in soils with higher moisture levels and significant water retention capacities. However, temperature does not appear to be relevant to the splash phenomenon at low moisture content (results for moisture content corresponding to a pressure head equal to 16 kPa in Fig. 5). The influence of the selected temperature conditions on the effect caused by changes in moisture content in the case of loamy sand may be related to the texture of this material. The content of the sand fraction in loamy sand was 81.59 % (Table 1). More than half of the mass of this soil was therefore composed of relatively large particles. It is possible that the spaces between the grains among all the tested soils may have been the largest in this material, which, in the context of temperature-induced changes in viscosity and surface tension of the water filling the pores, may have been responsible for the observed effects. In terms of water content, the lack of a temperature influence on sandy loam may be surprising. Although this soil had higher gravimetric water content than loamy sand, the difference was not large (Table 1). The two materials differed more in terms of particle size distribution. Sandy loam was characterised by a diversity in the size of grains, which influenced the arrangement and size of water-filled pores and increased the number of contacts between grains (pores between large grains could be filled with smaller particles). Such an arrangement promotes an increase in soil cohesion and thus resistance to deformation, which may have offset the effect caused by the change in water properties caused by temperature.

The second aspect concerning the selected temperature conditions is their influence on the properties of the water forming the falling drops. An increase in the drops' temperature from 5 to 25 °C resulted in a 41 % decrease in viscosity (from 1.519 [mPa·s] to 0.891 [mPa·s]) and a 4 % decrease in surface tension (from 0.0749 [$N{\cdot}m^{-1}$] to 0.720 [$N{\cdot}m^{-1}$]) (Dinçer and Zamfirescu, 2016). The drops with lower viscosity and surface tension break more easily, which may affect the way energy is transferred during impact (Rioboo et al., 2001). Naveen et al., (2020) showed that the changes in viscosity and surface tension induced by temperature increase lead to greater stretching of a drop upon hitting a flat surface. A similar trend may have occurred for the drop impacting the soil, where a higher temperature may have been associated with a larger area of drop interaction. In addition, the ratio of viscosity to surface tension may have influenced the formation of the edge of the spreading drop, which interacted with soil material displaced onto the crater rim (Yang et al., 2021).

A third aspect related to the selected temperature conditions is the influence of air temperature on the obtained results. According to Park et al. (1983), the temperature of the air influences its density, which partly determines the drag and the final velocity of the drops, and thus their energy. The possible occurrence of this effect required checking whether the assumption of maintaining constant drop energy under the different temperature conditions of the splash experiments was fulfilled. A high-speed camera was used to verify this issue. Analysis of the records showed that there were no statistically significant differences in the energy of the drops. The absence of the effect described by Park et al. (1983) may be attributed to the fact that, although the drops used in the splash experiments approached terminal velocity, they did not reach it.

All the measured quantities describing the craters were statistically significantly dependent on moisture content, soil texture, and the interaction of these two factors (Table 3). The obtained results align with previous studies by Mazur et al. (2022), which included mostly other soils but with similar differences in texture. As was presented in the mentioned paper, an increase in soil moisture resulted in statistically significant increases in the quantities characterising the craters. The reason for the observed relationship may be a reduction in the cohesion of the individual soils due to higher water content, which results in the easier detachment of material by falling drops (Cokca et al., 2004; Lv et al., 2023; Takita and Sumita, 2013). Referring to the results shown in Fig. 5 and considering all thermal variants together, the volume of craters formed on loamy sand at the moisture content corresponding to a pressure head equal to 1 kPa was on average 1.6 times larger than the volume of craters formed at the moisture content corresponding to a pressure head equal to 16 kPa content; the corresponding size ratio was 3.5 for sandy loam and 4.9 for silty loam. For the moisture content corresponding to a pressure head equal to 16 kPa, the craters formed on loamy sand were characterised by the largest volume, which can be linked to the high sand content, leading to lower cohesion of this soil in relation to the other materials. An increase in moisture content to a level corresponding to a pressure head equal to 1 kPa resulted in an increase in the volume of craters formed on loamy sand, but in the case of silty loam and sandy loam the change in the crater volume was much greater, which can be linked to a significant decrease in the cohesion of these materials. The observed trends seemed to be dependent on the sand content; the less sand there was in the soil material, the greater the impact of variations in moisture content on its deformation. As reported by Takita and Sumita (2013), who analysed the effect of sand sample moisture on deformation, an initial increase in moisture results in greater resistance to deformation, but exceeding a certain limit value reverses the trend and leads to increasing the size of the formed craters. The increase in the crater size with the increasing moisture content from a pressure head equal to 16 kPa to a pressure head equal to 1 kPa may suggest that a similar trend is also evidenced by our results. The turning point would be in the near field capacity, as indicated by the small size of the craters formed at this moisture content, and the change in the trend could be due to the appearance of gravitational water in the soils.

The final shape of the crater results from the impact of the drop and the phenomena occurring on the soil as a consequence. The topic of

crater formation was the subject of de Jong et al. (2017), who used high-speed profilometry to analyse the temporal dimensions of craters. One notable phenomenon they observed was the so-called avalanche, which was associated with the re-displacement of some material from the rim to the centre of the crater. As a result of the phenomenon, the dimensions of the crater changed and its final shape reached a greater diameter and a smaller depth than the transient unstable crater form obtained shortly after the impact of the drop. Relating the observations of de Jong et al. (2017) to the effect of temperature, analogous differences in crater dimensions were found across the different thermal variants in the case of silty loam at a moisture content corresponding to a pressure head equal to 1 kPa (Fig. 5A, B). Craters formed in thermal variants 2 and 3 had larger diameters and shallower depths than craters formed in variant 1. This difference is also clearly visible for parameter α. Based on this similarity, it can be assumed that for silty loam – with the highest mass proportion of water among the used soil materials – changes in liquid viscosity resulting from the selected temperature conditions influenced the intensity of the avalanche phenomenon. Thus, one of the possible reasons for the observed differences may have been a change in the crater formation process, resulting in an increase in the amount of fine particles re-displaced into the crater, leading to reduced depth and increased diameter of the craters.

The amount of soil material displaced during the splash phenomenon, and thus potentially the size of craters, is influenced by the mechanical effect of the drop impact as well as phenomena related to the breakdown of soil aggregates as a result of their contact with water, among others, slaking and physicochemical dispersion (H. Li et al., 2024). Xiao et al. (2018) reported that the effect of slaking resulted in the provision of material, which accounted for more than half of the eroded mass of soil material. They also highlighted that slaking played a greater role in soils whose granulometric distribution contained a low amount of sand fraction where it was responsible for up to 80 % of the eroded material. Although our study does not focus on the stability of soil aggregates, it is worth considering that the above phenomena and their relationship to temperature, moisture, or soil texture may have influenced the deformation. As shown by Li et al. (2022), an increase in the drop temperature caused an increase in the importance of slaking in the splash phenomenon, providing more material susceptible to displacement. However, our experiments do not show that the potential slaking effect influences the volume of craters formed after the impact of a single drop (Fig. 5D). The importance of moisture and temperature on aggregate stability was also addressed by Dowdeswell-Downey et al. (2023); they found that an increase in moisture resulted in a decrease in aggregate stability in sandy loam soil, while an increase in temperature resulted in an increase in aggregate stability in clay soil. The association of aggregate stability in a sandy loam with moisture content and the lack of this association with temperature are in line with our results and may partly explain the absence of a temperature effect on the craters formed on this soil.

Issue related to measurement uncertainties was the possible surface non-homogeneity of the prepared samples. The source of the problem may have been differences in the particle size distributions of the materials, as well as the manual method of sample preparation. Despite efforts to prepare the samples as precisely and uniformly as possible, the above factors could have influenced the occurrence of differences in the microrelief and local variations in surface moisture content. The development of methods for precise measurement of surface moisture would help to improve the study of soil deformation in the early stages of erosion by better controlling the conditions of the experiments. However, even now, the strength of this work is the applied methodology, which can serve as a starting point for analogous experiments on other soils, which, due to their different structure or the climate in the area where they occur, may follow different patterns than the materials included in this study. The effect of temperature on craters formed on an inclined soil surface also remains an open question.

The experimental results demonstrated that by interacting with soil texture and moisture content, temperature may influence certain aspects of the water erosion process at its early stages. The observed effect on the deformation of the soil surface after drop impact raises the question about the role of temperature in other erosion processes. Temperature-induced changes in deformation, such as an increase in crater diameter resulting in the disturbance of the soil surface over a larger area at higher temperatures, may facilitate the initiation of surface runoff on silty soils. This influence can be reinforced by heavy rains, the strength and frequency of which is also increased by the effect of temperature on heightened evaporation (Borrelli et al., 2020; Chapman et al., 2021). Extreme rainfall events may account for a large part of annual soil loss, which touches upon the relationship between temperature and erosion from a different perspective (Guo et al., 2019). On the other hand, climate change also results in a change in the annual precipitation profile, thus exposing bare soil without snow and vegetation cover to the occurrence of increasingly frequent winter rainfall (Aygün et al., 2021; Li and Fang, 2016; Łupikasza and Małarzewski, 2023). These patterns drive soil loss in the spring, which should be reflected in erosion models and strategies for reduction with these phenomena.

5. Conclusions

This work addressed the role of temperature in shaping the morphology of surface deformation (craters) caused by the splash phenomenon induced by drop impact. The direct effect of the selected temperature conditions on the craters was limited, while its interaction with the other factors considered in the study, i.e. soil texture and moisture content, was notable. This suggests that the effect of temperature on soil deformation during the early stages of erosion may occur under specific conditions. The observed relationship was likely underpinned by changes in the temperature-related viscosity and surface tension of water, which could have translated into a change in the drop impact mechanism or the soil material's susceptibility to displacement. Under the tested conditions, the selected temperature variant effect was visible on the craters formed on silty loam at a moisture content corresponding to a pressure head equal to 1 kPa. Statistical differences occurred in depth, diameter, and the ratio of both quantities. For the loamy sand, temperature influenced the effect of soil moisture on soil deformation, resulting in differences in volume and diameter between samples with varying moisture content at higher temperatures. No effect of temperature on deformation on sandy loam was observed.

To sum up the results and discussion presented above, it can be stated that the influence of temperature on soil surface deformation is generally significantly lower than other factors – primarily the influence of soil moisture. In other words, at least in the tested temperature range, the change in soil moisture has a much greater influence on the course and effect of deformation than the change in temperature. However, it should be remembered that the research was conducted on soils and temperatures referring to Central Europe. It remains an open question whether a combination of factors, i.e. a greater range of temperature changes and properties of soils occurring in other climatic zones, can cause a greater impact. The obtained results may partly limit the need to include a direct effect of temperature on erosion in models describing these processes, but a full answer to this question requires further analysis, including the determination of the effect of temperature on the amount of soil material ejected during the splash phenomenon.

CRediT authorship contribution statement

Rafał Mazur: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Software, Resources, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Magdalena Ryżak:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Supervision, Formal analysis, Conceptualization. **Agata Sochan:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Supervision, Methodology. **Michał Beczek:** Writing –

review & editing, Methodology, Conceptualization. **Cezary Polakowski:** Writing – review & editing. **Andrzej Bieganowski:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Supervision, Formal analysis, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

Funding: This work was partially supported by: a) the National Science Centre, Poland within the framework of project no. 2020/37/N/ST10/03363; b) Statutory Research of the Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109005.

Data availability

Results of soil surface deformation measurements after water drops impact at different temperature conditions made with a surface scanner (Original data) (Mendeley Data)

Reference to research data to this article: Mazur, Rafał; Ryżak, Magdalena; Sochan, Agata; Beczek, Michał; Polakowski, Cezary; Bieganowski, Andrzej (2024), "Results of soil surface deformation measurements after water drops impact at different temperature conditions made with a surface scanner", Mendeley Data, V1, https://doi.org/10.17632/mnjcscf28t.1.

References

Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J.W., Olson, C., Sztein, A.E., Sparks, D.L., 2015. Soil and human security in the 21st century. Science 348, 1261071. https://doi.org/10.1126/science:1261071.

Anderson, S.P., Hinton, A., Weller, R.A., 1998. Moored observations of precipitation temperature*. J. Atmos. Oceanic Technol. 15, 979–986. https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0979:MOOPT>2.0.CO;2.

Aygün, O., Kinnard, C., Campeau, S., 2021. Responses of soil erosion to warming and wetting in a cold Canadian agricultural catchment. Catena 201, 105184. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105184.

Beczek, M., Mazur, R., Beczek, T., Ryżak, M., Sochan, A., Gibała, K., Polakowski, C., Bieganowski, A., 2024. The effect of slope incline on the characteristics of particles ejected during the soil splash phenomenon. Geoderma 441, 116757. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116757.

Beczek, M., Ryżak, M., Lamorski, K., Sochan, A., Mazur, R., Bieganowski, A., 2018. Application of X-ray computed microtomography to soil craters formed by raindrop splash. Geomorphology 303, 357–361. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.019.

Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J.E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., Ballabio, C., 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 117, 21994–22001. https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117.

Chapman, S., Birch, C.E., Galdos, M.V., Pope, E., Davie, J., Bradshaw, C., Eze, S., Marsham, J.H., 2021. Assessing the impact of climate change on soil erosion in East Africa using a convection-permitting climate model. Environ. Res. Lett. 16, 084006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac10e1.

Chua, A.M., Tokura, T., 2004. Total organic carbon in soil. Customer Support Centre, Shimadzu (Asia Pacific), Pte. Ltd. Introduction.

Ciampalini, R., Constantine, J.A., Walker-Springett, K.J., Hales, T.C., Ormerod, S.J., Hall, I.R., 2020. Modelling soil erosion responses to climate change in three catchments of Great Britain. Sci. Total Environ. 749, 141657. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141657.

Cokca, E., Erol, O., Armangil, F., 2004. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay. Geotech. Geol. Eng. 22, 285–297. https://doi.org/10.1023/B:GEGE.0000018349.40866.3e.

Dash, S.S., Maity, R., 2023. Effect of climate change on soil erosion indicates a dominance of rainfall over LULC changes. J. Hydrol.: Reg. Stud. 47, 101373. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101373.

de Jong, R., Zhao, S.C., van der Meer, D., 2017. Crater formation during raindrop impact on sand. Phys. Rev. E 95, 042901. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.042901.

Delon, G., Terwagne, D., Dorbolo, S., Vandewalle, N., Caps, H., 2011. Impact of liquid droplets on granular media. Phys. Rev. E 84, 046320. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.046320.

Dinçer, I., Zamfirescu, C., 2016. Drying phenomena: theory and applications. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

Dowdeswell-Downey, E., Grabowski, R.C., Rickson, R.J., 2023. Do temperature and moisture conditions impact soil microbiology and aggregate stability? J Soils Sediments 23, 3706–3719. https://doi.org/10.1007/s11368-023-03628-2.

Epema, G., Riezebos, H.T., 1983. Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. Catena Supplement (Giessen) 4.

Falarz, M. (Ed.), 2021. Climate Change in Poland: Past, Present, Future. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70328-8.

Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordán, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M., Cerdà, A., 2017. Splash erosion: a review with unanswered questions. Earth Sci. Rev. 171, 463–477. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.009.

Furtak, K., Wolińska, A., 2023. The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture – A review. Catena 231, 107378. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107378.

Ghadiri, H., 2004. Crater formation in soils by raindrop impact. Earth Surf Processes Landf 29, 77–89. https://doi.org/10.1002/esp.1014.

Gosnell, R., Fairall, C.W., Webster, P.J., 1995. The sensible heat of rainfall in the tropical ocean. J. Geophys. Res. 100, 18437–18442. https://doi.org/10.1029/95JC01833.

Guo, Y., Peng, C., Zhu, Q., Wang, M., Wang, H., Peng, S., He, H., 2019. Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: Model applications, limitations and future challenges. J. Environ. Manage. 250, 109403. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109403.

Haynes, W.M. (Ed.), 2014. CRC handbook of chemistry and physics. CRC Press.

Huffman, R.L., Fangmeier, D.D., Elliot, W.J., Workman, S.R., 2013. Soil erosion by water. In: Soil and water conservation engineering seventh edition. American Society of Agricultural and Biological Engineers, pp. 145–170. https://doi.org/10.13031/swce:2013.7.

IUSS Working Group WRB, 2015. World reference base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, update 2015. ed. FAO, Rome.

Katsuragi, H., 2016. Physics of soft impact and cratering. Springer Japan, Tokyo. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55648-0.

Katsuragi, H., 2010. Morphology scaling of drop impact onto a granular layer. Phys. Rev. Lett. 104, 218001. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.218001.

Kestin, J., Sokolov, M., Wakeham, W.A., 1978. Viscosity of liquid water in the range −8 °C to 150 °C. J. Phys. Chem. Ref. Data 7, 941–948. https://doi.org/10.1063/1.555581.

Kincaid, D.C., Longley, T.S., 1989. A water droplet evaporation and temperature model. Transactions of the ASAE 32.

Laburda, T., Krása, J., Zumr, D., Devátý, J., Vrána, M., Zambon, N., Johannsen, L.L., Klik, A., Strauss, P., Dostál, T., 2021. SfM-MVS photogrammetry for splash erosion monitoring under natural rainfall. Earth Surface Processes and Landform 46, 1067–1082. https://doi.org/10.1002/esp.5087.

Legout, C., Leguédois, S., Le Bissonnais, Y., Malam Issa, O., 2025. Splash distance and size distributions for various soils Author links open overlay panel. Geoderma 124 (3–4), 279–292. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.006.

Li, H., Gu, J., Liu, G., Abd Elbasit, M.A.M., Hu, F., Zou, T., Wang, L., Zhang, Q., Guo, Z., 2022. Effects of raindrop temperature on the contributions of slaking and mechanical striking to aggregate disintegration during splash erosion. Soil Tillage Res. 224, 105518. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105518.

Li, H., Zhang, Q., Wu, J., Zou, H., Xia, X., Dan, C., Liu, C., Guo, Z., Zhang, Y., Liu, G., 2024a. Response of soil aggregate disintegration to antecedent moisture during splash erosion. Catena 234, 107633. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107633.

Li, X., Fan, H., Wang, P., Zhang, X., Li, A., Yang, X., Zhang, G., 2024b. Interactive effect of soil dispersity and rainfall intensity on splash erosion: Insights from laboratory tests. Catena 238, 107843. https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107843.

Li, Z., Fang, H., 2016. Impacts of climate change on water erosion: a review. Earth Sci. Rev. 163, 94–117. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004.

Long, E.J., Hargrave, G.K., Cooper, J.R., Kitchener, B.G.B., Parsons, A.J., Hewett, C.J.M., Wainwright, J., 2014. Experimental investigation into the impact of a liquid droplet onto a granular bed using three-dimensional, time-resolved, particle tracking. Phys. Rev. E 89, 032201. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.032201.

Łupikasza, E.B., Małarzewski, Ł., 2023. Trends in the indices of precipitation phases under current warming in Poland, 1966–2020. Adv. Clim. Chang. Res. 14, 97–115. https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.11.012.

Lv, L., Li, Y., Zhou, C., 2023. Mechanistic analysis of splash erosion on loess by single raindrop impact: interaction of soil compaction, water content, and raindrop energy. Biosyst. Eng. 236, 238–247. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.11.001.

Marcinkowski, P., Szporak-Wasilewska, S., Kardel, I., 2022. Assessment of soil erosion under long-term projections of climate change in Poland. J. Hydrol. 607, 127468. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127468.

Marzen, M., Iserloh, T., 2021. Processes of raindrop splash and effects on soil erosion. In: Precipitation. Elsevier, pp. 351–371. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822699-5.00013-6.

Mazur, R., Ryżak, M., Sochan, A., Beczek, M., Polakowski, C., Przysucha, B., Bieganowski, A., 2022. Soil deformation after one water-drop impact – The effect of texture and soil moisture content. Geoderma 417, 115838. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115838.

Naveen, P.T., Simhadri, R.R., Ranjith, S.K., 2020. Simultaneous effect of droplet temperature and surface wettability on single drop impact dynamics. Fluid Dyn 55, 640–652. https://doi.org/10.1134/S0015462820040084.
O'Brien, P.L., Hatfield, J.L., 2020. Extreme soil surface temperatures reflect need to rethink agronomic management. Agricultural & Env Letters 5, e20002. https://doi.org/10.1002/ael2.20002.
Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C., 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. Environ Sci Policy 54, 438–447. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012.
Park, S.W., Mitchell, J.K., Bubenzern, G.D., 1983. Rainfall characteristics and their relation to splash erosion. Transactions of the ASAE 26, 0795–0804. https://doi.org/10.13031/2013.34026.
Perkins-Kirkpatrick, S., Barriopedro, D., Jha, R., Wang, L., Mondal, A., Libonati, R., Kornhuber, K., 2024. Extreme terrestrial heat in 2023. Nat Rev Earth Environ 5, 244–246. https://doi.org/10.1038/s43017-024-00536-y.
Pimentel, D., 2006. Soil Erosion: a food and environmental threat. Environ Dev Sustain 8, 119–137. https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8.
Rendana, M., Wan Mohd Razi Idris, W.M.R., Alia, F., Rahim, S.E., Yamin, M., Izzudin, M., 2024. Relationship between drought and soil erosion based on the normalized differential water index (NDWI) and revised universal soil loss equation (RUSLE) model. Reg. Sustainability 5 (4), 100183. https://doi.org/10.1016/j.regsus.2024.100183.
Rioboo, R., Tropea, C., Marengo, M., 2001. Outcomes from a drop impact on solid surfaces. Atomiz Spr 11, 12. https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.v11.i2.40.
Rončević, V., Živanović, N., Van Boxel, J.H., Iserloh, T., Štrbac, S., 2023. Dripping Rainfall Simulators for Soil Research—Performance Review. Water 15, 1314. https://doi.org/10.3390/w15071314.
Sachs, E., Sarah, P., 2017a. Combined effect of rain temperature and antecedent soil moisture on runoff and erosion on Loess. Catena 158, 213–218. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.007.
Sachs, E., Sarah, P., 2017b. Effect of raindrop temperatures on soil runoff and erosion in dry and wet soils. A laboratory experiment. Land Degrad Dev 28, 1549–1556. https://doi.org/10.1002/ldr.2682.
Sartori, M., Ferrari, E., M'Barek, R., Philippidis, G., Boysen-Urban, K., Borrelli, P., Montanarella, L., Panagos, P., 2024. Remaining loyal to our soil: a prospective integrated assessment of soil erosion on global food security. Ecol. Econ. 219, 108103. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108103.
Sochan, A., Beczek, M., Mazur, R., Polakowski, C., Ryżak, M., Bieganowski, A., 2023. Splash erosion and surface deformation following a drop impact on the soil with different hydrophobicity levels and moisture content. PLoS One 18, e0285611. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285611.
Sochan, A., Bieganowski, A., Ryżak, M., Dobrowolski, R., Bartmiński, P., 2012. Comparison of soil texture determined by two dispersion units of Mastersizer 2000. Int. Agrophys. 26, 99–102. https://doi.org/10.2478/v10247-012-0015-9.
Takita, H., Sumita, I., 2013. Low-velocity impact cratering experiments in a wet sand target. Phys. Rev. E 88, 022203. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.022203.
Trnka, M., Semerádová, D., Novotný, I., Dumbrovský, M., Drbal, K., Pavlík, F., Vopravil, J., Štěpánková, P., Vizina, A., Balek, J., Hlavinka, P., Bartošová, L., Žalud, Z., 2016. Assessing the combined hazards of drought, soil erosion and local flooding on agricultural land: a Czech case study. Climate Res. 70, 231–249. https://doi.org/10.3354/cr01421.
Vargaftik, N.B., Volkov, B.N., Voljak, L.D., 1983. International tables of the surface tension of water. J. Phys. Chem. Ref. Data 12, 817–820. https://doi.org/10.1063/1.555688.
Vasquez, C., Klik, A., Stumpp, C., Laaha, G., Strauss, P., Ozcelik, N.B., Pistotnik, G., Yin, S., Dostal, T., Gaona, G., Strohmeier, S., 2024. Rainfall erosivity across Austria's main agricultural areas: Identification of rainfall characteristics and spatiotemporal patterns. J. Hydrol.: Reg. Stud. 53, 101770. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101770.
Vinaya Kumar, H.M., Mahantesh, S. (Eds.), 2021. Climate Change and Resilient Food Systems: Issues, Challenges, and Way Forward. Springer Singapore, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4538-6.
Wyser, E., Carrea, D., Jaboyedoff, M., Pudasaini, S.P., 2019. Cratering response during droplet impacts on granular beds. Eur. Phys. J. E 42, 111. https://doi.org/10.1140/epje/i2019-11877-8.
Xiao, H., Liu, G., Zhang, Q., Fenli, Z., Zhang, X., Liu, P., Zhang, J., Hu, F., Elbasit, M.A.M. A., 2018. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess plateau of China. Soil Tillage Res. 178, 150–158. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.026.
Yang, L., Li, Z., Yang, T., Chi, Y., Zhang, P., 2021. Experimental study on droplet splash and receding breakup on a smooth surface at atmospheric pressure. Langmuir 37, 10838–10848. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c01797.
Zachar, D., 1982. Soil erosion, developments in soil science. Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
Zambon, N., Johannsen, L.L., Strauss, P., Dostal, T., Zumr, D., Cochrane, T.A., Klik, A., 2021. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. Catena 196, 104827. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104827.
Zhang, Q., Gao, M., Zhao, R., Cheng, X., 2015. Scaling of liquid-drop impact craters in wet granular media. Phys. Rev. E 92, 042205. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.042205.
Zhao, R., Zhang, Q., Tjugito, H., Cheng, X., 2015a. Granular impact cratering by liquid drops: Understanding raindrop imprints through an analogy to asteroid strikes. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 112, 342–347. https://doi.org/10.1073/pnas.1419271112.
Zhao, S.C., De Jong, R., Van Der Meer, D., 2015b. Raindrop impact on sand: a dynamic explanation of crater morphologies. Soft Matter 11, 6562–6568. https://doi.org/10.1039/C5SM00957J.
Zhao, Y., Zhu, D., Wu, Z., Cao, Z., 2024. Extreme rainfall erosivity: Research advances and future perspectives. Sci. Total Environ. 917, 170425. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170425.

8. Oświadczenia współautorów

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

mgr inż. Rafał Mazur
Zakład Biogeochemii Środowiska Przyrodniczego
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Lublin 01.04.2026

Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że we wszystkich pracach stanowiących niniejszą rozprawę doktorską tj.:

- P1. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods*. SENSORS 2023, 23(1), 121. DOI 10.3390/s23010121
- P2. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Marciszuk K., Beczek M., Lamorski K., Bieganowski A. *Surface deformation and displacement of bed elements during splash - Model tests*. CATENA 2020, 185, 104277. DOI:10.1016/j.catena.2019.104277
- P3. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Przysucha B., Bieganowski A. *Soil Deformation after One Water-Drop Impact - The Effect of Texture and Soil Moisture Content*. GEODERMA 2022, 417, 115838. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115838
- P4. Mazur M., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content*. Catena 2025, 255, 109005. DOI: 10.1016/j.catena.2025.109005

mój wkład obejmował współudział w opracowaniu koncepcji pracy i metodyki badań (wspólnie z Promotorem i Promotorem Pomocniczym). Zdecydowana większość pomiarów i opracowanie uzyskanych wyników zostały przeprowadzone przeze mnie samodzielnie. Dodatkowo byłem autorem pierwszej wersji załączonych manuskryptów, jak również koordynowałem i aktywnie uczestniczyłem we wprowadzaniu poprawek po recenzjach.

W odniesieniu do publikacji P1, P3 i P4 byłem także inicjatorem badań, gdyż publikacje te powstały w ramach kierowanego przeze mnie projektu Preludium 2020/37/N/ST10/03363 pt. "Wpływ temperatury gleby na zjawisko rozbryzgu (splash erosion)".

Rafał Mazur

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

dr hab. Magdalena Ryżak, prof. IA PAN
Zakład Biogeochemii Środowiska Przyrodniczego
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Lublin 31.03.2026

Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że w poniższych trzech pracach inicjatywa podjętych badań jest wkładem intelektualnym mgra inż. Rafała Mazura.

- P1. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods*. SENSORS 2023, 23(1), 121. DOI 10.3390/s23010121
- P3. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Przysucha B., Bieganowski A. *Soil Deformation after One Water-Drop Impact - The Effect of Texture and Soil Moisture Content*. GEODERMA 2022, 417, 115838. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115838
- P4. Mazur M., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content*. Catena 2025, 255, 109005. DOI: 10.1016/j.catena.2025.109005

Jako promotor brałam udział we współopracowaniu koncepcji prac i metodyki badań. Ponadto współuczestniczyłam w nanoszeniu poprawek i uwag do pierwszych wersji manuskryptów przygotowanych przez mgra inż. Rafała Mazura oraz na etapie odpowiedzi na recenzje.

Publikacja

- P2. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Marciszuk K., Beczek M., Lamorski K., Bieganowski A. *Surface deformation and displacement of bed elements during splash - Model tests*. CATENA 2020, 185, 104277. DOI:10.1016/j.catena.2019.104277

była efektem realizacji projektu którym kierowałam, a w którym mgr inż. Rafał Mazur był zatrudniony. Mój wkład w tę pracę obejmował współopracowanie koncepcji pracy i metodyki badań oraz współuczestnictwo w nanoszeniu poprawek do pierwszej wersji manuskryptu przygotowanej przez mgra inż. Rafała Mazura oraz na etapie odpowiedzi na recenzje.

Jednocześnie uznaję kluczowy wkład mgra inż. Rafała Mazura w przygotowanie wszystkich czterech publikacji i wyrażam zgodę na wykorzystanie ich w Jego rozprawie doktorskiej.

Magdalena Ryżak

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

dr hab. inż. Agata Sochan
Zakład Biogeochemii Środowiska Przyrodniczego
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Lublin 01.04.2026

Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że w pracach:

- P1. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods*. SENSORS 2023, 23(1), 121. DOI 10.3390/s23010121
- P2. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Marciszuk K., Beczek M., Lamorski K., Bieganowski A. *Surface deformation and displacement of bed elements during splash - Model tests*. CATENA 2020, 185, 104277. DOI:10.1016/j.catena.2019.104277
- P3. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Przysucha B., Bieganowski A. *Soil Deformation after One Water-Drop Impact - The Effect of Texture and Soil Moisture Content*. GEODERMA 2022, 417, 115838. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115838
- P4. Mazur M., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content*. Catena 2025, 255, 109005. DOI: 10.1016/j.catena.2025.109005

mój wkład, jako promotora pomocniczego, obejmował współopracowanie koncepcji prac i metodyki badań oraz współuczestnictwo w nanoszeniu poprawek i uwag do pierwszych wersji manuskryptów przygotowanych przez mgra inż. Rafała Mazura oraz na etapie odpowiedzi na recenzje.

Jednocześnie uznaję kluczowy wkład mgra inż. Rafała Mazura w przygotowanie wszystkich czterech publikacji i wyrażam zgodę na wykorzystanie ich w Jego rozprawie doktorskiej.

Agata Sochan

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

prof. dr hab. Andrzej Bieganowski
Zakład Biogeochemii Środowiska Przyrodniczego
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Lublin 01.04.2026

Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że w pracach P1-P3 (przedstawionych poniżej) mój wkład obejmował współopracowanie metodyki badań oraz współuczestnictwo w nanoszeniu poprawek i uwag do pierwszych wersji manuskryptów przygotowanych przez mgra inż. Rafała Mazura oraz na etapie odpowiedzi na recenzje. W pracy P4 brałem dodatkowo udział we współopracowaniu koncepcji pracy.

- P1. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods*. SENSORS 2023, 23(1), 121. DOI 10.3390/s23010121
- P2. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Marciszuk K., Beczek M., Lamorski K., Bieganowski A. *Surface deformation and displacement of bed elements during splash - Model tests*. CATENA 2020, 185, 104277. DOI:10.1016/j.catena.2019.104277
- P3. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Przysucha B., Bieganowski A. *Soil Deformation after One Water-Drop Impact - The Effect of Texture and Soil Moisture Content*. GEODERMA 2022, 417, 115838. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115838
- P4. Mazur M., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content*. Catena 2025, 255, 109005. DOI: 10.1016/j.catena.2025.109005

Jednocześnie uznaję kluczowy wkład mgra inż. Rafała Mazura w przygotowanie wszystkich czterech publikacji i wyrażam zgodę na wykorzystanie ich w Jego rozprawie doktorskiej.

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

dr inż. Michał Beczek
Zakład Biogeochemii Środowiska Przyrodniczego
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Lublin 01.04.2026

Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że w pracach:

- P1. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods*. SENSORS 2023, 23(1), 121. DOI 10.3390/s23010121
- P2. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Marciszuk K., Beczek M., Lamorski K., Bieganowski A. *Surface deformation and displacement of bed elements during splash - Model tests*. CATENA 2020, 185, 104277. DOI:10.1016/j.catena.2019.104277
- P3. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Przysucha B., Bieganowski A. *Soil Deformation after One Water-Drop Impact - The Effect of Texture and Soil Moisture Content*. GEODERMA 2022, 417, 115838. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115838
- P4. Mazur M., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content*. Catena 2025, 255, 109005. DOI: 10.1016/j.catena.2025.109005

mój wkład obejmował współopracowanie metodyki badań, pomoc w realizacji pomiarów oraz współuczestnictwo w nanoszeniu poprawek i uwag do pierwszych wersji manuskryptów przygotowanych przez mgra inż. Rafała Mazura oraz na etapie odpowiedzi na recenzje. W pracy P4 brałem dodatkowo udział we współopracowaniu koncepcji pracy.

Jednocześnie uznaję kluczowy wkład mgra inż. Rafała Mazura w przygotowanie wszystkich czterech publikacji i wyrażam zgodę na wykorzystanie ich w Jego rozprawie doktorskiej.

Michał Beczek

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

dr inż. Cezary Polakowski
Zakład Biogeochemii Środowiska Przyrodniczego
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Lublin 15.10.2025

Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że w pracach:

- P1. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods*. SENSORS 2023, 23(1), 121. DOI 10.3390/s23010121
- P3. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Przysucha B., Bieganowski A. *Soil Deformation after One Water-Drop Impact - The Effect of Texture and Soil Moisture Content*. GEODERMA 2022, 417, 115838. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115838
- P4. Mazur M., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganowski A. *The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content*. Catena 2025, 255, 109005. DOI: 10.1016/j.catena.2025.109005

mój wkład obejmował współopracowanie metodyki badań, pomoc w opracowaniu wyników oraz współuczestnictwo w nanoszeniu poprawek i uwag do pierwszych wersji manuskryptów przygotowanych przez mgra inż. Rafała Mazura oraz na etapie odpowiedzi na recenzje.

Jednocześnie uznaję kluczowy wkład mgra inż. Rafała Mazura w przygotowanie wszystkich powyższych publikacji i wyrażam zgodę na wykorzystanie ich w Jego rozprawie doktorskiej.

Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego
Polskiej Akademii Nauk

ul. Doświadczalna 4
20-290 Lublin

tel.: 81 744 50 61
e-mail: sekretariat@ipan.lublin.pl

www.ipan.lublin.pl

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

dr hab. Krzysztof Lamorski
Zakład Metrologii i Modelowania Procesów Agrofizycznych
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Lublin 02.06.2026

Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

P2. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Marciszuk K., Beczek M., Lamorski K., Bieganowski A. *Surface deformation and displacement of bed elements during splash - Model tests*. CATENA 2020, 185, 104277. DOI:10.1016/j.catena.2019.104277

mój wkład obejmował pomiary z wykorzystaniem mikrotomografu, techniczne opracowaniu wyników uzyskanych z tych pomiarów, współuczestnictwo w nanoszeniu poprawek i uwag do pierwszej wersji manuskryptu przygotowanej przez mgra inż. Rafała Mazura, a także współudział w pracach prowadzonych na etapie odpowiedzi na recenzje.

Jednocześnie uznaję kluczowy wkład mgra inż. Rafała Mazura w przygotowanie powyższej publikacji i wyrażam zgodę na wykorzystanie jej w Jego rozprawie doktorskiej.

Lamorski

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

dr Bartosz Przysucha
Katedra Metod Ilościowych w Zarządzaniu
Wydział Zarządzania
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin

Lublin 01.06.2026

Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

P3. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Przysucha B., Bieganowski A. *Soil Deformation after One Water-Drop Impact - The Effect of Texture and Soil Moisture Content*. GEODERMA 2022, 417, 115838. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115838

mój wkład obejmował pomoc w statystycznej analizie danych oraz współuczestnictwo w nanoszeniu poprawek i uwag do pierwszej wersji manuskryptu przygotowanej przez mgra inż. Rafała Mazura, a także współudział w pracach prowadzonych na etapie odpowiedzi na recenzje.

Jednocześnie uznaję kluczowy wkład mgra inż. Rafała Mazura w przygotowanie powyższej publikacji i wyrażam zgodę na wykorzystanie jej w Jego rozprawie doktorskiej.

Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego
Polskiej Akademii Nauk

ul. Doświadczalna 4
20-290 Lublin

tel.: 81 744 50 61
e-mail: sekretariat@ipan.lublin.pl

www.ipan.lublin.pl

INSTYTUT AGROFIZYKI PAN

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

mgr inż. Karolina Marciszuk
Wydział Lotnictwa
Lotnicza Akademia Wojskowa
ul. Dywizjonu 303 nr 35, 08-521 Dęblin

Lublin 01.04.2026

Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

P2. Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Marciszuk K., Beczek M., Lamorski K., Bieganowski A. *Surface deformation and displacement of bed elements during splash - Model tests*. CATENA 2020, 185, 104277. DOI:10.1016/j.catena.2019.104277

mój wkład obejmował pomoc w technicznym przygotowaniu próbek oraz w opracowaniu wyników.

Jednocześnie uznaję kluczowy wkład mgra inż. Rafała Mazura w przygotowanie powyższej publikacji i wyrażam zgodę na wykorzystanie jej w Jego rozprawie doktorskiej.

Karolina Marciszuk

Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego
Polskiej Akademii Nauk

ul. Doświadczalna 4
20-290 Lublin

tel.: 81 744 50 61
e-mail: sekretariat@ipan.lublin.pl

www.ipan.lublin.pl