

prof. dr hab. Tomasz Stuczyński

Katedra Kształtowania i Projektowania Krajobrazu

Instytut Architektury Krajobrazu

Wydział Nauk Społecznych i Technicznych

Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II

Lublin, 15 września 2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Rafała Mazura

Deformacja powierzchni gleby w wyniku uderzenia kropli wody

Promotor: dr hab. Magdalena Ryżak, prof. IA PAN

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Agata Sochan

Dyscyplina rolnictwo i ogrodnictwo

1 Podstawa formalna i kryteria oceny

Podstawę sporządzenia recenzji stanowi powołanie mnie przez Radę Naukową Instytutu Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Mazura, dokonane na posiedzeniu w dniu 22 czerwca 2026 r. Postępowanie jest prowadzone w trybie eksternistycznym w dziedzinie nauk rolniczych, w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo.

Recenzję sporządzono według kryteriów art. 187 ust. 1–3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz.U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.). Ocenie podlegają: ogólna wiedza teoretyczna Kandydata, umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz oryginalność rozwiązania problemu naukowego. Ustawa dopuszcza rozprawę w formie zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów. Nie wymaga natomiast, aby badanie podstawowe kończyło się gotowym wdrożeniem.

2 Charakterystyka formalna rozprawy

Rozprawa liczy 109 stron. Strony 1–55 obejmują część syntetyczną z polskim i angielskim streszczeniem, wstępem, celami i hipotezami, opisem materiałów i metod, omówieniem wyników, wnioskami oraz bibliografią. Na stronach 56–100 zamieszczono teksty czterech publikacji P1–P4: odpowiednio na 16, 12, 7 i 10 stronach. Strony 101–109 zajmują oświadczenia autora, promotorów i współautorów. Cykl obejmuje jedną pracę przeglądową i trzy oryginalne prace badawcze; według danych podanych w rozprawie ich łączna punktacja wynosi 580 punktów, a suma wartości IF — 20,398.

Publikacje tworzące cykl są następujące:

- P1** Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganski A. Soil Deformation after Water Drop Impact—A Review of the Measurement Methods. *Sensors* 23 (2023), 121. doi 10.3390/s23010121. Praca przeglądowa; według danych podanych w rozprawie IF 3,4 i 100 punktów.
- P2** Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Marciszuk K., Beczek M., Lamorski K., Bieganski A. Surface deformation and displacement of bed elements during splash – Model tests. *Catena* 185 (2020), 104277. doi 10.1016/j.catena.2019.104277. Praca oryginalna; IF 5,198 i 140 punktów.
- P3** Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Przysucha B., Bieganski A. Soil Deformation after One Water-Drop Impact—The Effect of Texture and Soil Moisture Content. *Geoderma* 417 (2022), 115838. doi 10.1016/j.geoderma.2022.115838. Praca oryginalna; IF 6,1 i 200 punktów.

P4 Mazur R., Ryżak M., Sochan A., Beczek M., Polakowski C., Bieganski A. The potential effect of temperature on surface deformation after water drop impact in soils with different texture and moisture content. *Catena* 255 (2025), 109005. doi 10.1016/j.catena.2025.109005. Praca oryginalna; IF 5,7 i 140 punktów.

Kandydat jest pierwszym autorem wszystkich czterech publikacji. Z oświadczeń na stronach 101–109 wynika jego wiodący udział w opracowaniu koncepcji, przygotowaniu i wykonaniu doświadczeń, analizie danych oraz pisaniu manuskryptów. W P4 zakres udziału obejmuje ponadto pozyskanie finansowania i kierowanie projektem. Badania zrealizowano w ramach dwóch projektów NCN: Sonata Bis 4 dotyczącego bilansu energetycznego rozbryzgu oraz Preludium 19 dotyczącego wpływu temperatury gleby. Zakres zadeklarowanego wkładu pozwala ocenić samodzielność naukową Kandydata.

Konstrukcja cyklu jest logiczna. P1 porządkuje metody badania kraterów. P2 analizuje mechanizm na kontrolowanym złożu modelowym. P3 przenosi badania na przygotowane materiały glebowe i ocenia wpływ wilgotności, uziarnienia oraz energii kropli. P4 bada dodatkowo warunki termiczne. Kolejne publikacje rozwijają jeden problem naukowy, a część syntetyczna łączy ich wyniki w spójną całość.

3 Problem naukowy i jego znaczenie

Rozbryzg jest pierwszą, trwającą milisekundy fazą erozji wywołanej opadem. Uderzenie kropli przekazuje powierzchni pęd i energię, zwilża materiał, przemieszcza cząstki w obrębie złoża, tworzy zagłębienie i wał oraz może wyrzucać wodę i cząstki ponad powierzchnię. Końcowy krater zapisuje tylko część tego przebiegu. Nie pokazuje bezpośrednio, ile materiału opuściło próbkę, jak wysoko został wyrzucony ani z jaką prędkością i pod jakim kątem się poruszał.

Znaczenie problemu ma oparcie w szerszym dorobku badań nad erozją, a nie tylko w ogólnym przekonaniu o wadze ochrony gleby. Uderzenie kropli jest elementarnym mechanizmem odrywania i przemieszczania cząstek; w procesowym modelu EUROSEM odrywanie przez deszcz stanowi odrębny składnik bilansu erozji obok działania spływu, z uwzględnieniem energii opadu i rozbryzgu (Morgan i in., 1998). Badania doświadczalne pokazują zarazem zależność przebiegu rozbryzgu i deformacji od energii kropli, wilgotności oraz właściwości materiału i powierzchni. Nadal nie wyjaśniono jednak wystarczająco, które mierzalne cechy krateru odzwierciedlają poszczególne mechanizmy ruchu materiału i właściwości gleby. Uzasadnia to rozwijanie ilościowych pomiarów geometrii jako narzędzia badań podstawowych, bez przesądzania, że parametry krateru są już zwalidowanym wskaźnikiem erodowalności lub gotowym wejściem do modelu.

W literaturze poszczególne metody odpowiadają na odmienne pytania. Pułapki i ważenie opisują masę wyrzuconego materiału, szybkie kamery mogą ujawnić czas, prędkość i tor lotu cząstek, mikrotomografia pokazuje budowę deformacji wewnątrz złoża, a skanowanie lub fotogrametria odtwarzają geometrię powierzchni po uderzeniu. Żadna z tych metod sama nie daje pełnego bilansu masy, pędu i energii. Wartość cyklu polega na zestawieniu kilku części tego mechanizmu, a nie na zastąpieniu wszystkich pomiarów jednym parametrem krateru.

Pytanie o ruch cząstek w powietrzu ma w tej dziedzinie wyraźne uzasadnienie fizyczne. Long i in. (2014) śledzili w trzech wymiarach ziarna wyrzucone z luźnego piasku i rozróżnili cząstki przenoszone z wodą, poruszające się szybciej i pod małym kątem, od suchych ziaren wyrzucanych wolniej i bardziej stromo. Furbish i in. (2007) połączyli rejestrację szybką z miejscem lądowania ziaren, wskazując znaczenie zderzeń między nimi. Badania te nie służą do

wytykania braków innego eksperymentu. Pokazują natomiast, że dwa ziarna znalezione w podobnej odległości od miejsca uderzenia mogą przebyć tę drogę w inny sposób. Dlatego końcowy zasięg i tor lotu są różnymi informacjami o mechanizmie.

Za szczególnie wartościowe uważam przejście od złoża modelowego do materiałów glebowych oraz połączenie obserwacji ruchu, obrazu wnętrza złoża i końcowej geometrii powierzchni. P2 pokazuje mechanizm w układzie uproszczonym, w którym można śledzić pojedyncze kulki. P3 i P4 sprawdzają, jak kształt krateru zmienia się w rzeczywistych, choć przygotowanych laboratoryjnie materiałach glebowych. Taka kolejność jest właściwa dla badań podstawowych: najpierw rozpoznaje się przebieg zjawiska i czynniki nim sterujące, a dopiero później buduje i sprawdza zastosowania.

Rozprawę należy więc oceniać przede wszystkim jako badanie podstawowe z zakresu fizyki gleby i mechaniki uderzenia kropli. Samo lepsze poznanie, skąd pochodzą przemieszczone cząstki, jak wilgotność zmienia ich ruch oraz jak energia uderzenia wpływa na końcową deformację, stanowi wystarczające uzasadnienie naukowe. Nie należy wymagać od tego etapu gotowego modułu modelu erozji. Jednocześnie nie można przedstawiać takiego zastosowania jako wyniku już wykazanego. Rozprawa nie sprawdza, czy parametry krateru poprawiają przewidywanie masy rozbryzgu, spływu albo utraty gleby na nowych powierzchniach. Jest to uzasadniona perspektywa dalszych badań, a nie obecny poziom dowodu.

4 Cel pracy oraz hipotezy badawcze

Autor określił cel główny jako opis deformacji powierzchni gleby w wyniku uderzenia pojedynczej kropli wody w kontekście początkowego etapu erozji wodnej, czyli zjawiska rozbryzgu. Cel jest jasny, odpowiada tytułowi i został rozwinięty w trzech celach szczegółowych:

- C1** określenie sposobu przemieszczenia elementów złoża modelowego zależnie od ich początkowego położenia po uderzeniu kropli;
- C2** określenie wpływu uziarnienia i początkowej wilgotności gleb na wielkość i kształt kraterów tworzonych przez krople o różnej energii;
- C3** określenie łącznego wpływu temperatury, wilgotności i uziarnienia na wielkość i kształt kraterów.

Cele szczegółowe odpowiadają publikacjom P2, P3 i P4. Zostały zrealizowane w tym sensie, że dla każdego z nich przeprowadzono właściwy eksperyment i uzyskano wyniki dotyczące wskazanych zmiennych. Osobnej oceny wymaga jednak zakres potwierdzenia hipotez.

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

Ocena: hipoteza została zasadniczo wykazana w granicach modelowego układu P2. Wyniki pokazują różne strefy ruchu i odmienne zachowanie złoża suchego oraz nasyczonego. Pewność oceny testów ilościowych zależy jednak od wyjaśnienia, czy wiele markerów z jednego rozbryzgu traktowano jako obserwacje zagnieżdżone, a nie jako niezależne powtórzenia.

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

Ocena: hipoteza została wykazana tylko częściowo. P3 przekonująco pokazuje dominujący wpływ wilgotności i różnice między trzema badanymi materiałami. Nie wykazano równie mocno członu dotyczącego zależności wpływu energii od uziarnienia: raportowane wartości ω^2 dla

interakcji gleba $\times$ energia są bliskie zeru. Ponadto każdy poziom uziarnienia reprezentuje jedna konkretna gleba, dlatego efektu granulometrii nie można całkowicie oddzielić od innych różnic między materiałami.

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

Ocena: hipoteza została wykazana częściowo i dla określonych kombinacji warunków. Efekt główny wariantu termicznego był istotny dla średnicy równoważnej krateru przy $p = 0,008$, lecz nie dla głębokości, współczynnika α ani objętości. Wystąpiły wybrane interakcje z glebą i wilgotnością. Wynik wspiera zatem ostrożne twierdzenie, że warunki termiczne mogą modyfikować niektóre cechy krateru, a nie ogólny wniosek o silnym wpływie temperatury na całą deformację.

Cel główny rozprawy został osiągnięty. Nie wszystkie człony hipotez H2 i H3 uzyskały jednakowe wsparcie. Takie rozstrzygnięcie nie obniża wartości całego cyklu. Przeciwnie, ograniczony i zależny od warunków efekt temperatury jest sam w sobie ważnym wynikiem badania podstawowego.

5 Ocena programu badań i metod

5.1 Złoże modelowe i pomiary dynamiczne

W P2 zastosowano kulki szklane o średnicy 0,425–0,600 mm, barwne markery, fotografie przed i po uderzeniu, trzy zsynchronizowane kamery Phantom Miro 310 oraz mikrotomografię. Dwie szybkie kamery ustawiono na poziomie próbki pod kątem 90° , a trzecią nad próbką; artykuł podaje 3260 klatek na sekundę. Uproszczenie materiału było uzasadnione celem mechanistycznym, ponieważ pozwoliło określić początkowe i końcowe położenie wybranych elementów oraz rozpoznać zmiany pod powierzchnią.

Badanie wykazało, że materiał tworzący krater nie tylko opuszcza nieckę, lecz także przesuwają się w jej obrębie i współtworzy wał. W złożu suchym wyróżniono ruch w obszarze zwilżonym, wybicie i przemieszczenie do wału, a w złożu nasyconym ruch w obrębie deformacji i wybicie. Maksymalny odnotowany zasięg pojedynczej kulki wyniósł 135,9 mm w złożu suchym i 295,9 mm w nasyconym; ponad 95% kulek wybitych ze złoża suchego pochodziło z warstwy powierzchniowej. Kamery ujawniły również około 7 ms rozszerzania obszaru zwilżonego i około 25 ms jego późniejszego kurczenia. Są to konkretne wyniki dotyczące fizyki rozbryzgu.

Ilościowa analiza P2 opierała się głównie na porównaniu położenia markerów przed uderzeniem i po nim oraz na miejscu ich zatrzymania na papierze samoprzylepnym. Był to wybór zgodny z celem tej publikacji: określić, skąd pochodziły przemieszczone elementy i jaki rodzaj ruchu wykonały. P2 nie miała na celu rekonstrukcji trójwymiarowych torów lotu, wysokości wyrzutu, kątów ani prędkości kulek, dlatego brak tych wielkości nie jest wadą wykonania badania. Jest natomiast punktem wyjścia do nowego pytania mechanistycznego: czy zależne od wilgotności różnice zasięgu wynikają przede wszystkim z prędkości, kąta wyrzutu, udziału wody unoszącej ziarna, czy z połączenia tych czynników. Odpowiedź wymagałaby osobno zaprojektowanego, przestrzennie skalibrowanego pomiaru wielokamerowego.

Najważniejszą kwestią statystyczną wymagającą wyjaśnienia jest poziom niezależności danych. Wykonano 23 rozbryzgi dla złoża suchego i 10 dla nasyczonego, śledząc odpowiednio 370 i 237 markerów. Markerów obserwowanych podczas jednego rozbryzgu nie można traktować jak wielu niezależnych doświadczeń. Podobnie trzy przekroje tomograficzne tej samej próbki są

podpomiarami, nie kolejnymi próbkami. Publikacja nie podaje dostatecznie jasno sposobu agregacji tych danych przed testowaniem. Jest to pytanie o model statystyczny, a nie stwierdzenie, że analiza była błędna.

5.2 Wytwarzanie kropli i kontrola energii uderzenia

We wszystkich doświadczeniach stosowano wodę destylowaną, pompę perystaltyczną i szklaną kapilarę. Wielkość kropli ustalano przez kapilarę, a energię zmieniano przede wszystkim wysokością swobodnego spadku. Część syntetyczna przypisuje P2 kroplę o średnicy 4,2 mm, spadek z 1,5 m i energię 0,49 mJ. W P3 porównano dwie energie: 0,49 mJ przy spadku z 1,5 m oraz 1,35 mJ przy spadku z 7 m, przy tej samej deklarowanej średnicy 4,2 mm. P4 zastosowała kroplę 4,3 mm spadającą z 7 m, o prędkości $8,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i energii 1,40 mJ. Warunek P2 odpowiada zatem niskiemu poziomowi P3, a warunek P4 jest zbliżony do wysokiego poziomu P3, lecz nie jest z nim liczbowo identyczny.

Standaryzacja operacyjna została opisana sensownie. Stałe źródło wody i kapilara ograniczały zmienność średnicy, wysokość ustalała warunek energetyczny, kamera szybka służyła do pomiaru prędkości i średnicy, a do analizy dopuszczano wyłącznie centralne uderzenia pojedynczej kropli. P3 podaje, że energię wyznaczano z masy i prędkości kropli. Spadek z 7 m dawał ponad 90% prędkości granicznej kropli o tej wielkości, co uzasadnia fizyczne podobieństwo do opadu naturalnego. Nie jest to jednak sprawdzenie dokładności pomiaru energii.

Zakres kontroli różni się między publikacjami. P2 podaje odchylenie standardowe średnicy 0,02 mm. P3 podaje docelowe średnice i energie, ale w opisie metody nie przedstawia ich rozrzutu. P4 raportuje błędy standardowe: 0,02 mm dla średnicy, $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla prędkości i 0,02 mJ dla energii, a także brak różnic energii między wariantami termicznymi. Dane te wskazują na niewielki rozrzut monitorowanych parametrów w P4. Nie podano jednak liczby kropli użytej do oszacowania błędów standardowych ani pełnego rozkładu wyników.

Zakres ten jest wystarczający, aby traktować dwa wyraźnie rozdzielone poziomy energii P3 jako zamierzone warunki doświadczenia, a kontrolę P4 jako dowód, że warianty termiczne nie różniły się wykrywalnie energią kropli. Brak pełnego łańcucha niepewności nie unieważnia analiz wariancji ani porównań wewnątrz tych doświadczeń. Ogranicza natomiast ocenę małych różnic, przypisanie im znaczenia fizycznego oraz porównywanie wartości bezwzględnych między publikacjami.

Na podstawie rozprawy można częściowo ocenić zmienność średnicy w P2 oraz precyzję średnich parametrów kropli w P4. Nie jest to pełna ocena powtarzalności źródła między seriami, dniami i ponownymi ustawieniami. Brakuje liczby obserwacji tworzących podane błędy standardowe, opisu skali długości w płaszczyźnie obrazu, kontroli podstawy czasu kamery, sposobu wyznaczenia masy i przeniesienia tych składowych do niepewności energii. Osobna praca zespołu o użyciu szybkich kamer w badaniach rozbryzgu potwierdza znajomość problemu, ale bez jawnego powiązania procedur nie zastępuje opisu konkretnych serii P2–P4. Ważne jest też ustalenie, czy średnicę, prędkość i energię zapisano dla każdej kropli tworzącej analizowany krater, czy tylko dla osobnej serii kontrolnej. Tylko w pierwszym przypadku można bezpośrednio badać zależność zmienności geometrii krateru od rzeczywistej energii pojedynczego uderzenia.

Energię kinetyczną wyznacza zależność $E = mv^2/2$. Jeżeli masę obliczano z obrazu i założenia kulistego kształtu kropli, błąd średnicy ma szczególne znaczenie, ponieważ masa rośnie z trzecią potęgą średnicy. Dla danych P4 proste sprawdzenie rachunkowe — kropla wody o średnicy 4,3 mm i prędkości $8,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ — daje około 1,43 mJ, czyli wartość bliską raportowanym 1,40 mJ.

Potwierdza to spójność rzędu wielkości, lecz nie zastępuje walidacji energii. Minimalne sprawdzenie obejmowałoby: wzorzec długości w płaszczyźnie toru kropli, kontrolę podstawy czasu kamery, niezależne wyznaczenie średniej masy przez zważenie znanej liczby kropeł oraz powtórzenie pomiaru średnicy i prędkości na początku, w środku i na końcu serii. Pozwoliłoby to oddzielić stałe obciążenie skali od rozrzutu źródła i obliczyć niepewność energii. Najsilniejszy układ danych powstałby wtedy, gdy średnicę i prędkość przypisano do tej samej kropli, która utworzyła konkretny krater; seria kontrolna wystarcza do standaryzacji warunku, ale nie pozwala wyjaśniać zmienności między pojedynczymi kraterami.

5.3 Materiały glebowe i plany czynnikowe

W P3 i P4 zastosowano pełne, zrównoważone układy czynnikowe. W każdej pracy utworzono 18 kombinacji warunków i wykonano po 10 niezależnych kraterów w kombinacji, czyli po 180 doświadczeń. Każdy krater powstawał po uderzeniu jednej kropli w osobno przygotowaną próbkę. Sześć widoków skanera służyło zbudowaniu jednego modelu powierzchni i nie zwiększało liczby powtórzeń z 10 do 60. Taki plan pozwala analizować efekty główne i interakcje, pod warunkiem zachowania właściwej jednostki eksperymentalnej.

Materiały glebowe wysuszone, przesiano przez sito 2 mm, zwilżono do ustalonych potencjałów i ponownie umieszczono w pierścieniach o wysokości 10 mm. Postępowanie to zwiększa kontrolę warunków i jest właściwe dla badania podstawowego. Ogranicza jednak zakres uogólnienia. Próby nie zachowują struktury nienaruszonego bloku, a suszenie, przesiewanie i ponowne ułożenie mogły zmienić układ agregatów i porów; nie występowały też korzenie ani ciągłość profilu. Wyniki odnoszą się do przygotowanych materiałów, poziomej powierzchni i pojedynczego uderzenia, a nie bezpośrednio do całego profilu glebowego, stoku czy sekwencji naturalnego opadu.

W cyklu użyto pięciu materiałów glebowych, a w każdej z prac P3 i P4 po trzy. Gleby różniły się nie tylko rozkładem granulometrycznym, lecz także zmierzonymi wartościami zawartości węgla i gęstości objętościowej; mogły się też różnić niemierzonymi właściwościami struktury, zwilżalności i trwałości agregatów. Czynnik nazywany teksturą reprezentuje więc porównanie konkretnych materiałów o różnym uziarnieniu. Wyniki dobrze dokumentują różnice między tymi glebami, lecz nie pozwalają przypisać wszystkich różnic wyłącznie granulometrii.

W P4 wariant termiczny łączył temperaturę powietrza, gleby i kropli, dlatego doświadczenie oceniało łączny wpływ tego fizycznie uzasadnionego zestawu warunków, a nie osobny wpływ każdej z trzech temperatur. Warunki laboratoryjne kontrolowano za pomocą ogrzewania i klimatyzacji, temperaturę monitorowano niezależnymi przyrządami z dopuszczalnym odchyleniem 2 °C, wilgotność względną utrzymywano w zakresie 55–65%, a pomiar kamerą szybką nie wykazał różnic energii kropli między wariantami. Jest to mocna strona planu. Wniosek powinien jednak dotyczyć całego wariantu termicznego; przypisanie obserwowanych zmian konkretnie temperaturze gleby, kropli albo powietrza pozostaje interpretacją mechanizmu.

P4 trafnie wskazuje, że lokalne zróżnicowanie wilgotności i mikrorzeźby przygotowanych powierzchni mogło odpowiadać za część rozrzutu. W P3 i P4 wilgotność zadawano przez dodanie wody do odważonego materiału na podstawie wcześniej wyznaczonych krzywych retencji. Nie podano jednak czasu od wymieszania gleby z wodą do uderzenia kropli, sposobu zabezpieczenia przygotowanych prób przed parowaniem ani informacji, czy stosowano okres wyrównania wilgotności. Jest to brak opisu, a nie dowód, że wyrównania nie prowadzono; we wcześniejszej pracy zespołu próbki pozostawiano przez 24 godziny w szczelnym pojemniku w celu wyrównania wilgotności (Ryżak i in., 2015). W kolejnym doświadczeniu wystarczyłoby ujednolicić i podać

czas kondycjonowania oraz sprawdzać wilgotność grawimetrycznie na próbkach towarzyszących lub dla każdej partii, bez naruszania powierzchni próbek właściwych. Jest to szczególnie ważne, ponieważ wilgotność była w P3 czynnikiem o największym wpływie, a w P4 wszystkie cechy krateru zależały od wilgotności oraz jej interakcji z materiałem. Brak tej informacji nie podważa dużego i konsekwentnego efektu wilgotności, lecz ogranicza ocenę, czy mniejsze różnice i interakcje nie zależały częściowo od zmienności przygotowania próbek.

5.4 Pomiary geometrii i ich walidacja

Praca P1 kompetentnie porządkuje metody badania kraterów i omawia ich mocne oraz słabe strony. Autor zwraca uwagę na trudności związane z oświetleniem, powierzchnią moką i ciemną, wyznaczaniem brzegu deformacji, rejestracją chmur punktów oraz czasem pomiaru. Przegląd ma charakter narracyjny, bez przedstawienia strategii wyszukiwania i selekcji prac. Nie przekreśla to jego wartości jako wprowadzenia metodologicznego, lecz ogranicza możliwość oceny kompletności literatury.

P1 opisuje bliskozasięgową rekonstrukcję trójwymiarową ze zdjęć wykonywanych pod różnymi kątami. Nie jest to po prostu fotogrametria lotnicza ani wytwarzanie ortofotomapy. Oba zastosowania opierają się na zdjęciach nakładających się, skali i geometrii obserwacji, lecz sposób kontroli błędu zależy od układu kamer i badanego obiektu. Nie ma więc podstaw, aby automatycznie wymagać od pomiaru małego krateru sieci punktów terenowych właściwej nalotom. W P1 brakuje natomiast ilościowego rozróżnienia między rozdzielczością lub gęstością próbkowania a dokładnością i precyzją rekonstrukcji. Nie podano błędów skali, błędów w płaszczyźnie powierzchni i w kierunku głębokości ani powtarzalności pełnej procedury. Jest to ograniczenie głębokości przeglądu P1, a nie wada pomiarów P3 i P4, ponieważ w tych pracach zastosowano skaner światła strukturalnego, a nie fotogrametrię.

W P3 i P4 użyto skanera światła strukturalnego Scan3D UNIVERSE 10 Mpix. Dla każdej próbki wykonano sześć skanów po obrocie o 60°, oczyszczono i połączono chmury punktów, zbudowano siatkę, a następnie wyznaczono powierzchnię odniesienia, głębokość, objętość, średnicę i kształt konturu. Podane 655 punktów na mm² oraz odstęp około 0,039 mm opisują gęstość próbkowania powierzchni. Nie określają błędów wysokości, średnicy ani objętości.

Opis projekcji zmieniających się prążków, ich rejestracji przez detektor i utworzenia chmury punktów pozwala rozpoznać klasę zastosowanej techniki, lecz nie przedstawia wprost modelu pomiaru. W powierzchniowych systemach światła strukturalnego tej klasy współrzędne XYZ są wyznaczane z odpowiadających sobie elementów wzoru projektora i obrazu kamery w skalibrowanej geometrii, na zasadzie triangulacji optycznej. Jest to inny etap niż późniejsze łączenie punktów w siatkę trójkątów. Stwierdzenie, że oprogramowanie interpretuje sposób odbicia światła, jest zbyt ogólne, aby odtworzyć drogę od obrazów prążków do metrycznych współrzędnych. Wystarczyłby funkcjonalny opis identyfikacji lub fazy prążków, geometrii projektor–kamera, korekcji optyki i nadania skali; nie jest potrzebne ujawnienie kodu źródłowego programu ani firmowych szczegółów implementacyjnych (VDI/VDE 2634-2:2012; Rachakonda i in., 2019).

Terminów powtarzalność, precyzja i dokładność nie należy tu stosować zamiennie. Powtarzalność oznacza zgodność wyników uzyskanych po kilkukrotnym wykonaniu całej procedury na tym samym, niezmiennym obiekcie i w tych samych warunkach. Precyzja opisuje rozrzut takich powtórzeń, na przykład przez odchylenie standardowe. Dokładność wymaga porównania z wartością odniesienia i obejmuje również stałe obciążenie wyniku. Metoda może być bardzo powtarzalna, a jednocześnie systematycznie zawyżać głębokość lub objętość.

Kalibracja jest zatem warunkiem koniecznym, ale nie zastępuje walidacji. Kalibracja ustala zależność między sygnałem a wielkością mierzoną oraz parametry geometryczne i skalę przyrządu w określonych warunkach. Walidacja odpowiada na inne pytanie: czy po przejściu przez cały rzeczywiście zastosowany tor — przygotowanie obiektu, akwizycję sześciu widoków, ich rejestrację, filtrację, budowę siatki, wyznaczenie powierzchni odniesienia i obliczenie cech krateru — wynik ma wymagane obciążenie, rozrzut i poziom szumu, od którego należy odróżnić rzeczywistą zmianę. Błąd może powstać po kalibracji wskutek ustawienia próbki, właściwości optycznych powierzchni, dryfu układu, łączenia widoków, parametrów obróbki lub decyzji operatora. Z tego powodu dokumentacja kalibracji lub sprawdzenia aparatu potwierdza zdolność samego przyrządu w zadanej konfiguracji, natomiast wynik wzorca i powtórzeń potwierdza przydatność kompletnej procedury do konkretnego zadania.

Walidacja powinna rozdzielać składowe położenia w płaszczyźnie XY od składowej wysokości Z, ponieważ system triangulacyjny nie musi mieć jednakowej charakterystyki błędu we wszystkich kierunkach. Nie można z góry założyć, że Z jest zawsze mniej dokładne; trzeba to wykazać dla użytej geometrii i pola pomiarowego. Dla powtarzanych pomiarów wzorca należałoby podać osobno obciążenie i odchylenie standardowe w XY oraz Z, a dla końcowych cech krateru — obciążenie, SD, względne odchylenie standardowe i największą różnicę głębokości, średnicy i objętości. RSD współrzędnych względem umownego początku układu byłoby mało informacyjne; właściwsze są składowe błędy względem wzorca oraz RSD dodatnich cech geometrycznych. Bez tego rozdzielczości modelu nie można utożsamiać z dokładnością pomiaru deformacji.

Dziesięć kraterów w każdym wariancie P3 i P4 pokazuje łączny rozrzut między osobno przygotowanymi próbkami, kolejnymi kroplami i wynikami skanowania. Nie jest to pomiar precyzji skanera, ponieważ za każdym razem mierzono inny, fizycznie powstały krater. Także sześć chmur punktów nie stanowi sześciu powtórzeń. Są to widoki tego samego obiektu potrzebne do zbudowania jednego modelu. Na podstawie tych danych można ocenić zmienność całego doświadczenia, lecz nie można oddzielić zmienności rozbryzgu od błędu pomiaru.

W dokumentacji nie znalazłem liczbowego wyniku walidacji całej procedury dla użytego egzemplarza skanera, sposobu łączenia chmur, obróbki i badanych powierzchni. Schemat P4 określa wzajemne ustawienie sześciu chmur jako ich kalibrację, lecz jest to etap rejestracji jednego modelu, a nie sprawdzenie wyniku względem obiektu o znanej geometrii. Producent urządzeń UNIVERSE deklaruje kalibrację fabryczną i dostarczanie certyfikatu dokładności, co przemawia przeciw przypuszczeniu, że aparat pracował bez jakiegokolwiek kalibracji. W rozprawie nie przedstawiono jednak certyfikatu użytego egzemplarza i konfiguracji 10 Mpix ani wyniku sprawdzenia przed serią lub po niej. Jest to istotne, ponieważ VDI/VDE 2634-2 oraz ISO 10360-13 rozdzielają przyjęcie aparatu na podstawie charakterystyki producenta od jego ponownego sprawdzania przez użytkownika, a błędy parametrów kamery, projektora i ich wzajemnej geometrii mogą powodować systematyczne błędy wymiarowe (Icasio Hernandez i in., 2024). Brak raportu nie dowodzi błędności kierunków obserwowanych różnic, ale nie pozwala oddzielić błędu pomiaru od naturalnej zmienności kraterów ani ustalić najmniejszej deformacji odróżnialnej od szumu procedury.

Normowe kontrole optycznych systemów 3D wykorzystują skalibrowane płaszczyzny, kule i odległości wzorcowe. Jako proste sprawdzenie uzupełniające, lepiej dopasowane do tej konkretnej aplikacji, można zastosować sztywną, matową płytkę z dwoma lub trzema frezowanymi zagłębieniami o średnicach i głębokościach zbliżonych do badanych kraterów. Wartości

odniesienia powinny wynikać z niezależnego pomiaru rzeczywistych wymiarów wykonanej płytki, a nie tylko z projektu CAD; dla zagłębień o prostej geometrii objętość można obliczyć z tych wymiarów. Kilka pełnych cykli po sześć widoków, każdorazowo po zdjęciu i ponownym ustawieniu płytki, pozwoliłoby oszacować obciążenie i powtarzalność dla głębokości, średnicy i objętości. Dziesięć cykli byłoby rozsądną propozycją praktyczną, a nie liczbą wynikającą z normy. Dodatkowo można wielokrotnie zeskanować ten sam trwały krater lub inną stabilną powierzchnię, aby ocenić powtarzalność w warunkach zbliżonych do doświadczenia; nie zastępuje to jednak wzorca o znanej geometrii. Pary pełnych pomiarów powierzchni przygotowanej jak do doświadczenia, lecz bez uderzenia kropli, pozwoliłyby ponadto oszacować pozorną zmianę wytwarzaną przez ponowne ustawienie, skanowanie i obróbkę. Byłby to test stabilności i poziomu szumu całej procedury, a nie wzorec jej dokładności, ponieważ prawdziwa geometria powierzchni gleby nie jest znana. Porównanie kilku rzeczywistych kraterów z profilometrem lub mikrotomografią byłoby wartościowym rozszerzeniem, a nie warunkiem uznania wszystkich dotychczasowych wyników.

Bezpośredni przykład z badań rozbryzgu podaje Laburda i in. (2021), którzy w fotogrametrii SfM-MVS porównywali modele powierzchni przed deszczem i po nim, stosowali znaczniki odniesienia, raportowali błędy w płaszczyźnie i wysokości oraz próg zmiany odróżnialnej od błędu rekonstrukcji, a zmianę objętości zestawiali z niezależnie zebraną masą rozbryzgu. Była to inna metoda i inne warunki, więc wartości błędów nie można przenieść na skaner zastosowany w rozprawie. Praca pokazuje jednak właściwą logikę: osobno opisać próbkowanie modelu, błąd rekonstrukcji, zmianę odróżnialną od błędu i zgodność z niezależną wielkością fizyczną.

Powierzchnię odniesienia tworzone w oprogramowaniu Geomagic z nieodkształconego otoczenia krateru. P1 dopuszcza zarówno powierzchnię sztuczną, jak i skan wykonany przed uderzeniem. Te rozwiązania nie są równoważne: płaszczyzna wyznaczona po zdarzeniu może pomijać wcześniejszą mikrorzeźbę, natomiast skan tej samej próbki przed uderzeniem — po odpowiedniej rejestracji obu modeli — pozwala wyznaczyć pole zmiany wysokości względem rzeczywistej powierzchni początkowej. Dodatkowo etap prowadzony w ImageJ wymaga podania skali eksportowanego obrazu, zasad wyznaczenia granicy, ewentualnego wygładzania i progowania. Dotyczy to zwłaszcza współczynnika kształtu, który jest wrażliwy na drobne nierówności obrysu.

Warto także jasno rozdzielić dwa znaczenia słowa „chmura”. Chmura punktów z P3 i P4 jest statycznym zbiorem współrzędnych powierzchni po uderzeniu, z którego buduje się siatkę krateru. Nie jest chmurą wyrzuconych cząstek widoczną w nagraniu szybkiej kamery. Skan wykonany po rozbryzgu nie rejestruje cząstek znajdujących się w powietrzu ani tych, które opuściły pole pomiarowe.

5.5 Analiza statystyczna

W P3 i P4 zastosowanie wieloczynnikowej analizy wariancji jest zgodne z planem doświadczeń. Uwzględnienie interakcji było konieczne i stanowi mocną stronę. Publikacje nie przedstawiają jednak pełnych tabel z sumami kwadratów, stopniami swobody, średnimi kwadratami i statystyką F, szczegółowych wyników diagnostyki reszt ani przedziałów ufności. W P3 podano ω^2 jako miarę udziału czynnika w wyjaśnianiu zmienności, ale opis mianownika jako sumy kwadratów modelu jest niejednoznaczny. Niewielkie wartości ujemne ω^2 nie są same w sobie dowodem błędu rachunkowego; wymagają pokazania dokładnej definicji i danych użytych do obliczeń.

P3 dzieli wartości ω^2 na małe, średnie i duże według progów 0,1, 0,3 i 0,5, przypisanych Cohenowi. Ponieważ znaczenie progu zależy od tego, jaką wersję wskaźnika obliczono i jaki ma ona mianownik, sama etykieta nie może zastąpić interpretacji wyniku w jednostkach fizycznych. W dokumentacji brakuje wskazania miejsca w źródle oraz wyjaśnienia, dlaczego ta skala odpowiada zastosowanemu wzorowi. Wymaga to doprecyzowania, a nie automatycznego uznania obliczeń za błędne.

W P3 podano zastosowanie testów Shapiro–Wilka i Bartletta, natomiast P4 wymienia test Shapiro–Wilka, analizę wariancji i porównania Tukeya, lecz nie raportuje testu Bartletta. Przy dziesięciu obserwacjach w każdej kombinacji warunków testy założeń mają ograniczoną zdolność wykrywania odchylen. Ważne byłyby zatem także wykresy reszt, sprawdzenie obserwacji silnie wpływających na wynik i analiza, czy wnioski są odporne na pojedyncze nietypowe krater. Nie ma podstaw, by uznać zastosowaną analizę za niewłaściwą, lecz pełniejsza dokumentacja pozwoliłaby tę ocenę przeprowadzić.

Wyniki P3 i P4 zaprezentowano jako średnie z błędami standardowymi. Błąd standardowy mówi, jak precyzyjnie oszacowano średnią dla dziesięciu kraterów, a nie jak bardzo różniły się pojedyncze krater. Dla niezależnych obserwacji odchylenie standardowe można odtworzyć jako SE pomnożony przez pierwiastek z liczby obserwacji, ale nadal będzie to łączny rozrzut całego doświadczenia. Przykładowo dla raportowanej w P3 średniej głębokości $0,14 \pm 0,03$ mm, gdzie 0,03 mm jest SE i $n = 10$, odpowiadające SD wynosi około 0,095 mm. Nie jest to dowód błędu skanera; pokazuje znaczne łączne zróżnicowanie tworzenia i pomiaru kraterów, którego bez osobnej kontroli nie można rozłożyć na składniki. Dla oceny fizycznej zmienności zjawiska należy pokazać odchylenia standardowe lub współczynniki zmienności, a dla siły wniosków różnice w milimetrach i milimetrach sześciennych wraz z przedziałami ufności. W P4 warto było przedstawić miary wielkości efektu porównywalne z P3.

Wyniki wielu porównań po analizie wariancji oznaczono literami testu Tukeya, co jest poprawnym sposobem kontroli porównań parami w obrębie określonego zestawu średnich. Bez tabel liczbowych, danych surowych i jednoznacznego opisu każdej rodziny porównań nie można jednak niezależnie odtworzyć wszystkich oznaczeń. Najważniejszy wniosek statystyczny jest mimo to czytelny: wilgotność wyjaśnia dużą część zmienności, natomiast interakcja gleba $\times$ energia w P3 ma wartości ω^2 bliskie zeru i nie daje mocnego oparcia dla pełnego brzmienia H2.

6 Najważniejsze wyniki i wkład naukowy

P2 pokazuje, że przebieg deformacji zależy od położenia początkowego elementu złoża i obecności wody. W złożu suchym wyróżniono przesunięcie w obrębie obszaru zwilżonego, wybicie oraz przemieszczenie do wału. W złożu nasyconym stwierdzono przemieszczenie w obrębie deformacji i wybicie. Kamera szybka, markery i tomografia ujawniły, że końcowa geometria jest skutkiem kilku rodzajów ruchu, a nie prostego usunięcia materiału z niecki. Jest to wartościowy i zgodny z celem P2 wynik mechanistyczny.

P3 wykazała duże zróżnicowanie głębokości, średnicy równoważnej, kolistości i objętości kraterów. Najbardziej konsekwentnym czynnikiem była wilgotność. Wzrost wilgotności w badanym zakresie zwiększał rozmiary kraterów, a materiał o największym udziale pyłu tworzył najbardziej koliste deformacje. Energia kropli zwiększała średnie wartości części parametrów, lecz różnice nie zawsze były istotne. Ważnym wynikiem jest również stwierdzenie, że przybliżenie krateru wycinkiem kuli zawyżało jego objętość średnio o około 23% względem

obliczenia z pełnej siatki 3D. Jest to dowód przydatności trójwymiarowego opisu nieregularnej geometrii, choć nie stanowi niezależnej walidacji skanera.

P4 wykazała, że bezpośredni wpływ warunków termicznych jest mniejszy niż wpływ gleby i wilgotności. Istotność efektu głównego stwierdzono dla średnicy równoważnej, a dla pozostałych parametrów znaczenie miały wybrane interakcje. W pyle gliniastym przy większej wilgotności wzrost temperatury wiązał się z kraterami szerszymi i płytszymi. W piasku gliniastym warunki termiczne modyfikowały wpływ wilgotności na średnicę i objętość. Dla gliny piaszczystej wpływu temperatury nie stwierdzono. Ostrożna konkluzja autorów P4, że temperatura działa w określonych warunkach i słabiej niż wilgotność, jest zgodna z wynikami.

Oryginalność osiągnięcia nie polega na wynalezieniu skanowania 3D ani na samym zastosowaniu znanych parametrów geometrycznych. Polega na zbudowaniu spójnego programu, który łączy dynamikę rozbryzgu, ruch elementów złoża, strukturę wewnętrzną i końcową geometrię krateru oraz sprawdza ich zależność od materiału, wilgotności, energii i warunków termicznych. Cykl wnosi nowe dane do słabo rozpoznanego problemu fizyki gleby i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

7 Dyskusja wyników, ograniczenia i możliwe zastosowania

7.1 Zakres wyjaśnienia mechanizmu

Dyskusja rozprawy jest dobrze osadzona w literaturze dotyczącej uderzenia kropli, ruchu materiału ziarnistego, wilgotności i deformacji gleby. Autor rozpoznaje część ograniczeń, w tym przygotowanie uproszczonych prób, możliwą niejednorodność powierzchni i wstępny charakter badania temperatury. W kilku miejscach granica między wynikiem a proponowanym wyjaśnieniem powinna być jednak wyraźniejsza. P3 i P4 mierzą końcową geometrię całej powierzchni. Nie pozwalają bezpośrednio ustalić, która frakcja została wyrzucona ani jakie procesy odpowiadały za jej przemieszczenie. Interpretacje dotyczące odmiennego zachowania piasku, pyłu i łu są fizycznie uzasadnione, ale w tych doświadczeniach nie były mierzone osobno.

Dalsze wyjaśnianie źródeł zmienności wymagałoby większej populacji gleb, z kilkoma niezależnymi miejscami poboru lub blokami dla podobnych klas uziarnienia. Pomiar ciągłych właściwości — rozkładu wielkości cząstek, węgla organicznego, gęstości, zwilżalności i stabilności agregatów — pozwoliłyby następnie zastosować model regresyjny lub hierarchiczny z wieloma predyktorami i ocenić ich osobny udział. Nie jest to zarzut, że obecny eksperyment ma zbyt mało pojedynczych kraterów ani że powinien był od razu objąć taki program. Dziesięć powtórzeń w komórce służy oszacowaniu zmienności w danym materiale; większa liczba niezależnych gleb jest potrzebna dopiero do uogólnienia mechanizmu na właściwości gleby jako populację.

7.2 Wyrzut cząstek i bilans rozbryzgu

P2 pokazuje strefy, z których cząstki są wybierane, ich końcowy zasięg i różnicę między złożem suchym a nasyconym. Nie wyjaśnia ilościowo, jak dzieli się energia kropli między odkształcenie złoża, zwilżenie i infiltrację, ruch wału, wyrzut wody oraz ruch cząstek ponad powierzchnię. Nie było to zadaniem P2, ale jest naturalnym kolejnym problemem badań podstawowych. P3 i P4 dodają dokładniejszy opis końcowej geometrii, lecz również nie domykają bilansu materiału i energii.

Najbardziej wartościowym rozwinięciem byłoby równoczesne mierzenie zmiany geometrii zagłębienia i wału, masy wyrzuconego materiału, rozkładu odległości lądowania oraz rozkładu wielkości wyrzuconych cząstek. Tor lotu można śledzić dla widocznych ziaren lub znaczników za pomocą skalibrowanych i zsynchronizowanych kamer. Nie jest natomiast realistyczne śledzenie w taki sposób każdej drobnej cząstki pyłu lub iłu niesionej w kropli. Selektywność transportu tych frakcji należy badać przez zebranie materiału w pułapkach na różnych odległościach i późniejszą analizę uziarnienia. Połączenie obu podejść pozwoliłoby odróżnić mechanizm ruchu widocznych ziaren od składu materiału rzeczywiście wyniesionego z próbki.

Wyniki Longa i in. (2014) pokazują, dlaczego informacja o trajektorii może być ciekawa: niski kąt i duża prędkość mogą oznaczać transport z wodą, a wyższy kąt i mniejsza prędkość — ruch suchego ziarna. P2 już porównuje własne odległości wyrzutu z tym badaniem oraz odwołuje się do mechanizmu zderzeń opisanego przez Furbisha i in. (2007). Dalszy eksperyment powinien więc stawiać konkretną hipotezę, na przykład czy nasycenie złoża zwiększa zasięg przez zmianę prędkości, kąta, czy udziału agregatów połączonych wodą. Sam efektowny obraz „chmury” bez kalibracji i zdefiniowanej wielkości fizycznej nie byłby wystarczającym wynikiem.

7.3 Granica wniosków aplikacyjnych

W modelu EUROSEM (Morgan i in., 1998) odrywanie gleby przez uderzenia kropli opisuje eksperymentalnie wyznaczany wskaźnik podatności k , wyrażony w $\text{g}\cdot\text{J}^{-1}$, który łączy energię kinetyczną opadu z ilością materiału odrywanego z jednostki powierzchni. Ghadiri (2004) zaproponował objętość krateru wraz z wałem jako wskaźnik ilości materiału przemieszczonego przez pojedyncze uderzenie i wykazał jej zależność od energii oraz impulsu kropli i wytrzymałości podłoża. Sam zastrzegł jednak, że przejście do opadu złożonego z wielu kropli wymaga dalszych badań; nie ustanowił też prostego przelicznika między objętością krateru a masą wyrzuconej gleby. Geometria krateru może zatem informować o mechanizmie, lecz nie zastępuje pomiaru masy rozbryzgu ani doświadczalnego wyznaczenia podatności gleby na odrywanie.

Deklaracja o możliwym wykorzystaniu parametrów krateru w modelach erozji jest rozsądną perspektywą, ale nie wynikiem tej rozprawy. Jej wykazanie wymagałoby równoczesnego pomiaru geometrii i niezależnej zmiennej opisującej rozbryzg lub erozję, większej grupy gleb oraz osobnych danych do budowy i sprawdzenia modelu. Należałoby następnie wykazać, że dodanie cech krateru zmniejsza błąd przewidywania na nowych danych.

Takie zastrzeżenie nie obniża wartości rozprawy. Cykl odpowiada na wcześniejsze pytanie: jak przebiega lokalna deformacja po pojedynczym uderzeniu oraz jak zależy od materiału, wilgotności, energii i warunków termicznych. To samodzielny problem fizyczny i wystarczająca podstawa pozytywnej oceny doktoratu. Rozwijanie modelu erozyjnego powinno być przedstawione jako możliwy dalszy etap, bez obietnicy, że obecne parametry już mają potwierdzoną wartość prognostyczną.

8 Ocena formalna, językowa i redakcyjna

Rozprawa jest przygotowana starannie, napisana zrozumiałym językiem i dobrze zilustrowana. Streszczenia polskie i angielskie odpowiadają treści pracy. Cytowania oraz wykaz literatury umożliwiają identyfikację źródeł. Autoreferat prawidłowo łączy cztery publikacje i pozwala prześledzić wspólny problem badawczy.

Zauważone błędy mają charakter redakcyjny: na stronie 29 jednostkę gęstości punktów zapisano jako mm^{-1} zamiast mm^{-2} ; na stronie 30 podano 16 zamiast 18 wariantów planu czynnikowego; w wykazie P4 występuje inicjał „Mazur M.” zamiast „Mazur R.”; podano dwie wartości szybkości rejestracji 3268 i 3260 klatek na sekundę; w opisie statystyki pojawia się odwołanie do P2 zamiast P3. W P4 podpis rysunku 2 podaje średnicę kropli 4,2 mm, podczas gdy metoda opisuje 4,3 mm. Zapis spadku napięcia powierzchniowego wody kropli z 0,0749 do 0,720 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ wymaga korekty; z kontekstu wynika, że powinno być 0,0720 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$. W P4 pracę Legout i współautorów oznaczono rokiem 2025 zamiast 2005, a do jednego opisu bibliograficznego przeniesiono tekst interfejsu wydawcy „Author links open overlay panel”. Wskazane omyłki nie zmieniają oceny merytorycznej, ale powinny zostać poprawione w wersji archiwalnej autoreferatu.

9 Wiedza teoretyczna i samodzielność Kandydata

Praca przeglądowa, część syntetyczna i dyskusje w P2–P4 potwierdzają dobrą ogólną wiedzę teoretyczną Rafała Mazura w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo, szczególnie w zakresie fizyki gleby, procesów erozyjnych oraz metod obrazowania. Kandydat poprawnie rozumie wieloetapowy charakter rozbryzgu i potrafi zestawić wyniki uzyskane różnymi metodami. Potrzeba pełniejszego ujęcia niepewności pomiarowej i hierarchicznej struktury danych wyznacza kierunek doskonalenia warsztatu, ale nie podważa spełnienia ustawowego kryterium wiedzy teoretycznej.

Pierwsze autorstwo wszystkich publikacji, zakres zadań opisany w oświadczeniach, przygotowanie pierwszych wersji manuskryptów, wykonanie większości pomiarów i analiz oraz kierowanie projektem Preludium potwierdzają wiodącą rolę Kandydata. Współpraca ze specjalistami w zakresie mikrotomografii i statystyki jest naturalnym elementem programu wymagającego kilku technik. Całość materiału wskazuje, że Kandydat potrafi samodzielnie sformułować problem, zaplanować i przeprowadzić badania, opracować wyniki oraz przedstawić je w publikacjach naukowych.

10 Pytania do dyskusji podczas obrony

Poniższe pytania odnoszą się bezpośrednio do wyników i ograniczeń omówionych w recenzji. Ich celem jest doprecyzowanie sposobu pomiaru, poziomu wnioskowania i fizycznego znaczenia uzyskanych rezultatów oraz wskazanie dalszego rozwoju badań. Nie zmieniają one pozytywnej oceny rozprawy.

1. Walidacja pomiaru geometrii krateru

Podstawa pytania: W P3 i P4 model powierzchni tworzą z sześciu chmur punktów rejestrowanych po obrocie próbki o 60° , następnie wzajemnie dopasowywanych i przekształcanych w siatkę trójkątów. Podane próbkowanie 655 punktów $\cdot\text{mm}^{-2}$ i odstęp 0,039 mm określają gęstość danych, lecz nie dokładność ani powtarzalność całej procedury. Ma to szczególne znaczenie wobec najmniejszej średniej głębokości krateru wynoszącej 0,14 mm.

Pytanie: Jak, z uwzględnieniem zasady wyznaczania współrzędnych XYZ i łączenia sześciu widoków, należałoby potwierdzić dokładność i powtarzalność całej procedury oraz odnieść je do głębokości 0,14 mm, na przykład przez powtarzany pomiar trwałego wzorca o znanych wymiarach w XY i Z?

2. Kontrola energii kropli

Podstawa pytania: Energia uderzenia jest w P3 czynnikiem doświadczalnym, a w P4 podano średnicę, prędkość i energię kropli wraz z błędami standardowymi. Nie podano jednak liczby kropli objętych tą kontrolą ani tego, czy były to krople, które utworzyły analizowane krater. Bez tej informacji nie wiadomo, jaka część zmienności geometrii mogła wynikać ze zmienności samego wymuszenia.

Pytanie: Czy masę, prędkość i energię wyznaczano dla każdej kropli tworzącej analizowany krater, czy w oddzielnej serii kontrolnej, i jak ten sposób kontroli wpływa na interpretację rozrzutu cech krateru?

3. Jednostka doświadczalna w P2

Podstawa pytania: W P2 analizowano 370 markerów z 23 rozbryzgów złoża suchego i 237 markerów z 10 rozbryzgów złoża nasyconego. W mikrotomografii wykonano po trzy próbki na wariant i po trzy przekroje każdej próbki. Kulki i przekroje są pomiarami zagnieżdżonymi w rozbryzgu lub próbce, a nie niezależnymi powtórzeniami.

Pytanie: Na jakim poziomie liczono średnie, odchylenia i testy w P2: pojedynczej kulki lub przekroju czy niezależnego rozbryzgu lub próbki, i jakie ma to znaczenie dla siły wniosku o różnicach między złożem suchym i nasyconym?

4. Zasięg wyrzutu a rozmiar deformacji w P2

Podstawa pytania: W P2 na złożu suchym powstał większy krater, natomiast kulki ze złoża nasyconego były wyrzucane dalej: największa średnia odległość w analizowanych klasach położenia początkowego wynosiła odpowiednio 66,03 i 92,80 mm. Autor wiąże tę różnicę między innymi z położeniem strefy wyrzutu oraz działaniem napięcia powierzchniowego w obszarze zwilżonym.

Pytanie: Jak należy fizycznie interpretować to, że większej deformacji złoża suchego towarzyszył krótszy zasięg wyrzutu niż w złożu nasyconym, oraz jaki pomiar trajektorii cząstek najtrafniej sprawdziłby wyjaśnienie zaproponowane w P2?

5. Podstawa pełnego potwierdzenia hipotezy H2

Podstawa pytania: H2 zakłada, że wpływ zarówno wilgotności, jak i energii kropli na cechy krateru zależy od materiału glebowego. W P3 dominował ogólny efekt wilgotności, interakcja materiał $\times$ wilgotność była wyraźniejsza przede wszystkim dla głębokości, a interakcje materiał $\times$ energia były bliskie zeru. Mimo to w autoreferacie H2 uznano za potwierdzoną w całości.

Pytanie: Które wyniki uzasadniają pełne potwierdzenie H2, skoro dane pokazują przede wszystkim silny ogólny wpływ wilgotności, natomiast słabo wspierają zależność wpływu energii od materiału glebowego?

6. Zakres wniosku o wpływie uziarnienia

Podstawa pytania: Każdą klasę uziarnienia reprezentował jeden materiał glebowy. Materiały różniły się nie tylko udziałem piasku, pyłu i iłu, lecz także zawartością węgla organicznego i nieorganicznego oraz gęstością objętościową. Sama P3 wskazuje, że skrajne wyniki gliny piaszczystej mogły być częściowo związane z zawartością węgla.

Pytanie: W jakim zakresie różnice między kraterami można przypisać granulometrii, a w jakim łącznym właściwościom trzech konkretnych materiałów, i jak należałoby rozszerzyć badania na większą liczbę gleb, aby te wpływy rozdzielić?

7. Zakres wniosku o wpływie warunków termicznych w P4

Podstawa pytania: W P4 utworzono trzy warianty termiczne, w których równocześnie zmieniały się temperatury gleby, wody tworzącej kroplę i powietrza. Pomiar szybką kamerą wykazał, że energia kropli nie różniła się między wariantami. Efekt główny wariantu termicznego był istotny tylko dla średnicy równoważnej, natomiast pozostałe różnice ujawniały się w wybranych interakcjach i kombinacjach gleby oraz wilgotności.

Pytanie: Jak najściślej należy sformułować zakres potwierdzenia H3, skoro badano łączny wariant termiczny, a większość różnic ujawniła się tylko w określonych kombinacjach gleby i wilgotności?

8. Znaczenie podanych wartości ω^2

Podstawa pytania: W P3 podano wzór na ω^2 z mianownikiem $SS_{total} + MS_{error}$, a SS_{total} objaśniono jako sumę kwadratów modelu. Nie rozstrzyga to, czy w obliczeniach wykorzystano całkowitą skorygowaną sumę kwadratów obejmującą także resztę, czy wyłącznie sumę kwadratów efektów modelu. W tabeli znajdują się między innymi wartości 0,732 dla wpływu wilgotności na głębokość oraz -0,002 dla interakcji materiał $\times$ energia w odniesieniu do kolistości.

Pytanie: Co dokładnie oznaczało SS_{total} w wykonanych obliczeniach i jak przy tej definicji należy interpretować $\omega^2 = 0,732$ oraz wartość ujemną -0,002?

9. Geometria krateru a ilość wyrzuconej gleby

Podstawa pytania: W P4 autorzy wskazują jako otwarte pytanie związek geometrii krateru z ilością wyrzuconego materiału i zaznaczają, że rozmiar krateru wynika nie tylko z ubytku gleby, lecz również z jej zagęszczenia i uszczelnienia. W zakończeniu P4 stwierdzają, że pełniejsza ocena znaczenia temperatury dla erozji wymaga także oznaczenia ilości materiału wyrzuconego podczas rozbryzgu. P3 i P4 mierzą geometrię krateru, ale nie masę wyrzutu.

Pytanie: Jak Doktorant interpretuje objętość krateru w P3 i P4: jako miarę deformacji powierzchni czy także jako pośredni wskaźnik ilości wyrzuconej gleby, i czy tę drugą możliwość można najprościej sprawdzić przez równoczesny pomiar geometrii oraz suchej masy materiału zebranego wokół próbki po tym samym uderzeniu?

11 Ocena końcowa

Rozprawę doktorską mgr. inż. Rafała Mazura oceniam pozytywnie. Kandydat podjął ważny problem podstawowy i uzyskał oryginalne wyniki dotyczące fizyki deformacji powierzchni po uderzeniu kropli. Wykazał dobrą wiedzę teoretyczną oraz samodzielność badawczą. Cel główny i cele szczegółowe zostały zrealizowane. Hipoteza H1 znalazła zasadnicze potwierdzenie, natomiast H2 i H3 nie uzyskały pełnego potwierdzenia: wyniki wspierają jedynie część zawartych w nich zależności.

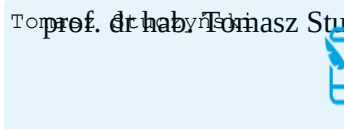
Na szczególne wyróżnienie zasługuje poziom publikacyjny osiągnięcia. Cykl obejmuje cztery spójne tematycznie prace, w tym trzy artykuły oryginalne, opublikowane między innymi w uznanych czasopismach *Geoderma* i *Catena*. Kandydat jest pierwszym autorem wszystkich publikacji, a według danych podanych w rozprawie ich łączna punktacja wynosi 580 punktów przy sumarycznym IF 20,398. Jest to znaczący dorobek na etapie ubiegania się o stopień doktora. Mocną stroną programu jest także wykorzystanie mierzonych prędkości i energii kropli zbliżonych do warunków naturalnego opadu. Wartość osiągnięcia wynika jednak nie tylko ze wskaźników, lecz przede wszystkim ze spójności programu, pierwszego autorstwa i uzyskanych wyników.

Najważniejsze zastrzeżenia dotyczą braku ilościowej walidacji całej procedury skanowania 3D, niepełnego opisu kontroli energii kropli, niepodanego sposobu wyrównywania i kontroli wilgotności przygotowanych prób, agregacji danych P2, raportowania statystyki, reprezentacji gleb oraz zbyt szerokich zapowiedzi zastosowań modelowych. Uwaga o wilgotności jest istotna właśnie dlatego, że był to najsilniejszy i najbardziej konsekwentny czynnik kształtujący geometrię kraterów; nie podważa ona tego dużego efektu, lecz dotyczy wiarygodnego rozdzielania mniejszych różnic i interakcji. Dalsze badania trajektorii, składu wyrzutu i bilansu energii są wartościowym rozwinięciem mechanistycznym, a nie naprawą celu P2. Uwagi te nie podważają oryginalności osiągnięcia ani zasadniczej wiarygodności wyników w granicach przeprowadzonych doświadczeń.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Rafała Mazura pod tytułem „Deformacja powierzchni gleby w wyniku uderzenia kropli wody” spełnia wymagania art. 187 ust. 1–3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata, potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie o dopuszczenie mgr. inż. Rafała Mazura do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Mazura. Wniosek uzasadniam wysokim poziomem publikacyjnym osiągnięcia, pierwszym autorstwem Kandydata we wszystkich czterech pracach, spójnością programu badawczego, oryginalnym wkładem w poznanie fizyki rozbryzgu oraz wykazaną samodzielnością naukową. Zgłoszone w recenzji ograniczenia wyznaczają kierunki dalszego rozwoju metody, lecz nie umniejszają wartości osiągnięcia stanowiącego podstawę tego wniosku.

.....
prof. dr hab. Tomasz Stuczyński



Literatura przywołana w recenzji

- Beczek M., Ryżak M., Sochan A., Mazur R., Polakowski C., Hess D., Bieganski A. (2020). Methodological aspects of using high-speed cameras to quantify soil splash phenomenon. *Geoderma* 378, 114592. doi 10.1016/j.geoderma.2020.114592.
- 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* 112, F01001. doi 10.1029/2006JF000498.
- Ghadiri H. (2004). Crater formation in soils by raindrop impact. *Earth Surface Processes and Landforms* 29(1), 77–89. doi 10.1002/esp.1014.
- Icasio Hernandez O., Rocha De La Cruz A., Muralikrishnan B., Lee V., Ren W., Gonzalez-Barbosa J.J. (2024). VDI/VDE 2634-2 and ISO 10360-13 performance evaluation tests, and systematic errors in structured light systems. *Precision Engineering* 88. doi 10.1016/j.precisioneng.2024.04.015.
- ISO 10360-13:2021. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) — Part 13: Optical 3D CMS. International Organization for Standardization.
- Laburda T., Krása J., Zúmr 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 Landforms* 46(5), 1067–1082. doi 10.1002/esp.5087.
- 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. doi 10.1103/PhysRevE.89.032201.
- Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A., Auerswald K., Chisci G., Torri D., Styczen M.E. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23(6), 527–544. doi 10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5.
- Rachakonda P.K., Muralikrishnan B., Sawyer D.S. (2019). Sources of errors in structured light 3D scanners. *Proceedings of SPIE* 10991, 1099106. doi 10.1117/12.2518126.
- Ryżak M., Bieganski A., Polakowski C. (2015). Effect of Soil Moisture Content on the Splash Phenomenon Reproducibility. *PLOS ONE* 10(3), e0119269. doi 10.1371/journal.pone.0119269.
- SMARTTECH3D (bez daty). SMARTTECH3D UNIVERSE — opis produktu i karta techniczna. Dostęp 16.09.2026.
- VDI/VDE 2634 Blatt 2:2012-08. Optical 3-D measuring systems — Optical systems based on area scanning. Verein Deutscher Ingenieure.