



UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych

mgr inż. Aleksandra Czuchaj

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Uwarunkowania dynamiki spływu powierzchniowego
w świetle terenowych badań eksperymentalnych**

*Conditions of the surface runoff dynamics
in the light of field experimental research*

Promotor:

prof. dr hab. inż. Marek Marciniak

Promotor pomocniczy:

dr Mikołaj Majewski

Poznań 2024

Dziękuję

Moim Promotorem Panu Profesorowi Markowi Marciniakowi oraz Panu Doktorowi Mikołajowi Majewskiemu za poświęcony czas, troskę, ogrom cierpliwości, życzliwości, wiary we mnie, a także za opiekę merytoryczną i nieocenione wsparcie, zarówno w terenie, jak i podczas pisania pracy. Dziękuję za wszystkie wskazówki i uwagi, za inspirację, a także za dzielenie się doświadczeniem i wiedzą, dzięki którym mogłam się rozwijać jako człowiek, badacz i dydaktyk.

Pracownikom Pracowni Hydrometrii oraz Stacji Bazowej Poznań-Morasko za życzliwość i wsparcie przy powstawaniu tej pracy. W szczególności Marysi i Tomkowi za hektolitry wypitej ze mną kawy.

Moim Rodzicom i Dziadkom za miłość, wsparcie, wyrozumiałość, troskę, motywowanie, zainteresowanie i szeroko rozumianą pomoc, dzięki której ta praca mogła powstać. Dziękuję za przekazane mi wartości oraz wychowanie mnie na świadomą swoich celów i zawziętą w dążeniu do nich osobę.

Przyjaciółom za każdą chwilę wytchnienia, przewietrzenia głowy, za każde życzliwe pytanie (w szczególności „Kiedy wreszcie to skończysz?”). Jestem wdzięczna, iż dzielnie słuchaliście, gdy w środku nocy opowiadałam ze szczegółami o moich badaniach, chociaż niekoniecznie mieliście ochotę tego słuchać. W szczególności dziękuję Karolinie („Proszę, nie mów już więcej o pracy”) i Adrianowi („Nie wiem, o czym mówisz, ale dobrze, brawo”).

Pracę dedykuję Babci, której zawsze będzie mi bardzo brakowało.

Czuję, że teraz czuwa nade mną z góry i się uśmiecha.

STRESZCZENIE

W warunkach obserwowanych zmian klimatycznych i wzrastającej antropopresji zauważalna jest zwiększona częstotliwość występowania zdarzeń ekstremalnych. Opady atmosferyczne coraz częściej cechują się dużym natężeniem i krótkim czasem trwania. Krótkotrwałe, intensywne opady deszczu stanowią zagrożenie na obszarach zurbanizowanych, gdyż mogą przyczyniać się do generowania powodzi błyskawicznych. Spływ powierzchniowy na skutek intensywnych opadów deszczu może formować się na obszarach zurbanizowanych ze względu na ich znaczne uszczelnienie. Niniejsza praca miała na celu rozpoznanie warunków występowania spływu powierzchniowego i jego dynamikę w zależności od kategorii opadu, typu pokrycia powierzchni terenu oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu. Pierwszym etapem było rozpoznanie warunków pluwialnych na obszarze badań. Szczególną uwagę poświęcono opadom ekstremalnym na obszarze aglomeracji poznańskiej. Następnie zaprojektowano i wykonano terenowe stanowisko badawcze wraz z symulatorem opadu. Trzecim etapem badań było zaplanowanie i przeprowadzenie serii eksperymentów terenowych, umożliwiających zbadanie dynamiki spływu powierzchniowego podczas zróżnicowanych opadów deszczu. Ostatnim etapem była interpretacja danych pozyskanych w terenie poprzez obliczenie bilansu wodnego stanowiska badawczego w ujęciu objętościowym i procentowym. Opracowano również krzywe dynamiki spływu powierzchniowego, a następnie opisano je za pomocą zestawu zdefiniowanych odpowiednio deskryptorów.

Słowa kluczowe: spływ powierzchniowy, zdarzenia ekstremalne, poletka testowe, eksperyment terenowy, symulator opadów

ABSTRACT

In the conditions of observed climate changes and increasing anthropopressure, an increased frequency of extreme events is noticeable. Precipitation is increasingly characterized by high intensity and short duration. Short-term, intense rainfall poses a threat in urbanized areas as it may contribute to generating flash floods. As a result of intense rainfall surface runoff may form in urban areas due to their significant percentage of impermeable landcovers. This research aimed to identify the conditions of surface runoff and its dynamics depending on the rainfall category, type of landcover and initial soil moisture conditions. The first stage was the identification of pluvial conditions in the study area. Particular attention was paid to extreme rainfall in the Poznań agglomeration. Then, a field research station with a rainfall simulator was designed and constructed. The third stage of the research was to plan and conduct a series of field experiments to investigate the dynamics of surface runoff during various rainfall events. The last stage was the interpretation of data obtained in the field by calculating the water balance of the research station in volume and percentage terms. Surface runoff dynamics curves were also developed and then described using a set of appropriately defined descriptors.

Keywords: surface runoff, extreme events, testing plots, field experiment, rainfall simulator

Spis treści

Wykaz symboli i skrótów	8
1. Wprowadzenie	9
1.1. Wstęp	9
1.2. Cel i zakres pracy	11
2. Problem badawczy	13
2.1. Zjawiska, zdarzenia i procesy ekstremalne w obliczu zmian klimatu.....	13
2.2. Miejskie powodzie błyskawiczne	15
2.3. Badania spływu powierzchniowego na powierzchniach o zróżnicowanym pokryciu terenu	19
3. Charakterystyka obszaru badań	22
3.1. Lokalizacja.....	22
3.2. Geologia i litologia	25
3.3. Rzeźba terenu	28
3.4. Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi.....	33
3.5. Klimat	36
3.6. Hydrologia	37
4. Analiza opadów	40
4.1. Metody klasyfikacji opadów	40
4.2. Opady dobowe w Poznaniu	43
4.3. Przykłady opadów wyjątkowych ekstremalnych w zlewni Różanego Strumienia	52
5. Projekt i wykonanie stanowiska do badań spływu powierzchniowego.....	54
5.1. Podstawowe założenia eksperymentu terenowego	56
5.2. Bilans wodny stanowiska	57
5.3. Konstrukcja stanowiska badawczego i aparatura pomiarowa	57
5.4. Kalibracja chwytaczy spływu powierzchniowego	60
5.5. Analiza niepewności.....	62

5.6. Program eksperymentu	63
5.7. Symulator opadów	65
6. Realizacja eksperymentu terenowego z symulacją opadów	71
6.1. Program i realizacja eksperymentów terenowych	71
6.2. Metodyka interpretacji krzywych dynamiki spływu powierzchniowego	78
7. Wyniki badań.....	81
7.1. Bilans wodny terenowego stanowiska badawczego	81
7.1.1. Bilans objętościowy.....	81
7.1.2. Bilans procentowy	92
7.2. Dynamika spływu powierzchniowego.....	96
7.3. Deskryptory dynamiki spływu powierzchniowego	101
7.3.1. Czas trwania opadu t_{opadu} oraz całkowita objętość opadu V_{opadu}	101
7.3.2. Moment inicjacji spływu powierzchniowego t_p	103
7.3.3. Moment zakończenia spływu powierzchniowego t_k	104
7.3.4. Czas trwania spływu powierzchniowego t_{splywu}	106
7.3.5. Całkowita objętość spływu powierzchniowego V_{splywu}	107
7.3.6. Współczynnik spływu powierzchniowego ψ	109
7.3.7. Natężenie spływu powierzchniowego Q_{splywu}	110
7.3.8. Kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego	112
7.3.9. Wskaźnik spływu powierzchniowego δ	113
7.3.10. Natężenie opadu P_{kryt} inicjującego spływ powierzchniowy	115
8. Podsumowanie.....	117
Bibliografia.....	121
Spis rycin	139
Spis tabel.....	142

Załącznik 1. Bilans wodny terenowego stanowiska badawczego	144
Załącznik 1A. Bilans objętościowy	145
Załącznik 1B. Bilans procentowy.....	149
Załącznik 2. Dokumentacja badań terenowych w postaci krzywych dynamiki spływu powierzchniowego $V = f(t)$ na tle opadów	153
Załącznik 2A. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla asfaltu	154
Załącznik 2B. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla kostki	158
Załącznik 2C. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla ugoru.....	162
Załącznik 2D. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla trawy.....	166
Załącznik 3. Porównanie krzywych dynamiki spływu powierzchniowego	170
Załącznik 3A. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego według typu pokrycia powierzchni terenu	171
Załącznik 3B. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego według kategorii symulowanego opadu	175
Załącznik 3C. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego według początkowych warunków wilgotnościowych gruntu.....	177

Wykaz symboli i skrótów

Symbol	Objaśnienie
E	Całkowite parowanie na stanowisku badawczym [mm] lub [%]
E_1	Parowanie w trakcie drogi kropeł wody z dysz symulatora do powierzchni stoku [mm] lub [%]
E_2	Parowanie wody, spływającej po poletkach testowych [mm] lub [%]
h	Poziom wody w chwytaczu spływu powierzchniowego [cm]
H_p	Spływ powierzchniowy [mm] lub [%]
I	Infiltracja [mm] lub [%]
P	Opad [mm] lub [%]
P_{kryt}	Natężenie opadu inicjującego spływ powierzchniowy [mm/h]
$Q_{spływu}$	Natężenia spływu powierzchniowego [dm ³ /min]
t_k	Moment zakończenia spływu powierzchniowego [min]
t_{opadu}	Czas trwania opadu [min]
t_p	Moment inicjacji spływu powierzchniowego [min]
$t_{spływu}$	Czas trwania spływu powierzchniowego [min]
V_c	Objętość wody wlewanej do chwytacza [dm ³]
V_{opadu}	Całkowita objętość opadu [dm ³]
V_r	Objętość wody obliczona z zależności liniowej dla chwytacza [dm ³].
$V_{spływu}$	Całkowita objętość spływu powierzchniowego [dm ³]
α	Współczynnik Chomicza [-]
β	Kąt nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego [stopnie]
δ	Wskaźnika spływu powierzchniowego [-]
ΔV	Niepewność bezwzględna [dm ³]
δV	Niepewność względna [%]
ψ	Współczynnik spływu powierzchniowego [-]

Skrót	Objaśnienie
A	Asfalt
A0	Opad silny według Chomicza (1951)
A1, A2, A3, A4	Opady ulewne według Chomicza (1951)
B1, B2	Opady nawalne według Chomicza (1951)
BDOT10k	Baza Danych Obiektów Topograficznych 1:10 000
D	Suche początkowe warunki wilgotnościowe gruntu
GZWP	Główne Zbiorniki Wód Podziemnych
IMGW-PIB	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy
K	Kostka
T	Trawa
U	Ugór
UAM	Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
W	Wilgotne początkowe warunki wilgotnościowe gruntu
ZMŚP	Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

W hydrologii jednym z najważniejszych zagadnień jest obieg wody w przyrodzie, nazywany też cyklem hydrologicznym. Pod pojęciem tym rozumie się naturalne i nieprzerwalne krążenie wody w przyrodzie w różnych skalach. W skali globalnej krążenie to polega na przechodzeniu pary wodnej z powierzchni oceanów i lądów do atmosfery, gdzie następuje jej kondensacja w chmury. W postaci chmur para wodna jest transportowana na duże odległości, a następnie wraca bezpośrednio do oceanów w postaci opadu lub spada na obszary lądowe. Na lądach woda opadowa częściowo infiltruje, a częściowo bierze udział w procesie odpływu podziemnego i powierzchniowego, kierując się do oceanów. Ponadto część wody opadowej wraca bezpośrednio do atmosfery na skutek parowania (Bajkiewicz-Grabowska, Mikulski 1996; Niedźwiedź 2003; Bochenek 2020).

Obieg wody opisywany jest przez równanie bilansu wodnego Pencka-Oppokowa, zgodnie z którym opad jest równy sumie parowania (ewaporacji i transpiracji), spływu powierzchniowego (stokowego i korytowego), podziemnego (gruntowego i podziemnego) oraz zmian retencji. Spływ powierzchniowy stokowy to spływ, który kształtuje się na nachylonych powierzchniach terenu, natomiast pod pojęciem spływu korytowego rozumie się ciekł wodne, odprowadzające wodę z danego obszaru. Bilans wodny sporządza się zarówno w ujęciu globalnym, jak i regionalnym czy lokalnym. W przypadku mniejszych obszarów bilans wodny może wskazać nadmiar lub deficyt wody. Na obszarze Polski średnia roczna suma opadów wynosi 638,6 mm (Kirschenstein, Baranowski 2005). Parowaniu na obszarze Polski ulega około 65% opadu atmosferycznego, natomiast w bezpośrednim spływie powierzchniowym bierze udział maksymalnie 19% wód opadowych (Chełmicki 2001).

Według infiltracyjnej teorii Hortona (1933, 1945) spływ powierzchniowy definiuje się jako różnicę pomiędzy wodą pochodzącą z opadu a wodą infiltrującą w podłoże, która nie odparowała. Horton (1940) zaznacza, iż najważniejszym czynnikiem warunkującym spływ powierzchniowy jest infiltracja, którą zdefiniował jako proces wsiąkania wody w glebę. Ponadto wprowadził pojęcie pojemności infiltracyjnej, określanej jako wartość zbliżona do przepuszczalności powierzchniowej warstwy gleby. Wraz z czasem trwania proces infiltracji maleje do osiągnięcia pojemności infiltracyjnej gruntu.

Słupik (1973) precyzuje, iż do wystąpienia spływu powierzchniowego na powierzchni nachylonej niezbędne jest, aby natężenie opadu przewyższało wielkość infiltracji. Powstała dzięki temu nadwyżka wody, po przewyciężeniu szorstkości powierzchni gruntu, spłynie laminarnie lub turbulentnie w postaci warstwy lub stróżek zgodnie z kierunkiem nachylenia stoku. O przewyciężeniu szorstkości podłoża pisała także Werner-Więckowska (1975), wydzielając trzy fazy spływu powierzchniowego – przewyciężenie wsiąkania, przewyciężenie szorstkości podłoża oraz koncentrację spływającej wody w strumieniu.

Natomiast Bocheńska i in. (2002) definiują spływ powierzchniowy jako epizodyczne, grawitacyjne przemieszczanie się wody po powierzchni terenu w kierunku koryt cieków oraz zagłębień terenu. Formowanie się spływu powierzchniowego obserwuje się na skutek opadów deszczu o dużym natężeniu lub długim czasie trwania, a także szybkiego topnienia pokrywy śnieżnej i lodowej (Pietrzak i in. 2013). W zależności od stopnia nasycenia profilu glebowego wodą spływ po stoku może być nasycony lub nienasycony. Spływ nienasycony ma miejsce, gdy na powierzchni gruntu formuje się spływ powierzchniowy, chociaż podłoże nie jest nasycone wodą, natomiast spływ nasycony – gdy podłoże nasycone jest wodą (Kirkby, Chorley 1967; Słupik 1981).

W publikacjach hydrologicznych często spotyka się określenie wielkości spływu powierzchniowego mianem opadu efektywnego. Opad efektywny definiowany jest jako ta część opadu atmosferycznego, która po wypełnieniu różnych form retencji na obszarze zlewni, dostaje się do koryta cieku drogą spływu powierzchniowego (Bajkiewicz-Grabowska, Mikulski 1996; Pociask-Karteczka 2006). Zazwyczaj wielkość opadu efektywnego wyznaczana jest za pomocą modeli empirycznych i symulacyjnych (Patwardhan i in. 1990; Banasik, Barszcz 2001; Kancelerz i in. 2012).

W każdej z definicji spływu powierzchniowego istotną rolę odgrywa powierzchnia nachylona, która na skutek działania sił grawitacji, wymusza ruch warstwy wody zebranej na powierzchni w kierunku spadku terenu. Jako stok określa się każdą powierzchnię, zlokalizowaną między kulminacją wzniesienia a jego płaskim podnóżem. Stanowią one najpowszechniejszą formę rzeźby terenu na wszystkich kontynentach kuli ziemskiej (Jahn 1956; Gerlach 1966; Klimaszewski 1981). Stoki są modyfikowane przez wiele procesów, a jednym z najczęstszych procesów morfogenetycznych jest erozja wodna gleb (Gerlach 1966; Gil 1976). Erozja wodna gleb jest jednym z procesów, których głównym inicjatorem jest woda spływająca po powierzchni, czyli zjawisko spływu powierzchniowego.

Każdy opad atmosferyczny, w zależności od jego sumy, natężenia oraz czasu trwania, przeobrażany jest w parę wodną, spływ śródglebowy i powierzchniowy, a rodzaj transformacji

zależy od wielu czynników. Spływ powierzchniowy również jest złożonym procesem, zależnym od wielu czynników. Spośród nich najważniejsze to: czas trwania i natężenie opadu, długość i nachylenie stoku, typ pokrycia powierzchni terenu oraz początkowe warunki wilgotnościowe gruntu. Istotny jest też rodzaj gleby czy występowanie okrywy roślinnej (Słupik 1973; Borowiec i in. 1974; Gil 1976; Henninger i in. 1976; Wischmeier, Smith 1978; De Roo, Riezebos 1992; Renard i in. 1997; Świąchowicz 2002; Bochenek, Gil 2010; Gołąb 2012).

1.2. Cel i zakres pracy

Głównymi celami badań przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej były:

1. Rozpoznanie dynamiki spływu powierzchniowego w zależności od: czasu trwania i natężenia opadu, typu pokrycia powierzchni terenu oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu.
2. Rozpoznanie wszystkich składowych bilansu wodnego podczas spływu wód opadowych po stoku oraz warunków ich występowania w zależności od: czasu trwania i natężenia opadów, typu pokrycia powierzchni terenu oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu.

Dla osiągnięcia powyższych celów zaplanowano i zrealizowano cztery zadania badawcze.

Pierwsze z zadań badawczych polegało na rozpoznaniu warunków pluwialnych obszaru badań ze szczególnym uwzględnieniem występowania opadów ekstremalnych. Do realizacji tego zadania wykorzystano dane Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Równolegle wykonano rozpoznanie profilu gruntowego na obszarze, na którym planowano wykonać terenowe stanowisko badawcze.

Drugim z podjętych zadań był zaprojektowanie i wykonanie terenowego stanowiska badawczego wraz z symulatorem opadów. Projekt ten wykonano na podstawie analiz warunków pluwialnych dla stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica. Terenowe stanowisko badawcze zlokalizowano w dolinie Rózanego Strumienia.

Trzecie zadanie badawcze obejmowało zaprojektowanie i przeprowadzenie serii eksperymentów terenowych, mających umożliwić zbadanie dynamiki spływu powierzchniowego w zależności od czasu trwania i natężenia opadu, typu pokrycia powierzchni terenu oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu. Plan eksperymentu był wykonywany równolegle z projektowaniem stanowiska badawczego, gdyż wybrane do

symulacji natężenia stanowiły podstawę do doboru odpowiedniej instalacji symulującej opady atmosferyczne.

Ostatnim zadaniem badawczym była interpretacja wyników pozyskanych w terenie. Obliczono objętościowy i procentowy bilans wodny dla każdego z poletek, przy każdym z symulowanych opadów oraz w zależności od warunków wilgotnościowych gruntu. Rozpoznano także dynamikę spływu powierzchniowego i jej zależność od czasu trwania i natężenia opadu, typu pokrycia powierzchni terenu oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu. Dane z terenu opracowano do postaci krzywych dynamiki spływu powierzchniowego, a następnie opisano je za pomocą zestawu odpowiednio zdefiniowanych deskryptorów.

2. Problem badawczy

2.1. Zjawiska, zdarzenia i procesy ekstremalne w obliczu zmian klimatu

Zjawiska ekstremalne cechują się wzrastającą częstotliwością występowania oraz intensywnością na skutek zmian klimatu wywołanych także przez działalność człowieka (Hulme i in. 1999; Kundzewicz 2011). Zmiany klimatu wpływają na ekosystemy, ludzi oraz infrastrukturę, między innymi pod postacią wzrastających maksymalnych temperatur powietrza, czy zagrożeń pożarami, suszami oraz silnymi opadami atmosferycznymi. Skutki ekstremalnych zjawisk, jak i generowane przez nie straty znacznie przekraczają skutki i straty powstające na skutek naturalnej zmienności klimatu na kuli ziemskiej. Zgodnie z raportem IPCC (2022) dotychczas wdrożone działania naprawcze, nakierowane na rozwój i adaptację ograniczyły wrażliwość środowiska, jednakże ekstremalne zjawiska pogodowe nie przestają stanowić zagrożenia. Postępujące zmiany klimatu doprowadziły do nieodwracalnych zmian w naturalnych i antropogenicznych systemach, które przekraczają ich zdolności adaptacyjne (IPCC 2022). Mają też znaczący wpływ na zdrowie ludzkie, bowiem obserwuje się większą zachorowalność na choroby zakaźne, zaburzenia oddychania, a także niedożywienie (Hsiang i in. 2013; Hsiang, Burke 2014; Patz 2014; Watts i in. 2020; Rocque i in. 2021).

Na coraz częstsze występowanie ekstremalnych zdarzeń meteorologicznych, hydrologicznych czy geomorfologicznych uwagę zwracało wielu autorów (Kostrzewski 2001; Bronstert 2003; Kundzewicz, Jania 2007; Lorenc i in. 2009). Przewiduje się także dalszy wzrost ich częstotliwości i intensywności (Rummukainen 2021; IPCC 2022; Seneviratne i in. 2021; Panagos i in. 2022; Tradowsky i in. 2023; Brewer 2024; Scafetta 2024).

W literaturze można spotkać wiele pojęć z określeniem „ekstremalny”: zjawisko ekstremalne, zdarzenie ekstremalne czy proces ekstremalny. Zwoliński (2008) podaje, iż **zjawisko ekstremalne** jest faktem empirycznym rzeczywistości, który można zaobserwować za pomocą dostępnych metod i środków. Według Niedźwiedzia i in. (2004) do opisu zjawisk ekstremalnych można odnieść ekstrema absolutne (tj. maksymalną i minimalną wartość wybranej charakterystyki zjawiska, zaobserwowaną w danym okresie czasu), a jako same zjawiska ekstremalne przyporządkować wartości bliskie ekstremom. W zakresie zjawisk ekstremalnych Niedźwiedź i in. (2004) posłużyli się percentylami prawdopodobieństwa i określili dwie wartości graniczne: 90 percentyl dla **zjawisk ekstremalnych** (tj. zjawiska, których prawdopodobieństwo wystąpienia jest mniejsze niż 10%) oraz 99 percentyl dla **zjawisk wyjątkowych ekstremalnych** (tj. zjawiska, których prawdopodobieństwo jest mniejsze niż

1%). Ponadto wydziela się pojęcie klęski żywiołowej, rozumianej jako katastrofa naturalna lub spowodowana na skutek ingerencji człowieka, zdarzająca się losowo i wywołująca duże zniszczenia, a niekiedy także ofiary śmiertelne.

Jako **zdarzenie ekstremalne** rozumie się zjawisko, które można umiejscowić w czasoprzestrzeni poprzez podanie czterech wymiarów – trzech określających położenie poziome i pionowe oraz czwartego w postaci czasu. Pod pojęciem czasoprzestrzeni kryją się zarówno systemy czy ekosystemy, jak i środowisko geograficzne, czy wybrane jednostki regionalne, tektoniczne lub hydrologiczne (Zwoliński 2008).

Procesem ekstremalnym określa się ukierunkowany ciąg następujących po sobie w czasoprzestrzeni, powiązanych przyczynowo, określonych zmian, które przetwarzają stan wejściowy w wyjściowy poprzez stadia rozwojowe zdarzenia ekstremalnego. Zmiany te należy rozpatrywać w kontekście przyczyny, wejścia, przebiegu oraz wyjścia (Zwoliński 2008). Według powyższych definicji, najwęższym pojęciem jest zjawisko ekstremalne, a najszerszym – proces ekstremalny.

W mediach coraz częściej pojawiają się doniesienia o klęskach żywiołowych, najczęściej w odniesieniu do rozległych powodzi i lawin błotnych. Jako przykłady można podać powódź błyskawiczną w Bogatyni w sierpniu 2010 roku, będącą skutkiem deszczu nawalnego w Górach Izerskich (Biedroń, Bogdańska-Warmuz 2012; Salata i in. 2012; Franczak, Listwan-Franczak 2016) czy spływ błotny z lipca 2014 roku na Słowacji, powstały na skutek trzyipółgodzinnego opadu o sumie 95 mm (Bacova-Mitkova i in. 2015) lub powodzi błyskawicznej w Wojcieszowie w lipcu 2012 na skutek opadu o natężeniu sięgającym do 69 mm/h (Franczak i in. 2017).

W okresie od 12 do 15 lipca 2021 roku na terenie Belgii, Luksemburga oraz Niemiec, a także sąsiadujących z nimi państw wystąpiły intensywne opady deszczu o sumie wynoszącej 175 mm. Skutkiem tych opadów były powodzie obserwowane przede wszystkim na terenie zachodnich Niemiec, a także na obszarze Belgii i Holandii. Zanotowano ponad 200 ofiar śmiertelnych, a także znaczne uszkodzenia infrastruktury, w tym domów, dróg oraz torów kolejowych (Szymczak i in. 2022). Straty finansowe oszacowano na 54 miliardy dolarów amerykańskich (Tradowsky i in. 2023).

W ostatnim czasie głośno było także o powodzi we włoskich regionach Emilia-Romania oraz Toskania. Na skutek intensywnych opadów deszczu, które w ciągu dwóch dób przekroczyły nawet 200 mm, ewakuowano ponad 36 tysięcy osób, straty finansowe oszacowano na co najmniej 8,8 miliarda euro, a także zanotowano 15 ofiar śmiertelnych

(Arrighi, Domeneghetti 2024). W mediach społecznościowych można było odnaleźć nagrania wezbrań w okolicznych rzekach czy zalanych miasteczek.

2.2. Miejskie powodzie błyskawiczne

W literaturze funkcjonuje wiele definicji powodzi, zarówno w ujęciu hydrologicznym, jak i gospodarczym. Bednarczyk i in. (2006) podają, iż powodzią określa się wezbranie wody, podczas którego woda przekracza stan brzegowy lub poziom korony wału przeciwpowodziowego i zalewa dolinę rzeki, powodując szkody oraz straty finansowe, a także przyrodnicze, społeczne czy moralne. Natomiast Biedroń i Walczykiewicz (2009) jako powódź określają czasowe pokrycie wodą terenu, który w normalnych warunkach nie jest pokryty wodą, powstałe na skutek wezbrania wody w ciekach naturalnych, zbiornikach wodnych, kanałach oraz od strony morza, powodujące zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi, środowiska, dziedzictwa kulturowego oraz działalności gospodarczej.

Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady ws. oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim (2007) określa powodzie jako naturalne zjawiska, którym nie sposób zapobiec. Jednocześnie dokument ten podkreśla, iż niektóre działania człowieka oraz zmiany klimatyczne przyczyniają się do zwiększenia prawdopodobieństwa występowania powodzi, a także intensyfikacji jej negatywnych skutków. Do tych działań zalicza między innymi przyrost zabudowy mieszkaniowej, czy obniżenie potencjału retencyjnego gleby na skutek użytkowania gruntów. Podkreślone jest też, iż skutkami powodzi mogą być ofiary śmiertelne, wysiedlenia ludności oraz szkody w środowisku naturalnym, a także zahamowanie rozwoju gospodarczego (Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej 2007). Majewski (2004) podaje, iż za 30% strat spowodowanych przez zjawiska ekstremalne na całym świecie, odpowiedzialne są powodzie.

W literaturze można spotkać różne klasyfikacje powodzi w zależności od zasięgu, wielkości i genezy powstania (Lambor 1954, 1962; Mikulski 1997; Mioduszewski 1998; Byczkowski 2005; Kowalewski 2006). Korzystając z klasyfikacji zaproponowanej przez Lambora (1954, 1962), można wyróżnić siedem typów powodzi: opadowe nawalne, opadowe rozlewne na skutek deszczów frontalnych, opadowe rozległe na skutek deszczów frontalnych nasilonych warunkami orograficznymi, roztopowe, sztormowe, zimowe śryżowe oraz zimowe zatorowe. Autor podaje, iż powodzie opadowe najczęściej występują w miesiącach letnich, natomiast pozostałe przeważnie obserwowane są w okresie wiosennym.

Lambor (1954, 1962) w swojej klasyfikacji nie wymienia powodzi błyskawicznych (*flash floods*). W odróżnieniu od powyższych definicji powodzi, powódź błyskawiczna jest nagłym zalaniem terenu, które cechuje krótki czas trwania oraz lokalny zasięg (Kron 2002; Pociask-Karteczka, Żychowski 2014). National Weather Service Weather Forecast Office NOAA precyzuje, iż powodzią błyskawiczną jest wezbranie, które spowodowały intensywne opady deszczu, często o charakterze burzowym, trwające zazwyczaj nie dłużej niż 6 godzin. Jednocześnie definicje te nie wykluczają wystąpienia powodzi błyskawicznej na skutek zatorów lodowych lub awarii infrastruktury hydrotechnicznej. W pojęciu powodzi błyskawicznej bowiem najistotniejszy jest szybki czas koncentracji, wynoszący od kilku minut do kilku godzin, a także znaczna ilość transportowanego rumowiska (USGS 2005). Shrestha i in. (2008) jako jedną z przyczyn powodzi błyskawicznych, poza gwałtownymi opadami deszczu, awariami zabudowy hydrotechnicznej i zatorami lodowymi, podają także osuwiska. Zaś Ostrowski i in. (2012) określają minimalną sumę opadu, niezbędną do wystąpienia powodzi błyskawicznej, wynoszącą 30 mm, jednocześnie wydłużając czas jego trwania do nawet 12 godzin. Należy jednak pamiętać, iż w literaturze podkreślany jest lokalny charakter powodzi błyskawicznych, najczęściej ok. 25 km² (Lenart 1993) oraz krótki czas trwania przy jednocześnie wysokiej dynamice zjawiska (Barredo 2007; Ostrowski i in. 2012; Pociask-Karteczka, Żychowski 2014).

Pociask-Karteczka i Żychowski (2014) zestawili wszystkie możliwe przyczyny powodzi błyskawicznych oraz sprzyjające im czynniki. Jako przyczyny autorzy wymienili: deszcze nawalne, topnienie pokrywy śnieżnej lub lodu lodowcowego, przerwanie wałów przeciwpowodziowych, uszkodzenie lub zniszczenie zapory, szybki spływ wód ze zbiornika wodnego lub nagły wzrost ich stanu w zbiorniku, a także podtopienie terenu. Natomiast jako czynniki sprzyjające formowaniu się powodzi błyskawicznych wskazali: owalny kształt zlewni, duże spadki terenu oraz koryt rzecznych, dużą koncentrację dolin na terenie zlewni, a także dużą gęstość dróg, znaczne zmiany w przepuszczalności pokryw i gleb w postaci tzw. uszczelnienia zlewni, znaczną wilgotność zlewni przed wystąpieniem powodzi, a także podatność gruntu na ruchy masowe oraz aktywność sejsmiczną i wulkaniczną na obszarze zlewni. Jednocześnie autorzy podkreślili, iż powodzie błyskawiczne mogą mieć charakter poligenetyczny.

W literaturze polskiej określenie *flash flood* można spotkać w wielu postaciach: szybka powódź, gwałtowna powódź, nagła powódź, a także gwałtowne wezbranie, czy powódź FF lub nagła powódź lokalna (Pociask-Karteczka, Żychowski 2014). W niniejszej rozprawie zamiennie stosowano określenia: *flash flood* oraz powódź błyskawiczna, a także powódź

miejska w odniesieniu do *flash floods* występujących na obszarach zurbanizowanych. W odniesieniu do błyskawicznych powodzi miejskich w literaturze anglojęzycznej funkcjonuje także określenie *urban flood*.

Problematyka powodzi błyskawicznych w dużej mierze dotyczy obszarów miejskich. W ciągu ostatniego stulecia zanotowano ogromny wzrost urbanizacji, a prognozy wskazują, iż będzie on trwał (Liu i in. 2014). W przeszłości o lokowaniu miast w dużej mierze decydowała bliskość wody, a zatem większość z nich była lokowana w pobliżu rzek. Z biegiem czasu i wzrostem urbanizacji dochodziło do rozrastania się miasta poza dolinę rzeki, aż duża część zabudowy znajdowała się poza płaskimi terasami zalewowymi. Wraz ze zmianami klimatu i coraz częściej występującymi ekstremalnymi zjawiskami, szczególnie ulewnymi opadami, wzrosło zagrożenie spływem powierzchniowym na obszarach miast. Proces urbanizacji powoduje przyrost zwartej zabudowy oraz częściowo lub całkowicie nieprzepuszczalnych powierzchni. Prowadzi to do zaburzeń w relacjach między składowymi bilansu wodnego (Kibler 1982; Jankowski 1986; Czaja 1999; Cheng, Wang 2002; Jokiel 2002; Akan, Houghtalen 2003; Gutry-Korycka 2007; Ciupa 2009; Haase 2009; Graf 2012, 2014; Michalczyk 2012). Poprzez ograniczanie infiltracji wód opadowych, zwiększone jest ryzyko wystąpienia powodzi błyskawicznych na skutek coraz częściej występujących ekstremalnych opadów deszczu. Proces wsiąkania wody opadowej jest ograniczony przez nieprzepuszczalne powierzchnie, a jednocześnie ilość wody z opadów nawalnych często przewyższa zdolność infiltracyjną przepuszczalnych gruntów miejskich. Na skutek tego formuje się niebezpieczny spływ powierzchniowy. Najczęściej jest on odprowadzany poprzez kanalizację burzową do wód powierzchniowych i zbiorników retencyjnych. Takie rozwiązania są charakterystyczne dla miast o zrównoważonej gospodarce wodami opadowymi (Russo i in. 2005; Słyś, Stec 2008; Barszcz 2009; Graf, Kałużna 2020). Należy jednak pamiętać, iż kanalizacja burzowa nie jest projektowana z myślą o opadach nawalnych, dlatego po takich opadach staje się niewydolna (Yan i in. 2018). Prowadzi do to zagrożenia wystąpieniem powodzi błyskawicznych oraz często ogromnymi stratami finansowymi pomimo lokalnego charakteru tego zjawiska.

W niniejszej pracy jako powierzchnie przekształcone rozumie się takie powierzchnie, których zdolność retencyjna została ograniczona przez działalność człowieka do częściowo przepuszczalnych lub całkowicie nieprzepuszczalnych. Są zatem to przede wszystkim tzw. obszary zurbanizowane w postaci powierzchni pokrytych przez różnego rodzaju materiały budowlane, w tym asfalt, beton czy kostki betonowe (tzw. brukowe).

Według Barredo (2007) 40% ofiar powodzi w latach 1950-2006 w Europie, było wynikiem powodzi błyskawicznych. Powódź błyskawiczna w Salerno (Włochy)

w październiku 1954 roku skutkowało 322 ofiarami, w tym 147 śmiertelnymi. Była spowodowana przez nagły opad deszczu, którego suma w ciągu 6 godzin wyniosła 320 mm. Podobnie gwałtowny opad o sumie 160 mm w ciągu godziny poskutkowało powodzią błyskawiczną, która zabiła 87 osób, w Hiszpanii w 1996 roku. W 1983 roku w Bilbao powódź błyskawiczna była skutkiem opadu o sumie 503 mm w ciągu doby, a liczba ofiar wyniosła 45. Na terenie Włoch, w regionie Kampania, w maju 1998 roku zanotowano 147 ofiar na skutek 143 mm intensywnego opadu w ciągu dwóch dni, któremu towarzyszyły spływy błotne. Natomiast w departamencie Gard we Francji we wrześniu 2002 roku w ciągu doby spadło 650 mm deszczu. Tą powodzią błyskawiczną były dotknięte 23 ofiary (Barredo 2007). Należy zauważyć, iż w ciągu jednej doby w departamencie Gard suma opadu była zbliżona do średniej rocznej sumy opadów na obszarze Polski.

Przykłady te dowodzą, iż na występowanie powodzi błyskawicznych bardziej wrażliwe są kraje śródziemnomorskie w południowej Europie. Spowodowane jest to warunkami klimatycznymi, gdyż w basenie Morza Śródziemnego intensywne opady deszczu mogą trwać nawet do kilku godzin, a wysokość opadu może sięgać setek milimetrów (Borga i in. 2007; Bain i in. 2009; Gaume i in. 2009; Marchi i in. 2010; Bryndal 2015). Wewnątrz kontynentu europejskiego, w tym na obszarze Polski warunki klimatyczne są łagodniejsze, ale w ciągu doby opad może wynieść nawet 100-300 mm (Woś 1991; Bryndal 2015). Według Bryndala (2015) najczęściej powodzie błyskawiczne powodowały opady burzowe trwające nie dłużej niż 2 godziny o natężeniu wynoszącym od 20 do 80 mm/h, a częstotliwość występowania powodzi była największa na terenach górskich, mniejsza na wyżynach i najmniejsza na obszarach nizinnych i przybrzeżnych. Należy pamiętać, iż jednocześnie na obszarach górskich w Polsce sumy opadów znacznie przewyższają opady w innych regionach kraju (Banasik, Górski 1990; Lorenc i in. 2009; Stach 2009). Powodzie błyskawiczne w Polsce obserwuje się od kwietnia do października, a najczęściej formują się one w lipcu. Rozkład ten jest podobny do występowania opadów burzowych na terenie Polski (Bryndal 2015).

Ze względu na lokalny oraz nagły, trudny do prognozowania charakter, ponad połowa danych na temat powodzi błyskawicznych na obszarze Europy była zbierana po wystąpieniu tego zjawiska (Marchi i in. 2010). W badaniach powodzi oraz szacowaniu ryzyka ich wystąpienia wykorzystywane są także radary meteorologiczne (Pierce i in. 2000; Pegram, Clothier 2001; Bowler i in. 2006; Atencia, Zawadzki 2014; Green i in. 2024). Pomimo wykorzystania radarów, prognozowanie powodzi błyskawicznych wciąż jest trudne (Smith i in. 2007), choć coraz częściej większą skuteczność wykazują modele symulacyjne.

2.3. Badania spływu powierzchniowego na powierzchniach o zróżnicowanym pokryciu terenu

Badania spływu powierzchniowego można prowadzić na wiele sposobów, zależnie od skali przestrzennej. Dla dużych obszarów, regionów czy krajów wykorzystywane są metody kartograficzne. Z ich wykorzystaniem prezentowane są różnego rodzaju stopnie nasilenia lub wskaźniki, zarówno spływu powierzchniowego, jak i erozji wodnej gleb (Józefaciuk, Józefaciuk 1996). Powszechne są też badania z wykorzystaniem modeli symulacyjnych (Bhutan i in. 2002; Warmerdam i in. 1993). Na mniejszych powierzchniach, na przykład niedużych zlewni, wykorzystuje się metody bezpośrednie, między innymi w postaci pomiarów geodezyjnych, a także fotogrametrię oraz skaning laserowy (Józefaciuk i in. 1994; Bhutan i in. 2002). Wykorzystuje się także różnego rodzaju modele symulacyjne. W mikroskali do badań spływu powierzchniowego oraz erozji wodnej gleb powszechnie wykorzystywane są poletka testowe (Nearing i in. 1989; Morgan i in. 1994; Blöschl, Sivapalan 1995; Sivapalan, Kalma 1995; Schulze 2000; Kirkby 2001; Cerdan i in. 2002; Bochenek, Gil 2010; Szpikowski 2010; Majewski 2020; Gil i in. 2021; Majewski, Szpikowski 2024). Zwykle lokalizuje się je w obrębie naturalnych stoków (Józefaciuk i in. 1996; Jadczyzyn 1999, 2010). Do pomiarów wykorzystuje się tzw. łapacze, m. in. worki Słupika czy rynny Gerlacha (Smolska 2009).

Jedną z zalet badań poletkowych jest możliwość zróżnicowania typów pokrycia powierzchni terenu oraz wykonania badań nie tylko przy naturalnych opadach deszczu, ale również w formie eksperymentów z symulatorem opadów. Badania na poletkach testowych prowadzi się w różnych położeniach fizycznogeograficznych, na obszarach górskich, wyżynnych oraz na nizinach.

W zlewniach górskich badania poletkowe skupione są na stokach o znacznym nachyleniu, użytkowanych rolniczo lub klasyfikowanych jako nieużytki, chociaż w literaturze można także spotkać publikacje dotyczące lasów i dróg leśnych czy pastwisk (Słupik 1972; Bunza 1978, 1989; Bochenek 2002; Gołąb i in. 2006; Stępniewski 2008; Leitinger i in. 2010; Kim i in. 2014; Gołąb 2015). Gołąb (2012) podaje, iż na terenach górskich spływ na terenach zalesionych o naturalnej pokrywie glebowej i roślinnej jest obserwowany bardzo rzadko. Formuje się on przede wszystkim na skutek nawalnych opadów oraz wysycenia pojemności infiltracyjnej gleby. Zjawisko spływu powierzchniowego obserwuje się zazwyczaj na stromych stokach o płytkiej pokrywie glebowej.

Na obszarach wyżynnych pomiary spływu powierzchniowego i erozji wodnej gleb z wykorzystaniem poletek testowych o różnej skali wykonywali w Polsce między innymi: Pałys

i Mazur (1994); Rejman i Usowicz (1999, 2002), Rejman (2001, 2006), Stępniewski (2008), Jadczyzyn (2010) oraz Rejman i Brodowski (2010), a na świecie także Marshall i in. (2014), Wu i in. (2018) czy Kulik i Gordienko (2022). Z zasady obszary wyżynne cechują się niższymi sumami opadów niż tereny górskie, a także mniej urozmaiconą rzeźbą terenu. Na obszarze Polski na wyżynach występują gleby sprzyjające rolnictwu oraz znaczny udział pokryw lessowych. Grunty te są zatem silnie zagrożone spływem powierzchniowym oraz erozją wodną gleby.

Na nizinach stoki o większych niż kilka stopni nachyleniach występują przede wszystkim na zboczach dolin rzecznych. Ze względu na polodowcowe formy terenu, obszary nizinne również mogą cechować się znaczną podatnością na spływ powierzchniowy i erozję wodną gleb. Zjawiska te w skali poletek testowych były szeroko badane w Polsce szczególnie na terenach pojeziernych (Karczewski 1981; Klimczak 1993; Kosturkiewicz, Szafranski 1993; Szpikowski 1998a, b, 2001a, b, 2003a, 2010; Smolska 2002, 2005, 2010a, b; Szafranski 1992; Szafranski i in. 1998; Szafranski, Stasik 2001; Majewski 2014, 2016, 2019, 2020; Majewski, Szpikowski 2024). W literaturze zagranicznej można odnaleźć natomiast prace m. in. z obszaru Niderlandów czy Normandii (Cerdan i in. 2004; Appels i in. 2016).

Na terenach użytkowanych rolniczo spływ powierzchniowy może wymywać składniki chemiczne obecne w gruncie. Nadmierne wymywanie związków fosforu i azotu może szkodzić uprawom i być zagrożeniem dla okolicznych wód powierzchniowych (Jadczyzyn 2010; Pietrzak i in. 2013). Na obszarze Polski wielu badaczy wykazało, iż spływ powierzchniowy z terenów użytkowanych rolniczo jest obszarowym źródłem eksportu substancji biogenych do wód powierzchniowych i stanowi poważne zagrożenie w zakresie eutrofizacji tych wód (Kiryłuk, Rauba 2011; Koszelnik, Tomaszek 2011; Smoroń 2012; Pietrzak i in. 2013). Podczas spływu powierzchniowego po gruntach ornych transportowane są nie tylko składniki mineralne, ale też pozostałości środków ochrony roślin (Jadczyzyn 2010). Zjawisko spływu powierzchniowego niesie także zagrożenie zanieczyszczenia wód płynących. Z użytków rolnych wymywane są składniki nawozowe, przede wszystkim związki fosforu i azotu, jednocześnie zmniejszając ich dostępność dla uprawianych roślin.

Pośród badań poletkowych na terenach użytkowanych rolniczo stosowano poletka pokryte czarnym ugiem, a także różnymi rodzajami zbóż jarych lub ozimych czy warzyw okopowych. W literaturze spotyka się również analizy spływu powierzchniowego na poletkach charakterystycznych dla łąk i pastwisk czy terenów leśnych (Yu i in. 2000; Cerdan i in. 2004; Leitinger i in. 2010; Stępniewski i in. 2010; Kim i in. 2014).

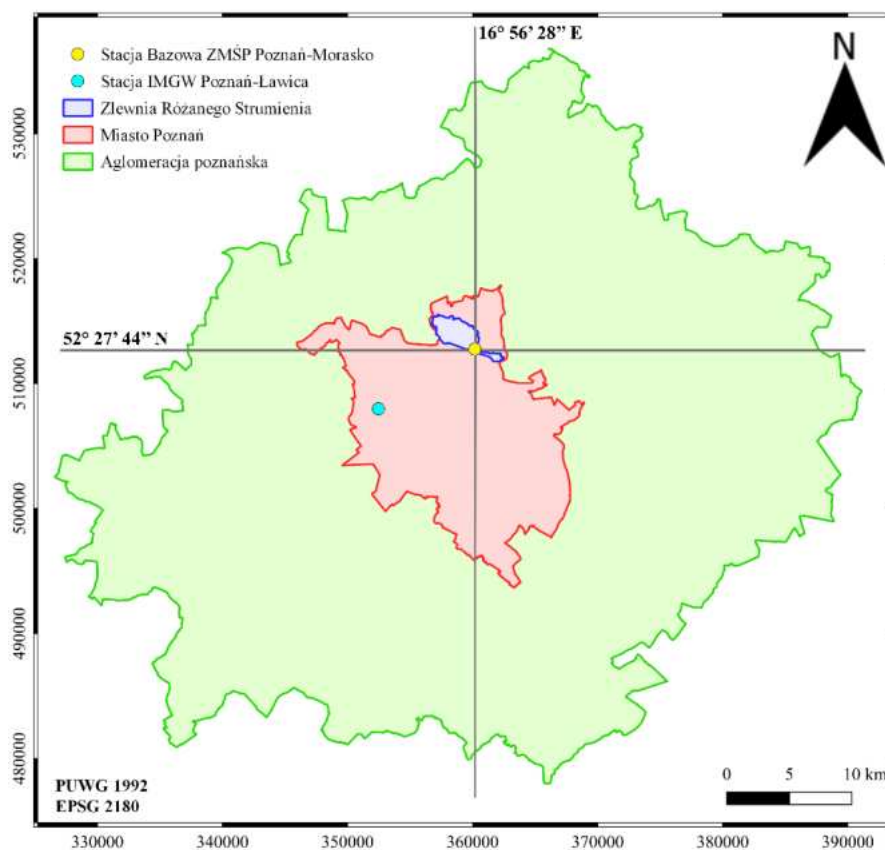
Jednym z najważniejszych skutków postępującej urbanizacji są zmiany w stosunkach wodnych, wpływające na wszystkie składowe bilansu wodnego (Kasvio i in. 2016; Zhang i in. 2018; Xu i in. 2020; Harjunpää 2023), a także zmiany wielkości dostępnych zasobów wodnych (Gutry-Korycka, Jokiel 2017; Suchożebrski 2018). Procesy urbanizacyjne powodują wzrost udziału powierzchni uszczelnionych, zastępujących naturalne pokrycia terenu. Wraz z tymi zmianami dochodzi do zmian w parowaniu i infiltracji, a także potęgowany jest spływ powierzchniowy. Woda z opadu nie ma bowiem możliwości przesiąkania w podłoże. Na skutek tego obszary miejskie są bardziej narażone na powódzie błyskawiczne. Ponadto wraz ze wzmożeniem spływu powierzchniowego pogorszeniu ulega jakość wody (Kuntaliitto 2012; Burant i in. 2018; Ju i in. 2023).

Badaniami spływu powierzchniowego na obszarach miast zajmowali się m. in. Tholin i Keifer (1960), Marsalek i in. (1999), Lee i Bang (2000), Deletic (1998), Choe i in. (2002), Ferreira i in. (2012), Liu i in. (2018), Charters i in. (2021) oraz Lapointe (2022). Zakres zainteresowań wyżej wymienionych badaczy był szeroki: od ilości wody spływającej po powierzchniach miejskich, przez jej jakość, do sposobów zarządzania nią. Należy jednakże zwrócić uwagę, iż przeważają badania na małych poletkach testowych (poniżej 5 m²). Znaczna jest także liczba publikacji dotyczących modelowania spływu powierzchniowego w miastach. Zagadnieniami tymi zajmowali się m. in. Choi i Ball (2002), Ettrich i in. (2005), Beven (2012), Mrowiec i Suchanek (2015), Jawgiel (2016), Thorndhal i Schaarup-Jensen (2016), Zhang i in. (2018), Liu i in. (2020), Xu i in. (2020) oraz Gray i in. (2023). Można także spotkać badania na powierzchniach o zróżnicowanym pokryciu terenu, występujących na obszarach miejskich: półprzepuszczalnych płytach betonowych (Andersen i in. 1999; Pezzaniti i in. 2009; Qin i in. 2013; Kamali i in. 2017) czy użytkach zielonych (Zhang i in. 2012, 2015; Armson i in. 2013; Nielsen i in. 2019).

Zasadnym wydaje się poszerzenie wiedzy w zakresie formowania się i dynamiki spływu powierzchniowego na powierzchniach o zróżnicowanym pokryciu terenu. W literaturze brakuje badań eksperymentalnych spływu powierzchniowego z wykorzystaniem symulacji opadów, która pozwala realizować badania niezależnie od warunków pogodowych.

3. Charakterystyka obszaru badań

W niniejszej rozprawie obszar badań analizowano w trzech skalach uszczegółowienia: aglomeracji poznańskiej, miasta Poznań oraz zlewni Różanego Strumienia (ryc. 3.1). Terenowe stanowisko badawcze znajduje się w zlewni Różanego Strumienia na stoku o nachyleniu 6° , reprezentatywnym dla każdej skali uszczegółowienia, a badane typy pokrycia powierzchni terenu stanowią duży udział użytkowania terenów w aglomeracji poznańskiej, mieście Poznań oraz zlewni Różanego Strumienia.

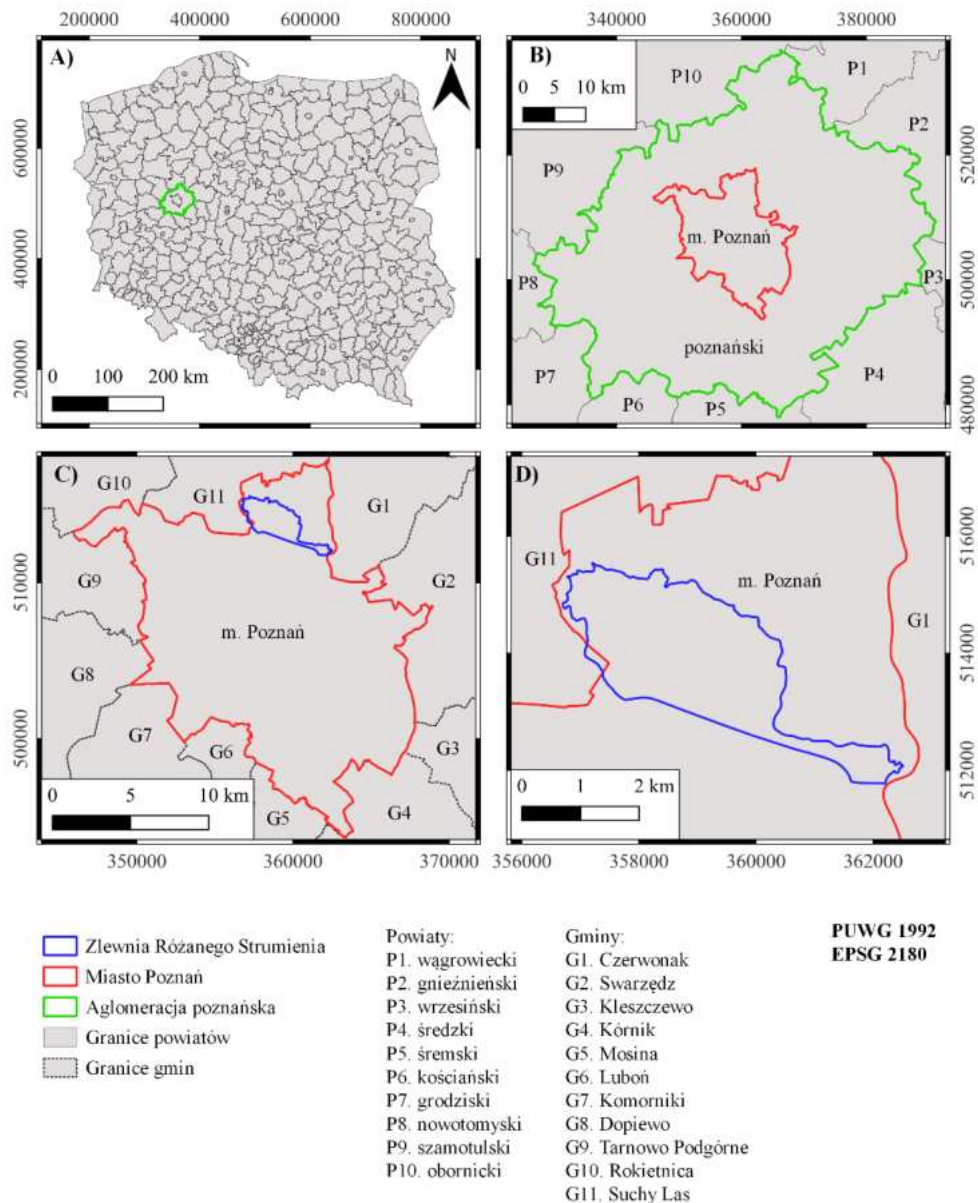


Ryc. 3.1. Położenie obszaru badań (według Państwowego Rejestru Granic, geoportal.gov.pl)

3.1. Lokalizacja

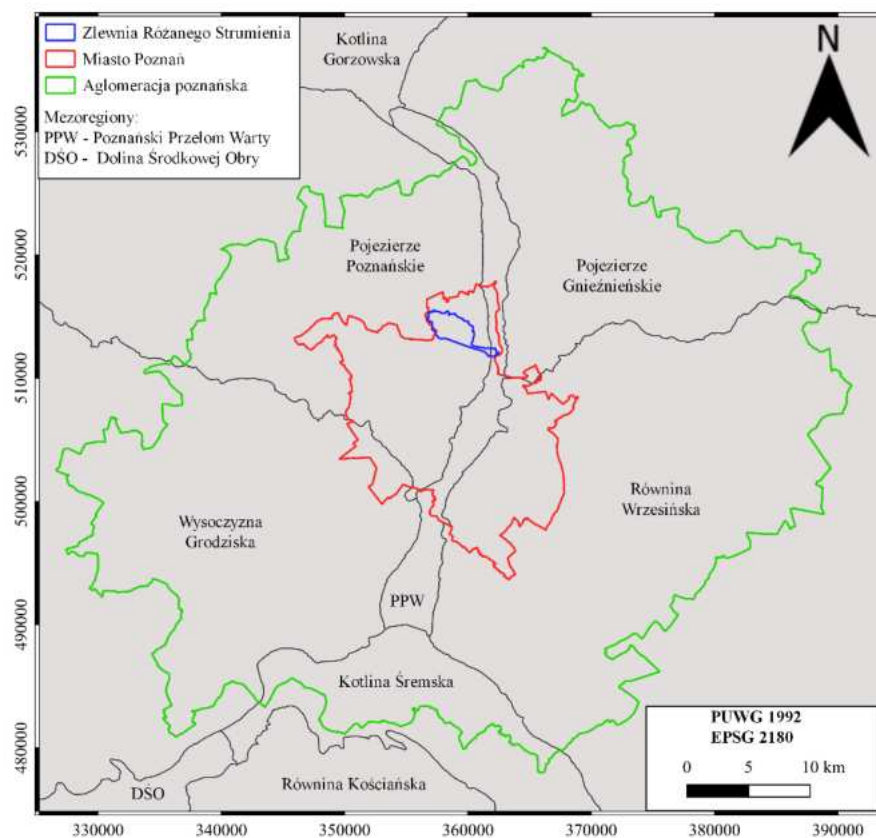
W celu ustalenia granic aglomeracji poznańskiej przyjęto koncepcję Swianiewicza i Klimskiej (2005), zgodnie z którą obejmuje ona obszar miasta Poznania oraz wszystkich przyległych do niego gmin, znajdujących się w powiecie poznańskim. Aglomeracja poznańska graniczy z następującymi powiatami: wągrowieckim, gnieźnieńskim, wrzesińskim, średzkim, śremskim, kościańskim, grodziskim, nowotomyskim, szamotulskim oraz obornickim (ryc. 3.2).

Miasto Poznań graniczy z następującymi gminami: Czerwonak, Swarzędz, Kleszczewo, Kórnik, Mosina, Luboń, Komorniki, Dopiewo, Tarnowo Podgórne, Rokietnica i Suchy Las. Największy poziom uszczegółowienia obszaru badań stanowi zlewnia Różanego Strumienia, zlokalizowana w północnej części Poznania. Obszar aglomeracji zajmuje 2160 km², z czego miasto Poznań obejmuje 261 km², a zlewnia Różanego Strumienia 7,7 km².



Ryc. 3.2. Lokalizacja obszaru badań na tle podziału administracyjnego: A) aglomeracja poznańska na tle Polski; B) aglomeracja poznańska na tle sąsiadujących powiatów; C) miasto Poznań na tle sąsiadujących gmin; D) zlewnia Różanego Strumienia (według Państwowego Rejestru Granic, geoportal.gov.pl)

Obszar aglomeracji poznańskiej znajduje się w większości w makroregionie Pojezierze Wielkopolskie (315.5) (tab. 3.1) (Solon i in. 2018). Przez centralną część aglomeracji, południkowo przebiega Poznański Przełom Warty (315.52) (ryc. 3.3). W południowo-wschodniej części obszaru znajduje się Równina Wrzesińska (315.56), a w północno-wschodniej Pojezierze Gnieźnieńskie (315.54). Na południowy zachód od Warty wyróżniono Wysoczyznę Grodziską (315.59), a na północny zachód Pojezierze Poznańskie (315.51). Ponadto na południu zlokalizowana jest Kotlina Śremska (315.64), zaliczana do makroregionu Pradoliny Warciańsko-Odrzańskiej (315.6).



Ryc. 3.3. Lokalizacja obszaru badań na tle podziału fizycznogeograficznego Polski (Solon i in. 2018)

Miasto Poznań w całości znajduje się w makroregionie Pojezierza Wielkopolskiego (315.5), w mezoregionach: Poznański Przełom Warty (315.52), Pojezierze Poznańskie (315.51), Pojezierze Gnieźnieńskie (315.54), Wysoczyzna Grodziska (315.59) oraz Równina Wrzesińska (315.56). Większość zlewni Różanego Strumienia znajduje się na Pojezierzu Poznańskim (315.51), z wyjątkiem odcinka ujściowego ciek, zaliczanego do Poznańskiego Przełomu Warty (315.52).

Tab. 3.1. Miejsce mezoregionów w obrębie aglomeracji poznańskiej w regionalizacji fizycznogeograficznej według Solona i in. (2018)

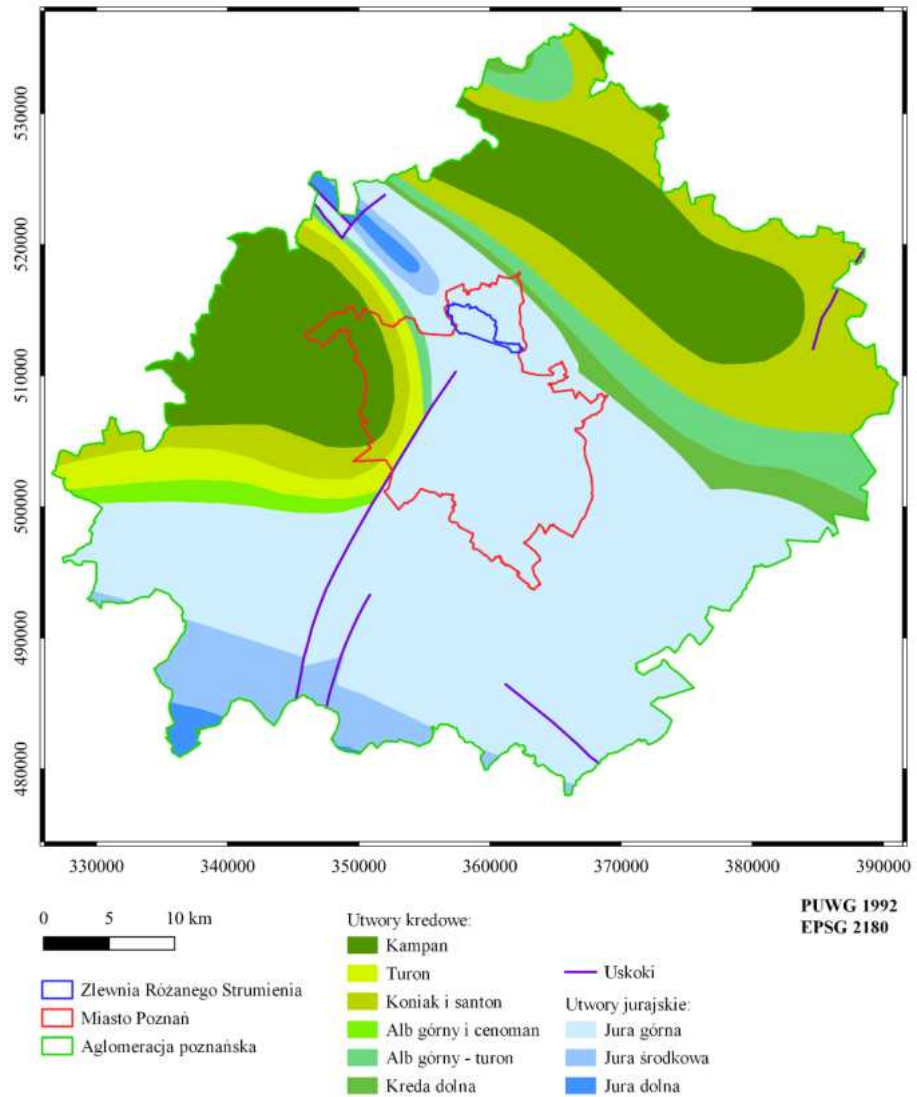
Obszar	Europa Zachodnia
Megaregion	Pozaalpejska Europa Środkowa (3)
Prowincja	Nizina Środkowoeuropejska (31)
Podprowincja	Pojezierza Południowobałtyckie (314-316)
Makroregiony	Pojezierze Wielkopolskie (315.5) i Pradolina Warciańsko-Odrzańska (315.6)
Mezoregiony	Równina Wrzesińska (315.56), Wysoczyzna Grodziska (315.59), Pojezierze Poznańskie (315.51), Poznański Przełom Warty (315.52), Pojezierze Gnieźnieńskie (315.54), Kotlina Śremska (315.64)

3.2. Geologia i litologia

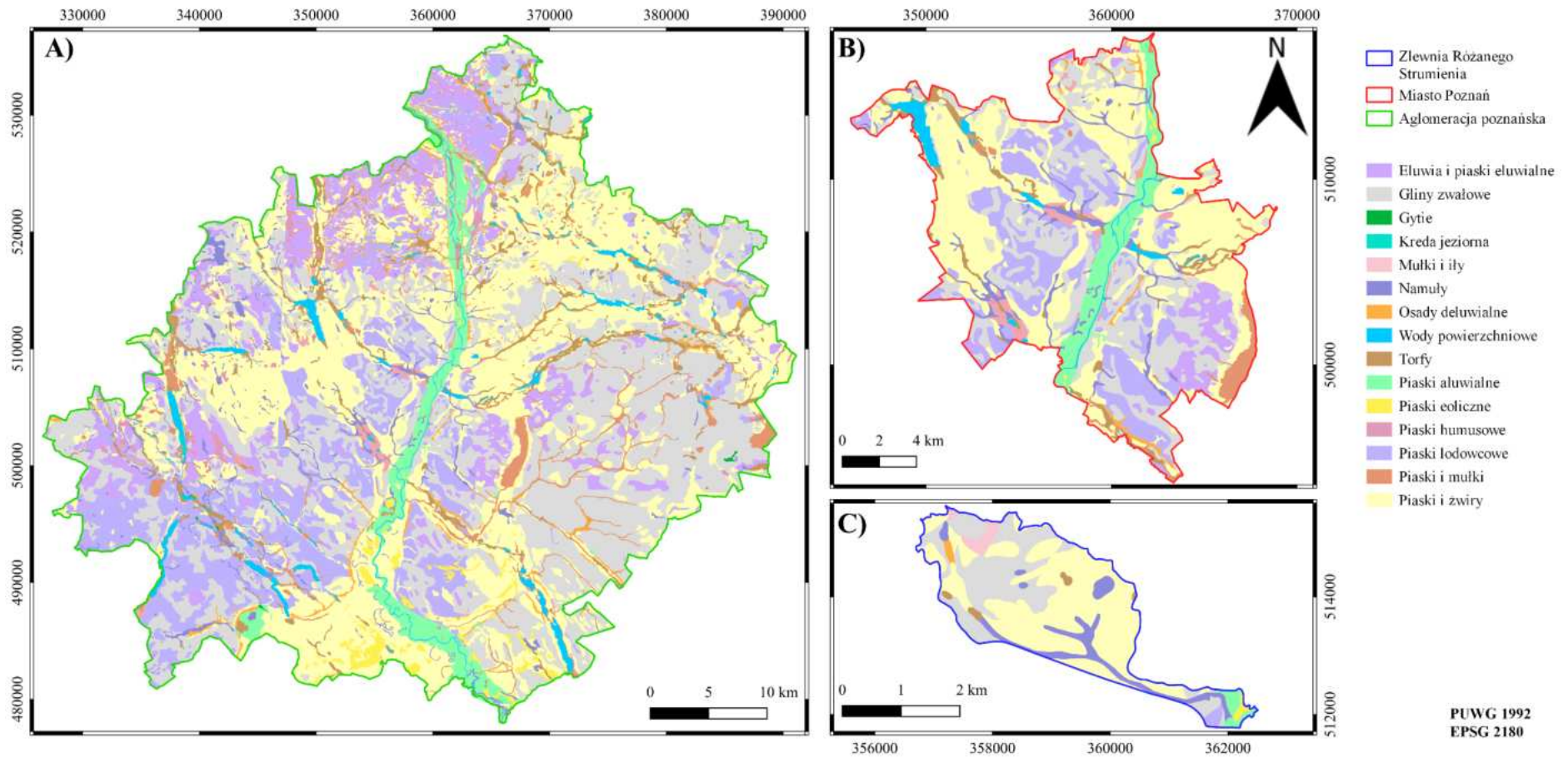
Obszar aglomeracji poznańskiej zlokalizowany jest na pograniczu monokliny sudeckiej i synklinorium szczecińsko-łódzko-miechowskiego (Pożaryski 1974; Górski, Przybyłek 1996). Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku 1:1 000 000 (Dadlez i in. 2000) wskazuje, iż podłoże mezozoiczne aglomeracji poznańskiej złożone jest z utworów jurajskich i kredowych (ryc. 3.4). Utwory kredowe znajdują się w północno-wschodniej i północno-zachodniej części aglomeracji. Ponadto na obszarze aglomeracji występuje kilka uskoków tektonicznych. Podłoże mezozoiczne miasta Poznania zbudowane jest w większości z utworów z górnej jury, z wyjątkiem północno-zachodniej części, gdzie występują utwory kredowe. W zlewni Różanego Strumienia w całości podłoże mezozoiczne datowane jest na górną kredę.

Podłoże kenozoiczne aglomeracji poznańskiej, miasta Poznania oraz zlewni Różanego Strumienia zestawiono na podstawie 17 arkuszy Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1:50 000: Parkowo (Szałajdewicz 2003), Wągrowiec (Nowak 2003), Szamotuły (Gogołek 1988), Oborniki Wielkopolskie (Skompski 1990), Murowana Goślina (Sydow 1996), KłECKO (Błaszczak 1997), Duszniki Wielkopolskie (Pluczyński, Sydow 1993), Buk (Gogołek 1992), Poznań (Chmal 1990), Swarzędz (Cincio 1994), Pobiedziska (Miętkiewicz, Sydow 1999), Grodzisk Wielkopolski (Michalska, Winnicka 2003), Stęszew (Chmal 1992), Mosina (Chachaj 1991), Kórnik (Bartczak 1990), Środa Wielkopolska (Gawroński 1999) i Śrem (Nowak 1998). W podłożu aglomeracji poznańskiej dominują gliny zwałowe (30,82%) oraz piaski i żwiry (30,84%) (ryc. 3.5, tab. 3.2). Ponadto znaczny udział w utworach kenozoicznych mają piaski lodowcowe (11,59%). Na obszarze Poznania również obserwuje się przewagę piasków i żwirów (36,73%) oraz glin zwałowych (22,69%), a także duży obszar pokrywają piaski lodowcowe (16,39%). Na obszarze zlewni Różanego Strumienia wśród utworów kenozoicznych dominują piaski i żwiry (53,50%) oraz gliny zwałowe (28,73%), ale nie

obserwuje się prawie wcale piasków lodowcowych (1,02%). Ponadto znaczne tereny zlewni pokryte są przez namuły (9,63%).



Ryc. 3.4. Budowa geologiczna obszaru badań bez utworów kenozoicznych (na podst. Dadlez i in. 2000)



Ryc. 3.5. Litologia utworów podłoża obszaru badań na podstawie Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000 (Gogołek 1988; Bartczak 1990; Chmal 1990; Skompski 1990; Chachaj 1991; Chmal 1992; Gogołek 1992; Pluczyński, Sydow 1993; Cincio 1994; Sydow 1996; Błaszczyk 1997; Nowak 1998; Gawroński 1999; Miętkiewicz, Sydow 1999; Michalska, Winnicka 2003; Nowak 2003; Szałajdewicz 2003; zgeneralizowane). A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia

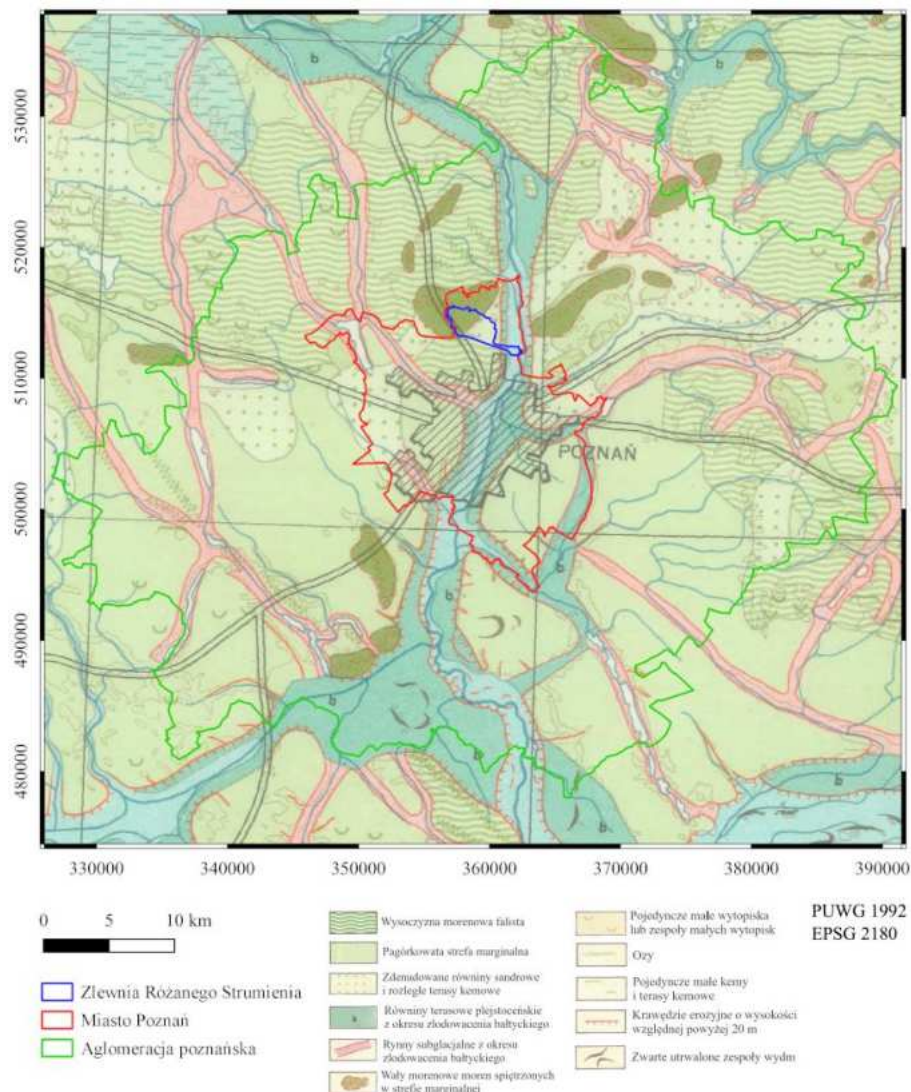
Tab. 3.2. Udział poszczególnych utworów kenozoicznych na obszarze badań na podstawie Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000 (Gogołek 1988; Bartczak 1990; Chmał 1990; Skompski 1990; Chachaj 1991; Chmał 1992; Gogołek 1992; Pluczyński, Sydow 1993; Cincio 1994; Sydow 1996; Błaszczyk 1997; Nowak 1998; Gawroński 1999; Miętkiewicz, Sydow 1999; Michalska, Winnicka 2003; Nowak 2003; Szałajdewicz 2003; zgeneralizowane)

Utwory kenozoiczne	Aglomeracja poznańska		Miasto Poznań		Zlewnia Różnego Strumienia	
	Powierzchnia	Udział	Powierzchnia	Udział	Powierzchnia	Udział
	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]
Eluvia i piaski eluwialne	187,95	8,69	11,29	4,31	0,00	0,00
Gliny zwałowe	666,24	30,82	59,42	22,69	2,22	28,73
Gytie	0,91	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Kreda jeziorna	0,64	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00
Mulki i ily	10,75	0,50	4,56	1,74	0,19	2,45
Namuły	49,25	2,28	9,69	3,70	0,75	9,63
Osady deluwialne	31,05	1,44	2,13	0,82	0,05	0,64
Wody powierzchniowe	35,96	1,66	5,80	2,21	0,00	0,00
Torfy	82,05	3,80	7,47	2,85	0,09	1,17
Piaski aluwialne	70,16	3,25	15,44	5,89	0,17	2,18
Piaski eoliczne	27,43	1,27	0,36	0,14	0,05	0,68
Piaski humusowe	25,38	1,17	0,01	0,00	0,00	0,00
Piaski lodowcowe	250,47	11,59	42,92	16,39	0,08	1,02
Piaski i mulki	56,66	2,62	6,59	2,52	0,00	0,00
Piaski i żwiry	666,92	30,84	96,20	36,73	4,14	53,50
RAZEM	2161,82	100,00	261,91	100,00	7,74	100,00

3.3. Rzeźba terenu

Poznań położony jest na obszarze nizinnym, jednakże w skali regionalnej jego rzeźba terenu cechuje się znacznym zróżnicowaniem (Zwoliński i in. 2017). Według Przeglądowej Mapy Geomorfologicznej Polski 1:500 000 (Rosa, Kozarski 1980) przeważającą część aglomeracji poznańskiej pokrywają wysoczyzny morenowe: płaska i falista (ryc. 3.6). W północnej i południowej części obszaru, w sąsiedztwie doliny Warty obserwuje się także wały moren spiętrzonych strefy marginalnej. Ponadto na terenie aglomeracji występują równiny sandrowe w postaci sandrów: lusowskiego, junikowskiego, strzeszyńskiego, piątkowskiego, kicińskiego, rzeki Głównej, a także naramowickiego na obszarze zlewni Różanego Strumienia (Biedrowski 1968; Hildebrandt-Radke 2016). W dolinie Warty oraz na

obszarze Pradoliny Warciańsko-Odrzańskiej znajdują się równiny terasowe plejstocenijskie z okresu zlodowacenia północnopolskiego oraz holocenijskie równiny zalewowe i nadzalewowe. Na obszarze aglomeracji poznańskiej obserwuje się silnie rozwiniętą sieć rynien subglacjalnych, częściowo wypełnionych przez jeziora, datowanych na okres zlodowacenia północnopolskiego. W południowej części obszaru, głównie na terenie teras zalewowych, można także spotkać utrwalone późnoglacialne i holocenijskie formy akumulacji eolicznej w postaci pojedynczych wydm lub ich zespołów.



Ryc. 3.6. Geomorfologia obszaru badań na podstawie Przeglądowej Mapy Geomorfologicznej Polski 1:500 000 (Rosa, Kozarski 1980)

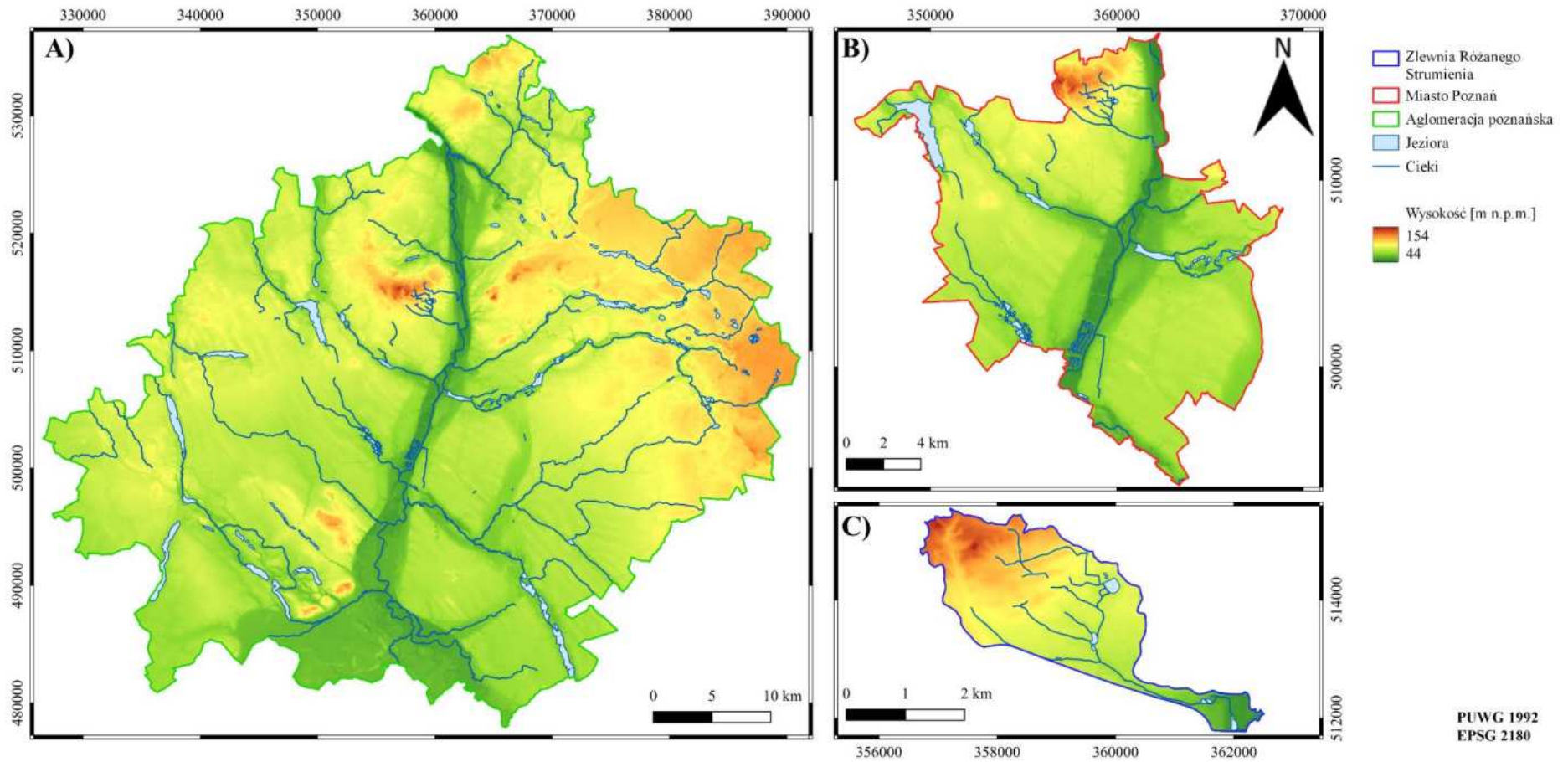
Podstawą analizy geomorfometrycznej analizowanego obszaru były dane LIDAR o rozdzielczości 1 m (geoportal.gov.pl). Najwyżej położonym punktem w obrębie aglomeracji poznańskiej, miasta Poznania oraz zlewni Różanego Strumienia jest Moraska Góra

(154 m n.p.m.). Najniższą wysokością bezwzględną cechuje się północny fragment doliny Warty, który na obszarze aglomeracji położony jest na wysokości 44 m n.p.m., na obszarze Poznania 48 m n.p.m., a w zlewni Różanego Strumienia 49 m n.p.m. (ryc. 3.7). W zlewni najniżej położone miejsce stanowi ujście Różanego Strumienia do Warty.

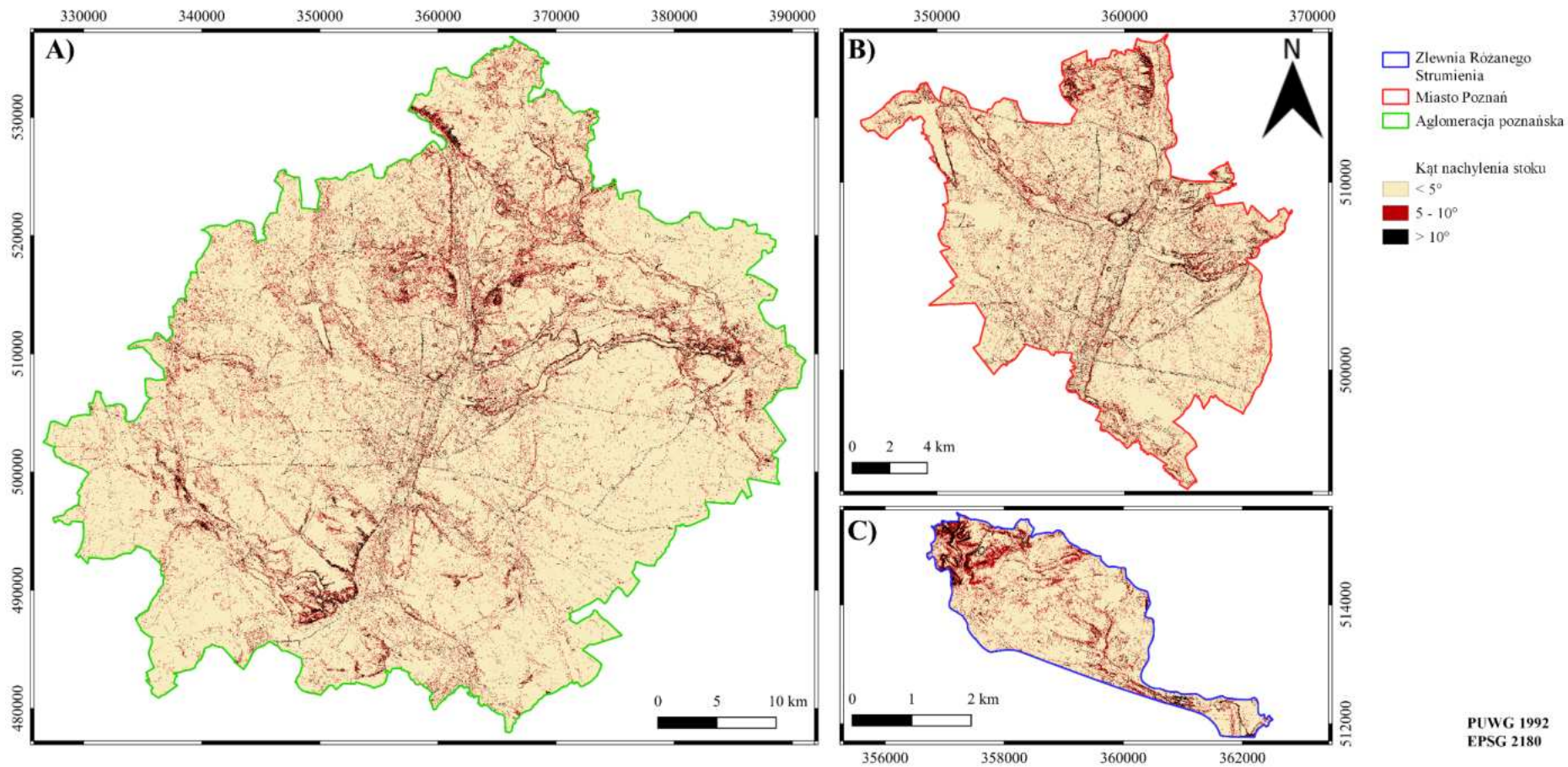
Położenie obszaru badań na terenach młodogłacjalnych determinuje wysokości względne oraz nachylenia stoków. Na obszarze aglomeracji poznańskiej, miasta Poznania oraz zlewni Różanego Strumienia dominują stoki o nachyleniu nieprzekraczającym 5° (ryc. 3.8, tab. 3.3). W aglomeracji stanowią 87,34% stoków, w Poznaniu 83,60%, a w zlewni Różanego Strumienia 77,66%. Jest to charakterystyczne dla obszarów zlokalizowanych na terenach nizinnych. Znaczny jak na obszary nizinne jest udział stoków o nachyleniu w przedziale 5 ÷ 10°. Ich udział wzrasta wraz z uszczegóławianiem obszaru badań do mniejszych powierzchni – w aglomeracji stanowią 9,08%, w Poznaniu 11,08%, a w zlewni Różanego Strumienia 17,02%. Najmniej jest stoków o nachyleniu powyżej 10°. Na obszarze aglomeracji stanowią one tylko 3,58%, a w Poznaniu oraz zlewni Różanego Strumienia 5,32%.

Tab. 3.3. Udział stoków o poszczególnych zakresach nachylenia na obszarze badań na podstawie danych pomiarowych LIDAR (geoportal.gov.pl)

Kąt nachylenia stoku	Agglomeracja poznańska		Miasto Poznań		Zlewnia Różanego Strumienia	
	Powierzchnia	Udział	Powierzchnia	Udział	Powierzchnia	Udział
[°]	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]
0 ÷ 5	1886,16	87,34	218,65	83,60	5,99	77,66
5 ÷ 10	196,03	9,08	28,99	11,08	1,31	17,02
10 ÷ 80	77,37	3,58	13,92	5,32	0,41	5,32
RAZEM	2159,57	100,00	261,57	100,00	7,72	100,00



Ryc. 3.7. Hipsometria obszaru badań na podstawie danych pomiarowych LIDAR (geoportal.gov.pl). A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia



Ryc. 3.8. Nachylenia stoków na obszarze badań na podstawie danych pomiarowych LIDAR (geoportal.gov.pl). A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia

3.4. Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi

Dane dotyczące typów pokrycia powierzchni terenu na obszarze aglomeracji poznańskiej pozyskano z Bazy Danych Obiektów Topograficznych 1:10 000 (BDOT10k) (geoportal.gov.pl).

Aglomeracja poznańska jest zamieszkała przez 980 tysięcy osób i cechuje się gęstością zaludnienia wynoszącą 453 os/km² (Narodowy Spis Powszechny... 2021). Pomimo tego, udział powierzchni terenów zurbanizowanych wynosi 12,18% (ryc. 3.9, tab. 3.4). Obszar aglomeracji jest w większości użytkowany rolniczo (44,93%), a jego znaczne fragmenty pokryte są przez lasy (25,28%) oraz roślinność trawiastą (14,75%). Tereny zurbanizowane są skoncentrowane przede wszystkim w centralnej części aglomeracji (tj. mieście Poznań) oraz na południu, w rejonie Lubonia, Puszczykowa i Mosiny. Obszary zalesione występują przede wszystkim w północnej części aglomeracji, gdzie znajduje się m. in. Park Krajobrazowy Puszcza Zielonka, oraz na południu, w okolicy Wielkopolskiego Parku Narodowego.

W granicach Poznania przeważają tereny zielone – lasy zajmują 21,08% powierzchni miasta, a obszary trawiaste 24,89%. Ponadto obserwuje się silną koncentrację terenów zurbanizowanych (32,86%). W północnej oraz południowo-wschodniej części miasta występują tereny użytkowane rolniczo (16,32%). Należy zauważyć, iż w granicach administracyjnych Poznania zamieszkuje ponad połowa mieszkańców aglomeracji. Według danych z Narodowego Spisu Powszechnego Ludności i Mieszkań 2021 roku było to 547 tysięcy osób (Narodowy Spis Powszechny... 2021).

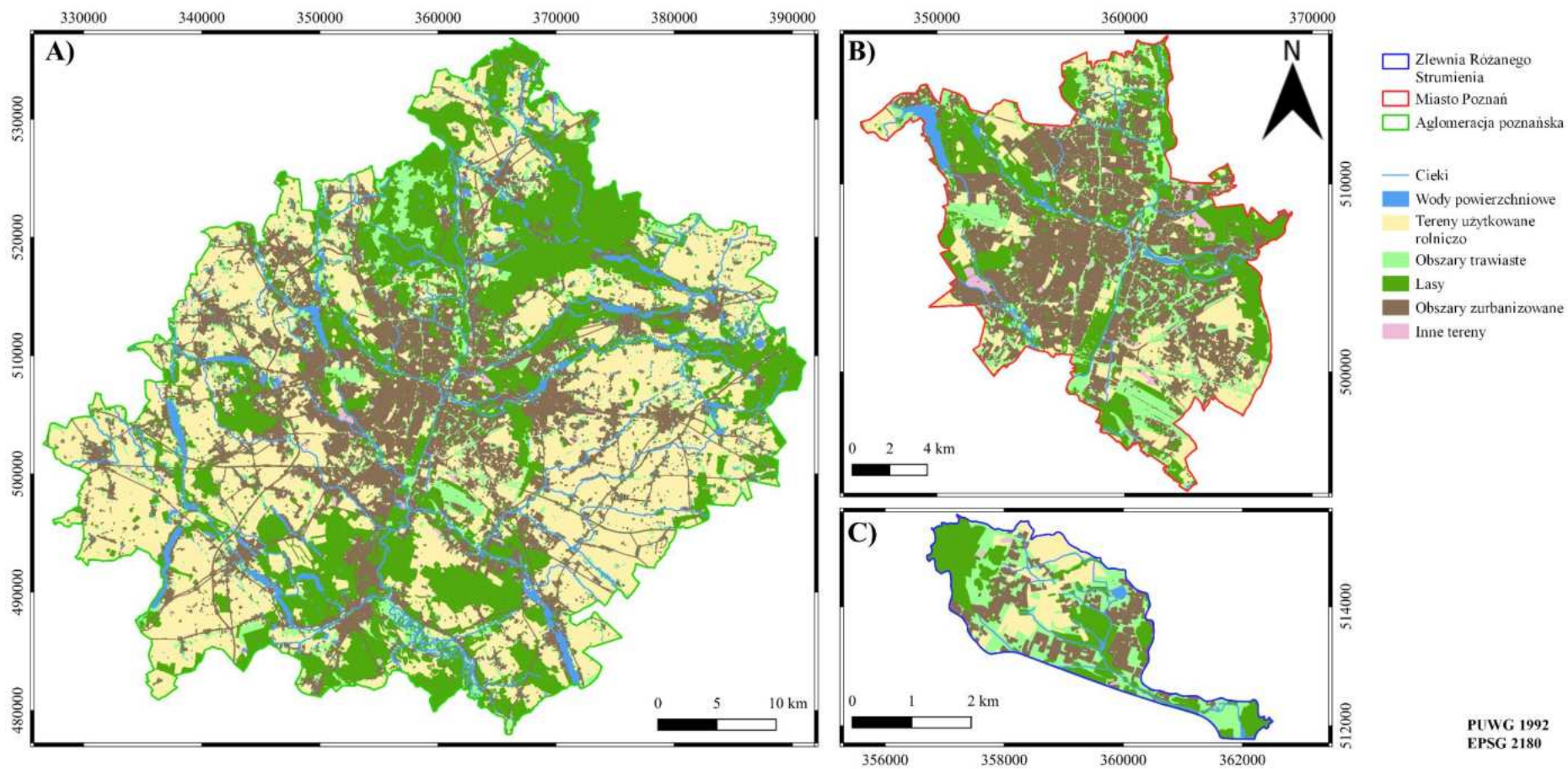
Zlewnia Różanego Strumienia charakteryzuje się największym udziałem terenów zielonych – tj. lasów (28,23%) oraz terenów trawiastych (33,65%). W jej północnej części położony jest fragment Rezerwatu Przyrody Meteoryt Morasko. Na obszarze zlewni znaczną powierzchnię zajmują grunty orne (19,25%), skoncentrowane przede wszystkim w jej środkowej części. Zabudowa skupiona jest wokół osiedli mieszkalnych Różany Potok i Morasko na pograniczu Poznania i gminy Suchy Las, a także kampusu uniwersyteckiego Morasko, należącego do Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza (UAM). Tereny zurbanizowane zajmują 17,11% powierzchni zlewni.

Zarówno w aglomeracji poznańskiej, jak i w Poznaniu oraz zlewni Różanego Strumienia, lasy stanowią w przybliżeniu 25% powierzchni danego obszaru. Szczególną uwagę należy zwrócić na znaczny udział gruntów ornych i innych terenów wykorzystywanych rolniczo, dominujących na terenie aglomeracji (44,93%), a także na obszary zurbanizowane, zajmujące aż 32,86% powierzchni Poznania. Obszary trawiaste obejmują 14,75% powierzchni

aglomeracji, lecz wraz z uszczegóławianiem obszaru badań do mniejszych jednostek obserwuje się wzrost ich udziału – na terenie miasta Poznania zajmują 24,89%, a w zlewni Różanego Strumienia aż 33,65%.

Tab. 3.4. Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi na obszarze badań na podstawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych 1:10 000 BDOT10k (geoportal.gov.pl; zgeneralizowane)

Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi	Aglomeracja poznańska		Miasto Poznań		Zlewnia Różnego Strumienia	
	Powierzchnia	Udział	Powierzchnia	Udział	Powierzchnia	Udział
	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]
Wody powierzchniowe	48,06	2,22	8,21	3,14	0,11	1,46
Tereny użytkowane rolniczo	971,25	44,93	42,75	16,32	1,49	19,25
Obszary trawiaste	318,88	14,75	65,19	24,89	2,60	33,65
Lasy	546,59	25,28	55,20	21,08	2,18	28,23
Obszary zurbanizowane	263,41	12,19	86,09	32,86	1,32	17,11
Inne tereny	13,64	0,63	4,47	1,71	0,02	0,30
RAZEM	2161,83	100,00	261,91	100,00	7,74	100,00



Ryc. 3.9. Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi na obszarze badań na podstawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych 1:10 000 BDOT10k (geoportal.gov.pl; zgeneralizowane). A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia

3.5. Klimat

Aglomeracja poznańska znajduje się w obrębie oddziaływania klimatu umiarkowanie ciepłego oceanicznego (Cfb) (Kottek i in. 2006). Pod względem regionalizacji klimatycznej Wosia (1993) obszar aglomeracji poznańskiej znajduje się w regionie środkowowielkopolskim (XV).

Na obszarze aglomeracji zlokalizowana jest stacja synoptyczna Poznań-Ławica w ramach sieci monitoringu Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB), która prowadzi obserwacje od 1951 roku. Historyczne pomiary meteorologiczne w Poznaniu sięgają 1846 roku (Kolendowicz i in. 2019).

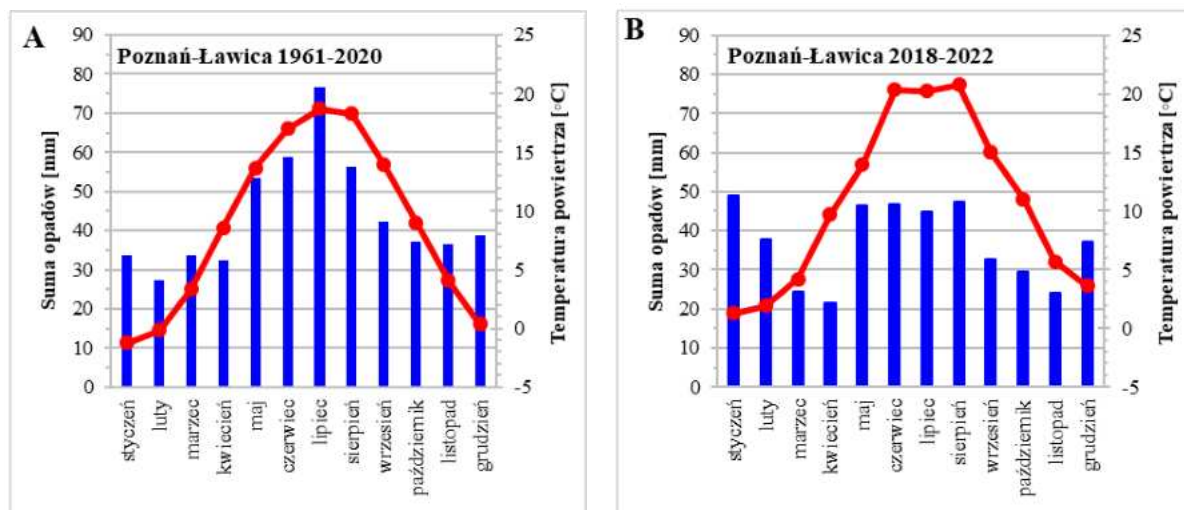
Według Farata (1996) uśrednione ciśnienie atmosferyczne w Poznaniu wynosi 1005 hPa, a nad obszarem miasta częściej obserwuje się centra układów wysokiego ciśnienia aniżeli ośrodki niżowe. W latach 1951-1990 przez średnio 230 dni w roku nie obserwowano frontów atmosferycznych, przez 67 dni występowały fronty chłodne, przez 42 dni – ciepłe, a przez 27 dni – zokludowane. Najczęściej notowano masy powietrza o pochodzeniu polarno-morskim (ok. 80%), znacznie rzadziej występowało powietrze polarno-kontynentalne, i powietrze arktyczne a najrzadziej – masy powietrza zwrotnikowego (ok. 2% w ciągu roku). Na obszarze Poznania przeważają wiatry z sektora zachodniego (NW, W, SW), obserwowane przez 48% roku.

W wieloleciu 1846-2016 średnia roczna temperatura wyniosła 8,1°C (Kolendowicz i in. 2019). Według danych IMGW-PIB dla lat 1961-2020 wyniosła 8,8°C, natomiast w latach 2018-2022 – 10,6°C (ryc. 3.10). Jednocześnie należy podkreślić, iż w badanym przez Kolendowicza i in. (2019) wieloleciu 1846-2016 osiem z dziesięciu najwyższych średnich rocznych temperatur zanotowano po 2000, a maksymalna z nich to 10,5°C. Na podstawie tych tendencji można wnioskować, iż na obszarze Poznania w ostatnich latach wyraźnie widoczne są skutki ocieplenia klimatu, lecz należy także zwrócić uwagę na zjawisko miejskiej wyspy ciepła oraz wzmożony proces urbanizacji w pobliżu stacji IMGW-PIB zlokalizowanej na poznańskim lotnisku Ławica.

Średnia roczna suma opadów na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica według Farata (1996) wyniosła 508 mm (wielolecie 1951-1990), a według Szygi-Pluty i Grześkowiak (2016) 526 mm (wielolecie 1981-2015). W wieloleciu 1961-2020 średnia roczna suma opadów w Poznaniu wyniosła 527 mm. Należy zwrócić jednakże uwagę, iż w latach 2018-2022 spadła ona do 440 mm (Rocznik meteorologiczny IMGW-PIB 2018, 2019, 2020, 2021, 2022). Średnia

roczna suma opadów dla obszaru Polski wynosi 638,6 mm (Kirschenstein, Baranowski 2005), co wskazuje, iż Poznań znajduje się w strefie deficytu opadów.

Szczegółowe charakterystyki opadów atmosferycznych dla Poznania zostały opisane w rozdziale 4 niniejszej rozprawy.



Ryc. 3.10. Klimatogramy dla stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica dla lat: A) 1961-2020, B) 2018-2022 (Roczniki meteorologiczne IMGW-PIB 2018, 2019, 2020, 2021, 2022)

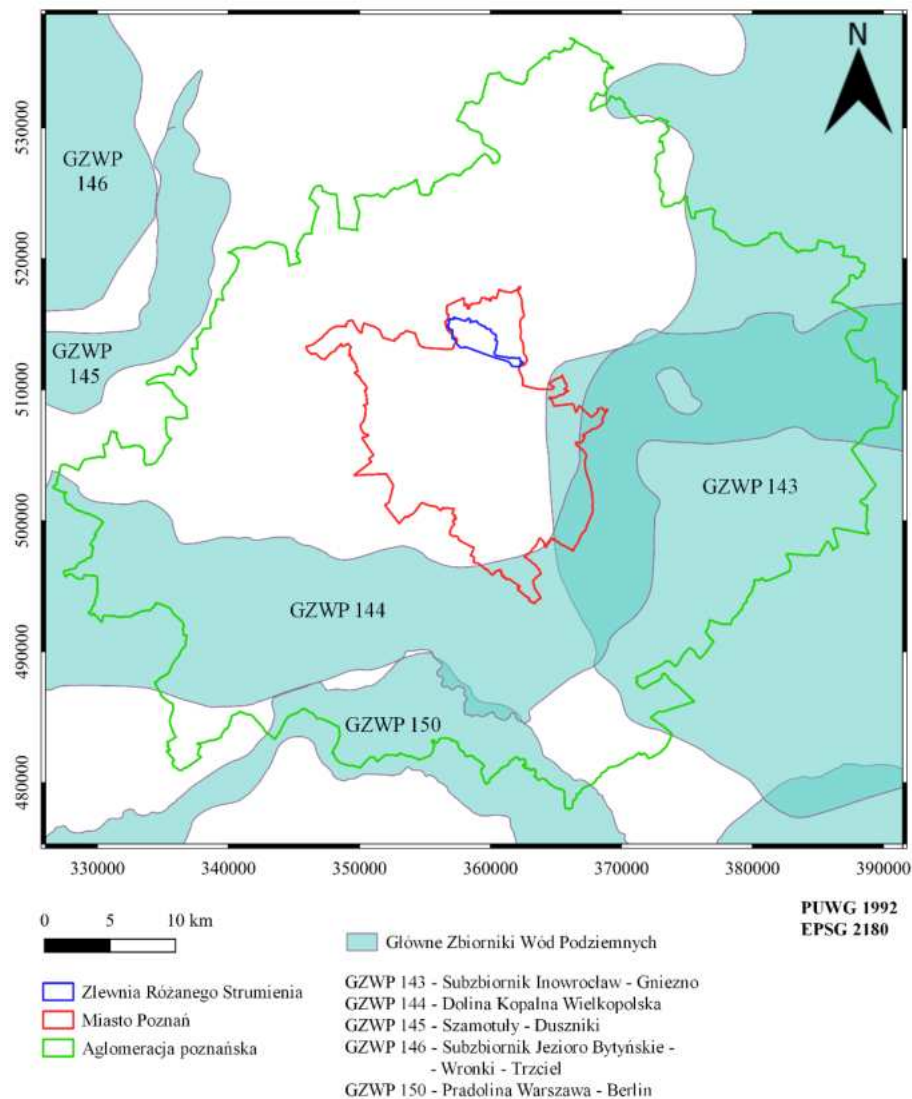
3.6. Hydrologia

Aglomeracja poznańska położona jest w regionie wodnym Warty. Głównym ciekim na obszarze aglomeracji jest Warta, płynąca w przełomowej dolinie o orientacji południkowej. Przepływa ona przez centralną część obszaru, dzieląc obszar aglomeracji na dwie w przybliżeniu równe części (ryc. 3.12). Warta jest zasilana przez liczne prawo i lewobrzeżne dopływy. Jej główne lewobrzeżne dopływy to: Wirenka, Potok Junikowski, Bogdanka, Różany Strumień i Potok Młyński, natomiast dopływy prawobrzeżne to: Babiarz, Kopel, Starynka, Cybina, Główna, Koźlanka oraz Trojanka. W granicach Poznania do Warty uchodzą: Bogdanka, Różany Strumień, Potok Młyński, Starynka, Cybina oraz Główna.

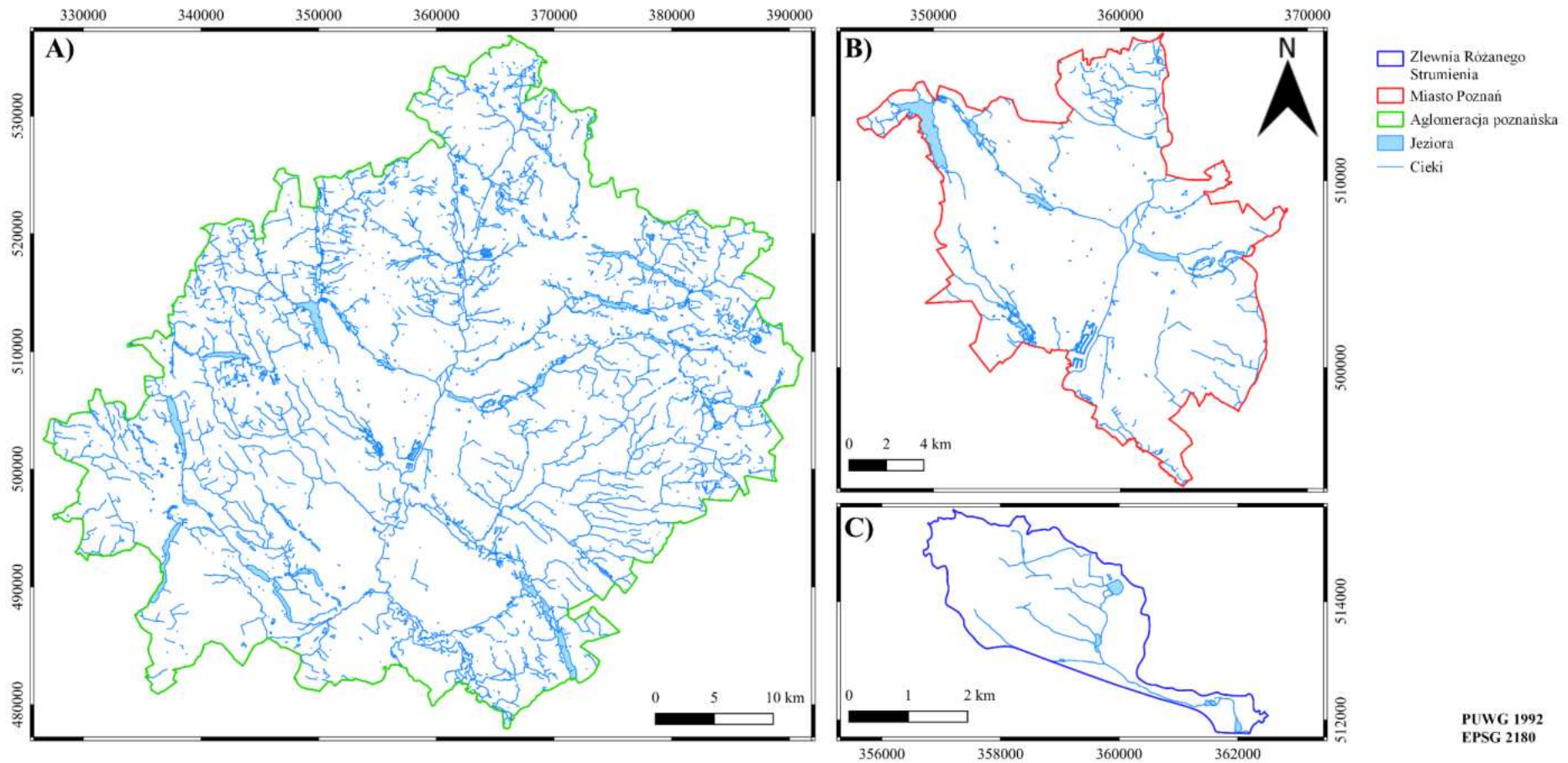
Według BDOT10k na terenie aglomeracji poznańskiej występuje ponad 1700 naturalnych i sztucznych zbiorników wodnych o powierzchni powyżej 1 ha. W powiecie poznańskim największe z nich to zespół jezior Rynny Kórnicko-Zaniemyskiej (m.in. Jezioro Kórnickie, Bnińskie, Skrzyńki Małe), a także jeziora: Strykowskie, Niepruszewskie, Dymaczewskie, Lusowskie czy Witobelskie. Na terenie miasta Poznania do największych zalicza się Jeziora: Kierskie, Rusałka oraz Strzeszyńskie, a także sztuczny zbiornik wodny –

Jeziro Maltańskie. W południowej części miasta wyróżnia się także zespół tzw. Stawów Junikowskich, nazywanych także gliniankami lub szachtami (Gołdyn i in. 2019). Na obszarze zlewni Różanego Strumienia znajduje się Jezioro Umultowskie, stawy przy Kampusie UAM Morasko oraz stawy hodowlane na Różanym Młynie.

Aglomeracja poznańska charakteryzuje się dużą zasobnością w wody podziemne, szczególnie we wschodniej i południowej części (ryc. 3.11). Na jej obszarze znajdują się trzy Główne Zbiorniki Wód Podziemnych (GZWP): Subzbiornik Inowrocław-Gniezno (GZWP 143), Dolina Kopalna Wielkopolska (GZWP 144) oraz Pradolina Warszawa-Berlin (GZWP 150).



Ryc. 3.11. Położenie obszaru badań na tle Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP)
(Centralna Baza Danych Geologicznych, PIG-PIB)



Ryc. 3.12. Mapa hydrograficzna obszaru badań według Bazy Danych Obiektów Topograficznych 1:10 000 BDOT10k (geoportal.gov.pl; zgeneralizowane).
A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia

4. Analiza opadów

4.1. Metody klasyfikacji opadów

Analizę opadów wykonano na podstawie danych IMGW-PIB. Dla wielolecia 1961-2020 obliczono podstawowe statystyki, takie jak wartości średnie oraz kwantylowe, zarówno dla poszczególnych lat, jak i półrocza ciepłego (kwiecień-wrzesień) i zimnego (październik-marzec) oraz pór roku. Ocenę wielkości opadów w poszczególnych latach przeprowadzono korzystając z klasyfikacji zaproponowanej przez Kaczorowską (1962). Klasyfikacja ta przyporządkowuje roczne sumy opadów do 7 klas (tab. 4.1), w zależności od procentu, jaki dana roczna suma opadów stanowi w stosunku do średniej rocznej sumy opadów dla całego wielolecia.

Tab. 4.1. Klasyfikacja opadów według Kaczorowskiej (1962)

Klasa roku	Norma roczna opadu
skrajnie suchy	< 50%
bardzo suchy	50 ÷ 74%
suchy	75 ÷ 89%
normalny	90 ÷ 110%
wilgotny	111 ÷ 125%
bardzo wilgotny	126 ÷ 150%
skrajnie wilgotny	> 150%

Dobowe sumy opadów sklasyfikowano według propozycji Olechnowicz-Bobrowskiej (1970), wydzielając dni bez opadów oraz dni z 6 różnymi sumami opadów (tab. 4.2). Klasyfikacja Olechnowicz-Bobrowskiej kończy się na dobowej sumy opadów wynoszącej 30 mm. Wszystkie opady o sumie przekraczającej 30 mm zostały określone jako opady bardzo silne. Ze względu na szczególne skupienie niniejszej rozprawy na silnych, ulewnych i nawalnych opadach, rozszerzono kryterium Olechnowicz-Bobrowskiej o szczegółową klasyfikację opadów o sumie powyżej 30 mm (tab. 4.3). Celem rozszerzenia klasyfikacji było rozpoznanie częstotliwości występowania opadów określonych przez Olechnowicz-Bobrowską jako bardzo silne. Opady powyżej 30 mm podzielono na 6 klas opadów bardzo silnych, numerowanych liczbami rzymskimi. Każda z wyróżnionych klas obejmowała opady w zakresie 10 mm, np. 30,1 ÷ 40,0 mm lub 50,1 ÷ 60,0 mm.

Tab. 4.2. Klasyfikacja opadów według Olechnowicz-Bobrowskiej (1970)

Klasa	Dobowa suma opadów [mm]
bez opadu	0,0
opad bardzo słaby	0,1 ÷ 1,0
opad słaby	1,1 ÷ 5,0
opad umiarkowany	5,1 ÷ 10,0
opad umiarkowanie średni	10,1 ÷ 20,0
opad silny	20,1 ÷ 30,0
opad bardzo silny	> 30,0

Tab. 4.3. Rozszerzenie klasyfikacji Olechnowicz-Bobrowskiej (1970) dla opadów bardzo silnych

Klasa opadu bardzo silnego	Dobowa suma opadów [mm]
I	30,1 ÷ 40,0
II	40,1 ÷ 50,0
III	50,1 ÷ 60,0
IV	60,1 ÷ 70,0
V	70, 1 ÷ 80,0
VI	> 80,1

W celu wyznaczenia zdarzeń ekstremalnych i ekstremalnych wyjątkowych wykorzystano kryterium Niedźwiedzia i in. (2006), które uwzględnia wartości percentyli prawdopodobieństwa. Zdarzenie ekstremalne to takie, którego prawdopodobieństwo wystąpienia przekracza 90 percentyl, a ekstremalne wyjątkowe przekracza 99 percentyl.

Klasyfikację opadów, uwzględniającą zarówno ich sumę, jak i czas trwania, zaproponował Chomicz (1951). Klasyfikacja ta jest przystosowana do warunków strefy umiarkowanej. Chomicz dokonał podziału na następujące kategorie opadów: opad zwykły, opad silny (A0), opady ulewne (A1-A4) oraz opady nawalne (B). Zakwalifikowanie opadu do odpowiedniej kategorii dokonuje się na podstawie wartości współczynnika α , obliczanego jako (4.1):

$$\alpha = \frac{P}{t^2} \quad (4.1.)$$

gdzie: α – współczynnik Chomicza [–],

P – suma opadu atmosferycznego [mm],

t – czas trwania opadu atmosferycznego [min].

		Suma opadu P [mm]																												
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	
Czas trwania opadu t [min]	30	0,91	1,83	2,74	3,65	4,56	5,48	6,39	7,30	8,22	9,13	10,04	10,95	11,87	12,78	13,69	14,61	15,52	16,43	17,34	18,26	19,17	20,08	21,00	21,91	22,82	23,73	24,65	25,56	B5
	35	0,85	1,69	2,54	3,38	4,23	5,07	5,92	6,76	7,61	8,45	9,30	10,14	10,99	11,83	12,68	13,52	14,37	15,21	16,06	16,90	17,75	18,59	19,44	20,28	21,13	21,97	22,82	23,66	
	40	0,79	1,58	2,37	3,16	3,95	4,74	5,53	6,32	7,12	7,91	8,70	9,49	10,28	11,07	11,86	12,65	13,44	14,23	15,02	15,81	16,60	17,39	18,18	18,97	19,76	20,55	21,35	22,14	B4
	45	0,75	1,49	2,24	2,98	3,73	4,47	5,22	5,96	6,71	7,45	8,20	8,94	9,69	10,43	11,18	11,93	12,67	13,42	14,16	14,91	15,65	16,40	17,14	17,89	18,63	19,38	20,12	20,87	
	50	0,71	1,41	2,12	2,83	3,54	4,24	4,95	5,66	6,36	7,07	7,78	8,49	9,19	9,90	10,61	11,31	12,02	12,73	13,44	14,14	14,85	15,56	16,26	16,97	17,68	18,38	19,09	19,80	
	55	0,67	1,35	2,02	2,70	3,37	4,05	4,72	5,39	6,07	6,74	7,42	8,09	8,76	9,44	10,11	10,79	11,46	12,14	12,81	13,48	14,16	14,83	15,51	16,18	16,85	17,53	18,20	18,88	
	60	0,65	1,29	1,94	2,58	3,23	3,87	4,52	5,16	5,81	6,45	7,10	7,75	8,39	9,04	9,68	10,33	10,97	11,62	12,26	12,91	13,56	14,20	14,85	15,49	16,14	16,78	17,43	18,07	B3
	70	0,60	1,20	1,79	2,39	2,99	3,59	4,18	4,78	5,38	5,98	6,57	7,17	7,77	8,37	8,96	9,56	10,16	10,76	11,35	11,95	12,55	13,15	13,75	14,34	14,94	15,54	16,14	16,73	
	80	0,56	1,12	1,68	2,24	2,80	3,35	3,91	4,47	5,03	5,59	6,15	6,71	7,27	7,83	8,39	8,94	9,50	10,06	10,62	11,18	11,74	12,30	12,86	13,42	13,98	14,53	15,09	15,65	B2
	90	0,53	1,05	1,58	2,11	2,64	3,16	3,69	4,22	4,74	5,27	5,80	6,32	6,85	7,38	7,91	8,43	8,96	9,49	10,01	10,54	11,07	11,60	12,12	12,65	13,18	13,70	14,23	14,76	
	120	0,46	0,91	1,37	1,83	2,28	2,74	3,20	3,65	4,11	4,56	5,02	5,48	5,93	6,39	6,85	7,30	7,76	8,22	8,67	9,13	9,59	10,04	10,50	10,95	11,41	11,87	12,32	12,78	
	180	0,37	0,75	1,12	1,49	1,86	2,24	2,61	2,98	3,35	3,73	4,10	4,47	4,84	5,22	5,59	5,96	6,34	6,71	7,08	7,45	7,83	8,20	8,57	8,94	9,32	9,69	10,06	10,43	
	240	0,32	0,65	0,97	1,29	1,61	1,94	2,26	2,58	2,90	3,23	3,55	3,87	4,20	4,52	4,84	5,16	5,49	5,81	6,13	6,45	6,78	7,10	7,42	7,75	8,07	8,39	8,71	9,04	B1
	270	0,30	0,61	0,91	1,22	1,52	1,83	2,13	2,43	2,74	3,04	3,35	3,65	3,96	4,26	4,56	4,87	5,17	5,48	5,78	6,09	6,39	6,69	7,00	7,30	7,61	7,91	8,22	8,52	
	300	0,29	0,58	0,87	1,15	1,44	1,73	2,02	2,31	2,60	2,89	3,18	3,46	3,75	4,04	4,33	4,62	4,91	5,20	5,48	5,77	6,06	6,35	6,64	6,93	7,22	7,51	7,79	8,08	B1
	330	0,28	0,55	0,83	1,10	1,38	1,65	1,93	2,20	2,48	2,75	3,03	3,30	3,58	3,85	4,13	4,40	4,68	4,95	5,23	5,50	5,78	6,06	6,33	6,61	6,88	7,16	7,43	7,71	
	360	0,26	0,53	0,79	1,05	1,32	1,58	1,84	2,11	2,37	2,64	2,90	3,16	3,43	3,69	3,95	4,22	4,48	4,74	5,01	5,27	5,53	5,80	6,06	6,32	6,59	6,85	7,12	7,38	
	420	0,24	0,49	0,73	0,98	1,22	1,46	1,71	1,95	2,20	2,44	2,68	2,93	3,17	3,42	3,66	3,90	4,15	4,39	4,64	4,88	5,12	5,37	5,61	5,86	6,10	6,34	6,59	6,83	
	480	0,23	0,46	0,68	0,91	1,14	1,37	1,60	1,83	2,05	2,28	2,51	2,74	2,97	3,20	3,42	3,65	3,88	4,11	4,34	4,56	4,79	5,02	5,25	5,48	5,71	5,93	6,16	6,39	B1
	540	0,22	0,43	0,65	0,86	1,08	1,29	1,51	1,72	1,94	2,15	2,37	2,58	2,80	3,01	3,23	3,44	3,66	3,87	4,09	4,30	4,52	4,73	4,95	5,16	5,38	5,59	5,81	6,02	
600	0,20	0,41	0,61	0,82	1,02	1,22	1,43	1,63	1,84	2,04	2,25	2,45	2,65	2,86	3,06	3,27	3,47	3,67	3,88	4,08	4,29	4,49	4,69	4,90	5,10	5,31	5,51	5,72		
		zwykły				A0		A1			A2				A3					A4					B1					

Zakres wartości współczynnika α	0,00	1,01	1,41	2,01	2,83	4,01	5,66	8,01	11,31	16,01	22,62
	1,00	1,40	2,00	2,82	4,00	5,65	8,00	11,30	16,00	22,61	32,00
Kategoria opadu		A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5
		zwykły	silny	ulewny				nawalny			

Ryc. 4.1. Klasyfikacja opadowa Chomicza (1951), obramowaniem w kolorze żółtym i pogrubieniem oznaczone opady wybrane do eksperymentu terenowego

Wizualna reprezentacja klasyfikacji Chomicza została przedstawiona na rycinie 4.1. Obramowaniem w kolorze żółtym zaznaczono kategorie opadów wybrane do eksperymentu terenowego, opisanego w rozdziale 5 niniejszej rozprawy.

4.2. Opady dobowe w Poznaniu

W wieloleciu 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica zaobserwowano 9577 dni z opadem. Stanowiło to 43,7% wszystkich dni w tym wieloleciu. Maksymalna dobową sumą opadów w badanym okresie wyniosła 85,7 mm (ryc. 4.2, 4.3). Dla dni z opadem o sumie co najmniej 0,1 mm w latach 1961-2020 średnia suma opadu to 3,3 mm, I kwartyl – 0,4 mm, mediana – 1,5 mm, a III kwartyl – 4,2 mm. Rozkład dobowych sum opadów cechował się neutralnym trendem.

Podobnie jak w przypadku sum dobowych, rozkład rocznych sum opadów atmosferycznych w Poznaniu w latach 1961-2020 także cechował się neutralnym trendem (ryc. 4.4). Średnia roczna suma opadów w analizowanym okresie wyniosła 526,7 mm. Roczne sumy opadów zmieniały się od 275 mm (1982) do 772,1 mm (1967). Mediana dla wielolecia to 528,8 mm, I kwartyl – 462,1 mm, a III kwartyl – 599,1 mm. Średnia roczna suma opadów obliczona dla Poznania była wyraźnie niższa niż średnia roczna suma opadów dla Polski w latach 1951-1995 – 638,6 mm (Kirschenstein, Baranowski 2005), a także niewiele niższe od średniej dla Polski północno-zachodniej w latach 1951-2000 wynoszącej 555,0 mm (Farat 2010).

Zgodnie z klasyfikacją opadów według Kaczorowskiej (1962) w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica stwierdzono: 8 lat bardzo suchych, 8 lat suchych, 21 lat normalnych, 15 lat wilgotnych oraz 7 lat bardzo wilgotnych (tab. 4.4). W badanym okresie nie wystąpiły lata skrajnie suche i skrajnie wilgotne. Procent rocznej sumy opadów w stosunku do sumy dla wielolecia w poszczególnych latach wahał się od 52% (1982) do 147% (1967). W ostatniej dekadzie badanego okresu (2011-2020) wyraźnie wzrosła zmienność rocznej sumy opadów z roku na rok – w Poznaniu wystąpiły zarówno lata bardzo suche i suche, jak i normalne, wilgotne oraz bardzo wilgotne.

Analizując sumy opadów w półroczu ciepłym (od kwietnia do września) oraz chłodnym (od listopada do marca), zaobserwowano, że wyższymi sumami opadów charakteryzowało się półrocze ciepłe – 319,9 mm w stosunku do 206,8 mm opadów w półroczu chłodnym (ryc. 4.4, tab. 4.5, 4.6). Najmniejszym stosunkiem sumy opadów w miesiącach ciepłych do miesięcy zimnych cechował się rok 1992 (61%), a najwyższym – 1996 (488%). Średnio suma opadów

cieplej połowy roku wyniosła 171% sumy opadów chłodnej połowy roku. W badanym wieloleciu pięciokrotnie opady chłodnej połowy roku przewyższyły opady ciepłej połowy roku (1970, 1983, 1992, 2002, 2019), a 13 razy suma opadów w ciepłej połowie roku wyniosła ponad 200% sumy opadów w chłodnej połowie roku (1961, 1963, 1965, 1972, 1977, 1980, 1984, 1985, 1996, 1997, 2006, 2011, 2014).

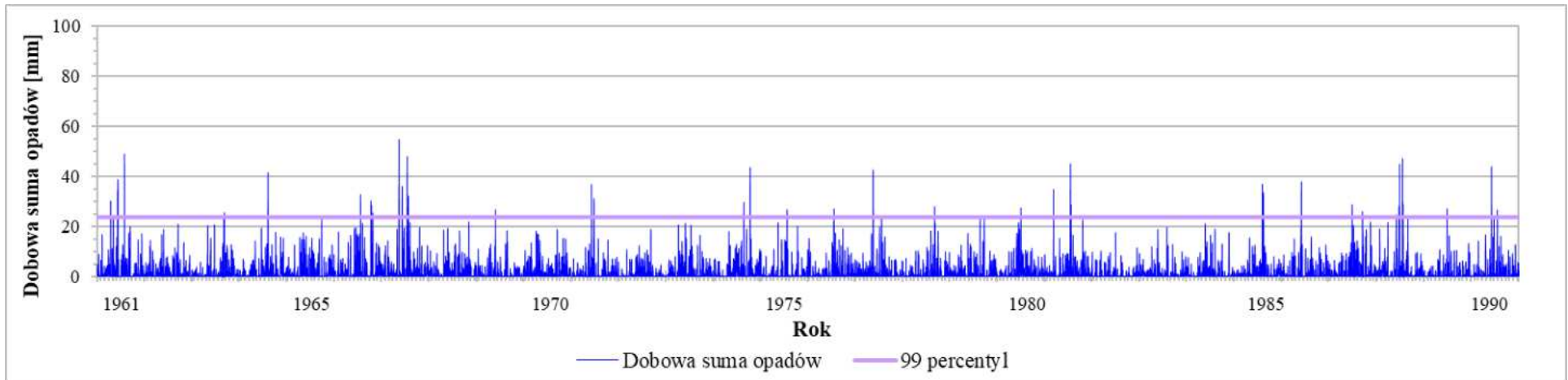
Najwięcej opadów obserwowano w czasie lata, a najmniej podczas wiosny. W okresie wiosennym (od kwietnia do czerwca) średnia suma opadów wynosiła 93,3 mm ($37,8 \div 176,9$ mm). Średnia suma opadów dla lata (od lipca do września) to 175,5 mm ($60,9 \div 332,2$ mm), dla jesieni (od października do grudnia) – 112,3 mm ($33,2 \div 237,2$ mm), a dla zimy (od stycznia do marca) – 94,6 mm ($37,2 \div 166,9$ mm).

Spośród średnich miesięcznych sum opadów atmosferycznych dla badanego wielolecia (1961-2020), najwyższą wartością średnią cechował się lipiec (76,8 mm), a najniższą luty (27,4 mm). Najwyższa suma miesięczna wystąpiła w lipcu 1996 roku (200,2 mm), a najniższa – w listopadzie 2011 (0,8 mm).

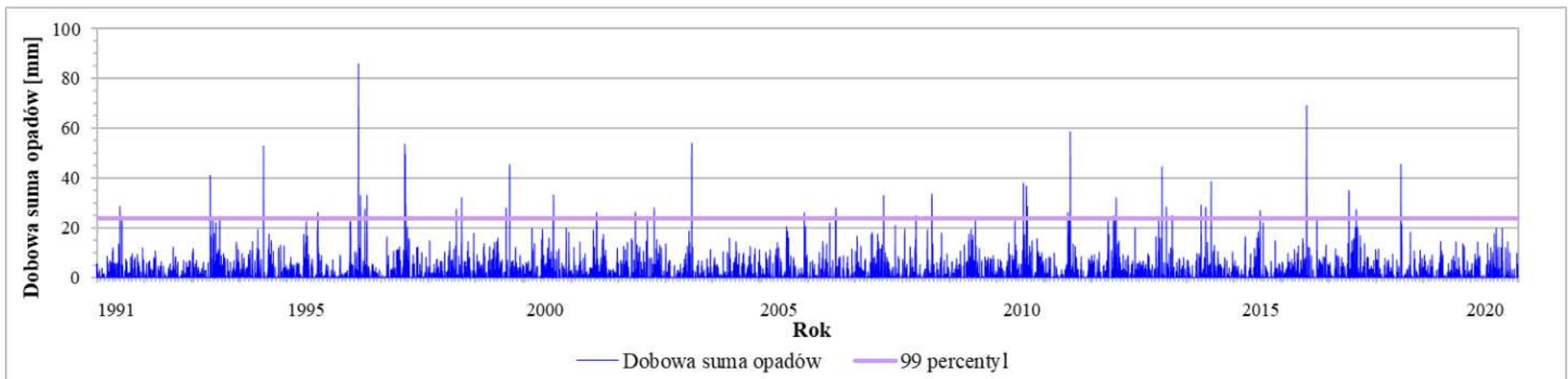
Tab. 4.4. Klasyfikacja opadowa według Kaczorowskiej (1962) w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica

1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
143	91	89	106	106	137	147	101	69	106
1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
82	61	100	120	71	98	112	91	92	102
1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
120	52	67	77	95	96	116	121	64	100
1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
79	67	132	112	94	105	121	115	113	116
2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
105	112	77	91	96	84	111	94	111	136
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
90	126	113	106	83	115	127	71	75	93

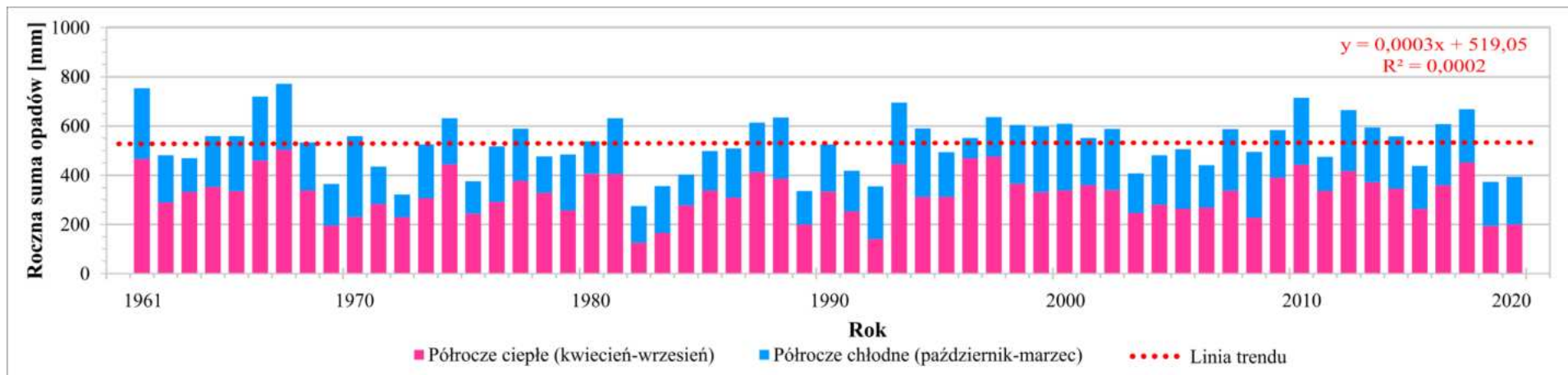
	<50%	skrajnie suchy
	50-74%	bardzo suchy
	75-89%	suchy
	90-110%	normalny
	111-125%	wilgotny
	126-150%	bardzo wilgotny
	>150%	skrajnie wilgotny



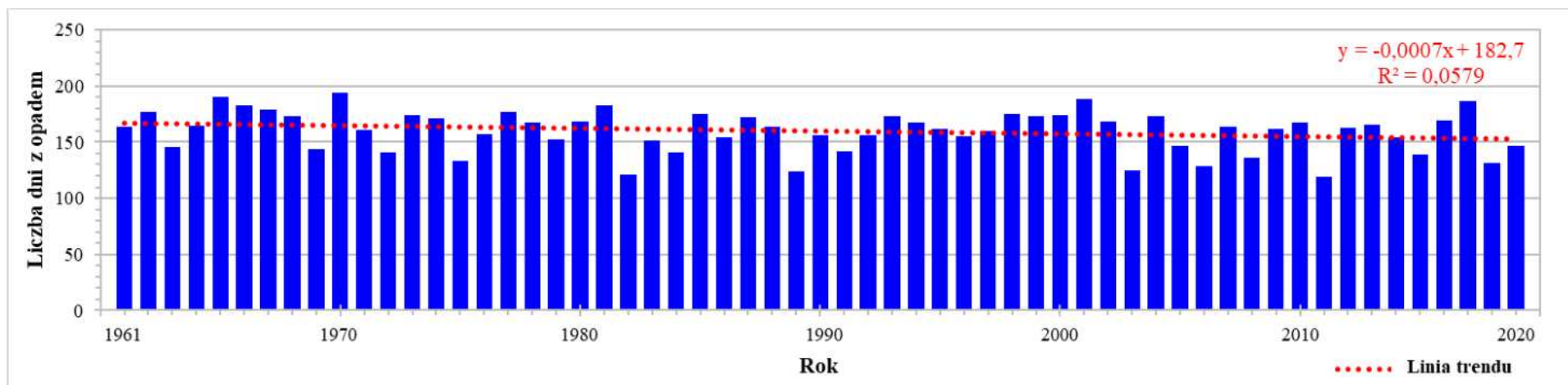
Ryc. 4.2. Dobowe sumy opadów atmosferycznych w latach 1961-1990 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica



Ryc. 4.3. Dobowe sumy opadów atmosferycznych w latach 1991-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica



Ryc. 4.4. Roczne sumy opadów z podziałem na półrocze ciepłe i chłodne w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica



Ryc. 4.5. Liczba dni z opadem w latach 1961-2020 w Poznaniu na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica

Tab. 4.5. Miesięczne sumy opadów w poszczególnych okresach i latach wielolecia 1961-1990 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica

W – wiosna (kwiecień-czerwiec), L – lato (lipiec-wrzesień), J – jesień (październik-grudzień), Z – zima (styczeń-marzec),

CIE – półrocze ciepłe (kwiecień-wrzesień), ZIM – półrocze chłodne (październik-marzec), % – stosunek opadów w półroczu ciepłym do opadów półrocza chłodnego

	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
sty	31,0	23,3	12,2	9,2	31,4	26,0	47,3	39,2	44,2	34,6	17,9	11,0	19,0	32,3	34,6	88,4	35,5	25,0	20,0	12,1	35,8	32,6	52,3	29,9	15,0	34,8	22,5	46,7	7,6	16,1
lut	42,3	46,3	14,4	26,4	14,4	61,0	63,7	20,9	13,7	43,8	21,1	4,9	37,4	26,0	9,2	15,3	24,0	4,4	18,6	12,0	14,0	9,2	24,6	13,4	10,4	8,3	26,0	49,4	16,4	31,0
mar	43,6	26,6	13,1	13,1	33,8	34,1	36,9	25,3	21,4	43,5	16,7	28,5	21,2	4,3	12,3	17,4	41,6	27,3	50,0	20,8	75,2	24,8	18,5	9,9	23,8	29,4	18,3	50,8	13,2	17,4
kwi	85,0	29,5	10,3	43,7	57,6	33,2	22,0	22,8	47,3	89,6	26,7	23,4	70,0	19,3	30,8	8,8	48,1	18,0	33,8	38,9	25,3	31,1	36,5	25,7	28,8	41,1	32,4	25,7	30,9	47,1
maj	105,0	83,3	85,9	35,9	117,6	41,1	88,1	68,4	58,2	52,6	53,1	48,7	56,2	47,6	30,7	29,7	117,0	30,7	28,9	32,8	37,3	35,1	46,3	65,4	46,7	51,0	23,2	22,6	18,2	24,8
cze	101,5	34,2	32,7	55,8	44,8	96,8	119,5	43,7	23,6	7,1	127,6	48,2	75,2	74,8	44,1	13,8	34,8	24,7	41,8	135,7	47,2	21,7	14,5	68,9	55,4	91,5	78,3	122,7	25,8	99,3
lip	132,5	25,4	6,8	26,9	80,1	123,9	123,2	70,4	16,0	39,4	27,1	46,9	75,6	89,2	81,4	109,2	100,8	38,4	48,3	104,8	163,7	31,9	10,8	58,3	31,1	39,9	104,5	152,8	61,2	53,5
sie	49,6	59,5	78,2	114,9	27,2	59,7	63,0	70,6	77,5	14,1	19,7	31,4	13,3	74,9	22,7	65,3	86,5	81,4	46,0	53,9	57,0	24,2	44,3	26,9	165,9	63,3	69,5	38,8	47,6	60,3
wrz	52,0	65,8	100,8	54,2	54,0	17,1	53,6	33,1	5,9	57,7	31,7	45,0	40,5	25,9	10,5	51,4	22,2	97,7	85,5	42,8	20,9	4,8	22,2	34,4	30,3	24,3	91,8	42,7	21,4	60,0
paź	25,4	21,7	28,4	64,6	11,8	121,0	55,6	53,1	14,3	60,1	24,5	9,4	45,6	132,5	54,5	22,0	16,4	56,8	6,6	36,2	78,5	8,1	27,4	24,2	9,1	39,2	45,1	6,4	25,2	35,8
lis	36,6	33,6	73,4	81,3	33,5	39,0	35,3	65,2	34,7	77,5	33,3	20,1	36,1	24,8	22,5	53,7	38,9	22,3	54,4	21,3	43,4	16,5	25,9	34,1	20,8	23,9	74,2	34,0	24,8	40,0
gru	49,1	31,4	13,0	32,9	52,3	66,2	63,9	20,3	7,8	39,1	35,1	3,7	34,5	79,9	21,9	42,0	23,1	50,3	50,6	26,2	33,5	35,0	32,2	12,1	60,5	61,6	27,4	42,2	42,9	39,1
rok	753,6	480,6	469,2	558,9	558,5	719,1	772,1	533,0	364,6	559,1	434,5	321,2	524,6	631,5	375,2	517,0	588,9	477,0	484,5	537,5	631,8	275,0	355,5	403,2	497,8	508,3	613,2	634,8	335,2	524,4
W	170,9	102,4	37,8	83,2	105,8	128,3	122,6	69,0	82,4	176,9	64,5	56,8	128,6	49,6	52,3	41,5	113,7	49,7	102,4	71,7	114,5	65,1	79,6	49,0	63,0	78,8	76,7	125,9	60,5	95,5
L	234,1	150,7	185,8	196,0	161,3	200,7	239,8	174,1	99,4	111,2	78,5	123,3	129,4	190,0	114,6	225,9	209,5	217,5	179,8	201,5	241,6	60,9	77,3	119,6	227,3	127,5	265,8	234,3	130,2	173,8
J	111,1	86,7	114,8	178,8	97,6	226,2	154,8	138,6	56,8	176,7	92,9	33,2	116,2	237,2	98,9	117,7	78,4	129,4	111,6	83,7	155,4	59,6	85,5	70,4	90,4	124,7	146,7	82,6	92,9	114,9
Z	116,9	96,2	39,7	48,7	79,6	121,1	147,9	85,4	79,3	121,9	55,7	44,4	77,6	62,6	56,1	121,1	101,1	56,7	88,6	44,9	125,0	66,6	95,4	53,2	49,2	72,5	66,8	146,9	37,2	64,5
CIE	525,6	297,7	314,7	331,4	381,3	371,8	469,4	309,0	228,5	260,5	285,9	243,6	330,8	331,7	220,2	278,2	409,4	290,9	284,3	408,9	351,4	148,8	174,6	279,6	358,2	311,1	399,7	405,3	205,1	345,0
ZIM	228,0	182,9	154,5	227,5	177,2	347,3	302,7	224,0	136,1	298,6	148,6	77,6	193,8	299,8	155,0	238,8	179,5	186,1	200,2	128,6	280,4	126,2	180,9	123,6	139,6	197,2	213,5	229,5	130,1	179,4
%	231	163	204	146	215	107	155	138	168	87	192	314	171	111	142	116	228	156	142	318	125	118	97	226	257	158	187	177	158	192

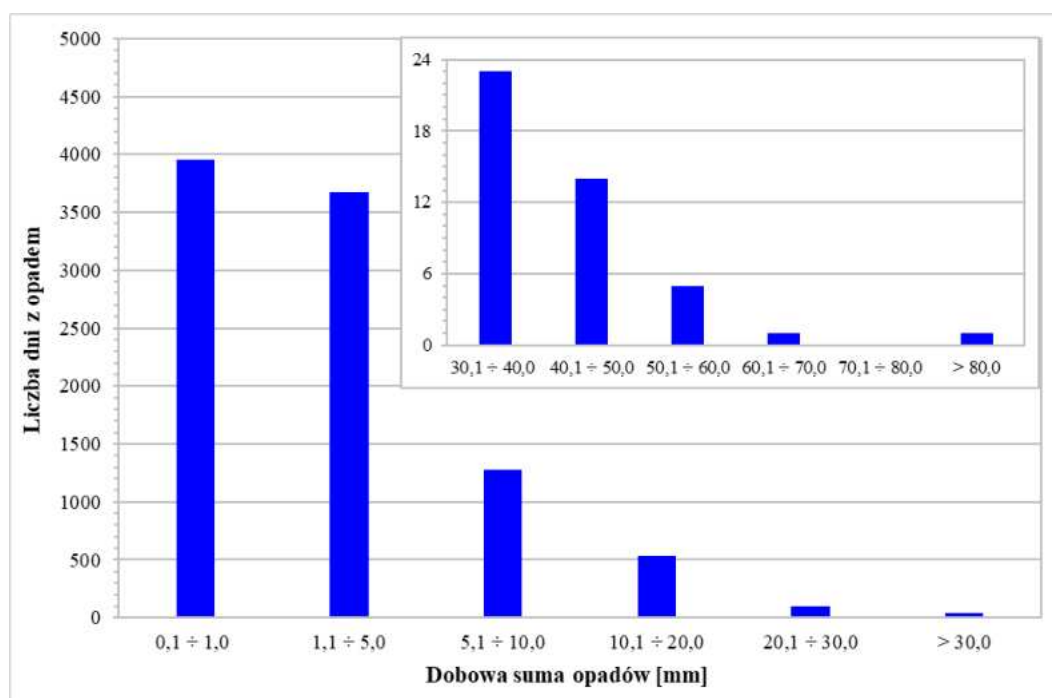
Tab. 4.6. Miesięczne sumy opadów w poszczególnych okresach i latach wielolecia 1991-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica

W – wiosna (kwiecień-czerwiec), L – lato (lipiec-wrzesień), J – jesień (październik-grudzień), Z – zima (styczeń-marzec),

CIE – półrocze ciepłe (kwiecień-wrzesień), ZIM – półrocze chłodne (październik-marzec), % – stosunek opadów w półroczu ciepłym do opadów półrocza chłodnego

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	średnia
sty	17,8	17,1	56,9	45,1	33,0	5,1	2,7	40,4	42,5	32,6	21,5	36,3	55,2	51,3	25,1	8,0	75,9	69,3	20,8	27,6	24,2	76,3	58,6	44,0	37,8	39,1	22,0	48,7	58,7	37,4	33,6
lut	11,2	30,4	31,3	18,3	45,1	27,3	49,8	27,9	29,7	40,8	20,6	62,9	8,6	28,2	49,5	24,7	40,2	22,5	30,4	17,6	32,1	46,6	40,1	6,2	9,1	40,9	33,7	4,4	15,9	76,3	27,4
mar	22,6	80,3	25,5	79,8	44,3	9,3	19,5	44,7	59,1	84,8	47,7	51,3	13,9	21,6	30,5	27,9	50,8	44,9	54,0	41,5	21,6	14,4	40,3	41,2	45,1	45,3	37,5	29,4	39,8	29,0	33,5
kwi	43,6	18,3	7,9	47,4	14,6	15,8	42,0	32,2	56,7	17,0	34,1	37,2	20,6	18,3	19,1	50,9	10,6	81,5	20,1	27,1	6,4	19,2	16,5	64,7	17,0	47,8	33,9	28,1	7,2	2,6	32,4
maj	43,7	27,6	83,9	59,3	65,4	79,5	65,5	27,2	57,0	57,4	11,9	70,6	17,2	49,9	65,2	49,2	78,2	9,7	86,2	110,5	10,1	69,7	85,3	87,7	22,9	41,3	32,9	16,6	83,5	47,5	53,2
cze	80,4	3,4	103,9	34,2	88,1	30,0	85,6	63,0	81,2	41,3	67,9	46,1	36,6	55,1	18,6	40,3	65,8	10,5	110,3	16,8	54,9	108,0	120,2	38,2	86,0	74,3	87,0	22,8	3,4	51,3	58,8
lip	36,5	24,7	113,4	77,1	27,2	200,2	193,2	57,6	40,7	80,7	105,4	28,1	132,5	49,3	76,7	13,4	86,7	54,4	85,7	80,7	180,9	139,5	44,9	89,8	88,8	128,3	127,1	81,3	22,8	65,3	76,8
sie	29,3	45,6	64,2	64,6	59,0	61,3	39,8	59,9	45,1	99,6	35,2	75,6	7,0	57,0	54,0	119,2	58,7	74,9	23,8	153,4	44,7	48,7	37,7	56,8	25,5	36,3	97,0	9,8	32,4	60,9	56,4
wrz	33,9	15,4	61,9	57,2	59,6	70,7	32,9	73,9	61,0	35,6	112,7	20,3	18,7	23,3	42,9	20,4	30,4	20,6	31,8	73,8	22,1	22,2	68,9	43,5	21,8	3,4	40,1	40,7	40,1	37,4	42,3
paź	29,7	24,7	18,7	19,4	12,3	27,7	59,1	84,0	45,9	23,9	27,2	99,6	34,8	45,7	6,1	25,9	17,9	58,0	52,4	7,5	23,7	28,6	15,4	29,1	17,4	75,0	67,9	23,4	19,2	41,0	37,0
lis	32,8	36,0	31,2	32,1	24,6	17,6	13,6	52,8	32,6	46,4	19,0	50,8	24,5	46,3	13,1	29,8	44,3	22,2	34,8	100,3	0,8	57,3	40,2	13,9	44,6	37,8	42,1	7,8	46,2	11,8	36,4
gru	36,9	31,8	96,3	55,0	20,3	6,7	31,8	40,5	45,9	49,4	48,2	9,4	38,1	35,4	104,7	30,6	26,8	25,9	33,2	58,5	53,1	33,9	26,4	43,1	21,7	38,5	46,5	59,5	23,6	31,5	38,9
rok	418,4	355,3	695,1	589,5	493,5	551,2	635,5	604,1	597,4	609,5	551,4	588,2	407,7	481,4	505,5	440,3	586,3	494,4	583,5	715,3	474,6	664,4	594,5	558,2	437,7	608,0	667,7	372,5	392,8	492,0	526,8
W	77,4	129,0	64,7	145,5	104,0	52,4	111,3	104,8	145,5	142,6	102,4	151,4	43,1	68,1	99,1	103,5	101,6	148,9	104,5	86,2	60,1	80,2	96,9	112,1	71,2	134,0	105,1	61,9	62,9	107,9	93,3
L	99,7	85,7	239,5	198,9	145,8	332,2	265,9	191,4	146,8	215,9	253,3	124,0	158,2	129,6	173,6	153,0	175,8	149,9	141,3	307,9	247,7	210,4	151,5	190,1	136,1	168,0	264,2	131,8	95,3	163,6	175,5
J	99,4	92,5	146,2	106,5	57,2	52,0	104,5	177,3	124,4	119,7	94,4	159,8	97,4	127,4	123,9	86,3	89,0	106,1	120,4	166,3	77,6	119,8	82,0	86,1	83,7	151,3	156,5	90,7	89,0	84,3	112,3
Z	51,6	127,8	113,7	143,2	122,4	41,7	72,0	113,0	131,3	158,2	89,8	150,5	77,7	101,1	105,1	60,6	166,9	136,7	105,2	86,7	77,9	137,3	139,0	91,4	92,0	125,3	93,2	82,5	114,4	142,7	94,6
CIE	267,4	135,0	435,2	339,8	313,9	457,5	459,0	313,8	341,7	331,6	367,2	277,9	232,6	252,9	276,5	293,4	330,4	251,6	357,9	462,3	319,1	407,3	373,5	380,7	262,0	331,4	418,0	199,3	189,4	265,0	319,9
ZIM	151,0	220,3	259,9	249,7	179,6	93,7	176,5	290,3	255,7	277,9	184,2	310,3	175,1	228,5	229,0	146,9	255,9	242,8	225,6	253,0	155,5	257,1	221,0	177,5	175,7	276,6	249,7	173,2	203,4	227,0	206,8
%	177	61	167	136	175	488	260	108	134	119	199	90	133	111	121	200	129	104	159	183	205	158	169	214	149	120	167	115	93	117	166,0

W latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica obserwowano średnio 160 dni z opadem (wynoszącym więcej niż 0,1 mm) w ciągu roku. Liczba tych dni wahała się od 119 do 194 dni i cechowała się ona niewielkim trendem malejącym (ryc. 4.5). Średnia dobową sumą opadów w latach 1961-2020 wyniosła 3,3 mm ($2,3 \div 4,5$ mm). Spośród wartości maksymalnych dobowych sum opadów dla poszczególnych lat najwyższą charakteryzował się rok 1996 (85,7 mm), a najniższą – 1992 (12,3 mm). Średnio w wieloleciu maksymalny opad dobowy w roku wyniósł 33,7 mm, a jego mediana to 30,5 mm. Najniższą obserwowaną dobową sumą opadów było 0,1 mm, stanowiące granicę występowania dnia z opadem. Dobowe sumy powyżej 50 mm obserwowano siedmiokrotnie w latach: 1967, 1994, 1996, 1997, 2003, 2011 oraz 2016.



Ryc. 4.6. Liczba dni z opadem o dobowej sumie opadu w poszczególnych zakresach (według Olechnowicz-Bobrowskiej 1970, uzupełnione) w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica

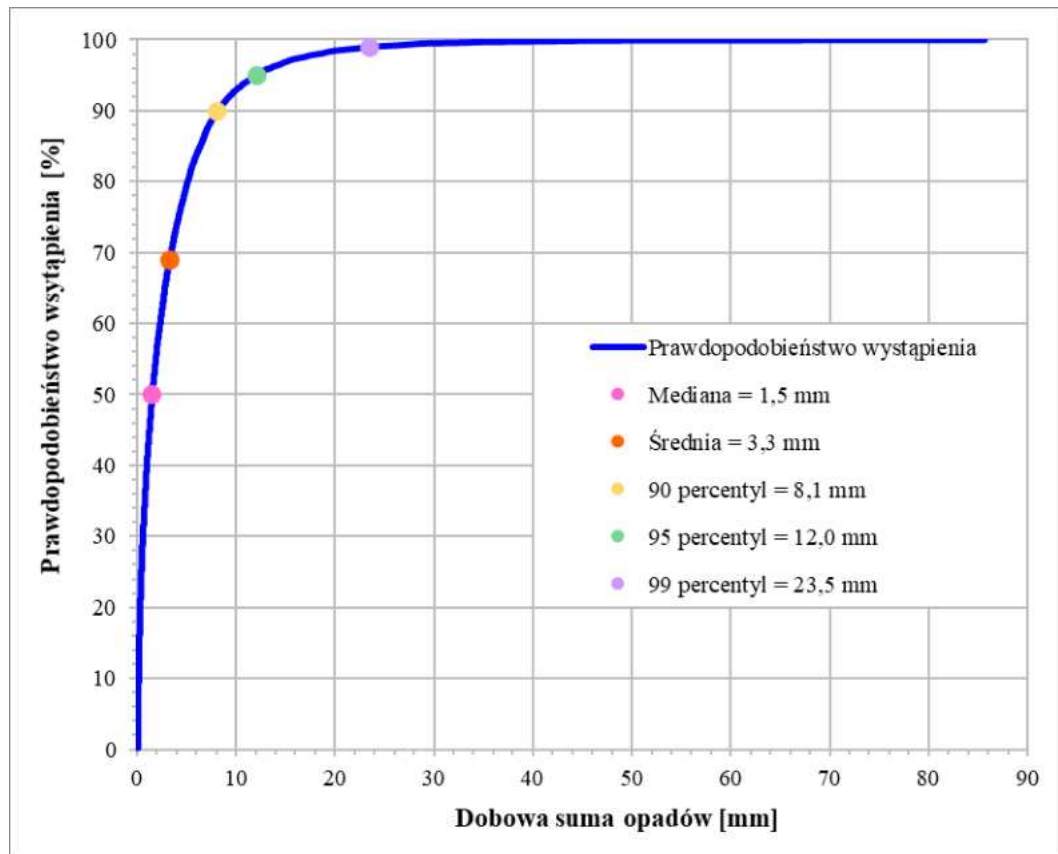
Zgodnie z klasyfikacją Olechnowicz-Bobrowskiej (1970) w Poznaniu występowała przewaga dni o opadach bardzo słabych i słabych (ryc. 4.6). Dni o opadach bardzo słabych ($0,1 \div 1,0$ mm) w latach 1961-2020 zaobserwowano 3953 (41,3%), a dni o opadach słabych ($1,1 \div 5,0$) 3676 (38,4%). Ponadto w Poznaniu wystąpiło: 1274 dni z opadem umiarkowanym ($5,1 \div 10,0$ mm; 13,3%), 529 dni z opadem umiarkowanie silnym ($10,1 \div 20,0$ mm; 5,5%) oraz 101 dni z opadem silnym ($20,1 \div 30,0$ mm; 1,1%). Spośród 44 dni z opadem bardzo silnym (powyżej 30 mm; 0,5%) 23-krotnie obserwowano opady w przedziale $30,1 \div 40,0$ mm (opad

bardzo silny klasy I), 14-krotnie w przedziale 40,1 ÷ 50,0 mm (opad bardzo silny klasy II), a 5-krotnie w przedziale 50,1 ÷ 60,0 mm (opad bardzo silny klasy III). Zaobserwowano także po jednym dniu o sumie opadów w przedziałach 60,1 ÷ 70,0 mm (opad bardzo silny klasy IV) oraz powyżej 80,0 mm (opad bardzo silny klasy VI).

Uwzględniając percentyle prawdopodobieństwa wystąpienia danego zdarzenia, zgodnie z klasyfikacją ekstremalnych zdarzeń meteorologicznych i hydrologicznych Niedźwiedzia i in. (2006) wyróżniono zdarzenia ekstremalne wyjątkowe, czyli takie, których prawdopodobieństwo wystąpienia przekracza wartość 99 percentyla dla wielolecia 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań Ławica (ryc. 4.7, tab. 4.7). Wartości percentyli obliczono dla dni z opadem o sumie co najmniej 0,1 mm. Jako granicę zdarzenia ekstremalnego wyjątkowego wyznaczono dobową sumę opadów o wysokości 23,5 mm. W badanym okresie jako zdarzenia ekstremalne wyjątkowe zakwalifikowano 99 spośród 21 915 dni.

Tab. 4.7. Wartości dobowych sum opadów oraz liczba dni z opadem równym lub mniejszym dla wybranych percentyli prawdopodobieństwa w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica

Percentyl	25,0	50,0	60,0	70,0	75,0	80,0	90,0	95,0	96,0	97,0	98,0
Suma opadu [mm]	0,4	1,5	2,4	3,5	4,2	5,1	8,1	12,0	13,5	15,3	18,3
Liczba dni z opadem większym lub równym	4950	2424	975	975	778	689	975	491	397	302	192
Percentyl	99,0	99,1	99,2	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,9	100,0
Suma opadu [mm]	23,5	24,6	25,9	27,0	28,0	28,9	32,5	35,2	41,5	47,5	85,7
Liczba dni z opadem większym lub równym	99	87	79	68	58	49	39	29	20	10	1
Zdarzenia ekstremalne wyjątkowe											



Ryc. 4.7. Prawdopodobieństwo wystąpienia dobowych sum opadów atmosferycznych w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica

W obliczu zmian klimatu nie obserwuje się istotnych trendów rosnących lub malejących w zakresie dobowych, miesięcznych lub rocznych sum opadów. Ewolucji ulega częstotliwość i intensywność opadów deszczu, a zmiany te są już obserwowane (IPCC 2021; Archer i in. 2024), a także prognozuje się ich intensyfikację w przyszłości (O’Gorman 2015; Donat i in. 2016; Prein i in. 2017; Kendon i in. 2018; Moustakis i in. 2021; IPCC 2022; Panagos i in. 2022). Wraz ze skróceniem się czasu trwania opadów atmosferycznych przy jednoczesnym wzroście ich natężenia, wzrasta zagrożenie zjawiskami ekstremalnymi w postaci silnych, ulewnych i nawałnych opadów deszczu (Fowler i in. 2021), mogących skutkować wezbraniem wody w ciekach lub powodzią. Zagrożenie powodzią, w tym błyskawicznymi, rośnie także na terenach o deficycie opadów, takich jak obszar Wielkopolski. Szczególnie narażone są tereny zurbanizowane, na których silnie ograniczona jest infiltracja wody opadowej w podłoże.

Wartość progowa wystąpienia zdarzenia ekstremalnego wyjątkowego, wynosząca 23,5 mm, nie uwzględnia tak istotnych parametrów jak intensywność i energia kinetyczna opadu. Z tego powodu także opady o sumie poniżej 23,5 mm, cechujące się dużą

intensywnością i energią kinetyczną mogą stanowić istotne zagrożenie dla infrastruktury miejskiej w zakresie powodzi błyskawicznych.

4.3. Przykłady opadów wyjątkowych ekstremalnych w zlewni Różanego Strumienia

Szczegółową analizę opadów o charakterze ekstremalnym można przeprowadzić na podstawie danych o większej rozdzielczości niż jedna doba. Jest to możliwe dla obszaru badań dzięki Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Poznań-Morasko, która od 2015 roku funkcjonuje na terenie zlewni Różanego Strumienia. Stacja Bazowa ZMŚP Poznań-Morasko zlokalizowana jest ok. 10 km na północny wschód od stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica (ryc. 3.1). Na Stacji Bazowej prowadzony jest szeroki zakres obserwacji środowiska przyrodniczego, w tym obserwacje meteorologiczne. Opad jest monitorowany w postaci sum dobowych oraz sum 10-minutowych. Ekstremalne zjawiska opadowe dla poszczególnych lat opisywane są w Raportach z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Poznań-Morasko (Major i in. 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022).

Najwyższą dobową sumę opadów w zlewni Różanego Strumienia w roku 2016 zarejestrowano 14 lipca – wyniosła ona 73,6 mm. Opad określono jako długotrwały, mogący powodować fale wezbraniowe, podtopienia i powodzie, podobny do opadów, które poskutkowały katastrofalnymi powodziami w dorzeczu Odry i Wisły w 2010 roku (Major i in. 2017). Zgodnie z klasyfikacją Chomicza (1951) opad ten zakwalifikowano jako opad ulewny A1. W roku 2017 najwyższy opad wyniósł 28,6 mm – wystąpił 1 sierpnia w postaci burzy w godzinach wieczornych i nocnych (Major i in. 2018). Został on zakwalifikowany jako opad ulewny A1. Podobny charakter, gwałtownego i przelotnego opadu burzowego miał opad z 18 lipca 2018 roku, którego suma wyniosła 23,5 mm (Major i in. 2019). Opad ten zakwalifikowany został jako opad silny A0. Rok później, 15 maja 2019 roku maksymalna dobową sumę opadów wyniosła 23,6 mm. Nad zachodnią częścią Polski zalegała wtedy szeroka strefa frontu ciepłego, skutkująca opadami deszczu i burzami (Major i in. 2020). Opad ten został zakwalifikowany jako opad ulewny A1. W 2020 roku najwyższa dobową sumę opadów została zarejestrowana 18 czerwca – 40,6 mm. Opad ten wystąpił w godzinach wieczornych i miał charakter burzowy (Major i in. 2021). Został on zakwalifikowany jako opad ulewny A2. Najwyższą spośród maksymalnych dobowych sum opadów na Stacji Bazowej ZMŚP Poznań-Morasko została zaobserwowana 22 czerwca 2021 roku – 77,6 mm. Tak silny opad

spowodował znaczne szkody w infrastrukturze miejskiej Poznania (m. in. zawalenie się dachu hali sportowej ze względu na trudności z odprowadzaniem wody opadowej), a także poskutkowało niewydolnością kanalizacji burzowej i licznymi podtopieniami na obszarze miasta (Major i in. 2022). Opad ten został zakwalifikowany jako opad nawalny A4. W roku 2022 najwyższą dobową sumę opadów zaobserwowano 20 czerwca 2022 roku (19,0 mm) na skutek długotrwałych burz (Major i in. 2023), został zakwalifikowany jako opad silny A0.

Przyjmując te same wartości progowe co w przypadku stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica (dobowa suma opadów równa 23,5 mm jako granica zdarzenia wyjątkowego ekstremalnego), większość z opisanych powyżej opadów można zaklasyfikować jako zdarzenia ekstremalne wyjątkowe. Należy jednakże zauważyć, iż opisane powyżej zdarzenia opadowe, określane przede wszystkim jako opady burzowe, cechują się gwałtownością i czasem trwania zdecydowanie krótszym niż jedna doba. Z wyjątkiem maksymalnego opadu z roku 2016, opisane zdarzenia opadowe trwały nie dłużej niż 360 minut. Przy tak wysokich sumach opadów i ich stosunkowo krótkich czasach trwania należy spodziewać się zagrożenia w postaci wysokich natężeń opadów.

W wieloletnim okresie 2015-2021 na Stacji Bazowej ZMŚP Poznań-Morasko najwyższa 10-minutowa suma opadu atmosferycznego wyniosła 14,6 mm w sierpniu 2017. Tak wysoki opad w okresie 10 minut w klasyfikacji Chomicza został zakwalifikowany jako opad ulewny A4. 10-minutowa suma opadu wynosząca 14,6 mm jest równoznaczna z godzinnym natężeniem opadu, równym 88 mm/h.

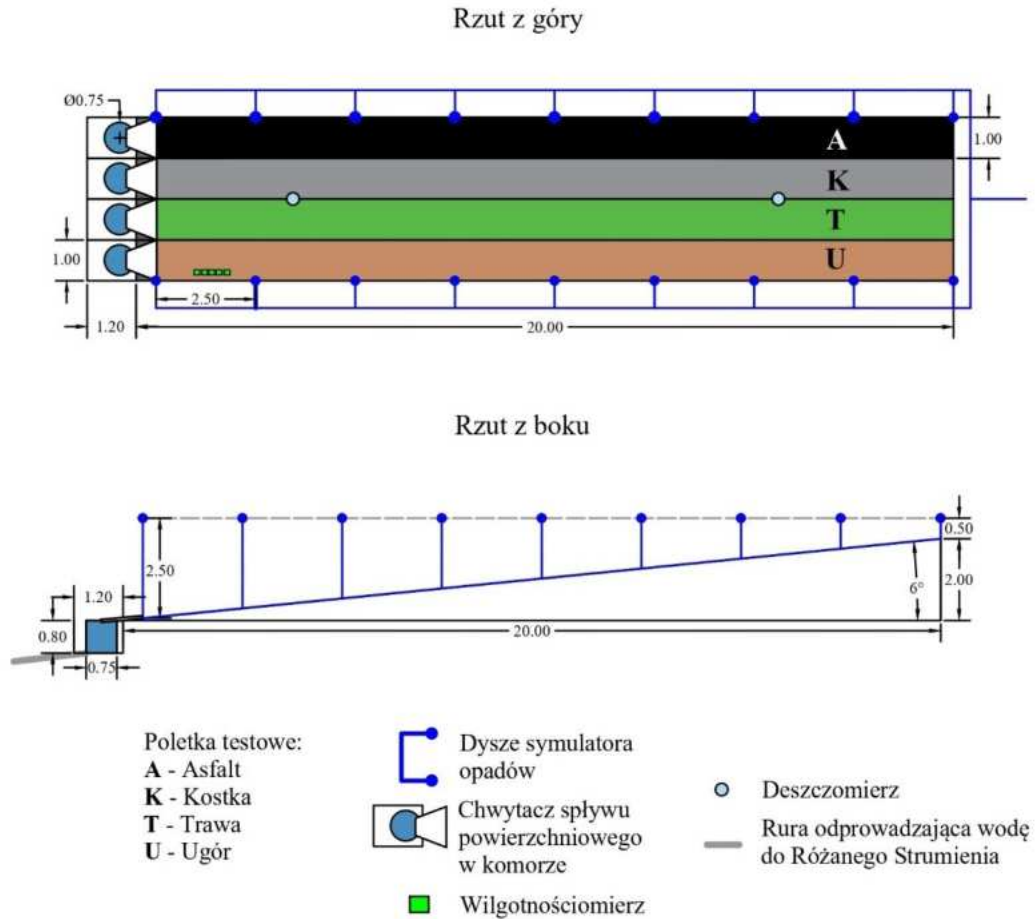
W celu przeprowadzenia badań dynamiki spływu powierzchniowego przy silnych, ulewnych i nawalnych opadach deszczu niezbędne jest wykorzystanie symulatora opadów. Częstotliwość silnych, ulewnych i nawalnych opadów deszczu jest zbyt rzadka i trudna do przewidzenia, aby możliwe było przeprowadzenie badań w warunkach naturalnych. Zgodnie z klasyfikacją Olechnowicz-Bobrowskiej (1970) opady o dobowej sumie wynoszącej ponad 30,0 mm zanotowano 44 razy w ciągu 60 lat, co daje średnio mniej niż jeden dzień rocznie. Ponadto od 2015 roku w zlewni Różanego Strumienia spośród opisanych powyżej ekstremalnych opadów, jeden cechował się sumą wynoszącą 40,6 mm, a dwa przekroczyły 70,0 mm. Należy także zauważyć, iż wszystkie opisane powyżej opady zaklasyfikowano jako opady silne (A0) lub opady ulewne (A1-A4). W warunkach naturalnych zatem nie wystąpił ani jeden opad nawalny kategorii B. Zastosowanie symulatora opadów jest zatem niezbędne, aby podczas eksperymentu terenowego możliwe było rozpoznanie dynamiki spływu powierzchniowego podczas silnych, ulewnych oraz nawalnych opadów deszczu.

5. Projekt i wykonanie stanowiska do badań spływu powierzchniowego

Badania spływu powierzchniowego spotykane w literaturze przede wszystkim skupiały się na aspekcie erozji wodnej gleb. Większość odbywała się z wykorzystaniem poletek testowych na wzór badań Wischmeiera i Smitha (1978). Badania spływu powierzchniowego były skupione przede wszystkim na terenach użytkowanych rolniczo, różniących się między sobą sposobem użytkowania rolniczego, a także długością poletek oraz kątem nachylenia stoku (Rüttimann i in. 1995; Sirvent i in. 1997; Bagarello, Ferro 1998, 2004; Chaplot, Le Bissonnais 2000; Wang i in. 2023; Li i in. 2024). W Europie zgodnie z bazą danych EUSEDcollab badania poletkowe, poza użytkami rolnymi (tj. czarny ugór oraz różnego rodzaju rośliny uprawne), prowadzono także na pastwiskach, w zaroślach, lasach oraz na terenach zabudowanych (Matthews i in. 2023).

Na terenie Polski badania poletkowe erozji wodnej gleby były prowadzone m. in. w Storkowie na Pojezierzu Drawskim (Szpikowski 1998a, b, 2001a, b, 2003a, b, 2010; Majewski 2014, 2020), w Szymbarku w Beskidzie Niskim (Gil 1976, 1994, 1998; Bochenek, Gil 2007, 2010; Kijowska-Strugała, Kiszka 2018; Gil i in. 2021), w Łazach na Pogórzu Wiśnickim (Święchowicz 1998, 2002, 2008, 2010, 2012, 2018; Święchowicz, Michno 2021), w Guciowie na Rostoczu Środkowym (Stępniewski 2008; Stępniewski i in. 2010), w Bogucinie na Płaskowyżu Nałęczowskim (Rejman, Usowicz 1999, 2002; Rejman 2006; Rejman i in. 2008; Rejman, Brodowski 2010), w Udziejku na Pojezierzu Suwalskim (Smolska 2002, 2008, 2010a, b) i w Mokronosach (Szafrąński 1992; Szafrąński i in. 1998; Szafrąński, Stasik 2001).

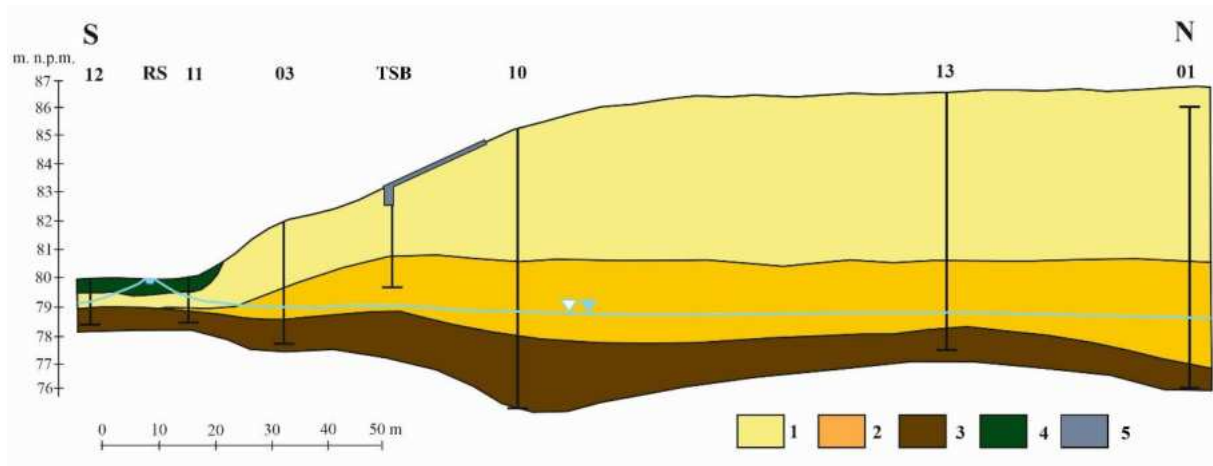
Terenowe stanowisko do badań spływu powierzchniowego zlokalizowano w zlewni Różanego Strumienia na stoku o nachyleniu 6° i ekspozycji południowej. W obrębie stanowiska badawczego znajdują się cztery poletka testowe o zróżnicowanym typie pokrycia powierzchni terenu (ryc. 5.1). Ze względu na szczególne ukierunkowanie badań na obszary miejskie, trzy poletka cechują się pokryciem dla nich charakterystycznym – asfaltem, kostką betonową na podsypce piaskowej oraz trawą. Czwarte z poletek pokryte jest czarnym ugorem, charakterystycznym dla terenów użytkowanych rolniczo. Czarny ugór jest standardową powierzchnią w badaniach erozji gleb i daje możliwość porównania uzyskanych wyników z wynikami pozyskanymi w innych lokalizacjach przez innych autorów. W dalszej części niniejszej rozprawy poletka z asfaltem i kostką dla uproszczenia będą określane jako powierzchnie przekształcone, a poletka z trawą i ugorem – powierzchnie naturalne.



Ryc. 5.1. Schemat stanowiska do badań spływu powierzchniowego

Terenowe stanowisko badawcze znajduje się w dolinie Różanego Strumienia, na jej lewobrzeżnym stoku (ryc. 5.2). W podłożu stanowiska znajdują się utwory przepuszczalne – piaski oraz zaglinione piaski Sandru Naramowickiego. Poniżej spągu warstwy wodonośnej występują utwory gliniaste.

Jedną z zalet zlokalizowania terenowego stanowiska badawczego jest osłonięcie poletek testowych z każdej strony zadrzewieniami. Warunki takie ograniczają zakłócenia, jakie w trakcie symulacji opadów mogłyby wystąpić na skutek porywów wiatru.



Ryc. 5.2. Przekrój geologiczny przez dolinę Różanego Strumienia (Okońska, Wolny 2011; zmienione)
1 – zaglinione piaski, 2 – piaski, 3 – gliny, 4 – torfy; 01, 03, 10, 11, 12, 13 – piezometry, RS – Różany Strumień,
TSB – terenowe stanowisko badawcze

5.1. Podstawowe założenia eksperymentu terenowego

W celu wykonania badań dynamiki sływu powierzchniowego niezbędne było zaprojektowanie i wykonanie terenowego stanowiska badawczego. Podczas projektowania terenowego stanowiska badawczego, programu eksperymentu oraz symulatora opadów poczyniono następujące założenia:

- Stanowisko zostanie zaprojektowane w taki sposób, aby możliwe było wyznaczenie pełnego bilansu wodnego dla poszczególnych poletek testowych.
- W czasie trwania symulacji opad będzie miał stałe natężenie.
- Program eksperymentu będzie obejmował opady według klasyfikacji Chomicza (1951) od opadu silnego A0, przez opady ulewne (A1-A4), po opady nawalne (B1-B2), a wraz ze wzrostem symulowanego natężenia opadu, rosnać będzie kategoria opadu.
- Symulator opadów powinien zapewnić równomierność opadu nad stanowiskiem badawczym.
- Opad powinien być symulowany bez przerw. Jeśli pojemność chwytaczy sływu powierzchniowego będzie ograniczona, przerwy w symulacji opadów będą możliwie najkrótsze, a ich celem będzie opróżnienie chwytaczy dla zapobiegnięcia przelania się wody.
- Krok czasowy rejestracji poziomu wody w chwytaczach sływu powierzchniowego będzie stały.

- W poszczególnych chwytaczach spływu powierzchniowego podczas eksperymentów będą wykorzystywane cyfrowe rejestratory zmian poziomu wody *Levelloggers* oraz cyfrowy rejestrator zmian wysokości ciśnienia atmosferycznego *Barologger*, umieszczony w klatce meteorologicznej w pobliskim ogródku meteorologicznym.

5.2. Bilans wodny stanowiska

Bilans obiegu wody na określonym obszarze (zazwyczaj w obrębie zlewni) opisywany jest przez równanie bilansowe Pencka-Oppokowa (5.1):

$$P = E + H_P + H_G + \Delta R \quad (5.1)$$

gdzie: P – opad (deszcz, śnieg, grad, ...),

E – parowanie (ewaporacja i transpiracja),

H_P – spływ powierzchniowy (stokowy i korytowy),

H_G – spływ podziemny (gruntowy i podziemny),

ΔR – zmiany retencji.

Bilans obiegu wody dla zaprojektowanego terenowego stanowiska badawczego można uprościć do postaci (5.2):

$$P = E + H_P + I \quad (5.2)$$

gdzie: P – opad (deszcz),

E – parowanie (ewaporacja),

H_P – spływ powierzchniowy (stokowy),

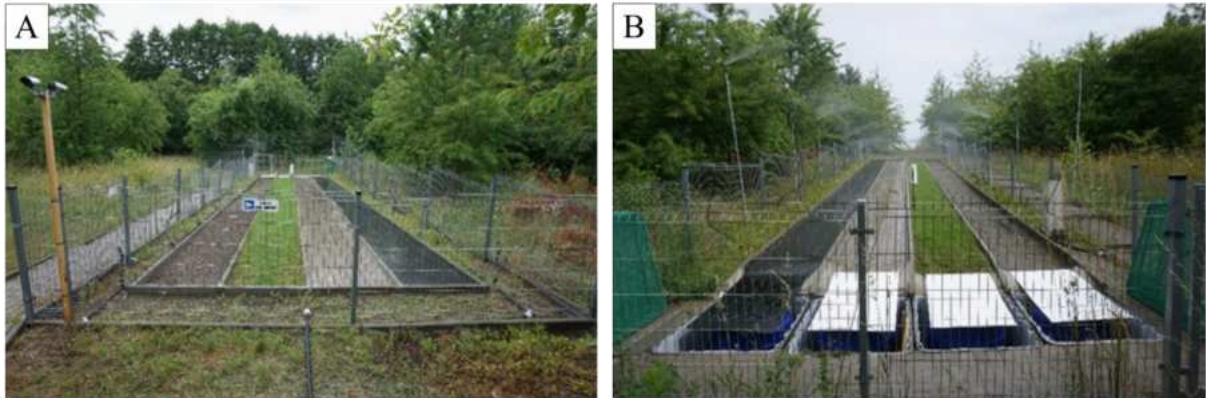
I – infiltracja.

Podczas projektowania stanowiska założono, iż pomiar opadu (P) będzie wykonywany za pomocą dwóch deszczomierzy Hellmanna, a także z wykorzystaniem przepływomierza instalacji zasilającej symulator opadów. Spływ powierzchniowy (H_P) będzie mierzony w chwytaczach spływu powierzchniowego, zlokalizowanych w dolnej części stanowiska.

5.3. Konstrukcja stanowiska badawczego i aparatura pomiarowa

Stanowisko badawcze złożone jest z czterech poletek testowych, każde o wymiarach: 1 m szerokości i 20 m długości (ryc. 5.3, 5.4). Poletka rozdzielone są betonowymi krawężnikami, uszczelnionymi z wykorzystaniem uszczelniacza dekararskiego. W dolnej części stanowiska krawężniki zwężają się do szerokości wykonanej z pleksi rynny, kierującej wodę

z poletka do chwytacza spływu powierzchniowego. Rynny mają kształt trapezu i wmontowane są w górną część chwytacza (ryc. 5.5A).



Ryc. 5.3. Widok na stanowisko badawcze z: A) górnej części stoku (7.07.2022); B) dolnej części stoku (7.07.2022)



Ryc. 5.4. Widok na stanowisko badawcze z lotu ptaka (fot. M. Winowski; 19.06.2023)



Ryc. 5.5. A) Rynna kierująca spływ do chwytacza spływu powierzchniowego (13.07.2022);
B) Chwytacz spływu powierzchniowego (8.07.2022); C) Komory chwytaczy spływu
powierzchniowego podczas montażu (20.11.2021); D) Montaż *Levelloggera* w chwytaczu spływu
powierzchniowego (fot. M. Marciniak, 8.07.2022)

Chwytacze spływu powierzchniowego znajdują się w dolnej części każdego z poletek testowych. Właściwy chwytacz umieszczony jest w komorze (ryc. 5.5B), wkopanej na głębokość 80 cm poniżej poziomu terenu. Komora została wykonana z plastikowego zbiornika typu Mauser poprzez odcięcie jego górnej części. Wymiary komory to 1,2 m × 1,0 m × 0,8 m. Każda komora znajduje się w metalowym stelażu i jest dodatkowo zabezpieczona przed naporem gruntu przez folię kubełkową (ryc. 5.5C).

Chwytnacz spływu powierzchniowego ma kształt walca i pojemność 300 dm^3 (ryc. 5.5B). Chwytnacz został umieszczony wewnątrz komory i jest połączony z poletkiem testowym za pomocą rynny (ryc. 5.5A). Rynna ma za zadanie kierować spływ powierzchniowy do wnętrza chwytacza. W dolnej części chwytacza znajduje się zawór, umożliwiający odprowadzenie wody ze spływu powierzchniowego, a także pobór próbek. Woda z chwytacza wypływa do komór, które połączono rurą, odprowadzającą wodę grawitacyjnie do doliny Rózanego Strumienia.

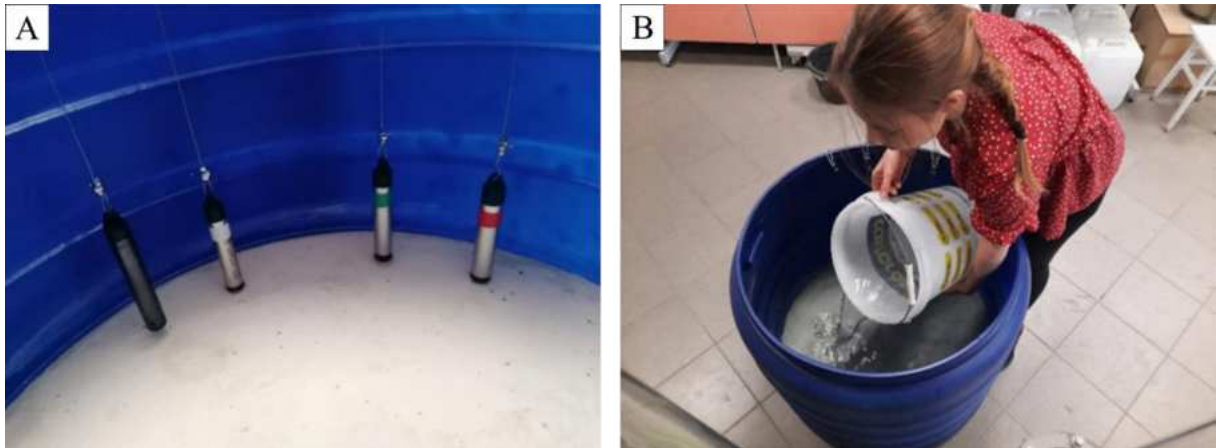
Do monitorowania zmian poziomu wody w chwytaczach spływu powierzchniowego zastosowano automatyczne rejestratory *Levelogger* (ryc. 5.5D) produkowane przez firmę Solinst. Rejestratory te współpracują z automatycznym rejestratorem ciśnienia atmosferycznego *Barologger*, zlokalizowanym w klatce meteorologicznej w pobliskim ogródku meteorologicznym przy Collegium Geographicum UAM, oddalonym od stanowiska badawczego o 80 m. Na poletku z czarnym ugiem zainstalowano sondy *MEC10 Soil Moisture & Temperature & EC Sensor* do pomiaru wilgotności gruntu na głębokościach: 5, 10, 20 i 50 cm.

5.4. Kalibracja chwytacza spływu powierzchniowego

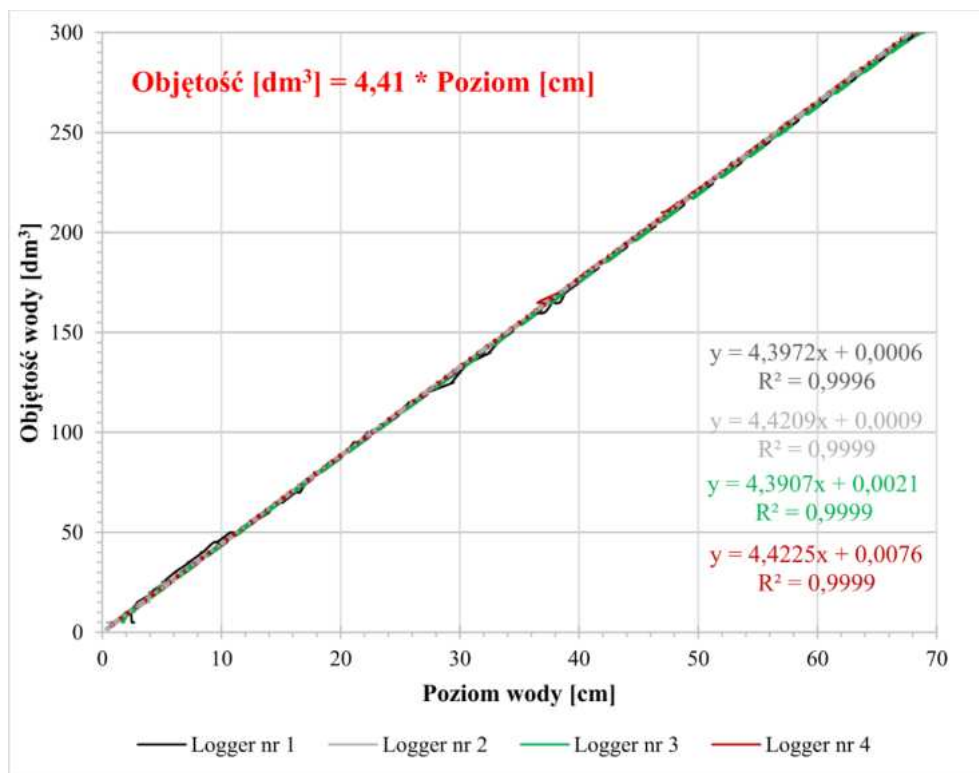
W celu umożliwienia określenia dynamiki spływu powierzchniowego, wykonano kalibrację chwytacza spływu powierzchniowego i aparatury pomiarowej (*Barologgera* i *Leveloggerów*). W warunkach laboratoryjnych w chwytaczu umieszczono cztery rejestratory zmian poziomu wody (*Levelogger*) (ryc. 5.6A), przeznaczone do pracy w terenie, oraz rejestrator wysokości ciśnienia atmosferycznego (*Barologger*). Następnie napełniono chwytacz 5 dm^3 wody. Po ustabilizowaniu się zwierciadła wody w chwytaczu, wleto do niego kolejną porcję 5 dm^3 wody. Procedurę powtórzono 60 razy aż do całkowitego zapełnienia chwytacza (ryc. 6.6B).

Kalibracja chwytacza pozwoliła uzyskać zależność pomiędzy poziomem wody w chwytaczu a jej objętością. Ponadto dokonano sprawdzenia sprawności aparatury przeznaczonej do pomiarów terenowych. Uzyskana liniowa charakterystyka chwytacza przedstawiona została na rycinie 5.7. W wyniku przeprowadzonej kalibracji spływu powierzchniowego określono, że 1 dm^3 wody w chwytaczu spływu powierzchniowego jest równy 4,41 cm poziomu wody. Wartość 4,41 jest zatem stałą, służącą do obliczania objętości wody w chwytaczu na podstawie jej poziomu. Stałą 4,41 wyznaczono jako średnią

współczynniki kierunkowych funkcji liniowych, opisujących zmiany poziomu wody zarejestrowane przez każdy z czterech zamontowanych w chwytaczu *Levelloggerów*.



Ryc. 5.6. A) *Levellogery* zamontowane w chwytaczu spływu powierzchniowego na czas kalibracji (fot. M. Marciniak, 19.05.2022); B) Kalibracja chwytacza spływu powierzchniowego w laboratorium (fot. M. Marciniak, 19.05.2022)



Ryc. 5.7. Zależność liniowa między objętością wody w chwytaczu a jej poziomem zarejestrowana za pomocą czterech *Levelloggerów*

5.5. Analiza niepewności

Podczas kalibracji chwytaczy spływu powierzchniowego wykonano analizę niepewności pomiarowych. Procedura kalibracji polegała na wlewaniu do chwytacza odmierzonych 5 dm³ wody w odstępach czasu, umożliwiających stabilizację zwierciadła wody, aż do wypełnienia chwytacza. Pomiar poziomu wody prowadzono z wykorzystaniem czterech *Leveloggerów*. Chwytacze spływu powierzchniowego wykalibrowano w warunkach laboratoryjnych. Efektem kalibracji było wyznaczenie zależności liniowej między poziomem wody w chwytaczu a jej objętością (1 cm wody jest równy 4,41 dm³).

Dla skalibrowanych chwytaczy spływu powierzchniowego wyznaczono: całkowitą objętość wody w chwytaczu (5.3) oraz niepewności bezwzględne ΔV (5.4) i niepewności względne δV (5.5) na podstawie następujących wzorów:

$$V_c = h \cdot 4,41 \quad (5.3)$$

$$\Delta V = |V_r - V_c| \quad (5.4)$$

$$\delta V = \frac{|V_r - V_c|}{V_r} \cdot 100\% \quad (5.5)$$

gdzie: ΔV – niepewność bezwzględna [dm³],

δV – niepewność względna [%],

h – poziom wody odczytany w chwytaczu [cm],

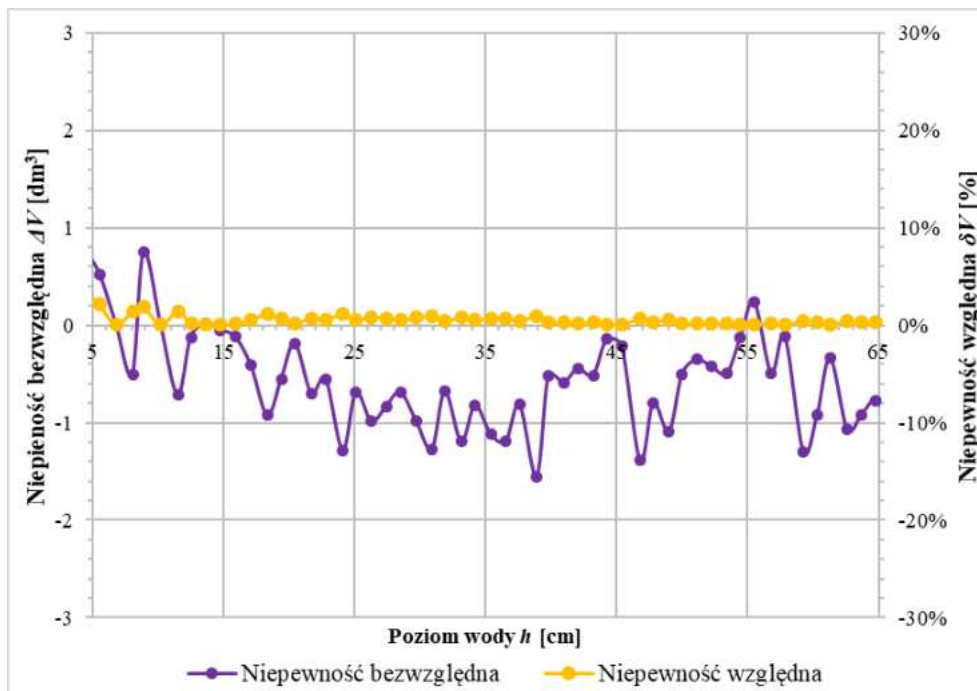
V_c – objętość wody obliczona z zależności liniowej dla chwytacza [dm³],

V_r – objętość wody wlewanej do chwytacza [dm³].

Ponieważ przed rozpoczęciem eksperymentu *Levelogger* w chwytaczu spływu powierzchniowego musi być zatopiony, początkowy poziom wody w chwytaczu zawsze wynosił 5 cm. Ponadto podczas trwania eksperymentu poziom wody w chwytaczu nigdy nie przekraczał 65 cm. Na rycinie 5.8 przedstawiono uzyskane wartości niepewności bezwzględnych ΔV oraz niepewności względnych δV . Rycina przedstawia analizę niepewności reprezentatywną dla prowadzonego eksperymentu terenowego, a zatem obejmuje zakres poziomu wody w chwytaczu od 5 cm do 65 cm.

Niepewności bezwzględne ΔV zmieniały się od -1,55 dm³ do 0,75 dm³, a ich średnia wartość wyniosła -0,58 dm³. Większość niepewności bezwzględnych ΔV charakteryzowała się ujemnymi wartościami. Niepewności względne δV zmieniały się od 0,04% do 2,10%, a średnia wartość wynosiła 0,52%. Największe niepewności względne δV występowały przy napełnieniu chwytacza od 5 do 9 cm, a powyżej 25 cm niepewności względne nie przekraczały 1%.

Podczas symulacji opadów na stanowisku badawczym zaobserwowano, iż niezbędne będzie ustalenie granicy błędu pomiarowego dla *Levelloggerów*. Zastosowana do pomiarów poziomu wody aparatura jest bardzo czuła na niestabilne zwierciadło wody. Podczas procesu spływu powierzchniowego woda z rynny spływa do chwytacza z wysokości wynoszącej od kilkunastu do ponad osiemdziesięciu centymetrów, dlatego trudno jest w takich warunkach o stabilne zwierciadło wody. Niepewności pochodzące od falowania lustra wody są trudne do oszacowania i były eliminowane podczas interpretacji wyników pozyskanych w terenie poprzez interpolację tempa wzrostu poziomu wody w chwytaczu.



Ryc. 5.8. Analiza niepewności dla chwytacza spływu powierzchniowego

5.6. Program eksperymentu

Na podstawie przeprowadzonych analiz opadów atmosferycznych na terenie Poznania (por. rozdział 4) podjęto decyzję o zastosowaniu symulatora opadów w badaniach spływu powierzchniowego. Zastosowanie symulatora opadów było konieczne, aby szczegółowo rozpoznać dynamikę spływu powierzchniowego przy sporadycznie występujących silnych, ulewnych i nawałnych opadach deszczu. Opady te stanowią szczególne zagrożenie na obszarach zurbanizowanych, doprowadzając często do lokalnych powodzi błyskawicznych przy niewydolności kanalizacji burzowej. Jednocześnie silne, ulewne i nawałne opady deszczu są na tyle rzadkie, a ich występowanie cechuje się znaczną losowością. Wykonanie pomiarów

terenowych byłoby zatem niemożliwe w warunkach opadów naturalnych. Symulator opadów uniezależnia od warunków pogodowych, a zatem umożliwia przeprowadzenie wszystkich zaplanowanych eksperymentów, a także rozpoznanie dynamiki spływu powierzchniowego przy maksymalnych opadach, zaobserwowanych w danym wieloleciu.

Do przeprowadzenia eksperymentu terenowego wybrano siedem kategorii opadów według klasyfikacji Chomicza (1951). Każda z kategorii cechuje się innym natężeniem i czasem trwania opadu. Ponadto postanowiono wykonać symulacje spływu powierzchniowego w warunkach suchych na gruncie, który nie był nawadniany przez co najmniej 24 godziny (warunki suche, określane jako D) oraz w warunkach wilgotnych na gruncie, który przed eksperymentem był nawodniony (warunki wilgotne, określane jako W). Eksperymenty w warunkach wilgotnych (W) postanowiono przeprowadzać każdorazowo zaraz po zakończeniu eksperymentów w warunkach suchych (D). Dla uproszczenia w dalszej części niniejszej rozprawy początkowe warunki wilgotnościowe gruntu będą określane jako warunki suche (D) oraz warunki wilgotne (W).

Tab. 5.1. Program eksperymentu terenowego
D – warunki suche, W – warunki wilgotne

Grupa opadów	Kategoria Chomicza		Natężenie opadu	Początkowe warunki wilgotnościowe gruntu	Czas trwania opadu	Suma opadu	Współczynnik Chomicza α	Data
			[mm/h]		[min]	[mm]		
Słabe, długotrwałe	A0	silny	4	D	360	24,0	1,26	07.07.2022
	A0		4	W	360	24,0	1,26	08.07.2022
	A1	ulewny	8	D	180	24,0	1,79	22.07.2022
	A1		8	W	180	24,0	1,79	22.07.2022
	A2		16	D	90	24,0	2,53	20.07.2022
	A2		16	W	90	24,0	2,53	20.07.2022
	A3		30	D	50	25,0	3,54	11.07.2022
	A3		30	W	50	25,0	3,54	11.07.2022
Intensywne, krótkotrwałe	A4		40	D	45	30,0	4,47	15.07.2022
	A4		40	W	45	30,0	4,47	15.07.2022
	B1	nawalny	50	D	60	50,0	6,45	25.07.2022
	B1		50	W	60	50,0	6,45	25.07.2022
	B2		60	D	70	70,0	8,37	18.07.2022
	B2		60	W	70	70,0	8,37	18.07.2022

Program eksperymentu obejmował 14 symulacji opadów i został przedstawiony w tabeli 5.1. Opady uszeregowane według klasyfikacji Chomicza (1951) podzielono na dwie grupy: opady słabe, długotrwałe (silny A0 oraz ulewne A1, A2 i A3), cechujące się malejącym

czasem trwania i stałą sumą opadu (~ 25 mm), oraz opady intensywne, krótkotrwałe (ulewny A4 oraz nawalne B1 i B2), charakteryzujące się wzrastającą sumą opadów (> 30 mm) oraz zbliżonym czasem trwania.

5.7. Symulator opadów

W literaturze spotyka się badania spływu powierzchniowego i erozji wodnej gleb z wykorzystaniem symulatorów opadów. Na obszarach, na których ekstremalne opady deszczu są rzadkie i trudne do prognozowania, zastosowanie symulatora opadów jest szczególnie uzasadnione (Iserloh i in. 2013). Poza uniezależnieniem od opadów naturalnych, symulator opadów umożliwia kontrolę nad zróżnicowanymi charakterystykami opadu: natężeniem, czasem trwania czy sumą opadu (Pall i in. 1983; Tossell i in. 1987; Sangüesa i in. 2010; Corona i in. 2013; Majewski 2020). Zastosowanie symulatora opadów umożliwia przeprowadzenie zaplanowanych eksperymentów terenowych, a także gwarantuje ich kontrolowane i powtarzalne warunki (Bowyer-Bower, Burt 1989; Iserloh i in. 2013; Boulange i in. 2019).

Iserloh i in. (2021) zwracają uwagę na braki w standaryzacji sposobu symulowania opadów. Symulatory opadów wykorzystywane są do badania spływu, infiltracji oraz erozji w warunkach laboratoryjnych i terenowych (Grierson, Oades 1977; Moore i in. 1983; Esteves i in. 2000; Foster i in. 2000; Fernández-Galvez i in. 2008). W literaturze obserwuje się najczęściej małe symulatory opadów, nawadniające powierzchnie poniżej 5 m² w warunkach laboratoryjnych (Bryan 1974; Piechnik 1992; Brodowski, Rejman 2004; Wierzbicki 2008; Armenise i in. 2018; Mhaske i in. 2019; Ahmadi i in. 2020; Fernández-Raga i in. 2022; Samantaray, Ghose 2022; Wei i in. 2023) oraz terenowych (Józefaciuk 1966; Tossell i in. 1987; Piechnik 1992; Slattery, Bryan 1994; Humphry i in. 2002; Nowocień i in. 2004; Sangüesa i in. 2010; Iserloh i in. 2013; Boulange i in. 2019; Salem, Meselhy 2021; Wu i in. 2022). Zastosowanie małych symulatorów jest tańsze, a także daje większe możliwości w zakresie kontroli nad charakterystykami opadu (Humphry i in. 2002; Iserloh i in. 2013; Majewski 2014, 2020; Mayerhofer i in. 2017; Naves i in. 2020). Duże symulatory opadów są większą inwestycją finansową i czasową, ale uzyskane wyniki są bardziej reprezentatywne (Mayerhofer i in. 2017) i prostsze do przełożenia na skalę lokalną czy regionalną. W literaturze spotyka się zatem symulatory nawadniające większe powierzchnie, kilkudziesięciu, a nawet ponad 100 m² (Hart i in. 1985; Simanton i in. 1985; Luk i in. 1986; Panini i in. 1997; Elhakeem, Papanicolaou 2009; Majewski 2020; Czuchaj i in. 2022; Isidoro i in. 2022; Majewski i in. 2023).

Należy równocześnie zauważyć, iż przeważająca liczba publikacji dotyczy badań na powierzchniach o różnym użytkowaniu rolniczym, m.in. zboże jare, ozime, rośliny okopowe. Występują też badania powierzchni o typach pokrycia powierzchni terenu innych niż rolnicze, m. in. darń, las czy roślinność zielona (Podwojewski i in. 2011; Parsakhoo i in. 2012; Li, Pan 2018; Kusumandari i in. 2021; Mendes i in. 2021; Yakupoglu i in. 2021). Na obszarze Polski badania z symulatorami opadów w zakresie erozji wodnej gleby prowadzono w Lublinie (Nowocien i in. 2004) oraz w Storkowie (Majewski 2014, 2020).

Z powodu nieregularnej i trudnej do przewidzenia częstotliwości występowania deszczów ulewnych i nawałnych realizacja badań podczas opadów naturalnych byłaby niemożliwa. Symulator opadów zapewnia przekrój opadów silnych, ulewnych i nawałnych według kategorii Chomicza zgodnie z programem eksperymentu, a także uniezależnia badania od warunków pogodowych – w tym od wystąpienia roku suchego lub mokrego.

Symulator opadów został zaprojektowany przez profesjonalną firmę zewnętrzną Przedsiębiorstwo Handlowo-Usługowe „ADVISOR” z siedzibą w Poznaniu. Firma ADVISOR zaprojektowała symulator opadów, zainstalowała go na stanowisku badawczym oraz wykonała jego uruchomienie. Symulator gwarantuje opad o stałym natężeniu i równomierności wynoszącej 80%.

Ogólny schemat symulatora opadów prezentuje rycina 5.9. Składa się on z następujących elementów:

1. zbiornika na wodę, zasilanego z hydrantu,
2. zestawu pompowo-filtracyjnego i pomiarowego ze sterownikiem,
3. instalacji zraszającej.

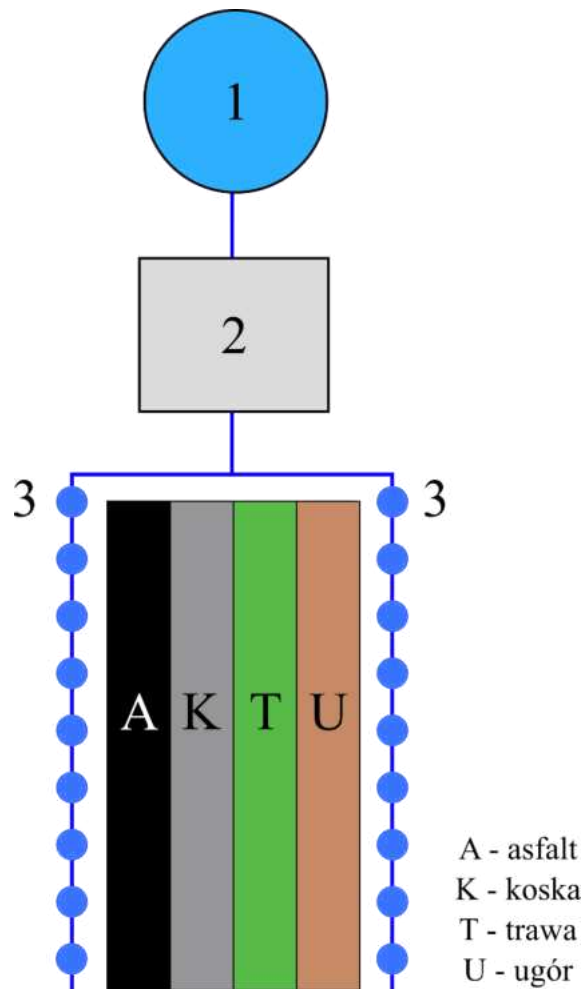
Zbiornik na wodę (ryc. 5.10A) ma wymiary: 1,2 m wysokości, 3,66 m średnicy i pojemność 10 m³. Składa się z okrągłego stelaża, wkładu z tworzywa sztucznego oraz nakładanej od góry pokrywy. Zbiornik znajduje się powyżej stanowiska badawczego na płaskim terenie, a woda do niego dostarczana jest za pomocą węży strażackich z oddalonego o ok. 100 m hydrantu (ryc. 5.10B), podłączonego do miejskiej sieci wodociągowej. Zbiornik napełniany był przed wykonaniem każdego z symulowanych opadów.

Zestaw pompowo-filtracyjny i pomiarowy ze sterownikiem złożony jest następujących elementów (ryc. 5.11):

- a) falownika IMF 1.1.22 EASY, będącego sterownikiem kontroli pracy,
- b) manometrów i armatury połączeniowej wykonanej z PCV, PE oraz stali nierdzewnej,

- c) pompy Multi EVO-A5 o wydajności $Q = 5 \text{ m}^3$ przy ciśnieniu 6 bar ze zbiornikiem przeponowym 24 dm^3 i obudową wykonaną ze stali nierdzewnej,
- d) węża ssawnego z PCV40, łączącego pompę ze zbiornikiem, zakończonego zawodem kulkowym 1'',
- e) wózka transportowo-platformowego,
- f) sterownika czasowego RAIN BIRD ESP-RZX i elektrozaworu startowego RAIN BIRD 100 DV 1''/24 VAC, sterujących pracą pompy,
- g) szafy elektrycznej w osłonie IP55 z dwoma bezpiecznikami,
- h) miernika przepływu wody K24 z dokładnością pomiaru $\pm 1\%$ i zakresie przepływu $10\text{-}120 \text{ dm}^3/\text{min}$,
- i) filtra dyskowego ARKAL LONG 1''/120mesch.

Zestaw pompowo-filtracyjny i pomiarowy ze sterownikiem jest mobilnym elementem symulatora opadów i umożliwia wykonanie deszczowań także poza stanowiskiem badawczym.



Ryc. 5.9. Ogólny schemat symulatora opadów



Ryc. 5.10. A) Zbiornik na wodę (8.07.2022); B) Hydrant podłączony do miejskiej sieci wodociągowej (8.07.2022)



Ryc. 5.11. Zestaw pompowo-filtracyjny i pomiarowy ze sterowaniem (8.07.2022)
a) falownik IMF, b) manometry i armatura połączeniowa, c) pompa ze zbiornikiem przeponowym,
d) wąż ssawny, e) wózek transportowo-platformowy, f) sterownik czasowy i elektrozawór,
g) szafa elektryczna z zabezpieczeniami, h) miernik przepływu wody, i) filtr dyskowy

Instalacja zraszająca składa się z rurociągów zasilających, wykonanych z polietylenu PE, dostarczających wodę z systemu pompowo-filtrowego do zraszaczy. Zraszacze zamontowane są na 18 tyczkach (prętach stalowych ocynkowanych, ryc. 5.12A) po obu stronach stanowiska badawczego, rozmieszczonych w równych odległościach co 2,5 m. Tyczki charakteryzują się zmienną wysokością od 0,5 m w górnej części stanowiska do 2,5 m przy jego dolnej części ze względu na konieczność zniwelowania wpływu nachylenia stoku na równomierność przepływu wody w systemie zraszającym. Stok cechuje się spadkiem

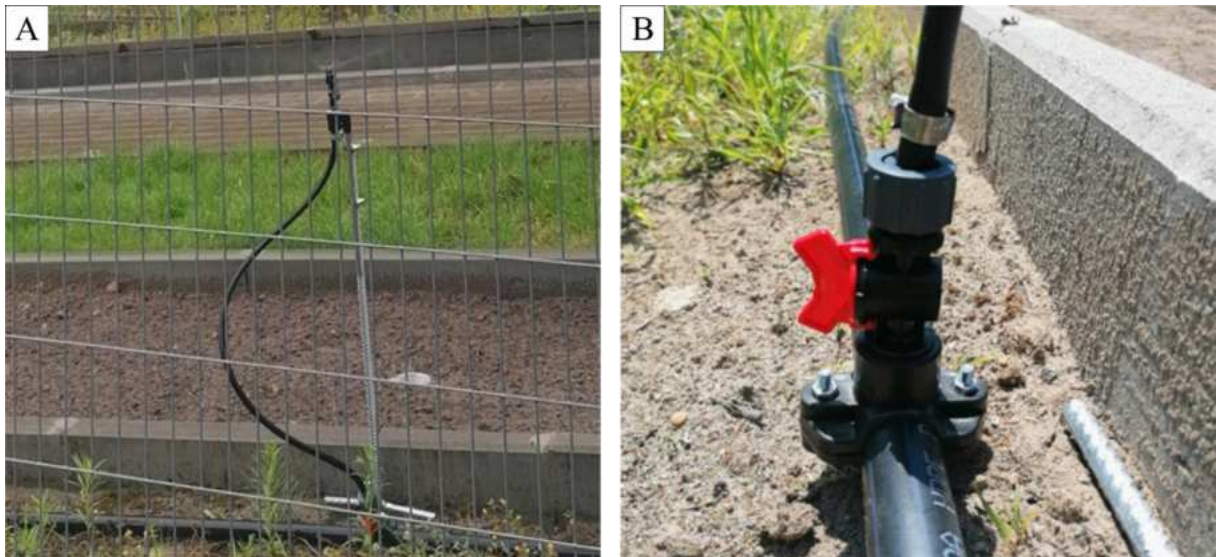
wynoszącym 10% (6°), a zatem zastosowanie tyczek o jednakowej wysokości na całej długości stanowiska groziłoby problemami związanymi ze stratami ciśnienia hydrostatycznego w systemie nawadniającym. Każde stanowisko zraszacza (tyczka oraz wymienna głowica zraszacza, tzw. dysza) jest wyposażone w osobny, niezależny zawór odcinający (ryc. 5.12B).

W celu zrealizowania pełnego programu eksperymentów symulator opadów został wyposażony w 4 zestawy różnych dysz do zraszaczy. Stosując odpowiednie konfiguracje tych dysz oraz podane przez projektanta systemu ciśnienia wody i przepływy chwilowe, uzyskuje się siedem różnych kategorii opadowych.

Zastosowane w symulatorze dysze (ryc. 5.13) to:

- a) NAAN DAN JAIN HADAR 7110 z dyszą Grey i małym wirnikiem,
- b) HUNTER dysza MP Rotator 1000,
- c) RAIN BIRD dysza R VAN 14,
- d) RAIN BIRD dysza VAN 15.

Konfiguracja dysz na cele eksperymentu jest przedstawiona w tabeli 5.2.



Ryc. 5.12. A) Stalowa tyczka i głowica zraszacza podczas płukania instalacji zraszającej (8.07.2022),
B) Zawór odcinający dla każdego zraszacza (8.07.2022)



Ryc. 5.13. Dysze stosowane do symulacji opadów (7.07.2022)

Tab. 5.2. Konfiguracje dysz umożliwiające uzyskanie symulację opadów o różnym natężeniu

Natężenie symulowanego opadu [mm/h]	Układ dysz
4	18 × HADAR Grey
8	10 × MP Rotator 1000
16	18 × MP Rotator 1000
30	18 × R VAN
40	10 × VAN 15
50	10 × VAN 15 oraz 8 × R VAN
60	18 × VAN 15

6. Realizacja eksperymentu terenowego z symulacją opadów

6.1. Program i realizacja eksperymentów terenowych

Badania eksperymentalne z wykorzystaniem symulatora opadów na terenowym stanowisku badawczym wykonano w dniach od 7 do 25 lipca 2022 roku w warunkach ciepłej, bezwietrznej i bezdeszczowej pogody (tab. 6.1).

Tab. 6.1. Warunki pogodowe podczas eksperymentu terenowego;
Grunt – początkowe warunki wilgotnościowe gruntu, D – warunki suche, W – warunki wilgotne,
Temp – temperatura powietrza, Wiatr – prędkość wiatru

Data	Grunt	Symulowany opad		Czas symulacji opadu		Warunki początkowe			Warunki końcowe		
		Natężenie [mm/h]	Kategoria Chomicza	Początek	Koniec	Godzina	Temp	Wiatr	Godzina	Temp	Wiatr
							[°C]	[m/s]		[°C]	[m/s]
07.07.2022	D	4	A0	10:56	17:17	10:30	18,8	0,0	17:30	19,9	0,0
08.07.2022	W			08:56	15:18	08:30	17,0	0,0	15:30	21,8	0,0
22.07.2022	D	8	A1	10:00	13:08	10:00	25,2	0,0	13:30	28,7	0,0
	W			13:17	16:30	13:00	28,6	0,0	17:00	34,1	0,0
20.07.2022	D	16	A2	10:30	12:09	10:00	30,9	0,0	12:30	34,1	0,0
	W			12:26	14:04	12:00	34,1	0,0	14:30	36,1	0,0
11.07.2022	D	30	A3	10:05	10:59	10:00	17,6	0,0	11:00	20,0	0,0
	W			11:27	12:20	11:00	20,0	0,0	12:30	18,6	0,0
15.07.2022	D	40	A4	10:54	11:45	10:30	16,7	0,0	12:00	18,3	0,0
	W			12:46	13:36	12:30	18,7	0,4	14:00	19,1	0,0
25.07.2022	D	50	B1	10:50	12:07	10:30	23,9	0,0	12:30	25,1	0,0
	W			13:06	14:19	13:00	24,9	0,0	14:30	27,2	0,0
18.07.2022	D	60	B2	10:50	12:20	10:30	22,5	0,0	12:30	25,2	0,0
	W			12:46	14:15	12:30	25,2	0,0	14:30	26,7	0,0

Przed rozpoczęciem każdej z symulacji opadu atmosferycznego wykonywano płukanie symulatora w celu usunięcia zanieczyszczeń, a także programowano *Levellogger* oraz *Barologger* z krokiem czasowym wynoszącym 1 minutę. W każdym z chwytaczy spływu powierzchniowego w momencie zawieszenia rejestratora zmian poziomu wody znajdowało się 5 cm wody. W chwytaczu na poletku z ugiem każdorazowo przed rozpoczęciem symulacji opadu osuszano dno do sucha, a następnie napełniano 5 cm czystej wody, aby możliwe było określenie koncentracji materiału zmywanego z ugiem.

W trakcie symulacji w terenie prowadzono obserwacje: przepływu na przepływomierzu, opadu w deszczomierzach Hellmanna oraz zmian poziomu wody w czterech chwytaczach. Przepływomierz stanowił część symulatora opadów (ryc. 6.1A). Deszczomierz Hellmanna umieszczono w dolnej części poletka z trawą na wysokości 1 m n.p.g. (ryc. 6.1B). Pomiaru zmian poziomu wody w chwytaczach spływu powierzchniowego były prowadzone z wykorzystaniem *Leveloggerów*, a także podlegały manualnej kontroli z wykorzystaniem rury wykonanej z PVC, która została odpowiednio wyskalowana. Podczas symulacji opadów korzystano z jednego lub dwóch deszczomierzy Hellmanna, umieszczanych w różnych punktach stanowiska, mając na celu sprawdzenie równomierności opadu.

Na potrzeby eksperymentu zaprojektowano formularz pomiarów spływu powierzchniowego z wykorzystaniem symulatora opadu (ryc. 6.2). W formularzu podczas eksperymentu terenowego notowano czas rozpoczęcia i zakończenia każdej z symulacji, kontrolne poziomy wody w chwytaczach spływu powierzchniowego (wykonane za pomocą wyskalowanej rury), a także sumę opadu odczytaną z deszczomierzy Hellmanna oraz przepływ chwilowy i sumę zużytej wody z przepływomierza. Na rycinie 6.3 zaprezentowano wypełniony formularz pomiarowy dla symulacji opadu B1 w warunkach suchych (D), wykonanej 25 lipca 2022 roku.



Ryc. 6.1. A) Przepływomierz oraz manometr symulatora opadów (07.07.2022); B) Deszczomierz Hellmanna na terenowym stanowisku badawczym (07.07.2022)

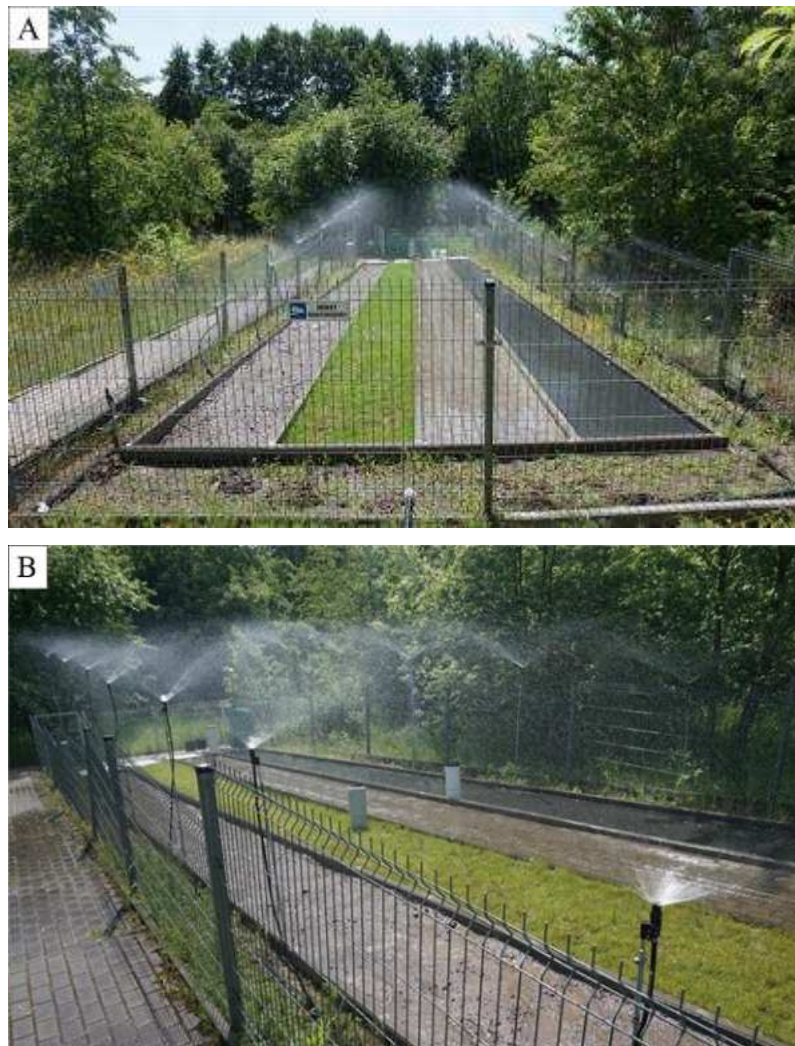
Plan eksperymentu:							Data:					
Planowane	Natężenie	mm/h		Regulator ciśnienia				Zrealizowane	Natężenie	mm/h		
	Czas trwania	min		Przepływ chwilowy	dm ³ /min				Czas trwania	min		
	Suma opadu	mm		Ciśnienie	bar				Suma opadu	mm		
	Alfa	[P/t ^{0.5}]		Uwagi					Alfa	[P/t ^{0.5}]		
	Kat. Chomicz	-							Kat. Chomicz	-		
Obserwacje hydro-meteorologiczne:												
Godzina		A – asfalt		K – kostka		T – trawa		U – ugór		Przelicznik skali	4,41	dm ³ /cm
	Numer loggera									Opad Hellmann	Przepływ chwilowy	Licznik pompa
	Start loggera											
	Krok czasowy											
	Stop loggera											
	cm	dm ³	cm	dm ³	cm	dm ³	cm	dm ³	mm	dm ³ /min	dm ³	
	Vo											
	Vk											

Ryc. 6.2. Formularz pomiarów spływu powierzchniowego z wykorzystaniem symulatora opadu

Plan eksperymentu: 4 × 15 min								Data: 25.07.2022				
Planowane	Nateżenie	mm/h	50	Regulator ciśnienia				Zrealizowane	Nateżenie	mm/h	61,5	
	Czas trwania	min	60	Przepływ chwilowy	dm ³ /min	66	66		Czas trwania	min	60	
	Suma opadu	mm	50,0	Ciśnienie	bar	2,7	2,2		Suma opadu	mm	61,5	
	Alfa	[P/t ^{0,5}]	6,45	Uwagi	objętość potrzebnej wody ok. 4 m ³ ; max spływ do beczki 1000 dm ³				Alfa	[P/t ^{0,5}]	7,94	
	Kat. Chomicz	-	B1		Kat. Chomicz	-	B1					
Obserwacje hydro-meteorologiczne: bardzo ciepło, brak zachmurzenia, lekki lub brak wiatru												
Godzina		A – asfalt		K – kostka		T – trawa		U – ugór		Przelicznik skali	4,41	dm ³ /cm
	Numer loggera	M-10 2058001		M-5 2058564		M-5 2058625		M-5 2058617		Opad Hellmann	Przepływ chwilowy	Licznik pompa
	Start loggera	10:00		10:00		10:00		10:00				
	Krok czasowy	1 min		1 min		1 min		1 min				
	Stop loggera	12:40		12:40		12:40		12:40				
	cm	dm ³	cm	dm ³	cm	dm ³	cm	dm ³	mm	dm ³ /min	dm ³	
11:00	Vo	5,0	22,1	5,0	22,1	6,0	26,5	5,0	22,1		66,0	0,0
11:15	koniec 1 serii	35,0	154,4	29,0	127,9	6,2	27,3	7,8	34,4	15,8		978,1
11:20	spuszczenie wody	9,0	39,7	11,0	48,5	6,2	27,3	7,8	34,4		66,4	
11:35	koniec 2 serii	39,0	172,0	33,0	145,5	6,8	30,0	13,0	57,3	15,3		1966,8
11:41	spuszczenie wody	6,0	26,5	6,0	26,5	6,8	30,0	13,0	57,3		66,2	
11:56	koniec 3 serii	35,4	156,1	31,4	138,5	7,2	31,8	18,2	80,3	14,7		2964,2
12:02	spuszczenie wody	8,0	35,3	8,0	35,3	7,2	31,8	18,2	80,3		66,0	
12:17	koniec 4 serii	39,4	173,8	34,8	153,5	7,5	33,1	21,6	95,3	15,7		3961,1
	Vk	39,4	173,8	34,8	153,5	7,5	33,1	21,6	95,3	61,5		3961,1

Ryc. 6.3. Formularz pomiarów spływu powierzchniowego z wykorzystaniem symulatora opadu dla opadu B1 w warunkach suchych (D) (25.07.2022)

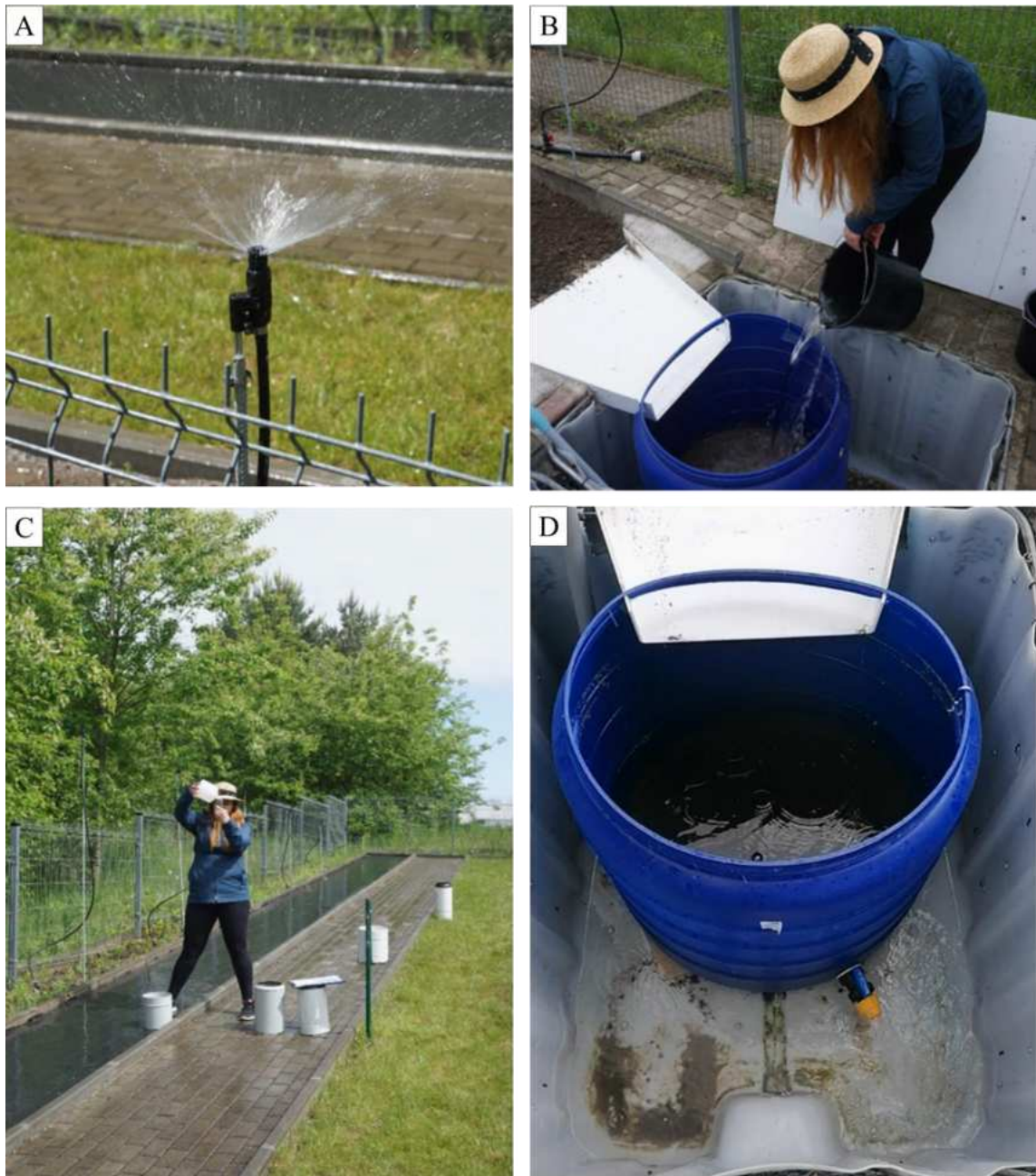
Każdy z przeprowadzonych eksperymentów terenowych został szeroko udokumentowany w formie zdjęć i nagrań. W niniejszej pracy zaprezentowano fragment tej dokumentacji w postaci zdjęć oraz klatek nagranych materiału filmowego. Rycina 6.4 prezentuje widok z góry i z boku na stanowisko badawcze podczas symulowanego opadu B2, natomiast rycina 6.5 – formowanie się spływu podczas symulacji opadu na rynnie (klatki z materiału filmowego) oraz wypełnione wodą ze spływu powierzchniowego chwytacze. Na rycinie 6.6 przedstawiono dyszę symulatora w trakcie symulowanego opadu, a także napełnianie chwytacza na poletku z ugiem wodą przez rozpoczęciem eksperymentu, pomiar opadu w deszczomierzu Hellmanna oraz opróżnienie chwytacza spływu powierzchniowego po zakończeniu eksperymentu.



Ryc. 6.4. Symulacja opadu B2 na terenowym stanowisku badawczym (18.07.2022); A) Widok na stanowisko z góry; B) widok na stanowisko z boku



Ryc. 6.5. A) Spływ powierzchniowy po rynnie na poletku kostką podczas symulacji opadu B2 (18.07.2022); B) Spływ powierzchniowy po rynnie na poletku ugorze podczas symulacji opadu B2 (18.07.2022); C) Chwytnacz spływu powierzchniowego na trawie po symulacji opadu B2 (18.07.2022); D) Chwytnacz spływu powierzchniowego na ugorze po symulacji opadu B2 (18.07.2022)



Ryc. 6.6. A) Dysza VAN 15 podczas symulacji opadu B2 (18.07.2022); B) Wypełnienie chwytacza spływu powierzchniowego na ugorze wodą przed rozpoczęciem eksperymentu (18.07.2022; fot. M. Marciniak); C) Pomiar opadu z deszczomierza Hellmanna (18.07.2022; fot. M. Marciniak); D) Opróżnianie chwytacza spływu powierzchniowego po zakończeniu eksperymentu (18.07.2022; M. Marciniak)

Przed przystąpieniem do interpretacji zarejestrowanych w terenie wyników, na podstawie formularzy pomiarowych wypełnionych w trakcie trwania eksperymentu sprawdzono, czy założony program eksperymentu został wykonany. Do oceny kategorii symulowanego opadu wg Chomicza posłużono się sumami opadów zmierzonymi z wykorzystaniem deszczomierza Hellmanna. Wyniki zestawiono w tabeli 6.2. Zrealizowano

zaplanowany program, symulując opady od silnego (AO) przez ulewne (A1-A4) do nawalnych (B1-B2). W przypadku opadów nawalnych sumy opadów według deszczomierza Hellmanna były wyższe aniżeli planowane, jednakże opady te wciąż znajdowały się w kategorii B1 i B2 według Chomicza. Pozostałe zrealizowane sumy opadów były zbliżone do planowanych.

Tab. 6.2. Planowany i zrealizowany program eksperymentu terenowego
D – warunki suche, W – warunki wilgotne

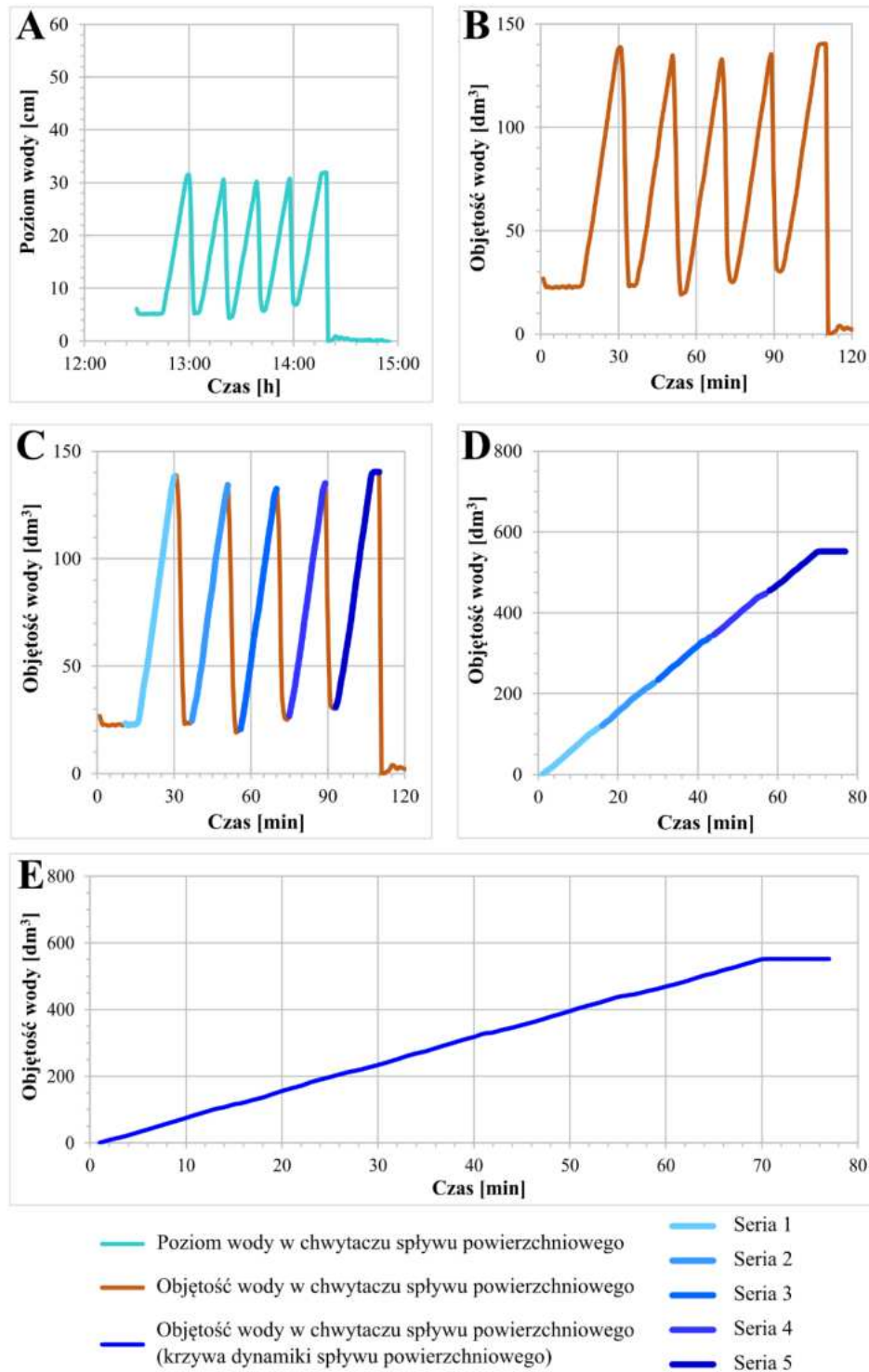
Plan eksperymentu							Wyniki eksperymentu			
Grupa opadów	Natężenie opadu	Suma opadu	Czas trwania [min]	Początkowe warunki wilgotnościowe gruntu	Współczynnik Chomicza α	Kategoria Chomicza	Natężenie opadu	Suma opadu	Współczynnik Chomicza α	Kategoria Chomicza
	[mm/h]	[mm]					[mm/h]	[mm]		
Słabe, długotrwałe	4	24,0	360	D	1,26	A0	3,6	21,4	1,1	A0
				W			3,6	21,4		A0
	8	24,0	180	D	1,79	A1	7,9	23,7	1,8	A1
				W			8,9	26,7		A1
	16	24,0	90	D	2,53	A2	17,7	26,6	2,8	A2
				W			17,8	26,7		A2
	30	25,0	50	D	3,54	A3	30,6	25,5	3,6	A3
				W			30,6	25,5		A3
Intensywne, krótkotrwałe	40	30,0	45	D	4,47	A4	43,7	32,8	4,9	A4
				W			40,8	30,6		4,6
	50	50,0	60	D	6,45	B1	58,0	58,0	7,5	B1
				W			61,5	61,5		7,9
	60	70,0	7	D	8,37	B2	74,1	86,5	10,3	B2
				W			67,5	78,8		9,4

6.2. Metodyka interpretacji krzywych dynamiki spływu powierzchniowego

Chwytnice spływu powierzchniowego charakteryzowały się ograniczoną pojemnością, wynoszącą 300 dm³, natomiast program symulacji opadów zakładał objętość opadu wynoszącą od 468 do 1359 dm³. Z tego powodu niezbędne było opróżnianie chwytnicy spływu powierzchniowego w trakcie trwania symulacji w celu zapobiegnięcia przelaniu się wody. W trakcie symulacji w zależności od natężenia opadu zaplanowano od jednej do czterech krótkich przerw. Podczas przerw w symulacji opadu opróżniano chwytnice, w których poziom wody wynosił ponad połowę chwytnicy. Podczas symulowanych opadów opróżnienia wymagały tylko chwytnice spływu powierzchniowego na poletku z asfaltem oraz kostką.

Interpretacja wyników zarejestrowanych w terenie odbywała się w warunkach kameralnych. Zarejestrowane w terenie zmiany poziomu wody w chwytnicach spływu powierzchniowego (ryc. 6.7A) przeliczono na objętość wody (ryc. 6.7B), wykorzystując

wyznaczoną w warunkach laboratoryjnych korelację liniową (1 cm wody w chwytaczu jest równy 4,41 dm³ wody). Następnie na uzyskanym wykresie wyznaczono okresy wzrostu objętości wody (ryc. 6.7C). Wyznaczone okresy przeniesiono na krzywą kumulacyjną (ryc. 6.7D), do każdego z kolejnych okresów dodając najwyższą objętość zarejestrowaną podczas poprzedniego okresu wzrostu poziomu wody. Rezultatem przeprowadzonej korekty była krzywa dynamiki spływu powierzchniowego dla określonej kategorii opadu, określonego poletka testowego i określonych początkowych warunków wilgotnościowych gruntu (ryc. 6.7E).



Ryc. 6.7. Etapy konstruowania krzywej dynamiki spływu powierzchniowego na przykładzie poletka z asfaltem podczas opadu B2 (18.07.2022): A) Poziom wody zarejestrowany przez *Levellogger* w chwytaczu spływu powierzchniowego; B) Objętość wody zarejestrowana przez *Levellogger* w chwytaczu spływu powierzchniowego; C) Wyznaczenie okresów wzrostu objętości wody podczas symulacji opadu; D) Złączone w krzywą dynamiki spływu powierzchniowego okresy wzrostu objętości wody podczas symulacji opadu; E) Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego

7. Wyniki badań

Przeprowadzone badanie eksperymentalne z wykorzystaniem symulatora opadów umożliwiły obliczenie bilansu wodnego dla stanowiska badawczego w postaci 28 wykresów, zebranych w załączniku 1. Ponadto efektem eksperymentu jest 56 krzywych dynamiki spływu powierzchniowego, przedstawionych w załączniku 2. Prezentują one dynamikę spływu powierzchniowego wyniki w zależności od:

- kategorii symulowanych opadów,
- typów pokrycia powierzchni terenu
- oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu.

Dodatkowo porównano krzywe dynamiki spływu powierzchniowego w zależności od kategorii symulowanych opadów, typu pokrycia powierzchni terenu oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu (załącznik 3).

W celu interpretacji pozyskanych w terenie wyników symulowane opady, na potrzeby niniejszej pracy, podzielono na dwie grupy: opady słabe, długotrwałe (A0, A1, A2, A3) oraz opady intensywne, krótkotrwałe (A4, B1, B2). Podział ten wykonano na podstawie planowanych czasów trwania i sum opadów. Opady słabe, długotrwałe cechują się sumą opadów wynoszącą ok. 25 mm oraz malejącym czasem trwania wraz ze wzrostem ich natężenia. Opady intensywne, krótkotrwałe cechują się zbliżonym czasem trwania (ok. 60 minut) i rosnącymi: sumą opadów oraz natężeniem.

7.1. Bilans wodny terenowego stanowiska badawczego

Bilans wodny terenowego stanowiska badawczego wyraża uproszczone równanie bilansu wodnego Pencka-Oppokowa (5.1). Bilans ten został szczegółowo omówiony w rozdziale 5.2 „Bilans wodny stanowiska”.

7.1.1. Bilans objętościowy

Bilans wodny terenowego stanowiska badawczego w ujęciu objętościowym wykonano dla poszczególnych kategorii symulowanego opadu, typów pokrycia powierzchni terenu oraz warunków wilgotnościowych gruntu. Wszystkie wyniki zebrano w załączniku 1A.

Podczas badań terenowych sumę **opadu** obliczano na podstawie odczytów zużycia wody z przepływomierza (opad obliczony) oraz mierzono z wykorzystaniem deszczomierza Hellmanna (opad pomierzony). Planowana suma opadów była zbliżona do zrealizowanego opadu obliczonego (tab. 7.1, ryc. 7.1), a różnica wynosiła nie więcej niż 2,5 mm i nie przekroczyła 10% sumy opadu.

Wysokości opadów obliczonych i pomierzonych różniły się między sobą w zależności od kategorii symulowanego opadu oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu (ryc. 7.1). Zróżnicowanie to wynikało z charakterystyki zastosowanego symulatora opadów, który cechował się 80-procentową równomiernością opadu, tj. w różnych punktach nawadnianego obszaru (stanowiska badawczego) wysokość opadu mogła różnić się o $\pm 10\%$ w stosunku do opadu obliczonego na podstawie odczytów z przepływomierza. Dla opadu A0 w warunkach suchych (D) wysokość opadu obliczonego wyniosła 26,4 mm, a zatem nad stanowiskiem badawczym wahała się w przedziale $23,8 \div 29$ mm. Opad pomierzony (21,4 mm) był niższy niż dolna granica przedziału wynikającego z 80-procentowej równomierności opadu. Dysze symulatora opadów zlokalizowane były 1,5 m powyżej deszczomierza Hellmanna, zatem różnica ta mogła wynikać z parowania kropelek wody w drodze od dysz do powierzchni poletka testowego.

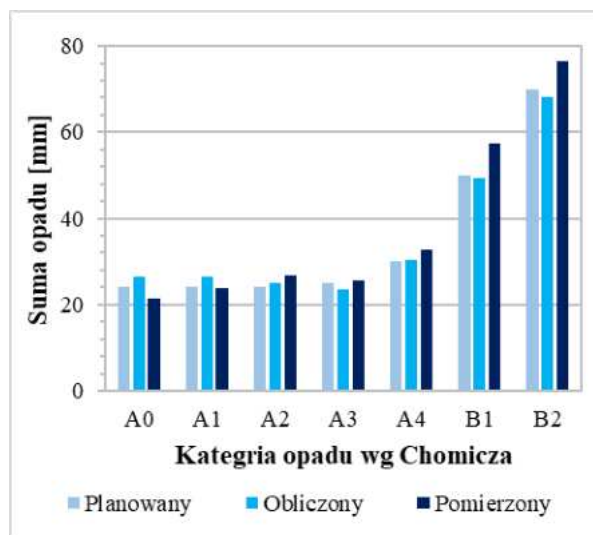
Podczas opadów słabych, krótkotrwałych (A0, A1, A2, A3) największą różnicę pomiędzy opadem pomierzonym a obliczonym zaobserwowano podczas opadu silnego A0 – w warunkach suchych (D) wyniosła ona 5,0 mm, a w warunkach wilgotnych (W) 4,8 mm. W przypadku opadów intensywnych, długotrwałych (A4, B1, B2) różnica pomiędzy opadem obliczonym a pomierzonym w warunkach suchych (D) nie przekroczyła 8,4 mm (opad nawalny B2), a w warunkach wilgotnych (W) 11,1 mm (opad nawalny B2). Z wyjątkiem opadu A0 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W) oraz opadu A1 w suchych warunkach suchych (D) opady pomierzone były wyższe od opadów obliczonych, jednakże mieściły się w zakresie 80% równomierności opadu, gwarantowanej przez zastosowany symulator.

Do obliczenia bilansu wodnego stanowiska badawczego przyjęto opady obliczone. Dla poszczególnych kategorii symulowanego opadu w zależności od warunków gruntowych nie różniły się one o więcej niż 0,6 mm. Jednorodność symulowanych opadów była na tyle wysoka, iż przyjęto opady symulowane w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) jako tożsame.

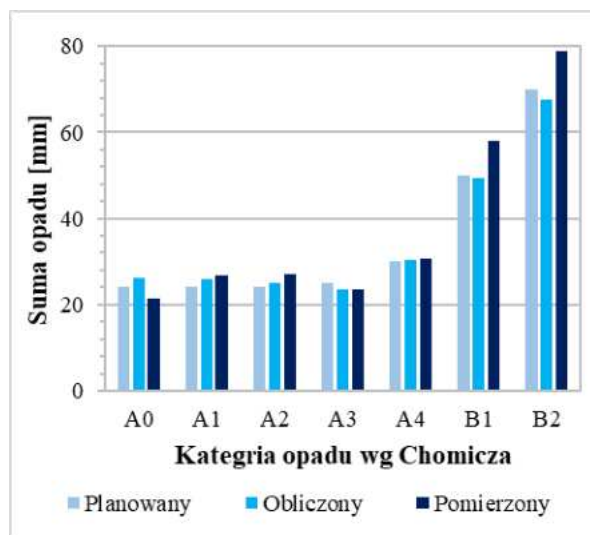
Tab. 7.1. Zestawienie opadu planowanego i zrealizowanego: obliczonego oraz pomierzonego
D – warunki suche, W – warunki wilgotne

Grupa opadów	Kategoria opadu	Początkowe warunki wilgotnościowe gruntu	Opad planowany	Opad obliczony	Opad pomierzony	
			[mm]	[mm]	[mm]	
Słabe, długotrwałe	A0	D	24,0	26,4	21,4	
	A1		24,0	26,5	23,7	
	A2		24,0	24,9	26,9	
	A3		25,0	23,6	25,5	
Intensywne, krótkotrwałe	A4		30,0	30,3	32,8	
	B1		50,0	49,5	57,5	
	B2		70,0	68,0	76,4	
Słabe, długotrwałe	A0		W	24,0	26,2	21,4
	A1			24,0	25,9	26,7
	A2			24,0	24,9	27,0
	A3			25,0	23,4	23,5
Intensywne, krótkotrwałe	A4			30,0	30,5	30,6
	B1	50,0		49,5	58,0	
	B2	70,0		67,7	78,8	

WARUNKI SUCHE (D)



WARUNKI WILGOTNE (W)



Ryc. 7.1. Zestawienie opadu planowanego i zrealizowanego: obliczonego oraz pomierzonego w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Określenie chwilowych wysokości **parowania** w warunkach terenowych jest trudne. Zazwyczaj ten składnik bilansu wodnego określany jest w sposób pośredni za pomocą różnych wzorów empirycznych, m. in. wzoru Zajkova, Dawidowa, Tichomirowa, Penmana, Iwanowa czy Baca lub Schmucka (Grabarczyk i in. 1990; Sasik 1992; Bac i in. 1998; Kossowska-Cezak i in. 2000; Jaworski 2004; Kossowska-Cezak, Bajkiewicz-Grabowska 2008; Prządka 2009;

Granger, Hedstorm 2011; Żarnowiec i in. 2016). Na stanowisku terenowym parowanie jest określone z wykorzystaniem poletka testowego o powierzchni całkowicie nieprzepuszczalnej. Na poletku tym nie występuje infiltracja, a zatem przy znajomości opadu i spływu powierzchniowego, możliwe jest obliczenie parowania (7.1):

$$E = P - H_p \quad (7.1)$$

Proces parowania podczas eksperymentu można podzielić na dwa etapy (7.2):

$$E = E_1 + E_2 \quad (7.2)$$

gdzie: E – całkowite parowanie na stanowisku badawczym,

E_1 – parowanie w trakcie drogi kroplel wody z dysz symulatora do powierzchni stoku,

E_2 – parowanie wody, spływającej po poletkach testowych.

Parowanie kroplel wody w powietrzu E_1 jest stałe na całym stanowisku, ponieważ nie zależy od typu pokrycia powierzchni poletka testowego. Druga składowa parowania E_2 jest zależna m in. od właściwości termicznych poszczególnych powierzchni, na przykład od jej barwy, czy pojemności cieplnej. W związku z ciemną barwą powierzchni asfaltowej można było spodziewać się największego parowania podczas spływu po powierzchni terenu z poletka z asfaltem. Ze powodu braku metod przeliczania parowania lub korygowania jego wielkości ze względu na rodzaj pokrycia powierzchni terenu, trudne było oszacowanie wysokości parowania dla poszczególnych poletek testowych.

Jako wskazówką posłużono się ewapotranspiracją z powierzchni trawiastej, obliczaną metodą Penmana-Montheithna przez stację pogodową *Davis Vantage Pro 2*, zlokalizowaną w pobliskim ogródku meteorologicznym, oddalonym 80 m od terenowego stanowiska badawczego. W zakresie symulowanych opadów składowa parowania E_2 na poletku z trawą wynosiła 5,8% ÷ 1,0% sumy opadu (średnio 3,0%), natomiast składowa parowania E_1 na poletku asfaltowym 29,0% ÷ 50,1% (średnio 42,9%) (tab. 7.2).

Na podstawie tych wielkości wywnioskowano, iż o wielkości parowania decyduje pierwszy etap procesu E_1 , podczas którego kroplel deszczu pokonują drogę z dysz na poletko testowe. Wobec braku możliwości uwzględnienia wpływu zróżnicowanego pokrycia powierzchni terenu na wielkość parowania, na potrzebę niniejszych badań przyjęto parowanie z poletka z asfaltem jako oszacowanie z góry parowania na pozostałych poletkach. Podczas opadów słabych, długotrwałych (A0, A1, A2, A3) parowanie na asfalcie wynosiło średnio 10,0 mm, natomiast podczas opadów intensywnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2) 23,6 mm (tab. 7.6).

Tab. 7.2. Oszacowanie wysokości parowania na stanowisku badawczym

D – warunki suche, W – warunki wilgotne,

E_1 – parowanie podczas drogi kropel wody z dysz na powierzchnię poletka z asfaltem,

E_2 – parowanie wody podczas spływu po powierzchni poletka z trawą

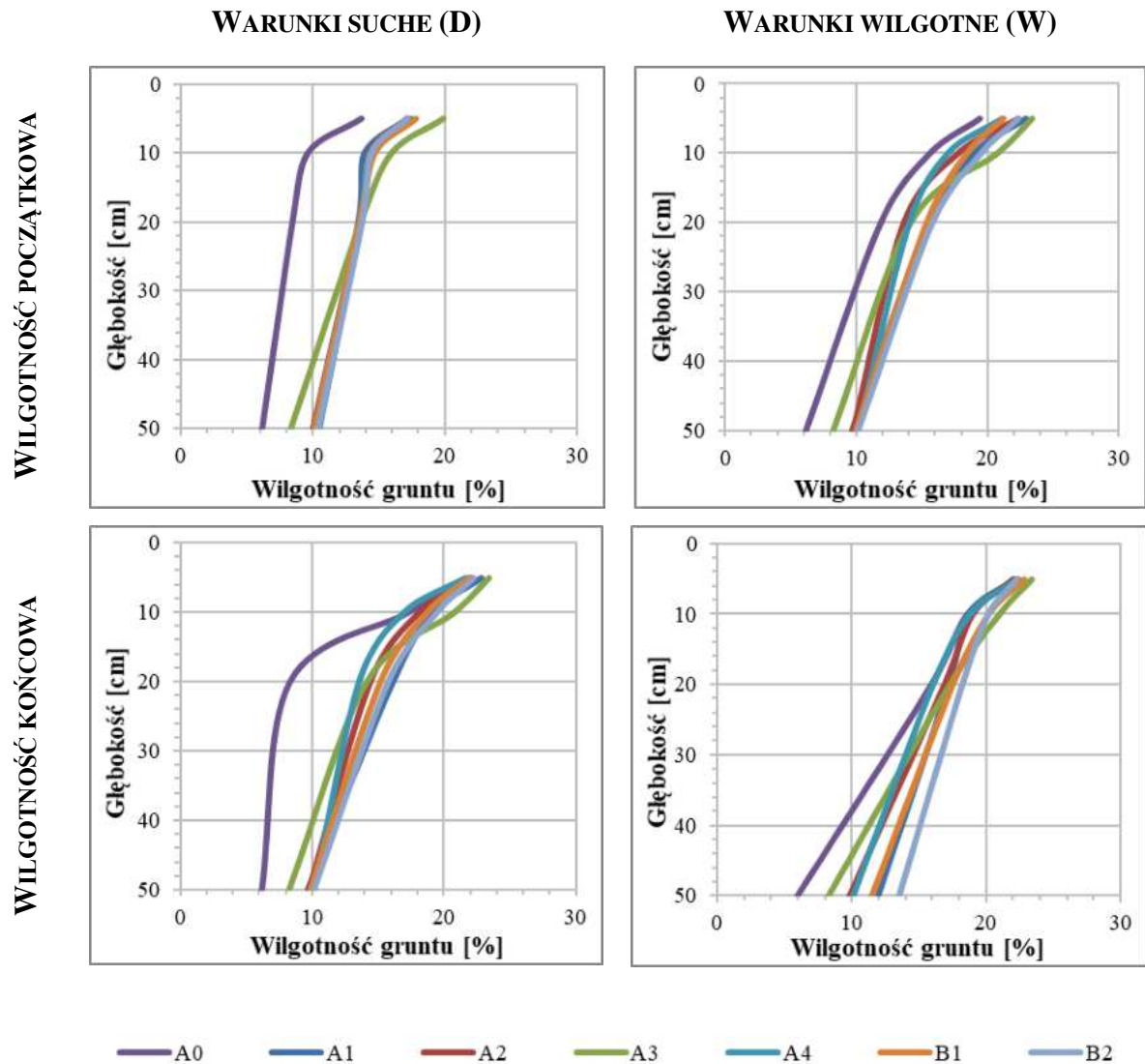
Grupa opadów	Kategoria opadu	Początkowe warunki wilgotnościowe gruntu	Opad P	E_1 asfalt	E_2 trawa	E_1 asfalt	E_2 trawa	
			[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	
Słabe, długotrwałe	A0	D	26,4	8,4	1,5	31,8	5,8	
	A1		26,5	10,4	1,3	39,3	4,9	
	A2		24,9	11,5	0,9	46,2	3,6	
	A3		23,6	10,3	0,4	43,6	1,9	
Intensywne, krótkotrwałe	A4		30,3	12,9	0,3	42,6	1,0	
	B1		49,5	24,5	0,9	49,5	1,9	
	B2		68,0	32,9	0,9	48,4	1,3	
Słabe, długotrwałe	A0		W	26,2	7,6	1,4	29,0	5,2
	A1			25,9	10,5	1,3	40,5	5,0
	A2			24,9	11,8	1,1	47,4	4,4
	A3	23,4		9,4	0,4	40,2	1,8	
Intensywne, krótkotrwałe	A4	30,5		13,2	0,4	43,3	1,3	
	B1	49,5		24,0	1,1	48,5	2,3	
	B2	67,7		34,3	1,0	50,7	1,5	
Średnia				35,5	15,8	0,9	42,9	3,0

Jednym z czynników warunkujących wielkość spływu powierzchniowego są **początkowe warunki wilgotnościowe gruntu**. Szczególnie na powierzchniach użytkowanych rolniczo na wilgotnym gruncie współczynnik spływu może być dwukrotnie większy niż na gruncie suchym (Li i in. 2011; Majewski i in. 2023). W celu uwzględnienia wpływu wilgotności gruntu, eksperyment terenowy z symulacją opadu wykonano w dwóch wariantach początkowych warunków wilgotnościowych gruntu – w warunkach suchych (D) oraz w warunkach wilgotnych (W). Istotne było zachowanie powtarzalnych początkowych warunków wilgotnościowych gruntu dla każdej symulowanej kategorii opadu.

Wilgotność gruntu mierzono na poletku testowym z ugiem na głębokościach: 5, 10, 20 i 50 cm. Czarny ugiem jest powierzchnią naturalną, nieporośniętą roślinnością, stanowił zatem poletko testowe o dużym potencjale infiltracyjnym. Początkowe i końcowe warunki wilgotnościowe gruntu przedstawiono w tabeli 7.3 oraz na rycinie 7.2.

Wzrost wilgotności gruntu w wyniku symulowania opadu był obserwowany w płytkich warstwach gruntu. Na głębokości 5 cm przed rozpoczęciem symulacji wilgotność wynosiła 15 ÷ 20% (warunki suche) i 20 ÷ 23% (warunki wilgotne), natomiast po jej zakończeniu – 20 ÷ 23% (warunki suche) i 22 ÷ 23% (warunki wilgotne). W głębszych warstwach gruntu nie obserwowano wzrostu wilgotności – na 50 cm w warunkach suchych przed symulacją opadu

i po jej zakończeniu wilgotność wynosiła ok. 10%, natomiast w warunkach wilgotnych – 10 ÷ 15%. Krótkotrwały opad nie dociera zatem do głębokości 50 cm poniżej poziomu terenu. Najdłuższy z symulowanych i cechujący się najmniejszą intensywnością opad A0 charakteryzował się znacznie niższymi wartościami początkowych wilgotności gruntu zarówno w warunkach suchych (D) – na 5 cm w warunkach suchych początkowo wilgotność wynosiła 13,7%, a na 50 cm 6,2%.



Ryc. 7.2. Początkowa i końcowa wilgotność gruntu podczas eksperymentów terenowych w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Tab. 7.3. Warunki wilgotnościowe gruntu podczas eksperymentu terenowego
Grunt – początkowe warunki wilgotnościowe gruntu, D – warunki suche, W – warunki wilgotne,
5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm – głębokość sondy poniżej powierzchni gruntu

Data	Grunt	Opad		Czas trwania opadu		Początkowa wilgotność gruntu [%]				Końcowa wilgotność gruntu [%]			
		[mm/h]	[-]	Początek	Koniec	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm
07.07.2022	D	4	A0	10:56	17:17	13,7	9,6	8,5	6,2	21,9	17,3	8,3	6,2
08.07.2022	W			08:56	15:18	19,4	15,6	11,9	6,2	22,4	18,6	15,9	6,0
22.07.2022	D	8	A1	10:00	13:08	17,2	13,9	13,5	10,0	22,8	19,1	16,1	9,7
	W			13:17	16:30	23,0	19,0	15,6	9,7	22,1	18,6	17,2	12,0
20.07.2022	D	16	A2	10:30	12:09	17,2	14,2	13,6	10,0	22,1	18,1	14,4	9,8
	W			12:26	14:04	22,3	17,7	13,6	9,8	22,0	19,0	16,9	9,8
11.07.2022	D	30	A3	10:05	10:59	19,9	16,0	13,6	8,3	23,4	20,8	14,1	8,2
	W			11:27	12:20	23,4	20,8	14,1	8,2	23,4	21,0	17,3	8,3
15.07.2022	D	40	A4	10:54	11:45	17,4	14,3	13,6	10,5	21,6	17,0	13,6	10,2
	W			12:46	13:36	21,1	17,0	14,0	10,2	22,3	18,8	16,1	10,2
13.07.2022	D	50	B1	10:50	12:07	17,8	14,7	13,6	10,2	21,9	18,7	15,2	9,8
	W			13:06	14:19	21,2	18,4	15,4	10,0	22,9	20,2	17,5	11,5
18.07.2022	D	60	B2	10:50	12:20	17,2	14,4	13,7	10,4	22,3	19,5	15,8	10,2
	W			12:46	14:15	22,3	19,5	15,8	10,2	22,3	20,2	18,3	13,6

Infiltracji nie obserwowano na poletku z asfaltem ze względu na jego nieprzepuszczalny charakter (tab. 7.4, 7.5, 7.6). Na kostce przy słabych, długotrwałych opadach (A0, A1, A2, A3) obserwowano wysoką infiltrację (średnio 10,3 mm), natomiast przy opadach intensywnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2) nastąpił jej wyraźny spadek do średnio 4,4 mm. Pomiędzy opadami A2 i A3 zaobserwowano największą zmienność wysokości infiltracji – spadek z 10,7 mm (D) i 8,5 mm (W) do 2,7 mm i 3,2 mm. Kostka betonowa cechuje się fugami, przez które deszcze o małych natężeniach infiltrują w głąb podłoża, na którym jest ułożona. W przypadku podłoża piaszczystego przy opadzie kategorii A3 i silniejszych dochodzi do wysycenia pojemności infiltracyjnej tego podłoża, a zatem ograniczenia infiltracji oraz intensyfikacji spływu powierzchniowego na kostce.

Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) podczas opadów słabych, długotrwałych (A0, A1, A2, A3), całkowita objętość wody, która nie odparowała, uczestniczyła w procesie infiltracji (średnio 15,1 mm na ugorze i 15,2 mm na trawie). Wyjątkiem było poletko z ugorem podczas opadu A3, na którym zaobserwowano formowanie się spływu powierzchniowego. Pomimo wystąpienia spływu powierzchniowego wysokość infiltracji na poletku z ugorem przy opadzie A3 nie spadła o więcej niż 0,8 mm w stosunku do opadu kategorii niższej (A2). Podczas opadów intensywnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2) średnia wysokość infiltracji na ugorze

wynosiła 18,4 mm, a na trawie 24,5 mm. Na ugorze podczas każdego z opadów tej grupy obserwowano spływ powierzchniowy, jednakże ze względu na wzrost sum symulowanych opadów, występował też wzrost wysokości infiltracji. Na trawie obserwowano infiltrację całego opadu przy każdym z symulowanych opadów z wyjątkiem opadu B1 w warunkach wilgotnych oraz opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W). Wystąpienie spływu powierzchniowego obniżyło infiltrację na trawie o 3,2 mm w warunkach wilgotnych (W) i o 0,4 mm w warunkach suchych (D).

Infiltracja na kostce była niższa niż na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa). Zaobserwowano, iż na skutek wzrostu intensywności opadu na kostce betonowej dochodzi do wysycenia pojemności infiltracyjnej piaszczystego podłoża, a zatem spadku wysokości infiltracji na rzecz wzrostu wysokości spływu powierzchniowego. Z wyjątkiem kostki podczas opadów słabych, długotrwałych Wyższą infiltrację obserwowano w warunkach suchych (D), z wyjątkiem części opadów słabych, krótkotrwałych (A0, A1, A2) na kostce.

Spływ powierzchniowy na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka) formował się podczas każdego z symulowanych opadów. Na asfalcie na wysokość spływu powierzchniowego nie miały wpływu początkowe warunki wilgotnościowe gruntu. Przy opadach słabych, długotrwałych (A0, A1, A2, A3) średnia wysokość spływu powierzchniowego wynosiła 15,2 mm. Obserwowano wzrost wraz z intensywnością opadów – dla opadów intensywnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2) wynosiła 25,6 mm. Na poletku z kostką, w przypadku opadów A0, A1 i A2 wielkość spływu powierzchniowego nie była wysoka i wynosiła poniżej 5 mm. Wzrost wielkości spływu zarejestrowano przy najintensywniejszym opadzie z grupy opadów słabych, długotrwałych – A3. W porównaniu z opadem A2, spływ wzrósł o 7,9 mm w warunkach suchych i 6,2 mm w warunkach wilgotnych. Na skutek wysycenia pojemności infiltracyjnej piaszczystego podłoża, na którym ułożona była kostka, podczas opadów intensywnych, krótkotrwałych spływ powierzchniowy wzrósł do średnio 21,2 mm. Warunki wilgotne (W) charakteryzowały się wyższymi wysokościami spływu powierzchniowego, aniżeli warunki suche (D).

Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) podczas opadów słabych, długotrwałych (A0, A1, A2, A3) formowanie się spływu powierzchniowego zaobserwowano jedynie na ugorze przy opadzie A3 (0,7 mm w warunkach suchych, 3,2 mm w warunkach wilgotnych). Wraz ze wzrostem natężenia opadu na ugorze wzrastała wysokość spływu powierzchniowego do średnio 7,2 mm, a maksymalnie 12,9 mm (B2 w warunkach wilgotnych). Na trawie spływ powierzchniowy wystąpił tylko podczas nawalnych opadów deszczu (kategoria B).

W warunkach suchych (D) przy opadzie B2 wyniósł 1,4 mm, natomiast w warunkach wilgotnych (W) przy opadzie B1 1,4 mm, a B2 5,0 mm (średnio 1,1 mm).

Przy stałej wartości parowania na całym stanowisku badawczym, im wyższa była infiltracja, tym niższy spływ powierzchniowy. Na asfalcie cały opad, który nie odparował, przekształcił się w spływ powierzchniowy ze względu na nieprzepuszczalny charakter tej powierzchni. Kostka betonowa cechowała się ograniczoną przepuszczalnością w postaci fug, którymi woda z opadu dostawała się do piaszczystego podłoża. Podłoże to jednakże cechowało się ograniczoną pojemnością infiltracyjną, po której przekroczeniu obserwowano znaczne zintensyfikowanie procesu spływu powierzchniowego. Na obu powierzchniach przekształconych obserwowano laminarną formę spływu powierzchniowego. Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) spływ powierzchniowy był mniejszy niż na asfalcie i kostce. Formował się on przede wszystkim w postaci strug.

Przy opadzie B2 wysokość parowania była niższa w warunkach suchych (D; 32,9 mm) niż w wilgotnych (W; 34,3 mm) (ryc. 7.3). Wyższą infiltrację obserwowano w warunkach suchych (D) na kostce (26,7 mm) i trawie (34,7 mm), natomiast na ugorze (5,8 mm) w warunkach wilgotnych (W). Najwyższy spływ powierzchniowy wystąpił na asfalcie (35,1 mm w warunkach suchych, 33,4 mm w warunkach wilgotnych). Na kostce był on niższy o 1,7 mm w warunkach suchych (D) i 4,5 mm w warunkach wilgotnych (W). Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa), spływ powierzchniowy wynosił: 8,4 ÷ 12,9 mm na ugorze oraz 0,4 ÷ 5,0 mm na trawie.

Wszystkie wyniki objętościowego bilansu wodnego dla symulowanych opadów deszczu zostały zebrane w załączniku 1A.

Tab. 7.4. Objętościowy bilans wodny słabych, długotrwałych opadów (A0, A1, A2, A3) przeprowadzonego eksperymentu terenowego
D – warunki suche, W – warunki wilgotne

Kategoria opadu	Początkowe warunki wilgotnościowe gruntu	Pokrycie powierzchni terenu	Składowe bilansu wodnego			
			Opad <i>P</i>	Parowanie <i>E</i>	Spływ <i>H_p</i>	Infiltracja <i>I</i>
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A0	D	Asfalt	26,4	8,4	18,0	0,0
		Kostka			1,3	16,7
		Ugórze			0,0	18,0
		Trawa			0,0	18,0
	W	Asfalt	26,2	7,6	18,6	0,0
		Kostka			2,9	15,7
		Ugórze			0,0	18,6
		Trawa			0,0	18,6
A1	D	Asfalt	26,5	10,4	16,1	0,0
		Kostka			2,8	13,3
		Ugórze			0,0	16,1
		Trawa			0,0	16,1
	W	Asfalt	25,9	10,5	15,4	0,0
		Kostka			4,2	11,2
		Ugórze			0,0	15,4
		Trawa			0,0	15,4
A2	D	Asfalt	24,9	11,5	13,4	0,0
		Kostka			2,7	10,7
		Ugórze			0,0	13,4
		Trawa			0,0	13,4
	W	Asfalt	24,9	11,8	13,1	0,0
		Kostka			4,6	8,5
		Ugórze			0,0	13,1
		Trawa			0,0	13,1
A3	D	Asfalt	23,6	10,3	13,3	0,0
		Kostka			10,6	2,7
		Ugórze			0,7	12,6
		Trawa			0,0	13,3
	W	Asfalt	23,4	9,4	14,0	0,0
		Kostka			10,8	3,2
		Ugórze			0,7	13,3
		Trawa			0,0	14,0

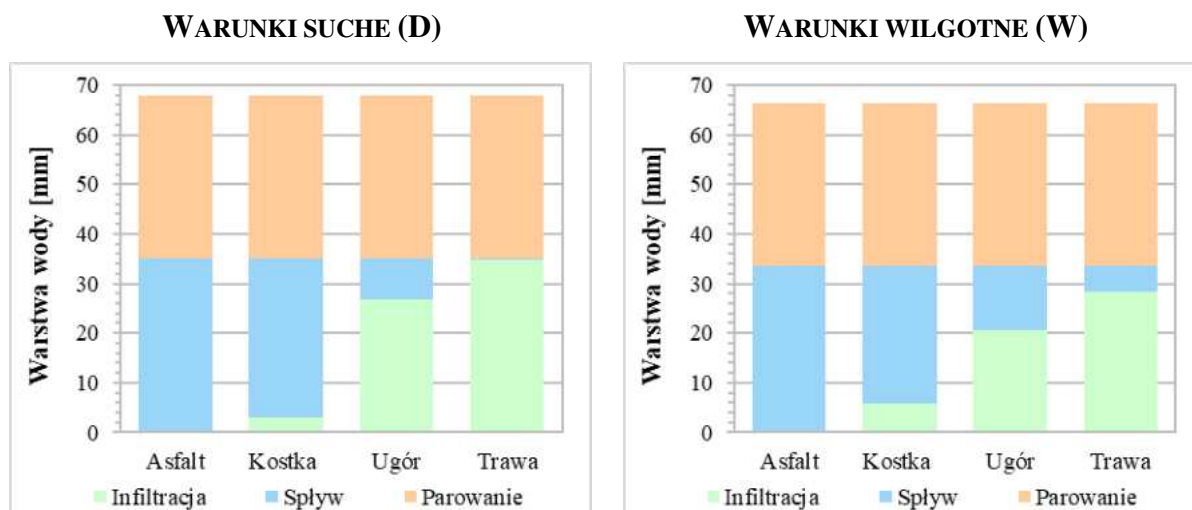
Tab. 7.5. Objętościowy bilans wodny intensywnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2) przeprowadzonego eksperymentu terenowego

D – warunki suche, W – warunki wilgotne

Kategoria opadu	Początkowe warunki wilgotnościowe gruntu	Pokrycie powierzchni terenu	Składowe bilansu wodnego			
			Opad <i>P</i>	Parowanie <i>E</i>	Splyw <i>H_P</i>	Infiltracja <i>I</i>
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A4	D	Asfalt	30,3	12,9	17,4	0,0
		Kostka			12,4	5,0
		Ugóór			3,2	14,2
		Trawa			0,0	17,4
	W	Asfalt	30,5	13,2	17,3	0,0
		Kostka			11,6	5,7
		Ugóór			4,2	13,1
		Trawa			0,0	17,3
B1	D	Asfalt	49,5	24,5	25,0	0,0
		Kostka			21,9	3,1
		Ugóór			6,6	18,4
		Trawa			0,0	25,0
	W	Asfalt	49,5	24,0	25,5	0,0
		Kostka			21,5	4,0
		Ugóór			8,1	17,4
		Trawa			1,4	24,1
B2	D	Asfalt	68,0	32,9	35,1	0,0
		Kostka			32,1	3,0
		Ugóór			8,4	26,7
		Trawa			0,4	34,7
	W	Asfalt	67,7	34,3	33,4	0,0
		Kostka			27,6	5,8
		Ugóór			12,9	20,5
		Trawa			5,0	28,4

Tab. 7.6. Średnie wartości składowych objętościowego bilansu wodnego dla opadów słabych, długotrwałych (A0, A1, A2, A3) oraz silnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2) przeprowadzonego eksperymentu terenowego

Grupa opadów	Pokrycie powierzchni terenu	Składowe bilansu wodnego			
		Opad <i>P</i>	Parowanie <i>E</i>	Splyw <i>H_P</i>	Infiltracja <i>I</i>
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Słabe, długotrwałe	Asfalt	25,2	15,8	15,2	0,0
	Kostka	25,2	10,0	5,0	10,3
	Ugóór	25,2	10,0	0,2	15,1
	Trawa	25,2	10,0	0,0	15,2
Intensywne, krótkotrwałe	Asfalt	49,3	23,6	25,6	0,0
	Kostka	49,3	23,6	21,2	4,4
	Ugóór	49,3	23,6	7,2	18,4
	Trawa	49,3	23,6	1,1	24,5



Ryc. 7.3. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.1.2. Bilans procentowy

Do analizy bilansu wodnego wykorzystano także ujęcie procentowe, gdzie poszczególne składowe bilansu charakteryzowane są za pomocą udziałów procentowych sumy opadów ($P = 100\%$).

Udział **parowania** w bilansie wodnym stanowiska wynosił średnio 39,8% przy słabych, długotrwałych opadach oraz 47,1% przy intensywnych, krótkotrwałych opadach. Z wyjątkiem opadu A0, udział infiltracji w bilansie wodnym nie przekraczał 40,0% (tab. 7.7, 7.8, 7.9). Parowanie nie zależało od warunków wilgotnościowych gruntu i, zgodnie z założeniami eksperymentu terenowego, było stałe dla każdego z poletek testowych.

Poletko z asfaltem charakteryzuje się całkowitą nieprzepuszczalnością, a zatem nie obserwowano na nim **infiltracji** wody opadowej w podłoże. Na kostce infiltracja była wysoka przy słabych, długotrwałych opadach (średnio 39%) i wraz ze wzrostem intensywności opadu jej udział w bilansie wodnym zmniejszył się do średnio 10,4%. Największy spadek zauważono między opadami A2 i A3 – w warunkach suchych (D) wyniósł on 31,3%, a w wilgotnych (W) 20,4%. Przy opadzie A3 na kostce doszło do wysycenia pojemności infiltracyjnej piaszczystego podłoża i przekształcenia w splyw powierzchniowy wody opadowej, która przy opadach o mniejszych natężeniach infiltrowała w fugi między kostką.

Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) przy słabych, długotrwałych opadach (A0, A1, A2, A3) w podłoże infiltrowała cała woda opadowa, z wyjątkiem opadu A3 na ugorze. Średni udział infiltracji w bilansie wodnym przy tych opadach na ugorze wyniósł 59,9%, a na

trawie 60,2%. Podczas opadu A3 w warunkach suchych (D) na ugorze w podłoże zinfiltrowało 53,3% opadu, a w warunkach wilgotnych (W) 56,8%. Podczas opadów intensywnych, długotrwałych (A4, B1, B2) zaobserwowano spadek udziału infiltracji do średnio 38,6% na ugorze i 51,1% na trawie. Wystąpienie spływu powierzchniowego na trawie przy nawalnych opadach deszczu (B1, B2) w warunkach wilgotnych (W) obniżyło udział infiltracji do 48,7% (B1) i 42,0% (B2), a przy opadzie B2 w warunkach suchych (D) do 51,1%. Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) infiltracja była większa w warunkach suchych (D), podobnie jak na kostce przy opadach intensywnych, krótkotrwałych, natomiast przy słabych, krótkotrwałych – w warunkach wilgotnych (W).

Na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka) **spływ powierzchniowy** formował się podczas każdego z symulowanych opadów. Na asfalcie jego udział w bilansie wodnym wynosił średnio 60,2% przy opadach słabych, długotrwałych (A0, A1, A2, A3) oraz 52,9% przy intensywnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2), a na kostce 20,4% przy opadach słabych, długotrwałych i 42,4% przy opadach intensywnych, krótkotrwałych. Wraz ze wzrostem natężenia opadu, wzrastał udział spływu powierzchniowego w bilansie wodnym poletka z kostką. Największy wzrost udziału spływu powierzchniowego na kostce zaobserwowano pomiędzy opadami A2 (11,0% w warunkach suchych, 18,4% w warunkach wilgotnych) i A3 (44,9% w warunkach suchych, 46,1% w warunkach wilgotnych).

Spływ powierzchniowy na ugorze występował podczas opadu A3 i opadów intensywnej, długotrwałych (A4, B1, B2). Wraz ze wzrostem natężenia opadu wzrastał od 3,3% do 19%. W warunkach suchych spływ powierzchniowy był mniejszy (D; średnio 9,9%) niż w warunkach wilgotnych (W; średnio 13,1%). Na trawie spływ wystąpił tylko przy opadzie B1 w warunkach wilgotnych (W) oraz B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W). Jego udział wynosił od 0,6% do 7,3%.

Przy opadzie B2 parowanie było niższe w warunkach suchych (D; 48,3%) niż w wilgotnych (W; 50,7%) (ryc. 7.4). Wyższy udział infiltracji obserwowano w warunkach suchych (D) na ugorze (39,3%) i trawie (51,1%), natomiast na kostce (8,5%) w warunkach wilgotnych (W). Największy udział spływu powierzchniowego w bilansie wodnym zaobserwowano na asfalcie (51,7% mm w warunkach suchych, 49,3% w warunkach wilgotnych). Na kostce był on niższy o 4,4% w warunkach suchych (D) i o 8,5% w warunkach wilgotnych (W). Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa), wynosił $12,4 \div 19,0\%$ na ugorze oraz $0,6 \div 7,3\%$ na trawie.

Wszystkie wyniki procentowego bilansu wodnego dla symulowanych opadów deszczu zostały zebrane w załączniku 1B.

Tab. 7.7. Procentowy bilans wodny opadów silnych i ulewnych (A0-A4) przeprowadzonego eksperymentu terenowego

D – warunki suche, W – warunki wilgotne

Kategoria opadu	Początkowe warunki wilgotnościowe gruntu	Pokrycie powierzchni terenu	Składowe bilansu wodnego			
			Opad <i>P</i>	Parowanie <i>E</i>	Spływ <i>H_p</i>	Infiltracja <i>I</i>
			[%]	[%]	[%]	[%]
A0	D	Asfalt	100,0	31,7	68,3	0,0
		Kostka			4,9	63,4
		Ugór			0,0	68,3
		Trawa			0,0	68,3
	W	Asfalt	100,0	28,9	71,1	0,0
		Kostka			11,0	60,1
		Ugór			0,0	71,1
		Trawa			0,0	71,1
A1	D	Asfalt	100,0	39,3	60,7	0,0
		Kostka			10,5	50,2
		Ugór			0,0	60,7
		Trawa			0,0	60,7
	W	Asfalt	100,0	40,6	59,4	0,0
		Kostka			16,4	43,0
		Ugór			0,0	59,4
		Trawa			0,0	59,4
A2	D	Asfalt	100,0	46,1	53,9	0,0
		Kostka			11,0	42,9
		Ugór			0,0	53,9
		Trawa			0,0	53,9
	W	Asfalt	100,0	47,3	52,7	0,0
		Kostka			18,4	34,3
		Ugór			0,0	52,7
		Trawa			0,0	52,7
A3	D	Asfalt	100,0	43,5	56,5	0,0
		Kostka			44,9	11,6
		Ugór			3,3	53,2
		Trawa			0,0	56,5
	W	Asfalt	100,0	40,0	60,0	0,0
		Kostka			46,1	13,9
		Ugór			3,2	56,8
		Trawa			0,0	60,0

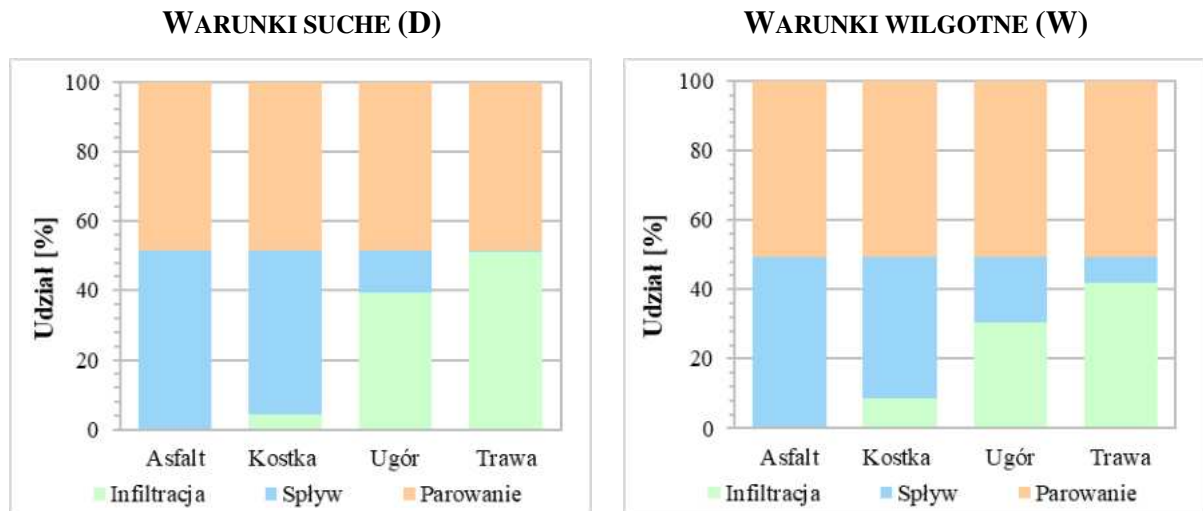
Tab. 7.8. Procentowy bilans wodny opadów nawalnych (B1-B2) przeprowadzonego eksperymentu terenowego

D – warunki suche, W – warunki wilgotne

Kategoria opadu	Początkowe warunki wilgotnościowe gruntu	Pokrycie powierzchni terenu	Składowe bilansu wodnego			
			Opad <i>P</i>	Parowanie <i>E</i>	Spływ <i>H_P</i>	Infiltracja <i>I</i>
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A4	D	Asfalt	100,0	42,5	57,5	0,0
		Kostka			41,1	16,4
		Ugór			10,6	46,9
		Trawa			0,0	57,5
	W	Asfalt	100,0	43,4	56,6	0,0
		Kostka			38,0	18,6
		Ugór			13,8	42,8
		Trawa			0,0	56,6
B1	D	Asfalt	100,0	49,5	50,5	0,0
		Kostka			44,3	6,2
		Ugór			13,3	37,2
		Trawa			0,0	50,5
	W	Asfalt	100,0	48,5	51,5	0,0
		Kostka			43,5	8,0
		Ugór			16,4	35,1
		Trawa			2,8	48,7
B2	D	Asfalt	100,0	48,3	51,7	0,0
		Kostka			47,3	4,4
		Ugór			12,4	39,3
		Trawa			0,6	51,1
	W	Asfalt	100,0	50,7	49,3	0,0
		Kostka			40,8	9,9
		Ugór			19,0	31,7
		Trawa			7,3	43,4

Tab. 7.9. Średnie wartości składowych procentowego bilansu wodnego dla opadów słabych, długotrwałych oraz silnych, krótkotrwałych

Grupa opadów	Pokrycie powierzchni terenu	Składowe bilansu wodnego			
		Opad <i>P</i>	Parowanie <i>E</i>	Spływ <i>H_P</i>	Infiltracja <i>I</i>
		[%]	[%]	[%]	[%]
Słabe, długotrwałe	Asfalt	100,0	39,8	60,2	0,0
	Kostka	100,0	39,8	20,4	39,9
	Ugór	100,0	39,8	0,7	59,5
	Trawa	100,0	39,8	0,0	60,2
Intensywne, krótkotrwałe	Asfalt	100,0	47,1	52,9	0,0
	Kostka	100,0	47,1	42,4	10,4
	Ugór	100,0	47,1	14,2	38,6
	Trawa	100,0	47,1	1,8	51,1



Ryc. 7.4. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.2. Dynamika spływu powierzchniowego

Dynamikę spływu powierzchniowego na terenowym stanowisku badawczym obserwowano z wykorzystaniem *Leveloggerów* zamontowanych w chwytaczach spływu powierzchniowego oraz *Barologgera*, znajdującego się w ogródku meteorologicznym przy Collegium Geographicum UAM. Rejestratory zaprogramowano z krokiem czasowym wynoszącym 1 minutę. Na podstawie pozyskanych w terenie danych zarejestrowano 56 krzywych dynamiki spływu powierzchniowego.

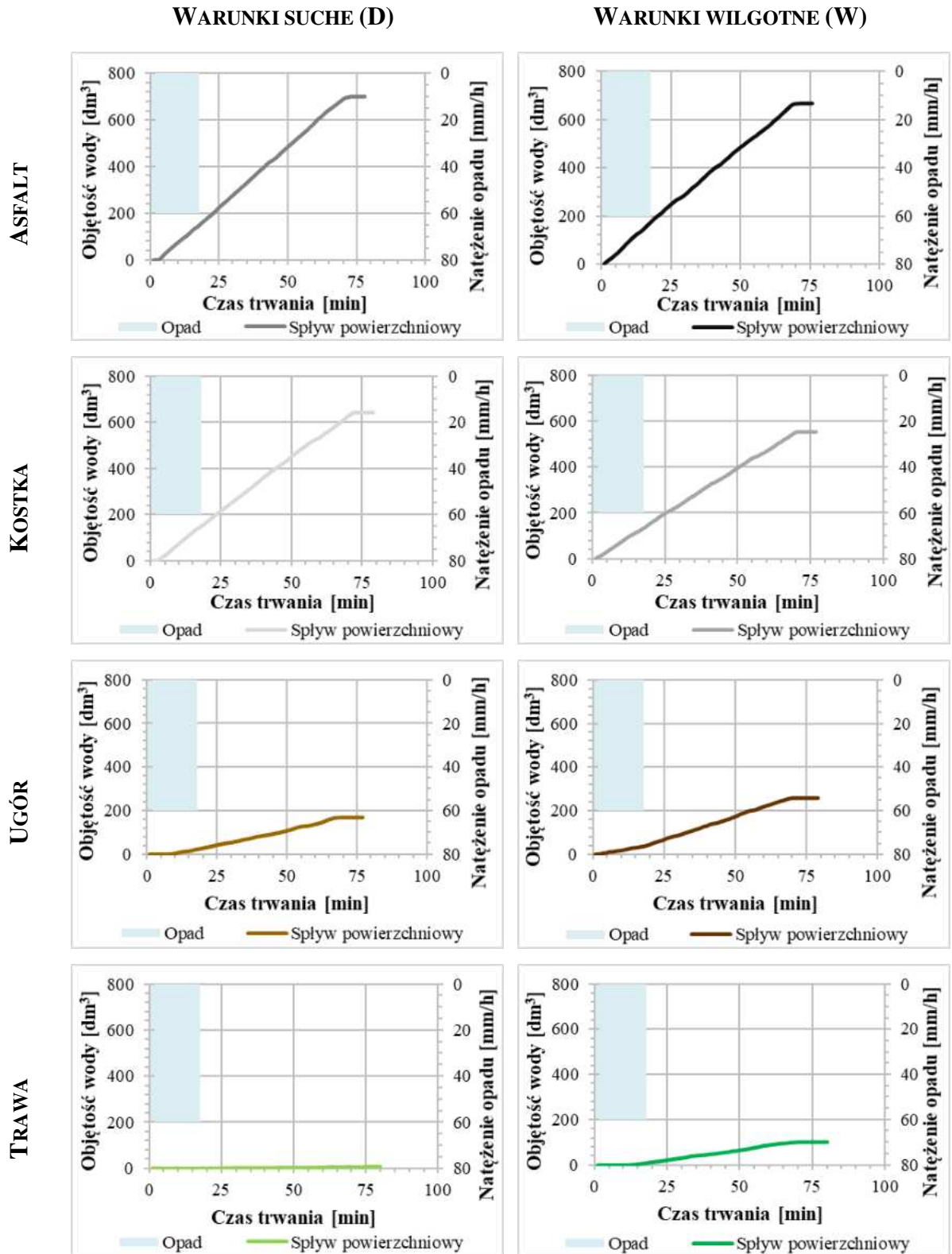
Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla poszczególnych kategorii symulowanych opadów, typów pokrycia powierzchni terenu oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu zebrano w załączniku 2. Dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W) krzywe dynamiki spływu powierzchniowego zaprezentowano na rycinie 7.5. Najwyższy spływ powierzchniowy zaobserwowano na asfalcie, a najniższy na trawie. Na asfalcie nie zauważono istotnego wpływu początkowych warunków wilgotnościowych gruntu na wysokość spływu powierzchniowego, na kostce spływ był większy w warunkach suchych (D), a na ugorze i trawie – w warunkach wilgotnych (W).

Porównanie krzywych dynamiki spływu powierzchniowego dla różnych typów pokrycia powierzchni i początkowych warunków wilgotnościowych gruntu w zależności od kategorii symulowanego opadu zebrano w załączniku 3A. Na rycinie 7.6 przedstawiono porównanie krzywych dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2. Największy spływ powierzchniowy niezależnie od początkowych warunków wilgotnościowych gruntu

obserwowano na asfalcie, a najniższy na trawie. Największe objętości spływu notowano w warunkach suchych (D) na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka), natomiast najmniejsze na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) w warunkach suchych (D).

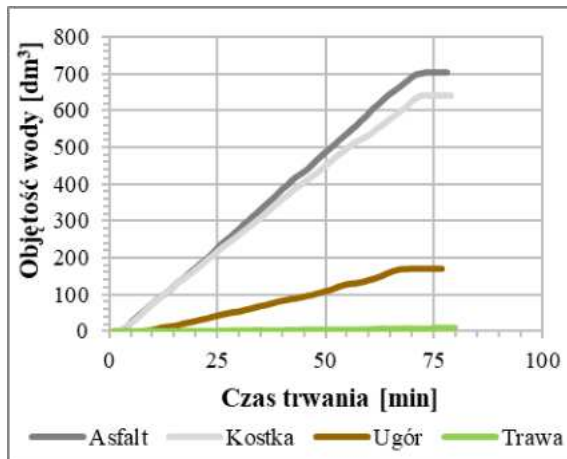
Porównanie krzywych dynamiki spływu powierzchniowego dla różnych kategorii symulowanego opadu i początkowych warunków wilgotnościowych gruntu w zależności od typu pokrycia powierzchni terenu zebrano w załączniku 3B. Porównanie krzywych dynamiki spływu powierzchniowego dla asfaltu zaprezentowano na rycinie 7.7. Najwyższe spływy powierzchniowe obserwowano podczas opadów nawalnych B1 i B2, niezależnie od początkowych warunków wilgotnościowych gruntów, a najniższe podczas najkrótszego z symulowanych opadów A3. Wysokość spływu podczas opadów silnych A0 oraz ulewnych A1 i A2 były zbliżone do opadów ulewnych A4, jednakże spływ podczas opadu A4 trwał znacznie krócej.

Porównanie krzywych dynamiki spływu powierzchniowego w zależności od początkowych warunków wilgotnościowych gruntu dla różnych kategorii symulowanego opadu oraz typów pokrycia powierzchni terenu zebrano w załączniku 3C. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 przedstawiono na rycinie 7.7. Na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka) wyższy spływ powierzchniowy obserwowano w warunkach suchych (D). Natomiast w warunkach wilgotnych (W) spływ powierzchniowy był większy na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa).

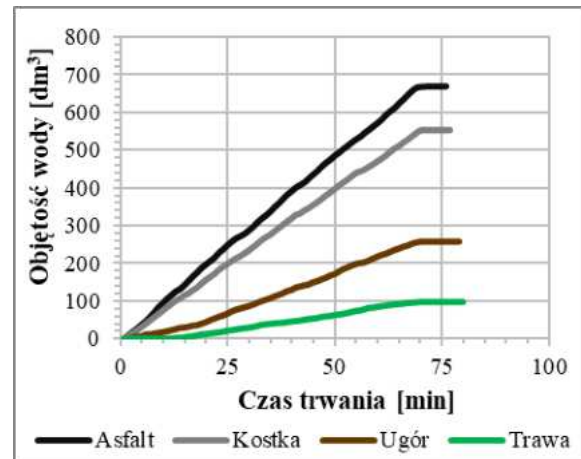


Ryc. 7.5. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

WARUNKI SUCHY (D)

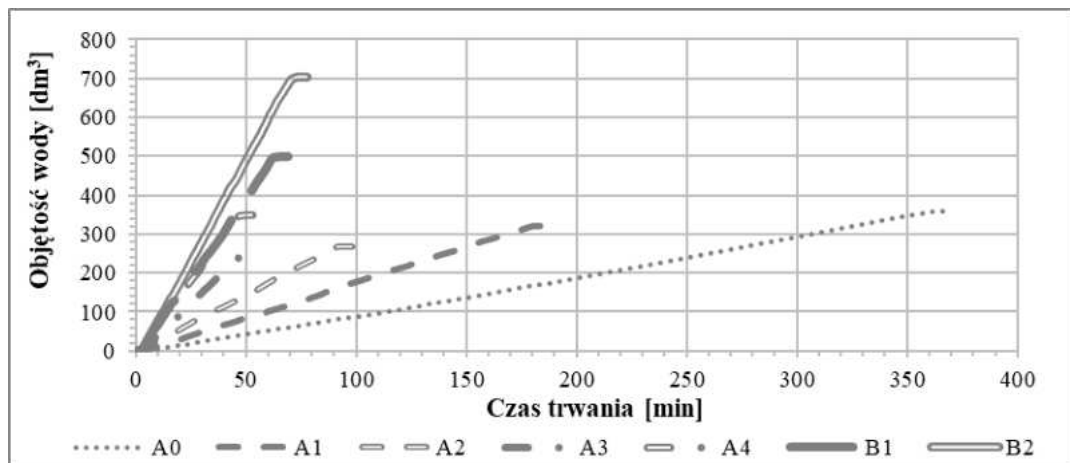


WARUNKI WILGOTNE (W)

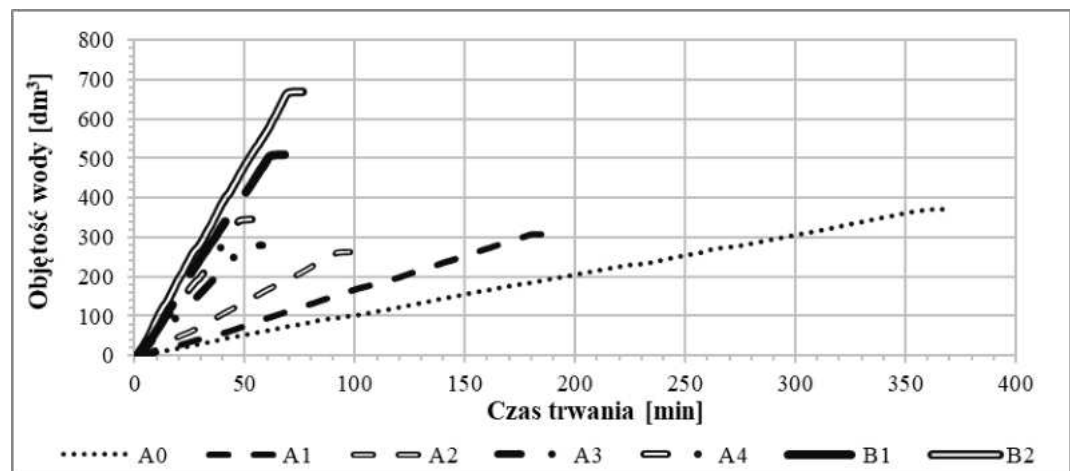


Ryc. 7.6. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W) na poszczególnych poletkach testowych

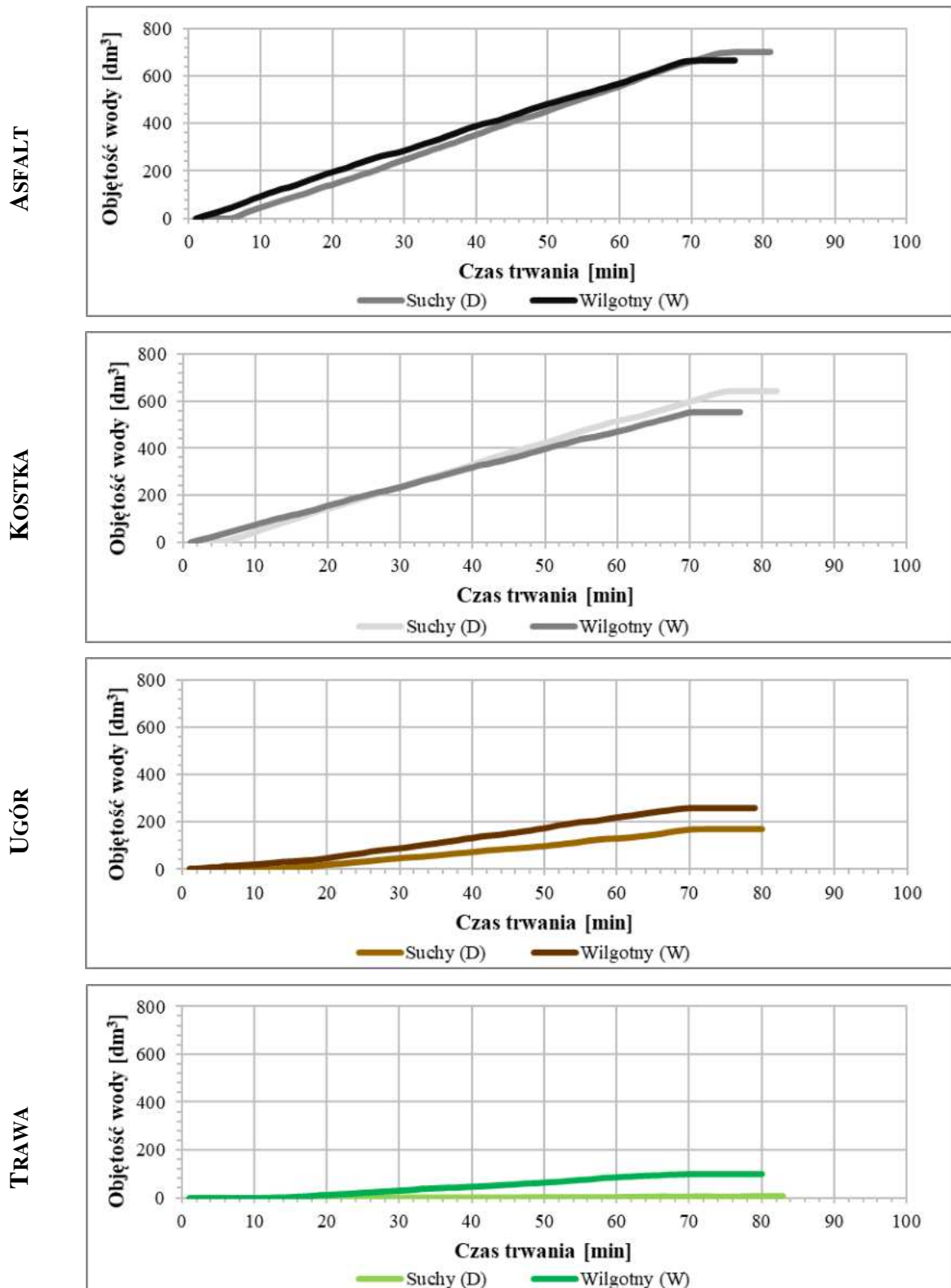
WARUNKI SUCHY (D)



WARUNKI WILGOTNE (W)



Ryc. 7.7. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W) dla poszczególnych kategorii opadu



Ryc. 7.8. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3. Deskryptory dynamiki spływu powierzchniowego

Dynamikę spływu powierzchniowego scharakteryzowano z wykorzystaniem 11 deskryptorów spływu powierzchniowego:

- czasu trwania opadu t_{opadu} ,
- całkowitej objętości opadu V_{opadu} ,
- momentu inicjacji spływu powierzchniowego t_p ,
- momentu zakończenia spływu powierzchniowego t_k ,
- czasu trwania spływu powierzchniowego t_{splywu} ,
- całkowitej objętości spływu powierzchniowego V_{splywu} ,
- współczynnika spływu powierzchniowego ψ ,
- natężenia spływu powierzchniowego Q_{splywu} ,
- kąta β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego,
- wskaźnika spływu powierzchniowego δ ,
- natężenia opadu inicjującego spływ powierzchniowy P_{kryt} .

Analizę deskryptorów spływu powierzchniowego wykonano dla zróżnicowanych warunków wilgotnościowych gruntu – warunków suchych (D), czyli gruntu nienawadnianego przez co najmniej 24 h oraz warunków wilgotnych (W), czyli gruntu nawodnionego przed symulowanym opadem. Typy pokrycia powierzchni terenu podzielono na powierzchnie przekształcone (asfalt, kostka) oraz powierzchnie naturalne (ugór, trawa).

7.3.1. Czas trwania opadu t_{opadu} oraz całkowita objętość opadu V_{opadu}

Czas trwania opadu t_{opadu} dla symulowanej kategorii opadu wyrażony jest w jednostkach czasu [min]. W trakcie przeprowadzania eksperymentów terenowych jego monitorowanie odbywało się poprzez zaprogramowanie sterownika czasowego, będącego elementem symulatora opadów.

Całkowita objętości opadu V_{opadu} dla symulowanej kategorii opadu przypadająca na dane poletko testowe wyrażona jest w jednostkach objętości [dm^3]. Objętość opadu przypadająca na cztery poletki testowe odczytywano z przepływomierza przy symulatorze opadu oraz mierzono za pomocą deszczomierza Hellmanna.

Czasy trwania opadów oraz całkowite objętości opadów dla przeprowadzonych eksperymentów zestawiono w tabeli 7.10 oraz 7.11, a także przedstawiono na rycinie 7.9.

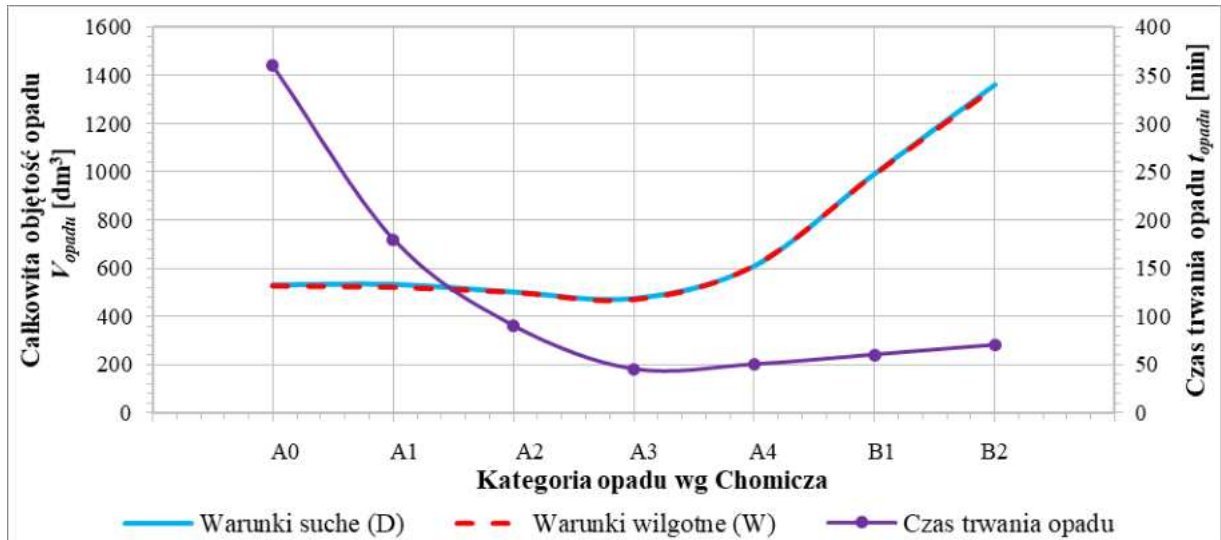
Dla opadów słabych, długotrwałych (kategorii od A0 do A3) przy zbliżonej objętości opadu (od A0 – 528 dm³ do A3 – 472 dm³) malał jego czas trwania (od A0 – 360 min do A3 – 45 min). Natomiast dla opadów intensywnych, krótkotrwałych (kategorii od A4 do B2) czas opadu pozostawał zbliżony (od A4 – 50 min do B2 – 70 min), zaś rosła objętość opadu (od A4 – 607 dm³ do B2 – 1359 dm³). Czas trwania opadu oraz jego objętość były takie same dla każdego poletka testowego.

Tab. 7.10. Czas trwania opadu t_{opadu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Czas trwania opadu t_{opadu} [min]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Warunki suche (D)							
Asfalt	360	180	90	45	50	60	70
Kostka	360	180	90	45	50	60	70
Ugór	360	180	90	45	50	60	70
Trawa	360	180	90	45	50	60	70
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	360	180	90	45	50	60	70
Kostka	360	180	90	45	50	60	70
Ugór	360	180	90	45	50	60	70
Trawa	360	180	90	45	50	60	70

Tab. 7.11. Całkowita objętość opadu V_{opadu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Całkowita objętość opadu V_{opadu} [dm ³]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Warunki suche (D)							
Asfalt	528	530	499	472	607	990	1359
Kostka	528	530	499	472	607	990	1359
Ugór	528	530	499	472	607	990	1359
Trawa	528	530	499	472	607	990	1359
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	524	519	498	468	609	990	1353
Kostka	524	519	498	468	609	990	1353
Ugór	524	519	498	468	609	990	1353
Trawa	524	519	498	468	609	990	1353



Ryc. 7.9. Całkowita objętości opadu V_{opadu} i czas trwania opadu t_{opadu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3.2. Moment inicjacji spływu powierzchniowego t_p

Moment inicjacji spływu powierzchniowego t_p , rozumiany jest jako czas liczony od rozpoczęcia symulacji opadu do początku wzrostu poziomu wody w chwytaczu spływu powierzchniowego dla danego poletka testowego, wyrażany w jednostkach czasu [min].

Momenty inicjacji spływu powierzchniowego dla przeprowadzonych eksperymentów w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) zestawiono w tabeli 7.12 oraz zaprezentowano na rycinie 7.10.

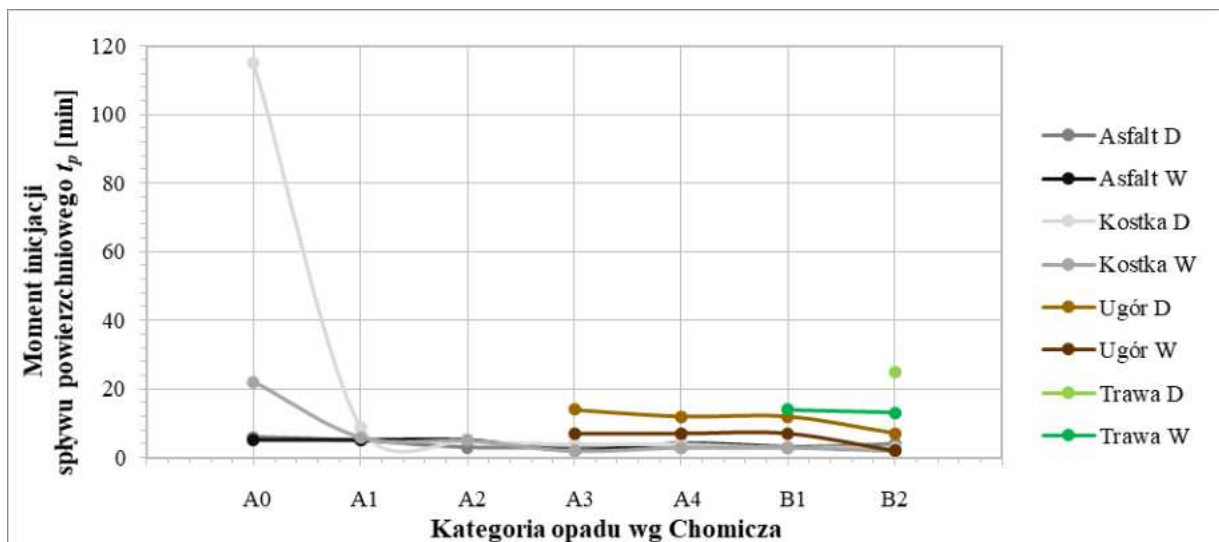
Na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka) spływ powierzchniowy uruchamiał się po każdym opadzie. Na powierzchni asfaltowej inicjacja spływu następowała po 2 ÷ 5 minutach niezależnie od warunków wilgotnościowych. Kostka zachowywała się podobnie jak asfalt z wyjątkiem opadu A0. Przy opadzie A0 pewna część wody infiltrowała przez fugi w piaszczyste podłoże, dlatego inicjacja spływu wystąpiła po 115 minutach w warunkach suchych (D) i 22 minutach w warunkach wilgotnych (W).

Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) opady kategorii A0-A2 nie inicjowały spływu powierzchniowego. Dla ugoru spływ powierzchniowy występował przy opadach w kategoriach A3 i wyższych. Dla warunków suchych (D) przy opadach w kategoriach A3, A4 oraz B1 spływ był inicjowany po około 13 ÷ 14 minutach, a dla warunków wilgotnych (W) po około 8 minutach. Po opadzie w kategorii B2 inicjacja spływu powierzchniowego nastąpiła wyraźnie wcześniej – dla warunków suchych (D) po 7 minutach, a dla warunków wilgotnych (W) po 2 minutach. Dla trawy w warunkach suchych (D) dopiero opad w kategorii B2

powodował uruchomienie spływu powierzchniowego po 25 minutach. Natomiast w warunkach wilgotnych (W) po opadach w kategoriach B1 oraz B2 spływ powierzchniowy zaobserwowano po około 14 minutach.

Tab. 7.12. Moment inicjacji spływu powierzchniowego t_p w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Moment inicjacji spływu powierzchniowego t_p [min]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
	Warunki suche (D)						
Asfalt	6	5	3	3	3	3	4
Kostka	115	6	5	4	4	3	3
Ugór	–	–	–	14	12	12	7
Trawa	–	–	–	–	–	–	25
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	5	5	5	2	4	3	2
Kostka	22	9	5	2	3	3	2
Ugór	–	–	–	7	7	7	2
Trawa	–	–	–	–	–	14	13



Ryc. 7.10. Moment inicjacji spływu powierzchniowego t_p w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3.3. Moment zakończenia spływu powierzchniowego t_k

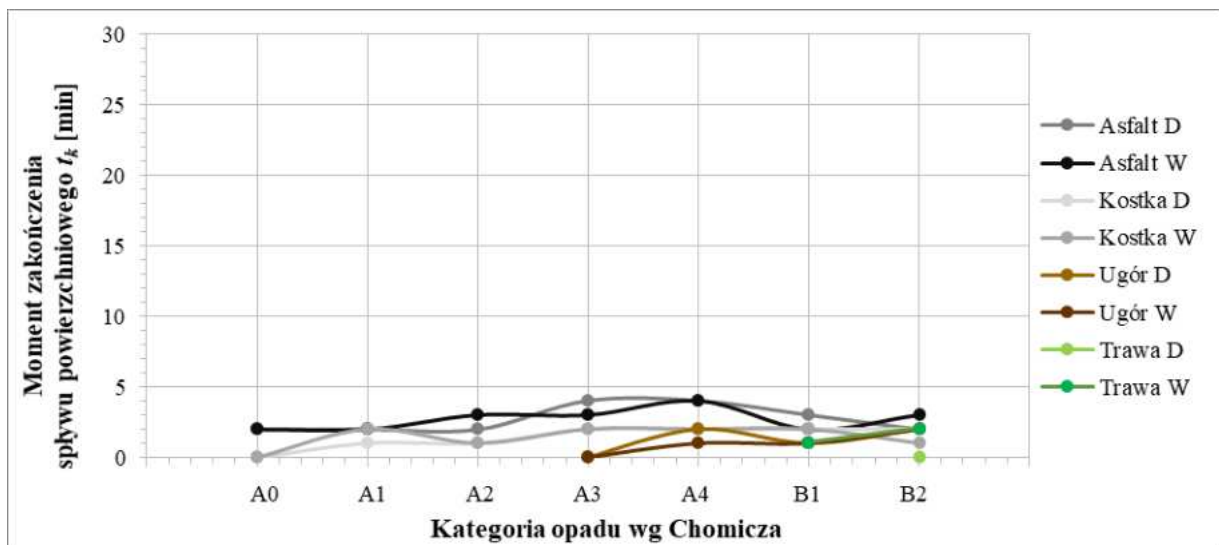
Moment zakończenia spływu powierzchniowego t_k rozumiany jest jako czas liczony od zakończenia symulacji opadu do zakończenia wzrostu poziomu wody w chwytaczu spływu powierzchniowego dla danego poletka testowego. Wyrażany jest w jednostkach czasu [min].

Momenty zakończenia spływu powierzchniowego dla przeprowadzonych eksperymentów w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) zestawiono w tabeli 7.13 oraz zaprezentowano na rycinie 7.11.

Dla każdej z badanych powierzchni spływ powierzchniowy kończył się kilka minut po zakończeniu opadu. Dla asfaltu i kostki było to 2 ÷ 5 minut, a dla ugoru i trawy 1 ÷ 4 minut po zakończeniu opadu. Moment zakończenia spływu powierzchniowego nie zależał od początkowych warunków wilgotnościowych gruntu.

Tab. 7.13. Moment zakończenia spływu powierzchniowego t_k w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Moment zakończenia spływu powierzchniowego t_k [min]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Warunki suche (D)							
Asfalt	2	2	2	4	4	3	2
Kostka	0	1	1	2	2	2	2
Ugór	–	–	–	0	2	1	2
Trawa	–	–	–	–	–	–	0
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	2	2	3	3	4	2	3
Kostka	0	2	1	2	2	2	1
Ugór	–	–	–	0	1	1	2
Trawa	–	–	–	–	–	1	2



Ryc. 7.11. Moment zakończenia spływu powierzchniowego t_k w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3.4. Czas trwania spływu powierzchniowego $t_{spływu}$

Czas trwania spływu powierzchniowego $t_{spływu}$ rozumiany jest jako czas od momentu inicjacji do zakończenia spływu powierzchniowego dla danego poletka testowego, przy danej kategorii symulowanego opadu dla danych warunków wilgotnościowych poletka (7.1). Wyrażany jest w jednostkach czasu [min].

$$t_{spływu} = t_{opadu} - t_p + t_k \quad (7.1)$$

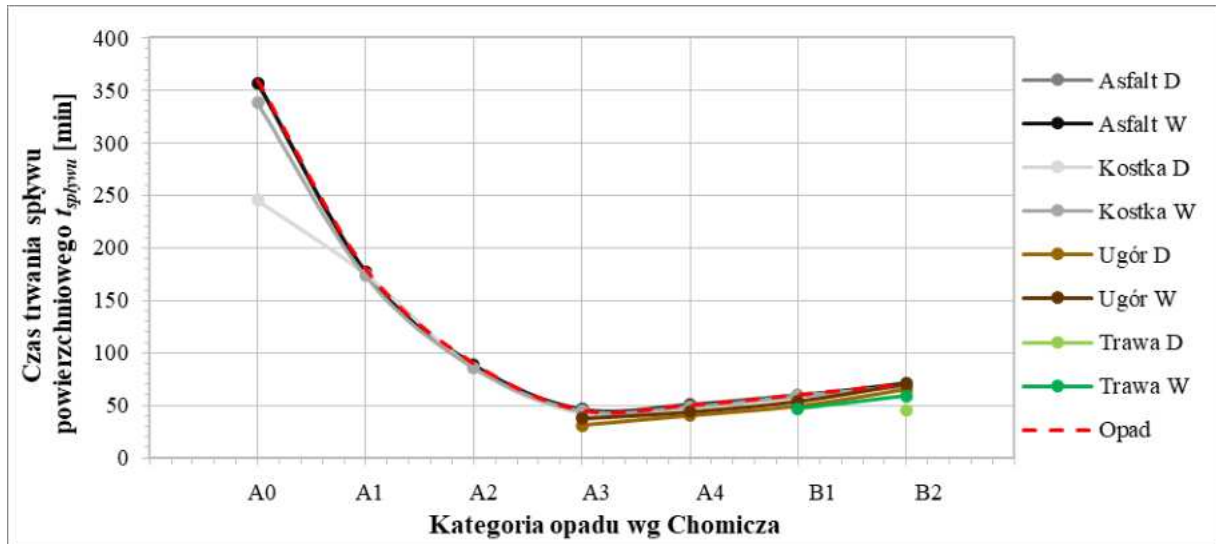
Zmienność czasu trwania spływu powierzchniowego dla przeprowadzonych eksperymentów w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) zestawiono w tabeli 7.14 oraz zaprezentowano na rycinie 7.12.

Dla powierzchni przekształconych (asfalt, kostka) czas trwania spływu powierzchniowego był bardzo podobny do czasu trwania opadu. Tylko przy opadzie w kategorii A0 spływ powierzchniowy po kostce trwał krócej o 115 minut od opadu dla warunków suchych (D) oraz o 22 minuty krócej od opadu dla warunków wilgotnych (W).

Dla powierzchni naturalnych (ugór, trawa) czas trwania spływu powierzchniowego był także bardzo podobny do czasu trwania opadu, lecz tylko dla tych kategorii opadu, które generowały spływ powierzchniowy. Dla ugoru były to kategorie opadu A3 i wyższe, a dla trawy – kategorie opadu B2 dla warunków suchych (D) oraz B1 i B2 dla warunków wilgotnych.

Tab. 7.14. Czas trwania spływu powierzchniowego $t_{spływu}$ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Czas trwania spływu powierzchniowego $t_{spływu}$ [min]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
	Warunki suche (D)						
Asfalt	356	177	89	46	51	60	68
Kostka	245	175	86	43	48	59	69
Ugór	–	–	–	31	40	49	65
Trawa	–	–	–	–	–	–	45
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	357	177	88	46	50	59	71
Kostka	338	173	86	45	49	59	69
Ugór	–	–	–	38	44	54	70
Trawa	–	–	–	–	–	47	59



Ryc. 7.12. Czas trwania spływu powierzchniowego t_{splywu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3.5. Całkowita objętość spływu powierzchniowego V_{splywu}

Całkowita objętość spływu powierzchniowego V_{splywu} z jednego poletka testowego, w czasie trwania jednej symulacji opadu o określonej kategorii, w określonych warunkach wilgotności gruntu, wyrażana jest w jednostce objętości [dm^3]. Całkowitą objętość spływu powierzchniowego rejestrowano w chwytaczach spływu powierzchniowego.

Całkowite objętości spływu powierzchniowego dla przeprowadzonych eksperymentów w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) zestawiono w tabeli 7.15 oraz zaprezentowano na rycinie 7.13.

Największymi całkowitymi objętościami spływu powierzchniowego charakteryzowało się poletko z asfaltem ze względu na swoją całkowitą nieprzepuszczalność. Nie zaobserwowano znaczących zależności całkowitej objętości spływu powierzchniowego od początkowych warunków wilgotnościowych gruntu.

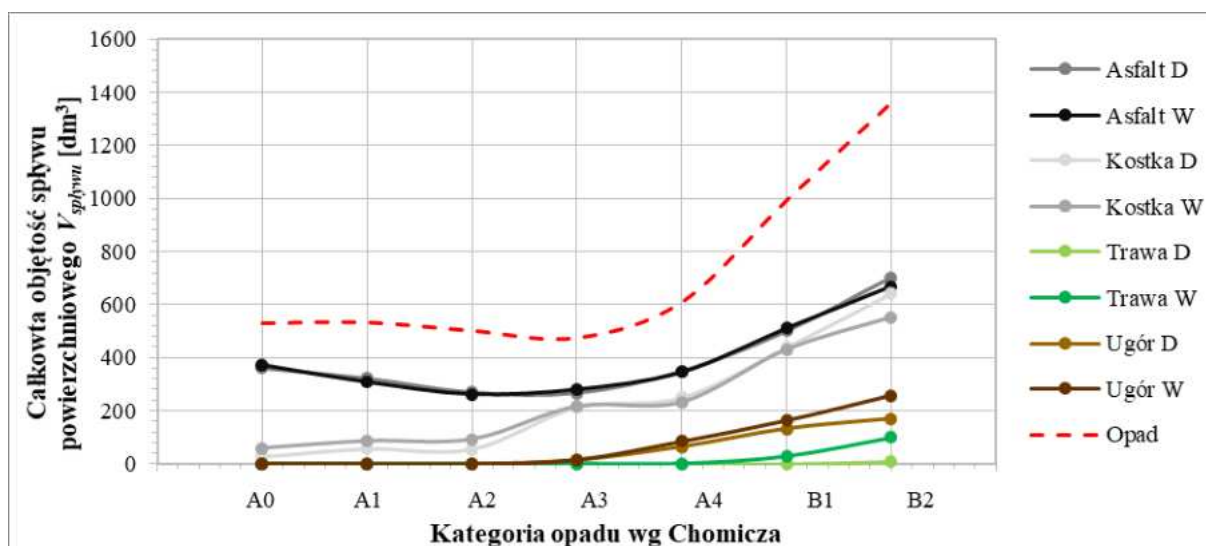
Różnica pomiędzy objętością spływu po asfalcie i po kostce wynikała z infiltracji części wody opadowej przez fugi w piaszczyste podłoże. Infiltracja była większa dla niskich kategorii opadów A0, A1 oraz A2. Od opadów w kategoriach A3 i wyższych wielkość infiltracji po powierzchni pokrytej kostką była stała i nie zależała od warunków wilgotnościowych.

Spływ powierzchniowy na ugorze wystąpił tylko przy opadach kategorii A3 i wyższych. Powierzchnia odkryta, bez szaty roślinnej w mniejszym stopniu może ograniczać spływ powierzchniowy. Ponadto w przypadku ugoru występuje zagrożenie związane z erozją powierzchni gruntu.

Najniższymi całkowitymi objętościami spływu powierzchniowego cechowało się poletko z trawą, na którym spływ powierzchniowy wystąpił tylko trzykrotnie – przy opadach B1 i B2 w warunkach wilgotnych (W) oraz B1 w warunkach suchych (D). Powierzchnia trawiasta nie tylko sprzyja infiltracji, ale także znaczna część spływu powierzchniowego może być pobierana i zatrzymywana przez system korzeniowy traw. Trawa wykazuje największe możliwości ograniczenia spływu powierzchniowego.

Tab. 7.15. Całkowita objętość spływu powierzchniowego $V_{spływu}$ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Całkowita objętość spływu powierzchniowego $V_{spływu}$ [dm ³]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
	Warunki suche (D)						
Asfalt	360	322	269	267	349	500	702
Kostka	26	56	55	212	249	439	642
Ugór	0	0	0	15	64	132	168
Trawa	0	0	0	0	0	0	8
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	372	308	263	280	345	510	667
Kostka	58	85	92	216	232	430	552
Ugór	0	0	0	15	84	162	257
Trawa	0	0	0	0	0	28	99



Ryc. 7.13. Całkowita objętość spływu powierzchniowego $V_{spływu}$ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3.6. Współczynnik spływu powierzchniowego ψ

Współczynnik spływu powierzchniowego ψ rozumiany jako iloraz całkowitej objętości spływu powierzchniowego $V_{spływu}$ do całkowitej objętości opadu przypadającego na dane poletko testowe V_{opadu} (7.2), wyrażany przez ułamek dziesiętny lub w procentach [%].

$$\psi = \frac{V_{spływu}}{V_{opadu}} \quad (7.2)$$

W inżynierii sanitarnej współczynnik spływu powierzchniowego ψ jest wykorzystywany przy projektowaniu kanalizacji deszczowej. Obliczany jest z powyższego wzoru lub pośrednich wzorów empirycznych (Błaszczuk i in. 1974; Imhoff, Imhoff 1982; Szpindor 1998; Błażejowski 2003; Królikowski, Królikowska 2009).

Wartości współczynnika spływu powierzchniowego dla przeprowadzonych eksperymentów w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) zestawiono w tabeli 7.16 oraz zaprezentowano na rycinie 7.13.

Najwyższymi współczynnikami spływu powierzchniowego cechowało się poletko z asfaltem. Nie zaobserwowano zależności od początkowych warunków wilgotnościowych gruntu, natomiast wraz ze wzrostem kategorii opadu, wartości współczynnika malały od 0,71 dla opadu A0 do 0,49 dla opadu B2.

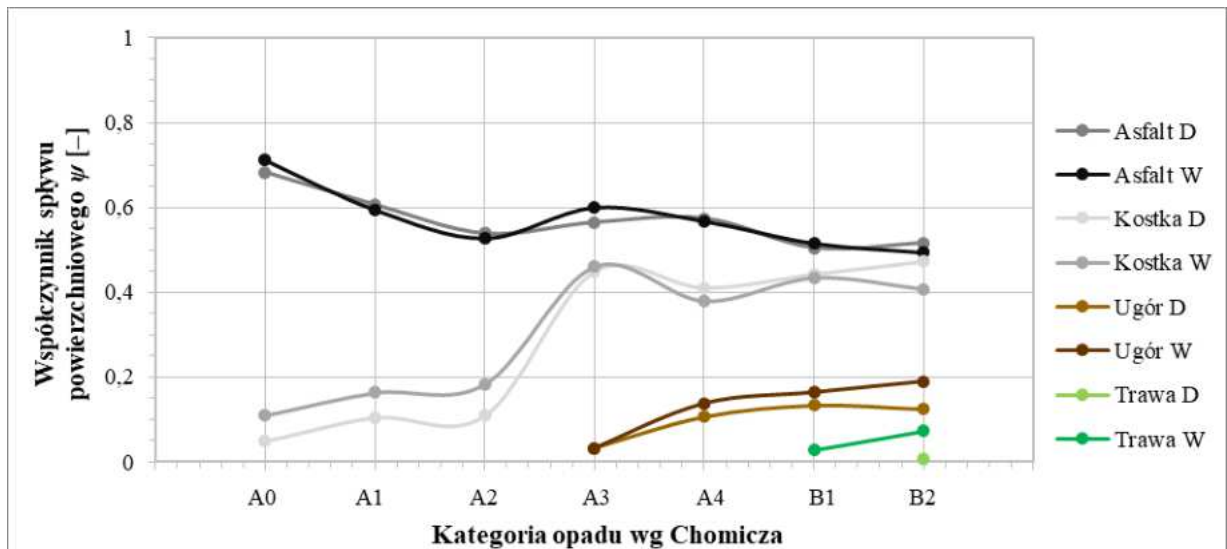
Na kostce współczynniki spływu były niższe niż na asfalcie. Dla opadów w kategoriach od A0 do A2 współczynnik spływu powierzchniowego nie przekraczał 0,20. Po opadach kategorii A3 i wyższych współczynnik spływu powierzchniowego wzrósł do wartości od 0,38 do 0,47. Zależność od warunków wilgotnościowych wystąpiła tylko przy opadach o niskich kategoriach.

Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) współczynniki spływu powierzchniowego nie przekraczały wartości 0,20. Dotyczy to tylko tych kategorii opadów, podczas których wystąpił spływ powierzchniowy, czyli od A3 na ugorze oraz opadów nawalnych (B1, B2) na trawie. Podczas spływu po ugorze nieznacznie wyższe współczynniki spływu powierzchniowego zanotowano dla warunków wilgotnych (W).

Na trawie wartości współczynników spływu powierzchniowego były najniższe spośród obserwowanych typów pokrycia powierzchni terenu – nie przekroczyły 0,10. W przypadku warunków wilgotnych (W) zanotowano wzrost wartości współczynnika pomiędzy opadami B1 i B2. Można przypuszczać, że przy opadach intensywniejszych niż B2 podobną tendencją cechowałyby się współczynniki spływu dla trawy w warunkach suchych (D).

Tab. 7.16. Współczynnik spływu powierzchniowego ψ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Współczynnik spływu powierzchniowego ψ [-]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
	Warunki suche (D)						
Asfalt	0,68	0,61	0,54	0,56	0,57	0,51	0,52
Kostka	0,05	0,10	0,11	0,45	0,41	0,44	0,47
Ugór	–	–	–	0,03	0,11	0,13	0,12
Trawa	–	–	–	–	–	–	0,01
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	0,71	0,59	0,53	0,60	0,57	0,52	0,49
Kostka	0,11	0,16	0,18	0,46	0,38	0,43	0,41
Ugór	–	–	–	0,03	0,14	0,16	0,19
Trawa	–	–	–	–	–	0,03	0,07



Ryc. 7.14. Współczynnik spływu powierzchniowego ψ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3.7. Natężenie spływu powierzchniowego $Q_{spływu}$

Natężenie spływu powierzchniowego $Q_{spływu}$, rozumiane jest jako średnie natężenie spływu powierzchniowego na poletku testowym podczas jednej symulacji (7.3), wyrażane w jednostce objętości na jednostkę czasu [dm^3/min]. Natężenie spływu powierzchniowego obliczano jako stosunek całkowitej objętości spływu powierzchniowego $V_{spływu}$ do czasu trwania spływu powierzchniowego $t_{spływu}$.

$$Q_{spływu} = \frac{V_{spływu}}{t_{spływu}} \quad (7.3)$$

Natężenie spływu powierzchniowego można także obliczać jako tangens kąta β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego.

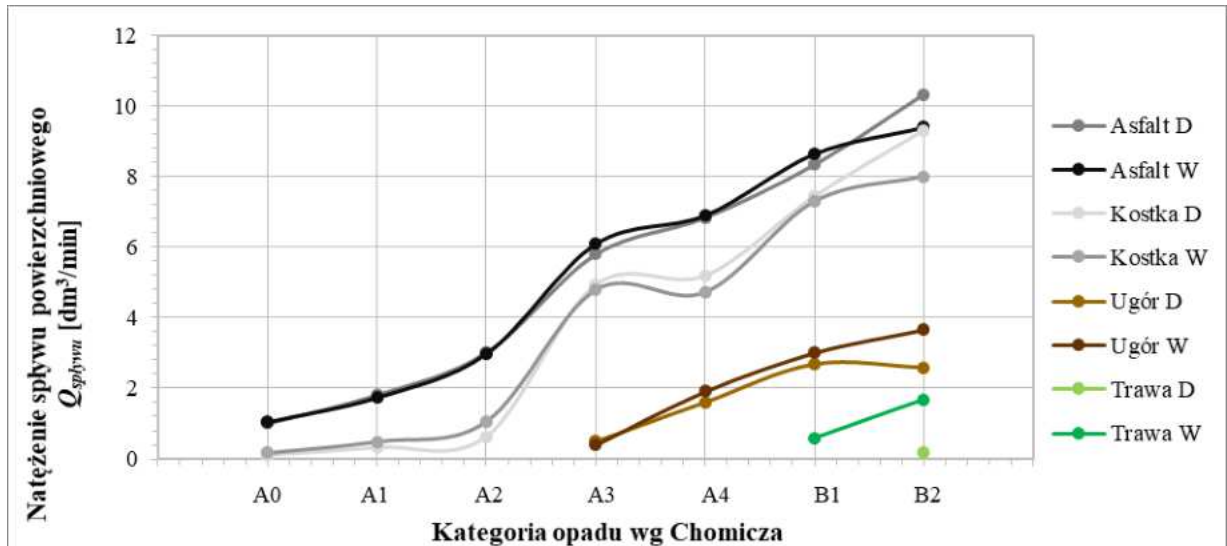
Zmienność natężenia spływu powierzchniowego dla przeprowadzonych eksperymentów w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) zestawiono w tabeli 7.17 oraz zaprezentowano na rycinie 7.15.

Najwyższe natężenia spływu powierzchniowego obserwowano na asfalcie. Wraz ze wzrostem kategorii opadu, wzrastało natężenie spływu powierzchniowego. Na asfalcie nie zaobserwowano zróżnicowania w zależności od początkowych warunków wilgotnościowych gruntu. Na kostce natężenie spływu powierzchniowego charakteryzowało się niższymi wartościami niż na asfalcie, ale bardzo zbliżoną tendencją wzrostową.

Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) obserwowano znacznie niższe natężenia spływu powierzchniowego niż na powierzchniach przekształconych. Zarówno na ugorze, jak i na trawie większe natężenia spływu powierzchniowego zarejestrowano dla warunków wilgotnych (W) niż dla warunków suchych (D). Dotyczy to opadów w kategorii A3 i wyższych dla ugoru oraz opadów nawalnych (B1, B2) dla trawy.

Tab. 7.17. Natężenie spływu powierzchniowego Q_{splywu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Natężenie spływu powierzchniowego Q_{splywu} [dm ³ /min]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Warunki suche (D)							
Asfalt	1,0	1,8	3,0	5,8	6,8	8,3	10,3
Kostka	0,1	0,3	0,6	4,9	5,2	7,4	9,3
Ugór	–	–	–	0,5	1,6	2,7	2,6
Trawa	–	–	–	–	–	–	0,2
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	1,0	1,7	3,0	6,1	6,9	8,6	9,4
Kostka	0,2	0,5	1,1	4,8	4,7	7,3	8,0
Ugór	–	–	–	0,4	1,9	3,0	3,7
Trawa	–	–	–	–	–	0,6	1,7



Ryc. 7.15. Natężenie spływu powierzchniowego Q_{splywu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3.8. Kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego

Kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego opisuje średnią objętość spływu powierzchniowego V_{splywu} w czasie t_{splywu} . Wyrażany jest w stopniach lub jednostkach pokrewnych.

$$\beta = \arctan \frac{V_{splywu}}{t_{splywu}} \quad (7.4)$$

Kąty β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego dla przeprowadzonych eksperymentów w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) zestawiono w tabeli 7.18 oraz zaprezentowano na rycinie 7.16.

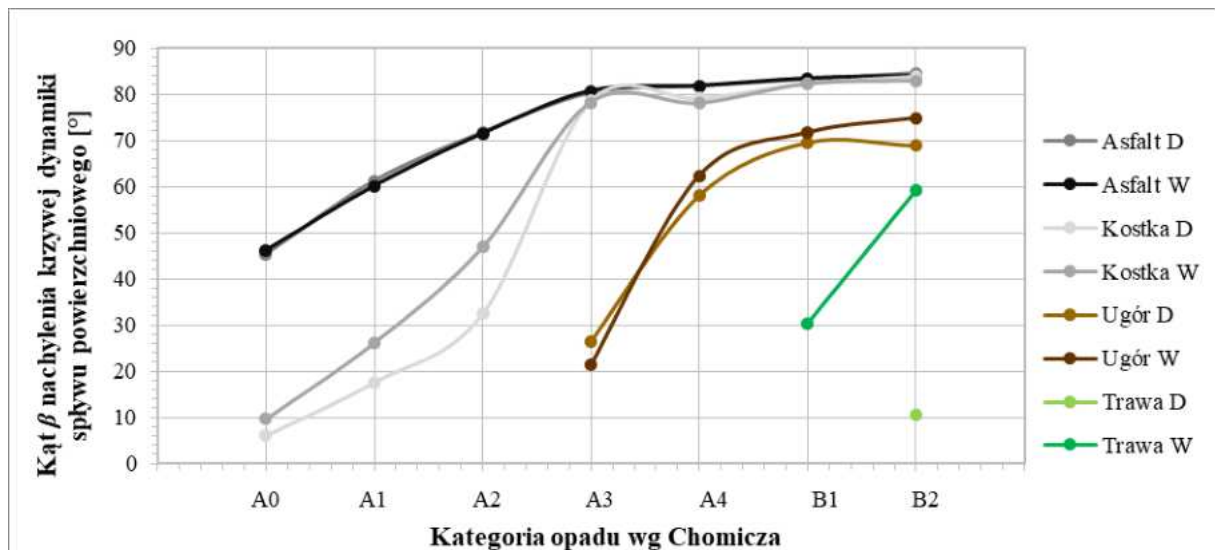
Kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego jest miarą tempa spływu wody po poletkach testowych. Dla powierzchni przekształconych (asfalt, kostka) tempo spływu rośnie wraz ze wzrostem kategorii opadu. Przy opadach w kategoriach A3 i wyższych tempo spływu wody stabilizuje się i kąt β stabilizuje się na poziomie około 80° . Stabilizacja kąta β świadczy o maksymalnej przepustowości poszczególnych poletek dla kąta nachylenia stoku wynoszącego 6° .

Dla ugoru kąt β ma charakter podobny do asfaltu i kostki z tym jednak zastrzeżeniem, że spływ po ugorze występuje tylko przy opadach kategorii A3 i wyższych. Stabilizację kąta β zaobserwowano na poziomie około 70° przy opadach w kategoriach B1 i B2. Niższa wartość kąta β świadczy o większych oporach hydraulicznych spływu po ugorze w porównaniu z oporami spływu po asfalcie lub kostce. Na poletku trawiastym zaobserwowano wystąpienie spływu powierzchniowego tylko przy opadach nawalnych (B1, B2).

Tempo spływu powierzchniowego wyrażane kątem β w niewielkim stopniu zależy od warunków wilgotnościowych na poszczególnych powierzchniach.

Tab. 7.18. Kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego [°]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
	Warunki suche (D)						
Asfalt	45	61	72	80	82	83	84
Kostka	6	18	32	79	79	82	84
Ugór	–	–	–	26	58	70	69
Trawa	–	–	–	–	–	–	11
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	46	60	71	81	82	83	84
Kostka	10	26	47	78	78	82	83
Ugór	–	–	–	22	62	72	75
Trawa	–	–	–	–	–	30	59



Ryc. 7.16. Kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3.9. Wskaźnik spływu powierzchniowego δ

Wskaźnik spływu powierzchniowego δ opisuje stosunek czasu trwania spływu $t_{spływu}$ do czasu trwania opadu t_{opadu} (7.5). Wyrażany jest bezwymiarowo jako ułamek dziesiętny.

$$\delta = \frac{t_{spływu}}{t_{opadu}} \quad (7.5)$$

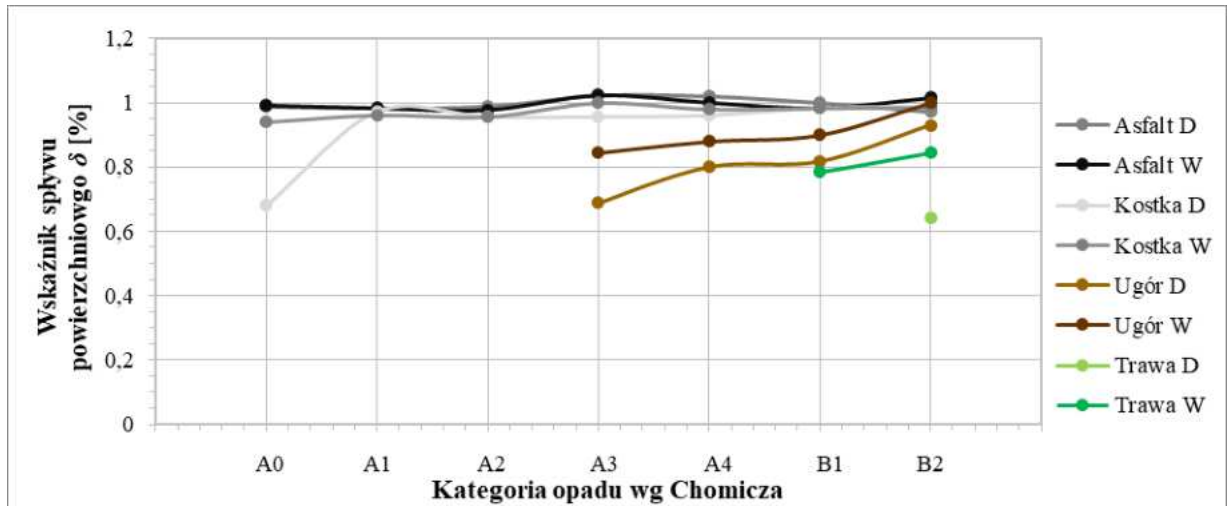
Wskaźniki spływu powierzchniowego dla przeprowadzonych eksperymentów w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) zestawiono w tabeli 7.19 oraz zaprezentowano na rycinie 7.17.

Na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka) wskaźnik spływu powierzchniowego był bliski jedności i nie zależał od warunków wilgotnościowych. Oznacza to, że czas spływu powierzchniowego był bardzo podobny do czasu trwania opadu. Wyjątek stanowi spływ powierzchniowy po kostce przy opadzie w kategorii A0 w warunkach suchych (D), kiedy spływ zaczął się z opóźnieniem spowodowanym wsiąkaniem wody przez fugi pomiędzy kostkami wypełnione piaskiem w piaszczyste podłoże pod kostką.

Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) wskaźnik spływu powierzchniowego był zależny od warunków wilgotnościowych i osiągał wartości niższe niż dla powierzchni przekształconych. Oznacza to, że spływ po powierzchniach naturalnych trwał krócej niż po powierzchniach przekształconych. Dla ugóru były to wartości z przedziału $0,69 \div 1,00$, a dla trawy $0,64 \div 0,84$.

Tab. 7.19. Wskaźnik spływu powierzchniowego δ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Wskaźnik spływu powierzchniowego δ [-]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Warunki suche (D)							
Asfalt	0,99	0,98	0,99	1,02	1,02	1,00	0,97
Kostka	0,68	0,97	0,96	0,96	0,96	0,98	0,99
Ugór	–	–	–	0,69	0,80	0,82	0,93
Trawa	–	–	–	–	–	–	0,64
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	0,99	0,98	0,98	1,02	1,00	0,98	1,01
Kostka	0,94	0,96	0,96	1,00	0,98	0,98	0,99
Ugór	–	–	–	0,84	0,88	0,90	1,00
Trawa	–	–	–	–	–	0,78	0,84



Ryc. 7.17. Wskaźnik spływu powierzchniowego δ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

7.3.10. Natężenie opadu P_{kryt} inicjującego spływ powierzchniowy

Natężenie opadu P_{kryt} inicjującego spływ powierzchniowy oznacza takie natężenie opadu, które inicjuje spływ powierzchniowy dla danego pokrycia powierzchni poletka (7.6).

$$P_{kryt} = \frac{V_{opadu}}{F_{poletka} \cdot t_{opadu}} \quad (7.6)$$

Natężenie opadu P_{kryt} należy wyrazić w [mm/h]. Ponieważ V_{opadu} [dm³], $F_{poletka} = 20$ m² oraz t_{opadu} [min] to (7.7):

$$P_{kryt} = \frac{V_{opadu} \cdot 10^{-3}}{20 \cdot t_{opadu} \frac{1}{60}} = \frac{3 \cdot V_{opadu}}{t_{opadu}} \quad (7.7)$$

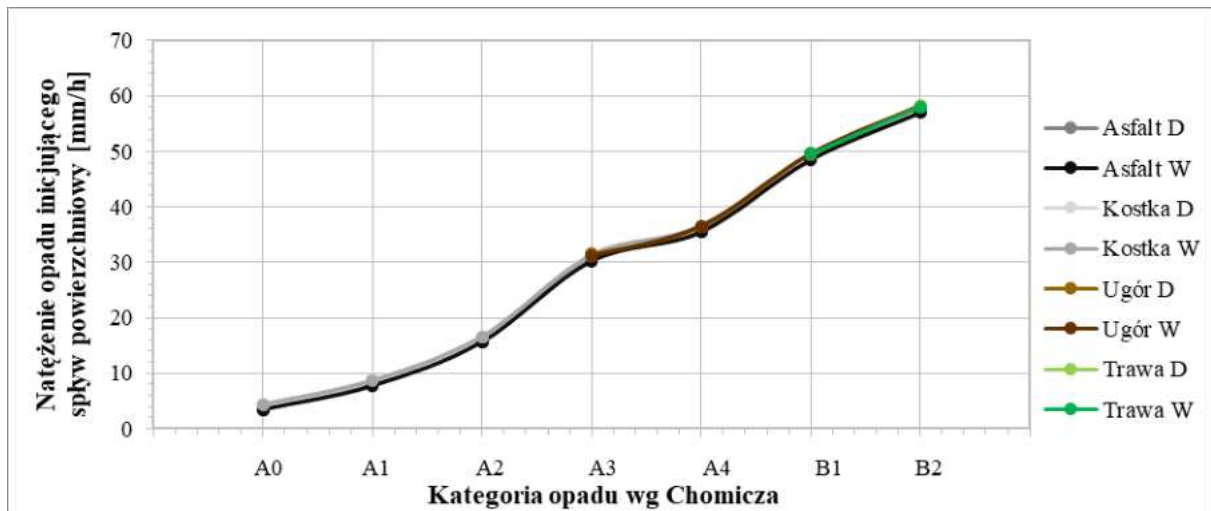
Natężenie opadu P_{kryt} inicjującego spływ powierzchniowy dla przeprowadzonych eksperymentów w warunkach suchych (D) oraz wilgotnych (W) zestawiono w tabeli 7.20 oraz zaprezentowano na rycinie 7.18.

Na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka) każdy opad inicjuje spływ powierzchniowy.

Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) tylko opady w wyższych kategoriach mogą uruchomić spływ powierzchniowy. Dla ugoru spływ powierzchniowy inicjował opad w kategorii A3 o natężeniu 31 mm/h niezależnie od warunków wilgotnościowych. Dla powierzchni trawiastej w warunkach suchych (D) opad krytyczny wynosił 58 mm/h, a w warunkach wilgotnych (W) 50 mm/h.

Tab. 7.20. Natężenie opadu P_{kryt} inicjujące spływ powierzchniowy w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

Natężenie opadu inicjującego spływ powierzchniowy [mm/h]							
Poletko	A0	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Warunki suche (D)							
Asfalt	4	9	17	31	36	50	58
Kostka	4	9	17	31	36	50	58
Ugór	–	–	–	31	36	50	58
Trawa	–	–	–	–	–	–	58
Warunki wilgotne (W)							
Asfalt	4	9	17	31	37	50	58
Kostka	4	9	17	31	37	50	58
Ugór	–	–	–	31	37	50	58
Trawa	–	–	–	–	–	50	58



Ryc. 7.18. Natężenie opadu P_{kryt} inicjującego spływ powierzchniowy w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

8. Podsumowanie

Celem przeprowadzonych badań było rozpoznanie dynamiki spływu powierzchniowego w zależności od: czasu trwania i natężenia opadu, typu pokrycia powierzchni terenu oraz początkowych warunków wilgotnościowych gruntu, a także rozpoznanie wszystkich składników bilansu wodnego podczas spływu wód opadowych po stoku.

Na podstawie charakterystyki fizycznogeograficznej aglomeracji poznańskiej uznano, że stok o nachyleniu 6° będzie wystarczająco reprezentatywny dla tego obszaru. Zdecydowano realizować cel badań poprzez symulację opadów na terenowym stanowisku badawczym. Program symulowanych opadów przyjęto na podstawie klasyfikacji Chomicza (1951) z uwzględnieniem charakterystyk rzeczywistych opadów ekstremalnych odnotowanych na obszarze badań. Zaprojektowano i uruchomiono terenowe stanowisko badawcze, które umożliwiło badania dynamiki spływu powierzchniowego w zakresie charakterystycznym dla aglomeracji poznańskiej, a z pewnym przybliżeniem także dla Niżu Polskiego czy Niziny Środkowoeuropejskiej. Nowością pracy jest przeprowadzenie badań spływu powierzchniowego na powierzchniach nieprzepuszczalnych i słabo przepuszczalnych charakterystycznych dla obszarów miejskich, a nie tylko na powierzchniach naturalnych i użytkowanych rolniczych.

Zrealizowano cały zaplanowany program badań, co umożliwiło zarejestrowanie 56 krzywych dynamiki spływu powierzchniowego. Pomierzono i obliczono bilans wodny objętościowy (zał. 1A) i procentowy (zał. 1B) dla terenowego stanowiska badawczego dla wszystkich zarejestrowanych przypadków spływu powierzchniowego. Zarejestrowane krzywe spływu powierzchniowego przeanalizowano w zależności od rodzaju pokrycia powierzchni terenu (zał. 2A, 2B, 2C oraz D). Przeanalizowano zarejestrowane krzywe spływu powierzchniowego według typu pokrycia powierzchni (zał. 3A), kategorii opadu (zał. 3B), początkowych warunków wilgotnościowych gruntu (zał. 3C).

Do spływu powierzchniowego zaproponowano zestaw 11 deskryptorów, charakteryzujących dynamikę badanego procesu:

- czas trwania opadu t_{opadu} ,
- całkowita objętość opadu V_{opadu} ,
- moment inicjacji spływu powierzchniowego t_p ,
- moment zakończenia spływu powierzchniowego t_k ,

- czas trwania spływu powierzchniowego $t_{spływu}$,
- całkowita objętość spływu powierzchniowego $V_{spływu}$,
- współczynnik spływu powierzchniowego ψ ,
- natężenie spływu powierzchniowego $Q_{spływu}$,
- kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego,
- wskaźnik spływu powierzchniowego δ ,
- natężenie opadu inicjującego spływ powierzchniowy P_{kryt} .

Ostatni z zaproponowanych deskryptorów pozwolił wyznaczyć natężenie opadu, na skutek którego dochodzi do inicjacji spływu powierzchniowego na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka) oraz na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) (tab. 8.1).

Tab. 8.1. Natężenie opadu inicjującego spływ powierzchniowy P_{kryt} dla poszczególnych typów pokrycia powierzchni terenu
D – warunki suche, W – warunki wilgotne

Typ pokrycia powierzchni terenu	Asfalt		Kostka		Ugór		Trawa	
	D	W	D	W	D	W	D	W
Początkowe warunki wilgotnościowe gruntu								
Kategoria opadu wg Chomicza	A0		A0		A3		B2	B1
Natężenie opadu P_{kryt} [mm/h]	4		4		30		60	50
Czas trwania opadu t [min]	360		360		50		70	60

Na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka) spływ powierzchniowy formował się podczas każdego z symulowanych opadów, zarówno w warunkach suchych (D) jak wilgotnych (W). Natomiast na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) spływ powierzchniowy wystąpił tylko podczas niektórych z symulowanych opadów. Na ugorze inicjacja spływu wystąpiła przy opadzie A3, natomiast na trawie – przy opadzie B1 w warunkach wilgotnych (W) i B2 w warunkach suchych (D).

Słabe, długotrwałe opady (A0, A1, A2, A3) cechowały się podobną sumą opadu (ok. 25 mm) i malejącym czasem trwania (od A0 – 360 min, do A3 – 45 min). Podczas tych opadów zawsze występował spływ powierzchniowy na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka). Na kostce podczas długotrwałych i mało intensywnych opadów obserwowano intensywną infiltrację opadu przez szczeliny w podłoże piaszczyste. Przy opadzie A3 zauważono, iż spływ powierzchniowy zintensyfikował się, co zinterpretowano jako wysycenie

pojemności infiltracyjnej tego podłoża. Na ugorze spływ zaobserwowano tylko podczas opadu A3, natomiast na trawie spływ powierzchniowy nie został zainicjowany.

Intensywne, krótkotrwałe opady (A4, B1, B2) charakteryzowały się rosnącą sumą opadu (od A4 – 30 mm, do B2 – 70 mm) i zbliżonym czasem trwania ($50 \div 70$ min). Spływ powierzchniowy podczas tych opadów obserwowano każdorazowo na powierzchniach przekształconych (asfalt, kostka) oraz na ugorze. Na kostce udział infiltracji został ograniczony przez wysycenie pojemności infiltracyjnej podłoża, dlatego spływ powierzchniowy na poletku z kostką był zbliżony do spływu na poletku z asfaltem. Na ugorze spływ powierzchniowy rósł wraz ze wzrostem natężenia opadu. Na trawie spływ powierzchniowy wstąpił tylko podczas opadu B2 w warunkach suchych (D) oraz opadów B1 i B2 w warunkach wilgotnych (W).

Na poletku z asfaltem nie zaobserwowano wpływu początkowych warunków wilgotnościowych gruntu ze względu na jego nieprzepuszczalny charakter. Na kostce podczas opadów słabych, długotrwałych (A0, A1, A2, A3) spływ był wyższy w warunkach wilgotnych, natomiast podczas opadów intensywnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2) poletko cechowało się odwrotną tendencją. Na powierzchniach naturalnych (ugór, trawa) po wystąpieniu spływu powierzchniowego jego wyższe wartości obserwowano w warunkach wilgotnych (W).

Najsilniejszy z symulowanych opadów (nawalny B2, 60 mm/h, 70 min) był tożsamy z opadem nawalnym, zarejestrowanym w Poznaniu w dniu 22 czerwca 2021 roku. Podczas badań symulacyjnych taka objętość opadu została w całości zinfiltrowana na poletku z suchą trawą, natomiast na poletku z trawą wilgotną po stoku spłynęło 7,3% opadu. Stoki pokryte trawą okazały się najlepszym, spośród badanych typów pokrycia powierzchni, zabezpieczeniem przed nawalnymi opadami deszczu, a w konsekwencji przed skoncentrowanym spływem i powodzią błyskawicznymi na obszarach zurbanizowanych.

Należy zwrócić uwagę, iż porównywanie wyników badań poletkowych spływu powierzchniowego w zakresie obiegu wody z wynikami badań innych autorów jest trudne. Na spływ powierzchniowy wpływa nie tylko czas trwania i natężenie opadu, ale też wilgotność gruntu i jego uziarnienie, a także nachylenie stoku, długość i szerokość poletek testowych, a nawet warunki topoklimatyczne stanowisk badawczych. Odnalezienie publikacji, w których wykonano badania na stanowisku terenowym o podobnych warunkach, okazało się niemożliwe. Natomiast porównywanie z wynikami badań przeprowadzonymi na innych poletkach testowych, czy też przy innych opadach wydaje się dyskusyjne.

Wykonane na terenowym stanowisku badawczym eksperymenty z symulacją opadu i opisem dynamiki spływu powierzchniowego mogą stanowić inspirację do dalszych badań,

także dla innych autorów. Badania spływu powierzchniowego należałoby kontynuować na stokach o większych nachyleniach.

W trakcie prowadzonych na terenowym stanowisku badawczym symulacji opadów poza rejestracją dynamiki spływu powierzchniowego, prowadzono obserwacje parametrów erozji wodnej gleby. Tematyka ta wykracza poza zakres merytoryczny pracy i będzie przedmiotem oddzielnych publikacji.

Bibliografia

- AHMADI S.H., GHASEMI H., SEPASKHAH A.R. (2020). Rice husk biochar influences runoff features, soil loss, and hydrological behavior of a loamy soil in a series of successive simulated rainfall events. *Catena* 192.
- AKAN A.O., HOUGHTALEN R.J. (2003). *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modelling*. John Wiley & Sons, New York.
- ANDERSEN C., FOSTER I., PRATT C. (1999). The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment. *Hydrological Process* 13(4), s. 597-609.
- APPELS W.M., BOGAART P.W., VAN DER ZEE S.E.A.T.M. (2016). Surface runoff in flat terrain: how field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity. *Journal of Hydrology* 534, s. 493-504.
- ARCHER L., HATCHARD S., DEVITT L., NEAL J.C., COXON G., BATES P.D., KENDON E.J., SAVAGE J. (2024): Future change in urban flooding using new convection-permitting climate projections. *Water Resources Research* 60.
- ARMENISE E., SIMMONS R.W., AHN S., GARBOU T. A., DOERR S.H., MOONEY S.J., STURROCK C.J., RITZ K. (2018). Soil seal development under simulated rainfall: structural, physical and hydrological dynamics. *Journal of Hydrology* 556, s. 211-219.
- ARMSON D., STRINGER P., ENNOS A.R. (2013). The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening* 12(3), s. 282-286.
- ARRIGHI C., DOMENEGHETTI A. (2024). Brief communication: on the environmental impacts of the 2023 floods in Emilia-Romagna (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 24, s. 673-679.
- ATENCIA A., ZAWADZKI I. (2014). A comparison of two techniques for generating nowcasting ensembles. Part I: Lagrangian ensemble technique. *Monthly Weather Review* 142(11), s. 4036-4052.
- BAC S., KOŹMIŃSKI C., ROJEK M. (1998). *Para wodna w atmosferze*. [W:] *Agrometeorologia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 77-93.
- BACOVA-MITKOVA V., PEKAROVA P., MIKLANEK P., LIOVA S. (2015). Post event analysis of the flash flood in small basin. *WSEAS Transactions on Environment and Development* 11, s. 193-200.
- BAGARELLO V., FERRO V. (1998). Calibrating storage tanks for soil erosion measurement from plots. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, s. 1151-1170.
- BAGARELLO V., FERRO V. (2004). Plot-scale measurement of soil erosion at the experimental area of Sparacia (southern Italy). *Hydrological Processes* 18, s. 141-157.
- BAIN V., NEWINGER O., GAUME E., BERNARDARA P., BARBUC M., BATEMAN A., GARCIA J., MEDINA V., SEMPRE-TORES D., VELASCO D., BLÁŠKOVIČOVA L., BLÖSCHL G., VIGLIONE A., BORGA M., DUMITRESCU A., IRIMESCU A., STANCALIE G., KOHNOWA S., SZOLGAY J., KOUTROULIS A., TSANIS I., MARCHI L., PRECISO E. (2009). *European flash floods data collection and analysis*. [W:] Samuels P., Huntington S., Allsop W., Harrop, J. (red.), *Flood risk management: research and practice*. Taylor and Francis, London, s. 1557-1585
- BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., MIKULSKI Z. (1996). *Hydrologia ogólna*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- BANASIK K., BARSZCZ M. (2001). Wpływ metody wyznaczania opadu efektywnego na czas opóźnienia odpływu i parametry modelu opad-odpływ. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 477, s. 15-21.
- BANASIK K., GÓRSKI D. (1990). Wyznaczanie erozyjności deszczy do uniwersalnego równania strat glebowych. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu* 189, s. 103-109.
- BARREDO J.I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950-2005. *Natural Hazards* 42, s. 125-148.
- BARSZCZ M. (2009). Analysis of freshets caused by heavy rainfall on small urbanized drainage basin of Służew Stream. *Studia Geotechnica et Mechanica* 4, s. 3-15.

- BARTCZAK E. (1990). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Kórnik. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- BAZA DANYCH OBIEKTÓW TOPOGRAFICZNYCH 1:10 000 (2022). Powiat poznański i miasto Poznań. <https://www.geortal.gov.pl/pl/dane/baza-danych-objektow-topograficznych-bdot10k/> (dostęp: 1.12.2023)
- BEDNARCZYK S., JARZĘBIŃSKA T., MACKIEWICZ S., WOŁOSZYN E. (2006). Vademecum ochrony przeciwpowodziowej. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, Gdańsk.
- BEVEN K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling The Primer. Willey & Sons Ltd.
- BHUTAN S.J., MARZEN L.J., KOELLIKER J.K., HARRINTON J.A., BARNES P.L. (2002). Assessment of runoff and sediment yield using remote sensing, GIS, and AGNPS. *Journal of Soil and Water Conservation* 57(6), s. 351-363.
- BIEDROŃ I., BOGDAŃSKA-WARMUZ R. (2012). Powódź 2010 – analiza strat i szkód powodziowych w Polsce. *Gospodarka Wodna* 4, s. 147-153.
- BIEDROŃ I., WALCZYKIEWICZ T. (2009). Problemy w określaniu zagrożenia powodziowego oceny ryzyka powodziowego na terenach górskich. *Czasopismo Techniczne*, z. 2-A/2009, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- BIEDROWSKI Z. (1968). Sandry okolic Poznania. Studium geomorfologiczno-sedymentologiczne. UAM, Poznań (maszynopis pracy doktorskiej).
- BLÖSCHL G., SIVAPALAN M. (1995). Scale issues in hydrological modelling. *Hydrological Processes* 9, s. 251-290.
- BLASZCZYK J. (1997). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Klecko. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- BLASZCZYK W., ROMAN M., STAMATELLO H. (1974). *Kanalizacja tom 1*. Arkady Warszawa.
- BŁAŻEJEWSKI R. (2003). *Kanalizacja wsi*. Wydawnictwo PZITS O/Włkp. Poznań.
- BOCHENEK W. (2002). Ocena możliwości retencyjnych pokryw glebowo-zwietrzelinowych na stoku pogórskim. *Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce, s. 103-107.
- BOCHENEK W. (2020). Prawidłowości obiegu wody na obszarze beskidzko-pogórskim Karpat Zachodnich w świetle zmian klimatu i działalności człowieka. *Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Polska Akademia Nauk, Prace Geograficzne* 271, Warszawa.
- BOCHENEK W., GIL E. (2007). Procesy obiegu wody, erozji gleb i denudacji chemicznej w zlewni Bystrzanki. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 16, 2(36), s. 28-42.
- BOCHENEK W., GIL E. (2010). Zróżnicowanie spływu powierzchniowego i spłukiwania gleby na poletkach doświadczalnych o różnej długości (Szymbark, Beskid Niski). [W:] Smolska E., Rodzik J. (red.), *Procesy erozyjne na stokach użytkowanych rolniczo (metody badań, dynamika i skutki)*. *Prace i Studia Geograficzne* 45, s. 265-278.
- BOCHEŃSKA T., DOWGIAŁŁO J., KLECZKOWSKI A.S., MACIOSZCZYK T., RÓŻKOWSKI A. (red.) (2002). *Słownik hydrogeologiczny*. Praca zbiorowa. Warszawa. PIG.
- BORGA M., BOSCOLO P., ZANON F., SANGATI, M. (2007). Hydrometeorological analysis of the 29 August 2003 flash flood in the Eastern Italian Alps. *Journal of Hydrometeorology* 8, s. 1049-1067.
- BOROWIEC S., WOŹNICZAK S., SKRZYCZYŃSKI T. (1974). Badania modelowe nad wpływem nachylenia na infiltrację, spływ i zmyw na różnych glebach uprawnych bez okrywy roślinnej. *Zeszyty Naukowe. Akademia Rolnicza w Szczecinie* 48, s. 39-47.
- BOULANGE J., MALHAT F., JAIKAEW P., NANKO K., WATANABE H. (2019). Portable rainfall simulator for plot-scale investigation of rainfall-runoff, and transport of sediment and pollutants. *International Journal of Sediment Research* 34(1), s. 38-47.
- BOWLER N.E., PIERCE C.E., SEED A.W. (2006). STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 132(620), s. 2127-2155.

- BOWYER-BOWER T.A.S., BURT T.P. (1989). Rainfall simulators for investigating soil response to rainfall. *Soil Technology* 2(1), s. 1-16.
- BREWER T. (2024). *Climate change: an interdisciplinary introduction*. Springer, Washington DC.
- BRODOWSKI R., REJMAN J. (2004). Określenie wpływu wilgotności i stanu powierzchni gleby wytworzonej z piasku gliniastego na spływ powierzchniowy i zmyw gleby. *Acta Agrophysica* 4(3), s. 619-624.
- BRONSTERT A. (2003). Floods and climate change: interactions and impacts. *Risk Analysis* 23(3), s. 545-557.
- BRYAN R.B. (1974). A simulated rainfall test for the prediction of soil erodibility. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Supplement Band* 21, s. 138-150.
- BRYNDAL T. (2015). Local flash floods in Central Europe: a case study of Poland. *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography* 69, s. 288-298.
- BUNZA G. (1978). Vergleichende Messungen von Abfluss und Bodenabtrag auf Almflächen des Stubnerkogels im Gasteiner Tal. [W:] Cernusca A. (red.), *Ökologische Analysen von Almflächen im Gasteiner Tal. Veröffentlichung des Österreichischen MaB-Hochgebirgsprogramms Hohe Tauern, Bd. 2*. Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, Austria, s. 315-334.
- BUNZA G. (1989). Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in der alpinen Grasheide der Hohen Tauern an der Großglockner Hochalpenstrasse. [W:] Cernusca A. (red.), *Struktur und Funktion von Grasland Ökosystemen im Nationalpark Hohe Tauern. Veröffentlichung des Österreichischen MaB-Programms, Bd. 13*. Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, Austria, s. 155-199.
- BURANT A., SELBIG W., FURLONG E.T., HIGGINS C.P. (2018). Trace organic contaminants in urban runoff: Associations with urban land-use. *Environmental Pollution* 242, s. 2068-2077.
- BYCZKOWSKI A. (2005). W sprawie definicji powodzi. *Przegląd Geofizyczny* 1-2, s. 73-76.
- CENTRALNA BAZA DANYCH GEOLOGICZNYCH (2017). *Główne Zbiorniki Wód Podziemnych*. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy. <https://dm.pgi.gov.pl/> (dostęp: 15.10.2023)
- CERDAN O., LE BISSONNAIS Y., COUTURIER A., SABY N. (2002). Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes* 16(16), s. 3215-3226.
- CERDAN O., LE BISSONNAIS Y., GOVERS G., LECOMTE V., VAN OOST K., COUTURIER A., KING C., DUBREUIL N. (2004). Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *Journal of Hydrology* 299(1-2), s. 4-14.
- CHACHAJ J. (1991). *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Mosina*. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- CHAPLOT V., LE BISSONNAIS Y. (2000). Field measurement of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, s. 145-153.
- CHARTERS F.J., COCHRANE T.A., O'SULLIVAN A.D. (2021). The influence of urban surface type and characteristics on runoff water quality. *Science of The Total Environment* 755, part 1.
- CHELMICKI W. (2001). *Woda. Zasoby, degradacja, ochrona*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- CHENG S., WANG R. (2002). An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application. *Hydrological Processes* 16(7), s. 1403-1418.
- CHMAL R. (1990). *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Poznań*. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- CHMAL R. (1992). *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Sęszew*. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- CHOE J.S., BAND K.W., LEE J.H. (2002). Characterization of surface runoff in urban areas. *Water Science & Technology* 45(9), s. 249-254.
- CHOI K., BALL J.E. (2002). Parameter estimation of urban runoff modelling. *Urban Water* 4(1), s. 31-41.
- CHOMICZ K. (1951): Ulewy i deszcze nawalne w Polsce. *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej* 2(3).

- CINCIO Z. (1994). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Swarzędz. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- CIUPA T. (2009). Wpływ zagospodarowania terenu na odpływ i transport fluwialny w małych zlewniach na przykładzie Sufragańca i Silnicy (Kielce). Wydawnictwo UJK, Kielce.
- CORONA R., WILSON T., D'ADDERIO L.P., PORCÙ F., MONTALDO N., ALBERTSON J. (2013). On the estimation of surface runoff through a new plot scale rainfall simulator in Sardinia, Italy. *Procedia Environmental Sciences* 19, s. 875-884.
- CZAJA S. (1999). Zmiany stosunków wodnych w warunkach silnej antropopresji (na przykładzie konurbacji katowickiej). *Prace Naukowe UŚ, Katowice*, 1782, 189.
- CZUCHAJ A., MAJEWSKI M., MARCINIAK M. (2022). Koncepcja stanowiska do badań spływu powierzchniowego i spłukiwania w zlewni Różanego Strumienia. [W:] Kostrzewski A., Szpikowski J., Majewski M. (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Współczesne przemiany naturalne i antropogeniczne środowiska przyrodniczego zlewni rzecznych i jeziornych*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 163-179.
- DADLEZ S. M., POKORSKI J., BUŁA Z. (2000). Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku 1:1 000 000. Wydawnictwo Kartograficzne Polskiej Agencji Ekologicznej, Warszawa.
- DE ROO A.P.J., RIEZEBOS H.T. (1992). Infiltration experiments on loess soil and their implications for modelling surface runoff and soil erosion. *Catena* 19, s. 221-239.
- DELETIC A. (1998). The first flush load of urban surface runoff. *Water Research* 32(8), s. 2462-2470.
- DONAT M.G., LOWRY A.L., ALEXANDER L.V., O'GORMAN P.A., MAHER N. (2016). More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nature Climate Change* 6(5), s. 508-513.
- DZIENNIK URZĘDOWY UNII EUROPEJSKIEJ. Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim. L 288/27.
- ELHAKHEEM M., PAPANICOLAOU A.N. (2009). Estimation of the runoff curve number via direct rainfall simulator measurements in the State of Iowa, USA. *Water Resources Management* 23(12), s. 2455-2473.
- ESTEVEZ M., PLANCHON O., LAPETITE J.M., SILVERA N., CADET P. (2000). The „EMIRE” large rainfall simulator: design and field testing. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, s. 681-690.
- ETTRICH N., STEINER K., THOMAS M., ROTHE R. (2005). Surface models for coupled modelling of runoff and sewer flow in urban areas. *Water Science & Technology* 52(5), s. 25-33.
- FARAT R. (1996). *Klimat Poznania*. [W:] Środowisko Naturalne Miasta Poznania, cz. 1, rozdz. 7. Urząd Miejski w Poznaniu, Wydział Ochrony Środowiska, Poznań, s. 69-78.
- FARAT R. (2010). Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce Północno-Zachodniej. [W:] Bednorz E. (red.), *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Warunki termiczne i opadowe*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 117-130.
- FERNÁNDEZ-GALVEZ J., BARAHNONA E., MINGORANCE M.D. (2008). Measurement of infiltration in small field plots by portable rainfall simulator: Application to trace-element mobility. *Water Air Soil Pollution* 191, s. 257-264.
- FERNÁNDEZ-RAGA M., RODRÍGUEZ I., CALDEVILLA P., BÚRDALO G., ORTIZ A., MARTÍNEZ-GARCÍA R. (2022). Optimization of a laboratory rainfall simulator to be representative of natural rainfall. *Water* 14(23), 3831.
- FERREIRA C.S.S., FERREIRA A.J.D., PATO R.L., MAGALHÃES M.D.C., COELHO C.D.O., SANTOS C. (2012). Rainfall-runoff-erosion relationships study for different land uses, in a sub-urban area. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues* 56(3), s. 5-20.
- FOSTER I.D.L., FULLEN M.A., BRANDSMA R.T., CHAPMAN A.S. (2000). Drip-screen rainfall simulators for hydro- and ped-geomorphological research: the coventry experience. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, s. 691-707.
- FOWLER H.J., LENDERINK G., PREIN A.F., WESTRA S., ALLAN R.P., BAN N., BARBERO R., BERG P., BLENKINSOP S., DO H.X., GUERREIRO S., HAERTER J.O., KENDON E.J., LEWIS E., SCHAER C., SHARMA A., VILLARINI G.,

- WASKO C., ZHANG X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment* 2(2), s. 107-122.
- FRANCZAK P., DZIAŁEK J., FIEDEN Ł., BIERNACKI W. (2017). Powódź błyskawiczna jako zdarzenie przyrodnicze i społeczne na przykładzie powodzi w Wojcieszowie 5 lipca 2012 roku. *Prace Geograficzne* 151, s. 27-51.
- FRANCZAK P., LISTWAN-FRANCZAK K. (2016). Powódź w zlewni Miedzianki (zlewnia Nysy Łużyckiej) w sierpniu 2010 roku. Dobra praktyka w redukcji ryzyka powodziowego w małych zlewniach górskich, w których wystąpiła powódź błyskawiczna. [W:] *Współczesne Problemy i Kierunki Badawcze w Geografii* (vol. 4). IGiGP UJ, Kraków, s. 55-84.
- GAUME E., BAIN V., BERNARDARA P., NEWINGER O., BARBUC M., BATEMAN A., BLAŠKOVIČOVA L., BLÖSCHL G., BORGA M., DUMITRESCU A., DALIAKOPOULOS I., GARCIA J., IRIMESCU A., KOHNOWA S., KOUTROULIS A., MARCHI L., MATREATA S., MEDINA V., PRECISO E., SEMPRE-TORES D., STANCALIE G., SZOLGAY J., TSANIS I., VELASCO D., VIGLIONE A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology* 367, s. 70-78.
- GAWROŃSKI J. (1999). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Środa Wielkopolska. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- GERLACH T. (1966). Współczesny rozwój stoków w dorzeczu górnego Grajcarka (Beskid Wysoki – Karpaty Zachodnie). *Prace Geograficzne IG PAN* 52, Warszawa.
- GIL E. (1976). Spłukiwanie gleby na stokach fliszowych w rejonie Szymbarku. *Dokumentacja Geograficzna* 2.
- GIL E. (1994). Monitoring obiegu wody i spłukiwania na stokach. [W:] *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa Szymbark (Karpaty Fliszowe), PIOŚ*, Warszawa, s. 66-87.
- GIL E. (1998). Wpływ długości stoku na rozmiary spływu powierzchniowego i spłukiwania (badania eksperymentalne). [W:] *Kostrzewski A. (red.), Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geosystemów Polski, Biblioteka Monitoringu Środowiska*, Warszawa, s. 105-112.
- GILE E., KJOWSKA-STRUGAŁA M., DEMCZUK P. (2021). Soil erosion dynamics on a cultivated slope in the Western Polish Carpathians based on over 30 years of plot studies. *Catena* 207.
- GOGOŁEK W. (1988). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Szamotuły. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- GOGOŁEK W. (1992). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Buk. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- GOŁĄB J. (2012). Symulacja objętości powierzchniowego spływu wody z sieci dróg leśnych w terenie górskim. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 2, s. 129-139
- GOŁĄB J. (2015). Powiązanie natężenia spływu powierzchniowego z dróg leśnych z natężeniem opadu. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 14(2), s. 115-126.
- GOŁĄB J., WAŃCZYK R., MATUSIAK B. (2006). Surface runoff from slanting forest roads. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 5(1), s. 13-25.
- GOŁDYN R., BASIŃSKA A., BUDZYŃSKA A., DONDAJEWSKA-PIELKA R., JONIAK T., KLIMASZYK P., KOWALCZEWSKA-MADURA K., KOZAK A., KUCZYŃSKA-KIPPEN N., NAGENGAST B., PIOTROWICZ R., SZELĄG-WASIELEWSKA E., SZYPER H., ŚWIDNICKI K. (2019). *Stojące i płynące wody Poznania*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- GÓRSKI J., PRZYBYŁEK J. (1996). Budowa geologiczna i wody podziemne. [W:] *Urząd Miejski w Poznaniu, cz. 1, rozdz. 5. Wydział Ochrony Środowiska. Środowisko naturalne miasta Poznania. Część I*. Poznań.
- GRABARCZYK S., ŻARSKI J., DUDEK S. (1990). Porównanie ewapotranspiracji potencjalnej obliczonej różnymi formułami z polowym zużyciem wody. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, seria Melioracja*, XXXV, 191, s. 23-29.
- GRAF R. (2012). Struktura i funkcjonowanie lokalnych systemów krążenia wód podziemnych na obszarze Wysoczyzny Poznańskiej. *Studia i Prace z Geografii i Geologii* 26, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.

- GRAF R. (2014). Przestrzenne zróżnicowanie spływu powierzchniowego w zlewniach zurbanizowanych na przykładzie miasta Poznania. [W:] Ciupa T., Suligowski R. (red.), Woda w mieście. Monografie Komisji Hydrologicznej PTG, tom 2, Instytut Geografii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce, s. 59-71.
- GRAF R., KAŁUŻNA J. (2020). Zarządzanie wodą opadową w mieście w aspekcie minimalizacji ryzyka podtopień i powodzi typu „flash flood” (na przykładzie Kalisza). [W:] Wrzeński D., Graf R., Perz A., Plewa K. (red.), Naturalne i antropogeniczne zmiany obiegu wody. Współczesne problemy i kierunki badań. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 171-191.
- GRANGER R.J., HEDSTROM N. (2011). Modelling hourly rates of evaporation from small lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, s. 267-277.
- GRAY L.C., ZHAO L., STILLWELL A.S. (2023). Impacts of climate change on global total and urban runoff. *Journal of Hydrology* 620, part. A.
- GREEN A.C., KILSBY C., BÁRDOSSY A. (2024). A framework for space-time modelling of rainfall events for hydrological applications of weather radar. *Journal of Hydrology* 630, 130630.
- GRIERSON I.T., OADES J.M. (1977). A rainfall simulator for field studies of run-off and soil erosion. *Journal of Agricultural Engineering Research* 22, s. 37-44.
- GUTRY-KORYCKA M. (2007). Odpływ ze zlewni zurbanizowanych. *Prace i Studia Geograficzne* 38, s. 37-56.
- GUTRY-KORYCKA M., JOKIEL P. (2017). Projekcje ewolucji zasobów wodnych Polski w wyniku zmian klimatu i wzrastającej antropopresji. [W:] Jokiel P., Marszelewski W., Pociask-Karteczka J. (red.) *Hydrologia Polski*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- HAASE D. (2009). Effects of urbanisation on the water balance – a long-term trajectory. *Environmental Impact Assessment Review* 4, s. 211-219.
- HARJUNPÄÄ A. (2023). Surface runoff in urban areas. Bachelor's thesis. Lahti University of Technology.
- HART G.E., JOHNSTON R.S., WHITSON C. (1985). Rainfall simulation on long slopes of a phosphate mine embankment. [W:] Lane L.J. (red.), *Proceedings Rainfall Simulator Workshop*, January 14-15, Tucson. Society for Range Management, Denver, s. 23-24.
- HENNINGER D.L., PETERSEN G.W., ENGMAN E.T. (1976). Surface soil moisture within a watershed – variations, factors influencing, and relationship to surface runoff. *Soil Science Society of America Journal* 40, s. 773-776.
- HILDEBRANDT-RADKE I. (2016). Środowisko geograficzne Poznania. [W:] Kara M., Makohonienko M., Michałowski A. (red.) *Przemiany osadnictwa i środowiska przyrodniczego Poznania i okolic od schyłku starożytności do lokacji miasta*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 23-46.
- HORTON R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions-American Geophysical Union* 14.
- HORTON R.E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America Proceedings* 5, s. 399-417.
- HORTON R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America* 56, s. 275-370.
- HSIANG S.M., BURKE M. (2014). Climate, conflict, and social stability: what does the evidence say? *Climate Change* 123, s. 39-55.
- HSIANG S.M., BURKE M., MIGUEL E. (2013). Quantifying the influence of climate on human conflict. *Science* 341.
- HULME M., BARROW E.M., ARNELL N.W., HARRISON P.A., JOHNS T.C., DOWNING T.E. (1999). Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability. *Nature* 397, s. 688-691.
- HUMPHRY J.B., DANIEL T.C., EDWARDS D.R., SHARPLEY A.N. (2002). A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies. *Applied Engineering in Agriculture* 18(2), s. 199-204.
- IMHOFF K., IMHOFF K.R. (1982). *Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków*. Poradnik. Arkady Warszawa.
- IPCC (2021). Summary for policymakers. [W:] Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E.,

- Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (red.), *Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- IPCC (2022). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- ISERLOH T., ISIDORO J.M.G.P., DE LIMA J.L.M.P., MARZEN M., DE LIMA M.I.P., GREEN D., SEEGER M., RIES, J.B. (2021). Moving towards harmonisation in rainfall simulation. EGU General Assembly 2021, online, 19-30 Apr 2021, EGU21-5667.
- ISERLOH T., RIES J.B., ARNÁEZ J., BOIX-FAYOS C., BUTZEN V., CERDÀ A., ECHEVERRÍA M.T., FERNÁNDEZ-GÁLVEZ J., FISTER W., GEIBLER C., GÓMEZ J.A., GÓMEZ-MACPHERSON H., KUHN N.J., LÁZARO R., LEÓN F.J., MARTÍNEZ-MENA M., MARTÍNEZ-MURILLO M.F., MARZEN M., MINGORANCE M.D., ORTIGOSA L., PETERS P., REGÜÉS D., RUIZ-SINOJA J.D., SCHOLTEN T., SEEGER M., SOLÉ-BENET A., WENGEL R., WIRTZ S. (2013). European small portable rainfall simulators: a comparison of rainfall characteristics. *Catena* 110, s. 100-112.
- ISIDORO J.M.G.P., SILVEIRA A., LIMA B.O. (2022). Development of a large-scale rainfall simulator for urban hydrology research. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 27(1).
- JADCZYSZYN J. (1999). Analiza spływu powierzchniowego i strat gleby o różnym uziarnieniu w doświadczeniu modelowym. *Pam. Puł.* 119, s. 121-132.
- JADCZYSZYN J. (2010). Spływ powierzchniowy i erozja gleby w użytkowanej rolniczo mikrozelewni stokowej (Rogalów, Wyżyna Lubelska). *Prace i Studia Geograficzne* 45, s. 67-78.
- JAHN A. (1956). Badania stoków w Polsce. *Przegląd Geograficzny* 28, s. 281-302.
- JANKOWSKI A.T. (1986). Antropogeniczne zmiany stosunków wodnych na obszarze uprzemysłowionym i urbanizowanym (na przykładzie Rybnickiego Okręgu Węglowego). *Prace Naukowe UŚ, Katowice*.
- JAWGIEL K. (2016). Modelowanie linii spływu powierzchniowego w zlewni Różanego Strumienia w suburbanizowanej strefie Poznania. *Technologia Wody* 4(48), s. 40-46.
- JAWORSKI J. (2004). Parowanie w cyklu hydrologicznym zlewni rzecznych. *Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Warszawa*.
- JOKIEL P. (2002). Zagospodarowanie terenu i jego rola w obiegu wody na przykładzie małej zlewni w strefie podmiejskiej Łodzi. [W:] Ciupa T., Kupczyk E., Suligowski R. (red.), *Obieg wody w zmieniającym się środowisku*. *Prace Instytutu Geografii AŚ, Kielce*, 7, s. 77-86.
- JÓZEFACIUK A., JÓZEFACIUK C., NOWOCIEŃ E. (1996). Modelowe badania podatności gleb na erozję – rozwiązania techniczne. *Mat. Sem. „Ochrona agroekosystemów zagrożonych erozją”, Puławy, K(11/1)*, s. 265-272.
- JÓZEFACIUK C. (1966). Zastosowanie deszczowni do badań wodnej erozji gleb. *Wiadomości IMUZ* 6(3), s. 285-290.
- JÓZEFACIUK C., JÓZEFACIUK A. (1996). Mechanizm i wskazówki metodyczne badania procesów erozji. *Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa*.
- JÓZEFACIUK C., KERN H., OCZOŚ Z., JADCZYSZYN J. (1994). Zmiany ilościowe i jakościowe erodowanych gleb w Werbkowicach w latach 1950-1990. *IUNG Puławy* 5(79), s. 47-73.
- JU X., LI W., LI J., HE L., MAO J., HAN L. (2023). Future climate change and urban growth together affect surface runoff in a large-scale urban agglomeration. *Sustainable Cities and Society* 99.
- KACZOROWSKA Z. (1962). Opady w Polsce w przekroju wieloletnim – tendencje, okresowość oraz prawdopodobieństwo niedoboru i nadmiaru opadów. *Prace Geograficzne* 33, IG PAN.
- KAMALI M., DELKASH M., TAJRISHY M. (2017). Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. *Journal of Environmental Management* 187, s. 43-53.
- KANCLERZ J., MURAT-BŁAŻEJEWSKA S., WOLAK A. (2012). Wyznaczenie wielkości opadu efektywnego i przepływów maksymalnych w małych zlewniach niezurbanizowanych. *Rocznik Ochrona Środowiska* 14, s. 572-581.

- KARCZEWSKI A. (1981). Soil denudation on cultivated land in the Polish Lowland near Poznań. *Quaestiones Geographicae* 7, s. 47-71.
- KASVIO P., ULVI T., KOSKIAHO J., JORMOLA, J. (2016). Kosteikkojen ja biosuodatusalueiden toimivuus hulevesien käsittelyssä – HULE-hankkeen loppuraportti (online). Suomen Ympäristökeskus.
- KENDON E.J., BLENKINSOP S., FOWLER H.J. (2018). When will we detect changes in short-duration precipitation extremes? *Journal of Climate* 31(7), s. 2945-2964.
- KIBLER D.F. (1982). Urban stormwater hydrology. Water resources monograph. American Geophysical Union, Washington.
- KIJOWSKA-STRUGAŁA M., KISZKA K. (2018). Environmental factors affecting splash erosion in the mountain area (the Western Polish Carpathians). *Landform Analysis* 36, s. 97-111.
- KIM J.K., ONDA Y., KIM M.S., YANG, D.Y. (2014). Plot-scale study of surface runoff on well-covered forest floors under different canopy species. *Quaternary International* 344, s. 75-85.
- KIRKBY M.J. (2001). From plot to continent: reconciling fine and coarse scale erosion models. [W:] Stott D.E., Mohtar R.H., Steinhardt G.C. (red.), *Sustaining the global farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory*, s. 860-870.
- KIRKBY M.J., CHORLEY R.J. (1967). Throughflow, overland flow and erosion. *Bulletin – International Association of Scientific Hydrology* 12, s. 5-21.
- KIRSCHENSTEIN M., BARANOWSKI D. (2005). Sumy opadów atmosferycznych w Polsce w latach 1951-1995. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 56, s. 55-72.
- KIRYLUK A., RAUBA M. 2011. Wpływ rolnictwa na stężenie fosforu ogólnego w wodach powierzchniowych zlewni rzeki Śliny. *Inżynieria Ekologiczna* 26, s. 122-132.
- KLIMASZEWSKI M. (1981). *Geomorfologia*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- KLIMCZAK R. (1993). Spłukiwanie na obszarach o zróżnicowanym użytkowaniu – przebieg i rola we współczesnym środowisku morfogenetycznym (zlewnia Młyńskiego Potoku, Pomorze Zachodnie). [W:] Kostrzewski A. (red.), *Geokosystem obszarów nizinnych. Zeszyty Naukowe IGiPZ PAN* 6, s. 61-78.
- KOLENDOWICZ L., CZERNECKI B., PÓLROLNICZAK M., TASZAREK M., TOMCZYK A. M., SZYGA-PLUTA K. (2019). Homogenization of air temperature and its long-term trends in Poznań. *Theoretical and Applied Climatology* 136, s. 1357-1370.
- KOSSOWSKA-CEZAK U., BAIKIEWICZ-GRABOWSKA E. (2008). *Parowanie*. [W:] *Podstawy hydrometeorologii*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 153-192.
- KOSSOWSKA-CEZAK U., MARTYN D., OLSZEWSKI K., KOPACZ-LEMBOWICZ M. (2000). *Meteorologia i klimatologia. Pomiar, obserwacje, opracowania*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Łódź.
- KOSTRZEWSKI A., (2001). Stan badań erozji gleb na Pomorzu Zachodnim. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis* 217, *Agricultura* 87, s. 117-124.
- KOSTURKIEWICZ A., SZAFRAŃSKI C. (1993). Spływy powierzchniowe i podpowierzchniowe z bogato rzeźbionych terenów. [W:] Kostrzewski A. (red.), *Geokosystem obszarów nizinnych, Zeszyty Naukowe IGiPZ PAN* 6, s. 123-130.
- KOSZELNIK P., TOMASZEK J. (2011). Spływy powierzchniowe azotu do wód Sanu i jego dopływów. [W:] Krupa J., Soliński T. (red.), *Turystyka wiejska, ochrona środowiska i dziedzictwo kulturowe Pogórza Dynowskiego. Praca zbiorowa, Dynów, Związek Gmin Pogórza Dynowskiego*, s. 179-186.
- KOTTEK M., GRIESER J., BECK C., RUDOLF B., RUBEL F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3), s. 259-263.
- KOWALEWSKI Z. (2006). Powodzie w Polsce – rodzaje, występowanie oraz system ochrony przed ich skutkami. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 6, 1(16), s. 207-220.
- KRON W. (2002). Flood risk = hazard · exposure · vulnerability. [W:] Wu B., Wang Z.Y., Wang G., Huang G.G.H., Fang H., Huang J. (red.), *Flood defence*. Science Press, New York.

- KRÓLIKOWSKI A., KRÓLIKOWSKA J. (2009). Ocena wpływu współczynników spływu i opóźnienia na przepływy obliczeniowe w sieci kanalizacji deszczowej. *Rocznik Ochrona Środowiska* 11, s. 163-171.
- KULIK A.V., GORDIENKO O.A. (2022). Conditions of snowmelt runoff formation on slopes in the south of the Volga Upland. *Eurasian Soil Science* 55, s. 36-44.
- KUNDZEWICZ Z., JANIA J. (2007). Extreme hydro-meteorological events and their impacts. From the global down to the regional scale. *Geographia Polonica* 80(2), s. 9-23.
- KUNDZEWICZ Z.W. (2011). Zmiany klimatu, ich przyczyny i skutki – obserwacje i projekcje. *Landform Analysis* 15, s. 39-49.
- KUNTALIITTO. (2012). *Hulevesiopus*. Helsinki: Suomen kuntaliitto.
- KUSUMANDARI A., SATRIAGASA M.C., HADI PURWANTO R., WIDAYANTI W.T. (2021). Erosion measurement by using rainfall simulator at grass soil and after harvested soil in Wanagama. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 810.
- LAMBOR J. (1954). Klasyfikacja typów powodzi i ich przewidywanie. *Gospodarka Wodna* 14(4), s. 129-131.
- LAMBOR J. (1962). *Metody prognoz hydrologicznych*. WKiŁ, Warszawa.
- LAPOINTE M., ROCHMAN C.M., TUFENKIJ N. (2022). Sustainable strategies to treat urban runoff needed. *Nature Sustainability* 5, s. 366-369.
- LEE J.H., BANG K.W. (2000). Characterization of urban stormwater runoff. *Water Research* 34(6), s. 1773-1780.
- LEITINGER G., TASSER E., NEWESELY C., OBOJES N., TAPPEINER U. (2010). Seasonal dynamics of surface runoff in mountain grassland ecosystems differing in land use. *Journal of Hydrology* 385(1-4), s. 95-104.
- LENART W. (1993). *Opad atmosferyczny*. [W:] Soczyńska U. (red.), *Podstawy hydrologii dynamicznej*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, s. 101-116.
- LI C., PAN C. (2018). The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall. *Journal of Hydrology* 558, s. 90-103.
- LI X.Y., CONTRERAS S., SOLE-BENET A., CANTON Y., DOMINGO F., LAZARO R., LIN H., WESEMAEL B.V., PUGDEFABREGAS J. (2011). Controls of infiltration-runoff processes in Mediterranean karst rangelands in SE Spain. *Catena* 86, s. 98-109.
- LI. Y., YANG J., YANG M., ZHANG F. (2024). Exploring biochar addition impacts on soil erosion under natural rainfall: A study based on four years of field observations on the Loess Plateau. *Soil and Tillage Research* 236.
- LIDAR (2023). Powiat poznański i miasto Poznań. <https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/dane-pomiarowe-lidar-lidar/> (dostęp: 28.10.2023)
- LIU J., SAMPLE D.J., BELL C., GUAN Y. (2014). Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater. *Water (Basel)* 6(4), s. 1069-1099.
- LIU W., CHEN W., FENG Q. (2018). Field simulation of urban surfaces runoff and estimation of runoff with experimental curve numbers. *Urban Water Journal* 15(5), s. 418-426.
- LIU W., FENG Q., DEO R.C., YAO L., WEI W. (2020). Experimental study on the rainfall-runoff responses of typical urban surfaces and two green infrastructures using scale-based models. *Environmental Management* 66, s. 683-693.
- LORENC H., CEBULAK E., GŁOWICKI B., KOWALEWSKI M. (2009). Struktura występowania intensywnych opadów deszczu powodujących zagrożenie dla społeczeństwa, środowiska i gospodarki Polski. [W:] Lorenc H. (red.), *Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju*. IMGW Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, s. 7-32.
- LUK S.H., ABRAHAMS A.D., PARSONS A.J. (1986). A simple rainfall simulator and trickle system for hydrogeomorphological experiments. *Physical Geography* 7, s. 344-356.
- MAJEWSKI M. (2014). Wykorzystanie eksperymentu terenowego w badaniach erozji wodnej gleb w zlewni Chwalimskiego Potoku (Pojezierze Drawskie, górna Parsęta). *Prace Geograficzne UJ* 138, s. 57-66.

- MAJEWSKI M. (2016). Wpływ struktury opadów na wielkość spływu powierzchniowego i splukiwania w zlewni Chwalimskiego Potoku (górną Parsętą). [W:] Kostrzewski A., Szpikowski J., Domańska M. (red.), Funkcjonowanie, tendencje rozwoju, zagrożenia i ochrona środowiska przyrodniczego Polski. Biblioteka Monitoringu Środowiska XXX, Storkowo, s. 162-168.
- MAJEWSKI M. (2019). Soil erosion under simulated rainfall, upper Parsęta catchment, NW Poland. [W:] 70 years Macedonian Geographical Society, New trends in Geography, Physical Geography, Ohrid, s. 55-64.
- MAJEWSKI M. (2020). Sekularne i ekstremalne procesy erozji wodnej gleb na Pojezierzu Drawskim. *Landform Analysis* 39, s. 1-104.
- MAJEWSKI M., CZUCHAJ A., MARCINIAK M. (2023). Impact of rainfall intensity on soil erosion based on experimental research. *Landform Analysis* 42, s. 25-36.
- MAJEWSKI M., SZPIKOWSKI J. (2024). Effect of rainfall parameters on soil erosion in Chwalimski Brook catchment, NW Poland. *Geomorphology* 454, 109167.
- MAJEWSKI W. (2004). Światowy Dzień Wody 2004. [W:] Woda i kataklizmy. Materiały z posiedzenia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Warszawa 29.03.2004. Wydawnictwo KDW PAN, Gdańsk, s. 10-18.
- MAJOR M., MARCINIAK M., KOLENDOWICZ L., CHMIEL J., CELKA Z., CHUDZIŃSKA M., MAJEWSKI M., KRUSZYK R., PÓLROLNICZAK M., OKOŃSKA M., ZIĘBA M., WOLNY F., CZUCHAJ A. (2020). Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2019 roku. Poznań.
- MAJOR M., MARCINIAK M., KOLENDOWICZ L., CHMIEL J., MAJEWSKI M., KRUSZYK R., PÓLROLNICZAK M., OKOŃSKA M., GUDOWICZ J., OLEJARCZYK M., ZIĘBA M. (2017). Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Różany Strumień w 2016 roku. Poznań.
- MAJOR M., MARCINIAK M., KOLENDOWICZ L., CHUDZIŃSKA M., DAJDOK Z., KRUSZYK R., MAJEWSKI M., OKOŃSKA M., PÓLROLNICZAK M., STEFANIUK M. (2023). Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2022 roku. Poznań.
- MAJOR M., MARCINIAK M., KOLENDOWICZ L., CHUDZIŃSKA M., MAJEWSKI M., KRUSZYK R., PÓLROLNICZAK M., OKOŃSKA M., OLEJARCZYK M., ZIĘBA M. (2018). Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Różany Strumień w 2017 roku. Poznań.
- MAJOR M., MARCINIAK M., KOLENDOWICZ L., CHUDZIŃSKA M., MAJEWSKI M., KRUSZYK R., PÓLROLNICZAK M., OKOŃSKA M., OLEJARCZYK M., ZIĘBA M. (2019): Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Różany Strumień w 2018 roku. Poznań.
- MAJOR M., MARCINIAK M., KOLENDOWICZ L., CHUDZIŃSKA M., MAJEWSKI M., KRUSZYK R., PÓLROLNICZAK M., OKOŃSKA M., STEFANIUK M. (2021). Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2020 roku. Poznań.
- MAJOR M., MARCINIAK M., KOLENDOWICZ L., CHUDZIŃSKA M., MAJEWSKI M., KRUSZYK R., PÓLROLNICZAK M., OKOŃSKA M., STEFANIUK M. (2022). Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2021 roku. Poznań.
- MARCHI L., BORGA M., PRECISO E., GAUME E. (2010). Characterization of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology* 394, s. 118-133.
- MARSALEK J., ROCHFORD Q., BROWNLEE B., MAYER T., SERVOS M. (1999). An exploratory study of urban runoff toxicity. *Water Science and Technology* 39(12), s. 33-39.
- MARSHALL M.R., BALLARD C.E., FROGBROOK L., SOLLOWAY I., MCINTYRE N., REYNOLDS B., WHEATER H.S. (2014). The impact of rural land management changes on soil hydraulic properties and runoff processes: results from experimental plots in upland UK. *Hydrological Processes* 28(4), s. 2617-2629.
- MAYERHEWS F., VERSTRAETEN G., BORRELLI P., VANMAERCKE M., POESEN J., STEEGEN A., DEGRÉ A., CÁRCELES RODRÍGUEZ B., BIELDERS C., FRANKE C., ALARY C., ZUMR D., PATAULT E., NADAL-ROMERO E., SMOLSKA E., LICCIARDELLO F., SWERTS G., THODSEN H., CASALÍ J., ESLAVA J., RICHET J.B., OUVRY J.F., FARGUELL J., ŚWIĘCHOWICZ J., NUNES J.P., PAK L.T., LIAKOS L., CAMPO-BESCÓS M.A., ŻELAZNY M., DELAPORTE M., PINEUX N., HENIN N., BEZAK N., LANA-RENAULT N., TZORAKI O., GIMÉNEZ R., LI T., DURÁN ZUAZO V.H., BAGARELLO V., PAMPALONE V., FERRO V., ÚBEDA X., PANAGOS P. (2023).

- EUSEDcollab: a network of data from European catchments to monitor net soil erosion by water. *Nature* 10, 515.
- MAYERHOFER C., MEIßL G., KLEBINDER K., KOHL B., MARKART G. (2017). Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator – effects of land use and land cover on surface runoff in Alpine catchments. *Catena* 156, s. 184-196.
- MENDES T.A., DUTRA ALVES R., DE FARIAS NEVES GITIRANA JR. G., APARECIDO DOS SANTOS PEREIRA S., RODRIGUEZ REBOLLEDO J.F., PEREIRA DA LUZ M. (2021). Evaluation of rainfall interception by vegetation using a rainfall simulator. *Sustainability* 13(9), 5082.
- MHASKE S.N., PATHAK K., BASAK A. (2019). A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory. *Catena* 172, s. 408-420.
- MICHALCZYK Z. (red.), (2012). Ocena warunków występowania wody i tworzenia się spływu powierzchniowego w Lublinie. Wydawnictwo UMCS, Lublin.
- MICHALSKA E., WINNICKA G. (2003). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Grodzisk Wielkopolski. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- MIĘTKIEWICZ M., SYDOW S. (1999). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Pobiedziska. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- MIKULSKI Z. (1997). Powódź jako odwieczna klęska żywiolowa. *Gospodarka Wodna* 11, s. 364-370.
- MIODUSZEWSKI W. (1998). Woda jako czynnik zagrożenia w krajobrazie rolniczym. [W:] Więzik B., Maciejewski M. (red.), *Zagrożenia klęskami żywiołowymi. Materiały Konferencyjne Bielsko-Biała 14-16 października*. Wydawnictwo Naukowe DWN, Kraków, s. 33-42.
- MOORE I.D., HIRSCHI M.C., BARTFIELD B.J. (1983). Kentucky rainfall simulator. *T Asea* 26(4), s. 1085-1089.
- MORGAN R.P.C., QUINTON J.N., RICKSON R.J. (1994). Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: the EUROSEM approach. *Outlook Agric* 23, s. 5-9.
- MOUSTAKIS Y., PAPALEXIOU S.M., ONOF C.J., PASCHALIS A. (2021). Seasonality, intensity, and duration of rainfall extremes change in a warmer climate. *Earth's Future* 9(3).
- MROWIEC M., SUCHANEK E. (2015). Badania modelowe spływu z utwardzonych powierzchni przepuszczalnych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1, s. 15-18.
- NARODOWY SPIS POWSZECHNY LUDNOŚCI I MIESZKAŃ 2021. <https://spis.gov.pl/> (dostęp: 28.10.2023)
- NATIONAL WEATHER SERVICE WEATHER FORECAST OFFICE NOAA. Floods and flash floods. <https://www.weather.gov/ffc/floods> (dostęp: 05.03.2024)
- NAVES J., ANTA J., SUÁREZ J., PUERTAS J. (2020). Hydraulic, wash-off and sediment transport experiments in a full-scale urban drainage physical model. *Scientific Data* 7(1), 44.
- NEARING M.A., FOSTER G.R., LANE L.J., FINKNER S.C. (1989). A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. *Trans. ASAE* 32, s. 1587-1593
- NIEDŹWIEDŹ T. (red.) (2003). *Słownik meteorologiczny*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- NIEDŹWIEDŹ T., MICHALCZYK Z., STARKEL L., USTRNUL Z. (2004). Prezentacja na konferencji: Ekstremalne zdarzenia meteorologiczne i hydrologiczne w Polsce (ocena zdarzeń oraz prognozowanie ich skutków dla środowiska życia człowieka). Sosnowiec, 13.12.2004.
- NIEDŹWIEDŹ, T., MICHALCZYK, Z., STARKEL, L., USTRNUL, Z. (2006). Meteorological, hydrological and geomorphological extreme events in central Europe – an attempt of classification. [W:] Jania J., Kundzewicz W.P. (red.), *Extreme hydrometeorological events in Poland and their impacts – European context*. International Conference, Warsaw, Poland, 7-9 Dec. 2006, Book of Abstracts, s. 130-131.
- NIELSEN K.T., MOLDRUP P., THORNDHAL S., NIELSEN J.E., DUUS L.E., RASMUSSEN S.H., UGGERBY M., RASMUSSEN M.R. (2019). Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. *Hydrological Processes* 33, s. 3364-3377.
- NOWAK J. (1998). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Śrem. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.

- NOWAK J. (2003). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Wągrowiec. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- NOWOCIEŃ E., PODOLSKI B., WAWER R. (2004). Estimating outflow and sediment uptake chosen Polish soil kinds in simulated conditions. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities* 7(2).
- O'GORMAN P.A. (2015). Precipitation extremes under climate change. *Current Climate Change Reports* 1(2), s. 49-59
- OKOŃSKA M., WOLNY F. (2011). Rozpoznanie hydrogeologiczne jako element przygotowań do badań migracji znacznika w warstwie wodonośnej. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 445, s. 447-454.
- OLECHNOWICZ-BOBROWSKA B. (1970). Częstość dni z opadem w Polsce. *Prace Geograficzne IG PAN*, 86.
- OSTROWSKI J., CZARNECKA H., GŁOWACKA B., KRUPA-MARCHLEWSKA J., ZANIEWSKA M., SASIM M., MOSKWICKI T., DOBROWOLSKI A. (2012). Nagłe powodzie lokalne (*flash flood*) w Polsce i skala ich zagrożeń. [W:] Lorenc H. (red.) *Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo*, tom 3. Kłęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju. IMGW-PIB, Warszawa, s. 123-149.
- PALL R., DICKINSON W.T., BEALS D., MCGIRR R. (1983). Development and calibration of rainfall simulator. *Canadian Agricultural Engineering* 25, s. 181-187.
- PAŁYS S., MAZUR Z. (1994). Erozja wodna gleb w zlewni rolniczej i leśnej na Wyżynie Lubelskiej. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 266, *Melioracje i Inżynieria Środowiska* 14, s. 129-137.
- PANAGOS P., BORRELLI P., MATTHEWS F., LIAKOS L., BEZAK N., DIODATO N., BALLABIO C. (2022). Global rainfall erosivity projection for 2050 and 2070. *Journal of Hydrology* 610.
- PANINI T., TORRI D., PELLEGRINI S., PAGLIAI M., SALVADOR SANCHIS M.P. (1997). A theoretical approach to soil porosity and sealing development using simulated rainstorms. *Catena* 31, s. 199-218.
- PAŃSTWOWY REJESTR GRANIC (2023). <https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/panstwowy-rejestr-granic-prg/> (dostęp: 21.09.2023)
- PARSAKHOO A., MAJID LOTFALIAN M., KAVIAN A., HOSEINI S.A., DEMIR M. (2012). Calibration of a portable single nozzle rainfall simulator for soil erodibility study in hyrcanian forests. *African Journal of Agricultural Research* 7(27), s. 3957-3963.
- PATWARDHAN A.S. NIEBER J.L., JOHNS E.L. (1990). Effective rainfall estimation methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116(2), s. 182-193.
- PATZ J.A., FRUMKIN H., HOLLOWAY T., VIMONT D.J., ANDREW HAINES A. (2014). Climate change: challenges and opportunities for global health. *JAMA* 312, s. 1565-1580.
- PEGRAM G.G., CLOTHIER A.N. (2001). High resolution space-time modelling of rainfall: the „string of beads” model. *Journal of Hydrology* 241(1-2), s. 26-41.
- PEZZANITI D., BEECHAM S., KANDASAMY J. (2009). Influence of clogging on the effective life of permeable pavements. *Water Management* 162(3).
- PIECHNIK L. (1992). Nowe konstrukcje symulatorów deszczu do badań odporności gleby na erozję. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie, Sesja Naukowa* 35, s. 113-124.
- PIERCE C.E., HARDAKER P.J., COLLIER C.G., HAGGETT C.M. (2000). GANDOLF: A system for generating automated nowcasts of convective precipitation. *Meteorological Applications* 7(4), s. 341-360.
- PIETRZAK S., WESOŁOWSKI P., BRYŚIEWICZ A., DUBIL M. (2013). Chemizm polowego spływu powierzchniowego na tle uwarunkowań agrotechnicznych, w wybranym gospodarstwie województwa zachodniopomorskiego. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 13, 3(43), s. 115-129.
- PLUCZYŃSKI E., SYDOW S. (1993). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Duszniki Wielkopolskie. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- POCIASK-KARTECZKA J. (red.) (2006). *Zlewnia. Właściwości i procesy*. IGiGP UJ, Kraków.
- POCIASK-KARTECZKA J., ŻYCHOWSKI J. (2014). Powodzie błyskawiczne (flash floods) – przyczyny i przebieg. [W:] Ciupa T., Suligowski R. (red.), *Woda w mieście. Monografie Komisji Hydrologicznej PTG*, tom 2, Instytut Geografii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce, s. 59-71.

- PODWOJEWSKI P., JANEAU J.L., GRELLIER S., VALENTIN C., LORENTZ S., CHAPLOT V. (2011). Influence of grass soil cover on water runoff and soil detachment under rainfall simulation in a sub-humid South African degraded rangeland. *Earth Surface Processes and Landforms* 36(7), s. 911-922.
- POŻARYSKI W. (1974). Podział obszary Polski na jednostki tektoniczne. [W:] Pożaryski W. (red.), *Budowa geologiczna Polski*, t. IV. Tektonika, cz. 1. Niż Polski. s. 24-34.
- PREIN A.F., RASMUSSEN R.M., IKEDA K., LIU C., CLARK M. P., HOLLAND G. J. (2017): The future intensification of hourly precipitation extremes. *Nature Climate Change* 7(1), s. 48-52
- PRZĄDKA Z. (2009). Porównanie wyników oceny parowania jeziora Łękek uzyskanych metodą obliczeniową i pomiarową. *Monitoring Środowiska Przyrodniczego* 10, s. 73-78.
- QIN H., LI Z., FU G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management* 129.
- REJMAN J. (2001). Ocena przemieszczenia materiału glebowego w procesie erozji wodnej na glebie lessowej. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis* 217, *Agricultura* 87, s. 195-200.
- REJMAN J. (2006). Wpływ erozji wodnej i uprawowej na przekształcanie stoków lessowych. *Acta Agrophysica* 136(3).
- REJMAN J., BRODOWSKI R. (2010). Ocena erozji wodnej gleby lessowej na uprawach buraka cukrowego i pszenicy jarej na podstawie badań poletkowych. [W:] Smolska E., Rodzik J. (red.), *Procesy erozyjne na stokach użytkowanych rolniczo (metody badań, dynamika i skutki)*. *Prace i Studia Geograficzne* 45, s. 215-228.
- REJMAN J., BRODOWSKI R., IGLIK I. (2008). Annual variations of soil erodibility of silt loam developed from loess based on 10-years runoff plot studies. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW* 39, s. 77-83.
- REJMAN J., USOWICZ B. (1999). Ilościowy opis przenoszenia gleby i wody w procesie erozji wodnej. *Acta Agrophysica* 23, s. 143-148.
- REJMAN J., USOWICZ B. (2002). Ocena erozji wodnej gleb lessowych oparta na pomiarach poletkowych. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 11, 2(25), s. 15-22.
- RENARD K.G., FOSTER G.R., WEESIES G.A, MCCOOL D.K. YDER D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook* 703, US Department of Agriculture, Washington DC.
- ROCQUE R.J., BEAUDOIN C., NDJABOUE R., CAMERON L., POIRIER-BERGERON L., POULIN-RHEAULT R.A., FALLON C., TRICCO A.C., O WITTERMAN H. (2021). Health effects of climate change: an overview of systematic reviews. *BMJ Open* 11.
- ROCZNIK METEOROLOGICZNY 2018. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy. https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/Roczniki/Rocznik%20meteorologiczny/Rocznik%20Meteorologiczny%202018.pdf (dostęp: 22.09.2022)
- ROCZNIK METEOROLOGICZNY 2019. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy. https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/Roczniki/Rocznik%20meteorologiczny/Rocznik%20Meteorologiczny%202019.pdf (dostęp: 22.09.2022)
- ROCZNIK METEOROLOGICZNY 2020. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy. https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/Roczniki/Rocznik%20meteorologiczny/Rocznik%20Meteorologiczny%202020.pdf (dostęp: 22.09.2022)
- ROCZNIK METEOROLOGICZNY 2021. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy. https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/Roczniki/Rocznik%20meteorologiczny/Rocznik%20Meteorologiczny%202021.pdf (dostęp: 22.09.2022)
- ROCZNIK METEOROLOGICZNY 2022. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy. https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/Roczniki/Rocznik%20meteorologiczny/Rocznik%20Meteorologiczny%202022.pdf (dostęp: 22.09.2022)
- ROSA B., KOZARSKI S. (1980). Przeglądowa mapa geomorfologiczna Polski 1:500 000, arkusz Poznań. Instytut Geografii PAN, Warszawa.

- RUMMUKAINEN M. (2021). Changes in climate and weather extremes in the 21st century. *WIREs Climate Change* 2012, 3, s.115-129.
- RUSSO B., GÓMEZ M., MARTÍNEZ P., SÁNCHEZ H. (2005). Methodology to study the surface runoff in urban streets and the design of drainage inlets systems. Application in a real case study. 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, 21-26 August 2005.
- RÜTTIMANN M., SCHAUB D., PRASUHN V., RÜEGG W. (1995). Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland – some critical considerations. *Catena* 25, s. 127-139.
- SALATA R., SONDAJ L., WOJCIECHOWSKI M. (2012). Ocena aktualnego stanu zabezpieczenia KWB Turów w aspekcie zdarzeń powodziowych zaistniałych w sierpniu 2010 r. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 82, s. 157-172.
- SALEM H.M., MESELHY A.A. (2021). A portable rainfall simulator to evaluate the factors affecting soil erosion in the northwestern coastal zone of Egypt. *Natural Hazards* 105, s. 2937-2955
- SAMANTARAY S., GHOSE D.K. (2022). Prediction of S12-MKII rainfall simulator experimental runoff data sets using hybrid PSR-SVM-FFA approaches. *Journal of Water and Climate Change* 13(2).
- SANGÜESA C., ARUMÍ J., PIZARRO R., LINK O. (2010). A rainfall simulator for the in situ study of superficial runoff and soil erosion. *Chilean Journal Of Agricultural Research*, s. 178-182.
- SASIK J. (1992). Parowanie ze stawu rybnego. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Rozprawa habilitacyjna* 107.
- SCAFETTA N. (2024). Impacts and risks of „realistic” global warming projections for the 21st century. *Geoscience Frontiers* 15(2).
- SCHULZE R. (2000). Transcending scales of space and time in impact studies of climate and climate change on hydrohydrological responses. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 82, s. 185-212
- SENEVIRATNE S.I., ZHANG X., ADNAN M., BADI W., DERECZYNSKI C., DI LUCA A., GHOSH S., ISKANDAR I., KOSSIN J., LEWIS S., OTTO F., PINTO I., SATOH M., VICENTE-SERRANO S., WEHNER M., ZHOU B. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate*. Cambridge University Press, s. 1513-1766.
- SHRESTHA A.B., SHAH S.H., KARIM R. (2008). Resource manual on flash flood risk management. Module 1: Community-based management. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu.
- SIMANTON J.R., JOHNSON C.W., NYHAN J.W., ROMNEY E.M. (1985). Rainfall simulation on rangeland erosion plots. [W:] Lane L.J. (red.), *Proceedings Rainfall Simulator Worskhop, January 14-15, Tucson*. Society for Range Management, Denver, s. 11-17.
- SIRVENT J., DESIR G., GUTIERREZ M., SANCHO C., BENITO G. (1997). Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE Spain). *Geomorphology* 18, s. 61-75.
- SIVAPALAN M., KALMA J.D. (1995). Scale problems in hydrology: contributions of the Robertson Workshop. *Hydrological Processes* 9, s. 243-250.
- SKOMPSKI S. (1990). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Oborniki Wielkopolskie. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- SLATTERY M.C., BRYAN R.B. (1994). Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface. *Catena* 22, s. 17-34.
- SŁUPIK J. (1972). Spływ powierzchniowy na stokach górskich Karpat fliszowych. *Gospodarka Wodna* 8, s. 290-295.
- SŁUPIK J. (1973) Zróżnicowanie spływu powierzchniowego na fliszowych stokach górskich. *Dokumentacja Geograficzna* 2.
- SŁUPIK J. (1981). Rola stoku w kształtowaniu odpływu w Karpatach fliszowych. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 142, Kraków.

- SŁYŚ D., STEC A. (2008). Techniczne i estetyczne aspekty projektowania otwartych zbiorników retencyjnych wód deszczowych. *Gospodarka Wodna*, 10, s. 411-414.
- SMITH A., BAECK M.L., MEIERDIERCKX K.L., MILLER A.J., KRAJEWSKI W.F. (2007). Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Advances in Water Resources* 30(10), s. 2087-2097.
- SMOLSKA E. (2002). The intensity of soil erosion in agricultural areas in North-Eastern Poland. *Landform Analysis* 3, s. 25-33.
- SMOLSKA E. (2005). Znaczenie spłukiwania w modelowaniu stoków młodoglacjalnych (na przykładzie Pojezierza Suwalskiego). Wydawnictwo WGRS UW, Warszawa.
- SMOLSKA E. (2008). Rola opadów ekstremalnych w denudacji stoków młodoglacjalnych na przykładzie Pojezierza Suwalskiego. *Landform Analysis* 8, s. 69-72.
- SMOLSKA E. (2009). Metody pomiaru spłukiwania. [W:] *Procesy erozyjne na stokach użytkowanych rolniczo. Warsztaty Geomorfologiczne. Lublin-Guciów*, s. 23.
- SMOLSKA E. (2010a). Spłukiwanie gleby na użytkowanych rolniczo stokach młodoglacjalnych na przykładzie Pojezierza Suwalskiego. [W:] Ciupa T., Suligowski R. (red.), *Woda w badaniach geograficznych. Instytut Geografii Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce*, s. 137-149.
- SMOLSKA E. (2010b). Spływ wody i erozja gleby na piaszczystym stoku w obszarze młodoglacjalnym – pomiary poletkowe (Pojezierze Suwalskie, Polska NE). [W:] Smolska E., Rodzik J. (red.), *Procesy erozyjne na stokach użytkowanych rolniczo (metody badań, dynamika i skutki). Prace i Studia Geograficzne* 45, s. 197-214.
- SMOROŃ S. (2012). Zagrożenie eutrofizacją wód powierzchniowych wyżyn lessowych Małopolski. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 12., 1(37), s. 181-191.
- SOLON J., BORZYSZKOWSKI J., BIDŁASIK M., RICHLIN A., BADORA K., BALON J., BRZEZIŃSKA-WÓJCIK T., CHABUDZIŃSKI Ł., DOBROWOLSKI R., GRZEGORCZYK I., JODŁOWSKI M., KISTOWSKI M., KOT R., KRĄŻ P., LECHNIO J., MACIAS A., MAJCHROWSKA A., MALINOWSKA E., MIGOŃ P., MYGA-PIĄTEK U., NITA J., PAPIŃSK E., RODZIK J., STRZYŻ M., TERPIŁOWSKI S., ZIAJA W. (2018). Physico-geographical mesoregions of Poland: verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographia Polonica* 91(2), s. 143-170.
- STACH A. (2009). Analiza struktury przestrzennej i czasoprzestrzennej maksymalnych opadów dobowych w Polsce w latach 1956-1980. Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu. Seria Geografia 85, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- STĘPNIEWSKI K. (2008). Wpływ spływu roztopowego i deszczowego na wielkość spłukiwania z poletek o różnym użytkowaniu. *Landform Analysis* 9, s. 49-52.
- STĘPNIEWSKI K., DEMCZUK P., RODZIK J., SIWEK K. (2010). Związki między opadem deszczu a spływem powierzchniowym i spłukiwaniem gleby na poletkach doświadczalnych o różnym użytkowaniu (Guciów-Roztocze Środkowe). [W:] Smolska E., Rodzik J. (red.), *Procesy erozyjne na stokach użytkowanych rolniczo (metody badań, dynamika i skutki). Prace i Studia Geograficzne* 45, s. 229-241.
- SUCHOŻEBRSKI J. (2018). Zasoby wodne Polski. [W:] *Zarządzanie zasobami wodnymi w Polsce 2018. Global Compact Network Poland*, Warszawa, s. 92-96.
- SWIANIEWICZ P., KLIMSKA U. (2005). Społeczne i polityczne zróżnicowanie aglomeracji w Polsce – waniliowe centrum, mozaika przedmieść. *Prace i Studia Geograficzne* 35, s. 45-70.
- SYDOW S. (1996). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Murowana Goślina. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- SZAFRAŃSKI C. (1992). Spływy powierzchniowe i erozja wodna gleb na bogato rzeźbionych terenach polodowcowych. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie. Sesja Naukowa* 35, 101-109.
- SZAFRAŃSKI C., FIEDLER M., STASIK R. (1998). Erozja wodna w małej zlewni użytkowanej rolniczo na Pojezierzu Gnieźnieńskim. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica* 4B/98, s. 73-81.

- SZAFRAŃSKI C., STASIK R. (2001). Występowanie erozji wodnej gleb na Pojezierzu Gnieźnieńskim w latach mokrych. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis* 217, *Agricultura* 87, s. 217-220.
- SZAŁAJDEWICZ J. (2003). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Parkowo. Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB, Warszawa.
- SZPIKOWSKI J. (1998a). System pomiarowy oraz wielkość i mechanizm erozji wodnej gleb na stokach użytkowanych rolniczo w zlewni młodoglacjalnej (górna Parsęta, Chwalimski Potok). [W:] Kostrzewski A. (red.), *Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geosystemów Polski*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, s. 51-59.
- SZPIKOWSKI J. (1998b). Wielkość i mechanizm erozji wodnej gleb na stokach użytkowanych rolniczo w zlewni młodoglacjalnej (górna Parsęta, Chwalimski Potok). *Bibliotheca Fragmenta Agronomica* 4b/98, s. 113-124.
- SZPIKOWSKI J. (2001a). Uwarunkowania mechanizmu procesu rozbryzgu w młodoglacjalnej zlewni Chwalimskiego Potoku (górna Parsęta, Pojezierze Drawskie). [W:] Karczewski A., Zwoliński Z. (red.), *Funkcjonowanie geosystemów w zróżnicowanych warunkach morfoklimatycznych*. Monitoring, ochrona, edukacja. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, s. 511-524.
- SZPIKOWSKI J. (2001b). Wzajemne relacje rozbryzgu i spłukiwania jako przejaw zmienności erozji wodnej gleb na stokach o zróżnicowanym użytkowaniu rolniczym (zlewnia Chwalimskiego Potoku, górna Parsęta). *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis* 217, *Agricultura* 87, s. 221-226.
- SZPIKOWSKI J. (2003a). Contemporary processes of soil erosion and the transformation of the morphology of slopes in agricultural use in the postglacial catchment of the Chwalimski Potok (Upper Parsęta, Drawskie Lakeland). *Quaestiones Geographicae* 22, s. 79-90.
- SZPIKOWSKI J. (2003b). Mechanizm spływu i spłukiwania na stokach użytkowanych rolniczo w zlewni górnej Parsęty. [W:] Kostrzewski A., Szpikowski J. (red.), *Funkcjonowanie geosystemów zlewni rzecznych t. 3. Obieg wody, uwarunkowania i skutki w środowisku przyrodniczym*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 261-277.
- SZPIKOWSKI J. (2010). Uwarunkowania i wielkość rozbryzgu gleby na podstawie pomiarów na powierzchniach testowych w zlewni Chwalimskiego Potoku (Pomorze Zachodnie). [W:] Smolska E., Rodzik J. (red.), *Procesy erozyjne na stokach użytkowanych rolniczo (metody badań, dynamika i skutki)*. *Prace i Studia Geograficzne* 45, s. 181-195.
- SZPINDOR A. (1998). *Zaopatrzenie w wodę i kanalizacja wsi*. Wydanie 2. Arkady Warszawa.
- SZYGA-PLUTA K., GRZEŚKOWIAK K. (2016): Warunki pluwalne w Poznaniu w latach 1981-2015. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 67, s. 239-256.
- SZYMCZAK S., BACKENDORF F., BOTT F., FRICKE K., JUNGHÄNEL T., WALAWENDER E. (2022). Impacts of heavy and persistent precipitation on railroad infrastructure in July 2021: a case study from the Ahr Valley, Rhineland-Palatinate, Germany. *Atmosphere* 13(7), 1118.
- ŚWIĘCHOWICZ J. (1998). Spłukiwanie gleby na stoku eksperymentalnym w rejonie Łazów (Pogórze Wielickie). [W:] Kostrzewski A. (red.), *Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geosystemów Polski*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, s. 217-227.
- ŚWIĘCHOWICZ J. (2002). Współdziałanie procesów stokowych i fluwialnych w odprowadzaniu materiału rozpuszczonego i zawiesiny ze zlewni pogórskiej. Instytut Geografii UJ, Kraków.
- ŚWIĘCHOWICZ J. (2008). Zdarzenia spłukiwania na stokach pogórskich użytkowanych rolniczo (Pogórze Wiśnickie). *Landform Analysis* 9, s. 53-56.
- ŚWIĘCHOWICZ J. (2010). Spłukiwanie gleby na użytkowanych rolniczo stokach pogórskich w latach hydrologicznych 2007-2008 w Łazach (Pogórze Wiśnickie). [W:] Smolska E., Rodzik J. (red.), *Procesy erozyjne na stokach użytkowanych rolniczo (metody badań, dynamika i skutki)*. *Prace i Studia Geograficzne* 45, s. 243-263.
- ŚWIĘCHOWICZ J. (2012). Wartości progowe parametrów opadów deszczu inicjujących procesy erozyjne w zlewniach użytkowanych rolniczo. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków.

- ŚWIĘCHOWICZ J. (2018). The assessment of influence of soil erosion by water in the transformation of agricultural slopes of the Wiśnicz Foothills. *Landform Analysis* 36, s. 85-95.
- ŚWIĘCHOWICZ J., MICHNO A. (2021). Monitoring erozji wodnej gleby a zapis jej skutków w osadach deluwialnych w zlewni Dworskiego Potoku (Przedgórze Brzeskie). Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków.
- THOLIN A.L., KEIFER C.J. (1960). Hydrology of urban runoff. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 125(1), s. 47-106.
- THORNDHAL S., SCHAARUP-JENSEN K. (2016). Comparative analysis of uncertainties in urban surface runoff modelling. NOVATECH 2007 – 6th International Conference on sustainable techniques and strategies for urban water management, June 2007, Lyon, France. s. 1631-1638.
- TOSSELL R.W., DICKINSON W.T., RUDRA R.P., WALL G.J. (1987). A portable rainfall simulator. *Canadian Agricultural Engineering* 29, s. 155-162.
- TRADOWSKY J.S., SJOUKJE Y., PHILIP S.Y., KREIENKAMP F., KEW S.F., LORENZ P., ARRIGHI J., BETTMANN T., CALUWAERTS S., CHAN S.C., DE CRUZ L., DE VRIES H., DEMUTH N., FERRONE A., FISCHER E.M., FOWLER H.J., GOERGEN K., HEINRICH D., HENRICHS Y., KASPAR F., LENDERINK G., NILSON E., OTTO F.E.L., RAGONE F., SENEVIRATNE S.I., SINGH R.K., SKÅLEVÅG A., TERMONIA P., THALHEIMER L., VAN AALST M., VAN DEN BERGH J., VAN DE VYVER H., VANNITSEM S., VAN OLDENBORGH G.J., VAN SCHAEYBROECK B., VAUTARD R., VONK D., WANDERS N. (2023). Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021. *Climatic Change* 176, 90.
- USGS (2005). Flood definitions. U.S. Geological Survey, Kansas Water Science Center <http://ks.water.usgs.gov/Kansas/waterwatch/flood/definition.html> (dostęp: 1.03.2024)
- WANG C., ZHANG G., CHEN S., WAN Y. (2023). Effect of straw incorporation on controlling runoff and soil erosion in cropland with different land degradation degrees. *Land Degradation and Development* 35(2), s. 717-731.
- WARMERDAM P.M.M., KOLE J., STRICKER J.N.M. (1993). Rainfall-runoff modelling in the research area of the Hupselse Beek, the Netherlands, Runoff and sediment yield modelling (RSY-93) Proceedings of the International Symposium held at Warsaw Agric. Univ. – SGGW, Warsaw, s. 45-53.
- WATTS N., AMANN M., ARNELL N., AYEB-KARLSSON S., BEAGLEY J., BELESOVA K., BOYKOFF M., BYASS P., CAI W., CAMPBELL-LENDRUM D., CAPSTICK S., CHAMBERS J., COLEMAN S., DALIN C., DALY M., DASANDI N., DASGUPTA S., DAVIES M., DI NAPOLI C., DOMINGUEZ-SALAS P., DRUMMOND P., DUBROW R., EBI K.L., ECKELMAN M., EKINS P., ESCOBAR L.E., GEORGESON L., GOLDR S., GRACE D., GRAHAM H., HAGGAR P., HAMILTON I., HARTINGER S., HESS J., HSU S.C., HUGHES N., MIKHAYLOV S.J., JIMENEZ M.P., KELMAN I., KENNARD H., KIESEWETTER G., KINNEY P.L., KJELLSTROM T., KNIVETON D., LAMPARD P., LEMKE B., LIU Y., LIU Z., LOTT M., LOWE R., MARTINEZ-URTAZA J., MASLIN M., MCALLISTER L., MCGUSHIN A., MCMICHAEL C., MILNER J., MORADI-LAKEH M., MORRISSEY K., MUNZERT S., MURRAY K.A., NEVILLE T., NILSSON M., SEWE M.O., ORESZCZYN T., OTTO M., OWFI F., PEARMAN O., PENCHEON D., QUINN R., RABBANIHA M., ROBINSON E., ROCKLÖV J., ROMANELLO M., SEMENZA J.C., SHERMAN J., SHI L., SPRINGMANN M., TABATABAEI M., TAYLOR J., TRIÑANES J., SHUMAKE-GUILLEMOT J., VU B., WILKINSON P., WINNING M., GONG P., MONTGOMERY H., COSTELLO A. (2021). The 2020 report of the Lancet countdown on health and climate change: responding to converging crises. *Lancet* 397, s.129-70.
- WEI L., LI F., CAI D., LIU Y., LUO D., WEN Y. (2023). Investigating the effect of biochar application on raindrop-driven soil erosion under laboratory rainfall experiments. *Geoderma* 430.
- WERNER-WIĘCKOWSKA H. (1975). Zmienność warunków kształtowania się odpływu w zlewni. *Przegląd Geograficzny* 32(1-2).
- WIERZBICKI K. (2008). Wybrane metody pomiarów erozji wodnej nachylonych powierzchni utworów antropogenicznych. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 17, 2(40), s. 25-33
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *Agricultural Handbook* 537, U.S. Department of Agriculture, Washington D. C.

- WOŚ A. (1991). *Klimat Polski*. Warszawa, Polskie Wydawnictwo Naukowe.
- WOŚ A. (1993). *Regiony klimatyczne Polski w świetle częstotliwości występowania różnych typów pogody*. Zeszyty IGIPZ PAN 20, Warszawa.
- WU B., LI L., XU L., LI X. (2022). Modelling sheet erosion on steep slopes of clay loess soil using a rainfall simulator. *Biosystem Engineering* 216, s. 1-16.
- WU Y., OUYANG W., HAO Z., YANG B., WANG L. (2018). Snowmelt water drives higher soil erosion than rainfall water in a mid-high latitude upland watershed. *Journal of Hydrology* 556, s. 438-448.
- XU C., RAHMAN M., HAASE D., WU Y., SU M., PAULEIT S. (2020). Surface runoff in urban areas: the role of residential cover and urban growth form. *Journal of Cleaner Production* 262.
- YAKUPOGLU T., GUNDOGAN R., DINDAROGLU T., KUSVURAN K., GOKMEN V., RODRIGO-COMINO J., GYASI-AGYEI Y., CERDÀ A. (2021). Tillage impacts on initial soil erosion in wheat and sainfoin fields under simulated extreme rainfall treatments. *Sustainability* 13(2), 789.
- YAN J., JIN J., CHEN F., YU G., YIN H., WANG W. (2018). Urban flash flood forecast using support vector machine and numerical simulation. *Journal of Hydroinformatics* 20(1), s. 221-231.
- YU B., ROSE C.W., CIESOLKA C.C.A., CAKURS U. (2000) The relationship between runoff rate and lag time and the effects of surface treatments at the plot scale. *Hydrological Sciences Journal* 45(5), s. 709-726.
- ZHANG B., XIE G., LI N., WANG S. (2015). Effect of urban green space changes on the role of rainwater runoff reduction in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning* 140, s. 8-16.
- ZHANG B., XIE G., ZHANG C., ZHANG J. (2012). The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: a case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management* 100, s. 65-71.
- ZHANG N., LUO Y.J., CHEN X.Y., LI Q., JING Y.C., WANG X., FENG C.H. (2018) Understanding the effects of composition and configuration of land covers on surface runoff in a highly urbanized area. *Ecological Engineering* 125, s. 11-25.
- ZWOLIŃSKI Z. (2008). Wybrane zjawiska ekstremalne pojezierzy polskich. *Landform Analysis* 8, s. 98-106.
- ZWOLIŃSKI Z., HILDEBRANDT-RADKE I., MAZUREK M., MAKOHONIENKO M. (2017). Existing and proposed urban geosites values resulting from geodiversity of Poznań City. *Quaestiones Geographicae* 36(3), s. 125-149.
- ŻARNOWIEC W., POLICHT-LATAWIEC A., OSTROWSKI K. (2016). Szacowanie wielkości parowania wody z powierzchni dachowych na podstawie wybranych wzorów empirycznych. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus* 15(4), s. 17-28.

Spis rycin

Ryc. 3.1. Położenie obszaru badań (według Państwowego Rejestru Granic, geoportal.gov.pl)	22
Ryc. 3.2. Lokalizacja obszaru badań na tle podziału administracyjnego: A) aglomeracja poznańska na tle Polski; B) aglomeracja poznańska na tle sąsiadujących powiatów; C) miasto Poznań na tle sąsiadujących gmin; D) zlewnia Różanego Strumienia (według Państwowego Rejestru Granic, geoportal.gov.pl)	23
Ryc. 3.3. Lokalizacja obszaru badań na tle podziału fizycznogeograficznego Polski (Solon i in. 2018).....	24
Ryc. 3.4. Budowa geologiczna obszaru badań bez utworów kenozoicznych (na podst. Dadlez i in. 2000)	26
Ryc. 3.5. Litologia utworów podłoża obszaru badań na podstawie Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000 (Gogolek 1988; Bartczak 1990; Chmal 1990; Skompski 1990; Chachaj 1991; Chmal 1992; Gogolek 1992; Pluczyński, Sydow 1993; Cincio 1994; Sydow 1996; Błaszczyk 1997; Nowak 1998; Gawroński 1999; Miętkiewicz, Sydow 1999; Michalska, Winnicka 2003; Nowak 2003; Szałajdewicz 2003; zgeneralizowane). A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia.....	27
Ryc. 3.6. Geomorfologia obszaru badań na podstawie Przeglądowej Mapy Geomorfologicznej Polski 1:500 000 (Rosa, Kozarski 1980).....	29
Ryc. 3.7. Hipsometria obszaru badań na podstawie danych pomiarowych LIDAR (geoportal.gov.pl). A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia.....	31
Ryc. 3.8. Nachylenia stoków na obszarze badań na podstawie danych pomiarowych LIDAR (geoportal.gov.pl). A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia.....	32
Ryc. 3.9. Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi na obszarze badań na podstawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych 1:10 000 BDOT10k (geoportal.gov.pl ; zgeneralizowane). A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia	35
Ryc. 3.10. Klimatogramy dla stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica dla lat: A) 1961-2020, B) 2018-2022 (Roczniki meteorologiczne IMGW-PIB 2018, 2019, 2020, 2021, 2022)	37
Ryc. 3.11. Położenie obszaru badań na tle Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) (Centralna Baza Danych Geologicznych, PIG-PIB).....	38
Ryc. 3.12. Mapa hydrograficzna obszaru badań według Bazy Danych Obiektów Topograficznych 1:10 000 BDOT10k (geoportal.gov.pl ; zgeneralizowane). A) aglomeracja poznańska, B) miasto Poznań, C) zlewnia Różanego Strumienia.....	39
Ryc. 4.1. Klasyfikacja opadowa Chomicza (1951), obramowaniem w kolorze żółtym i pogrubieniem oznaczone opady wybrane do eksperymentu terenowego	42
Ryc. 4.2. Dobowe sumy opadów atmosferycznych w latach 1961-1990 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica...45	
Ryc. 4.3. Dobowe sumy opadów atmosferycznych w latach 1991-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica...45	
Ryc. 4.4. Roczne sumy opadów z podziałem na półrocze ciepłe i chłodne w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica.....	46
Ryc. 4.5. Liczba dni z opadem w latach 1961-2020 w Poznaniu na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica	46
Ryc. 4.6. Liczba dni z opadem o dobowej sumie opadu w poszczególnych zakresach (według Olechnowicz-Bobrowskiej 1970, uzupełnione) w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica	49
Ryc. 4.7. Prawdopodobieństwo wystąpienia dobowych sum opadów atmosferycznych w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica	51
Ryc. 5.1. Schemat stanowiska do badań spływu powierzchniowego	55

Ryc. 5.2. Przekrój geologiczny przez dolinę Różanego Strumienia (Okońska, Wolny 2011; zmienione).....	56
Ryc. 5.3. Widok na stanowisko badawcze z: A) górnej części stoku (7.07.2022); B) dolnej części stoku (7.07.2022).....	58
Ryc. 5.4. Widok na stanowisko badawcze z lotu ptaka (fot. M. Winowski; 19.06.2023)	58
Ryc. 5.5. A) Rynna kierująca spływ do chwytacza spływu powierzchniowego (13.07.2022); B) Chwytacz spływu powierzchniowego (8.07.2022); C) Komory chwytaczy spływu powierzchniowego podczas montażu (20.11.2021); D) Montaż <i>Levelloggera</i> w chwytaczu spływu powierzchniowego (fot. M. Marciniak, 8.07.2022)	59
Ryc. 5.6. A) <i>Levellogger</i> y zamontowane w chwytaczu spływu powierzchniowego na czas kalibracji (fot. M. Marciniak, 19.05.2022); B) Kalibracja chwytacza spływu powierzchniowego w laboratorium (fot. M. Marciniak, 19.05.2022).....	61
Ryc. 5.7. Zależność liniowa między objętością wody w chwytaczu a jej poziomem zarejestrowana za pomocą czterech <i>Levelloggerów</i>	61
Ryc. 5.8. Analiza niepewności dla chwytaczy spływu powierzchniowego	63
Ryc. 5.9. Ogólny schemat symulatora opadów	67
Ryc. 5.10. A) Zbiornik na wodę (8.07.2022); B) Hydrant podłączony do miejskiej sieci wodociągowej (8.07.2022).....	68
Ryc. 5.11. Zestaw pompowo-filtracyjny i pomiarowy ze sterowaniem (8.07.2022).....	68
Ryc. 5.12. A) Stalowa tyczka i głowica zraszacza podczas płukania instalacji zraszającej (8.07.2022), B) Zawór odcinający dla każdego zraszacza (8.07.2022)	69
Ryc. 5.13. Dysze stosowane do symulacji opadów (7.07.2022).....	70
Ryc. 6.1. A) Przepływomierz oraz manometr symulatora opadów (07.07.2022); B) Deszczomierz Hellmanna na terenowym stanowisku badawczym (07.07.2022)	72
Ryc. 6.2. Formularz pomiarów spływu powierzchniowego z wykorzystaniem symulatora opadu	73
Ryc. 6.3. Formularz pomiarów spływu powierzchniowego z wykorzystaniem symulatora opadu dla opadu B1 w warunkach suchych (D) (25.07.2022).....	74
Ryc. 6.4. Symulacja opadu B2 na terenowym stanowisku badawczym (18.07.2022); A) Widok na stanowisko z góry; B) widok na stanowisko z boku	75
Ryc. 6.5. A) Spływ powierzchniowy po rynnie na poletku kostką podczas symulacji opadu B2 (18.07.2022); B) Spływ powierzchniowy po rynnie na poletku ugięciem podczas symulacji opadu B2 (18.07.2022); C) Chwytacz spływu powierzchniowego na trawie po symulacji opadu B2 (18.07.2022); D) Chwytacz spływu powierzchniowego na ugorze po symulacji opadu B2 (18.07.2022)	76
Ryc. 6.6. A) Dysza VAN 15 podczas symulacji opadu B2 (18.07.2022); B) Wypełnienie chwytacza spływu powierzchniowego na ugorze wodą przed rozpoczęciem eksperymentu (18.07.2022; fot. M. Marciniak); C) Pomiar opadu z deszczomierza Hellmanna (18.07.2022; fot. M. Marciniak); D) Opróżnianie chwytacza spływu powierzchniowego po zakończeniu eksperymentu (18.07.2022; M. Marciniak)	77
Ryc. 6.7. Etapy konstruowania krzywej dynamiki spływu powierzchniowego na przykładzie poletka z asfaltem podczas opadu B2 (18.07.2022): A) Poziom wody zarejestrowany przez <i>Levellogger</i> w chwytaczu spływu powierzchniowego; B) Objętość wody zarejestrowana przez <i>Levellogger</i> w chwytaczu spływu powierzchniowego; C) Wyznaczenie okresów wzrostu objętości wody podczas symulacji opadu; D) Złączone	

w krzywą dynamiki spływu powierzchniowego okresy wzrostu objętości wody podczas symulacji opadu; E)	
Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego	80
Ryc. 7.1. Zestawienie opadu planowanego i zrealizowanego: obliczonego oraz pomierzonego w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	83
Ryc. 7.2. Początkowa i końcowa wilgotność gruntu podczas eksperymentów terenowych w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	86
Ryc. 7.3. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	92
Ryc. 7.4. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	96
Ryc. 7.5. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	98
Ryc. 7.6. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W) na poszczególnych poletkach testowych	99
Ryc. 7.7. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W) dla poszczególnych kategorii opadu	99
Ryc. 7.8. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	100
Ryc. 7.9. Całkowita objętość opadu V_{opadu} i czas trwania opadu t_{opadu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	103
Ryc. 7.10. Moment inicjacji spływu powierzchniowego t_p w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	104
Ryc. 7.11. Moment zakończenia spływu powierzchniowego t_k w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	105
Ryc. 7.12. Czas trwania spływu powierzchniowego t_{splywu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	107
Ryc. 7.13. Całkowita objętość spływu powierzchniowego V_{splywu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	108
Ryc. 7.14. Współczynnik spływu powierzchniowego ψ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	110
Ryc. 7.15. Natężenie spływu powierzchniowego Q_{splywu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	112
Ryc. 7.16. Kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	113
Ryc. 7.17. Wskaźnik spływu powierzchniowego δ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	115
Ryc. 7.18. Natężenie opadu P_{kryt} inicjującego spływ powierzchniowy w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	116

Spis tabel

Tab. 3.1. Miejsce mezoregionów w obrębie aglomeracji poznańskiej w regionalizacji fizycznogeograficznej według Solona i in. (2018).....	25
Tab. 3.2. Udział poszczególnych utworów kenozoicznych na obszarze badań na podstawie Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000 (Gogołek 1988; Bartczak 1990; Chmal 1990; Skompski 1990; Chachaj 1991; Chmal 1992; Gogołek 1992; Pluczyński, Sydow 1993; Cincio 1994; Sydow 1996; Błaszczyk 1997; Nowak 1998; Gawroński 1999; Miętkiewicz, Sydow 1999; Michalska, Winnicka 2003; Nowak 2003; Szałajdewicz 2003; zgeneralizowane).....	28
Tab. 3.3. Udział stoków o poszczególnych zakresach nachylenia na obszarze badań na podstawie danych pomiarowych LIDAR (geoportal.gov.pl)	30
Tab. 3.4. Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi na obszarze badań na podstawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych 1:10 000 BDOT10k (geoportal.gov.pl; zgeneralizowane)	34
Tab. 4.1. Klasyfikacja opadów według Kaczorowskiej (1962)	40
Tab. 4.2. Klasyfikacja opadów według Olechnowicz-Bobrowskiej (1970)	41
Tab. 4.3. Rozszerzenie klasyfikacji Olechnowicz-Bobrowskiej (1970) dla opadów bardzo silnych	41
Tab. 4.4. Klasyfikacja opadowa według Kaczorowskiej (1962) w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica	44
Tab. 4.5. Miesięczne sumy opadów w poszczególnych okresach i latach wielolecia 1961-1990 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica.....	47
Tab. 4.6. Miesięczne sumy opadów w poszczególnych okresach i latach wielolecia 1991-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica.....	48
Tab. 4.7. Wartości dobowych sum opadów oraz liczba dni z opadem równym lub mniejszym dla wybranych percentyli prawdopodobieństwa w latach 1961-2020 na stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica	50
Tab. 5.1. Program eksperymentu terenowego	64
Tab. 5.2. Konfiguracje dysz umożliwiające uzyskanie symulację opadów o różnym natężeniu.....	70
Tab. 6.1. Warunki pogodowe podczas eksperymentu terenowego;	71
Tab. 6.2. Planowany i zrealizowany program eksperymentu terenowego.....	78
Tab. 7.1. Zestawienie opadu planowanego i zrealizowanego: obliczonego oraz pomierzonego	83
Tab. 7.2. Oszacowanie wysokości parowania na stanowisku badawczym.....	85
Tab. 7.3. Warunki wilgotnościowe gruntu podczas eksperymentu terenowego	87
Tab. 7.4. Objętościowy bilans wodny słabych, długotrwałych opadów (A0, A1, A2, A3) przeprowadzonego eksperymentu terenowego	90
Tab. 7.5. Objętościowy bilans wodny intensywnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2) przeprowadzonego eksperymentu terenowego	91
Tab. 7.6. Średnie wartości składowych objętościowego bilansu wodnego dla opadów słabych, długotrwałych (A0, A1, A2, A3) oraz silnych, krótkotrwałych (A4, B1, B2) przeprowadzonego eksperymentu terenowego	91
Tab. 7.7. Procentowy bilans wodny opadów silnych i ulewnych (A0-A4) przeprowadzonego eksperymentu terenowego	94
Tab. 7.8. Procentowy bilans wodny opadów nawałnych (B1-B2) przeprowadzonego eksperymentu terenowego.....	95

Tab. 7.9. Średnie wartości składowych procentowego bilansu wodnego dla opadów słabych, długotrwałych oraz silnych, krótkotrwałych.....	95
Tab. 7.10. Czas trwania opadu t_{opadu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	102
Tab. 7.11. Całkowita objętość opadu V_{opadu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W).....	102
Tab. 7.12. Moment inicjacji spływu powierzchniowego t_p w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W).....	104
Tab. 7.13. Moment zakończenia spływu powierzchniowego t_k w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)...	105
Tab. 7.14. Czas trwania spływu powierzchniowego t_{splywu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W).....	106
Tab. 7.15. Całkowita objętość spływu powierzchniowego V_{splywu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	108
Tab. 7.16. Współczynnik spływu powierzchniowego ψ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	110
Tab. 7.17. Natężenie spływu powierzchniowego Q_{splywu} w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	111
Tab. 7.18. Kąt β nachylenia krzywej dynamiki spływu powierzchniowego w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	113
Tab. 7.19. Wskaźnik spływu powierzchniowego δ w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	114
Tab. 7.20. Natężenie opadu P_{kryt} inicjujące spływ powierzchniowy w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)	116
Tab. 8.1. Natężenie opadu inicjującego spływ powierzchniowy P_{kryt} dla poszczególnych typów pokrycia powierzchni terenu	118



mgr inż. Aleksandra Czuchaj

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Uwarunkowania dynamiki spływu powierzchniowego
w świetle terenowych badań eksperymentalnych**

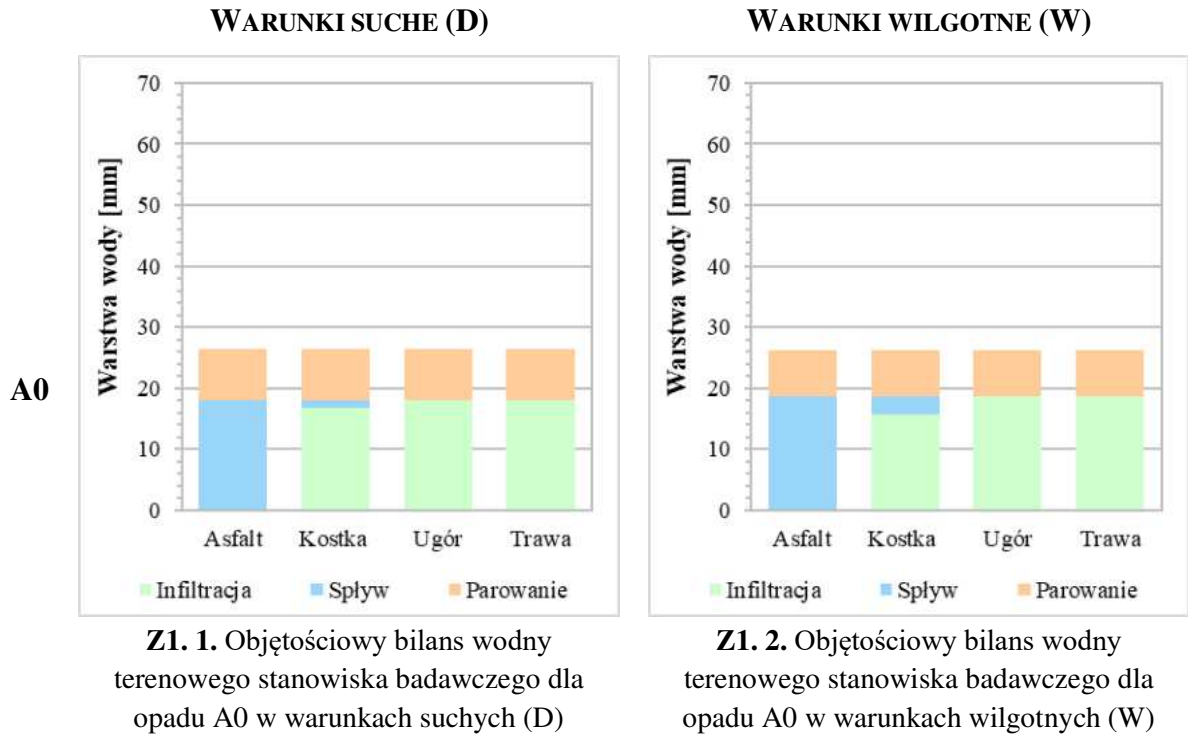
Załącznik 1. Bilans wodny terenowego stanowiska badawczego

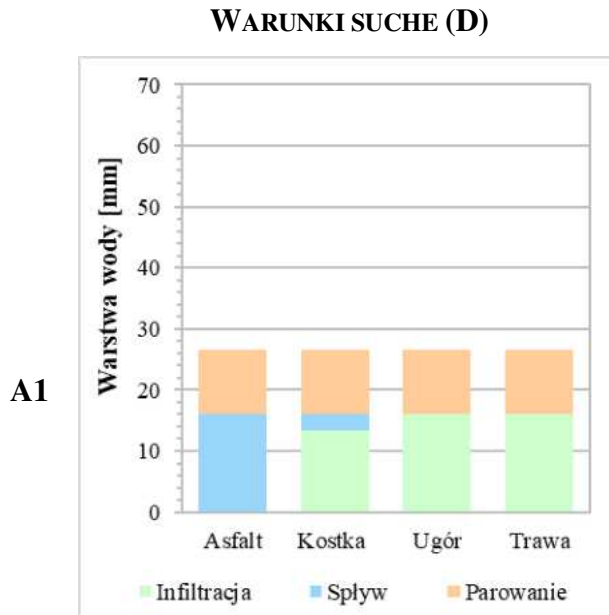
Załącznik 1A. Bilans objętościowy

Załącznik 1B. Bilans procentowy

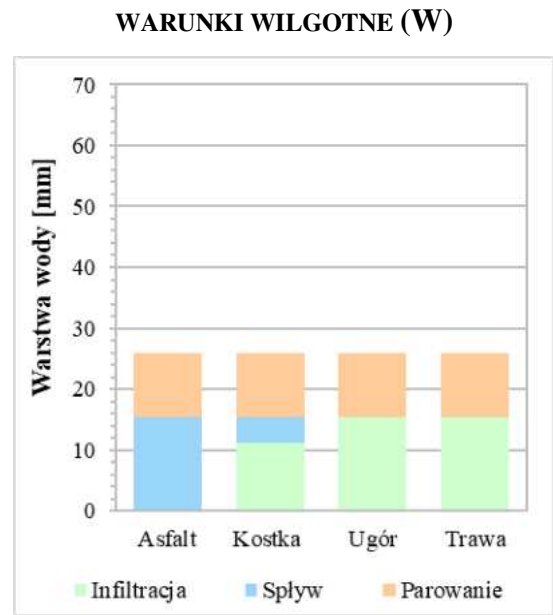
Poznań 2024

Załącznik 1A. Bilans objętościowy

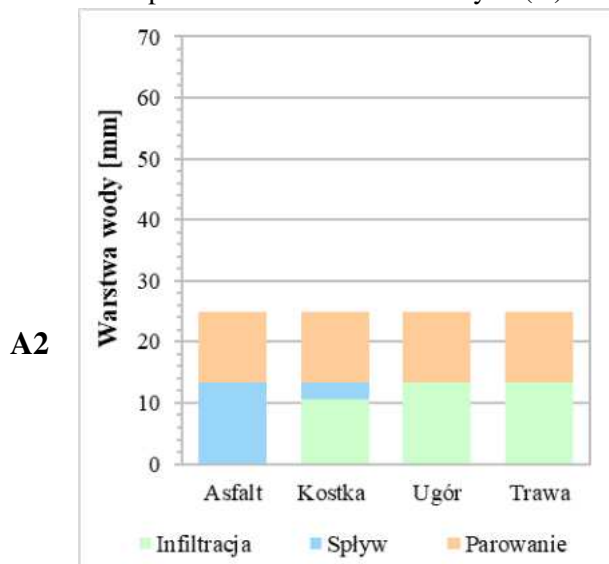




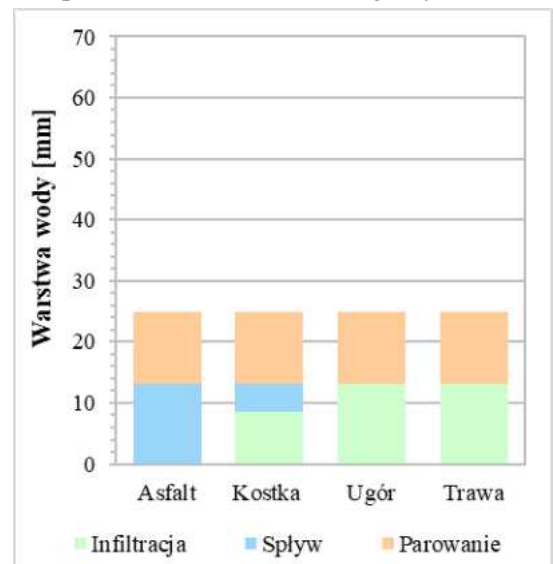
Z1. 3. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A1 w warunkach suchych (D)



Z1. 4. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A1 w warunkach wilgotnych (W)

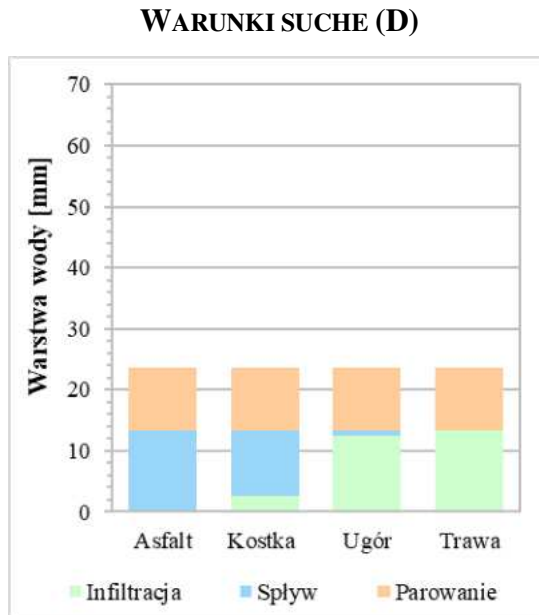


Z1. 5. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A2 w warunkach suchych (D)

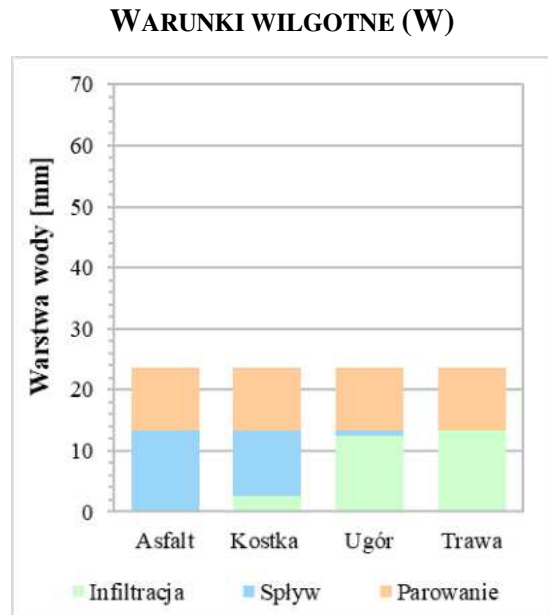


Z1. 6. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A2 w warunkach wilgotnych (W)

A3

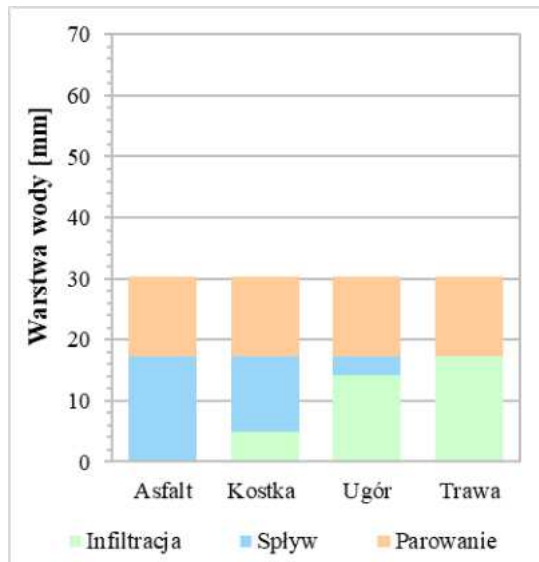


Z1. 7. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A3 w warunkach suchych (D)

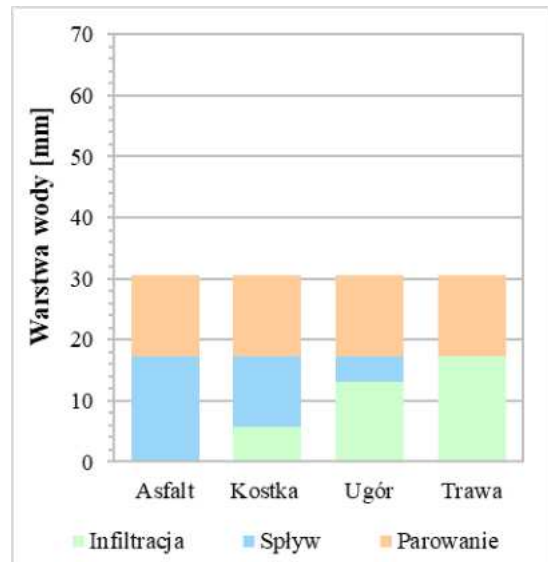


Z1. 8. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A3 w warunkach wilgotnych (W)

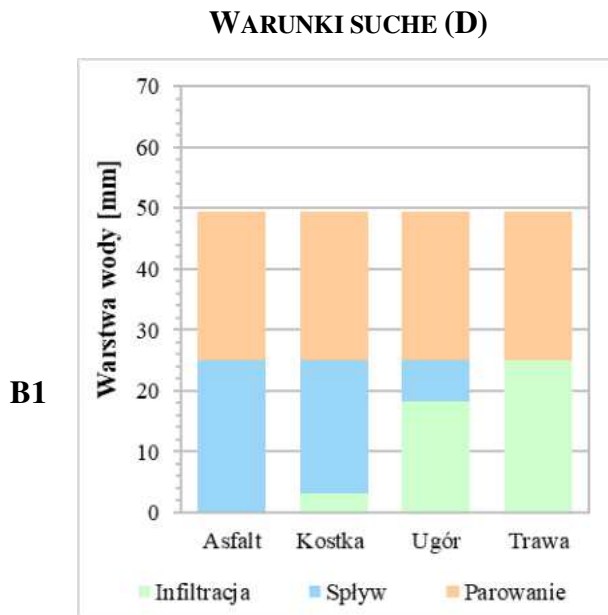
A4



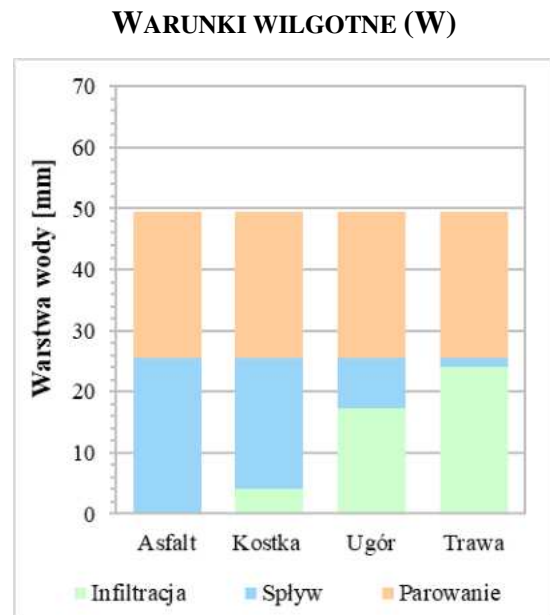
Z1. 9. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A4 w warunkach suchych (D)



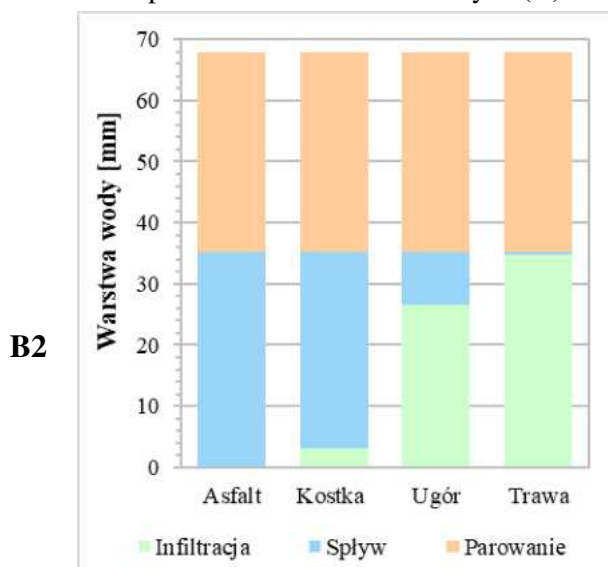
Z1. 10. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A4 w warunkach wilgotnych (W)



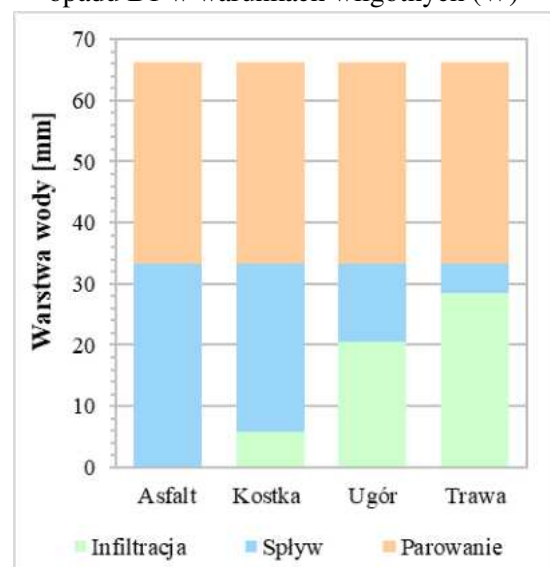
Z1. 11. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B1 w warunkach suchych (D)



Z1. 12. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B1 w warunkach wilgotnych (W)



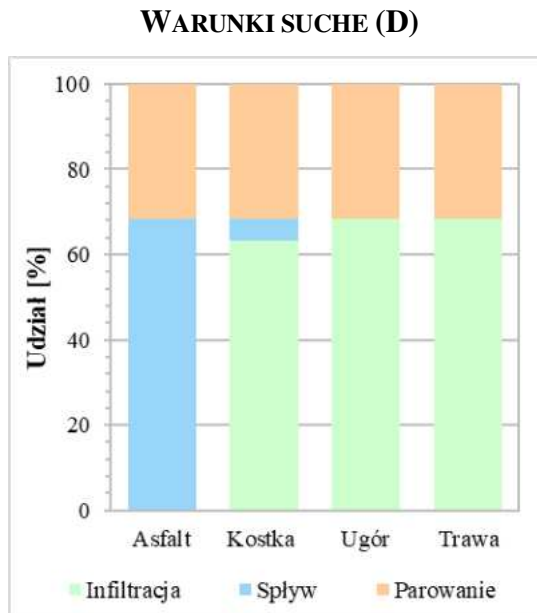
Z1. 13. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B2 w warunkach suchych (D)



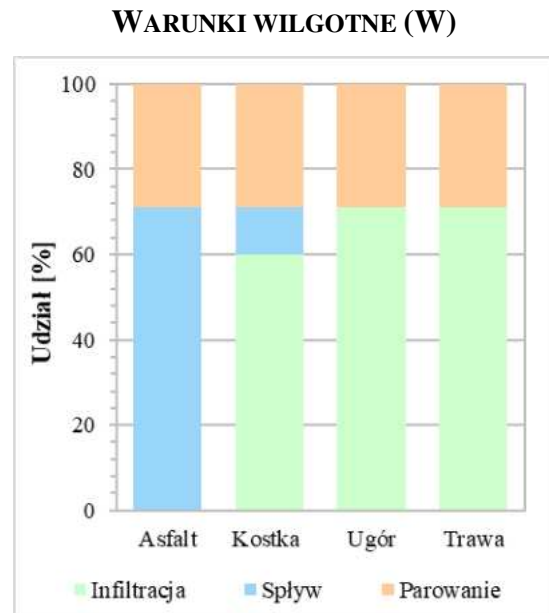
Z1. 14. Objętościowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B2 w warunkach wilgotnych (W)

Załącznik 1B. Bilans procentowy

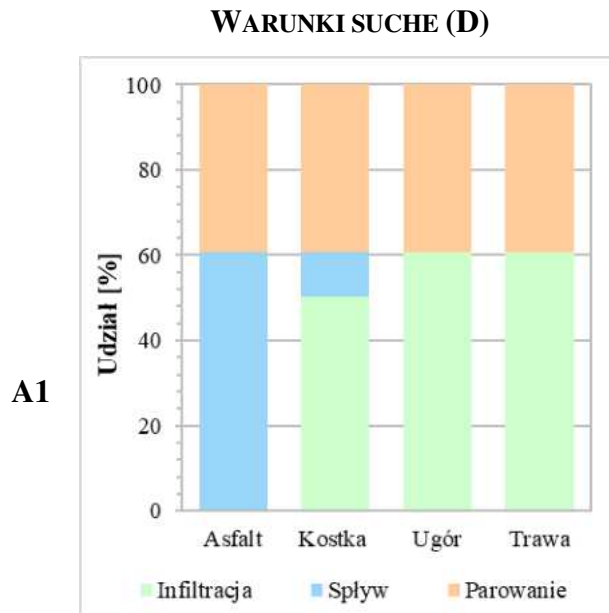
A0



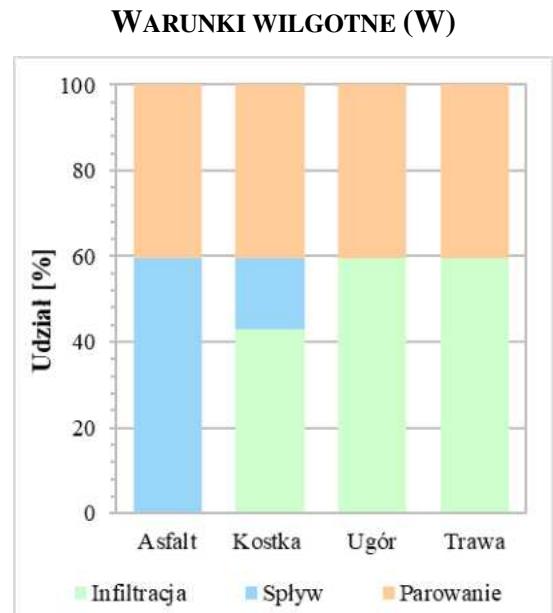
Z1. 15. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A0 w warunkach suchych (D)



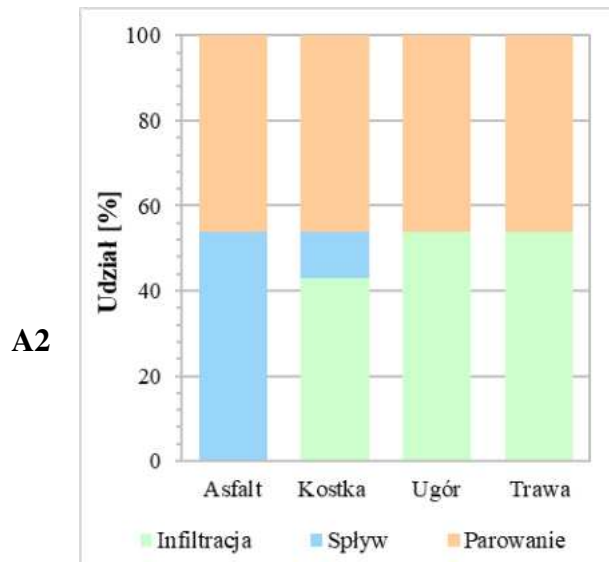
Z1. 16. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A0 w warunkach wilgotnych (W)



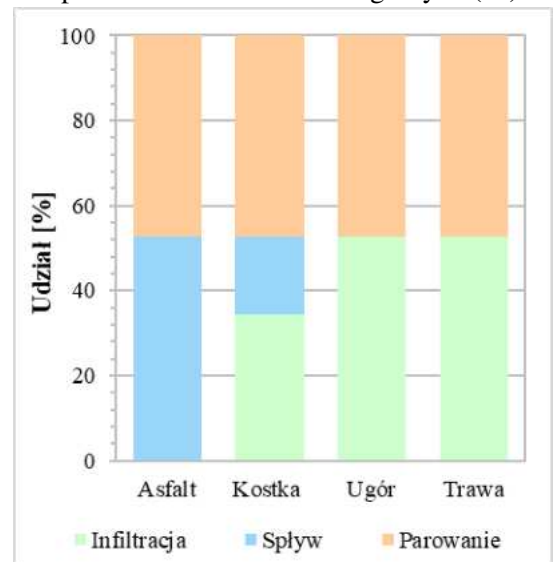
Z1. 17. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A1 w warunkach suchych (D)



Z1. 18. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A1 w warunkach wilgotnych (W)

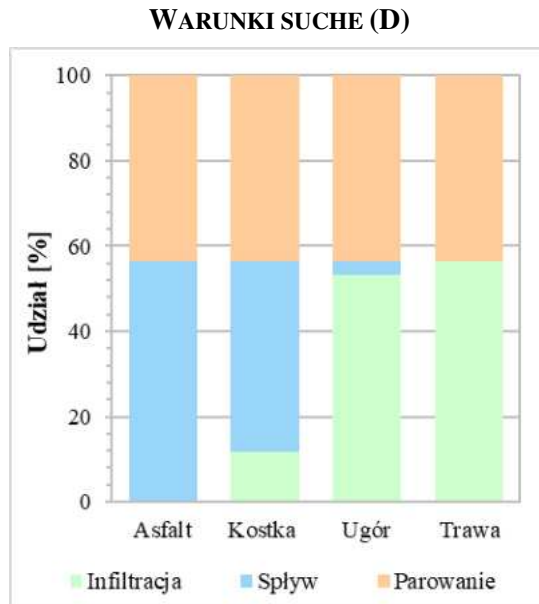


Z1. 19. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A2 w warunkach suchych (D)

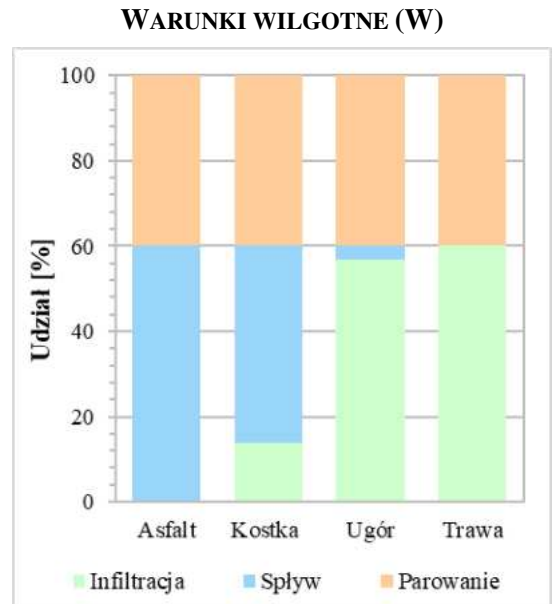


Z1. 20. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A2 w warunkach wilgotnych (W)

A3

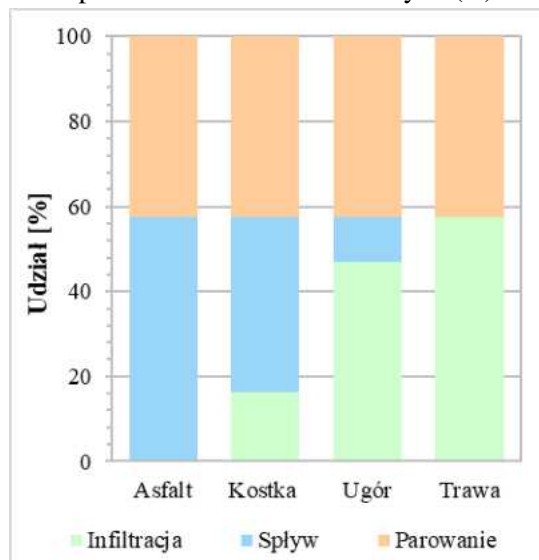


Z1. 21. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A3 w warunkach suchych (D)

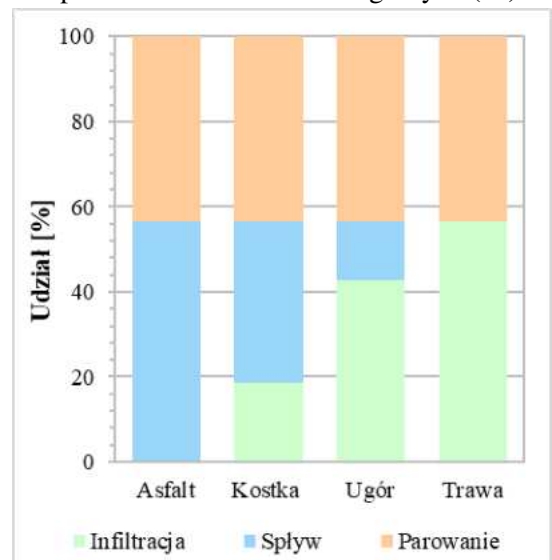


Z1. 22. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A3 w warunkach wilgotnych (W)

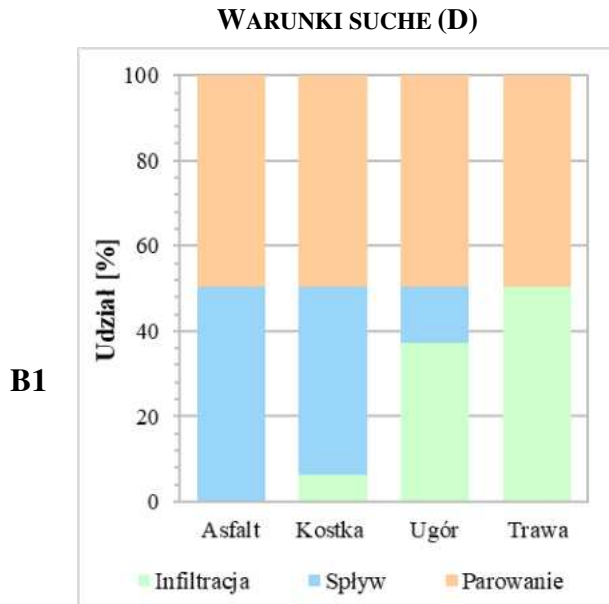
A4



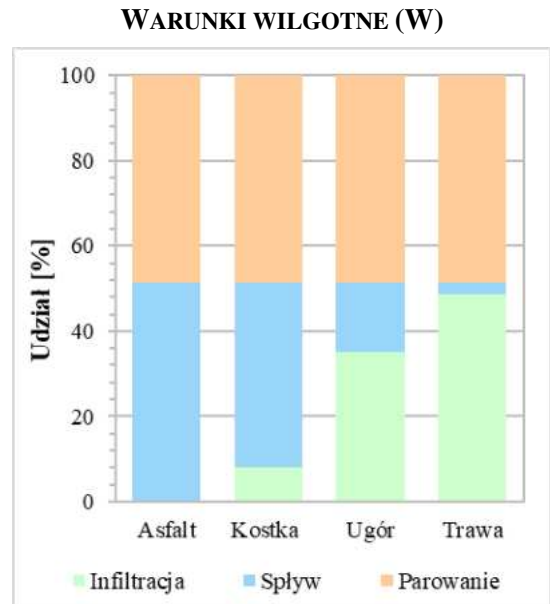
Z1. 23. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A4 w warunkach suchych (D)



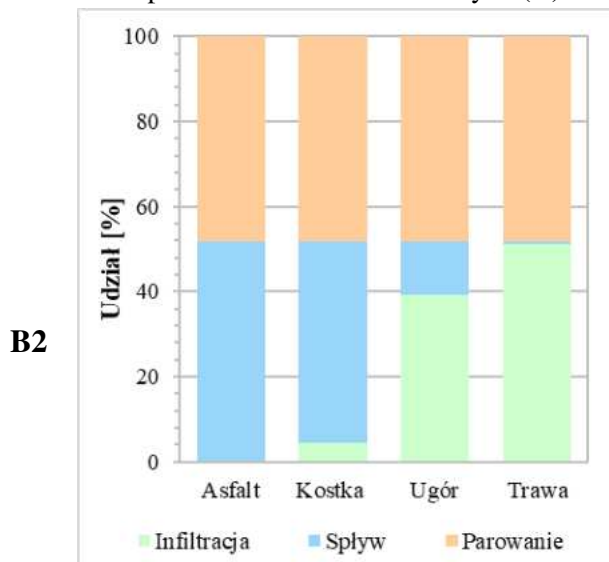
Z1. 24. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu A4 w warunkach wilgotnych (W)



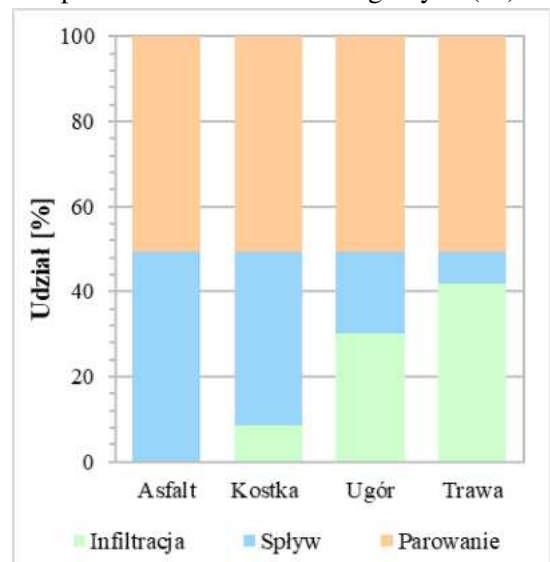
Z1. 25. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B1 w warunkach suchych (D)



Z1. 26. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B1 w warunkach wilgotnych (W)



Z1. 27. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B2 w warunkach suchych (D)



Z1. 28. Procentowy bilans wodny terenowego stanowiska badawczego dla opadu B2 w warunkach wilgotnych (W)



mgr inż. Aleksandra Czuchaj

ROZPRAWA DOKTORSKA

Uwarunkowania dynamiki spływu powierzchniowego w świetle terenowych badań eksperymentalnych

Załącznik 2. Dokumentacja badań terenowych w postaci krzywych dynamiki spływu powierzchniowego $V = f(t)$ na tle opadów

Załącznik 2A. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla asfaltu

Załącznik 2B. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla kostki

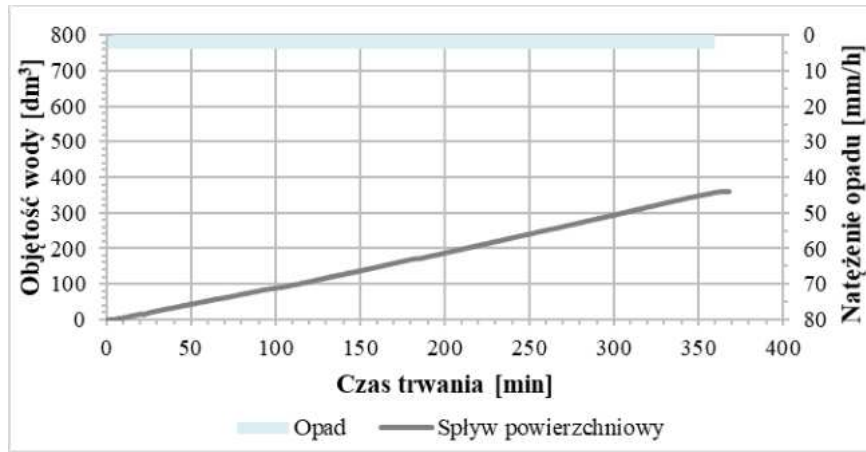
Załącznik 2C. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla ugoru

Załącznik 2D. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla trawy

Poznań 2024

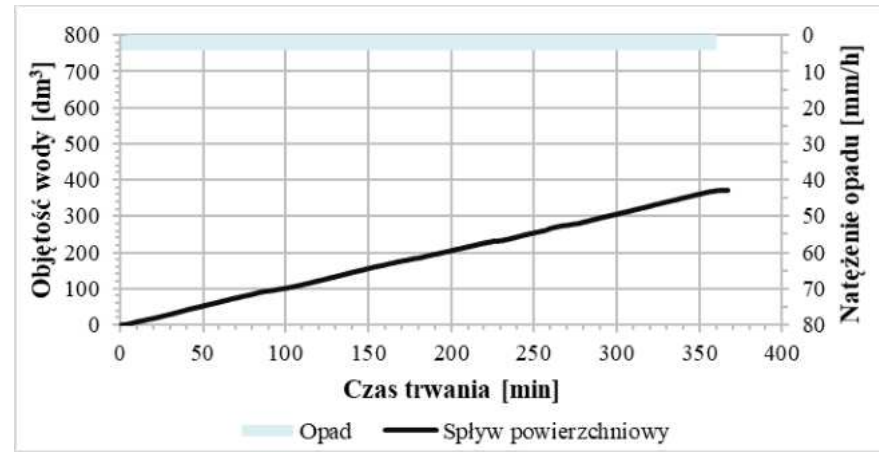
Załącznik 2A. Krzywe dynamiki splywu powierzchniowego dla asfaltu

WARUNKI SUCHE (D)



Z2. 1. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A0 w warunkach suchych (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

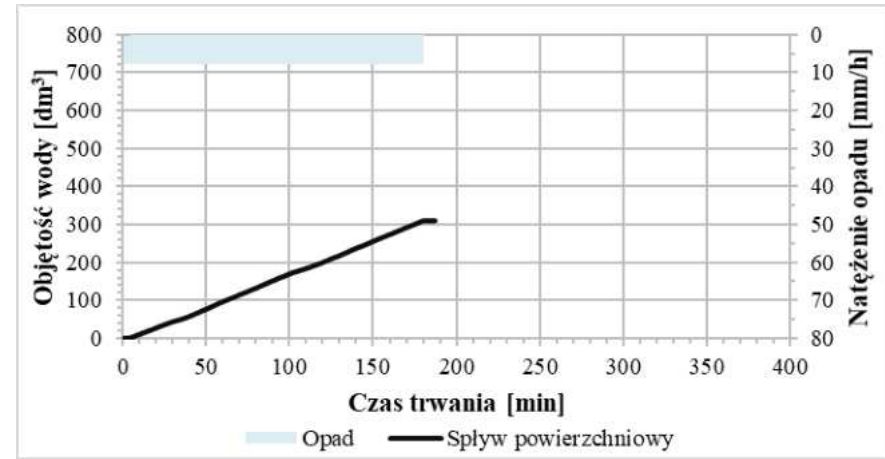
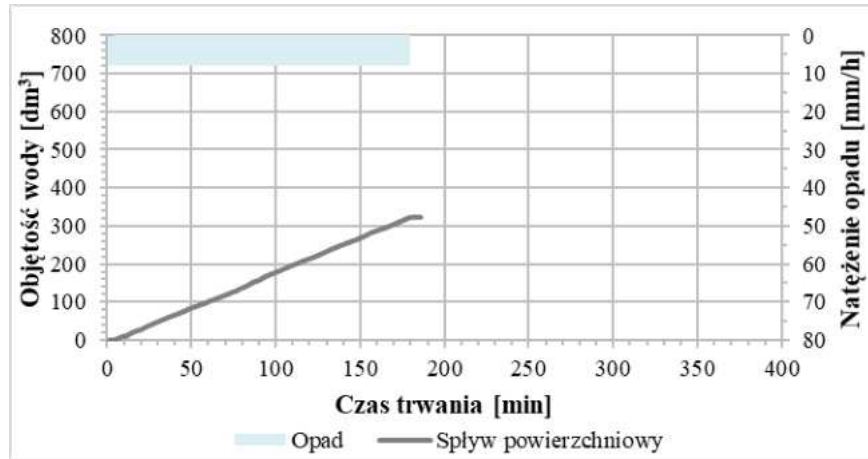


Z2. 2. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A0 w warunkach wilgotnych (W)

WARUNKI SUCHE (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

A1

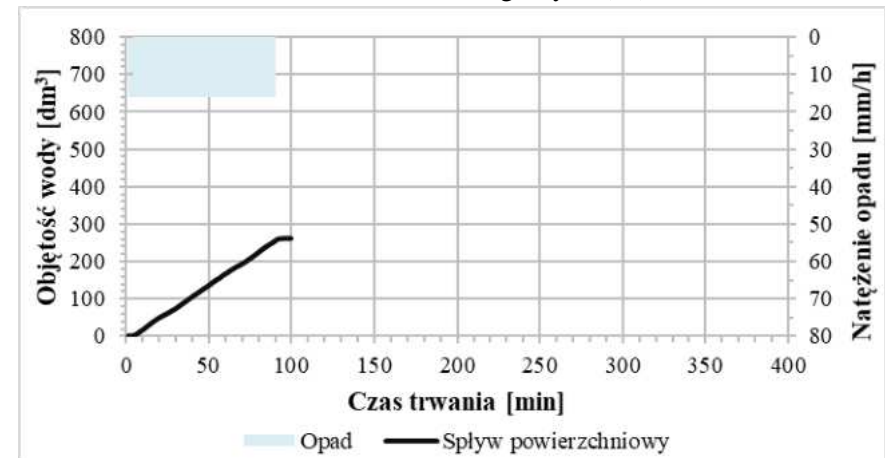
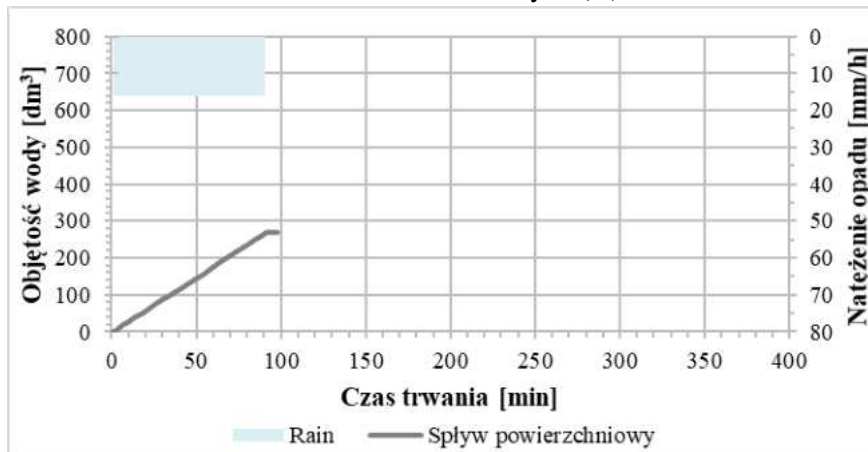


Z2. 3. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A1 w warunkach suchych (D)

Z2. 4. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A1 w warunkach wilgotnych (W)

155

A2



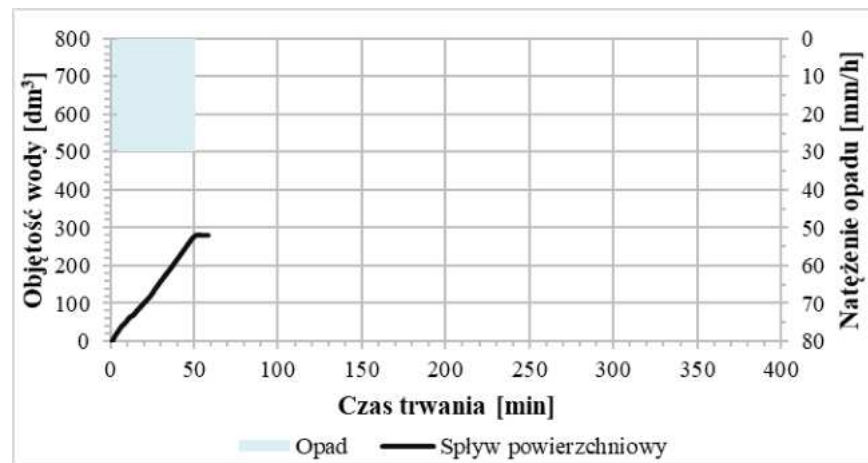
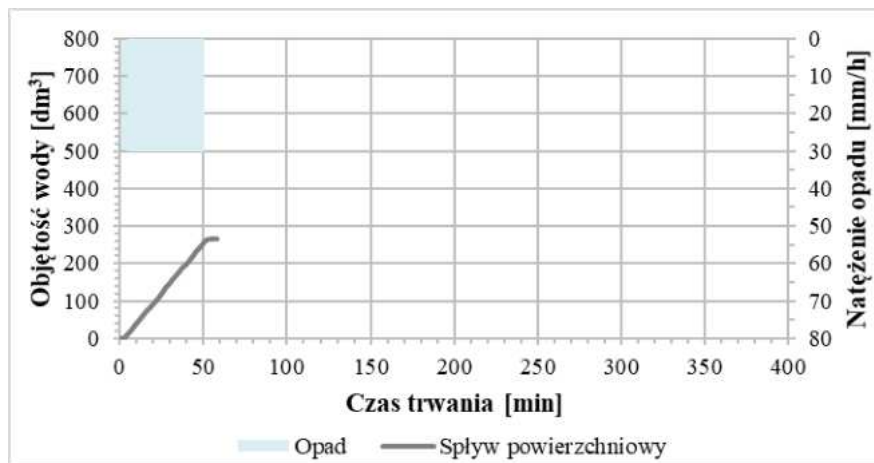
Z2. 5. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A2 w warunkach suchych (D)

Z2. 6. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A2 w warunkach wilgotnych (W)

WARUNKI SUCHE (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

A3

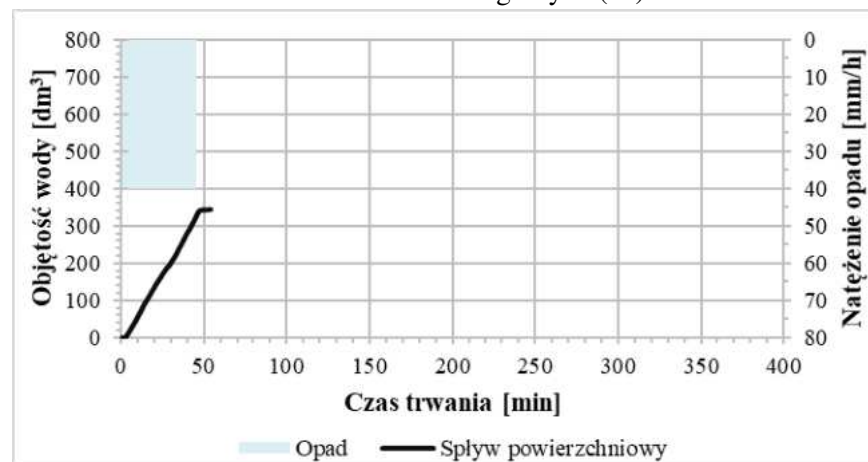
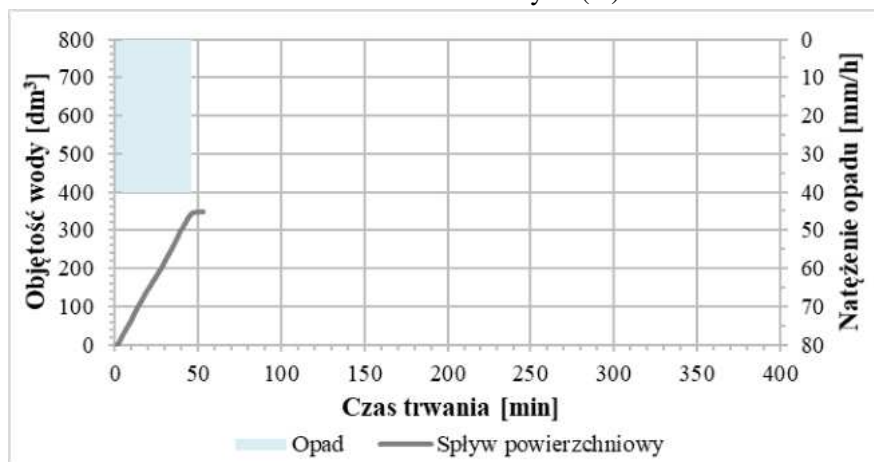


Z2. 7. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A3 w warunkach suchych (D)

Z2. 8. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A3 w warunkach wilgotnych (W)

156

A4



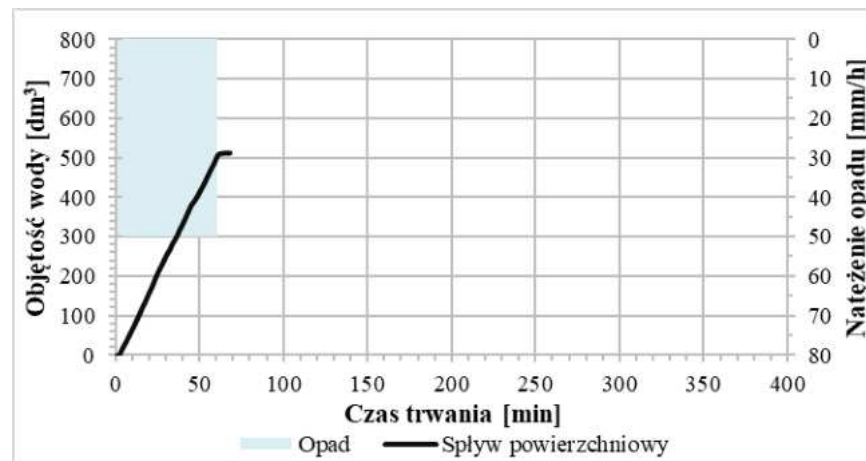
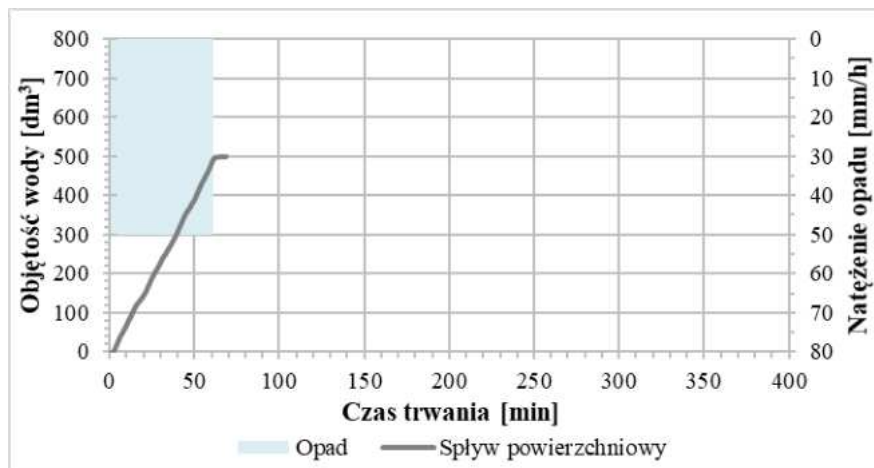
Z2. 9. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A4 w warunkach suchych (D)

Z2. 10. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A4 w warunkach wilgotnych (W)

WARUNKI SUCHE (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

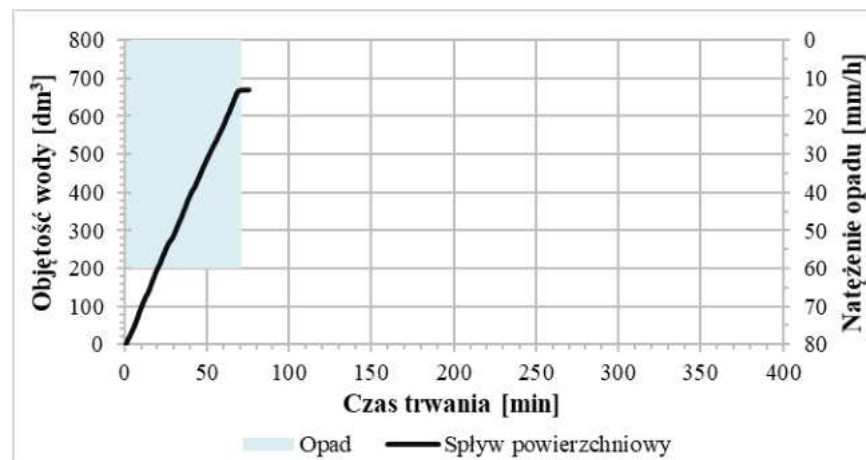
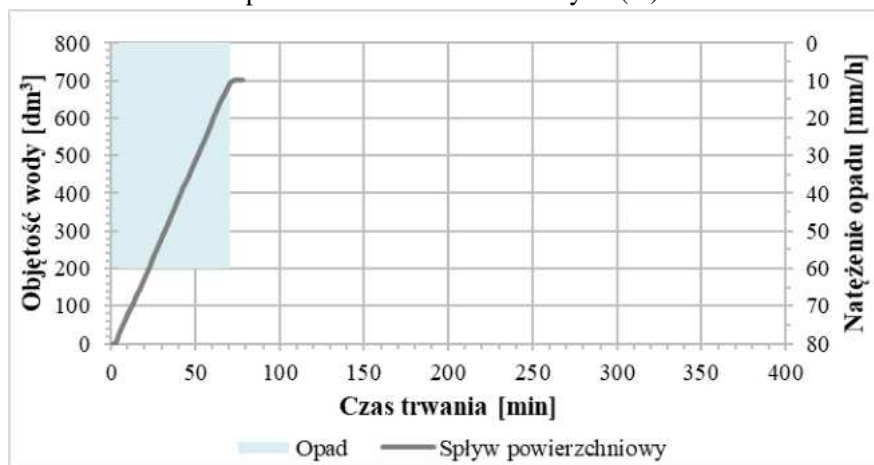
B1



Z2. 11. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu B1 w warunkach suchych (D)

Z2. 12. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu B1 w warunkach wilgotnych (W)

B2

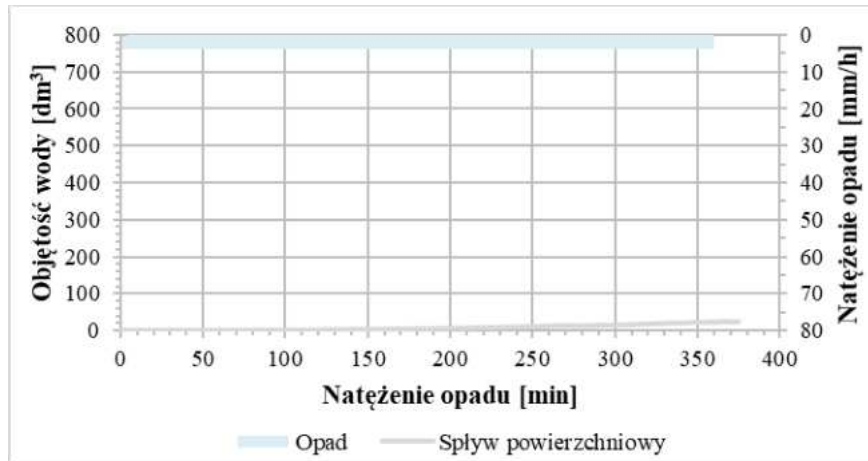


Z2. 13. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu B2 w warunkach suchych (D)

Z2. 14. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu B2 w warunkach wilgotnych (W)

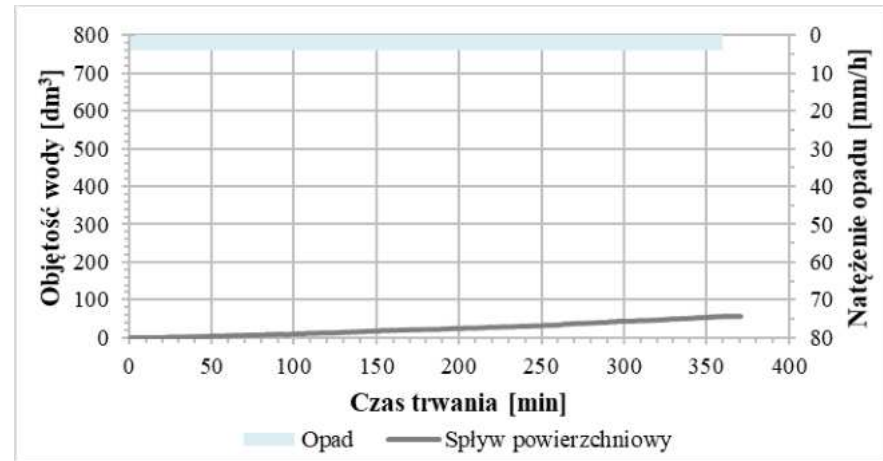
Załącznik 2B. Krzywe dynamiki sypwu powierzchniowego dla kostki

WARUNKI SUCHE (D)



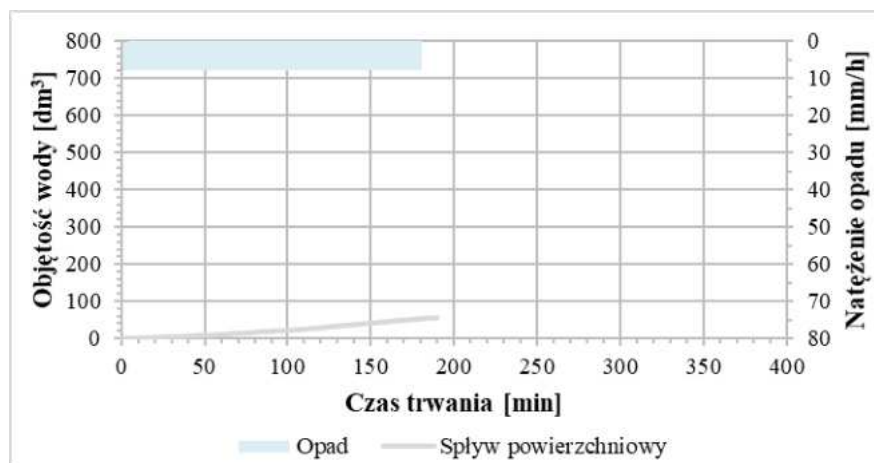
Z2. 15. Krzywa dynamiki sypwu powierzchniowego na kostce dla opadu A0 w warunkach suchych (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)



Z2. 16. Krzywa dynamiki sypwu powierzchniowego na kostce dla opadu A0 w warunkach wilgotnych (W)

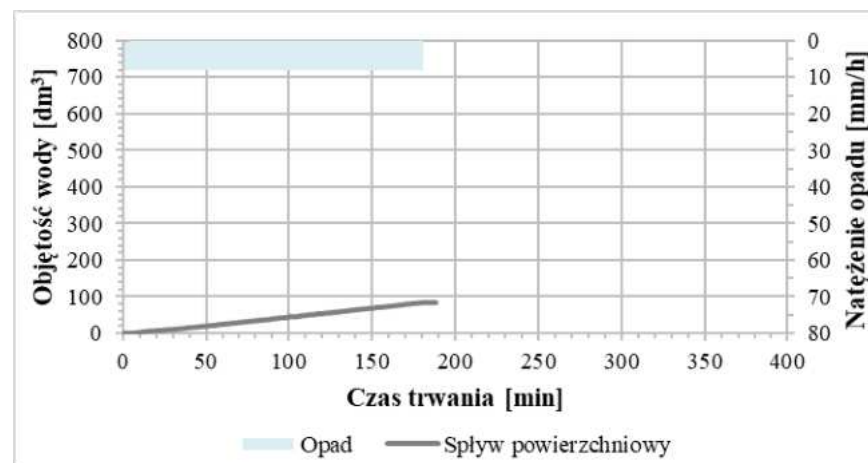
WARUNKI SUCHE (D)



A1

Z2. 17. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na kostce dla opadu A1 w warunkach suchych (D)

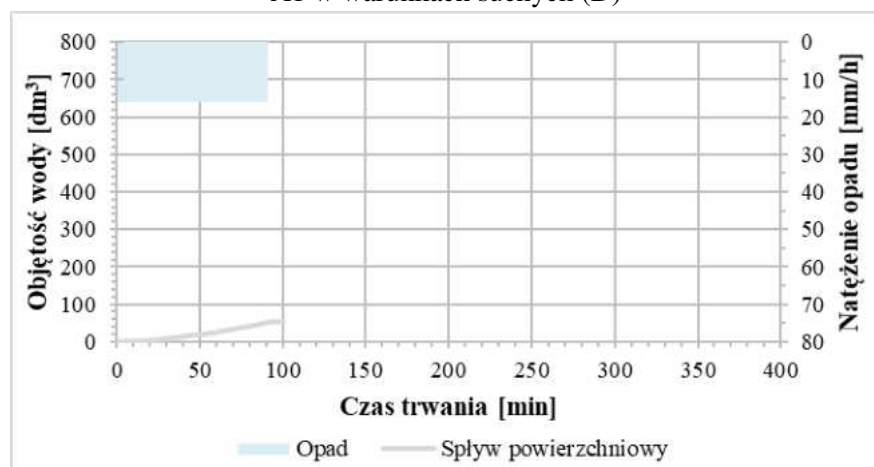
WARUNKI WILGOTNE (W)



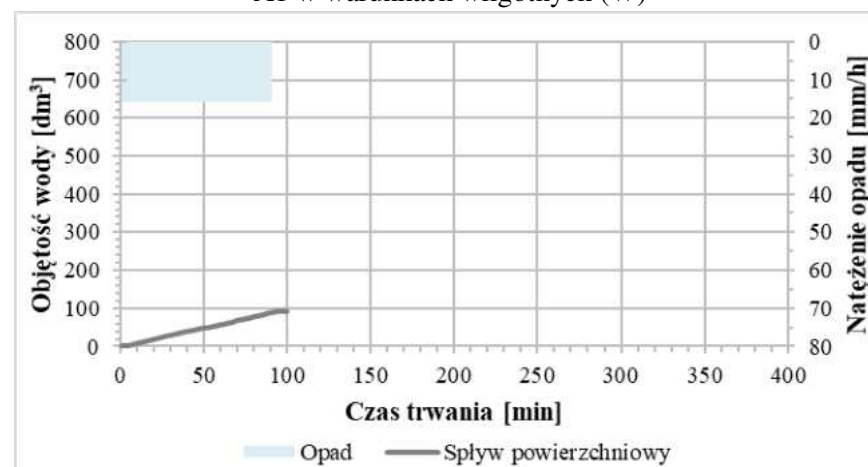
Z2. 18. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na kostce dla opadu A1 w warunkach wilgotnych (W)

159

A2

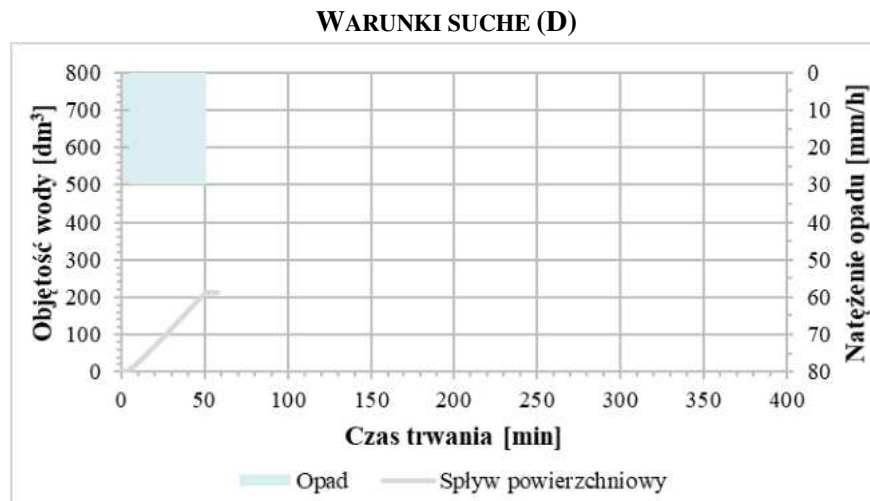


Z2. 19. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na kostce dla opadu A2 w warunkach suchych (D)



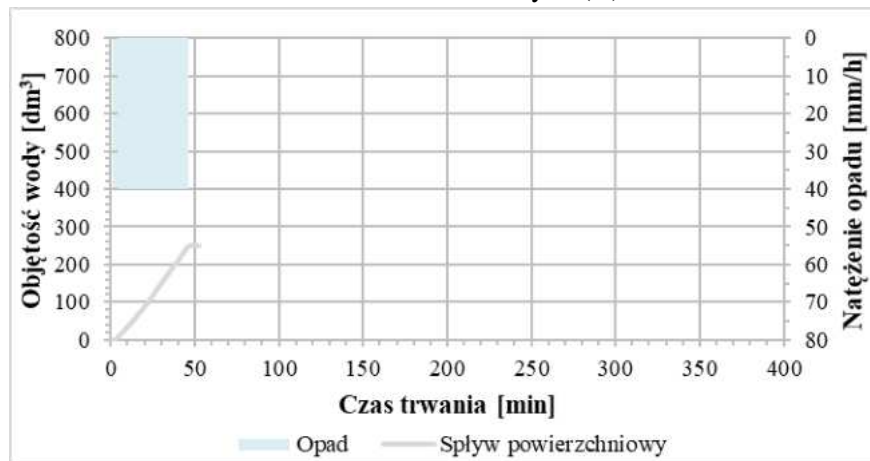
Z2. 20. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na kostce dla opadu A2 w warunkach wilgotnych (W)

A3



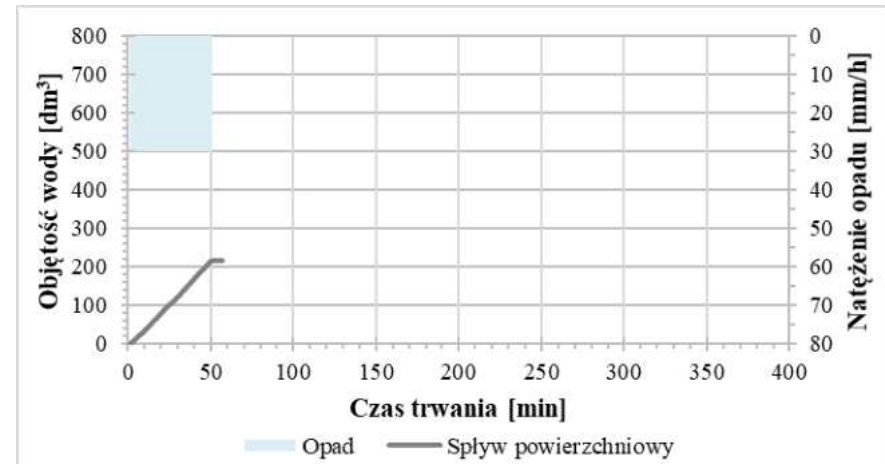
Z2. 21. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na kostce dla opadu A3 w warunkach suchych (D)

A4

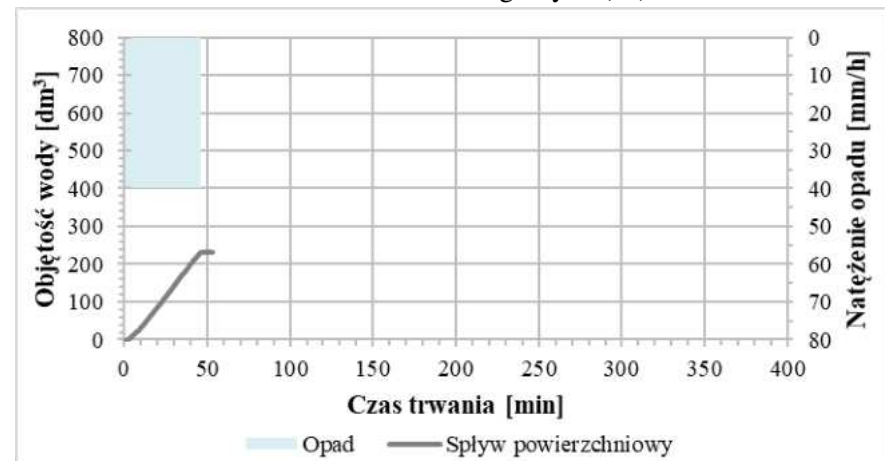


Z2. 23. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na kostce dla opadu A4 w warunkach suchych (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)



Z2. 22. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na kostce dla opadu A3 w warunkach wilgotnych (W)

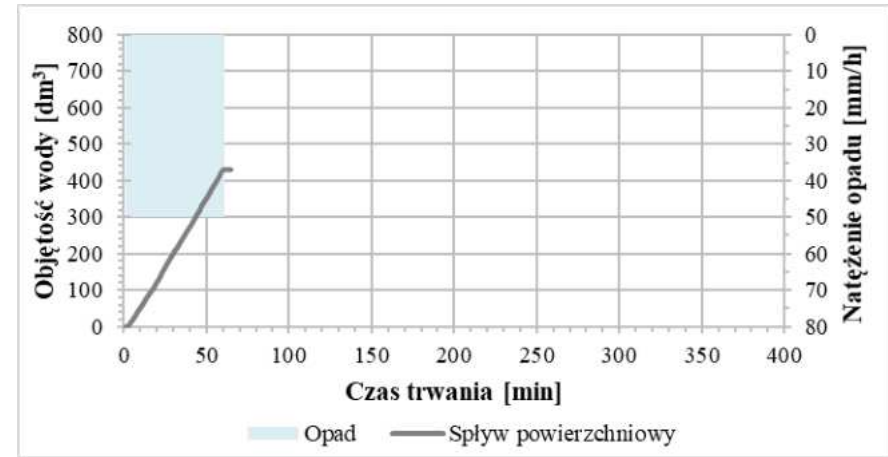
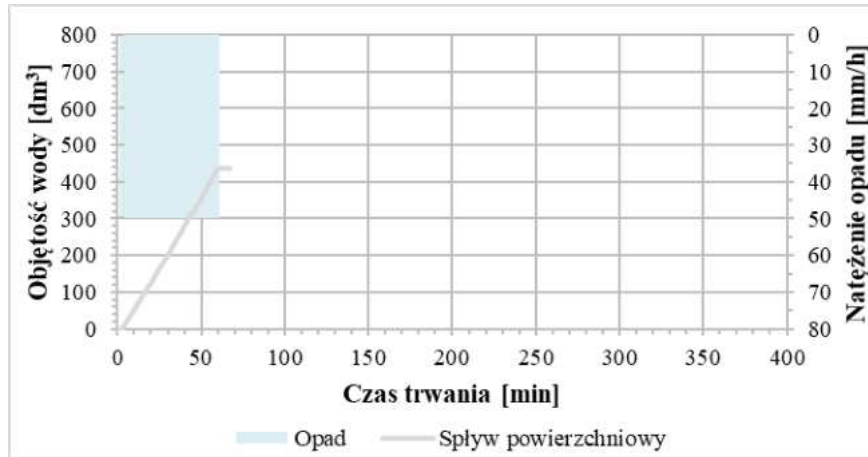


Z2. 24. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na kostce dla opadu A4 w warunkach wilgotnych (W)

WARUNKI SUCHE (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

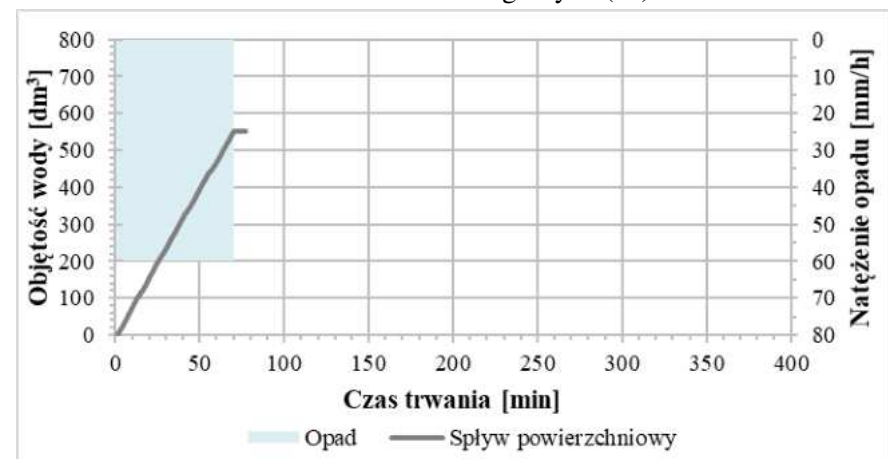
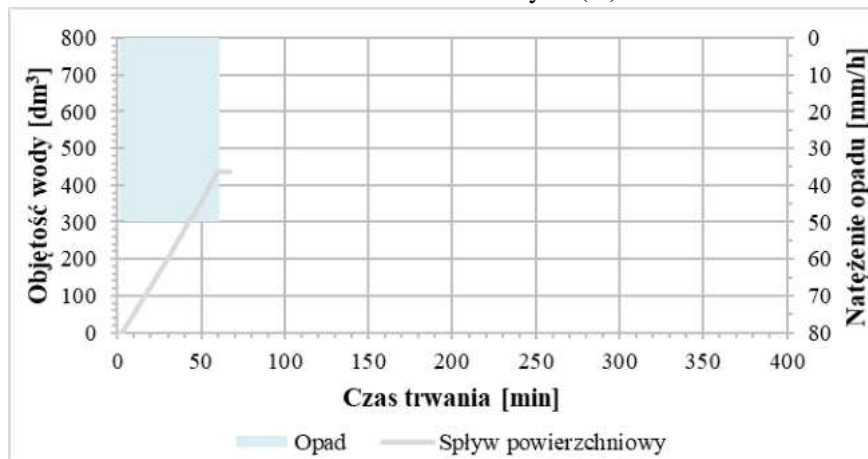
B1



Z2. 25. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na kostce dla opadu B1 w warunkach suchych (D)

Z2. 26. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na kostce dla opadu B1 w warunkach wilgotnych (W)

B2

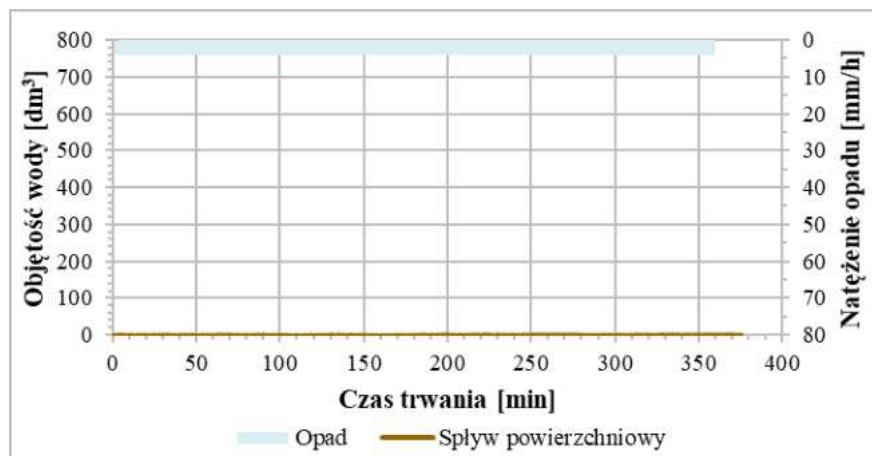


Z2. 27. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na kostce dla opadu B2 w warunkach suchych (D)

Z2. 28. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na kostce dla opadu B2 w warunkach wilgotnych (W)

Zalacznik 2C. Krzywe dynamiki splywu powierzchniowego dla ugoru

WARUNKI SUCHE (D)



Z2. 29. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na ugorze dla opadu A0 w warunkach suchych (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)



Z2. 30. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na ugorze dla opadu A0 w warunkach wilgotnych (W)

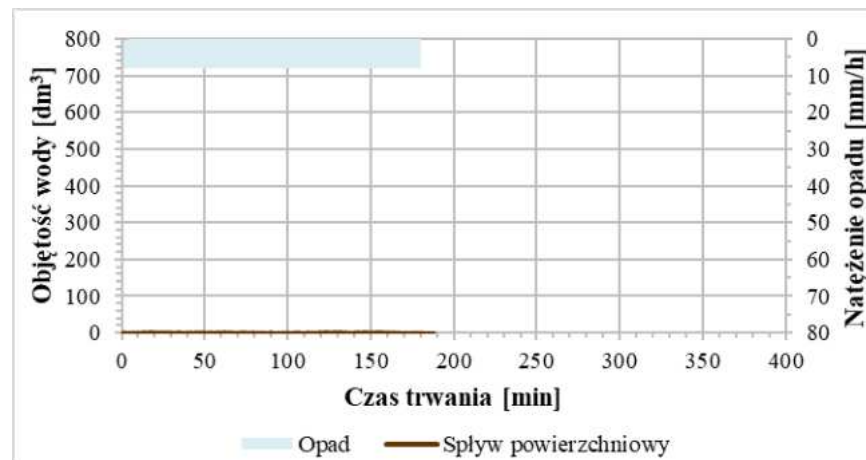
WARUNKI SUCHE (D)

A1



Z2.31. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A1 w warunkach suchych (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

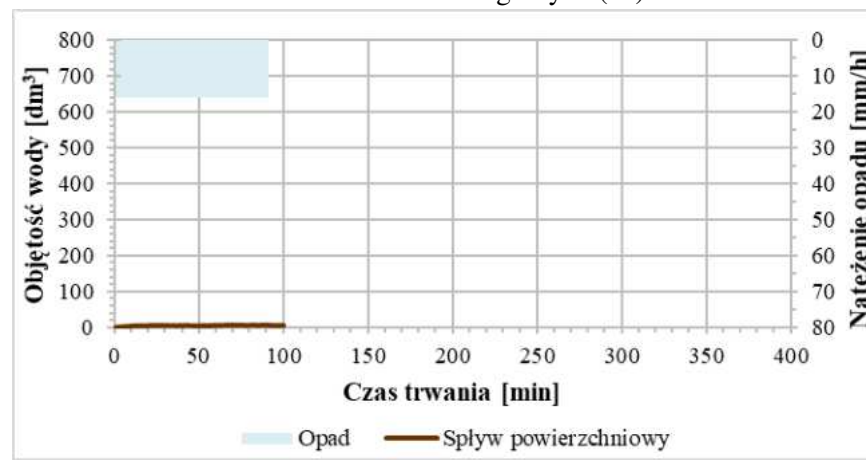


Z2.32. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A1 w warunkach wilgotnych (W)

A2



Z2.33. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A2 w warunkach suchych (D)

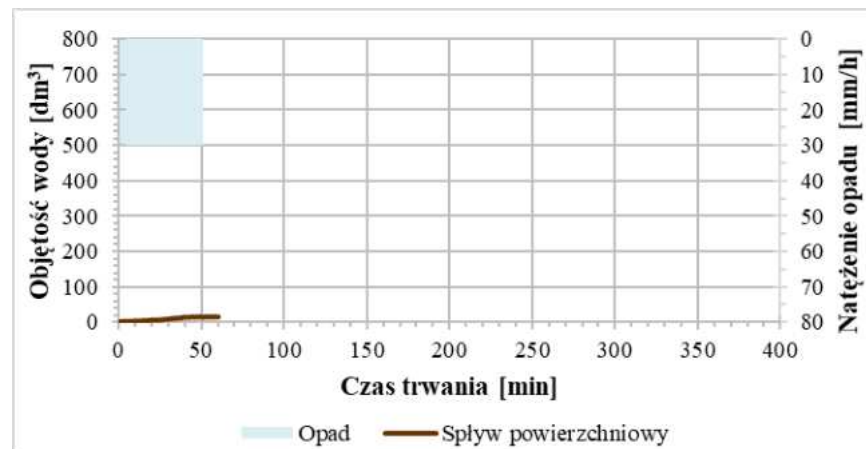
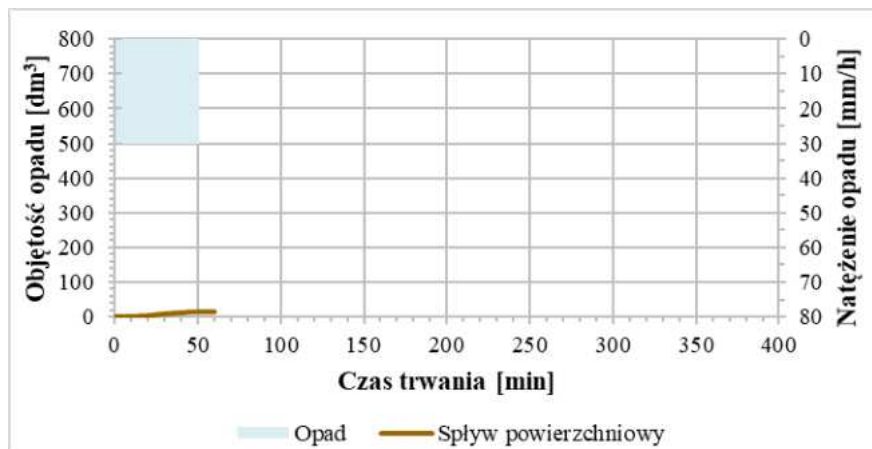


Z2.34. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A2 w warunkach wilgotnych (W)

WARUNKI SUCHE (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

A3

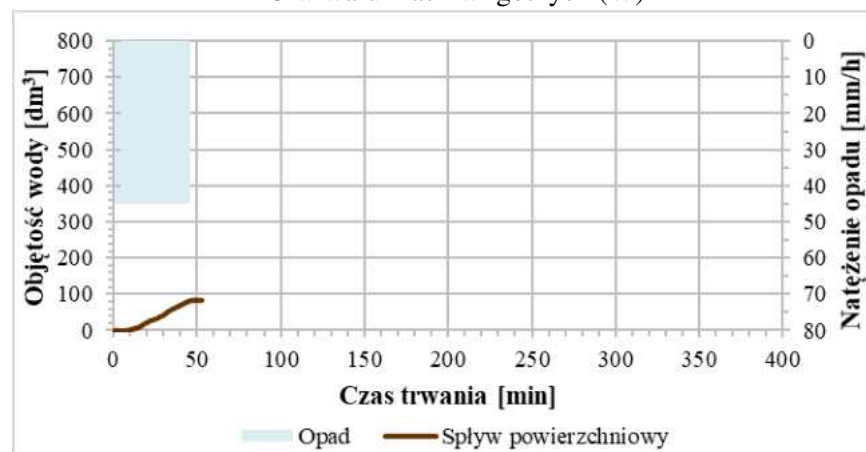
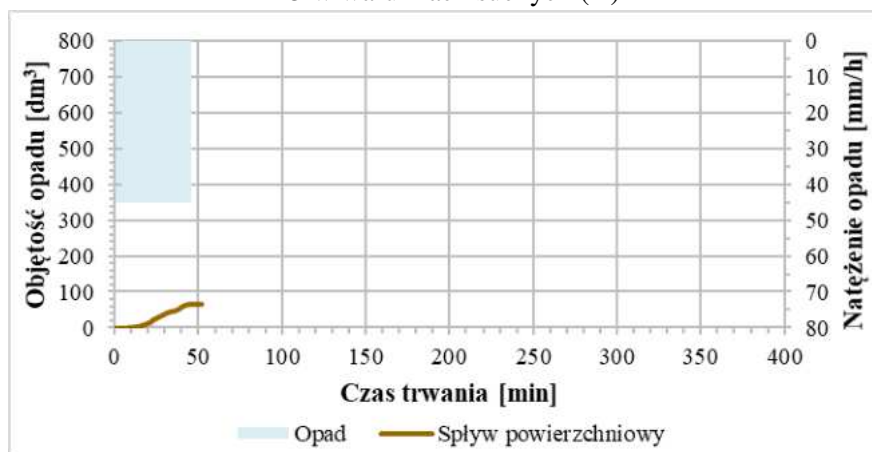


Z2. 35. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A3 w warunkach suchych (D)

Z2. 36. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A3 w warunkach wilgotnych (W)

164

A4



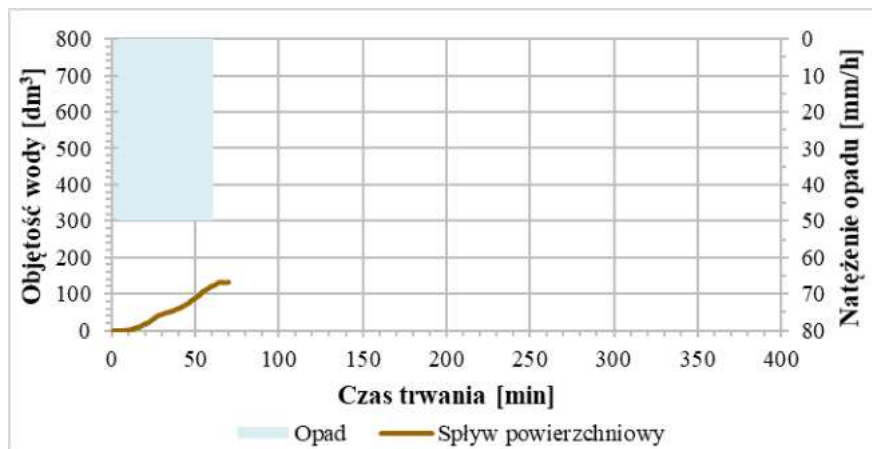
Z2. 37. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A4 w warunkach suchych (D)

Z2. 38. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A4 w warunkach wilgotnych (W)

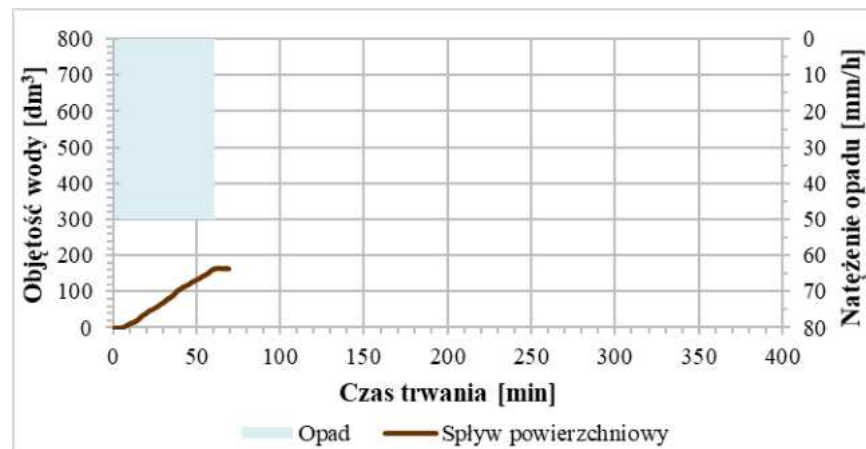
WARUNKI SUCHE (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

B1

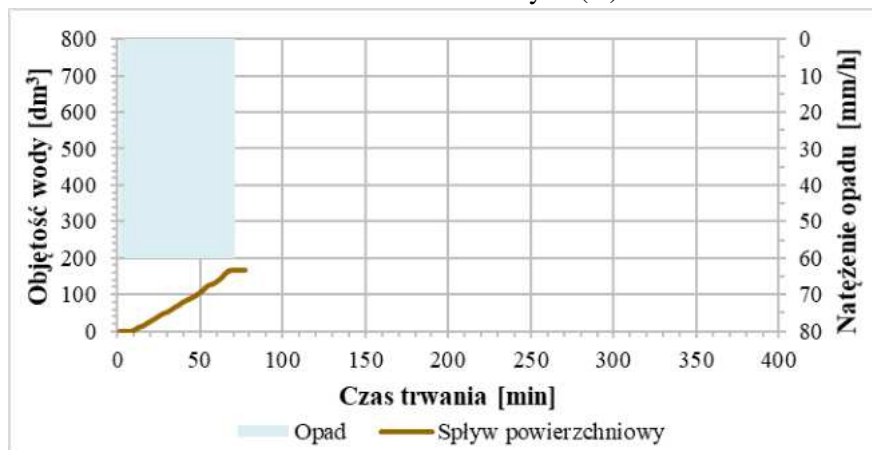


Z2. 39. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu B1 w warunkach suchych (D)

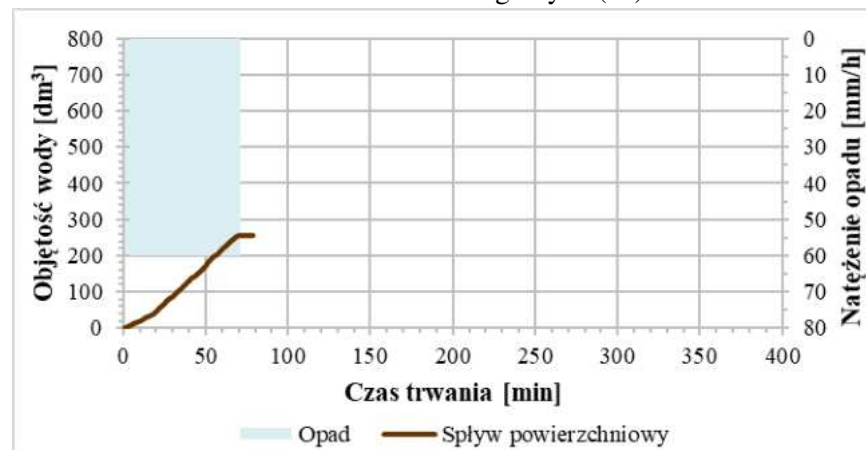


Z2. 40. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu B1 w warunkach wilgotnych (W)

B2



Z2. 41. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu B2 w warunkach suchych (D)

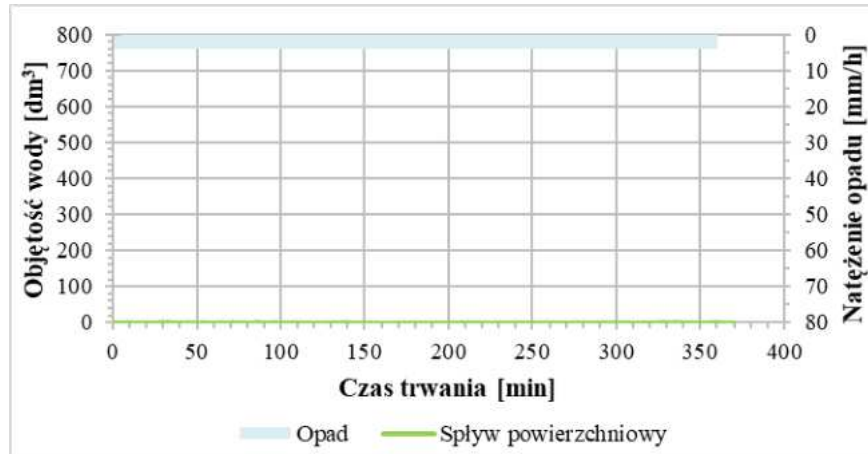


Z2. 42. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu B2 w warunkach wilgotnych (W)

A0

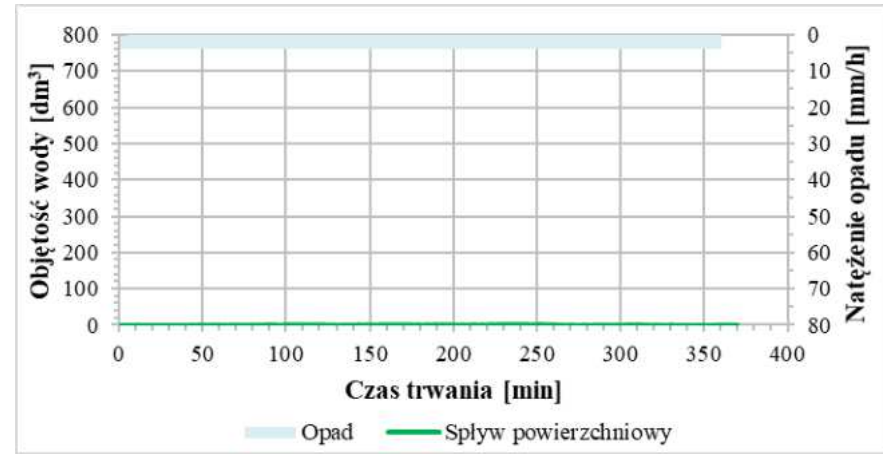
Załącznik 2D. Krzywe dynamiki sływu powierzchniowego dla trawy

WARUNKI SUCHE (D)



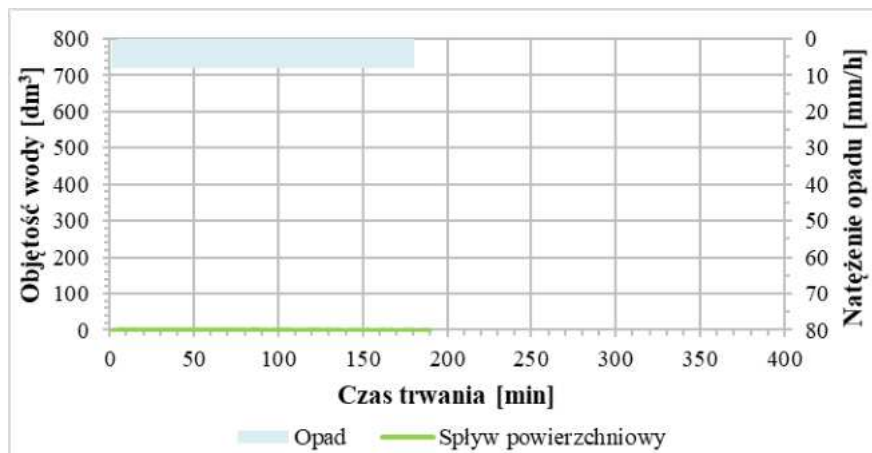
Z2. 43. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na trawie dla opadu A0 w warunkach suchych (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)



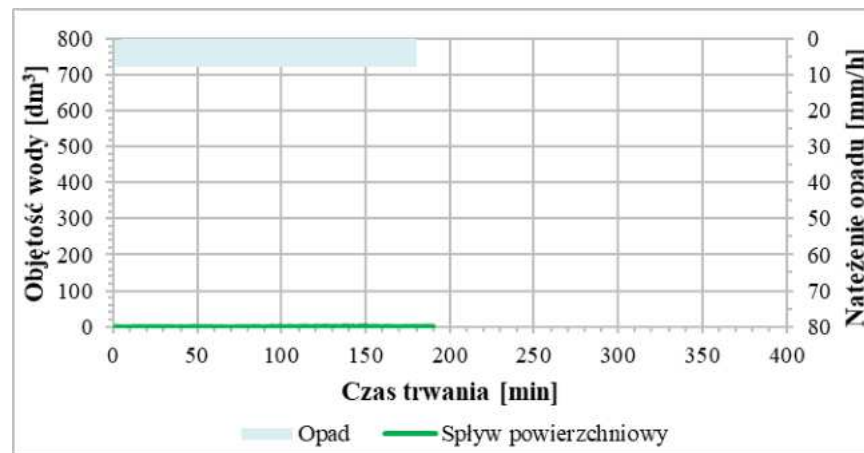
Z2. 44. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na trawie dla opadu A0 w warunkach wilgotnych (W)

WARUNKI SUCHE (D)



Z2. 45. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu A1 w warunkach suchych (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

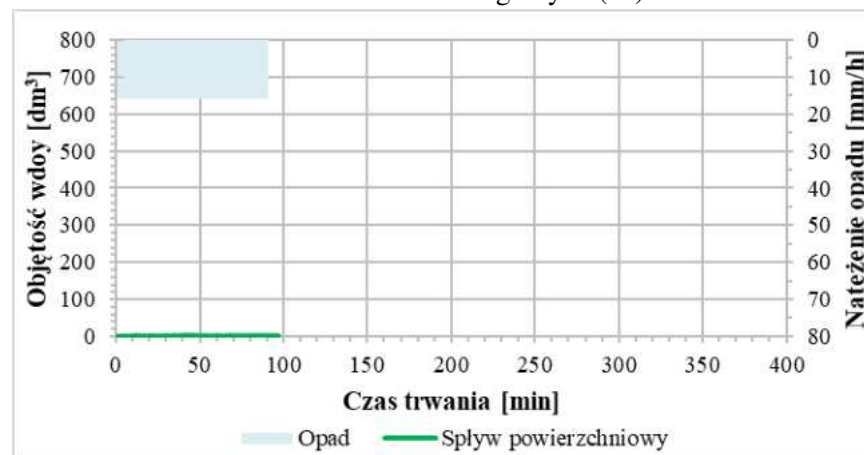


Z2. 46. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu A1 w warunkach wilgotnych (W)

A1



Z2. 47. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu A2 w warunkach suchych (D)

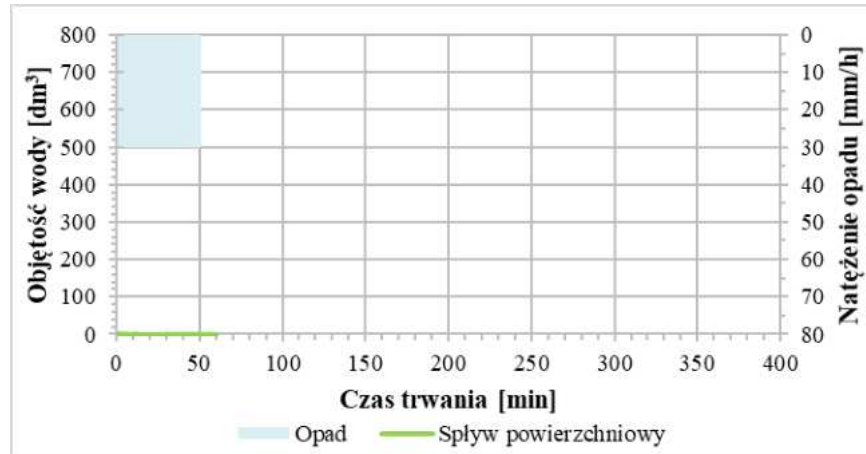


Z2. 48. Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu A2 w warunkach wilgotnych (W)

A2

WARUNKI SUCHE (D)

A3



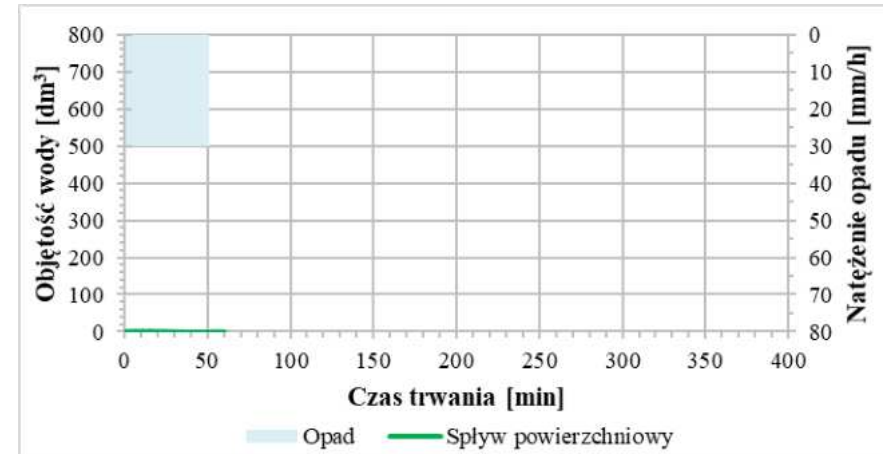
Z2. 49. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na trawie dla opadu A3 w warunkach suchych (D)

A4

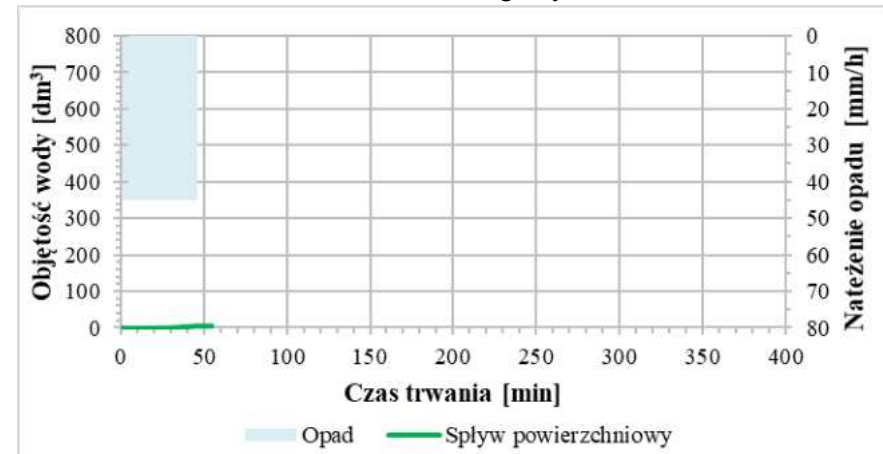


Z2. 51. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na trawie dla opadu A4 w warunkach suchych (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)



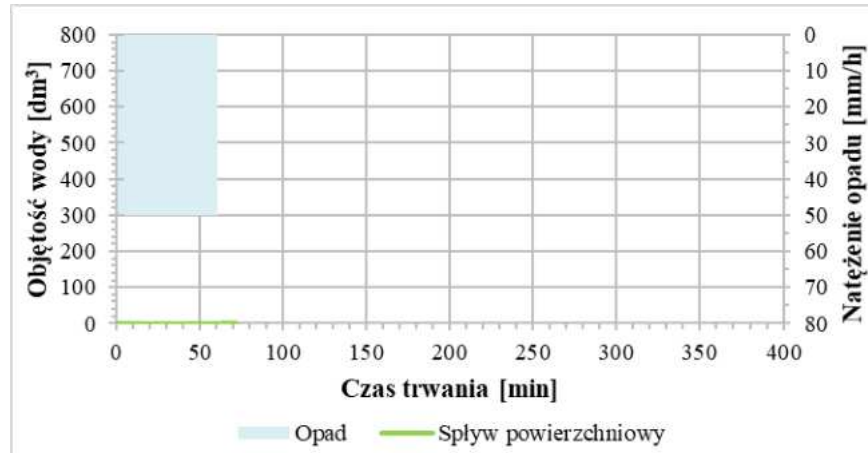
Z2. 50. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na trawie dla opadu A3 w warunkach wilgotnych (W)



Z2. 52. Krzywa dynamiki sływu powierzchniowego na trawie dla opadu A4 w warunkach wilgotnych (W)

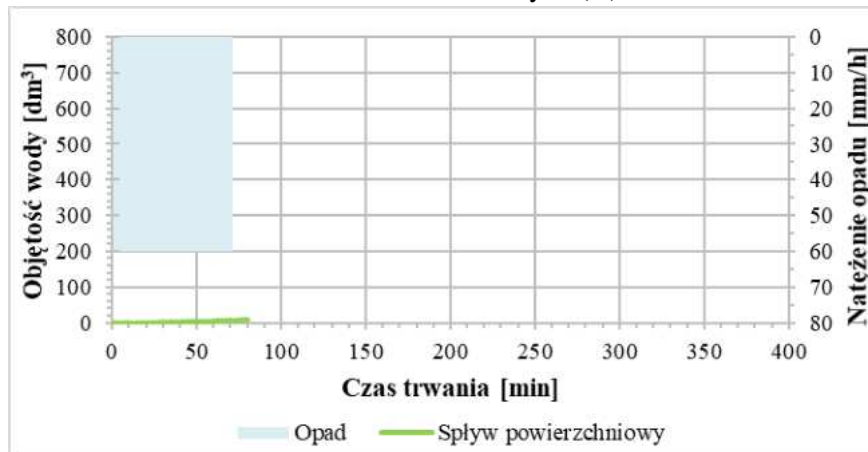
WARUNKI SUCHE (D)

B1



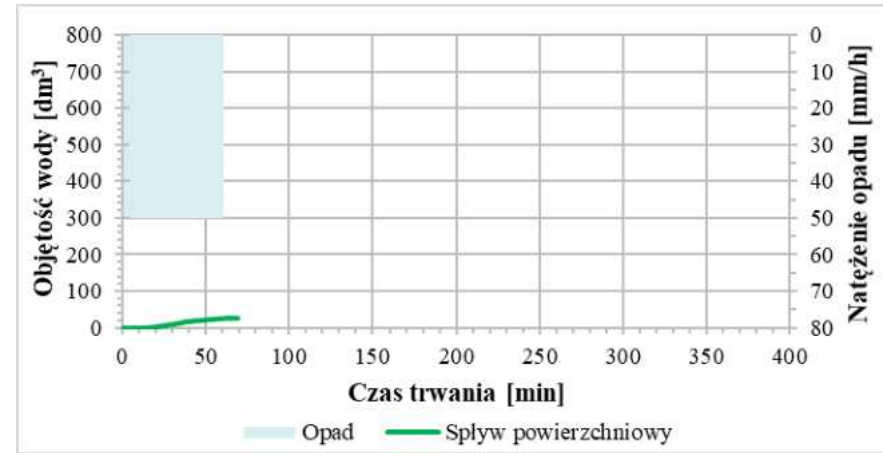
Z2. 53. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na trawie dla opadu B1 w warunkach suchych (D)

B2

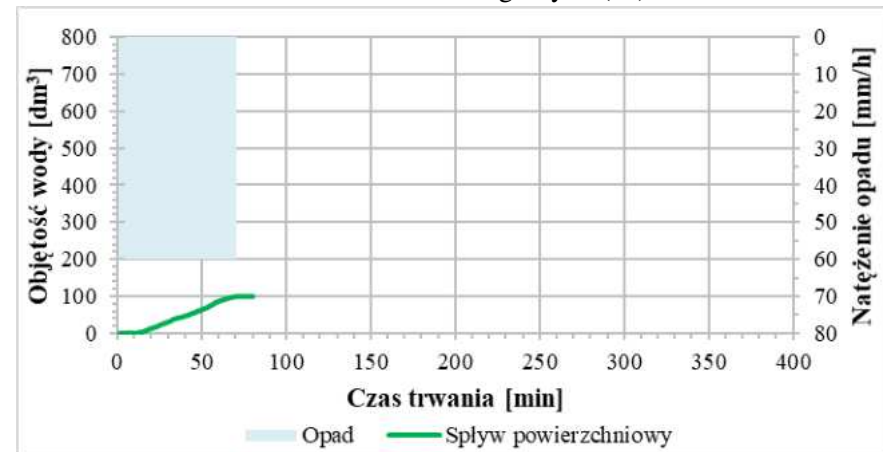


Z2. 55. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na trawie dla opadu B2 w warunkach suchych (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)



Z2. 54. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na trawie dla opadu B1 w warunkach wilgotnych (W)



Z2. 56. Krzywa dynamiki splywu powierzchniowego na trawie dla opadu B2 w warunkach wilgotnych (W)



mgr inż. Aleksandra Czuchaj

ROZPRAWA DOKTORSKA

Uwarunkowania dynamiki spływu powierzchniowego w świetle terenowych badań eksperymentalnych

Załącznik 3. Porównanie krzywych dynamiki spływu powierzchniowego

Załącznik 3A. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego
według typu pokrycia powierzchni terenu

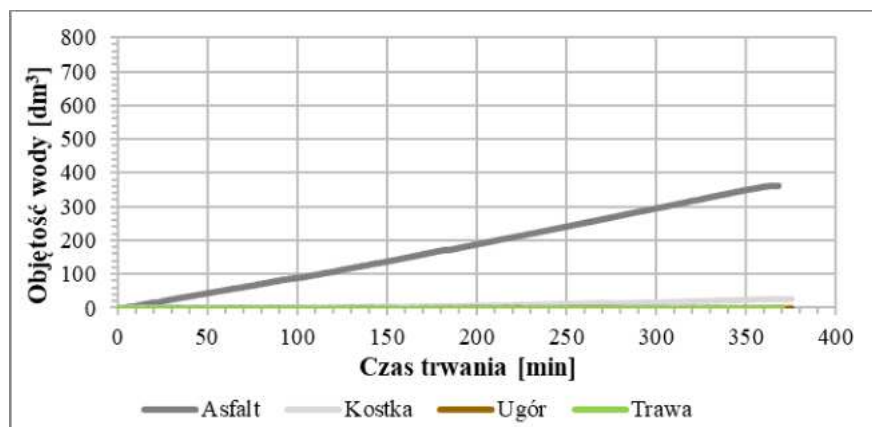
Załącznik 3B. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego
według kategorii symulowanego opadu

Załącznik 3C. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego
według początkowych warunków wilgotnościowych gruntu

Poznań 2024

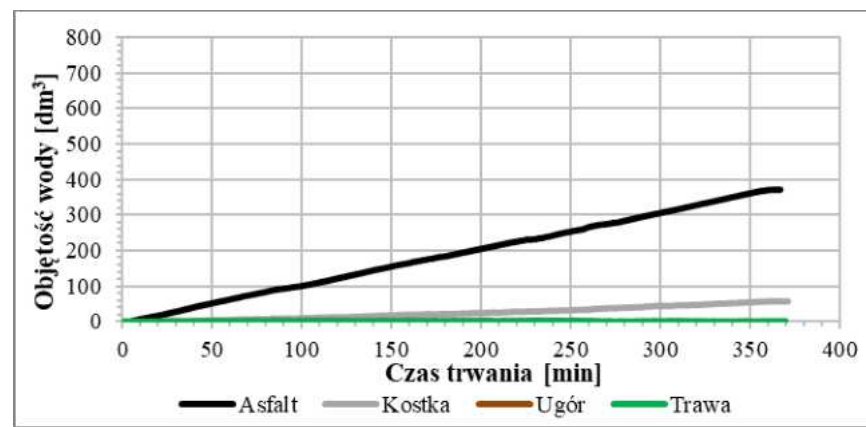
Załącznik 3A. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego według typu pokrycia powierzchni terenu

WARUNKI SUCHE (D)



Z3. 1. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A0 w warunkach suchych (D) na poszczególnych poletkach testowych

WARUNKI WILGOTNE (W)



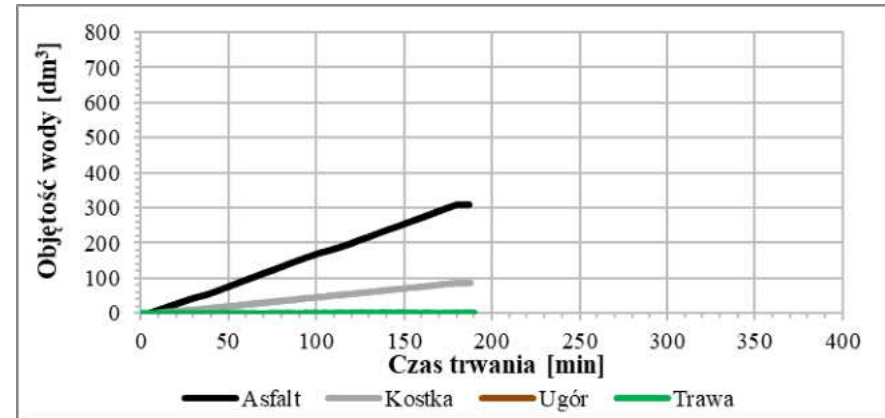
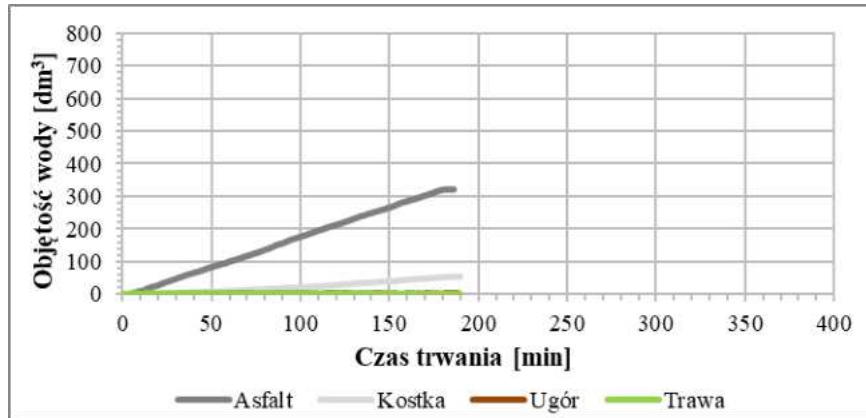
Z3. 2. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A0 w warunkach wilgotnych (W) na poszczególnych poletkach testowych

A0

WARUNKI SUCHE (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

A1

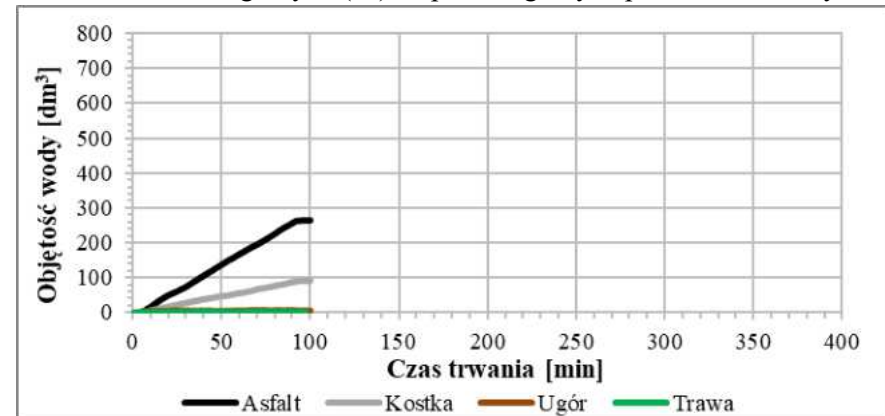
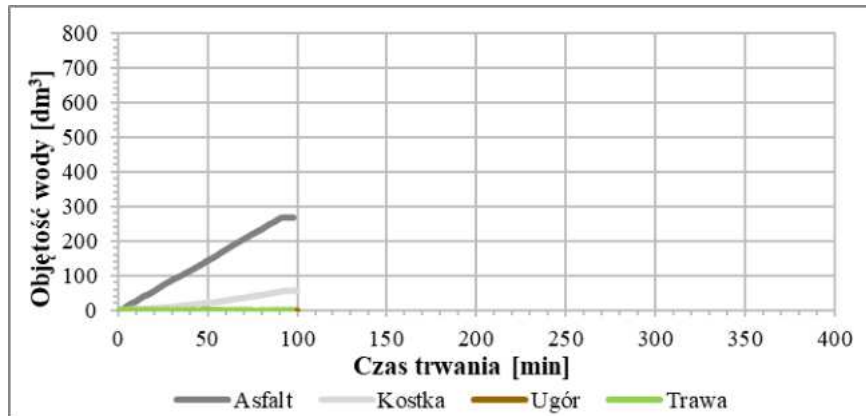


Z3. 3. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A1 w warunkach suchych (D) na poszczególnych poletkach testowych

Z3. 4. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A1 w warunkach wilgotnych (W) na poszczególnych poletkach testowych

172

A2



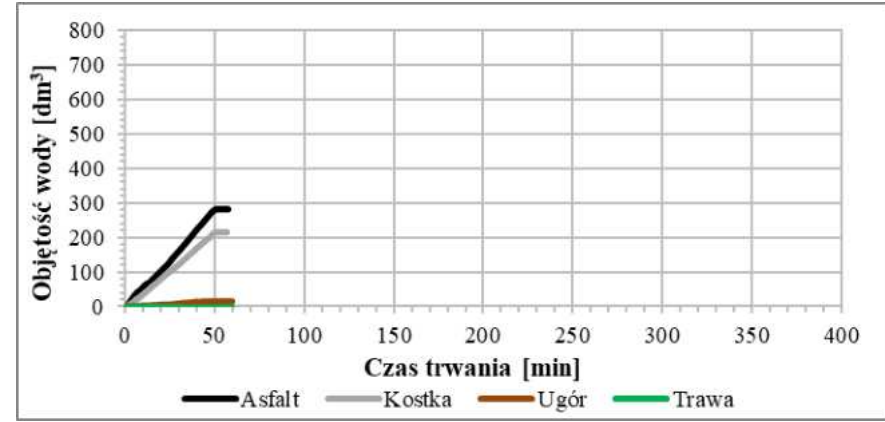
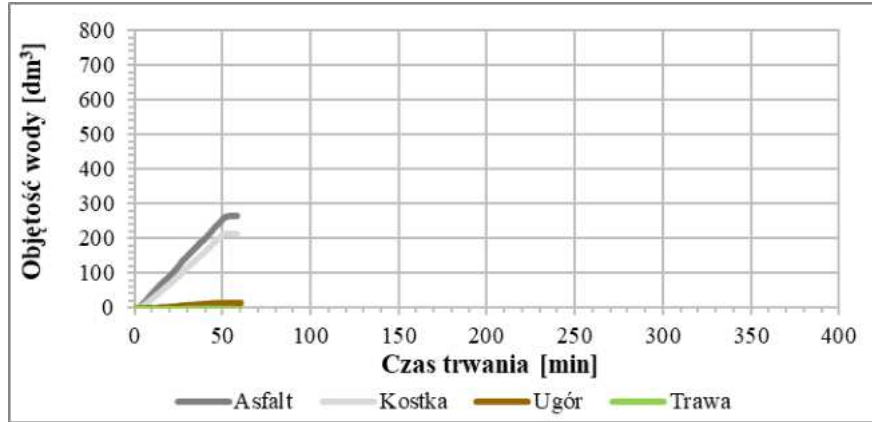
Z3. 5. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A2 w warunkach suchych (D) na poszczególnych poletkach testowych

Z3. 6. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A2 w warunkach wilgotnych (W) na poszczególnych poletkach testowych

WARUNKI SUCHE (D)

WARUNKI WILGOTNE (W)

A3

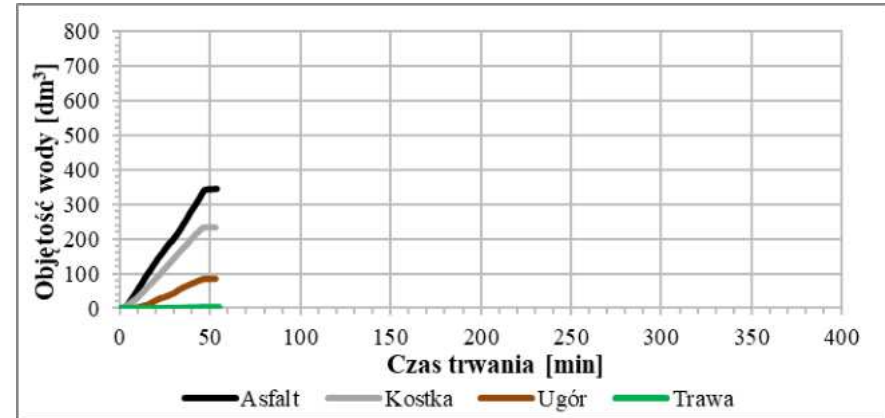
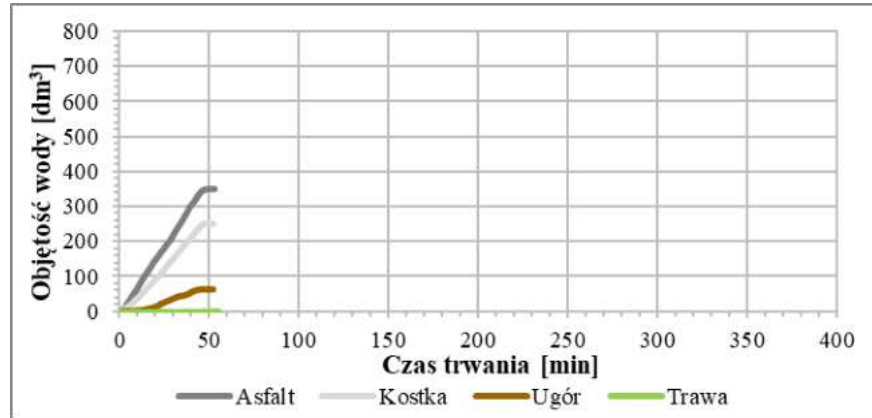


Z3. 7. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A3 w warunkach suchych (D) na poszczególnych poletkach testowych

Z3. 8. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A3 w warunkach wilgotnych (W) na poszczególnych poletkach testowych

173

A4

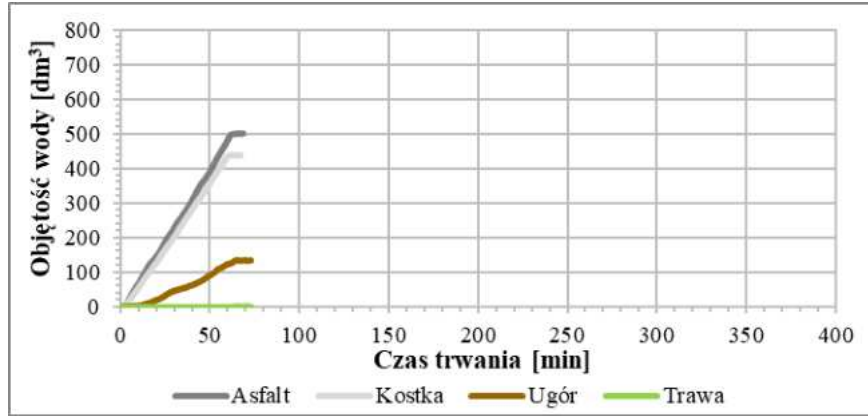


Z3. 9. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A4 w warunkach suchych (D) na poszczególnych poletkach testowych

Z3. 10. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu A4 w warunkach wilgotnych (W) na poszczególnych poletkach testowych

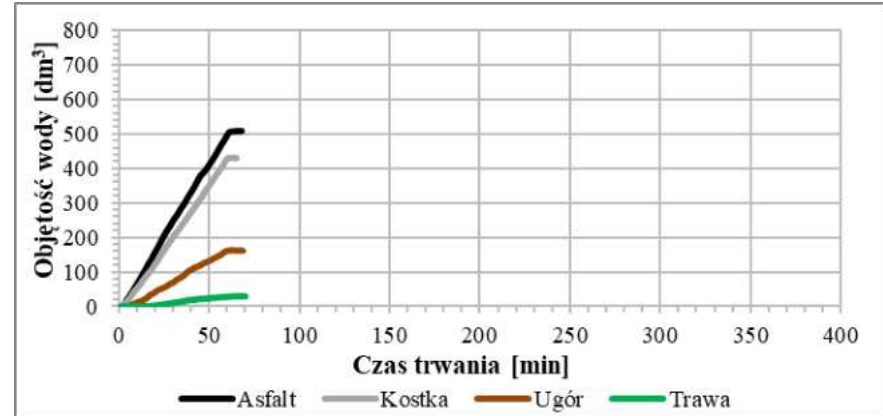
WARUNKI SUCHE (D)

B1



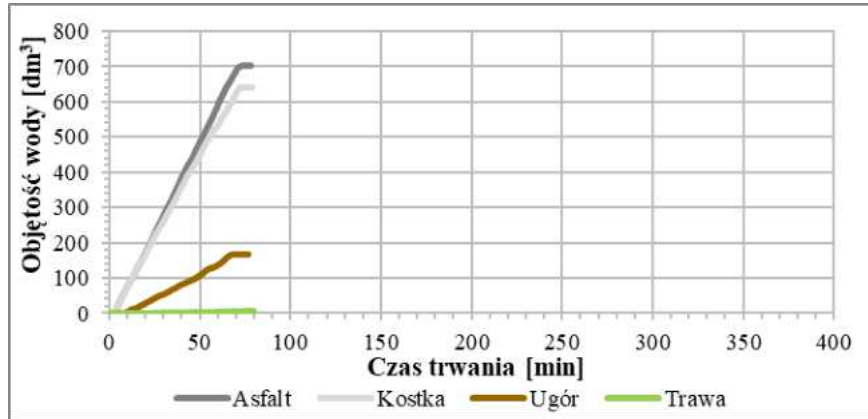
Z3. 11. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B1 w warunkach suchych (D) na poszczególnych poletkach testowych

WARUNKI WILGOTNE (W)

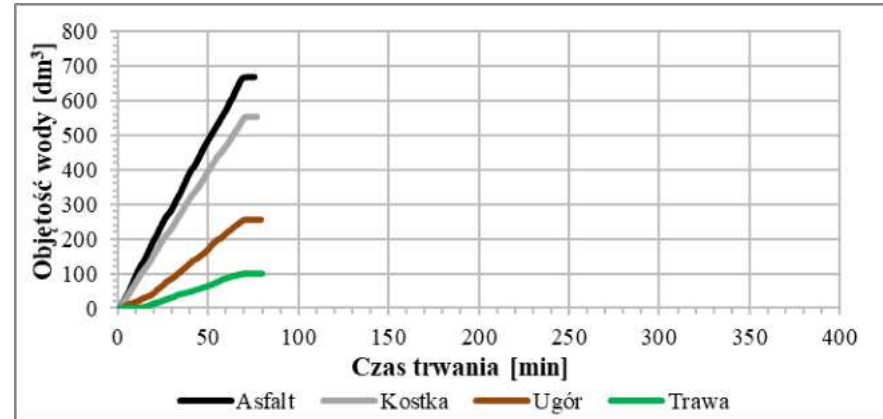


Z3. 12. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B1 w warunkach wilgotnych (W) na poszczególnych poletkach testowych

B2



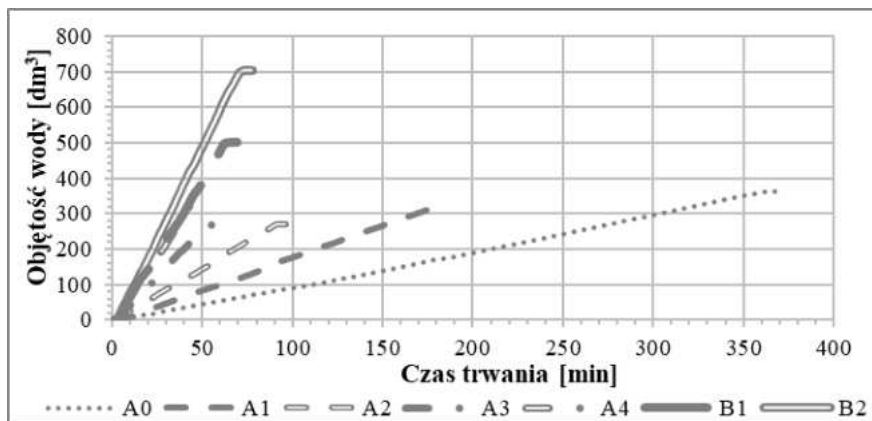
Z3. 13. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 w warunkach suchych (D) na poszczególnych poletkach testowych



Z3. 14. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 w warunkach wilgotnych (W) na poszczególnych poletkach testowych

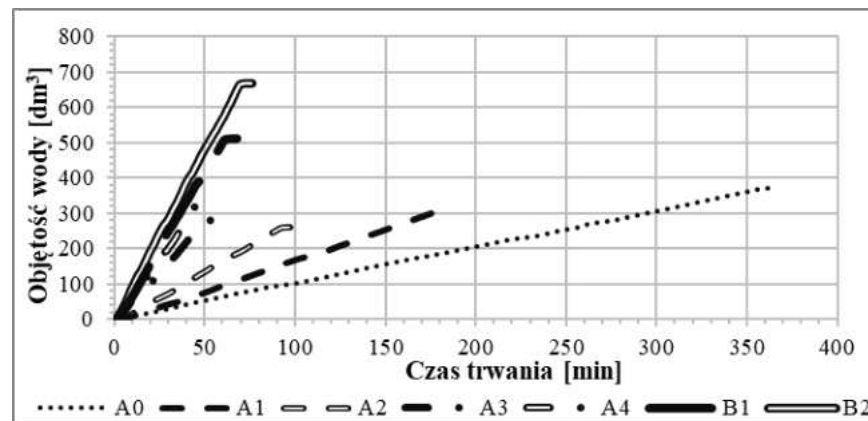
Załącznik 3B. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego według kategorii symulowanego opadu

WARUNKI SUCHE (D)



Z3. 15. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie w warunkach suchych (D) dla poszczególnych kategorii opadu

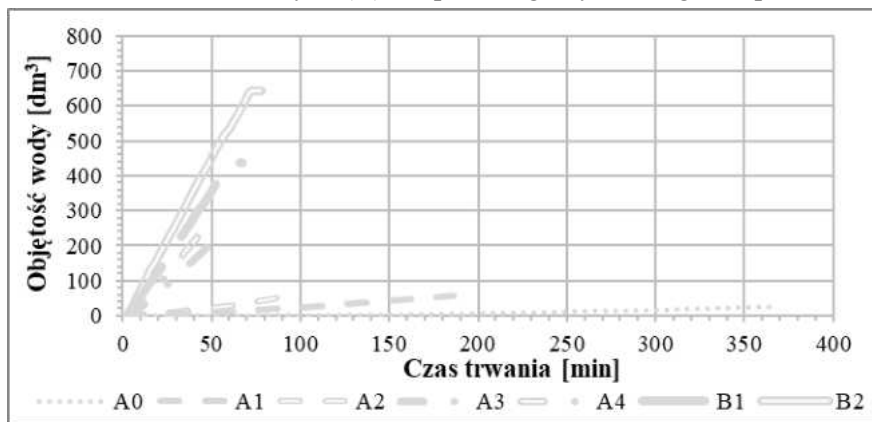
WARUNKI WILGOTNE (W)



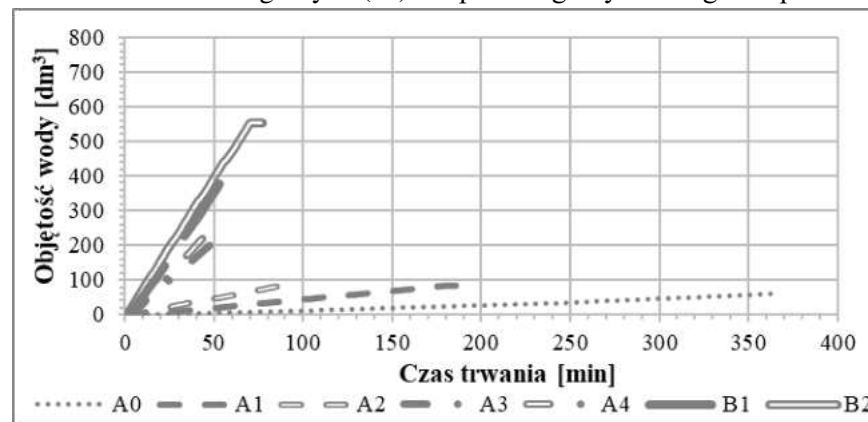
Z3. 16. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie w warunkach wilgotnych (W) dla poszczególnych kategorii opadu

ASFALT

KOSTKA



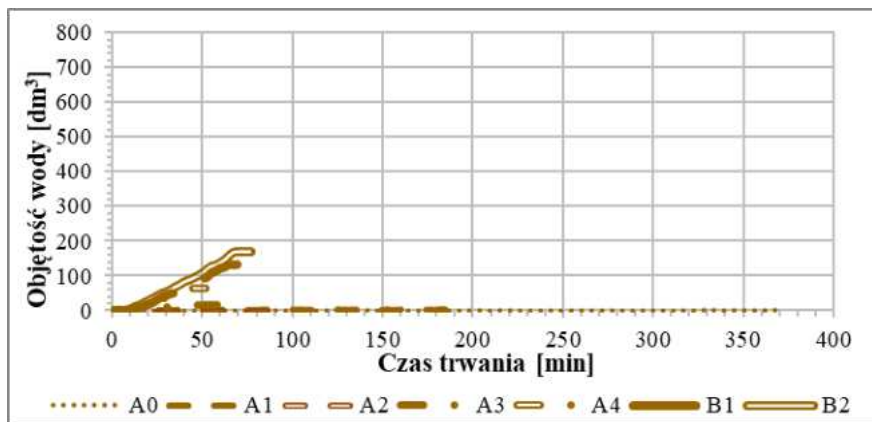
Z3. 17. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na kostce w warunkach suchych (D) dla poszczególnych kategorii opadu



Z3. 18. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na kostce w warunkach wilgotnych (W) dla poszczególnych kategorii opadu

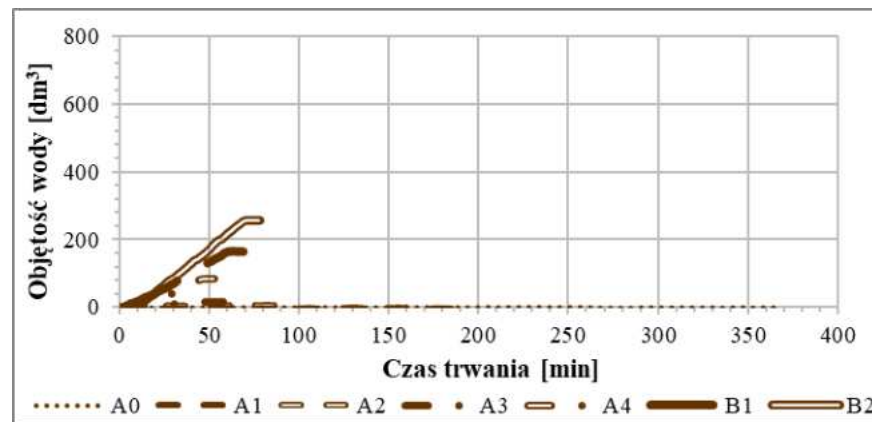
UGÓR

WARUNKI SUCHE (D)



Z3. 19. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze w warunkach suchych (D) dla poszczególnych kategorii opadu

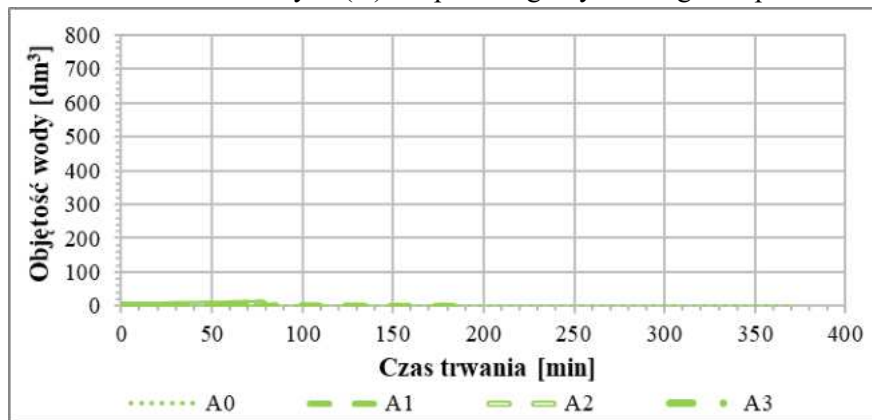
WARUNKI WILGOTNE (W)



Z3. 20. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze w warunkach wilgotnych (W) dla poszczególnych kategorii opadu

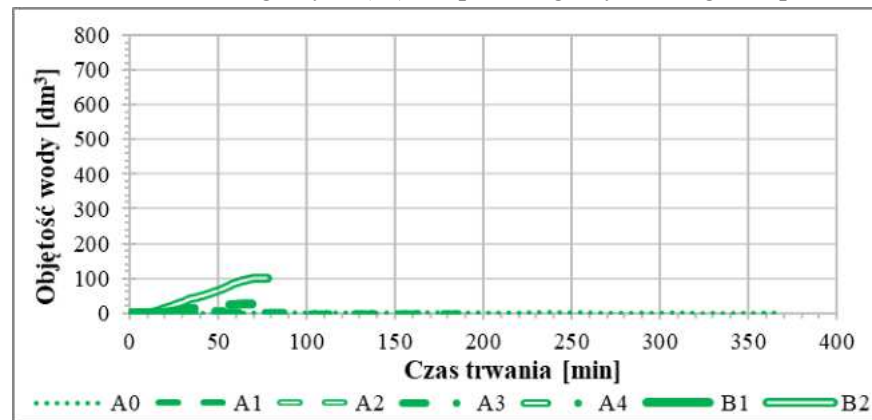
TRAWA

WARUNKI SUCHE (D)



Z3. 21. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na trawie w warunkach suchych (D) dla poszczególnych kategorii opadu

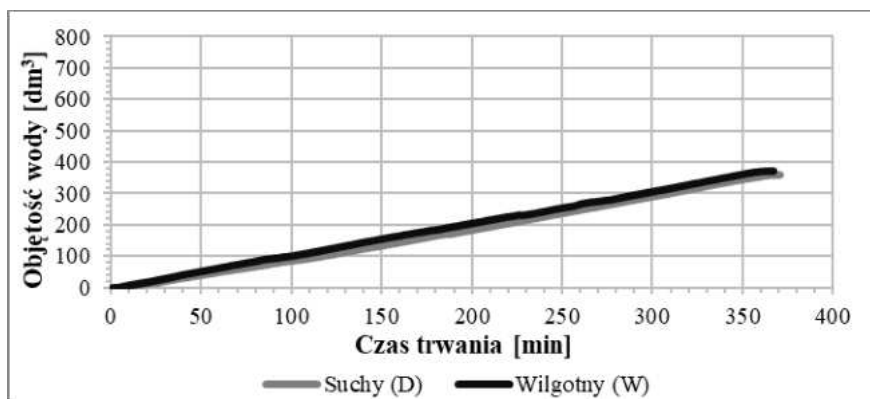
WARUNKI WILGOTNE (W)



Z3. 22. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na trawie w warunkach wilgotnych (W) dla poszczególnych kategorii opadu

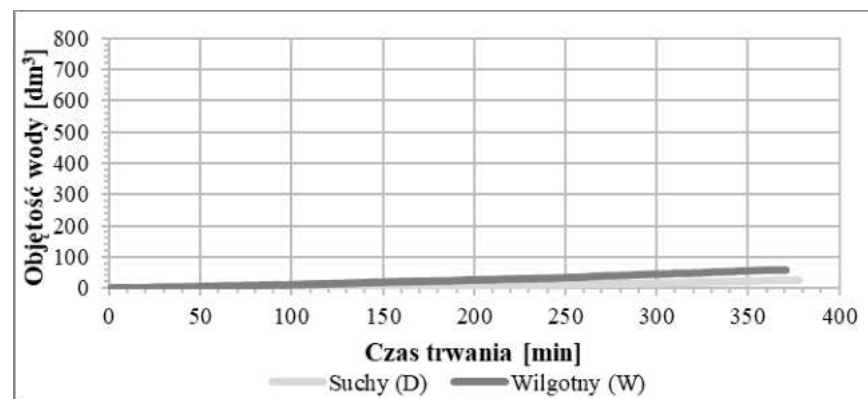
Załącznik 3C. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego według początkowych warunków wilgotnościowych gruntu

ASFALT



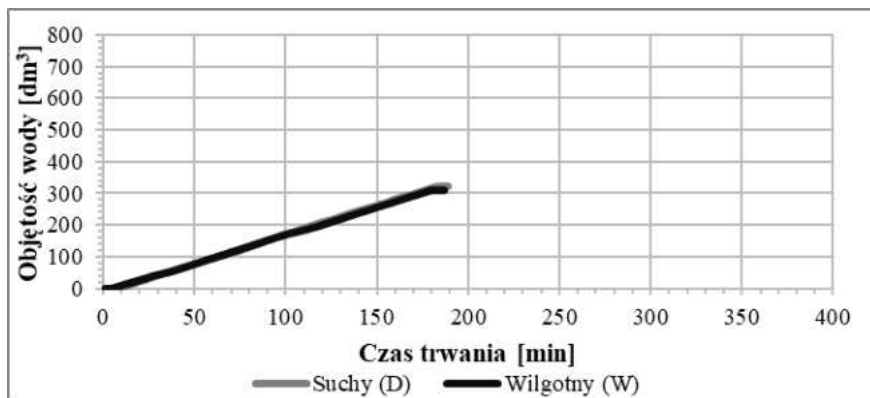
Z3. 23. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A0 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

KOSTKA



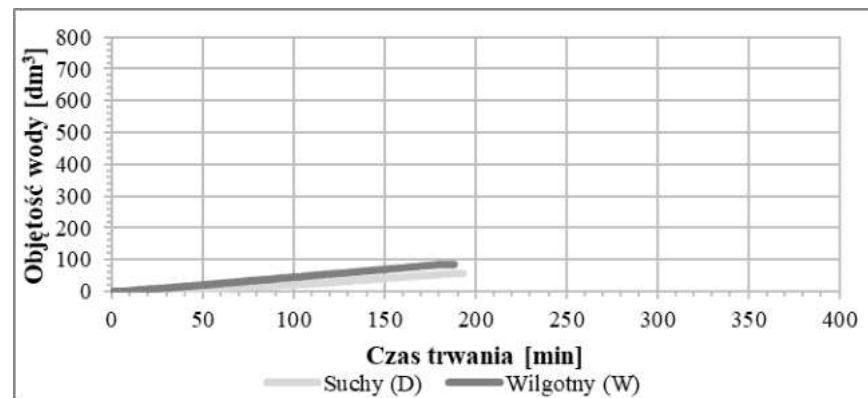
Z3. 24. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na kostce dla opadu A0 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

ASFALT

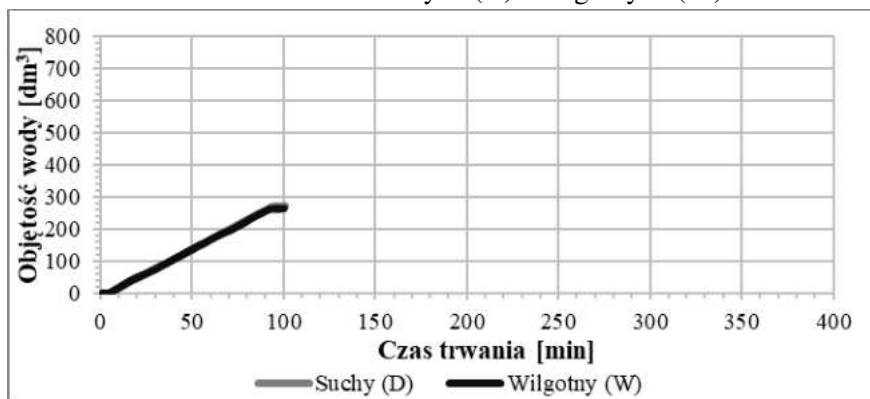


Z3. 25. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A1 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

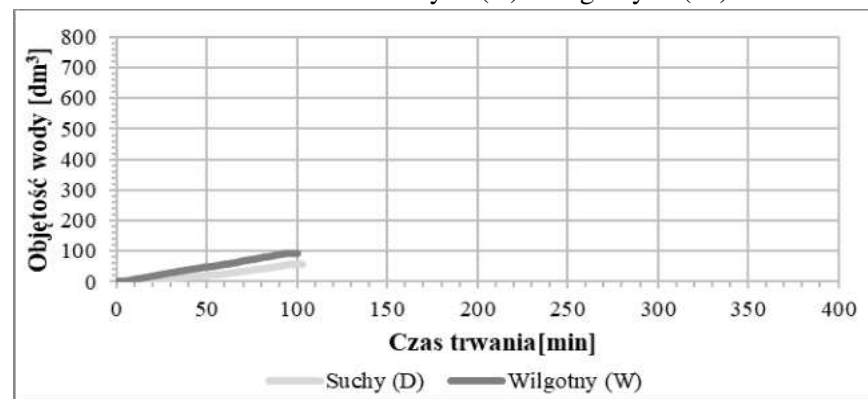
KOSTKA



Z3. 26. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na kostce dla opadu A1 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

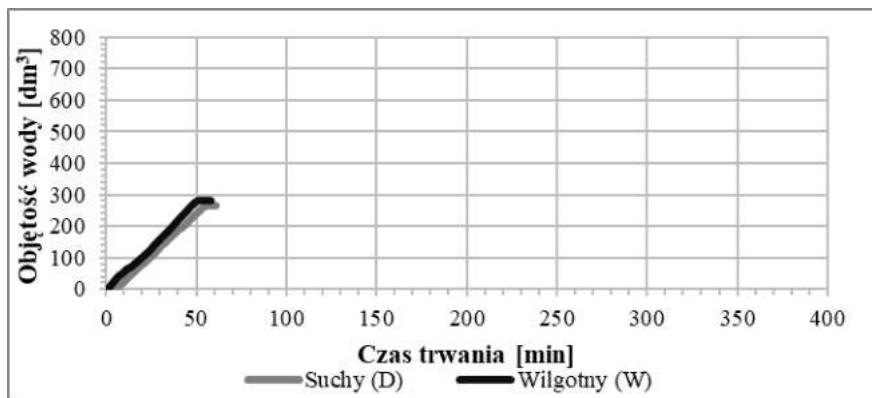


Z3. 27. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)



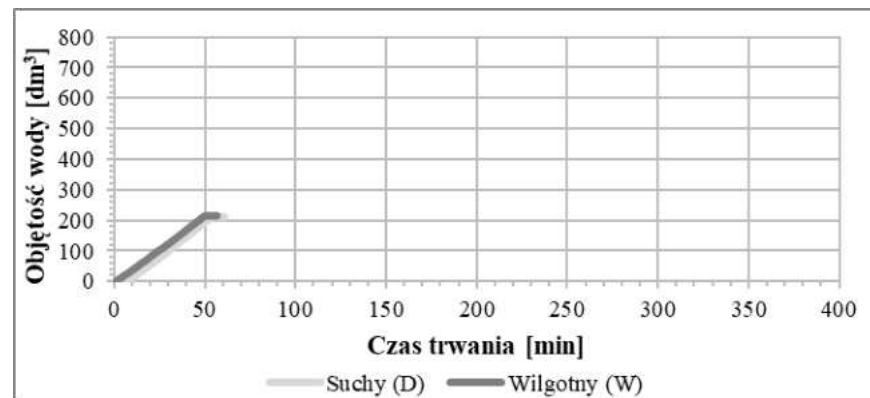
Z3. 28. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na kostce dla opadu A2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

ASFALT

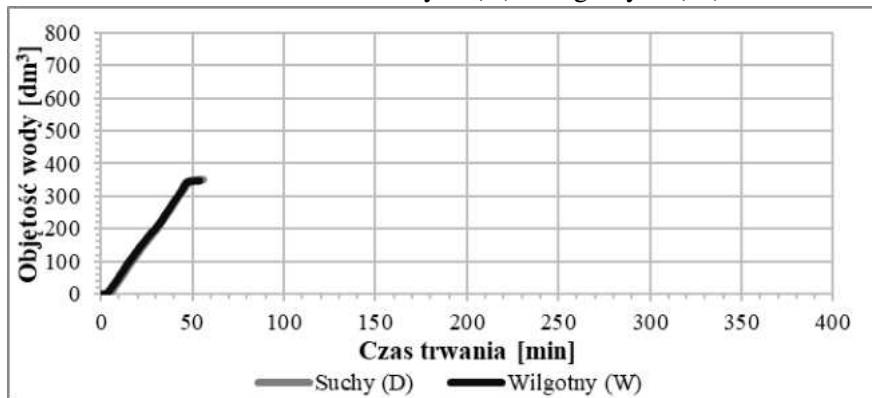


Z3. 29. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A3 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

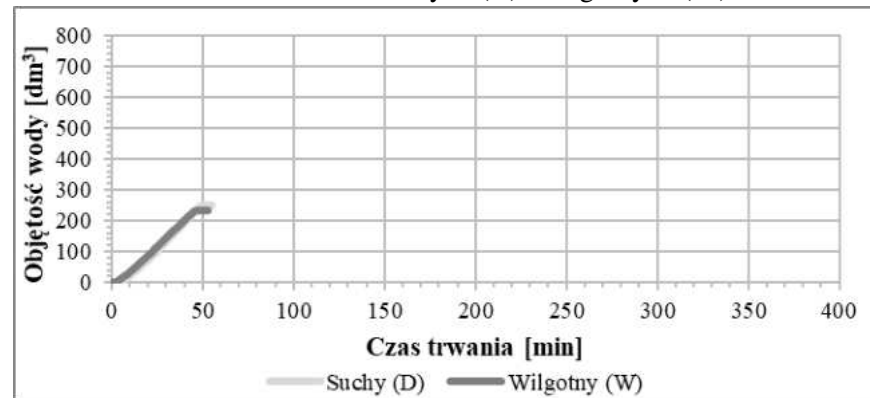
KOSTKA



Z3. 30. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na kostce dla opadu A3 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

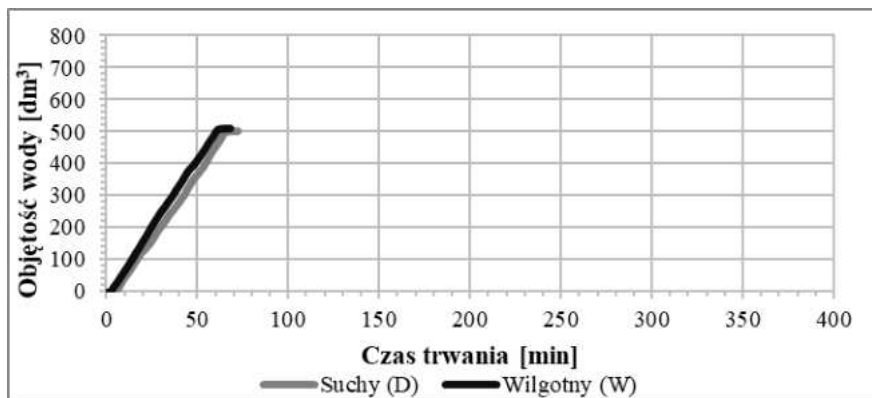


Z3. 31. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu A4 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)



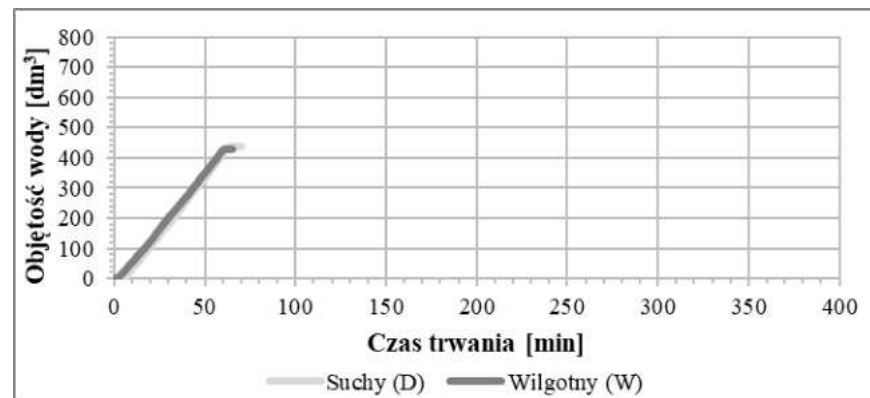
Z3. 32. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na kostce dla opadu A4 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

ASFALT

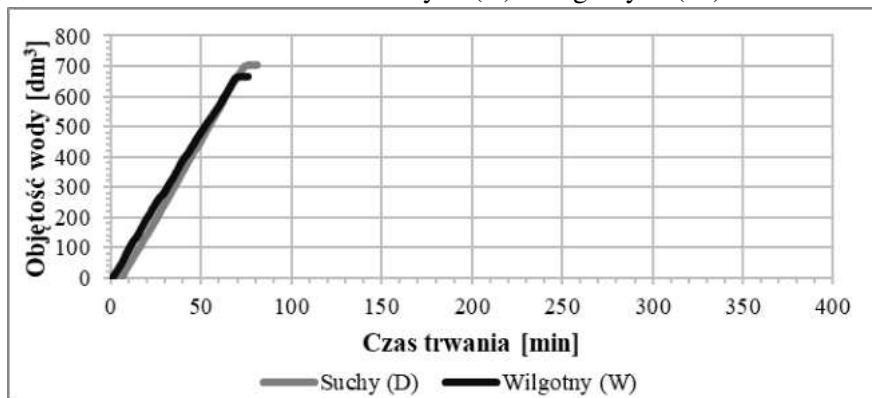


Z3. 33. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu B1 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

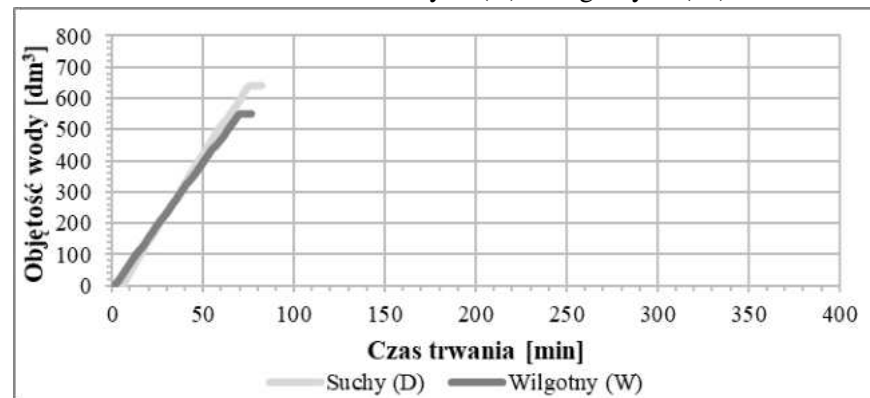
KOSTKA



Z3. 34. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na kostce dla opadu B1 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

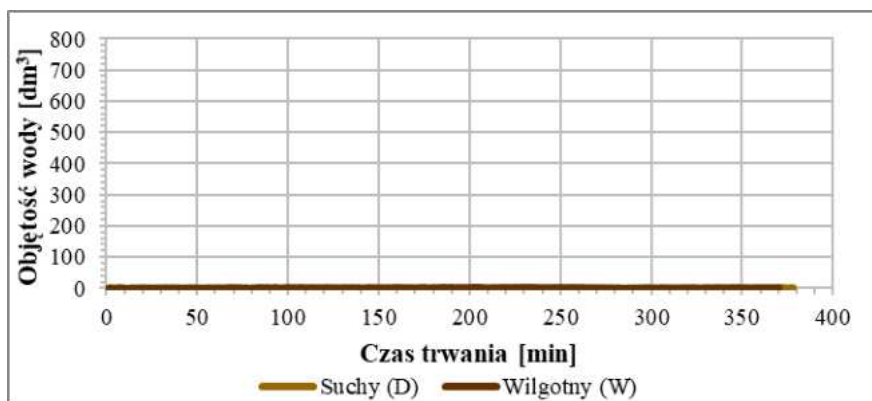


Z3. 35. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na asfalcie dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)



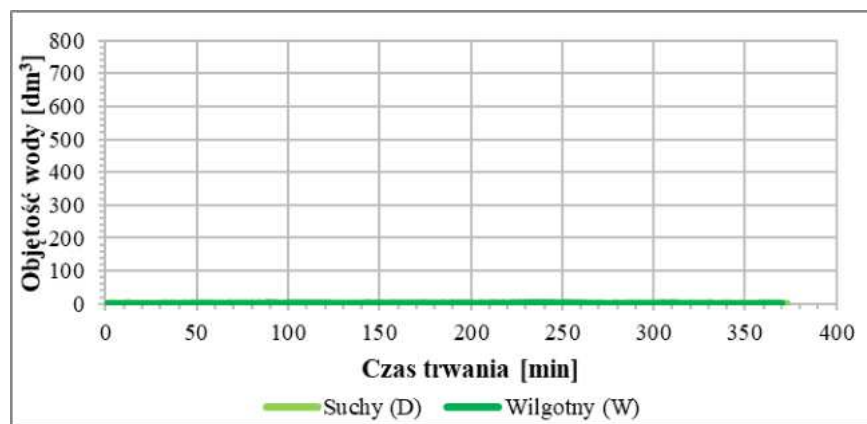
Z3. 36. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na kostce dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

UGÓR



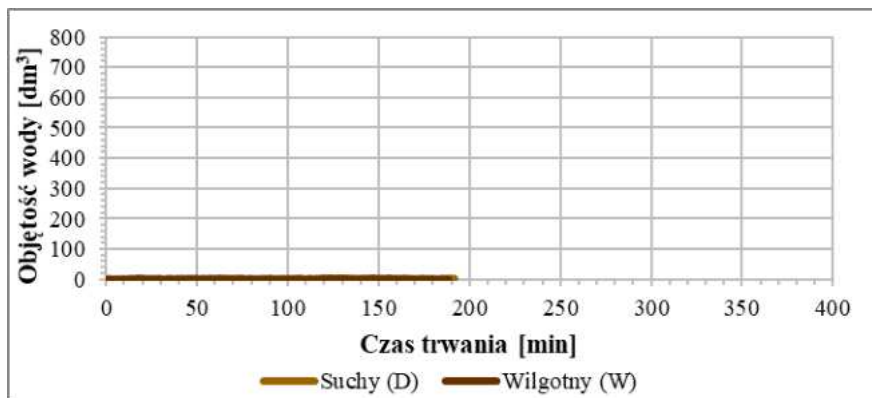
Z3. 37. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A0 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

TRAWA



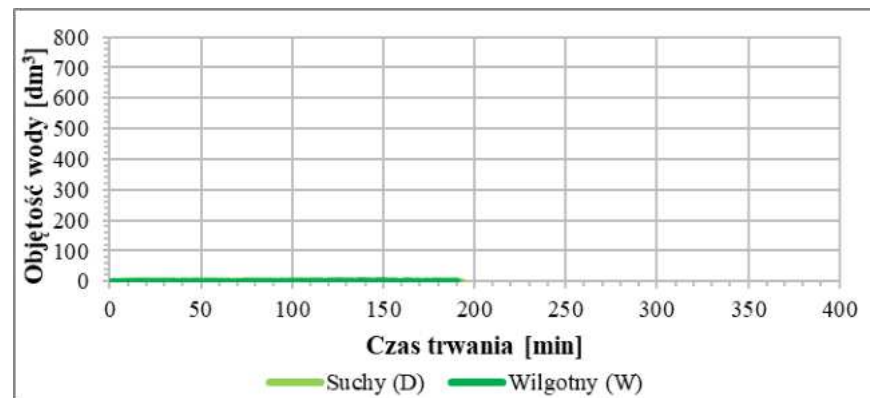
Z3. 38. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu A0 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

UGÓR

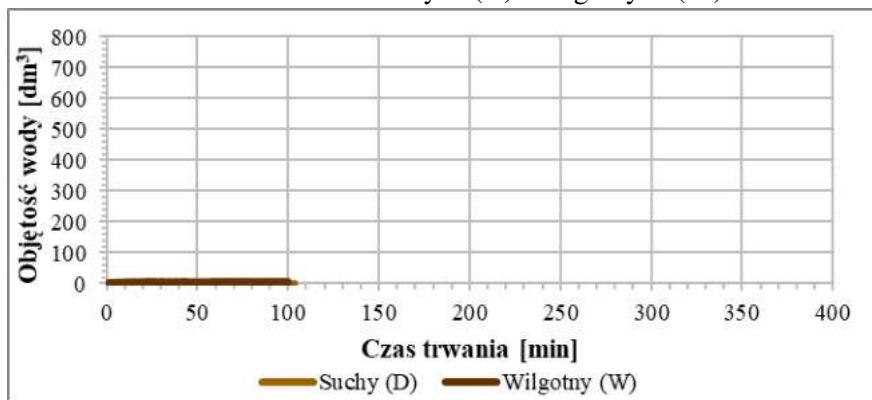


Z3. 39. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A1 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

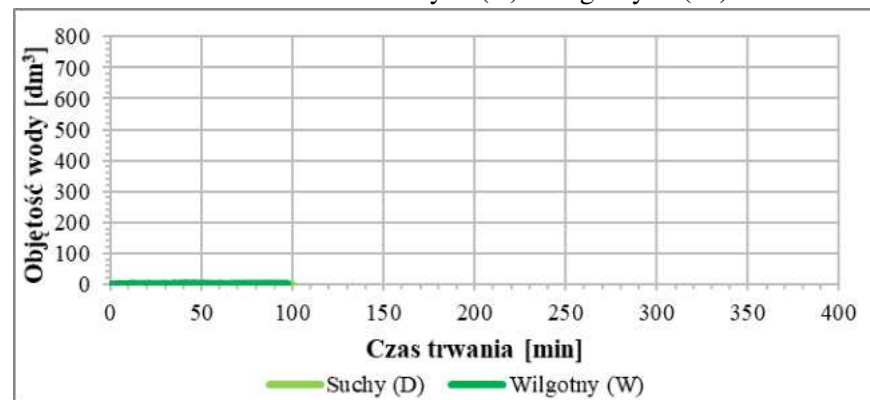
TRAWA



Z3. 40. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu A1 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

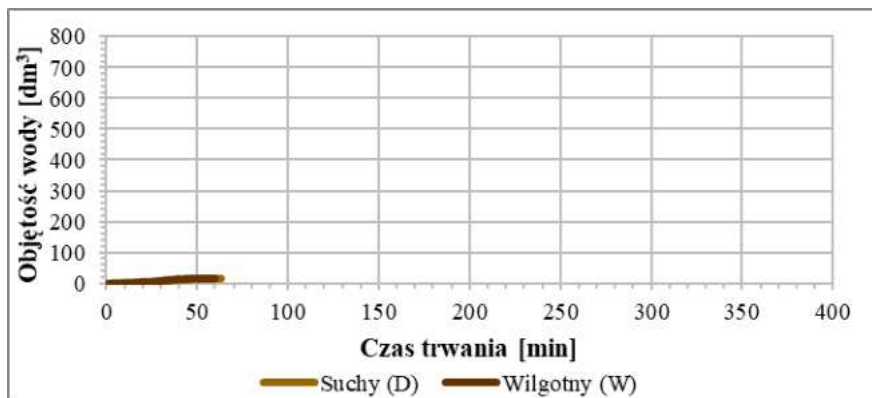


Z3. 41. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)



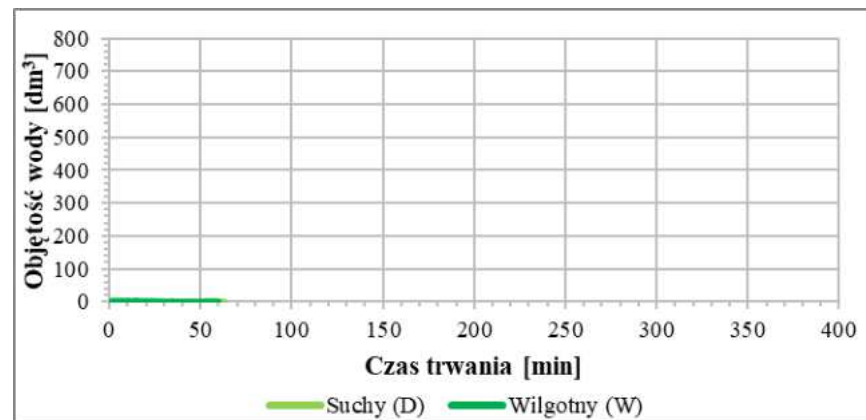
Z3. 42. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu A2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

UGÓR

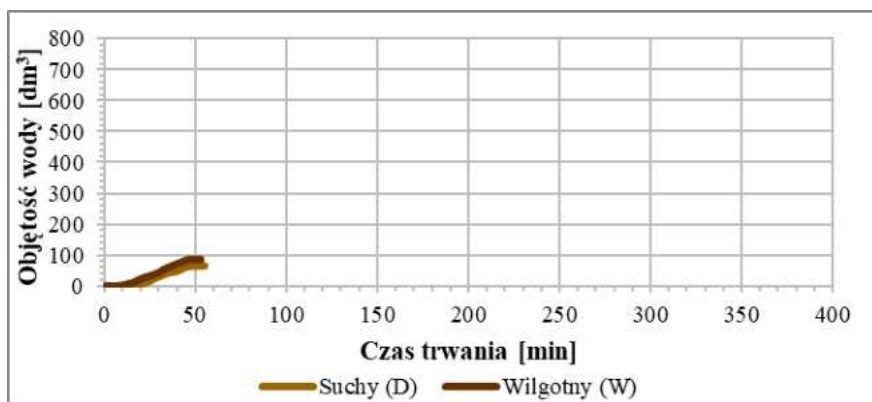


Z3. 43. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A3 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

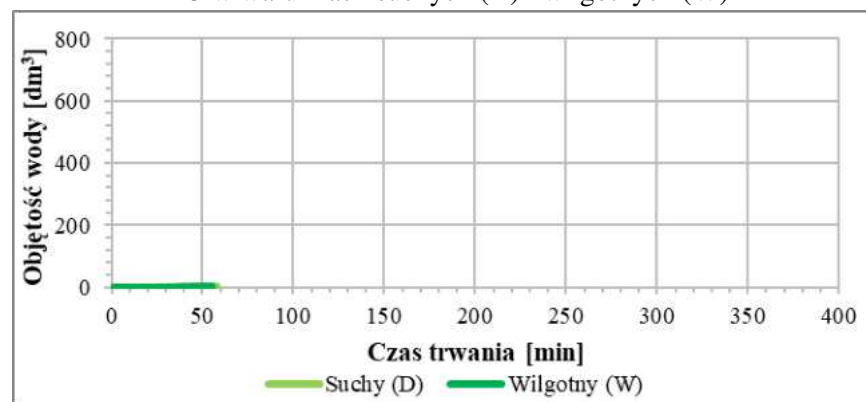
TRAWA



Z3. 44. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu A3 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

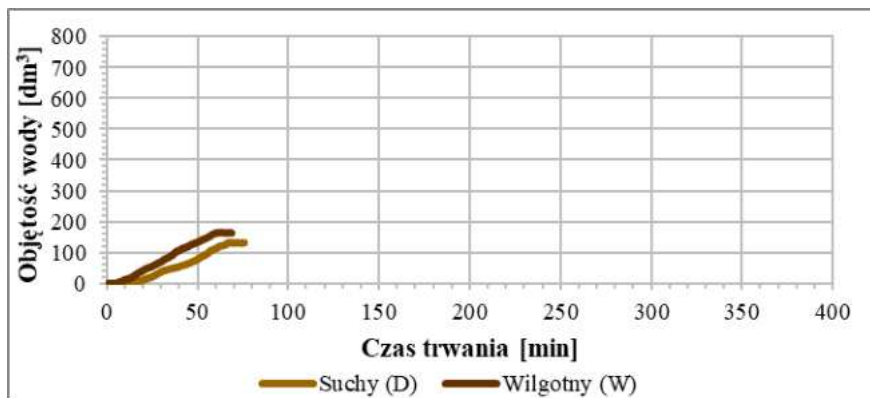


Z3. 45. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu A4 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)



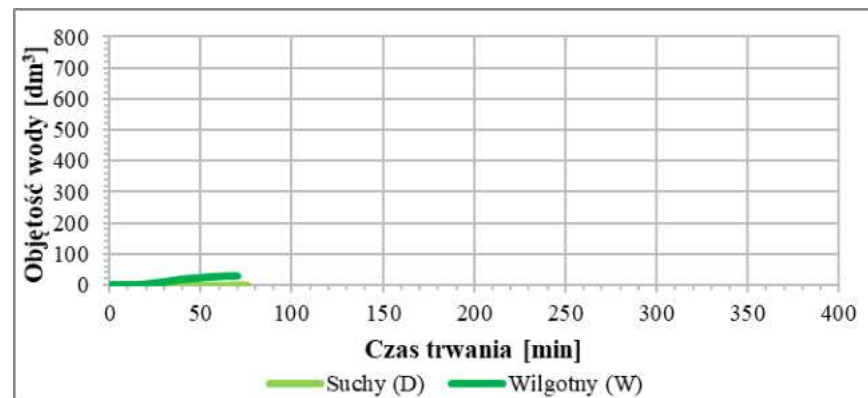
Z3. 46. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu A4 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

UGÓR

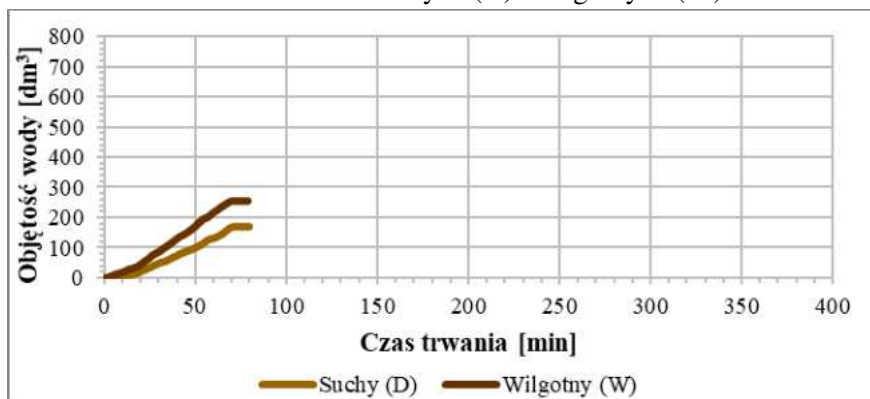


Z3. 47. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu B1 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)

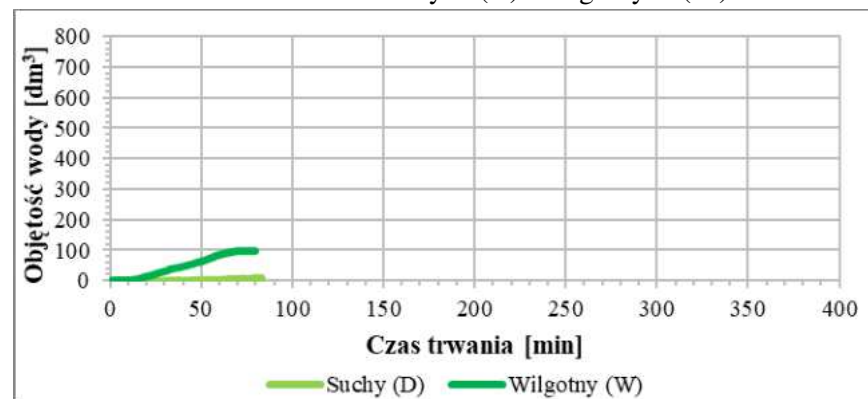
TRAWA



Z3. 48. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu B1 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)



Z3. 49. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na ugorze dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)



Z3. 50. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego na trawie dla opadu B2 w warunkach suchych (D) i wilgotnych (W)