

Paragrafy, meandry i drony: Skomplikowane losy „silnie zmienionej” rzeki.

1. Dylągówka: Gdzie historia spleta się z nurtem.

Dylągowski Potok, na Mapie Podziału Hydrograficznego Polski (MPHP) widniejący pod nazwą Dylągówka, wypływa z północnych zboczy góry Kruszelnica (501 m n.p.m.) i po około 6 km wpada do Sanu. Wzdłuż potoku zlokalizowane są dwie wsie o odmiennej charakterystyce. W górnym biegu znajduje się wieś Dylągowa (gm. Dynów), lokowana w II połowie XV wieku na prawie niemieckim. Pierwsze wzmianki o niej pochodzą z 1484 roku, kiedy to stanowiła część dóbr dynowskich rodu Kmitów. W dalszej części potok przepływa przez wieś Sielnica (gm. Dubiecko), gdzie odkryto ślady wielokulturowej osady obronnej. Najstarszym znaleziskiem jest paleolityczny wiórowiec krzemienisty – prymitywne, lecz precyzyjnie obrobione narzędzie pełniące funkcję noża lub sierpa, reprezentujące kulturę wschodniograwecką. Ciągłość osadnicza na tym terenie, potwierdzona znaleziskami z neolitu i epoki brązu oraz średniowiecznym grodziskiem, dobitnie świadczy o tym, że zasoby wodne Dylągówki od tysięcy lat determinowały warunki życia lokalnych społeczności. Istotną rolę potok odgrywał również w czasach nowożytnych. Już w okresie rozbiorów (Austro-Węgry) został częściowo uregulowany zaparami przeciw-rumowiskowymi. Dokumentacja Nadzoru Wodnego w Dynowie potwierdza, że pierwsze budowle regulacyjne powstały tu w 1914 roku, a ich systematyczna odbudowa i modernizacja trwała w latach 1956–1971. W górnej części potoku w latach 1958–1993 wzniesiono kolejne cztery zapory. O wysokiej kulturze technicznej ówczesnych inżynierów oraz znaczeniu tych inwestycji dla mieszkańców świadczy dbałość o detale: na obiektach zachowały się pamiątkowe tablice, a kilometrą rzeki wyznacza kunsztownie wykonany stalowy słup informacyjny. Mimo niewielkich rozmiarów, ciek ten stanowi fascynujący przykład współistnienia wiekowej historii osadnictwa w dolinie rzeki San z intensywną ingerencją hydrotechniczną w ujarzmienie potoku.



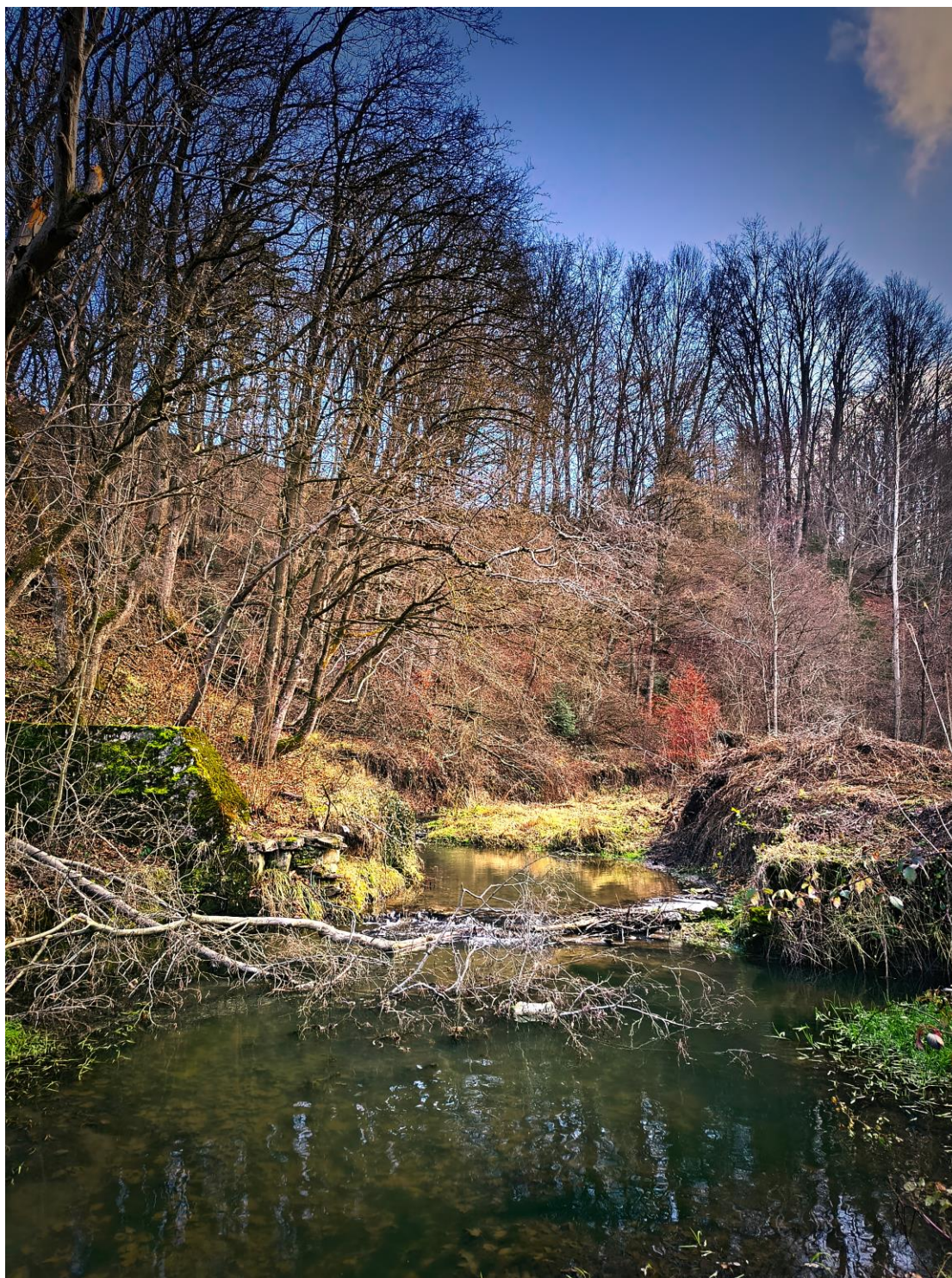
Fot. 1. Tablica pamiątkowa wmurowana w jedną z zapór przeciw-rumowiskowych odbudowaną lub wyremontowaną w 1958 roku.



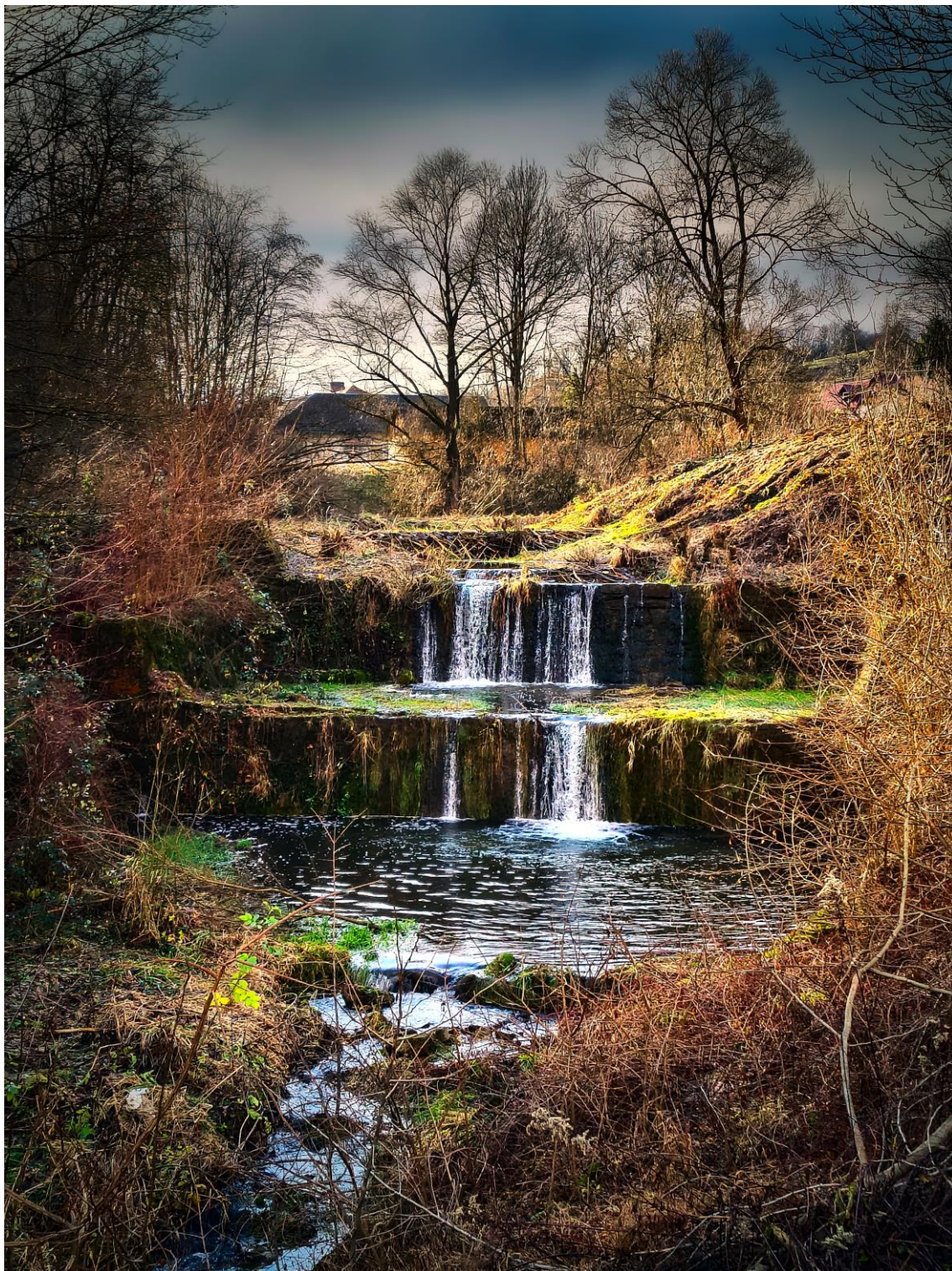
Fot. 2. Ozdobny słup oznaczony cyfrą 3 usytuowany w 3 kilometrze potoku Dylągówka.

Mimo monumentalnej zabudowy regulującej hydrologię niemal całego potoku, w korycie wyraźnie zaznaczają się procesy samorenaturyzacji. Natura sukcesywnie odzyskuje przestrzeń: konstrukcje hydrotechniczne, poddawane nieustannej erozji wodnej oraz naporowi materiału skalnego z fliszowych jarów ulegają powolnej degradacji. Materiał kamienny, niegdyś budujący umocnienia, dziś pokryty jest warstwą mułu i gleby, stając się podłożem dla roślinności pionierskiej. Zarówno dno, jak i same zapory porastają glony, mszaki oraz amfity płożące, co z jednej strony osłabia strukturę budowli a z drugiej

tworzy unikalne habitaty i mikroekosystemy. Znajduje to odzwierciedlenie w fakcie, że dziś kaskady w Sielnicy stanowią malowniczą atrakcję turystyczną, chętnie uwiecznianą na fotografiach.



Fot. 3. Przykład zniszczonej zapory przeciw-rumowiskowej w km 2+241.



Fot. 4. Kaskada zapór w km 1+356 w m. Sielnica.



Fot. 5. „U” kształtna zaporą przeciw-rumowiskowa w km 3+004 w m. Dylągowa.



Fot. 6. Zapora przeciw-rumowiskowa o konstrukcji kratowej w km 3+808 w m. Dylągowa.

2. Paragrafy i meandry administracyjne.

Z perspektywy formalno-prawnej Dylągówka zgodnie z rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 4 listopada 2022 r. w sprawie Planu gospodarowania wodami na obszarze dorzecza Wisły (Dz. U. z 2023 r. poz. 300) stanowi samodzielną, silnie zmienioną jednolitą część wód powierzchniowych (JCWP) o nazwie Dylągówka (kod: RW20000422355929). Według typologii jest to potok lub mała rzeka

fliszowa o charakterze krzemianowym (typ RWf_krz), charakteryzujący się dużym spadkiem podłużnym (ok. 29 promili) i niewielką, lecz w sporej części zalesioną zlewnią o powierzchni ok. 10 km². Całkowita długości potoku według MPHP wynosi 6,391 km a średnia szerokość (6 pomiarów co kilometr) wynosi ok. 2,5 m. Dylągówka posiada jeden wyróżniony w MPHP dopływ o nazwie Dopływ w Roztoce.

Spośród zidentyfikowanych w tej JCWP presji wiodącą jest presja na elementy biologiczne zależne od hydromorfologii – identyfikuje się tu m.in. 35 budowli poprzecznych. Ocena stanu wód z 2022 r. według prowadzonego przez GIOŚ Państwowego Monitoringu Środowiska wskazuje na zły stan wód z powodu umiarkowanego potencjału ekologicznego (elementy fizykochemiczne tj. przewodność w 20 °C > drugiej klasy) oraz stanu chemicznego poniżej dobrego (ze względu na difenyletery bromowane i rtęć identyfikowane w biocie). Tym samym cel środowiskowy, którym jest umiarkowany potencjał ekologiczny i dobry stan chemiczny dla omawianej JCWP uznano za zagrożony ryzykiem nieosiągnięcia. W związku z powyższym, w aktualnie obowiązującym Planie gospodarowania wodami przewidziano dla tej JCWP przeprowadzenie działań renaturyzacyjnych skupiających się głównie na minimalizacji oddziaływania istniejącej zabudowy poprzecznej potoku na elementy biologiczne.

Jednak czy w obecnym stanie zagospodarowania doliny potoku Dylągówka (gęsta zabudowa wsi, przylegająca do koryta potoku droga i cmentarz) możliwe jest udrożnienie lub likwidacja tak wielu zapór przeciw-rumowiskowych i na jaką faktyczną poprawę stanu środowiska możemy wtedy liczyć? Pytanie to dotyka sedna konfliktu między ochroną przeciwpowodziową a wymogami środowiskowymi optującymi za przywracaniem naturalnego charakteru cieków. Likwidacja barier w zlewniach fliszowych, takich jak Dylągówka, wiąże się z ryzykiem gwałtownej erozji wgłębnej i destabilizacją zboczy, co w przeszłości było głównym powodem zabudowy tego potoku. Z drugiej strony, każda taka budowla stanowi barierę nie do przebycia dla organizmów wodnych, przerywając ciągłość ekologiczną rzeki.

Jak wskazują najnowsze wyniki badań GIOŚ z 2022 r. obserwacje hydromorfologiczne prowadzone w oparciu o Hydromorfologiczny Indeks Rzeczny (HIR) na odcinku monitoringowym potoku Dylągówka cechują się wysokim wskaźnikiem równym 0,724, co odpowiada 1 klasie jakości wód. HIR to kluczowy parametr wykorzystywany w ocenie stanu lub potencjału ekologicznego cieków naturalnych. Pozwala on obiektywnie ocenić zróżnicowanie morfologiczne koryta oraz stopień jego przekształcenia przez działalność człowieka, np. wskutek regulacji czy wznoszenia obiektów hydrotechnicznych. Wysoki wynik HIR sugeruje, że mimo obecności barier, potok zachował (albo z czasem wytworzył) wiele cech naturalnych, takich jak zróżnicowane substraty dna czy naturalne formy brzegowe. Wyniki te oraz wysokie oceny elementów biologicznych zależnych od hydromorfologii jak makrobezkręgowce bentosowe (1 klasa) oraz ichtiofauna (1 klasa EFI+_PL = 0,835) spowodowały, iż w trakcie przeglądu i aktualizacji silnie zmienionych i sztucznych części wód, realizowanego na potrzeby opracowania III aktualizacji Planów gospodarowania wodami, Dylągówka otrzymała w procesie screeningu szansę na powrót do statusu naturalnej części wód. Byłby to precedens pokazujący, że procesy samorenaturyzacji mogą być silniejsze niż techniczna antropopresja. Niemniej jednak, uwzględniając stopień zabudowy potoku oraz kluczową funkcję przeciwoerozyjną, jaką pełnią te budowle dla bezpieczeństwa infrastruktury i okolicznych miejscowości, ostatecznie podjęto ostrożną decyzję. Dylągówka, pomimo wyraźnych kontrastów między technicznym przekształceniem cieku a bardzo dobrymi wynikami badań biologicznych, zachowała na kolejny cykl planistyczny status silnie zmienionej części wód (SZCW).

Sytuacja ta pozostawiła jednak wiele pytań i wątpliwości, które należało rozwiązać bezpośrednio w terenie, przeprowadzając szczegółową inwentaryzację potoku oraz porównawcze badania HIR. Głównym problemem badawczym stała się weryfikacja, czy punktowy monitoring GIOŚ rzetelnie oddaje stan całego, sześciokilometrowego cieku, czy też jest jedynie optymistyczną enklawą. Zadanie to stało się również świetną okazją do przetestowania i porównania tradycyjnych metod przeglądów

rzek z nowoczesnymi technologiami opartymi na bezzałogowych statkach powietrznych (dronach) wyposażonych w różnorodne sensory. Zastosowanie skaningu laserowego (LiDAR) oraz fotogrametrii wysokiej rozdzielczości miało na celu sprawdzenie, czy jesteśmy w stanie zdalnie i precyzyjnie identyfikować bariery na niewielkich ciekach w częściowo zadrzewionych dolinach rzecznych.

3. Misja nad potokiem.

Prace terenowe na całej długości potoku Dylągówka przeprowadzono w dniach 3 i 11 grudnia 2025 r. Głównym celem badań była szczegółowa inwentaryzacja barier oraz weryfikacja stanu hydromorfologicznego cieku przy użyciu metod tradycyjnych i teledetekcyjnych. Przegląd koryta potoku polegał na jego fizycznym przejściu od ujścia aż do źródła oraz precyzyjnym pomiarze i opisanu każdej napotkanej budowli, bariery czy obiektu inżynierskiego. Pomiar wysokości całkowitej budowli oraz wysokości piętrzenia wody (mierzonej od poziomu lustra wody dolnej) dokonywano przy użyciu wyskalowanej tyczki geodezyjnej. Przyjęto restrykcyjną zasadę, według której za odrębny obiekt poprzeczny traktowano każde piętrzenie generowane nawet przez tę samą strukturę. Dla przykładu: zaporę przeciw-rumowiskową wraz ze stopniem stabilizującym na końcu jej niecki wypadowej były klasyfikowane i ewidencjonowane jako dwa niezależne obiekty piętrzące, co pozwoliło na rzetelne oddanie stopnia fragmentacji ekosystemu. Lokalizację budowli wraz z pomierzonymi parametrami nanoszono w czasie rzeczywistym w aplikacji QField, zainstalowanej na urządzeniach mobilnych wyposażonych w moduły GPS. Umożliwiło to późniejszą szybką integrację zebranych danych z systemem prowadzonych baz przestrzennych (HYMO2). Ponadto na dwóch odrębnych odcinkach badawczych – z których jeden wyznaczono bezpośrednio w punkcie monitoringowym GIOŚ – zebrano dane zgodnie z metodyką opisaną w „Podręczniku obserwacji hydromorfologicznych elementów oceny stanu ekologicznego wód płynących” (Szoszkiewicz K. i in., 2017), celem późniejszego obliczenia wskaźnika HIR. Badania te objęły ocenę takich parametrów jak zróżnicowanie profilu poprzecznego koryta, struktura substratu dna oraz zagospodarowanie doliny.

Równoległe do prac naziemnych przeprowadzono zaawansowaną misję lotniczą. Do zebrania danych z powietrza wykorzystano drona DJI Matrice 300 RTK – platformę cechującą się wysoką stabilnością lotu i precyzją pozycjonowania dzięki technologii RTK. Dron został wyposażony w pełnoklatkową kamerę RGB DJI Zenmuse P1 do fotogrametrii oraz skaner laserowy LiDAR RIEGL miniVUX-2UAV. Zastosowanie dwóch różnych sensorów miało na celu porównanie skuteczności wykrywania barier w trudnych warunkach terenowych. Ze względu na potrzebę demontażu części osprzętu drona w celu instalacji skanera LiDAR prace podzielono na etapy: nalot fotogrametryczny wykonano 3 grudnia 2025 r., korzystając z optymalnych warunków oświetleniowych, natomiast skan laserowy zrealizowano przy okazji kolejnej wizyty w terenie. Dzięki takiemu podejściu uzyskano kompleksowy obraz cyfrowy potoku wraz z fragmentem doliny rzecznej, łączący wysokorozdzielczą ortomozaikę z precyzyjną chmurą punktów, zdolną do zobrazowania powierzchni terenu nawet pod strukturą koron drzew i odwzorowania faktycznej rzeźby koryta.

Nalot fotogrametryczny z wykorzystaniem kamery DJI Zenmuse P1 zrealizowano w czterech szeregach na wysokości 70 m, przy zachowaniu 70-procentowego pokrycia poprzecznego oraz 80-procentowego pokrycia podłużnego zdjęć, co było niezbędne do poprawnej rekonstrukcji gęstej chmury punktów w trudnym terenie. W trakcie misji wykonano 3043 zdjęcia o łącznej objętości 53 GB. Po obróbce zebranych danych w dedykowanym oprogramowaniu otrzymano ortomozaikę przedstawiającą dolinę rzeczna na szerokości ok. 200 m, charakteryzującą się niezwykle wysoką rozdzielczością piksela terenowego (GSD) na poziomie 0,008 m. Proces generowania produktów końcowych był niezwykle wymagający sprzętowo – pliki projektowe zajęły dodatkowe 105 GB pamięci dyskowej. Na potrzeby dalszych analiz przestrzennych w środowisku QGIS wygenerowano zoptymalizowaną ortomozaikę oraz Cyfrowy Model Pokrycia Terenu (DSM/DEM) o rozdzielczości 0,1 m (pliki o rozmiarach odpowiednio

325 MB i 535 MB). Pozwoliło to na płynną pracę z danymi przy zachowaniu szczegółowości pozwalającej na identyfikację drobnych elementów terenu. Całość opracowania wykonano w państwowym układzie współrzędnych prostokątnych płaskich PL-1992, przyjmując za osnowę wysokościową model geoidy Amsterdam.



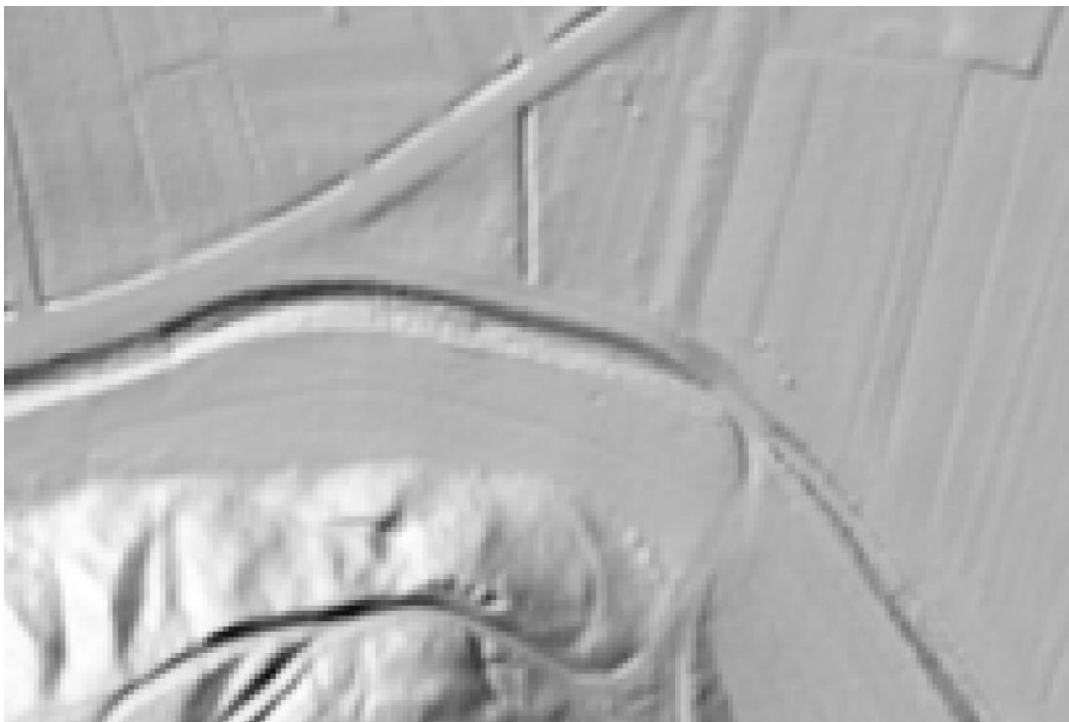
Ryc. 1. Fragment ortomozaiki o rozdzielczości piksela terenowego 0,1 m (km ok. 0+400).

Nalot z wykorzystaniem skanera LiDAR RIEGL miniVUX-2UAV wykonano jednym przelotem w osi potoku na wysokości 80 m. W przeciwieństwie do fotogrametrii skanowanie laserowe pozwoliło na rejestrację wielu odbić (do 5), co umożliwiło odfiltrowanie roślinności i dotarcie wiązki lasera do samego dna doliny. Surowe dane zebrane w terenie zajmowały 2,2 GB. Po procesie klasyfikacji chmury punktów i obróbce w dedykowanym oprogramowaniu (gdzie projekt urósł o dodatkowe 13,4 GB) wygenerowano Numeryczny Model Terenu (NMT) o rozdzielczości piksela 0,5 m (150 MB). Mimo mniejszej rozdzielczości w porównaniu do modelu fotogrametrycznego, model LiDAR odwzorowywał dolinę rzeczną na szerokości ok. 300 m (o 100 m więcej niż fotogrametria). Prace obliczeniowe również prowadzono w układzie PL-1992 w oparciu o geoidę Amsterdam, zapewniając pełną spójność przestrzenną obu zestawów danych.



Ryc. 2. Fragment NMT ze skanu LiDAR o rozdzielczości piksela terenowego 0,5 m (km ok. 0+400).

Dla porównania możliwości interpretacyjnych i weryfikacji dokładności danych pozyskanych z niskiego pułapu wykorzystano również archiwalny NMT z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii (GUGiK). Dla zlewni Dylągówki pozyskano dane ze skaningu lotniczego (ALS) z maja 2024 r. o rozdzielczości 1 m. Zestawienie to miało na celu sprawdzenie, czy ogólnodostępne dane publiczne są wystarczające do inwentaryzacji małych budowli hydrotechnicznych, czy też niezbędne jest każdorazowe wykonywanie dedykowanych nalotów o wyższej gęstości chmury punktów.



Ryc. 3. Fragment NMT GUGiK o rozdzielczości piksela terenowego 1 m (km ok. 0+400).

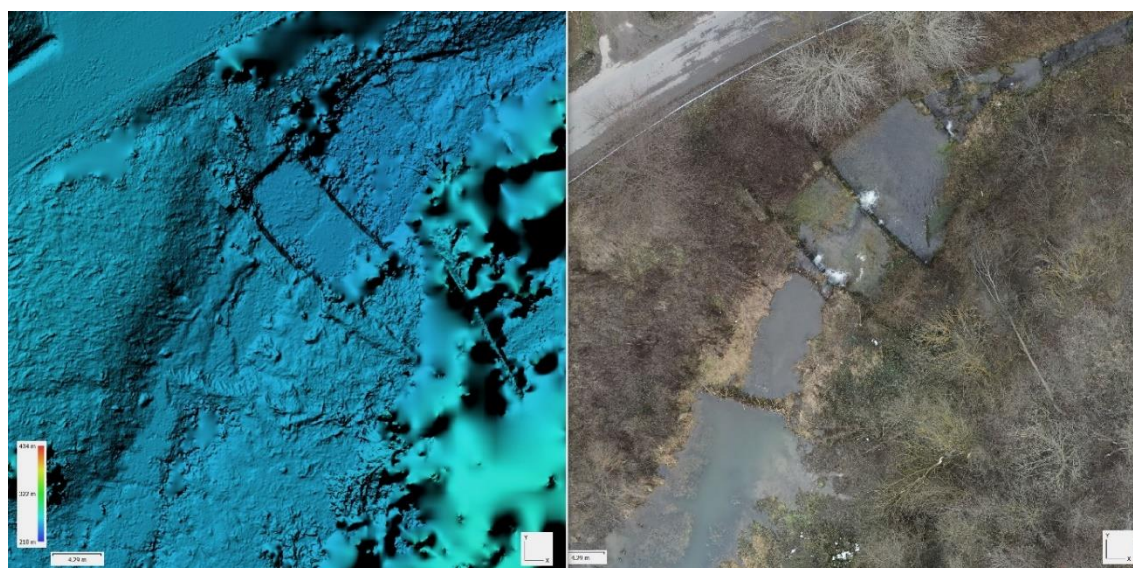
4. Rzeka cyfrowa czy analogowa: Co widzi laser, a co ludzkie oko?

Po zakończeniu fazy terenowej nadszedł czas na intensywne prace kameralne i procesowanie zebranych danych przestrzennych. Podsumowanie i uporządkowanie informacji pozwoliło na wyodrębnienie w sumie 60 obiektów piętrzących. Wynik ten rzuca nowe światło na stopień antropogenicznego przekształcenia Dylągówki, gdyż inwentaryzacja wykazała niemal dwukrotnie więcej barier, niż zakładały dotychczasowe bazy danych. Na tę liczbę złożyło się 55 różnego rodzaju budowli poprzecznych (progi, stopnie, rampy kamienne, zapory przeciw-rumowiskowe), 3 brody oraz 2 tamy bobrowe, które mimo swojego naturalnego pochodzenia, pełnią analogiczną funkcję hydrologiczną jak budowle techniczne.

Analiza wysokorozdzielczej ortomozaiki oraz modelu DEM (Cyfrowego Modelu Pokrycia Terenu) pozwoliła na poprawną identyfikację 51 obiektów poprzecznych. Warto zaznaczyć, że skuteczność detekcji barier metodą fotogrametryczną wyniosła zatem 85%. Pomiar wysokości piętrzenia wody udało się przeprowadzić dla 49 obiektów na podstawie różnicy wysokości odczytanej z modelu DEM. Wykrywalność obiektów była determinowana głównie przez ich lokalizację oraz strukturę szaty roślinnej w momencie wykonywania nalotu. Obiekty znajdujące się pod zwartą koroną drzew lub krzewów na tak małym i wąskim potoku są po prostu niezauważalne z powietrza, a sam pomiar wysokości piętrzenia z modelu DEM jest uniemożliwiony lub całkowicie zaburzony przez takie struktury. Kluczowym elementem analizy było porównanie dokładności pomiarów zdalnych z wynikami uzyskanymi w terenie. Dla obiektów, dla których możliwy był pomiar wysokości piętrzenia wody, średni bezwzględny błąd wyniósł 25%. Oznacza to, że w przypadku pojedynczej budowli różnica między modelem a rzeczywistością mogła być znacząca. Jednak suma względnych odchyłek procentowych dla całej populacji pomiarów wyniosła tylko - 3%. Taki rozkład błędów sugeruje, że odchylenia mają charakter losowy i wzajemnie się znoszą, co przekłada się na bardzo dużą globalną zgodność pomiarów wykonanych na podstawie nalotu fotogrametrycznego z pomiarami rzeczywistymi. Z punktu widzenia planowania strategicznego dla całej JCWP dane te są zatem wysoce wiarygodne, mimo drobnych niedokładności przy poszczególnych obiektach.

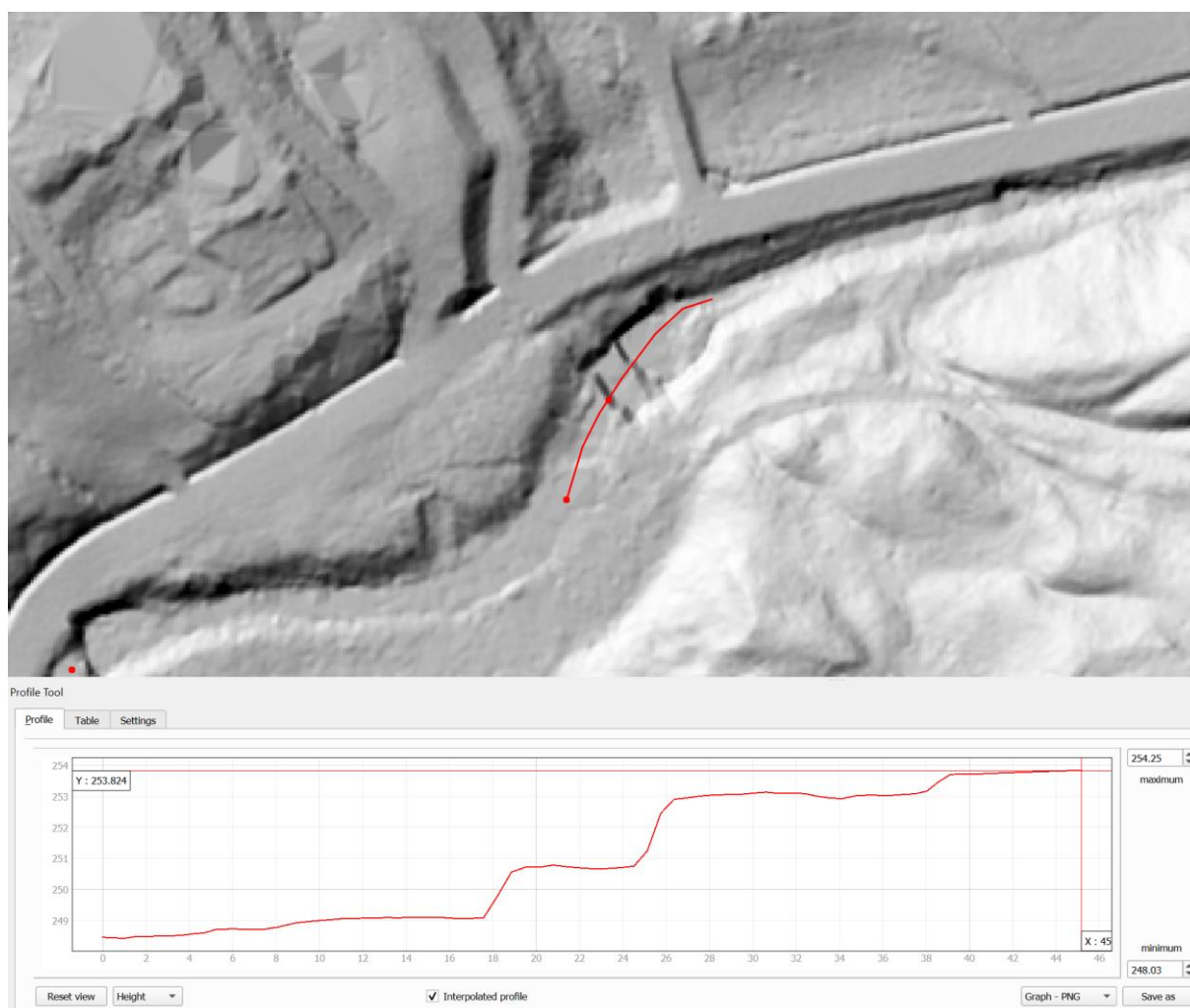


Ryc. 4. Fragment ortomozaiki z widocznymi budowlami i tamą bobrową oraz przekrój podłużny wykonany na bazie modelu DEM (km ok. 1+350).

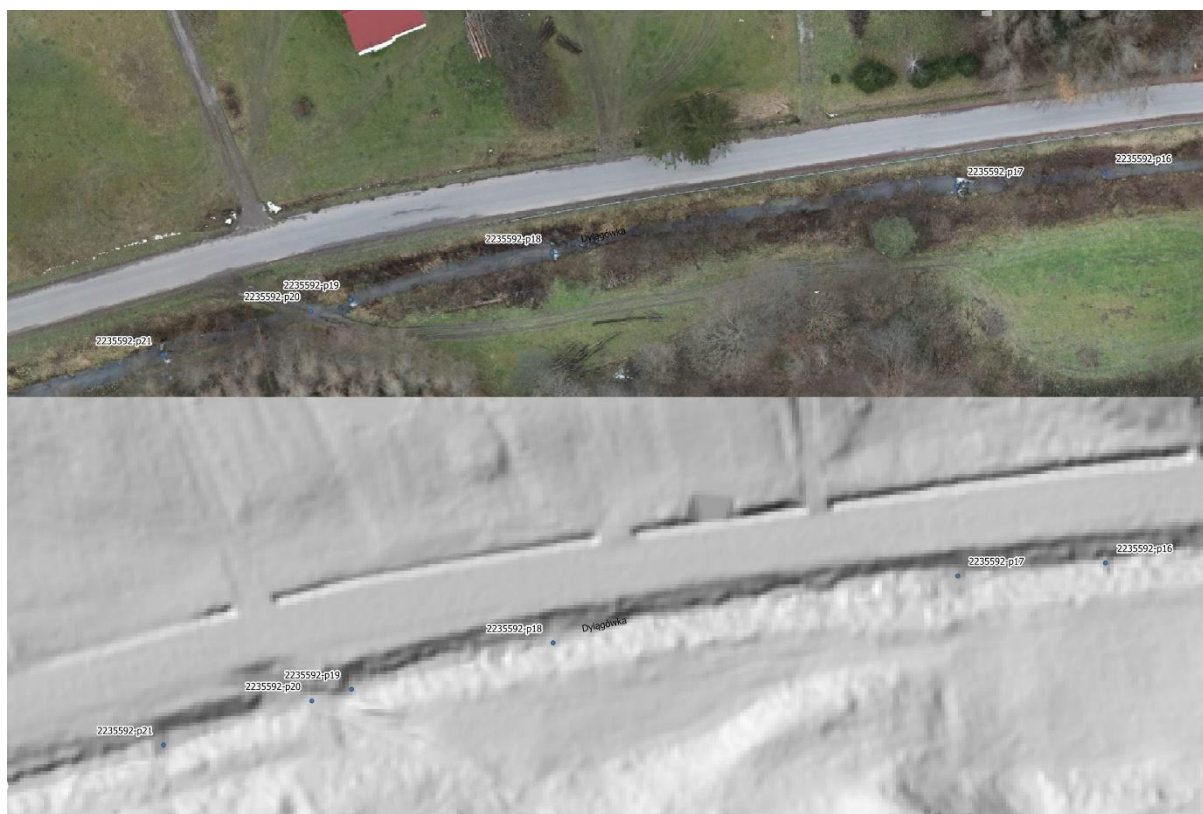


Ryc. 5. Zbliżenie na fragment ortomozaiki i model DEM z powyższej ryciny – wyraźnie ukazujące zróżnicowaną powierzchnię modelu DEM nawet na pozornie płaskiej tafli wody (km ok. 1+350).

Analogiczną analizę w zakresie wykrywalności obiektów oraz pomiarów ich wysokości piętrzenia przeprowadzono na podstawie NMT wygenerowanego z chmury punktów uzyskanej skanerem laserowym LiDAR. W tym przypadku na surowym zobrazowaniu udało się zidentyfikować jedynie 36 obiektów poprzecznych. Niska skuteczność detekcji wizualnej (zaledwie 60%) wynika bezpośrednio ze specyfiki interpretacji modeli rastrowych oraz przyjętej standaryzacji parametrów cieniowania. Manipulując kątami padania światła (azymutem i wysokością słońca nad horyzontem) można wprowadzić uwypuklić krawędzie niektórych budowli, jednak dzieje się to kosztem „ukrycia” innych, które stają się nieczytelne w cieniu topograficznym. Warto jednak podkreślić kluczową przewagę tej technologii nad fotogrametrią – dane LiDAR dzięki zdolności penetracji wiązki przez luki i odbicia w okapie drzew i krzewów technicznie umożliwiały dokonanie pomiarów wszystkich 60 obiektów – nawet tych ukrytych pod gęstym zwarciem drzew. Warunkiem koniecznym była jednak uprzednia znajomość ich lokalizacji pozyskana z wizji terenowej. Dla 36 pierwotnie zidentyfikowanych obiektów średni błąd bezwzględny wyniósł 25%, jednak suma względnych odchyłek osiągnęła aż 355%.



Ryc. 6. Fragment NMT LiDAR z widocznymi budowlami i tamą bobrową oraz przekrój podłużny (km ok. 1+350).



Ryc. 7. Fragment NMT LiDAR z barierami niezauważalnymi na tym zobrazowaniu (p16-p19) oraz widocznymi (p20, p21) w porównaniu z tym samym fragmentem ortomozaiki (wszystkie obiekty zauważalne).

Dla pełnego zobrazowania potencjału i ryzyk związanych z tą technologią analizę rozszerzono na cały zbiór 60 obiektów. Średni błąd bezwzględny wzrósł do 30%, natomiast suma względnych odchyłek procentowych osiągnęła drastyczny poziom 580%. Tak wysoka wartość dodatnia wskazuje na systematyczne i znaczące zawyżanie wyników przez model LiDAR. Przykładowo, przy niewielkiej budowli o rzeczywistej wysokości piętrzenia 0,1 m, LiDAR wskazał wartość 0,25 m (błąd rzędu 150%). Szczególnie interesującym przypadkiem jest obiekt ID 2235592-p10, gdzie odnotowano skrajną rozbieżność: model fotogrametryczny (DEM) zawyżył wynik o 10%, podczas gdy LiDAR zaniżył go aż o 70%. Przypadek ten doskonale ilustruje fundamentalną słabość klasycznego skaningu laserowego w hydrografii: zjawisko pochłaniania (absorpcji) wiązki lasera podczerwonego przez wodę. Ponieważ lustro wody nie odbija wystarczającej liczby impulsów, algorytmy interpolujące NMT „szukają” punktów podparcia na najbliższych stałych elementach. W efekcie rzędna zwierciadła wody zostaje często sztucznie podciągnięta do wysokości sąsiednich obiektów, takich jak dolna część skarpy, wystające głazy czy gęste roślinność nadbrzeżne. To wypaczenie obrazu powoduje, że odległość pionowa między wodą górną a dolną zostaje zafałszowana. Dla porównania, w fotogrametrii powierzchnia wody jest odtwarzana jako jednorodna płaszczyzna bez tak drastycznych zniekształceń, co czyni ją paradoksalnie bardziej wiarygodną w pomiarze samego lustra wody na otwartej przestrzeni.



Ryc. 8. Przykład opisanej w tekście znacznej odchyłki pomiarów z wykorzystaniem NMT LiDAR (linia czerwona) a modelem DEM (linia niebieska).

Na załączonej grafice, prezentującej przekrój podłużny koryta, widać wyraźnie, że wartość wysokości bezwzględnej odczytana z NMT LiDAR dla wody dolnej jest znacznie większa niż ta odczytana z modelu DEM. Zjawisko to potwierdza wcześniejszą tezę o błędzie systematycznym LiDAR-u w obszarach wodnych: brak odbić od lustra wody powoduje, że model wiąże rzędną z najbliższymi punktami stałymi na brzegu, co sztucznie wypłyca koryto na wykresie. Wartości dla wody górnej (powyżej spiętrzenia) są z kolei porównywalne w obu modelach, co wynika z większej i bardziej stabilnej powierzchni odbicia. Jednak na fragmencie przekroju po lewej stronie widać istotną różnicę w interpretacji otoczenia: model DEM odzwierciedlił również gałęzie zwisające bezpośrednio nad ciekiem, traktując je jako najwyższy punkt pokrycia terenu. Powoduje to powstawanie swoistych pików na przekroju fotogrametrycznym, które mogą błędnie sugerować obecność przeszkód w samym korycie. Dzięki zaawansowanym algorytmom klasyfikacji chmury punktów, obróbka danych LiDAR pozwala na precyzyjne wyselekcjonowanie punktów obrazujących wyłącznie rzeczywistą powierzchnię terenu (ground). Dzięki funkcji wielokrotnego odbicia, laser odzwierciedla to co znajduje się pod roślinnością, co pozwala na numeryczne usunięcie gałęzi z profilu i uzyskanie czystej linii gruntu. Jest to kluczowa przewaga LiDAR-u przy inwentaryzacji obiektów w gęstych zaroślach, mimo wspomnianych wcześniej problemów z odwzorowaniem samej tafli wody. Podsumowując analizę wizualną, model DEM lepiej oddaje geometrię płaszczyzn wodnych na otwartych odcinkach, natomiast NMT LiDAR jest niezastąpiony do analizy morfologii brzegów i skarp ukrytych pod roślinnością, o ile zachowamy krytycyzm wobec prezentowanych przez niego rzędnych dna.

Wykorzystanie wysokorozdzielczego modelu NMT LiDAR umożliwiło również wykonanie dodatkowej analizy jaką było przeprowadzenie rewizji przebiegu osi koryta Dylągówki. Dzięki zdolności wiązki lasera do penetracji gęstej szaty roślinnej i rejestracji wielu odbić, uzyskano rzeczywisty obraz morfologii dna doliny, identyfikując mikroformy terenowe i meandry ukryte pod koronami drzew. Przeprowadzona w ten sposób korekta trasy wykazała, że rzeczywista długość cieku wynosi 6578 m, co w porównaniu do danych z MPHP oznacza przyrost o 186 m (ok. 3 %). Dla tak małego potoku nie jest to spektakularna

wartość, jednak na większych rzekach może ona odgrywać istotną rolę, gdyż poprawnie wyznaczona geometria koryta ma fundamentalne znaczenie dla poprawności wielu analiz hydrologicznych i morfometrycznych. Długość rzeki jest parametrem bazowym do wyliczeń np. wskaźnika krętości czy rzeczywistych spadków podłużnych koryta. Ponadto, zweryfikowany przebieg osi pozwala na budowę bardziej wiarygodnych modeli hydraulicznych, lepiej oddających dynamikę przepływu wody i czas retencji korytowej, co w skali całej zlewni znacząco podnosi jakość planowanych działań z zakresu gospodarki wodnej.

Przeprowadzona dodatkowo wielokryterialna analiza porównawcza NMT, pochodzącego z zasobów GUGiK oraz danych z dedykowanego skaningu LiDAR, wykazała istotne podobieństwa w ogólnej charakterystyce tych zbiorów. W zakresie detekcji większych barier stałych (>1 m), takich jak stopnie wodne czy jazy, dane ogólnodostępne wykazują wykrywalność terenową porównywalną do dedykowanego nalogu LiDAR. Kluczowa różnica pojawia się jednak w przypadku obiektów o charakterze efemerycznym lub mogących dynamicznie zmieniać swoją lokalizację, takich jak tamy bobrowe, odsypiska lub inne zmienne elementy morfologiczne koryta rzeki. Dane w zasobach GUGiK nie zawierają rzeczywistego zobrazowania tych elementów, co wynika bezpośrednio ze zbyt dynamicznego charakteru tych obiektów. Powstają one, ulegają przemieszczeniu lub destrukcji w cyklach znacznie krótszych niż interwały aktualizacji państwowego zasobu geodezyjnego. Analiza precyzji pomiarowej ujawniła poważne ryzyka związane z bezkrytycznym przyjmowaniem rzędnych obiektów hydrotechnicznych z modeli LiDAR. Dane z NMT GUGiK wykazały, podobnie jak dane z dedykowanego skaningu, sumaryczne zawyżenie wyników – suma bezwzględnych odchyłek wyniosła 540%, a średni błąd względny 32%. Tak wysokie wartości potwierdzają, że błędy pomiarowe uzyskane w technologii LiDAR nie znoszą się wzajemnie, lecz mają charakter systematyczny. Największy odnotowany błąd pomiaru wysokości niewielkiego spiętrzenia (o rzeczywistej wysokości 0,2 m) wyniósł aż 350%, co w praktyce może prowadzić do całkowicie błędnych wniosków dotyczących skali fragmentacji rzeki przy wykorzystaniu jedynie danych z GUGiK.

W poniższej tabeli przedstawiono syntetyczne zestawienie analiz wykonanych w oparciu o różne metody badawcze wraz z podsumowaniem czasowej pracochłonności każdej z nich. Zestawienie to pozwala na obiektywną ocenę stosunku jakości uzyskanych danych do nakładów czasu i środków niezbędnych na ich pozyskanie. Dodatkowo do porównania wprowadzono metodę hybrydową (Fotogrametria + LiDAR). Decyzja ta wynika z faktu, iż w obliczu dynamicznego rozwoju sektora systemów bezzałogowych statków powietrznych (SBSP) na rynku coraz częściej pojawiają się zintegrowane systemy pomiarowe łączące oba sensory w jednej głowicy (np. DJI Zenmuse L2/L3 czy CHCNAV AlphaAir 10). Kluczowa przewaga takich rozwiązań nad zestawem sensorów montowanych zamiennie – jak miało to miejsce w niniejszym przypadku – polega na drastycznej optymalizacji logistyki terenowej. Zamiast dwóch osobnych misji wykonuje się jeden nalot, w trakcie którego jednocześnie rejestrowana jest wysokorozdzielcza dokumentacja zdjęciowa oraz precyzyjna chmura punktów LiDAR. Dzięki temu uzyskujemy dane o idealnej spójności czasowej i przestrzennej, zdjęcia są automatycznie nakładane na chmurę punktów (tzw. kolorowanie chmury), co eliminuje błędy przesunięć między ortomosaiką a modelem terenu. W kontekście inwentaryzacji rzek metoda hybrydowa wydaje się najbardziej kompletnym narzędziem inwentaryzacyjnym.

	Wizja terenowa	Nalot fotogrametryczny	Nalot LiDAR	Hybryda foto/LiDAR
Sumaryczna liczba możliwych do identyfikacji budowli	60	51 (85%)	36 (60%)	54 (90%)
Liczba budowli, dla których możliwy był pomiar wysokości piętrzenia wody	60	49 pomiar możliwy jedynie poza zadrzewieniami	36 dysponując lokalizacją budowli pomiar możliwy dla 60 obiektów	54 dysponując lokalizacją budowli pomiar możliwy dla 60 obiektów
Średni błąd procentowy (+/-) pomiaru wysokości piętrzenia wody	0 %	25%	30%	26%
Suma względnych odchyłek procentowych wykonanych pomiarów wysokości	0 %	- 3%	355% dla 36 zidentyfikowanych obiektów 580% dla wszystkich obiektów	380% dla wszystkich obiektów
Szerokość odwzorowania doliny rzecznej	w linii przemarszu	200 m	300 m	200 m
Ocena stanu technicznego	tak	nie	nie	nie
Czasochłonność metody - teren	7 h pracy 2-3 osób	2 h pracy drona	0,5 h pracy drona	b.d.
Czasochłonność metody – prace kameralne	2 h	2 h – nie licząc czasu obróbki danych	2 h – nie licząc czasu obróbki danych	b.d
Zużycie pamięci dyskowej	fot + shp - 500 MB	pliki - 158 GB orto - 325 MB DEM - 535 MB	pliki - 16 GB NMT - 150 MB	b.d.

5. Ekologiczny kompromis: Czy Dylągówka jest naprawdę dzika?

Kluczowym zagadnieniem badawczym pozostaje kwestia, w jaki sposób identyfikacja i precyzyjne opisanie wszystkich budowli poprzecznych wpływa na realną ocenę przekształceń hydromorfologicznych potoku w kontekście działań naprawczych zawartych w Planach gospodarowania wodami. Odpowiedź na to pytanie ma fundamentalne znaczenie, gdyż ciągłość podłużna cieku jest jednym z głównych elementów warunkujących dobry stan/potencjał ekologiczny JCWP. W niniejszej analizie wyliczenia HIR poprzedzono sporządzeniem protokołu kameralnego dla całej JCWP Dylągówka. Prace te oparto na szczegółowej interpretacji ortofotomap, ogólnodostępnych danych GIS oraz innych materiałów źródłowych. Na tej podstawie do szczegółowych prac terenowych wytypowano dwa odcinki badawcze o długości 500 m każdy:

- odcinek nr 1: zlokalizowany w dolnej części potoku, charakteryzujący się silniejszą antropopresją, przejawiającą się m.in. w intensywnej zabudowie brzegów oraz modyfikacjach profilu podłużnego,
- odcinek nr 2: wyznaczony w środkowej części biegu, obejmujący punkt monitoringowy Państwowego Monitoringu Środowiska (nr PL01S1601_3657 Dylągówka-Sielnica w km 2+193).

W każdym z tych odcinków, w ramach szczegółowej wizji terenowej, dokonano oceny parametrów koryta w 10 profilach kontrolnych, a następnie przeprowadzono ocenę syntetyczną dla całego odcinka. Metodyka ta pozwala na uchwycenie zmienności morfologicznej w skali mikro oraz ocenę stopnia przekształcenia całego odcinka. Obliczony zgodnie z metodyką HIR dla odcinka nr 1 wyniósł 0,35, a dla odcinka nr 2 – 0,6. Warto podkreślić, że istotną rolę w procesie ustalania ostatecznej klasy obserwacji hydromorfologicznej odgrywa współczynnik korekty klasy stanu hydromorfologicznego (Wk), obliczany w ramach prac kameralnych na poziomie całej JCWP. Współczynnik ten służy do zniwelowania błędu wynikającego z punktowej oceny cieków i odnosi ją do kontekstu całego obszaru JCWP, uwzględniając presję i przekształcenia, które mogą nie występować bezpośrednio w 500-metrowym odcinku badawczym, ale oddziałują na system rzeczny w większej skali. Dla zlewni potoku Dylągówka Wk wyliczony został na poziomie 0,57, co sprawia, iż pozostaje on neutralny dla końcowej oceny – nie zawyża on ani nie obniża ostatecznej klasy elementów hydromorfologicznych. W efekcie ocena końcowa dla odcinka nr 1 odpowiadała 5 klasie (stan zły) a dla odcinka nr 2 – 3 klasie (stan umiarkowany).

Analizując wszystkie składowe wpływające na wartość wskaźnika HIR można dojść do wniosku, iż najistotniejszym parametrem w zlewniach rzek uregulowanych i zabudowanych budowlami poprzecznymi jest Wskaźnik Przekształcenia Hydromorfologii na podstawie oceny terenowej (WPHT). Opisuje on skalę oddziaływania budowli hydrotechnicznych znajdujących się bezpośrednio w odcinku badawczym. Tym samym lokalizacja 500-metrowego odcinka w danej JCWP jest kluczowa przy wskaźnikowym scharakteryzowaniu stopnia przekształcenia całej zlewni. Wykazana różnica między porównawczym odcinkiem nr 1 i nr 2 wynika właśnie z sumarycznej wartości stopnia oddziaływania na środowisko przypisanego każdej z budowli występującej na danym odcinku. Należy zauważyć, że nawet pojedynczy stopień wodny o znacznej wysokości może drastycznie obniżyć ocenę całego fragmentu cieków. Zauważono również, że wspomniany wcześniej współczynnik korekty Wk istotnie zależy od Parametru Przekształcenia Hydromorfologii w zakresie budowli piętrzących (PPH2), jak i od Parametru Różnorodności Hydromorfologicznej w zakresie użytkowania terenu doliny rzeki (PRH4). Ten drugi element, skupiający się na heterogeniczności otoczenia rzeki, budzi najwięcej kontrowersji metodologicznych, gdyż wydaje się być parametrem wysoce subiektywnym, zależnym od interpretacji badacza dokonującego analizy map, zwłaszcza w kwestii rozróżniania seminaturalnych terenów otwartych od gruntów o niskiej intensywności użytkowania rolniczego.

Ostatecznie do analizy porównawczej otrzymanych wyników z oficjalnymi danymi GIOŚ przyjęto wyliczenia dla odcinka nr 2, zakładając, iż jest on najbardziej zbliżony lokalizacją do odcinka badawczego GIOŚ (zawiera punkt monitoringowy). Przyjęcie konkretnego roku odniesienia dla badań GIOŚ nie było jednak oczywiste, gdyż najnowsze wyniki z 2022 r. znacząco odbiegają od tych z 2019 r., zarówno w zakresie samej wartości HIR, jak i elementów biologicznych zależnych od hydromorfologii. Najistotniejszą różnicę zauważono w zakresie ichtiofauny, która w 2019 r. otrzymała 4 klasę jakości (determinując tym samym 4 klasę elementów biologicznych), natomiast w 2022 r. uzyskała już klasę 2. Taka poprawa stanu ichtiofauny przy jednoczesnym braku realizacji w tym okresie działań renaturyzacyjnych jest zastanawiająca, gdyż element ten jest ściśle zależny od przekształceń hydromorfologicznych, w tym w szczególności od istniejących budowli poprzecznych, stanowiących fizyczne bariery dla migracji/powrotu ryb w górę rzeki. Z kolei wartość wskaźnika HIR w danych GIOŚ w 2019 r. wynosiła 0,615, a w 2022 r. wzrosła do 0,724. Obliczony przez nas dla odcinka nr 2 wskaźnik HIR na poziomie 0,6 jest wyraźnie zbliżony z wyliczeniami GIOŚ z 2019 roku, natomiast znacznie odstaje od wartości z 2022 r. Ponadto w obu przypadkach ostateczna klasa stanu elementów hydromorfologicznych została "podciągnięta" przez GIOŚ o jedną pozycję w górę dzięki wysokiemu współczynnikowi korekty Wk (równym 0,75) i w 2019 r. otrzymała wartość 2 klasy (stan dobry),

a w 2022 r. 1 klasy (stan bardzo dobry) w stosunku do 3 klasy (stan umiarkowany) wyliczonej w trakcie autorskich badań.

Powyższa analiza porównawcza potwierdza duże uogólnienie metody HIR, której wynik jest w ogromnym stopniu zależny od usytuowania odcinka badawczego w terenie, subiektywnej oceny badaczy w zakresie poszczególnych parametrów oraz jakości i aktualności danych wykorzystywanych na etapie prac kameralnych.

6. Bilans i perspektywy kamiennych budowli.

W świetle szerokiego spektrum zebranych, przeanalizowanych i porównanych danych terenowych należy stwierdzić, iż decyzja o pozostawieniu statusu SZCW Dylągówce była właściwa. Przemawia za tym przede wszystkim wykazany w toku inwentaryzacji stopień antropogenicznego przekształcenia rzeki i całej zlewni. Ze względu na istotną funkcję, jaką pełnią te budowle w procesach przeciwerozwojowych oraz ochrony infrastruktury drogowej, cmentarza i zabudowań mieszkalnych, zaprojektowanie i realizacja działań renaturyzacyjnych muszą zostać przeprowadzone z dużą ostrożnością. Radykalna likwidacja zapór w zlewni fliszowej o tak dużym spadku (ok. 29 promili) wiązałaby się bowiem z nieakceptowalnym ryzykiem gwałtownej erozji wgłębnej i destabilizacji zboczy, co w przeszłości było głównym powodem zabudowy tego potoku. Ponadto działania naprawcze oparte na poprawie parametrów różnorodności hydromorfologicznej występującej w korycie rzeki, a nie na wyburzeniach, będą łatwiej akceptowalne przez lokalną społeczność i uzyskają znacznie wyższy stopień efektywności kosztowej. Zbilansowanie tych dwóch głównych składowych wpływa de facto na skuteczną realizację postanowień Planu gospodarowania wodami, pozwalając na osiągnięcie celu środowiskowego, który wyrażony parametrami monitorowanymi przez GIOŚ (choć dość zmiennymi) jest niemal w zasięgu ręki.

Realizowane przy tej okazji prace z wykorzystaniem SBSP pozwoliły na zgromadzenie cennego materiału badawczego, na bazie którego można formułować dalsze wnioski o wykorzystaniu i efektywności tych technologii przy planowaniu prac utrzymaniowych, działaniach inwestycyjnych, w tym renaturyzacji, czy także budowaniu wiedzy w zakresie możliwości wyznaczenia rzek swobodnie płynących zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie odbudowy zasobów przyrodniczych.

Opracowano w RZGW Rzeszów przez (w kolejności alfabetycznej):

- Edyta Bogdan
- Beata Dybka
- Rafał Ptak
- Magdalena Sztaba