



Naturalne bystrza – ostoje bioróżnorodności: analiza funkcji tarliskowych dla ryb i siedliskowych dla bezkręgowców

Natural riffles – biodiversity havens: analysis of spawning grounds for fish and habitat functions for invertebrates

Michał Bien^{1,2}  Karol Plesiński² 

¹ Okręg Polskiego Związku Wędkarskiego w Kielcach
ul. Warszawska 34a/31, 25-312 Kielce

² Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji
al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków

michalmaciejbien@gmail.com • karol.plesinski@urk.edu.pl (autor korespondencyjny)

Zarys treści. Opracowanie przedstawia wyniki działań wdrożeniowych przeprowadzonych w korycie rzeki Mierzawy, których celem było odtworzenie tarliska dla pstrągów potokowych. Prace poprzedzono szczegółowymi badaniami terenowymi, obejmującymi pomiary hydrodynamiczne oraz pobór próbek osadów dennych, co umożliwiło precyzyjne określenie właściwego uziarnienia i ilości materiału żwirowego potrzebnego do odbudowy tarliska. Po zakończeniu działań przeprowadzono monitoring ekologiczny, obejmujący dalsze pomiary hydrodynamiczne, analizę osadów dennych, inwentaryzację gniazd tarłowych, odłowy ichtiologiczne i pobór makrozoobentosu. Badania wykazały, że zasilenie koryta rzeki materiałem żwirowym spowodowało polepszenie warunków hydrodynamicznych na tarlisku, co znacząco ograniczyło akumulację piasku w osadach żwirowych. Parametry hydrodynamiczne uległy poprawie, a osady denne zawierały mniej piasku, co sprzyjało lepszym warunkom rozrodu pstrągów potokowych. W efekcie, po zakończeniu prac odnotowano większą liczbę gniazd tarłowych, a także większą skuteczność rozrodu. Pomimo, iż odtworzone tarlisko miało służyć pstrągom potokowym, inne gatunki ryb również z niego korzystały.

Słowa kluczowe: tarlisko, gniazdo tarłowe, pstrąg potokowy, warunki hydrodynamiczne, rumowisko żwirowo-kamienne.

Keywords: spawning grounds, spawning nest, brown trout, *Salmo trutta*, hydrodynamic conditions, gravel-stone sediment.

Wstęp

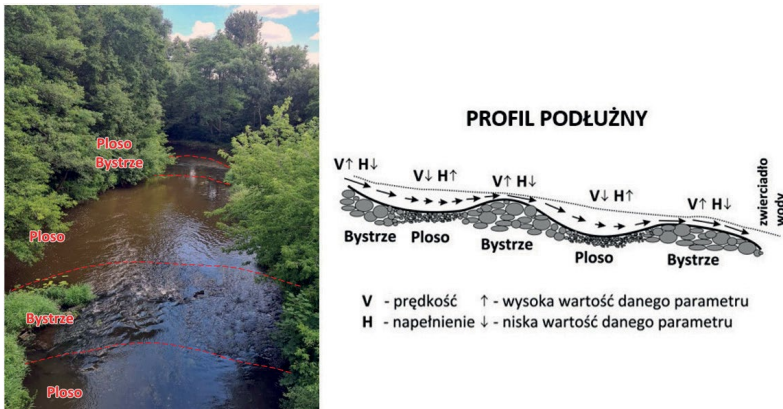
Antropopresja w dolinach rzecznych doprowadziła w ostatnich dekadach do znaczącej degradacji siedlisk ryb łososiowatych. Procesy regulacji koryt, fragmentacja korytarzy ekologicznych oraz zmiany reżimu hydrologicznego i jakości wody negatywnie wpływają na dostępność i jakość siedlisk rozrodczych. W konsekwencji obserwuje się spadek liczebności populacji wielu gatunków ryb, w tym pstrąga potokowego. Renaturyzacja rzek, której przykładem są działania podjęte na rzece Mierzawie, stanowi kluczowe narzędzie w przywracaniu funkcji ekologicznych ekosystemów rzecznych i adaptacji do zmieniających się warunków środowiskowych.

W korytach rzecznych możemy zaobserwować naturalne sekwencje morfologiczne dna w postaci występujących na przemian wyplęceń (nazywanych również szypotami, bystrzami, przemiałami) i przegłębień, nazywanych plosami (ryc. 1) (Witkowski, 2018). Są one formami nierozzerwalnie ze sobą związanymi. Naturalne bystrza powstają w miejscach deponowania rumowiska i formowania się łach korytowych. Charakteryzują się one znacznymi naprężeniami stycznymi (głębokość wody wynosi tu kilku do kilkunastu centymetrów, a spadek jest większy niż średni spadek odcinka rzeki, w której występują omawiane struktury), dużymi prędkościami oraz słabym wysortowaniem ładunku dennego. Z kolei w plosach naprężenia styczne i prędkości są dużo niższe. Materiał jest tutaj lepiej wysortowany, dominują frakcje drobniejsze niż na bystrzach (Radecki-Pawlik, 2010, 2014). Jeśli materiał denny na bystrzach ma odpowiednie uziarnienie, wtedy są to idealne miejsca do składania ikry przez ryby łososiowate. Zatem bystrza stanowią niewrażliwą funkcję biologiczną w korytach rzecznych dla rozmnażania ryb litofilnych (Bień i Plesiński, 2023).

Każdy gatunek ryb litofilnych wymaga specyficznych warunków tarliskowych, ponieważ biologia rozrodu różni się. Niektóre gatunki, np. brzana, rozrzucają na dnie kleistą ikrę, która osadza się między ziarnami żwiru. Natomiast ryby łososiowate zakopują ikrę w żwirze. W tym przypadku wyróżniamy dwie strategie – lipień zakopuje ikrę na danej powierzchni bystrza, bez tworzenia indywidualnych gniazd, natomiast pstrąg potokowy, będąc gatunkiem terytorialnym, wybiera i broni najlepsze miejsca, w których usypuje żwirowe gniazdo, gdzie składa ikrę (Backiel, 1964).

Wybór miejsca na tarlisko zależy od czynników takich jak: prędkość wody, napełnienie, spadek dna rzecznej oraz frakcja osadów dennych. Parametry te są istotne dla prawidłowej inkubacji ikry, która u pstrąga potokowego trwa około 400 stopniocdni. Odpowiednia frakcja rumowiska umożliwia właściwe umieszczenie ikry między ziarnami żwiru oraz zapewnia jej właściwe optukiwanie i wymianę gazową podczas inkubacji. Ważna jest nie tylko wielkość ziaren rumowiska, ale także ich kształt. Ziarna o ostrych krawędziach mogą prowadzić do zranień samic ryb podczas budowy gniazda (Cowan i Welcomme, 1998).

Wysoka prędkość wody ($\geq 0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) na tarlisku wpływa na transport rumowiska, zapobiegając osadzeniu się drobnych frakcji piaszczystych, które mogłyby zablokować



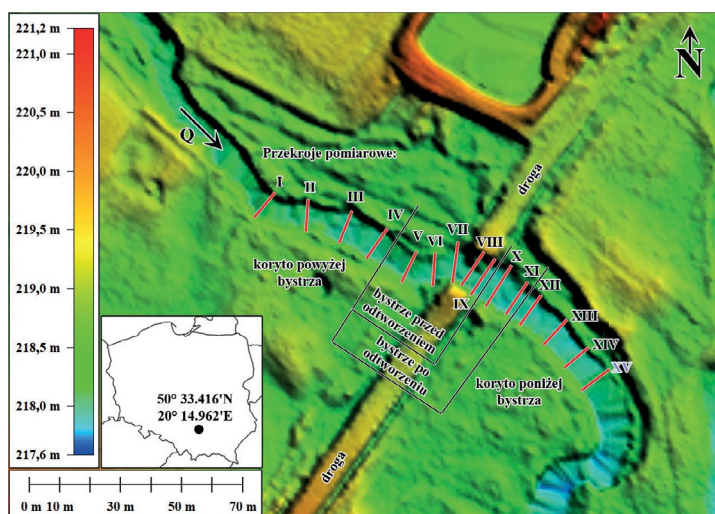
Ryc. 1. Naturalna sekwencja bystrze-ploso (fot. M. Bień) oraz schemat jej profilu podłużnego
The natural riffle-pool sequence (photographed by M. Bień), with a schematic representation of its longitudinal profile

przestrzenie między żwirami i utrudnić przepływ przez gniazdo. Głębokość wody, spadek zwierciadła, prędkość przepływu oraz przepuszczalność materiału dennego kluczowo wpływają na infiltrację wody w podłoże tarliska. Głębsza woda i większe nachylenie zwierciadła zwiększają ciśnienie i gradienty hydrauliczne, sprzyjając przepływowi wód gruntowych. Wyższa prędkość przepływu może oczyszczać pory w osadach, wspierając infiltrację, podczas gdy wolniejszy przepływ sprzyja osadzeniu cząstek, ograniczając jej intensywność. Przepuszczalność podłoża decyduje o szybkości i ilości infiltrującej wody, co jest kluczowe dla odpowiednich warunków tlenowych i rozwoju tarliska. Ryby unikają miejsc o najmniejszej głębokości, aby nie narażać gniazd na odsłonięcie przy niskim stanie wody (Cow i Welcomme, 1998). Należy bezwzględnie dążyć do zachowania bystrzy i odtwarzania ich gdziekolwiek jest to możliwe. W żadnym wypadku nie powinno się ich niwelować, plantować sprzętem mechanicznym lub usuwać.

Celem niniejszej pracy była analiza parametrów hydrodynamicznych i granulometrycznych bystrza w celu określenia możliwości odtworzenia funkcji tarliska pstrąga potokowego w wyżynnym potoku oraz weryfikacja wykorzystania przez ryby odtworzonego tarliska.

Obiekt badań

Obiektem badań jest bystrze zlokalizowane na rzece Mierzawie w miejscowości Przyłęczek, w południowej części województwa świętokrzyskiego (ryc. 2). Całkowita długość Mierzawy to 61,2 km, natomiast powierzchnia jej zlewni wynosi 557,92 km². Mierzawa jest rzeką III rzędu – to największy prawobrzeżny dopływ Nidy. Jest to mała rzeka wyżynna, której koryto wykształciło się w podłożu węglanowym. Zlewnia Mierzawy tworzy granicę dla trzech mezoregionów: Wyżyny Miechowskiej, Garbu Wodzisławskiego i Płaskowyżu Jędrzejowskiego (Kondracki, 2009). Przepływy charakterystyczne obserwowane na po-



Ryc. 2. Lokalizacja oraz schemat pomiarowy bystrza

Location of the riffle and presentation of the measurement scheme

Opracowanie własne w programie GlobalMapper na podstawie danych z zasobu geoportal.gov.pl.

sterunku wodowskazowym w Michałowie wynoszą: $NNQ=0,320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $SNQ=1,22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $SSQ=2,44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $SWQ=6,29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $WWQ=13,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Szerokość koryta wynosi od 1 m w źródłowym odcinku do 7 m w ujściowym, jednak warto zaznaczyć, że zarówno odcinek źródłowy, jak i ujściowy, zostały uregulowane w XX w. W środkowym biegu, na nieprzekształconych przez człowieka odcinkach, szerokość koryta osiąga do 14 m. Dno rzeki jest przeważnie piaszczyste, miejscowo kamienisto-żwirowe. Zlewnia rzeki jest w większości użytkowana rolniczo (79% powierzchni), w środkowym biegu występują obszary leśne i pozostałości zadrzewień nadrzecznych (tereny leśne stanowią 15% powierzchni), natomiast tereny zurbanizowane są zlokalizowane liniowo wzdłuż biegu rzeki. Rzeka została uregulowana na około 18 km swojej długości, z czego około 10 km to odcinek źródłowy. W XIX w. była intensywnie zabudowana młynami wodnymi. Obecnie na rzece znajduje się 17 budowli hydrotechnicznych, z których trzy służą do poboru wody dla stawów rybnych, a jedna zasila szkołę drzew oraz małą elektrownię wodną (MEW). Pozostałe budowle nie pełnią obecnie żadnej funkcji, a część z nich jest przeznaczona do rozbioru ze względu na zły stan techniczny.

Bystrze, które pełni funkcję tarliska dla pstrągów potokowych, znajduje się w okolicach mostu w ciągu drogi gminnej (środkowy odcinek rzeki). Spadek podłużny zwierciadła wody niskiej na bystrzu wynosi 4,74%. Dno bystrza zbudowane jest ze żwirów i piasków, które najczęściej są zakumulowane.

Z powodu corocznego zmniejszania się obszaru pokrytego żwirem oraz narastającego udziału piasku w osadach dennych, zdecydowano o wzbogaceniu tego odcinka koryta żwirem z niewielką domieszką kamieni o następującej masie:

- dla frakcji 8-20,0 mm: ok. 10,00 t,
- dla frakcji 20-31,5 mm: ok. 50,00 t,
- dla frakcji 31,5-100 mm: ok. 40,00 t.



Fot. 1. Odtwarzanie tarliska: A – wsypywanie żwiru do koryta rzecznego, B – rozprowadzanie żwiru po bystrzu (fot. M. Bień)

Restoration of the spawning grounds: A – tipping of gravel on to the riverbed (left), B – spreading of gravel at the riffle (photo by M. Bień)

Żwir dostarczony do koryta rzecznego został w taki sposób rozprowadzony, aby zalegał na większej powierzchni (zasypano istniejący wtenczas wybój poniżej mostu) niż dotychczas, przez co zwiększyła się czynna powierzchnia tarliska. Tarlisko, pierwotnie o długości 30 m, zostało wydłużone do 45 m. Dzięki temu powinna się zwiększyć ilość gniazd tarlowych. Dodatkowo, zmniejszenie frakcji piaszczystej w bystrzu (tarlisku) powinno zwiększyć skuteczność wylęgu narybku.

Działania odtworzeniowe zostały przeprowadzone przez autorów pracy we współpracy z członkami Okręgu Polskiego Związku Wędkarskiego w Kielcach w okresie letnim 2022 r. (fot. 1).

Metodyka

W celu analizy funkcji tarliskowej bystrza zostały wykonane następujące badania:

1. Analiza granulometryczna rumowiska – materiał został pobrany z bystrza przed oraz po przeprowadzeniu prac odtworzeniowych tarliska. Osad denny został pobrany z powierzchni 1 m² (Wołoszyn, 1994). Po poborze osadu wykonano analizę uziarnienia przy pomocy sit o wymiarach oczek w mm: 100; 63; 40; 31,5; 20; 16; 10; 8; 6,3; 4; 2; 1; 0,63; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063 (Wiłun, 1987). Następnie wykreślono krzywe granulometryczne (przesiewu) oraz obliczono wskaźnik różnoziarnistości gruntu:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

gdzie:

d_{60} – średnica ziaren sedymentu stanowiąca wraz z mniejszymi 60% masy badanej próbki [m],

d_{10} – średnica ziaren sedymentu stanowiąca w raz z mniejszymi 10% masy badanej próbki [m].

2. Analiza hydrodynamiczna polegała na wykonaniu pomiarów prędkości przepływu wody w strefie przydennej toni wodnej (na wysokości 5 cm ponad dnem rzeczonym) oraz napełnienia w kilku przekrojach poprzecznych (Radecki-Pawlik et al., 2018). Pomiary były wykonywane młynkiem elektrometrycznym VALEPORT FM 801 przy przepływie zbliżonym do $SNQ=0,54 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Następnie wyznaczono liczbę Froude'a, a także liczbę Reynoldsa (Graf, 2001):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

$$Re_d = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

gdzie:

V – prędkość przepływu wody [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

g – przyspieszenie ziemskie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

h – napełnienie [m],

d – średnica ziarna sedymentu [m],

ν – kinematyczny współczynnik lepkości wody [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Lokalizacja przekrojów pomiarowych była następująca:

- przekroje oznaczone numerami I-IV zostały wykonane powyżej bystrza/tarliska;
- przekroje oznaczone numerami V-IX zostały wykonane na bystrzu. Po odtworzeniu tarliska, które zostało wydłużone w dół rzeki, przekroje X i XI znalazły się w końcowym odcinku bystrza/tarliska;
- przekroje oznaczone numerami VII, VIII, IX zostały wykonane pod mostem (odpowiednio: wzdłuż górnej krawędzi mostu, w środku i na dolnej);
- przekroje oznaczone numerami XII-XV zostały wykonane poniżej bystrza/tarliska.

Wszystkie parametry hydrauliczne zobrazowano na wykresach.

3. Warunki morfodynamiczne koryta oszacowano dla frakcji d_{16} i d_{83} na podstawie wykresu Sundborga (Sundborg, 1956). Wykres ten określa zależności prędkości przepływu od wielkości ziaren, określając jeden z trzech procesów: akumulacji, strefy przejściowej lub erozji ziaren sedymentu. Analizie poddano sedyment o wielkości d_{16} i d_{84} .
4. Badania siedliskowe przeprowadzono poprzez monitoring ichtiofauny z wykorzystaniem bateryjnego agregatu do odłowów ryb (produkcji Hans Grassl, Niemcy). Odłowy zostały wykonane dwukrotnie na odcinku odtwarzanego bystrza oraz 100 m powyżej i poniżej tego obszaru. Przeprowadzono również wizje terenowe i obserwacje w okresie tarła, a obecność makrozoobentosu zbadano za pomocą skrobaka dna.

Wyniki badań i dyskusja

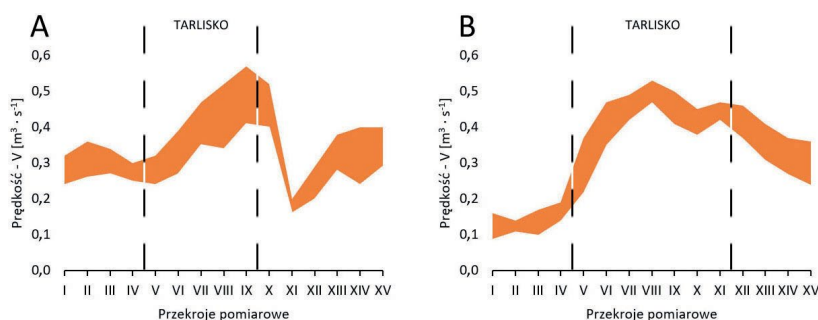
Przed odtworzeniem tarliska prędkości wody powyżej bystrza wynosiły 0,24-0,36 m·s⁻¹ (ryc. 3). Następnie rosły, aby pod mostem osiągnąć maksymalne wartości, dochodzące do 0,57 m·s⁻¹. Poniżej mostu stwierdzono wybój, z którego materiał został wymyty podczas wyższych stanów wody w rzece. Jego napełnienie podczas pomiarów terenowych wynosiło w najgłębszym miejscu do 1,35 m, co skutkowało znacznym spadkiem prędkości przydennej do zakresu 0,16-0,20 m·s⁻¹. Poniżej bystrza prędkości przydenne wracały do poziomu porównywalnego z zakresem obserwowanym powyżej tarliska (0,20-0,40 m·s⁻¹).

Po zasileniu bystrza materiałem żwirowo-kamienistym wartości parametrów hydrodynamicznych uległy znaczącym zmianom. Wsypanie żwiru i rozprowadzenie go po bystrzu spowodowało niewielkie podniesienie dna koryta, co skutkowało powstaniem powyżej tarliska odcinka akumulacyjnego. Właśnie ten odcinek był jedną z form ochrony tarliska przed zapiaszczeniem. Podniesienie elewacji dna spowodowało niewielkie piętrzenie powyżej bystrza, wzrost napełnienia w korcie rzeki i znaczący spadek prędkości w porównaniu z sytuacją wcześniejszą (ryc. 3 i 4). Napełnienie dochodziło do 0,60 m, a prędkości wahały się w granicach 0,09-0,19 m·s⁻¹. Przy tak niskich wartościach prędkości transportowany z górnych partii koryta piasek powinien być akumulowany przed bystrzem, a nie na tarlisku. Taka sytuacja była korzystna, ponieważ naturalnie chroniła tarlisko przed zapiaszczeniem gniazd tarłowych. Przed odtworzeniem tarliska gniazda były zapiaszczane, ponieważ frakcje drobnoziarniste docierały do tarliska i tam się osadzały. Przyczyną tego zjawiska była niska prędkość przepływu na tarlisku oraz zwiększona szorstkość podłoża, składającego się głównie z żwiru. Taka struktura podłoża tworzyła przestrzenie interstycjalne, w których zatrzymywały się drobne ziarna piasku. Pomimo wyższych prędkości przepływu na tarlisku w porównaniu z resztą koryta rzecznoego, większa szorstkość dna skutecznie redukowała zdolność transportową wody w odniesieniu do drobnych osadów.

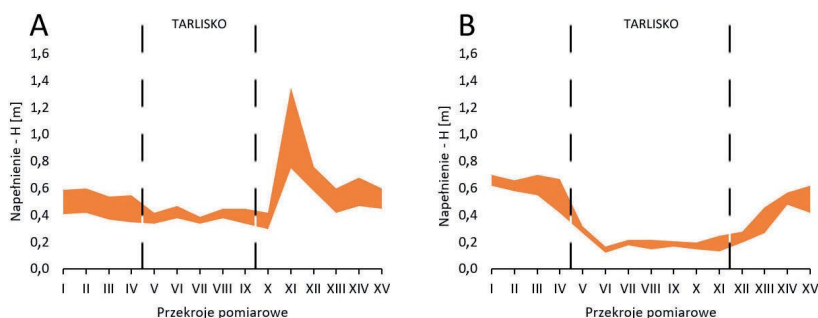
W efekcie piasek był deponowany w szczelinach między żwirowymi frakcjami, co mogło sprzyjać stabilizacji substratu, ale jednocześnie ograniczać przepływ wody w tych przestrzeniach, wpływając na warunki środowiskowe istotne dla organizmów wodnych, zwłaszcza ryb odbywających tarło.

Na bystrzu napętnienie w korycie było niższe niż przed odtworzeniem tarliska (ryc. 4). Z kolei prędkości przydenne w górnej części tarliska były wyższe, zaś w środkowej i dolnej nieznacznie podwyższone w porównaniu z sytuacją przed modernizacją. Stosunkowo wysokie wartości prędkości powinny zapobiec osadzaniu się piasku na tarlisku. Poniżej bystrza prędkości mały, a napętnienie wzrosło.

Zmodyfikowany przemiał pełniący funkcję tarliska oddziaływał na przepływającą wodę jak naturalne bystrze o zwiększonej szorstkości: struga wody przyspieszała, co przekładało się na zmniejszenie napętnienia (Charlton, 2008) (ryc. 3 i 4). Po odtworzeniu tarliska zjawisko to było bardziej widoczne. Optymalne wartości prędkości przepływu na tarlisku dla pstrąga potokowego wynoszące $0,15-1,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ były zapewnione (przy założeniu długości ryby wynoszącej $L \leq 80 \text{ cm}$, gdyż maksymalnie tej długości ryby były w rzece Mierzawie obserwowane) (Crisp, 2000).



Ryc. 3. Prędkość w strefie przydennej koryta w poszczególnych przekrojach pomiarowych na analizowanym odcinku koryta rzecznej przed (A) i po (B) odtworzeniu tarliska
Velocity in the bottom zone of the riverbed at individual measurement cross-sections along the analysed section of river, before (A) and after (B) the restoration of the spawning grounds

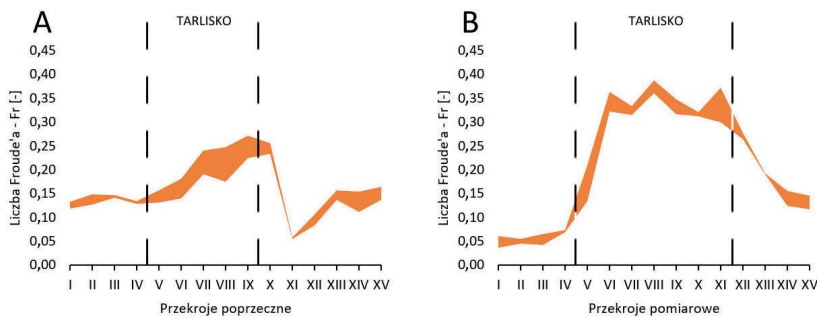


Ryc. 4. Głębokość koryta w poszczególnych przekrojach pomiarowych na badanym odcinku rzeki przed (A) i po (B) odtworzeniu tarliska
The depth of the channel at the different measurement cross-sections along the studied section of river, before (A) and after (B) the restoration of the spawning grounds

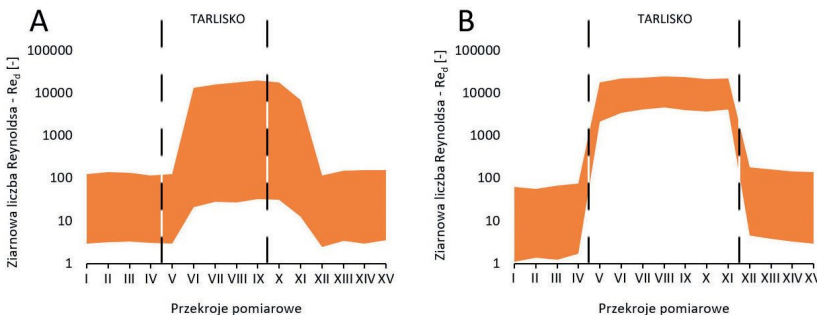
Wartości liczby Froude'a ($Fr < 1$) (ryc. 5) świadczyły o występowaniu ruchu nadkrytycznego (spokojnego), braku odskoku hydraulicznego i tworzenia się antyfal, co sugerowało, że materiał żwirowo-kamienny nie powinien być rozmywany (Dąbkowski et al. 1982).

Liczba Reynoldsa może być określona w zależności od przyjętego rozmiaru liniowego (napętnienie, wysokość szorstkości lub średnica ziarna), dlatego w warstwie przydennej wyróżniamy liczbę Reynoldsa ziarnową (Re_d , ryc. 6) (Schlichting, 1965). Wartości $Re_d < 5$ świadczą o przepływie hydraulicznie gładkim, czyli szorstkość dna nie ma wpływu na rozkład prędkości. Wszystkie elementy dna są całkowicie zanurzone w warstwie laminarnej. Uzyskując wartości $Re_d > 70$, mamy do czynienia z przepływem hydraulicznie szorstkim, który cechuje się wpływem dna na profil prędkości. Niektóre elementy dna, takie jak duże głazy, roślinność, wystają ponad warstwę laminarną. Wartości z przedziału $5 < Re_d < 70$ świadczą o ruchu przejściowym pomiędzy gładkim a szorstkim (Gordon et al. 2007; Radecki-Pawlik, 2014).

Na przemiele przepływ miał charakter szorstki, a rumowisko żwirowo-kamienne w warunkach niskich stanów wody wystawało ponad warstwę laminarną. Wartości liczby Reynoldsa obliczone dla przeciętnej średnicy ziarna oraz dla danego napętnienia koryta i danej geometrii koryta wzrosły po odtworzeniu tarliska z zakresu 13-19 815 do 2185-25 268 (ryc. 6).



Ryc. 5. Liczba Froude'a na analizowanym odcinku koryta rzecznego przed (A) i po (B) odtworzeniu tarliska
Froude numbers along the analysed section of riverbed, before (A) and after (B) the restoration of the spawning grounds



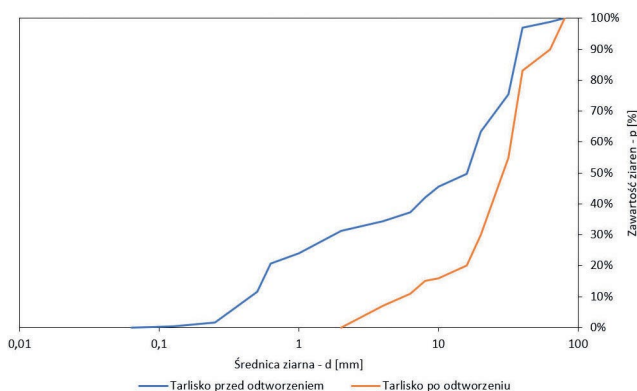
Ryc. 6. Ziarnowa liczba Reynoldsa na analizowanym odcinku koryta rzecznego przed (A) i po (B) odtworzeniu tarliska
Reynolds numbers along the analysed section of riverbed, before (A) and after (B) the restoration of the spawning grounds

Wzrost wartości był spowodowany zwiększoną szorstkością podłoża wynikającą z zasilenia koryta rzeczno materiałem gruboziarnistym. Z kolei powyżej tarliska wartości parametru zmniejszyły się z 3-143 do 1-75, co tym razem było uzależnione od spadku prędkości przydennej. Poniżej bystrza nie zauważono znaczących zmian przed i po odtworzeniu tarliska.

Rumowisko znajdujące się do tej pory w dnice koryta rzeczno składało się z frakcji żwirowej (67,6%) z domieszką piasku (31,3%) i kamieni (1,1%) – rumowisko było bardzo różnoziarniste ($U=40$) (ryc. 7). Po uzupełnieniu materiałem żwirowo-kamiennym rumowisko znajdujące się w miejscu tarliska zmieniło swoją strukturę; składało się głównie z żwiru (83%) i kamieni (17%), zaś piasku nie stwierdzono. Wskaźnik uziarnienia spadł do wartości $U=5$ – materiał stał się równoziarnisty. Warunki, jakie spełniało rumowisko po jego uzupełnieniu materiałem żwirowo-kamiennym, były korzystniejsze dla pstrągów składających ikrę. Mniejsza ilość frakcji piaskowej wpływała pozytywnie na przeżywalność ikry oraz na procent wyklucia (Crisp, 2000).

Analizując parametry hydrodynamiczne i granulometryczne, można było określić warunki transportowe rumowiska rzeczno przy użyciu wykresu Sundborga (ryc. 8). Wykres ten został opracowany przez szwedzkiego geografa Åke Sundborga w 1956 r. jako rozszerzenie i uzupełnienie wykresu Hjulströma (1935). Jest to narzędzie stosowane w szerokim zakresie w naukach fluwialnych, pozwalające na dokładną analizę procesów erozji, transportu i osadzania materiału sedymentacyjnego w wodach płynących. Wykres składa się z trzech pól, które są rozdzielone dwoma krzywymi:

- krzywa krytycznej prędkości erozji: górna krzywa na wykresie pokazuje minimalną prędkość przepływu wody wymaganą do rozpoczęcia erozji ziaren o określonej wielkości. Dla cząstek o średnicy około 0,1-0,2 mm (drobny piasek) wymagana prędkość erozji jest najniższa. Natomiast dla mniejszych cząstek, takich jak ility i pyły, potrzebne są wyższe prędkości ze względu na ich właściwości kohezji, które utrudniają ich erozję;
- krzywa prędkości depozycji: dolna krzywa przedstawia maksymalną prędkość przepływu, przy której cząstki o określonej wielkości będą osadzane. Gdy prędkość spada poniżej tej wartości, cząstki zaczynają się osadzać na dnice rzeki lub nie są uruchamiane, jeśli dotychczas zalegały na podłożu dennym.



Ryc. 7. Krzywe granulometryczne osadów dennych znajdujących się na tarlisku
Granulometric curves for bed sediments found in the spawning grounds

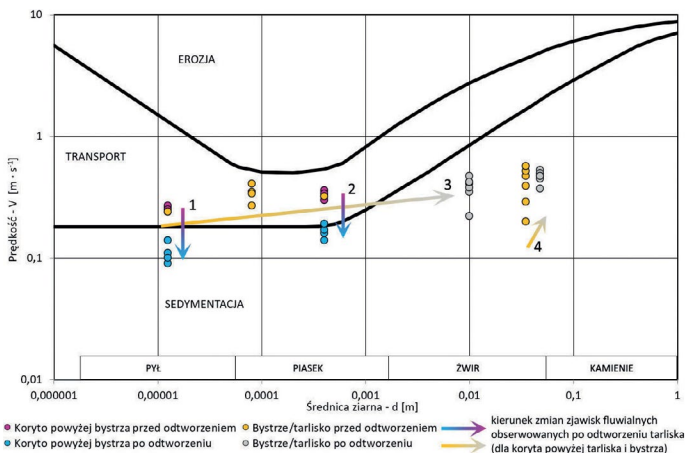
Strefa transportu: obszar między krzywymi erozji i depozycji reprezentuje zakres prędkości, przy których cząstki są transportowane w zawieszynie lub jako ładunek denny. Warto zauważyć, że prędkość wymagana do utrzymania ziaren w ruchu jest zazwyczaj niższa niż prędkość potrzebna do ich początkowej erozji. Strefa ta często jest też nazywana strefą przejściową.

Na rycinie 8 możemy zauważyć, że po modyfikacji przemiału wszystkie ziarna sedimentu znajdującego się na odcinku tarliskowym (szare markery) nie powinny być uruchamiane, przez co dno tarliska nie było rozmywane. Należy pamiętać, że pod warstwą żwiru i kamieni, która ma miąższość 15-30 cm, zalega piasek. Z tego powodu uzupełniono koryto także frakcją kamienistą, której zadaniem było zwiększenie szorstkości przepływu i stabilizacja nowego sedimentu. Piasek powinien być zdeponowany przed tarliskiem (niebieskie markery), gdzie poprzez podniesienie korony bystrza utworzono dla niego pułapkę sedimentacyjną.

Wyniki przedstawione na wykresie Sundborga (ryc. 8) mogą służyć jako narzędzie do oceny skuteczności przeprowadzonych prac związanych z odtworzeniem tarliska. Zaprezentowane na wykresie strzałki obrazują kierunki zmian zjawisk fluwialnych, jakie zaszły przed i po realizacji tych działań.

Strzałki oznaczone numerami 1 i 2 odzwierciedlają zmiany procesów zachodzących w korycie powyżej bystrza, w tym również w pułapce sedimentacyjnej. Ich pionowe skierowanie w dół symbolizuje, że wykonana pułapka powinna skutecznie pełnić swoją rolę, zatrzymując zarówno drobne rumowisko (strzałka nr 1 dla d_{16}), jak i gruboziarnisty materiał (strzałka nr 2 dla d_{84}). Pierwotne bordowe markery, reprezentujące koryto powyżej bystrza, po przeprowadzonej rewitalizacji przesunęły się w dół wykresu (niebieskie markery), przechodząc do strefy sedimentacyjnej. To przesunięcie wynikało ze zmniejszenia prędkości przepływu wody.

Natomiast na bystrzu, pełniącym funkcję tarliska, zmiana pozycji markerów po rewitalizacji powinna być wypadkową przesunięć w kierunku prawym w górę (strzałki nr 3 dla d_{16} oraz nr 4 dla d_{84}). Owe zmiany są związane zarówno ze wzbogaceniem bystrza materiałem



Ryc. 8. Wykres Sundborga (1956)
Diagram after Sundborg (1956)

gruboziarnistym (co oznacza przesunięcie w lewo), jak i ze wzrostem prędkości przepływu wody (co powoduje przesunięcie w górę).

Takie spostrzeżenia podkreślają złożoność dynamiki procesów fluwialnych oraz skuteczność działań zmierzających do przywrócenia równowagi ekologicznej i hydrologicznej w analizowanym fragmencie rzeki. Podobne zależności odnotowali również Bień i Pleśniński (2023), którzy przeprowadzili analogiczne analizy w oparciu o wykres Hjulströma (1935). W ich badaniach również zaobserwowano, że wypadkowy wektor przesunięcia markerów kieruje się w górę i w prawo, co dodatkowo potwierdza trafność i poprawność podjętych prac rewitalizacyjnych.

Przed odtworzeniem na środkowym odcinku bystrza obserwowano maksymalnie 3 gniazda, przy czym skuteczność tarła była niewielka, a liczba narybku letniego wynosiła co roku do 50 sztuk pstrągów potokowych (ryc. 9). Po odtworzeniu stwierdzono 5 gniazd w pierwszym roku i 8 gniazd w drugim, co w pierwszym roku skutkowało odłowieniem 287 sztuk narybku letniego pstrąga potokowego na odcinku rzeki bezpośrednio poniżej i powyżej bystrza.

Zasilenie koryta rzecznej materiałem żwirowym (z domieszką frakcji powyżej 40 mm) spowodowało, iż warunki hydrodynamiczne w obrębie przemiału są optymalne dla funkcjonowania tarliska. Polepszenie warunków hydrodynamicznych wynika nie tylko z wymagań życiowych i rozrodczych pstrągów potokowych, ale również z konieczności uwzględnienia procesów geomorfologicznych, które zapewniają stabilność bystrza pełniącego funkcję tarliska.

Jednocześnie na bystrzu dwukrotnie zaobserwowano (w 2023 r. i 2024 r.) tarło minoga ukraińskiego (*Eudontomyzon mariae*), który jest gatunkiem z załącznika II Dyrektywy Siedliskowej (Dyrektywa Siedliskowa, 1992), a w kraju objęty jest ochroną ścisłą. Dodatkowo w miejscach występowania większych frakcji kamienistych obserwowano pojawienie się głowaczy białołętych (*Cottus gobio*), gatunku z załącznika II i V Dyrektywy Siedliskowej (1992) oraz załącznika II Konwencji Berneńskiej (1979), w Polsce objętego ochroną ścisłą i wymagającego ochrony czynnej.

Dzięki poborowi prób makrozoobentosu z bystrza uzyskano skład gatunkowy wodnych bezkręgowców. Zostały stwierdzone następujące ich rzędy: obunogi (*Amphipoda*), jętki (*Ephemeroptera*), ważki (*Odonata*), dwuskrzydłe (*Diptera*) i chruściki (*Trichoptera*). Dla tych przedstawicieli fauny rzecznej bardzo dobrymi miejscami do rozwoju były przestrzenie między ziarnami żwiru oraz kamieni, które stwarzały schronienie, w przeciwieństwie do piasku. Materiał żwirowo-kamienisty był również odpowiednim miejscem żerowania



Ryc. 9. Schemat gniazd tarłowych pstrąga potokowego na tarlisku (gniazda zaznaczono białymi kropkami)
Schematic representation of spawning nests for brown trout at the spawning grounds (nests marked with white dots)

Opracowanie własne w programie GlobalMapper na podstawie danych z zasobu geoportal.gov.pl.

dla konsumentów I stopnia. Żwir i kamienie często były porastane przez glony, będące bazą pokarmową dla np. niektórych chruścików. Przepływająca przez przestrzenie między żwirem woda zawierająca drobne cząstki organiczne stwarzała dobre warunki do odżywiania dla organizmów żywiących się martwą materią organiczną, jak larwy dwuskrzydłe czy obunogi. Z kolei wszystkie mniejsze organizmy stały się pokarmem zarówno dla larw ważek, jak i niektórych jętek czy chruścików.

Wnioski

W niniejszej pracy przeanalizowano efekt wzbogacenia koryta rzecznej materiałem żwirowo-kamienistym, który doprowadził do rewitalizacji bystrza pełniącego funkcję tarliska dla pstrąga potokowego. Zgodnie z oczekiwaniami, podjęte działania pozytywnie wpłynęły na warunki rozrodcze tego gatunku. Uziarnienie rumowiska dennego uległo zwiększeniu, eliminując frakcję piaskową, której obecność jest niepożądana w gniazdach tarłowych. Jedynym mankamentem zwiększonej średnicy ziaren rumowiska i eliminacji piasku z tarliska jest zaleganie w dnie materiału niemalże jednorodnego, mniej zróżnicowanego.

W aspekcie morfologicznym – powierzchnia żwirowego tarliska uległa zwiększeniu (z 60 m² do 160 m²), przez co więcej powierzchni aktywnej było dostępnej dla trących się pstrągów. Także specjalne ukształtowanie odsypów żwirowych, które zostały uformowane w sposób wymuszający zmienną hydrodynamikę przemiału i ochraniającą brzegi przed rozmyciem, spowodowało zróżnicowanie warunków dla potencjalnych miejsc rozrodu.

W kontekście hydrodynamicznym – powyżej tarliska prędkość zmniejszyła się do bardzo niskich wartości ($V = 0,09-0,19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), co powinno spowodować depozycję transportowanego piasku. W związku z tym ziarna piasku nie powinny doptywać do tarliska, a powinny być sedymentowane w odcinku koryta powyżej, przez co odcinek ten ma pełnić funkcję naturalnej pułapki sedymentacyjnej. Na odcinku tarliskowym wartości parametrów hydrodynamicznych uległy optymalizacji (w porównaniu ze stanem sprzed odtworzenia). W aspekcie rozrodczym – zabiegi modyfikacyjne przyniosły pozytywne efekty w postaci zwiększenia populacji pstrąga potokowego oraz poprawy różnorodności biologicznej tego odcinka rzeki.

Ryciny, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniem własnym autorów artykułu.

Piśmiennictwo

- Backiel, T. (1964). *Pstrągi*. Warszawa, PWRiL.
- Bień, M., & Plesiński, K. (2023). Odtworzenie tarliska dla pstrągów potokowych (*Salmo trutta*) w korycie rzeki Mozgawa w Piotrkowicach – aspekty hydrodynamiczne i sedymentologiczne. W: T. Heese (red.) *Ochrona i rekultywacja wód* (s. 155-163). Toruń: Towarzystwo Naukowe w Toruniu.
- Charlton, R. (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Londyn, Nowy Jork: Taylor & Francis Group.
- Cowx, I.G., & Welcomme, R.L. (1998). *Rehabilitation of rivers for fish*. FAO. Fishing News Books. Oxford: Blackwell Science.

- Crisp, D.T. (2000). *Trout and Salmon: Ecology, Conservation and Rehabilitation*. Fishing News Books. Oxford: Blackwell Science.
- Dąbkowski, L., Skibiński, J., & Żbikowski, A. (1982). *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych*. Warszawa: WRiL.
- Dyrektywa Siedliskowa. (1992). Dyrektywa Rady 92/43/EWG z dnia 21 maja 1992 r. w sprawie ochrony siedlisk przyrodniczych oraz dzikiej fauny i flory. Dz.U.UE.L.1992.206.7
- Gordon, N.D., McMahon, T.A., Finlayson, B.L., Gippel, C.J., & Nathan, R.J. (2007). *Stream Hydrology. An introduction for ecologists*. London: John Wiley & Sons.
- Graf, W.H. (2001). *Fluvial Hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry*. Chichester, John Wiley & Sons.
- Hjulström, F. (1935). *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by river Fyris*. Almqvist & Wiksells Boktryckeri. Uppsala: University of Uppsala.
- Kondracki, J. (2009). *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: PWN.
- Konwencja Berneńska. (1979). *Konwencja o ochronie gatunków dzikiej flory i fauny europejskiej oraz ich siedlisk*. Brno, 19.09.1979 r. (Dz. U. 96.58.263 z dnia 25 maja 1996 r.).
- Radecki-Pawlik, A. (2010). O niektórych bliskich naturze rozwiązaniach utrzymania koryt rzek i potoków górskich. *Gospodarka Wodna*, 2, 78-85.
- Radecki-Pawlik, A. (2014). *Hydromorfologia rzek i potoków górskich – Działy wybrane*. Kraków: Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.
- Radecki-Pawlik, A., Plesiński, K., Radecki-Pawlik, B., Kuboń, P., & Manson, R. (2018). Hydrodynamic parameters in a flood impacted boulder block ramp: Krzczonówka mountain stream, Polish Carpathians. *Journal of Mountain Science*, 15(11), 2335-2346.
<https://doi.org/10.1007/s11629-018-4893-6>
- Schlichting, H. (1965). *Grenzschicht – Theorie*. Karlsruhe: G. Braun Verlag.
- Sundborg, A. (1956). *The river Klarälven – A study of fluvial processes*. Stockholm: Geografiska Annaler Häfte.
- Wiłun, Z. (1987). *Zarys geotechniki*. Warszawa: WKiŁ.
- Witkowski, K. (2018). Morfodynamika uregulowanego koryta rzeki górskiej. *Przegląd Geograficzny*, 90(1), 137-155. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2018.1.7>
- Wołoszyn, J., Czamara, W., Eliasiewicz, R., & Krężel, J. (1994). *Regulacja rzek i potoków*. Wrocław: Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu.

Summary

This paper presents the results of implementation activities aimed at reconstructing a natural riffle along the bed of the River Mierzawa at Przyłęczek, Poland, with a view to spawning grounds for brown trout *Salmo trutta* being restored and created.

Each species of lithophilous fish requires specific spawning conditions due to differences in reproductive biology. Thus, for instance, salmonids including brown trout bury their eggs in gravel. However, the choice of a spawning site depends on factors such as water velocity, depth, riverbed slope and sediment grain-size. These parameters are crucial for the proper incubation of eggs by the trout, which takes approximately 400 degree-days in the species in question. The appropriate grain-size allows eggs to be placed properly between gravel particles, and ensures adequate rinsing and gaseous exchange during

incubation. The sizes and shapes of grains are important, as those with sharp edges can injure female fish during nest building.

High water velocity in spawning areas influences the transport of sediment, preventing the deposition of fine-sand fractions that could block spaces between gravel, and hinder water flow through the nest. Water depth, slope, flow velocity, and bottom-sediment permeability are all key to water infiltration into the spawning substrate. Deeper water and steeper slopes increase hydraulic pressure and gradients, promoting groundwater flow. Higher flow velocities can clear sediment pores, encouraging infiltration, whereas slower flows promote particle deposition, reducing infiltration intensity. Substrate permeability determines the rate and extent of water infiltration, which is vital for maintaining oxygen-rich conditions for egg incubation. Fish also avoid the shallowest depths in order to ensure that nests are protected from exposure during periods of low water.

The studied riffle's hydrodynamic and granulometric parameters were studied so as to allow for an evaluation of its potential as a reconstructed spawning ground for brown trout in an upland stream, and verify utilisation by fish of the reconstructed spawning site.

Implementation work involved enrichment of the selected section of riverbed with gravel and stones in the following quantities:

- the 8-20 mm fraction: approximately 10 tonnes
- the 20-31.5 mm fraction: approximately 50 tonnes
- the 31.5-100 mm fraction: approximately 40 tonnes

These restoration efforts were prompted by year-on-year reductions in the areas of riverbed covered by gravel, as well as an observed increase in the proportion of sand in the studied riffle's bottom sediments, which can be considered as degrading spawning-ground parameters.

The introduced gravel was distributed to cover a larger area than before (with an existing hole in the bed below the bridge filled). The area of the active spawning ground was increased in this way. Granulometric analysis of bottom sediment, water-velocity measurements, geodetic surveys, and habitat studies were all conducted before and after the intervention.

The Sundborg diagram (Fig. 8) makes it clear that, following the riffle modification work, sediment grains in the spawning section remained stable and were not mobilised, thereby ensuring that the spawning grounds were not washed away. As a sand layer remained in place beneath the layer of gravel and stones 15-30 cm thick, the riverbed was supplemented with coarser stones to increase flow roughness and stabilise the new sediment. Sand is expected to settle upstream of the spawning grounds, where a sediment trap was created by raising the riffle crest. This trap should prove effective at retaining sand – as is confirmed by the observed reduction in water velocity. The impacts of the revitalisation work (Fig. 8) were for hydrodynamic conditions at the riffle to improve, with a stop therefore put to the unfavourable accumulation of sand in the spawning area.

Before restoration, a maximum of three nests of brown trout were observed in the middle section of the riffle, with these also characterised by low spawning efficiency – to the extent that only about 50 summer brown-trout fry were recorded annually (Fig. 10). Following restoration, five nests were observed in the first year, and eight in the second year. The number of summer brown-trout fry obtained during the first year was 287.

The restoration work yielded the following positive effects where conditions for reproduction among brown trout were concerned:

1. The improved grain size of the bottom sediment reflected elimination of a sand fraction undesirable in spawning nests. The increased grain size and reduction in amounts of sand resulted in a more homogeneous sediment composition.
2. The gravel spawning area increased in size, with the active surface expanding from 60 to 160 m². The specially-designed shape of gravel bars also introduced varied hydrodynamic conditions, protecting riverbanks from erosion and creating diverse potential spawning sites.
3. Enhanced sediment stopping was a consequence, as water velocity decreased significantly upstream of the spawning ground, encouraging sand deposition. This makes it unlikely that sand will be transported into the spawning grounds, as the upstream section now functions as a natural sedimentation trap. Hydrodynamic parameters were thus optimised in the spawning grounds as compared with the conditions pre-restoration.
4. A positive ecological impact can be said to have been exerted by the restoration efforts along the section of river, with the population of brown trout increased as a result, and biodiversity enhanced.