

Własności fizyczne kajaka.

Opracowanie: Jerzy Świtek

Spis treści.

Część I. Kajak na stojącej, płaskiej wodzie.

1. Dlaczego kajak pływa?
2. Dlaczego dno kajaka jest na dole, a kokpit u góry?
3. Dlaczego „kabina” to obligatoryjny element kajakarstwa ?

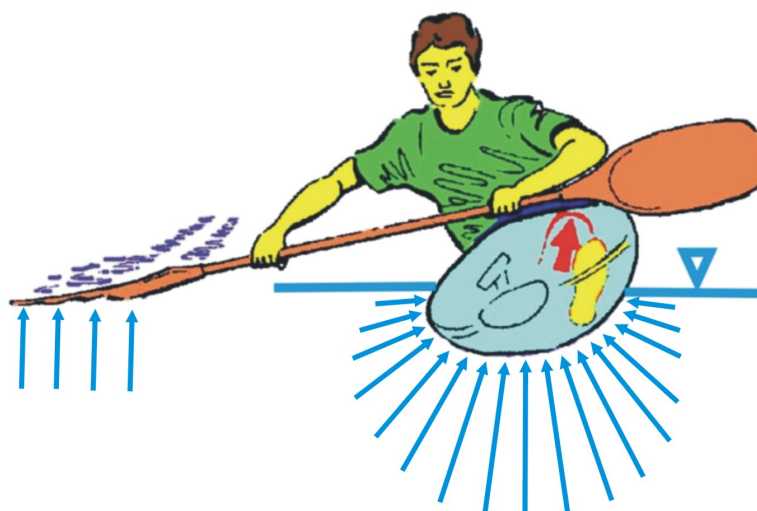
Część I. Kajak na stojącej, płaskiej wodzie.

1. Dlaczego kajak pływa?

Kajak zazwyczaj porusza się na granicy powietrza i wody oraz zawsze w polu grawitacyjnym Ziemi. W konsekwencji na kadłub kajaka, kajakarza, jego wyposażenie i bagaż oddziałują woda, powietrze oraz Ziemia. Oddziaływania te różnią się między sobą. Inaczej oddziałuje woda i powietrze, a inaczej Ziemia. Dla uproszczenia dalszych rozważań pominiemy chwilowo działanie powietrza (*jest ono istotne przy pływaniu na wietrze*), a kajakarza z jego wyposażeniem i bagażem będziemy traktowali łącznie z kajakiem jako jedną, sztywną całość.

Warto tutaj zwrócić uwagę na założenie sztywności. Oznacza to, że zarówno bagaż jak i sam kajakarz nie porusza się względem kadłuba kajaka, a cały układ nie zmienia swojego kształtu. Podczas rzeczywistego pływania taka sytuacja prawie nigdy nie ma miejsca. Większość manewrów wymaga jednak ruchu kajakarza względem kadłuba kajaka. Chociażby ruch rąk i skręt tułowia podczas wiosłowania czy też utrzymywanie równowagi przy przechyle poprzez ruch w biodrach powodują, że założenie sztywności układu kajak – bagaż – kajakarz wydaje się bezsensowne. Z punktu widzenia dydaktyki ma ono jednak olbrzymią zaletę – zdecydowanie uprasza opis i ułatwia zrozumienie tego co dzieje się z kajakiem w bardziej złożonych sytuacjach, gdy zrezygnujemy z założenia sztywności układu.

Przy uwzględnieniu powyższych ustaleń wróćmy do współoddziaływań wody, kajaka i Ziemi. Interesuje nas zachowanie się kajaka, będziemy więc szukali odpowiedzi na pytanie: jak woda i Ziemia działają na kajak? (*Pamiętamy z fizyki, że istnieje zasada akcji i reakcji co oznacza, że kajak działa również tak samo na wodę i Ziemię tylko z przeciwnym zwrotem*). Różnica między działaniami wody i Ziemi jest bardzo istotna. Po pierwsze woda działa tylko na powierzchnię kajaka. Natomiast Ziemia działa na każdy element masy kajaka, bagażu i samego kajakarza. W fizyce działania między dwoma ciałami nazywane są siłami. Będziemy dalej posługiwać się tym wygodnym określeniem. W przypadku działania wody będziemy mówić o siłach powierzchniowych, a w przypadku działania Ziemi o siłach masowych. Schematycznie siły te przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Działanie wody jest skierowane zawsze prostopadle do powierzchni kadłuba. Natomiast działanie Ziemi zawsze skierowane pionowo w dół.



Rys. 1. Powierzchniowe działanie wody na kadłub kajaka.



Rys. 2. Działanie Ziemi na każdy element masy kajaka, bagażu i kajakarza.

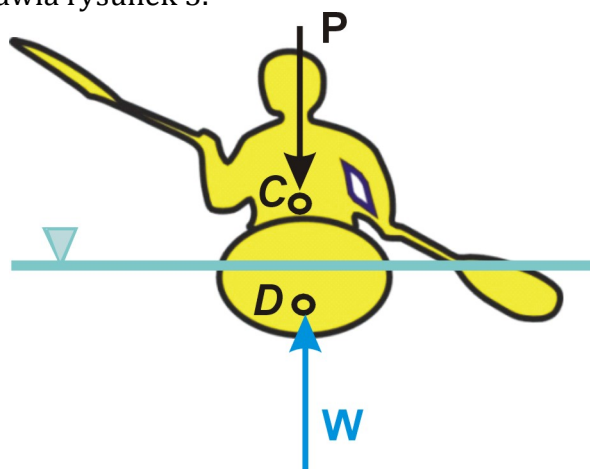
Zauważmy, że w obu przypadkach siły są rozłożone w sposób ciągły w przestrzeni. Siły powierzchniowe na powierzchni kontaktu wody i kajaka, a siły masowe po całej objętości zajmowanej przez kajak, bagaż i kajakarza.

Niestety, jakiegokolwiek działania na tak sformułowanych siłach są bardzo kłopotliwe. Wymagają stosowania pojęć i reguł używanych w matematyce wyższej. A przecież nie to jest naszym celem. W związku z powyższym zastosujemy kolejne uproszczenie, a mianowicie siły rozłożone po powierzchni i masie zastąpimy przez ich sumy dające w wyniku siły skupione. W przypadku działania wody, tę wypadkową siłę skupioną (suma sił powierzchniowych), będziemy nazywać **wyporem**, a w przypadku działania Ziemi wypadkowa sił masowych nosi nazwę **ciężaru**. Zarówno wypór jak i ciężar mają kierunek pionowy. Ciężar jest skierowany do dołu, wypór zawsze do góry, patrz rys. 3.

Zastąpienie sił powierzchniowych i masowych poprzez ich wypadkowe czyli wypór i ciężar ma sens tylko wtedy jeśli skutki działania sił skupionych będą identyczne ze skutkami działania sił rozłożonych. Samo sumowanie jest warunkiem niewystarczającym. Aby skutki działania były identyczne zarówno wypór jak i ciężar muszą być przyłożone w konkretnych punktach. Dla wyporu jest to **środek wyporu**. Znajduje się on w geometrycznym środku zanurzonej

części kajaka. Dla ciężaru jest to środek ciężkości całego układu złożonego z kajaka, bagażu i kajakarza.

Ten nowy model oddziaływania wody i Ziemi na kajak, oparty na siłach skupionych, przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Oparty na siłach skupionych model działania Ziemi i wody na kajak, gdzie:

- W – wypór,
- P – ciężar,
- D – środek wyporu,
- C – środek ciężkości.

W stanie równowagi ciężar i wypór są sobie równe, leżą na jednej prostej i są przeciwnie skierowane. Stwierdzenie to jest niczym innym, jak znanym z fizyki, prawem Archimedesusa odniesionym do układu kajak – woda.

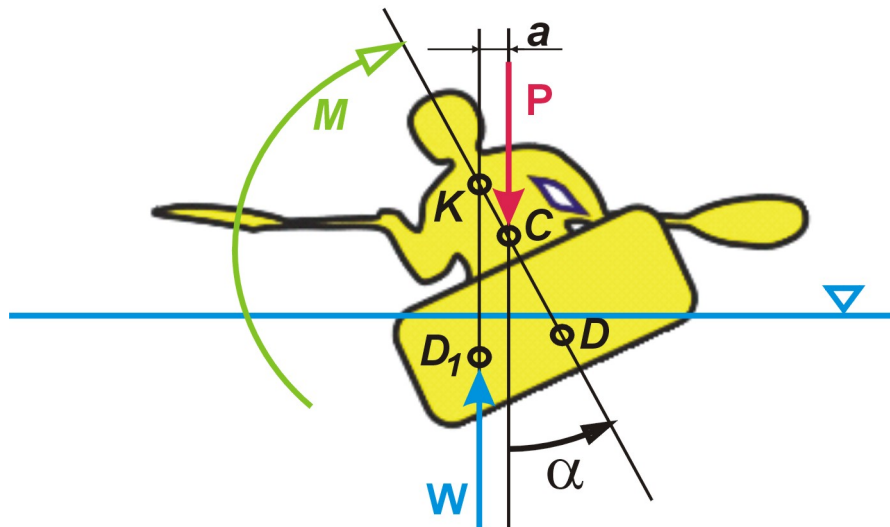
Dla pełnego obrazu warto jeszcze zaznaczyć, że wypór i ciężar, oprócz przeciwnych zwrotów, mają jeszcze jedną istotną różnicę. Rzecz leży w ich charakterze. Otóż wypór zależy od ciężaru, a nie odwrotnie. Mówimy, że ciężar jest siłą czynną, a wypór siłą bierną. W praktyce dostosowywanie się wyporu do ciężaru polega na zmianie zanurzonej części kajaka. Przy wzroście ciężaru kajak zanurza się głębiej, tym samym rośnie powierzchnia kontaktu kajaka z wodą, a w konsekwencji siły powierzchniowe i ich wypadkowa czyli wypór. Ot i cała tajemnica pływalności kajaka.

2. Dlaczego dno kajaka jest na dole a kokpit u góry?

Układ działających na kajak sił, przedstawiony na rysunku 3, przedstawia sobą tzw. **parę sił**. Jest to szczególny układ, w którym występują dwie siły o tych samych wartościach, tych samych kierunkach¹, ale o przeciwnych zwrotach. Z uwagi na wspomnianą wyżej cechę wyporu (siła bierna) ciężar i wypór zawsze będą tworzyły parę sił. W sytuacji przedstawionej na rys. 3, na którym nie występuje przechył kajaka, obie siły leżą na jednej prostej. Dodawanie tych sił daje zawsze wynik zerowy. Oznacza to, że nie zaobserwujemy żadnego efektu ich działania. Kajak pozostaje w spoczynku i zazwyczaj mówimy wtedy o równowadze statycznej.

¹ Kierunkiem nazywamy prostą, wzdłuż której działa siła. Proste równoległe mają ten sam kierunek.

Problem nieco skomplikuje się jeśli założymy przechył kajaka². Sytuację taką przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Ciężar i wypór przy przechyle kajaka.

Przechył kajaka o kąt α nie spowoduje zmiany sił wyporu i ciężaru. Będą one w dalszym ciągu równe co do wartości, będą miały przeciwne zwroty oraz będą miały ten sam kierunek. Spełniają więc wszystkie cechy pary sił. Jedyną różnicą, w stosunku do sytuacji bez przechyłu, związana jest z faktem, że siły nie leżą teraz na jednej prostej lecz na prostych równoległych. Wynika to ze zdefiniowanych uprzednio punktów przyłożenia sił skupionych.

Przechył kajaka nie spowoduje zmiany położenia środka ciężkości układu kajak – bagaż – kajakarz (*pamiętamy o założeniu sztywności układu*). Przy przechyle punkt C pozostanie więc w swoim pierwotnym położeniu.

Zupełnie inaczej jest ze środkiem wyporu - punkt D. Na skutek przechyłu zmiana ulega powierzchnia kontaktu wody z kadłubem kajaka, a tym samym w innym miejscu znajdzie się geometryczny środek części zanurzonej. Oznacza to, że siłę wyporu musimy teraz przyłożyć w punkcie D_1 .

Ta, często nieznaczna, zmiana położenia środka wyporu pociąga za sobą poważne konsekwencje. Zauważmy przede wszystkim, że pomimo zerowania się sumy sił, końcowy efekt ich działania nie będzie zerowy jak miało to miejsce, w omówionej już sytuacji, bez przechyłu. Nie wystąpi co prawda postępowe przemieszczenie kajaka³ niemniej para sił, nie leżących na jednej prostej, będzie powodowała obrót. Miarą tego działania jest **moment pary sił**. Jest to umowna wielkość pozwalająca na porównanie między sobą różnych par sił, podobnie jak np. prędkość pozwala na porównanie zmian położenia w czasie różnych kajaków lub masa na porównanie ich bezwładności. Wartość momentu pary sił jest równa iloczynowi siły i odległości pomiędzy równoległymi, na których leżą siły, tzn. $M = Pa = Wa$, gdzie „a” nazywane jest **ramieniem pary sił**. Oznacza to, że

² Przechył będziemy definiowali jako kąt zawarty pomiędzy osią pionową związaną z kajakiem a kierunkiem pionowym.

³ Dowolne przemieszczenie kajaka możemy zawsze rozpatrywać jako złożenie ruchów postępowych oraz ruchów obrotowych. W ruchu postępowym wszystkie punkty kajaka przemieszczają się identycznie po równoległych torach. Natomiast w ruchu obrotowym wszystkie punkty kajaka poruszają się po okręgach o wspólnym środku.

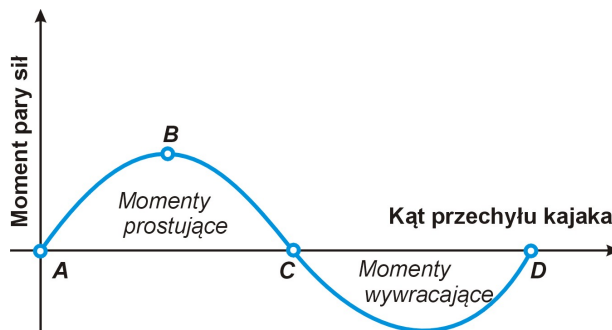
końcowy efekt działania ciężaru i wyporu zależy nie tylko od wartości tych sił, ale również, w tym samym stopniu, od ich wzajemnego położenia na prostych równoległych. Im większa odległość pomiędzy prostymi, na których leżą ciężar i wypór, tym większy moment pary sił, a tym samym bardziej wyraźny efekt ich działania.

Na rysunku 4 przedstawiono sytuację, w której powstający moment pary sił przeciwstawia się przechyłowi i dąży do ustawienia kajaka w pozycji bez przechyłu czyli stara się „wyprostować” kajak. Momenty, których efektem działania jest takie zachowanie się kajaka nazywamy **momentami prostującymi**. Jest to jednocześnie odpowiedź na postawione w tytule pytanie. Przechył kajaka powoduje zazwyczaj powstawanie momentów prostujących, które niezależnie od woli i działań kajakarza starają się utrzymać kajak w położeniu równowagi statycznej.

Przy omawianiu momentów prostujących niesposób pominąć milczeniem nieco inny sposób ich obliczania stosowany powszechnie w okrętownictwie oraz tradycyjnie przez żeglarzy. Otóż proste, na których leży siła wyporu, przy różnych kątach przechyłu, przecinają się w jednym punkcie. Punkt ten nosi nazwę metacentrum (na rys. 4 oznaczono go literą M). Odległość pomiędzy metacentrum i środkiem ciężkości nazwano wysokością metacentryczną. Wysokość metacentryczna związana jest z ramieniem pary sił zależnością trygonometryczną zawierającą kąt przechyłu co oznacza, że moment pary sił dla określonego kąta przechyłu można wyznaczać posługując się ramieniem pary sił lub zamiennie wysokością metacentryczną i kątem przechyłu.

3. Dlaczego „kabina” to obligatoryjny element kajakarstwa ?

Stwierdzenie, że przechył kajaka powoduje zazwyczaj powstawanie momentów prostujących, jest niestety prawdziwe tylko w pewnym zakresie początkowych kątów przechyłu. Kajak, podobnie jak każdą nawodną jednostkę pływającą⁴, można bezpiecznie przechylić tylko do pewnego kąta, po którego przekroczeniu obserwujemy zupełnie odmienny efekt działania pary sił. Zjawisko to zilustrowano na wykresie (rys. 5), na którym przedstawiono charakter zmian momentu pary sił w funkcji kąta przechyłu kajaka.



Rys. 5. Zmiana momentu prostującego w funkcji kąta przechyłu.

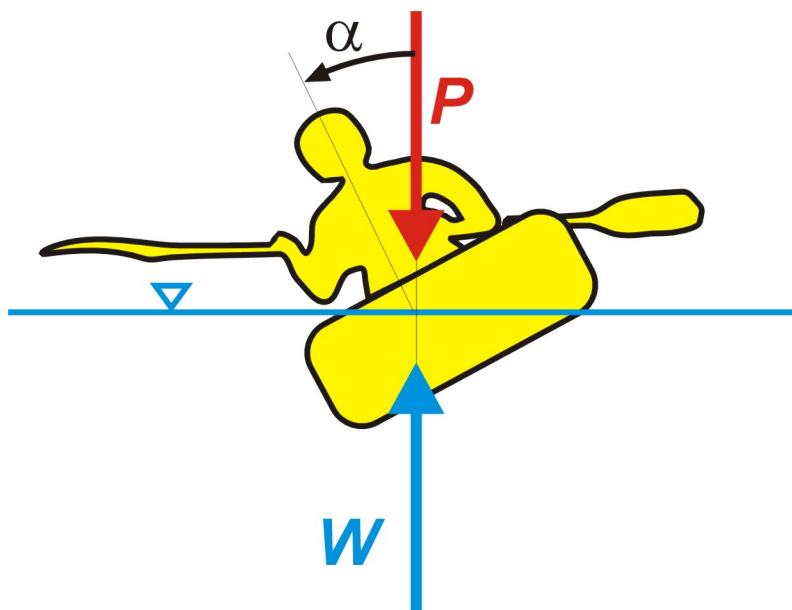
⁴ Pomijamy tutaj milczeniem nawodne jednostki pływające wyposażone w specjalnie konstruowane systemy balastowe pozwalające na zachowanie dodatnich momentów prostujących w praktycznie całym zakresie możliwych kątów przechyłu.

Nie sugerując się rzeczywistymi wartościami kąta przechyłu oraz odpowiadającym im wartościami momentu pary sił⁵, na krzywej momentów pary sił występuje zawsze kilka charakterystycznych punktów.

Punkt „A” odpowiada sytuacji przedstawionej na rys. 3. Wypór i ciężar leżą na jednej prostej co warunkuje zerową wartość momentu prostującego, a kąt przechyłu jest równy zeru⁶.

Zwiększanie kąta przechyłu powoduje wzrost ramienia pary sił, a tym samym wzrost momentu prostującego. Na rys. 5 momentowi temu nadano umownie wartości dodatnie. Wzrost momentu prostującego obserwujemy aż do kąta przechyłu odpowiadającego punktowi „B”. Jest to kąt, przy którym wystąpi maksymalny moment prostujący.

Po przekroczeniu punktu „B” wzrostowi kąta przechyłu będą towarzyszyły malejące wartości momentu prostującego. Po osiągnięciu punktu „C” moment pary sił jest ponownie równy zeru. Układ, występujących wtedy sił, zilustrowano na rys. 6. Ta charakterystyczna wartość kąta przechyłu nosi nazwę krytycznego kąta przechyłu. Jest to graniczna wartość kąta przechyłu, przy której kajak, po ustaniu przyczyny powodującej przechył, jeszcze samodzielnie powróci do wyjściowego stanu równowagi statycznej.

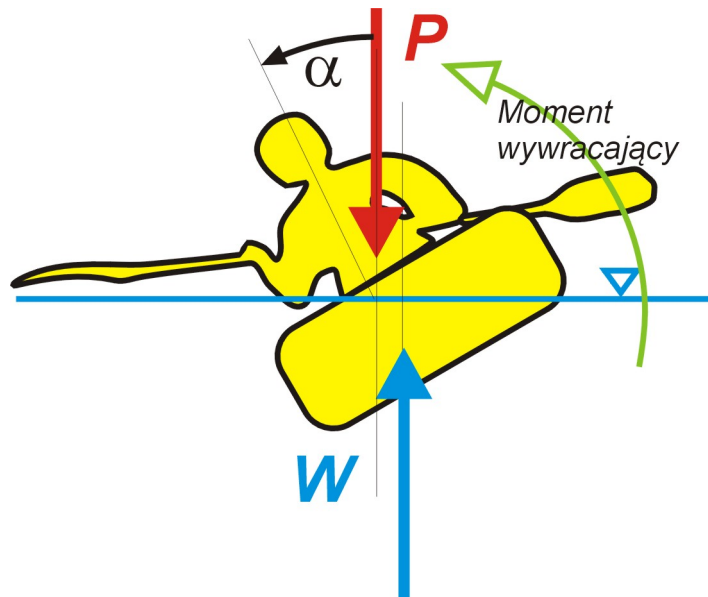


Rys. 6. Para sił przy krytycznym kącie przechyłu.

Konsekwencją dalszego zwiększania kąta przechyłu jest powstanie momentu pary sił o znaku przeciwnym niż moment prostujący czyli powstanie momentu wywracającego. Taką sytuację ilustruje rys 7.

⁵ Przebieg krzywej przedstawionej na rys. 5 oraz konkretne wartości momentów sił i kątów przechyłu zależą od kształtu kadłuba kajaka oraz stanu załadowania.

⁶ Przy niesymetrycznym załadowaniu kajaka, w położeniu równowagi statycznej, kąt ten może być różny od zera.



Rys. 7. Para sił po przekroczeniu krytycznego kąta przechyłu.

Wypór i ciężar będą teraz dążyć do ustawienia kajaka w nowym położeniu równowagi statycznej – dnem do góry. Jeśli w porę nie zastosujemy jakiegokolwiek techniki, zapobiegającej wzrostowi kąta przechyłu, wywrotka jest nieunikniona.

Analizując przebieg krzywej momentu pary sił nie zastanawialiśmy się nad przyczynami powodującymi przechył kajaka. Nie było zresztą takiej potrzeby. Podczas rzeczywistej eksploatacji kajaka przekroczenie krytycznego kąta przechyłu zdarza się aż nader często. W zdecydowanej większości przypadków są to przyczyny wynikające z ruchu kajaka. Rozważając statykę kajaka nie będziemy się nimi w tym miejscu zajmować. Tym niemniej, nawet w nieruchomym kajaku, nieumiejętne zachowanie się kajakarza może doprowadzić do przekroczenia bezpiecznego kąta przechyłu. Jakby nie było, wywrotka jest wkomponowana w kajakarstwo. Jeśli ktoś jeszcze jej nie miał to oznacza, że albo nie pływa kajakiem, albo jak dotychczas miał dużo szczęścia - ale to tylko kwestia czasu.

Wsiadając do różnych kajaków mamy zazwyczaj odmienne wrażenia co do ich stateczności⁷. W jednych czujemy się komfortowo niczym w fotelu. Nie musimy myśleć o utrzymaniu równowagi – kajak sam to robi. W innych każdy niopatrzny ruch grozi wywrotką, a są i takie, w których bez odpowiedniego przygotowania nie jesteśmy w stanie utrzymać równowagi. Domyślamy się, że tajemnica takiego, a nie innego zachowania kajaka tkwi w jego konstrukcji. Przjrzyjmy się jednak bliżej temu zagadnieniu patrząc na właściwości kajaka poprzez pryzmat działających na niego sił.

O charakterze naszych odczuć decydują momenty prostujące pojawiające się przy małych odchyleniach od stanu równowagi. Mówimy wtedy o stateczności początkowej kajaka. Jeśli występują duże momenty prostujące kajak jest odporny na niewielkie zakłócenia równowagi. To właśnie daje poczucie komfortu. Natomiast przy małych momentach prostujących kajak reaguje na każdy nasz ruch, zmuszając do nieustannej kontroli zachowania w kajaku.

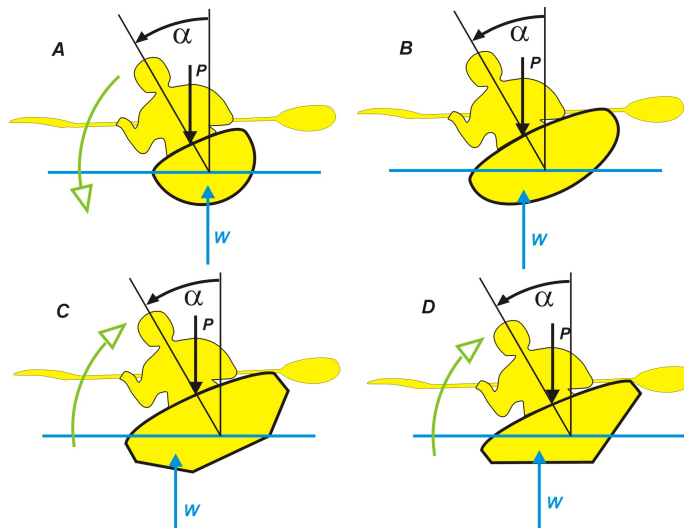
⁷ Statecznością nazywamy zdolność kajaka do zachowania stanu równowagi statycznej.

Nasuwa się tutaj jedna istotna, godna podkreślenia uwaga, że błędem byłaby ocena jakości kajaka na podstawie stateczności początkowej. Niewprawny kajakarz będzie prawdopodobnie poszukiwał kajaka o dużej stateczności początkowej, ale już np. przy pływaniu na fali duża stateczność początkowa jest raczej wadą niż zaletą. Właściwości kajaka muszą być dostosowane do warunków jego wykorzystywania. Rzecz jednak w tym jak uzyskać określoną cechę?

Rozwiązanie wydaje się proste. Mamy przecież do czynienia tylko z dwoma siłami. Na ciężar nie mamy tak naprawdę istotnego wpływu. Przy określonym stanie załadowania i masie kajakarza możemy co najwyżej tylko nieznacznie opuścić w pionie punkt przyłożenia tej siły, umieszczając jak najbliżej dna kajaka najbardziej masywne elementy bagażu. Jednak w praktyce, uzyskany w ten sposób efekt, nie da zauważalnych zmian w stateczności początkowej.

Wypór z kolei jest siłą bierną, zależną tylko od ciężaru, a więc również nie mamy wpływu na jego wartość. Pozostaje tylko jeden czynnik decydujący o stateczności początkowej. Na etapie projektowania kajaka mamy wpływ na położenie punktu przyłożenia siły wyporu czyli pośrednio na ramię momentu prostującego. Dokładniej mówiąc chodzi o przemieszczanie się środka wyporu przy przechyle kajaka. Jeśli mały przechył spowoduje duże przemieszczenie się środka wyporu uzyskamy wyraźny wzrost ramienia prostującego. W konsekwencji proporcjonalnie wzrośnie moment prostujący, a w końcowym efekcie stateczność początkowa kajaka.

Pamiętamy, że środek wyporu leży zawsze w geometrycznym środku zanurzonej części kadłuba kajaka. Jego przemieszczenie przy przechyle będzie więc zależało od kształtu przekroju poprzecznego⁸ kadłuba kajaka. W celu ilustracji powyższego stwierdzenia, na rys. 8 przedstawiono położenie środka wyporu, dla kilku hipotetycznych kształtów kadłuba, przy tym samym kącie przechyłu.



Rys. 8. Para sił przy różnych przekrojach poprzecznych kajaka.

⁸ Mówimy o stateczności poprzecznej kajaka stąd analizujemy jego przechyły na burty. W tym przypadku należy rozpatrywać przekroje poprzeczne. Jednak analogiczne rozważania można przeprowadzić dla stateczności wzdłużnej kajaka analizując jego przegłębienia na dziób i rufę. Wtedy pod uwagę należałoby brać przekroje wzdłużne kadłuba.

Nie wnikając w szczegóły, na rys. 8 wyraźnie widać, że istnieją dwa skrajne przypadki. Przy płaskim, szerokim dnie kajak posiada dużą stateczność początkową. Po przeciwnej stronie znajduje się kadłub o przekroju kołowym, którego stateczność początkowa jest równa zero.

Z powodu związku stateczności początkowej z kształtem zanurzonej części kadłuba, często zamiennie do stateczności początkowej używa się pojęcia stateczności kształtu. Warto przy tym zapamiętać, że charakterystyczną cechą wszystkich kajaków, niezależnie od ich kształtu i stanu załadowania, jest to, że środek ciężkości znajduje się zawsze powyżej środka wyporu.