

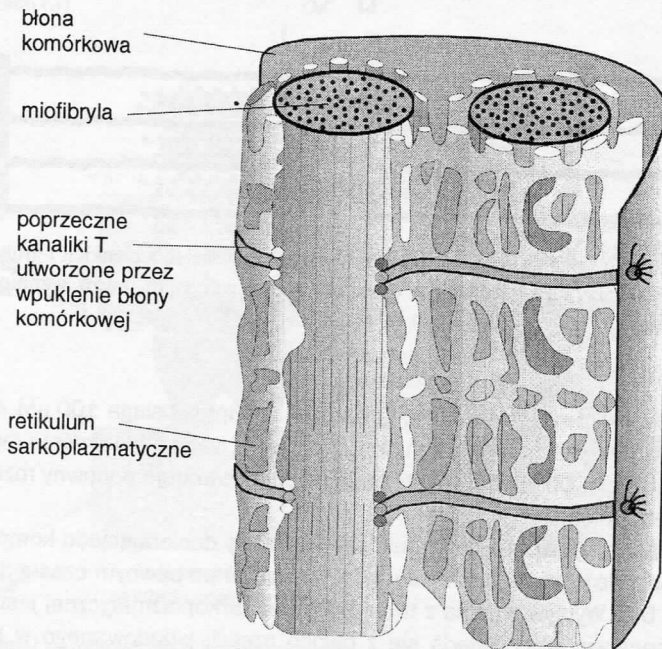
# 8

## MIĘŚNIE, TRANSPORT W KOMÓRCE, ORGANY ELEKTRYCZNE

### 8.1

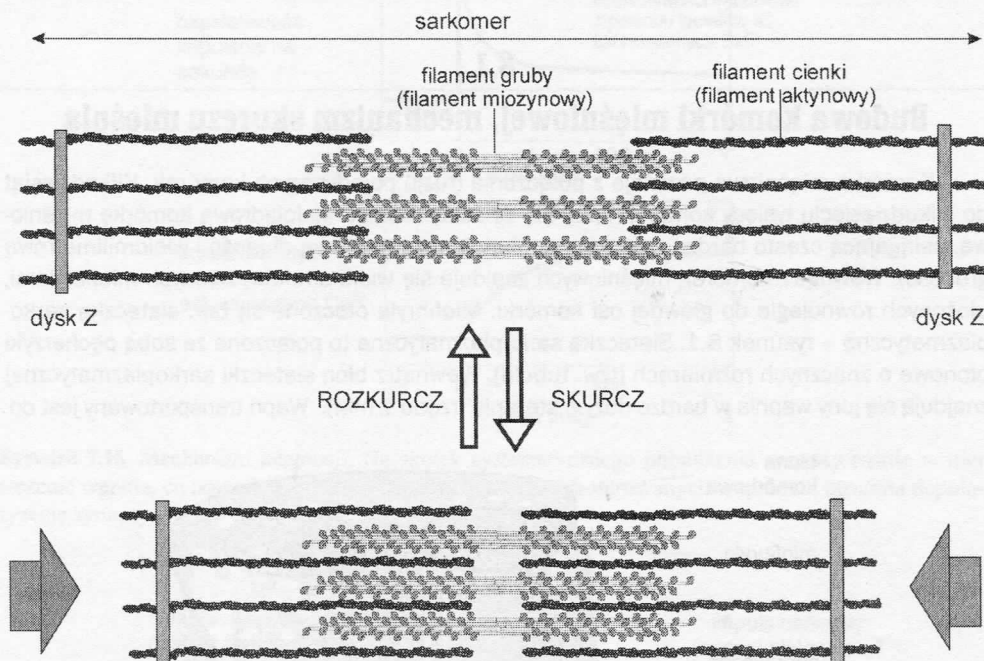
#### Budowa komórki mięśniowej, mechanizm skurczu mięśnia

Komórka mięśniowa powstaje z połączenia (fuzji) pojedynczych komórek. Kilkadziesiąt do kilkudziesięciu tysięcy komórek łączy się ze sobą tworząc wielojądrową komórkę mięśniową, osiągającą często bardzo znaczne rozmiary (nawet metrową długość i wielomilimetrową grubość). Wewnątrz komórek mięśniowych znajduje się wiele struktur, zwanych miofibrylami, ułożonych równoległe do głównej osi komórki. Miofibryle otoczone są tzw. siateczką sarkoplazmatyczną – rysunek 8.1. Siateczka sarkoplazmatyczna to połączone ze sobą pęcherzyki błonowe o znacznych rozmiarach (tzw. tubule). Wewnątrz błon siateczki sarkoplazmatycznej znajdują się jony wapnia w bardzo dużym stężeniu (rzędu 1 mM). Wapń transportowany jest do



**Rysunek 8.1.** Miofibryle otoczone są siateczką sarkoplazmatyczną, w której zgromadzone jest duże stężenie jonów wapniowych

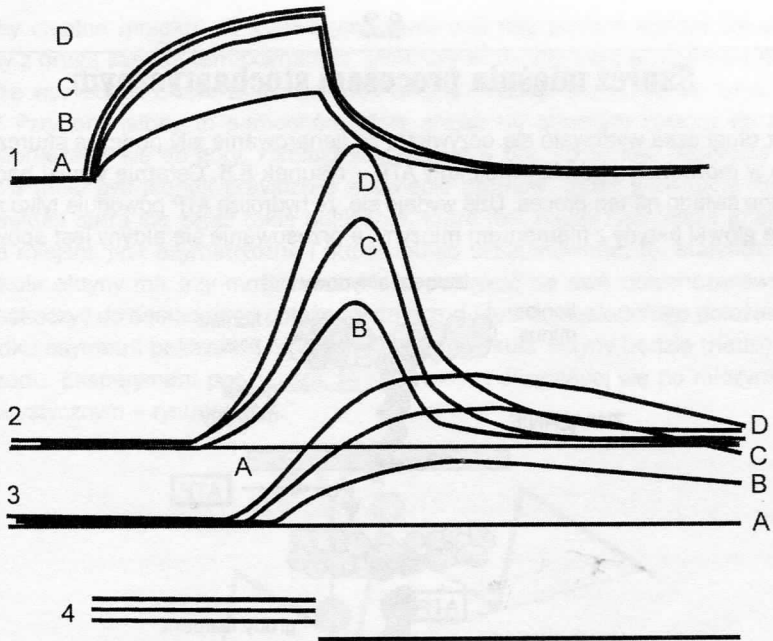
wnętrza tubul przez pompę wapniową (Ca-ATPazę). Miofibryle są układem filamentów grubych (miozyny) i filamentów cienkich (aktyny). Wewnątrz cytoplazmy komórek mięśniowych (podobnie jak i innych komórek) jest bardzo małe stężenie jonów wapniowych (rzędu kilkudziesięciu nM). Pod wpływem pojawiającego się dużego stężenia jonów wapnia filamety cienkie przesuwają się po filamentach grubych i długość miofibryli ulega skróceniu (mięsień się kurczy) – rysunek 8.2. Już przy wzroście stężenia wapnia do  $1 \mu\text{M}$  miofibryle zaczynają się kurczyć.



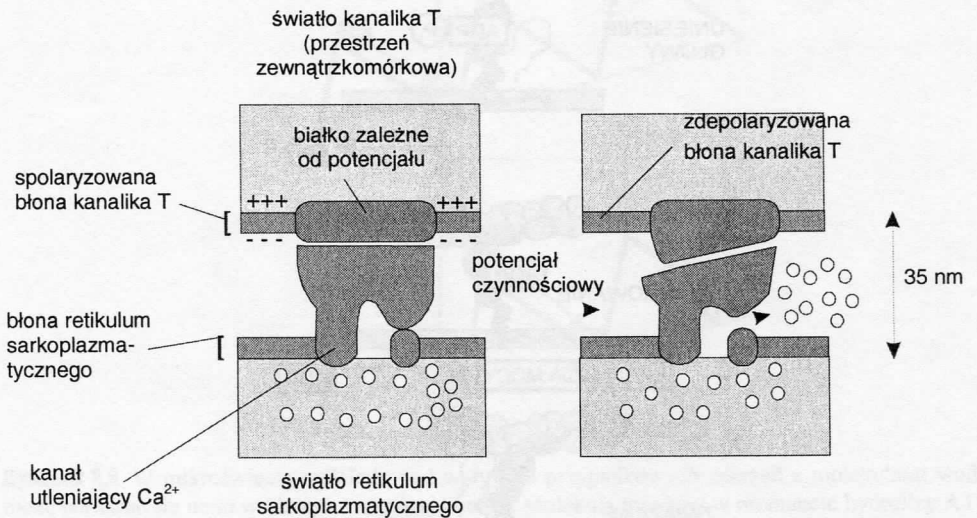
**Rysunek 8.2.** Miofibryle składają się z sarkomerów, a te zbudowane są z cienkich i grubych filamentów. Filamety cienkie połączone są ze sobą w dyskach Z. Pod wpływem jonów wapniowych filamety cienkie ślizgają się po filamentach grubych i sarkomer ulega skróceniu

Miofibryle są całkowicie skurczone, gdy stężenie wapnia osiąga  $100 \mu\text{M}$ . Tuż po skurczu mięśnia pracę rozpoczyna pompa wapniowa, a stężenie wapnia w komórce i w pobliżu miofibryli szybko obniża się. Obniżenie się stężenia wapnia powoduje ponowny rozkurcz miofibryli i relaksację całego mięśnia.

Doświadczalnie wykazano, że impuls czynnościowy docierający do komórki mięśniowej najpierw prowadzi do wzrostu stężenia jonów wapnia, a po pewnym czasie do skurczu mięśnia – rysunek 8.3. Wpływ wapnia z tubul siateczki sarkoplazmatycznej jest spowodowany przez kanał wapniowy, który składa się z dwóch części: wbudowanego w błonę siateczki kanału i związanej z nią części czulej na zmiany potencjału elektrycznego, wbudowanej w tzw. kanaliki T będące wpukleniami błony komórkowej – rysunek 8.4.



**Rysunek 8.3.** Pod wpływem bodźca stymulującego o różnej intensywności (4) w komórce mięśniowej następuje depolaryzacja komórki (1), nieco później pojawia się wzrost stężenia wapnia (2), a później napina się mięsień (3)

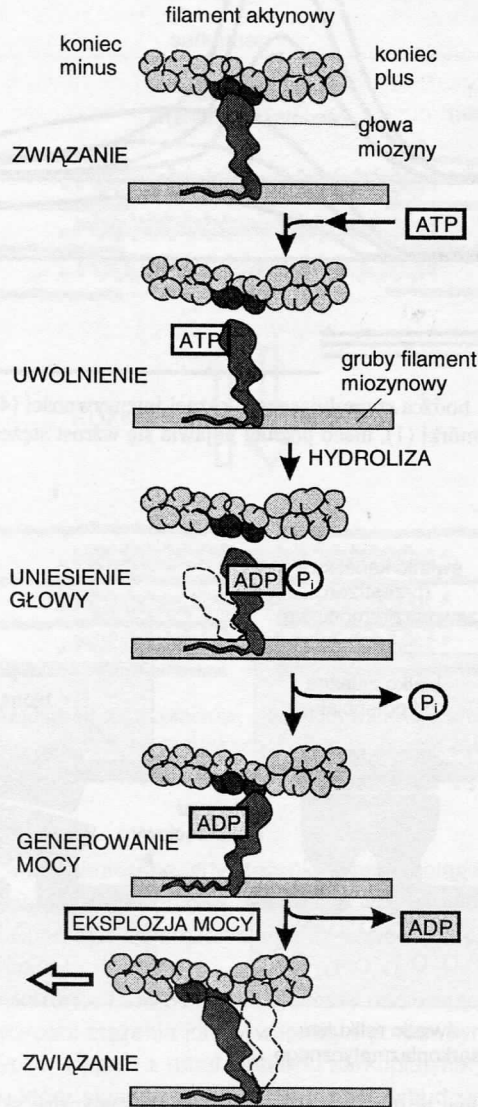


**Rysunek 8.4.** Kanał wapniowy w tubulach siateczki sarkoplazmatycznej składa się z dwóch części: wbudowanej w kanaliki T błony komórkowej i wbudowanej w tubule. Pod wpływem zmiany potencjału na błonie komórkowej kanał ulega otwarciu i wypuszcza jony wapnia zgromadzone w tubulach

8.2

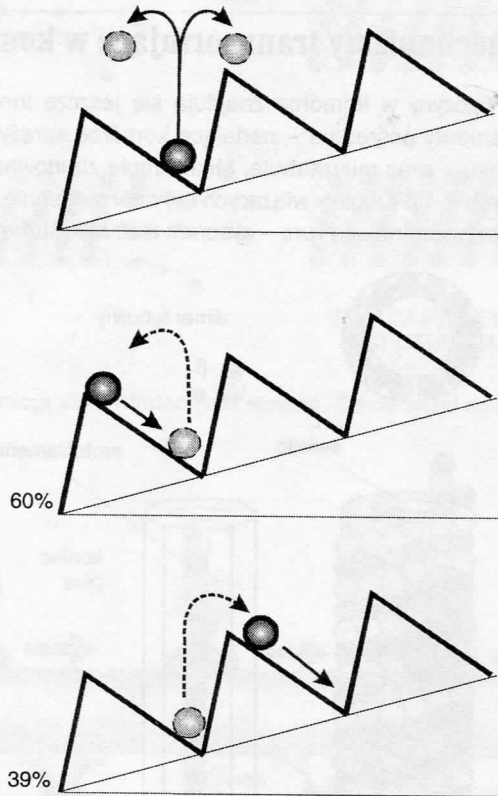
**Skurcz mięśnia procesem stochastycznym**

Przez długi czas wydawało się oczywiste, że generowanie siły podczas skurczu mięśnia następuje w momencie hydrolizy molekuly ATP – rysunek 8.5. Ostatnie wyniki badań rzuciły całkiem inne światło na ten proces. Dziś wydaje się, że hydroliza ATP powoduje tylko rozerwanie połączenia główki aktyny z filamentem miozyny, a przesuwanie się aktyny jest spowodowane

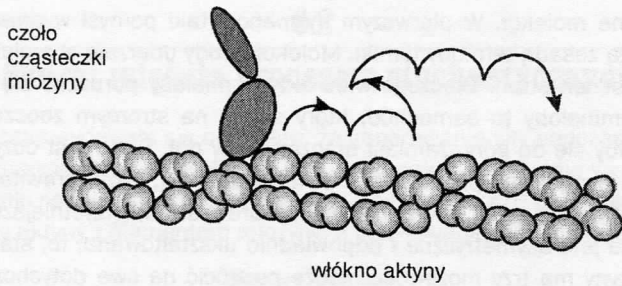


**Rysunek 8.5.** Kolejne etapy przesuwania się molekuly aktyny po miozynie (obraz klasyczny). Siła jest generowana w momencie hydrolizy ATP

przez ruchy cieplne molekuł. W pierwszym momencie taki pomysł wydaje się absurdalny i sprzeczny z drugą zasadą termodynamiki. Molekuły wody uderzają w molekułę aktyny chaotycznie, ze wszystkich stron. Dlaczego więc aktyna miałaby poruszać się tylko w jednym kierunku? Przypominałoby to samochód, który stojąc na stromym zboczu po zwolnieniu hamulca poruszałby się do góry, zamiast staczać się w dół. To co jest oczywiste w makroświecie, nie musi być jednak prawdziwe w świecie atomów, gdzie grawitacja nie odgrywa roli, a molekuła stara się zająć takie położenie, które jest najkorzystniejsze energetycznie. Jeżeli owo miejsce jest asymetryczne i odpowiednio ukształtowane, to, statystycznie ujmując, molekuła aktyny ma trzy możliwości: może powrócić na swe dotychczasowe miejsce, może przeskoczyć do sąsiedniego położenia do przodu lub do sąsiedniego położenia do tyłu. W przypadku asymetrii pokazanej na rysunku 8.6 molekuła aktyny będzie (netto) poruszała się do przodu. Eksperyment potwierdził, że ruch aktyny ślizgającej się po miozynie jest procesem statystycznym – rysunek 8.7.



**Rysunek 8.6.** W mikroświecie molekuła pod wpływem przypadkowych zderzeń z molekułami wody może poruszać się netto w kierunku rosnącej energii. Molekuła miozyny w momencie hydrolizy ATP oddziela się od aktyny. Zanim zwiąże się ponownie z aktyną, wykonuje ruch chaotyczny do przodu lub do tyłu na różną odległość (górny rysunek). Budowa główki miozyny i aktyny powoduje, że zwiążanie może nastąpić w tym samym miejscu (60%), o jedno położenie do przodu (39%) lub o jedno położenie do tyłu (1%) (niepokazane)

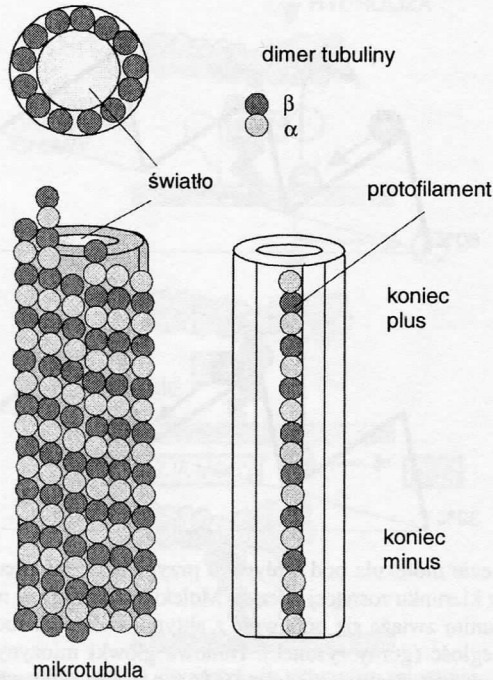


**Rysunek 8.7.** Eksperyment wykazał, że molekula miozyny ślizga się po aktynie na sposób stochastyczny (częściej do przodu niż do tyłu). Na rysunku pokazane są kolejne położenia główki miozyny. Bardzo rzadko obserwowano przeskok o dwa położenia do przodu

### 8.3

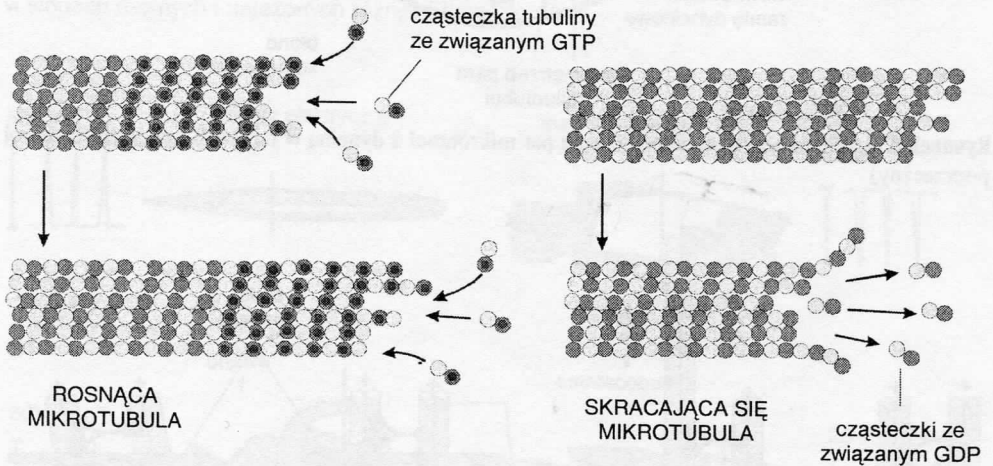
## Inne mechanizmy transportujące w komórkach

Oprócz aktyny i miozyny w komórce znajdują się jeszcze inne struktury zbudowane z długich molekuł: filamenty pośrednie – nadające komórce sprężystość i łączące ze sobą komórki, np. w nabłonku – oraz mikrotubule. Mikrotubule zbudowane są z dwóch rodzajów podjednostek białkowych  $\alpha$ - i  $\beta$ -tubuliny wiążących się naprzemiennie ze sobą, a jednocześnie tworzących strukturę przypominającą rurę – rysunek 8.8. Mikrotubule w komórce podlegają

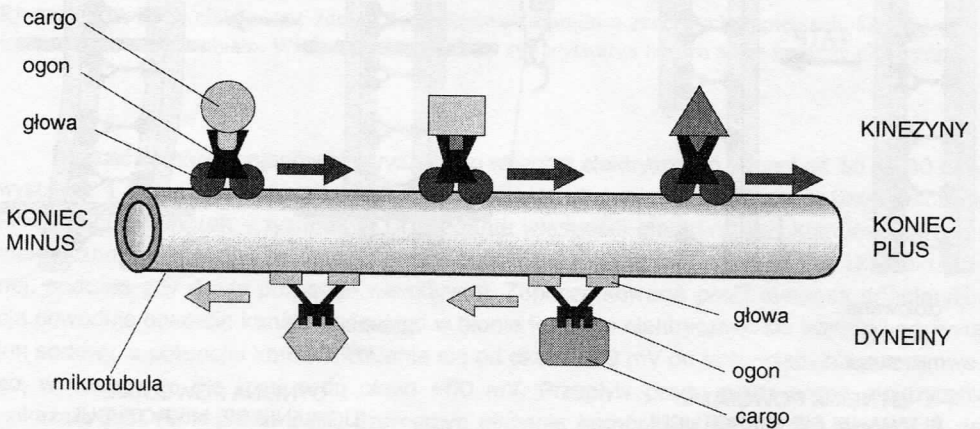


**Rysunek 8.8.** Mikrotubule składają się z dimeru tubulin ułożonych w struktury liniowe i połączone ze sobą w formie rury

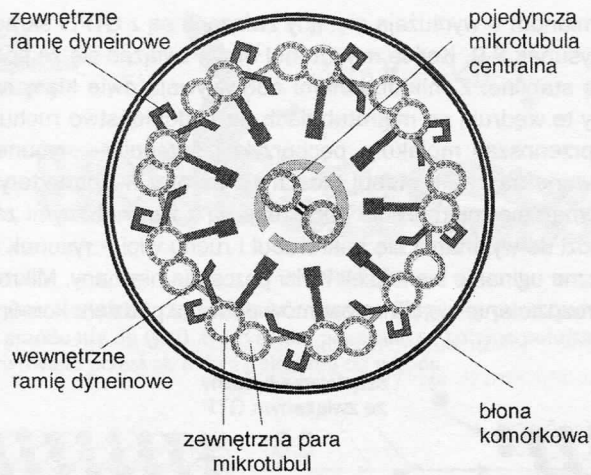
dynamicznym przemianom – wydłużają się, gdy związane są z GTP, i skracają się, gdy połączone są z GDP – rysunek 8.9. Końce mikrotubul mogą związać się ze specjalnym białkiem i wówczas stają się stabilne. Z mikrotubulami oddziałują dwie klasy molekuł – dyneiny i kinezy. Molekuły te wędrują po mikrotubulach na podobieństwo ruchu aktyny po miozynie, jednocześnie przenosząc molekuły, pęcherzyki i organelle – rysunek 8.10. Również rzęski i wici zbudowane są z mikrotubul ułożonych parami w charakterystyczną strukturę (rysunek 8.11). Zewnętrzne mikrotubule połączone są z wewnętrznymi za pomocą dynein. Ruch dynein prowadzi do wyginania się mikrotubul i ruchu wici – rysunek 8.12. Mechanizm koordynujący rytmiczne uginanie się rzęsek i wici pozostaje nieznan. Mikrotubule są również odpowiedzialne za rozdzielanie się chromosomów podczas podziału komórki.



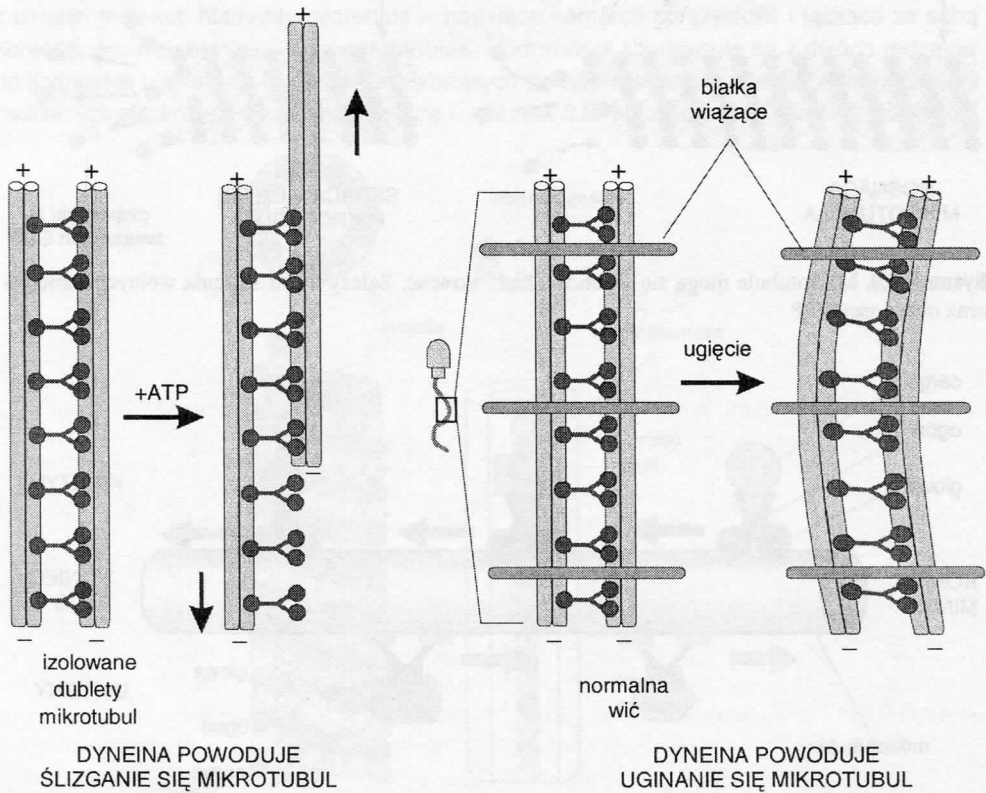
**Rysunek 8.9.** Mikrotubule mogą się wydłużać bądź skracać. Zależy to od stężenia wolnych dimerów oraz obecności GTP



**Rysunek 8.10.** Po mikrotubulach odbywa się dwustronny transport pęcherzyków, organelli i molekuł w komórkach



**Rysunek 8.11.** Charakterystyczne połączenie par mikrotubul z dyneiną w rzęskach i wiciach (przekrój poprzeczny)



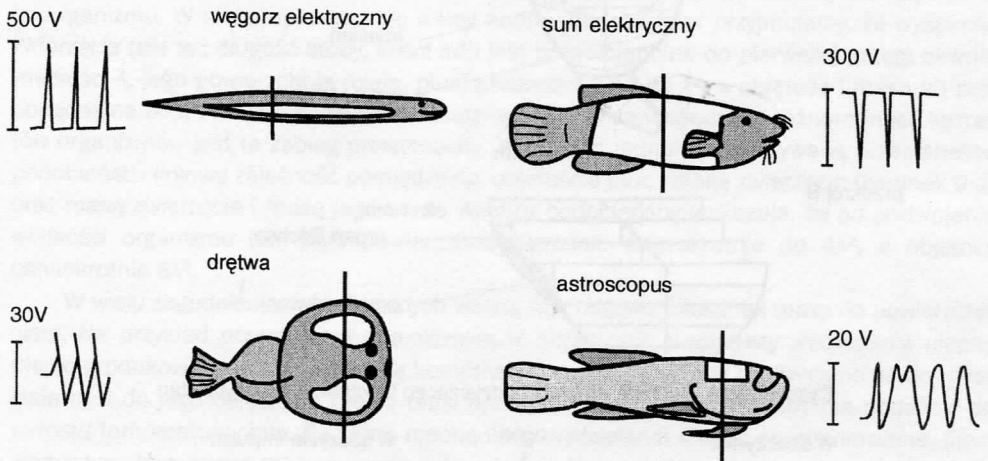
**Rysunek 8.12.** Dyneiny przytwierdzone do mikrotubul powodują ślizganie się mikrotubul po sobie. Jeżeli dwie mikrotubule są do siebie przytwierdzone, to ruch dynein powoduje uginanie się pary mikrotubul



## 8.4

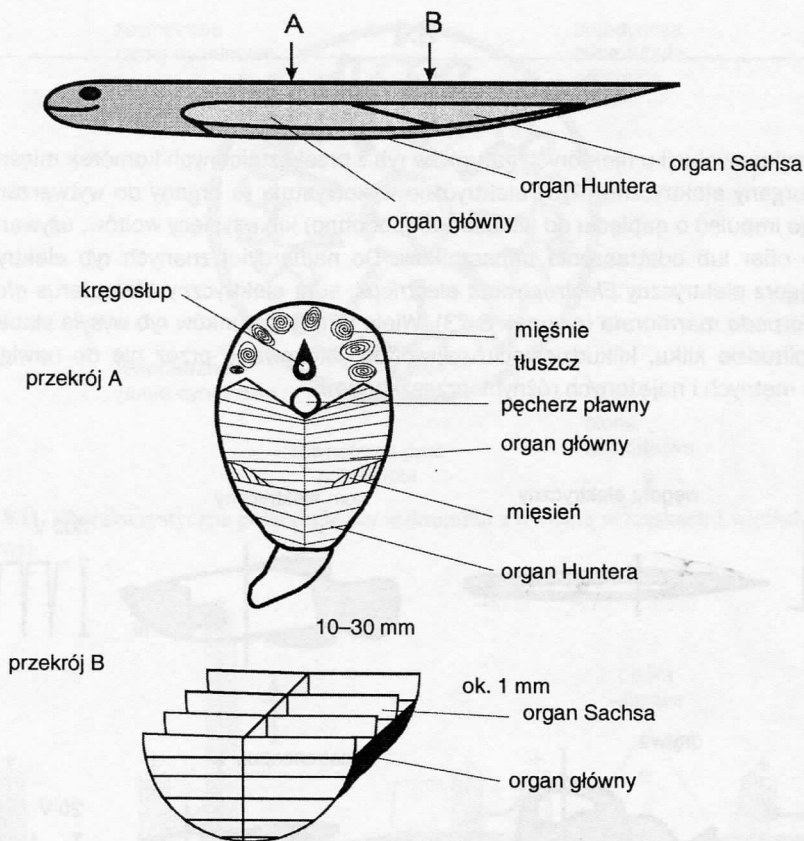
## Organy elektryczne u ryb

W wyniku ewolucji u niektórych gatunków ryb z przekształconych komórek mięśniowych powstały organy elektryczne. Ryby elektryczne wykorzystują te organy do wytwarzania bardzo silnego impulsu o napięciu od kilkuset do (podobno) kilku tysięcy woltów, używanego do porażania ofiar lub odstraszenia napastników. Do najbardziej znanych ryb elektrycznych należą węgorz elektryczny *Electrophorus electricus*, sum elektryczny *Malapterus electricus* i drętwa *Torpedo marmorata* (rysunek 8.13). Wiele innych gatunków ryb wysyła słabe impulsy (o amplitudzie kilku, kilkudziesięciu miliwoltów) stosowane przez nie do nawigowania w wodach mętnych i najeżonych różnymi przeszkodami.

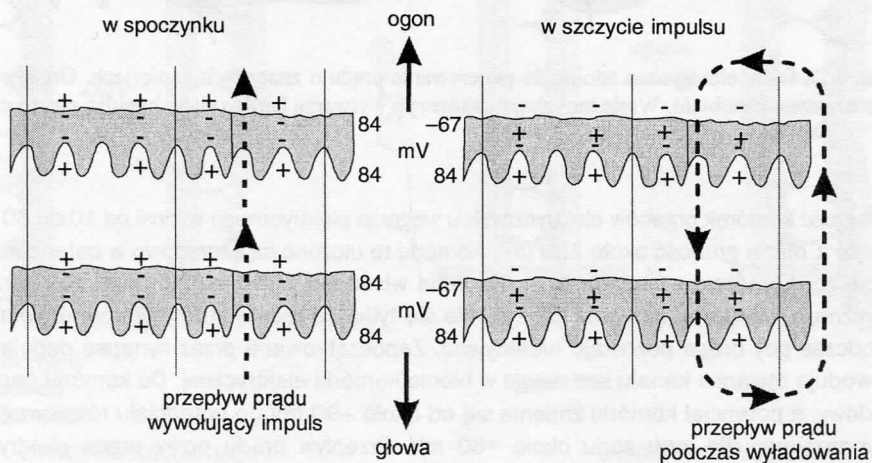


**Rysunek 8.13.** Ryby elektryczne zdolne do generowania prądu o znacznych napięciach. Organy elektryczne oznaczone na biało. Wiele innych gatunków ryb wytwarza bardzo słabe impulsy elektryczne

Długość komórek organów elektrycznych u węgorza elektrycznego wynosi od 10 do 30 mm, wysokość 1 mm a grubość około 100  $\mu\text{m}$ . Komórki te ułożone są szeregowo w baterię liczącą kilka tysięcy komórek – rysunek 8.14. Badania własności elektrycznych komórek narządu elektrycznego wskazują, że potencjał zmienia się tylko po jednej stronie komórki elektrycznej, podczas gdy druga pozostaje nieaktywna. Zapoczątkowana przez synapsę depolaryzacja powoduje otwarcie kanału sodowego w błonie komórki elektrycznej. Do komórki napływa jon sodowy, a potencjał komórki zmienia się od około  $-90\text{ mV}$  do potencjału równowagowego, wynoszącego dla jonu sodu około  $+60\text{ mV}$ . Przepływ prądu przez organ elektryczny pokazany jest na rysunku 8.15. Szeregowe ułożenie komórek elektrycznych powoduje, że powstająca całkowita różnica potencjałów jest sumą potencjałów wszystkich komórek, z których każda wytwarza około 150 mV.



Rysunek 8.14. Budowa organu elektrycznego u węgorza elektrycznego



Rysunek 8.15. Zmiana polaryzacji komórek u węgorza elektrycznego. Tylko jedna strona komórek ulega depolaryzacji w momencie impulsu. Różnica potencjałów przez komórkę zmienia się z wartości 0 do +150 mV