

# Nowe spojrzenie na histologię i anatomię mięśni – wyniki analiz histologicznych, anatomicznych oraz badań ultrasonograficznych

Muscles – histology, micro/macroanatomy and US anatomy,  
a brand new perspective

## Zbigniew Czyrny

Lek. med. Zbigniew Czyrny, Praktyka Prywatna, Michałów Grabina, Polska  
www.czyrny.pl  
E-mail: zbigniew.czyrny@wp.pl



Zbigniew Czyrny

### Podziękowania

*Panu Profesorowi Maciejowi Pronickiemu, za wykonane preparaty histologiczne mięśnia trójgłowego łydki szczura, które były momentem przełomowym dla mojego zrozumienia struktury mięśni.*

*Pracę tę dedykuję Panu doktorowi Markowi Prorokowi, mojemu uniwersyteckiemu nauczycielowi anatomii.*

### Acknowledgments

*I would like to specially thank Professor Maciej Pronicki M.D. Ph.D. who prepared a set of custom histological specimens on my request which allowed me to understand the muscle structure and clear my doubts about it.*

*I dedicate this paper to my university anatomy teacher – Marek Prorok M.D.*

## Streszczenie

Celem pracy było przedstawienie histologii i anatomii mięśni szkieletowych. Artykuł celowo pomija strefę przyczepów mięśni.

Materiał i metoda:

Analizie poddano wybrane pozycje literatury, preparaty histologiczne mięśnia trójgłowego łydki szczura, przekroje anatomiczne Visible Human Project, ponad 1000 wykonanych w ciągu ostatnich 11 lat badań usg mięśni.

Wyniki:

Mięśnie są zbudowane z dwóch podstawowych z punktu widzenia ich funkcji tkanek – mięśniowej i łącznej, czyli ścięgnistej. Pozostałe typy tkanek obecne w jednostce mięśniowo-ścięgnistej są związane z obecnością naczyń krwionośnych, nerwów i tłuszczu.

Mięśnie szkieletowe posiadają dwa systemy ścięgna. System ścięgniasty pierwszy, nazywany endomysium lub śródmięsną, ściśle opłaszcza całą powierzchnię włókna mięśniowego przyczepiając się do niego na każdym poziomie błon granicznych Z sarkomerów (system złącz mięśniowo-ścięgniastych ściennych – ZMSS) oraz kotwiczny część swoich włókien pomiędzy włóknkami mięśniowymi na początku i końcu włókna mięśniowego (system złącz mięśniowo-ścięgniastych terminalnych – ZMST). Przyczep powłoki ścięgniastej endomysium do włókna mięśniowego na każdym poziomie błony granicznej Z sarkomeru pozwala na przeniesienie na ścięgno siły generowanej przez skurcz komórki mięśniowej. Endomysium poprzez tak ścisły związek z włóknem mięśniowym jako struktura o charakterze ścięgniastym spełnia jeszcze jedną, nie mniej istotną rolę – chroni włókno mięśniowe, naczynia włosowate i nerwy przed rozerwaniem.

System ścięgniasty drugi nazywany perimysium lub omięsną wzmacnia strukturę mięśnia biegnąc pomiędzy włóknami endomysium (zespolony z nimi) przez cały brzusiec mięśniowy, a jego podstawową funkcją jest ochrona struktur życiowych mięśnia – naczyń krwionośnych i nerwów oraz oczywiście

samych włókien mięśniowych. Oba systemy są nieprzerwaną kontynuacją ścięgna i powstają poprzez delaminację włókien ścięgniastych na poziomie brzośca mięśniowego. Tak zdefiniowane dystrybutory włókien endomysium i perimysium autor nazywa rdzeniami ścięgniastymi. Rdzenie ścięgniaste mogą być ostatecznymi dystrybutorami włókien ścięgniastych mięśnia (endomysium i perimysium) jednak w obrębie niektórych mięśni jako cecha stałej anatomii lub jako odmiana anatomiczna od rdzeni ścięgniastych odchodzą w głąb brzośca silne pasma ścięgniaste nie będące ani endo- ani perimysium, lecz dystrybutorami tych ostatecznych pasm ścięgniastych. Takie pasma autor określa mianem rdzeni ścięgniastych drugorzędowych. Wyróżnia się dwa podstawowe typy rdzeni ścięgniastych – półpierzaste i pierzaste. Rdzenie półpierzaste biegną po powierzchni brzośca mięśniowego i dystrybuują włókna endomysium i perimysium na jedną stronę. Takie rdzenie są zazwyczaj bardzo szerokie. Rdzenie pierzaste biegną wewnątrz brzośca i dystrybuują włókna na obie swoje strony. Wiele mięśni posiada rdzenie ścięgniaste zmieniające swoją pierzastość na różnych poziomach mięśnia.

Wnioski:

Struktury ścięgniaste mięśnia zachowują w swej większości (wyjątkiem są pasma endomysium kotwiczone w złączach mięśniowo-ścięgniastych terminalnych włókien mięśniowych) nieprzerwaną ciągłość pomiędzy przyczepami.

Budowa systemu ścięgniastego mięśnia wskazuje na to, że strefy złącz mięśniowo-ścięgniastych terminalnych nie są najsłabszym ogniwem jego struktury.

Zerwania w przebiegu urazów rozciągających mięśni zawsze dotyczą struktury ich tkanki ścięgniastej i mogą wystąpić na różnych poziomach – ścięgna, rdzenia ścięgniaste, endomysium oraz perimysium.

## Summary

The aim of the study: to present histology and anatomy of skeletal muscles. Article intentionally does not analyze enthesal region.

Materials and methods:

Selected positions of literature, histological specimens of a rat triceps surae muscle, anatomical sections of Visible Human Project and over 1000 US muscle examinations performed by author within last 11 years were analyzed.

Results:

Muscles are built of two basic types of tissue – connective or tendinous and muscular. Other types of tissues present within musculo-tendinous unit are related to presence of blood vessels, nerves and fat. Muscles have two tendinous systems. First system called endomysium tightly wraps up the whole surface of myofiber attaching to it at every sarcomeric Z membrane level and also anchors some fibers in its terminal myotendinous junction at the beginning and end of the myofiber. Endomysial attachment at every Z membrane level along the myofiber allows force transmission from myofiber onto tendinous system during contraction. Endomysium as a tendinous structure plays another, no less important, role being so tightly attached to the myofiber – it protects the myofiber, its capillaries and nerves against an overstretch injury. Second tendinous system called perimysium reinforces the muscle belly structure running between endomysial tendinous fibers through the muscle belly and its primary function is to protect vital structures of a muscle – myofibers, nerves and blood vessels. Both systems are a direct continuum of tendons and are distributed by a delamination of tendons at the level of a muscle belly. These tendinous distributors of endomysial and perimysial fibers are called “core tendons” in this paper. Core tendons can be final distributors of tendinous fibers (endomysium and perimysium) into the muscle but in some muscles either as anatomical feature or as anatomical variants core tendons give secondary strong tendinous bands which are neither endomysium nor perimysium but distributors of endomysium and perimysium. Those are called here – “secondary core tendons”. There are basically two types of core tendons – semipennate and pennate. Semipennate cores run on the surface of muscle and distribute fibers on one side only, they are usually wide. Pennate or pinnate core tendons run inside the muscle belly and distribute tendinous fibers on both sides. Many muscles have both types of core tendons which can change their pennation during their course.

Muscle is a tendon delaminated into perimysium and endomysium at the muscle belly level with muscular fibers attached to the endomysial system.

Conclusions:

Tendinous structures of a muscle are continuous from the origin to the insertion. The only exception are these fibers of endomysium that anchor at the terminal myotendinous junctions – at the beginning and end of the myofiber.

Built and tear patterns of muscles indicate that terminal myotendinous junctions are not the weakest link of muscle structure.

Tearing of muscle following overstretch injury always involve tendinous tissue and may occur at all tendinous levels – tendon, core tendon, perimysium and endomysium.

## Słowa kluczowe

mięśnie, histologia, anatomia, ultrasonografia

## Key words

muscle, histology, anatomy, ultrasound

## Cel pracy

Celem pracy było przedstawienie struktury histologicznej i anatomicznej i funkcji mięśni szkieletowych, z wyjątkiem stref przyczepów mięśni.

## Materiał i metoda

Analiza materiału na którym oparto pracę:

- Pozycje literatury 1-8,
- Preparaty histologiczne mięśnia trójgłowego łydki szczura,
- Przekroje anatomiczne Visible Human Project (9),
- Ponad 1000 wykonanych w ciągu ostatnich 11 lat badań usg mięśni.

### Histologia, anatomia i funkcja mięśni

Mięśnie szkieletowe składają się z tkanki mięśniowej, łącznej czy ścięgnistej, nerwowej, nabłonkowej oraz tłuszczowej. Przedmiotem głównego zainteresowania tej pracy są tkanki mięśniowa i ścięgnista.

Włókna mięśniowe poprzecznie prążkowane (myofibra transversostriata) to wielojądrzaste komórki powstające z mioblastów. Pojęcia komórka mięśniowa i włókno mięśniowe są tożsame. Według różnych źródeł grubość włókien mięśniowych waha się w granicach 10-100 $\mu$ m, a długość w granicach 1 mm-kilkadziesiąt cm. Włókno/komórka mięśniowa otoczona jest cienką błoną plazmatyczną – sarkolemmą. Na zewnątrz od sarkolemmy znajduje się błona podstawna będąca już częścią ścięgnistej powłoki włókna mięśniowego – endomyzium.

## Aim of the study

The aim of the study is finding out the truth of musculo-tendinous unit histoanatomy structure based on selected histological and anatomical literature positions and own observations based on US muscle examinations.

## Materials

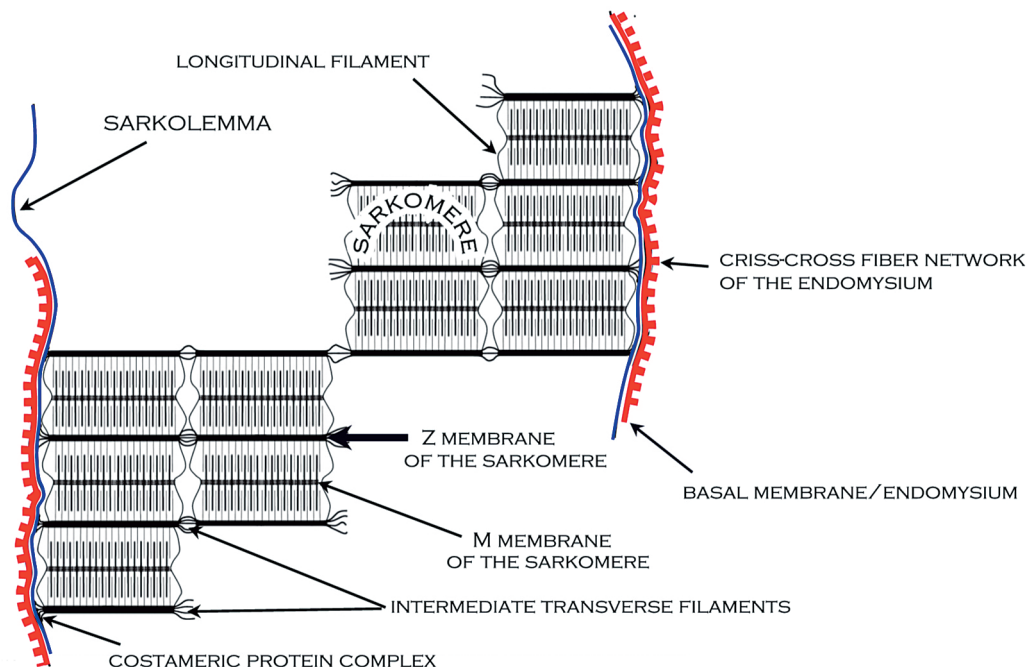
Materials for this study were:

- Literature positions 1-8,
- histological specimens of rat's triceps sure muscle,
- Visible Human Project anatomical sections (9),
- Over 1000 skeletal muscle examinations performed within the last 11 years.

### Histology, anatomy and function of muscles

Skeletal muscles consist of muscular tissue, tendinous tissue, nervous tissue and epithelial tissue with some adipose tissue. The first two are of main interest in this paper.

Striated myofibers (myofibra transversostriata) are multinuclear cells derived from myoblasts. According to various sources their thickness ranges between 10 and 100 $\mu$ m and length from 1 mm to over 30 cm. A myofiber or myocell is covered by a thin plasmatic membrane – sarkolemma. Another layer outside sarkolemma is the basal membrane which already is a part of tendinous endomysium (fig. 1, 2, 3, 4). The space between sarkolemma and basal membrane/endomysium is called



Ryc. 1. Schemat budowy włókna mięśniowego. Longitudinal filament – filament podłużny, intermediate transverse filaments – filamenty pośrednie poprzeczne, basal membrane of endomysium – błona podstawna endomysium, criss-cross fiber network of the endomysium – włókna kratkowe/kożycowate endomysium, Z membrane of the sarcomere – błona graniczna Z sarkomeru, M membrane of the sarcomere – błona graniczna M sarkomeru, costameric protein complex – kompleks białkowy kostameru.

Fig. 1. Schematic details of the myofiber structure.

sium (ryc. 1, 2, 3, 4). Przestrzeń pomiędzy sarkolemą i błoną podstawną endomysium (macierz zewnątrzkomórkowa) ma szerokość ok. 30 nanometrów ( $30 \times 10^{-9}$  m) i jest wypełniona kompleksem mikrofilamentów oraz lepkiimi glikozaminoglikanami, które są dodatkowym, poza białkowym kompleksem integrzyn, (ryc. 2, 3) spoiwem pomiędzy błoną komórkową (sarkolemą) i endomysium (1,2).

Endomysium zawiera naczynia włosowate (kapilary), drobne nerwy motoryczne i współczulne, fibroblasty, histocyty i włókna kolagenowe typu III i IV ułożone w kratkową sieć (1). Kratkowy, czy nożycowy układ włókien kolagenowych endomysium pozwala komórce mięśniowej na zmianę długości i grubości podczas skurczu i napięcia kiedy to siła skurczu sarkomerów przenoszona jest na endomysium na poziomach błon granicznych Z sarkomerów oraz na jej ochronę przed nadmiernym uszkodzającym rozciągnięciem (ryc. 7).

Perimysium, czy śródmięśnia to dodatkowy system ścięgniasty mięśnia zbudowany z włókien kolagenowych typu II i III (3), który nie kotwiczy włókien w złączu mięśniowo-ścięgnistym terminalnym włókna mięśniowego tylko biegnie pomiędzy włóknami mięśniowymi i ich endomysium ściśle się z nim zespalając (ryc. 2, 4). Perimysium i endomysium powstają niejako przez delaminację ścięgien/rdzeni ścięgniastych lub biegną bezpośrednio od/do rozległych przyczepów kostnych.

Ściągno na poziomie brzuśca mięśniowego (strefa delaminacji na endomysium i perimysium) jest definiowane przez autora jako „rdzeń ścięgniasty” dla podkreślenia jego ścięgnistego charakteru i jednocześnie dla wyróżnienia odcinka brzuścowego ścięgna, który jest strefą delaminacji jego włókien, a zatem początkiem endomysium i perimysium.

Inaczej rdzenie ścięgniaste są dystrybutorami włókien ścięgniastych (endomysium) kotwiczonych w końcach włókna mięśniowego i biegnących po powierzchni każdego włókna mięśniowego oraz włókien ścięgniastych (perimysium) biegnących pomiędzy włóknami mięśniowymi i zespolonych z endomysium.

the extra cellular matrix. It is approx. 30 nanometers ( $30 \times 10^{-9}$  m) wide and is filled with a dense matrix of filaments and glue-like glycosaminoglycans that are additional to integrins (fig. 2, 3) bond between the cellular layer of sarkolemma and tendinous endomysium (1,2).

Endomysium contains, capillaries, fine motor and sympathetic nerve branches, fibroblasts, histiocytes and a criss-cross collagen type III and IV fiber network which forms its outer layer (1). Collagen criss-cross organization of the endomysium allows the myofiber to change length and thickness during stretch and contraction when transmitting force from each Z sarcomeric membrane level and protect it against an overstretch injury (fig. 7).

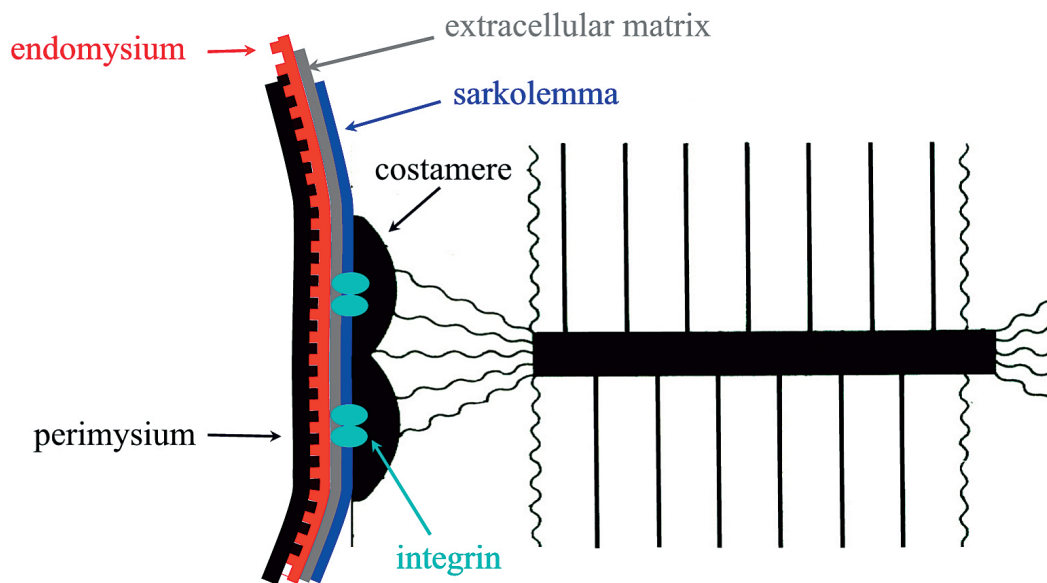
Perimysium is an additional tendinous system made of collagen type I and III (3) which doesn't anchor any fibers in the terminal myotendinous junction of the myofiber but runs between endomysial fiber covers being tightly interweaved with them (fig. 2,4).

Perimysium and endomysium are in fact bands of delaminated tendons/core tendons or derive directly from vast bone insertions.

Tendon at the level of muscle belly (delamination zone into endomysium and perimysium) is defined here as “core tendon” just to underline that it is the same tendon but at the level where fibers of endo- and perimysium leave it to invest muscle belly or are collected from it to fuse back and form a tendon. In other words core tendons are distributors of tendinous fibers of endomysium that partly anchor into the terminal MTJ and partly cover each myofiber and perimysium that runs between endomysium being tightly fused with it.

Using another perspective endomysial bands running on the surface of the myocell and perimysium bands are continuum of tendinous tissue from origin to insertion (fig. 8-10).

Endomysium and perimysium are rich in nociceptors (4) which most likely makes them responsible for disseminated muscular pain when overtrained, whatever that means structurally.



Ryc. 2. Schemat kotwiczenia błony granicznej Z sarkomeru – złącze mięśniowo-ścięgniaste ścienne.

Fig. 2. Schematic image of the sarcomeric Z membrane anchoring system – the parietal myotendinous junction.



Jeszcze inaczej pasma endomysium biegnące po powierzchni włókna mięśniowego oraz pasma perimysium w sposób nieprzerwany łączą rdzenie ścięgniaste lub rdzenie ścięgniaste i bezpośrednie przyczepy kostne, lub bezpośrednie przyczepy kostne po obu stronach brzucha (ryc. 8-10).

Endomysium i perimysium są bogato unerwione przez nocyceptory (4) co jest najprawdopodobniej odpowiedzialne za uogólnioną bolesność mięśni po ich przetrenowaniu, cokolwiek to oznacza strukturalnie.

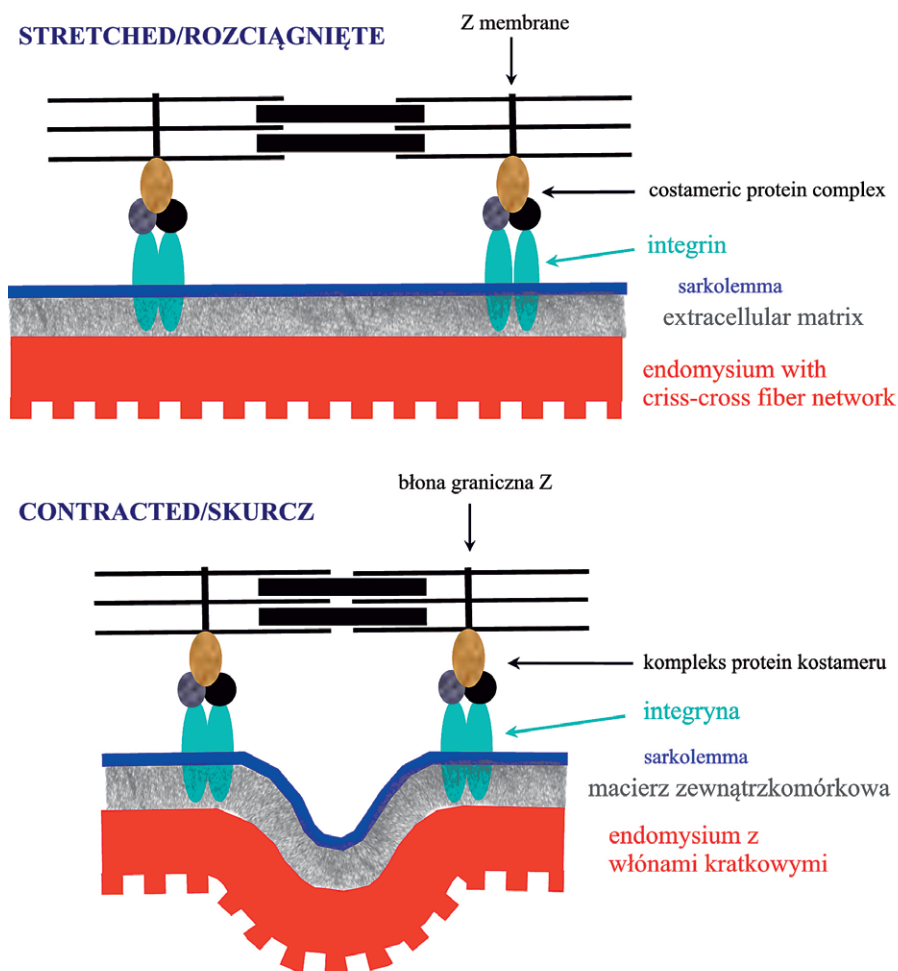
Zdolność mięśni do skurczu/napięcia i wydłużenia/relaksacji jest mylna z ich elastycznością. W fizyce elastyczność czy sprężystość to właściwość materiału do powrotu do swojego pierwotnego kształtu po tym jak ustało działanie czynnika go odkształcającego, podczas gdy skurcz i rozkurcz to nic innego, jak skracanie i wydłużanie włókien mięśniowych/mięśnia.

Zdolność mięśni do skracania/wydłużania bez uszkodzenia ma szeroki zakres i wynosi ok. +/- 40% ich długości w stanie relaksacji (2). Maksymalne skrócenie mięśnia jest ograniczone zdolnością sarkomerów do skurczu. Jego maksymalna długość jest ograniczona przez zdolność jego włókien mięśniowych do relaksacji oraz przez struktury ścięgniaste mięśnia chroniące włókna mięśniowe przed nadmiernym rozciągnięciem. Należy pamiętać, że całkowita relaksacja mięśni moż-

Ability of muscles to shrink/contract and elongate/relax is confused with their elasticity. In physics, elasticity is the physical property of a material that returns to its original shape after the stress that made it deform is removed. Contraction and relaxation are simply elongation and shortening of myofibers.

Ability of muscles to shorten and reach maximal length/stretch without contusion has a wide range of approx. +/-40% of its relaxed state (2). Maximal shortening of a muscle is limited to sarcomeric ability to contract but its maximal length is limited by tendinous structures reinforcing and protecting myofibers against an overstretch and by the ability of myofibers to relax. Full muscular relaxation can be achieved by anesthesia or during REM phase of sleep. So maximal muscle stretch ability is dependable on muscular relaxation, tendinous maximal length and tendinous stretch ability. That as we know from literature ranges somewhere around 4% (4) to 6% (3) of a tendon length. Stretch elongation of a tendon more than that causes damage of fibers. And when a tendon (endomysium and perimysium) protecting muscular fiber is torn the fiber and all its supporting structures are damaged with it. Then we encounter an irreversible structural damage – a tear.

Fundamental contractile element of the muscle is a sarcomere. Sarcomeres consist of M membrane with



Ryc. 3. Skracanie się włókna mięśniowego podczas skurczu. Na podstawie Engel&Franzini-Armstrong (2004).

Fig. 3. Shortening of the myofiber during contraction. Based on Engel&Franzini-Armstrong.

liwa jest tylko w fazie REM snu oraz po znieczuleniu. Elastyczność ścięgien w zależności od źródła mieści się w granicach 4% (5) do 6% (3). Wydłużenie włókien ścięgniastych ponad tę barierę owocuje ich uszkodzeniem i co za tym idzie – uszkodzeniem komórek mięśniowych i wszystkich struktur im towarzyszących, jeżeli dochodzi do uszkodzenia endo- i perimysium. Mamy wówczas do czynienia z naderwaniem/zerwaniem – to już deformacja nieodwracalna.

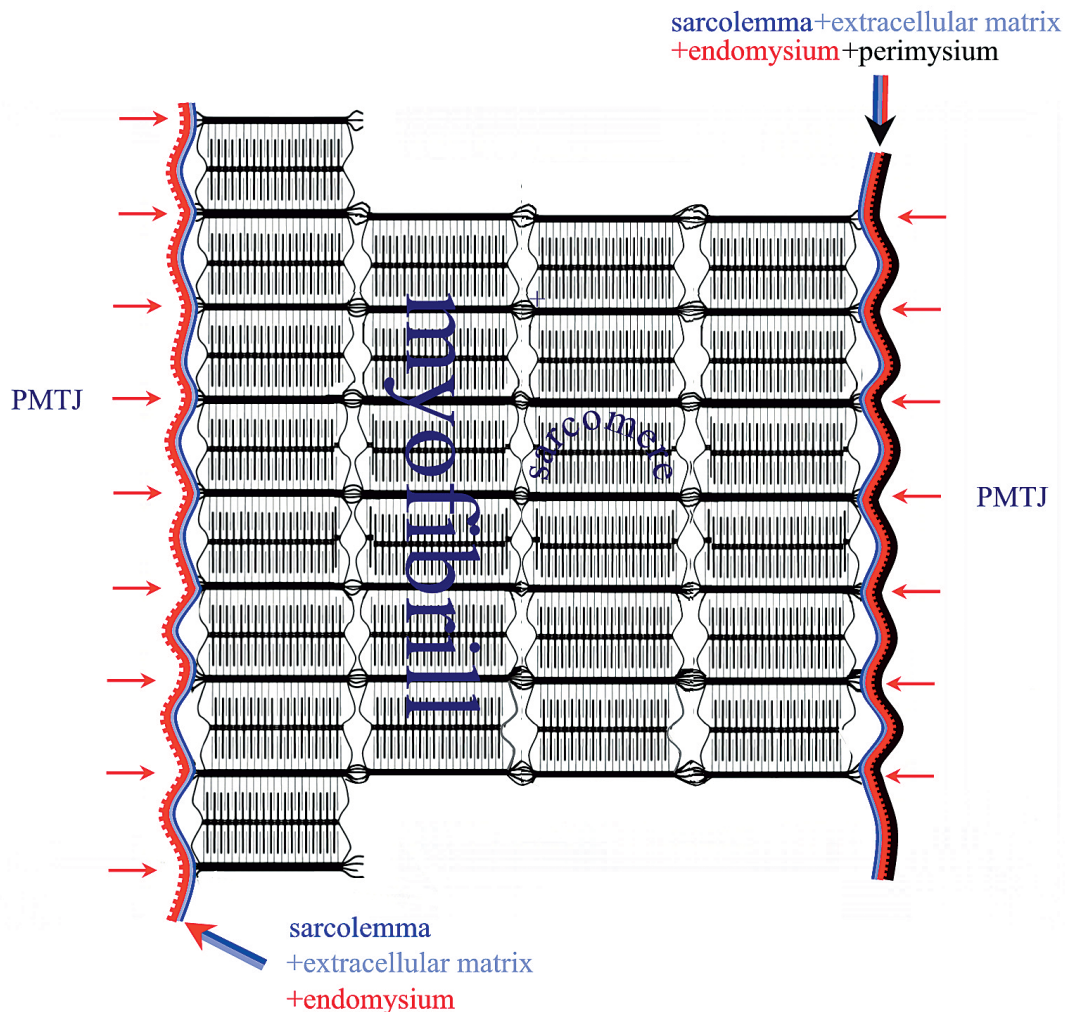
Podstawowym elementem/jednostką kurczliwą mięśnia jest sarkomer. Sarkomery składają się z błon granicznych M z przytwierdzonymi do nich elementami miozyny oraz błon granicznych Z z przytwierdzonymi do nich elementami aktyny. Aktyna i miozyna odpowiadają za skurcz i relaksację sarkomeru/mięśnia. Błony graniczne M i Z połączone są ze sobą filamentami podłużnymi, które spełniają między innymi rolę podstawowych na tym poziomie elementów chroniących sarkomer przed nadmiernym wydłużeniem czyli rozerwaniem, jednocześnie ograniczając je od boków (2,5).

Sarkomery łączą się jeden z drugim w pionie poprzez wspólne błony graniczne Z tworząc długie „pociągi”, gdzie każdy sarkomer spełnia rolę lokomotywy. Pociągi takie odpowiadają włóknikom mięśniowym. Ich dłu-

myosin filaments attached to it and Z membrane with actin filaments attached to it. Actin and myosin do all the shortening and lengthening job in the muscle fiber. M and Z membranes are connected by longitudinal filaments which act as primary overstretch protectors at this level wrap sarkomeres up from the sides (2,5) (fig. 1). Sarkomeres attach to one another by Z membranes which are common to two sarkomeres forming long sarcomeric trains called myofibrils. Trains where every sarkomere is a locomotive. Myofibrills are as long as the whole myofiber. Muscle fiber has ability to add or delete sarkomeres to/from myofibril.

Sarkomeres attach to the neighboring sarkomere/myofibril or the inner wall of the myofiber (costameric protein complex) by means of intermediate transverse filaments (fig. 1). So connected myofibrills make packages that wrapped up in plasmatic membrane (sarkolemma) form a striated myofiber (myofibra transversostriata).

To attach to the sarcoplasmatic wall of the myofiber and the tendinous endomysium covering it, a complex of intermediate transverse filaments attaches Z membrane of sarkomere to a protein complex called costamere which further connects to plasmatic membrane and the outside extra cellular matrix/endotenon via a complex cal-



Ryc. 4. Złącze mięśniowo-ścięgniste ścienne (ZMSS) na poziomie każdej błony granicznej Z sarkomeru. W ludzkich komórkach mięśniowych jest ok. 500 takich złącz na każdy 1mm długości włókna w stanie relaksacji.

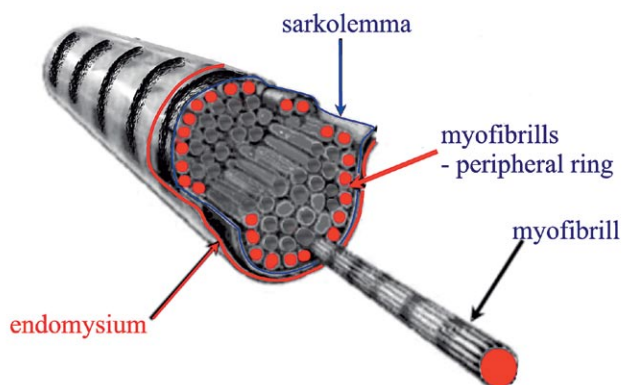
Fig. 4. Parietal myotendinous junctions (PMTJ) at each level of the Z membrane. There are 500 of PMTJ's per 1mm of a relaxed human muscle.

gość odpowiada długości całej komórki mięśniowej. Komórka mięśniowa ma zdolność dokładania i wycinania sarkomerów do/z włókienek mięśniowych.

Sarkomery łączą się między sobą i do ściany komórkowej (kompleksu białkowego – kostameru) za pośrednictwem filamentów pośrednich poprzecznych (ryc. 1). Tak połączone sarkomery/włókienka mięśniowe tworzą włókna mięśniowe poprzecznie prążkowane (myofibra transversostriata) lub komórki mięśniowe.

W celu przyczepu włókienek mięśniowych do błony sarkoplazmatycznej i dalej do endomysium kompleks filamentów pośrednich poprzecznych przyczepia błonę Z sarkomeru do kompleksu białkowego o nazwie kostamer, który bezpośrednio przyczepia się do sarkolemmy. Zespolona z kostamerem integryna (kompleks białek), łączy sarkolemmę z macierzą zewnątrzkomórkową i endomysium (ryc. 2, 3). Jest to faktycznie element systemu złącz mięśniowo-ścięgnistych (ryc. 3) nazywany przez autora złączem mięśniowo-ścięgnistym ściennym (ZMSS) i jest głównym sprzęgłem, za pomocą którego siła skurczu włókienek mięśniowych przekładana jest na system ścięgnisty mięśnia poprzez endomysium. Tak więc sarkomer skracając się podczas skurczu przekłada jego siłę (ryc. 3) na każdym poziomie błony granicznej Z na ścięgniste endomysium (1,3), zespolone z nim perimysium (ryc. 2, 3, 4) i dalej na rdzeń ścięgnisty/ścięgnisto i ostatecznie przyczep mięśnia lub bezpośrednio na przyczep mięśnia.

Podczas procesu skurczu włókno mięśniowe marszczy i kurczy się segmentalnie jak robi to wiele robaczek, na przykład dżdżownica. Różnica między dżdżownicą i komórką mięśniową jest taka, że robak kurczy swoje segmenty sekwencyjne żeby pełznąć, mięsień natomiast kurczy się na całej swojej długości, żeby się skrócić i zbliżyć do siebie ścięgna powlekające go, bądź je napiąć i utrzymać w zadanej długości. Zjawisko to dotyczy złącza mięśniowo-ścięgnistego ściennego. Warto zauważyć, że zgodnie z informacją z podręcznika anatomi-



Ryc. 5. Schemat włókna mięśniowego. Pokolorowane na czerwono włókienka obwodowe/peryferyjne – jedyne, które przenoszą siłę skurczu sarkomerów bezpośrednio na ścianę komórkową/endomysium. Na podstawie Gray's Anatomy (2005).

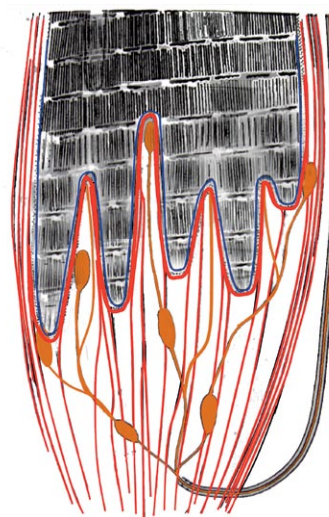
Fig. 5. Schematic drawing of the myofiber. Myofibrills of the peripheral ring are the only ones that attach directly to the wall of the fiber thus directly transmits force to the tendinous sheath – the endomysium. Based on Gray's anatomy.

led integrin (fig. 2, 3). That system is called here a parietal myotendinous junction (PMTJ) and is a main force transmitter from contracting myofiber onto a tendinous system (fig. 3). So a sarkomere when shortening during contraction transmits force onto the tendinous endomysium/perimysium (1,3) (fig. 2, 3, 4) and further onto a core tendon (or insertion), tendon and finally insertion.

During that process a myofiber shrinks segmentally like many worms do. The difference between a worm and muscle fiber is that a worm shrinks its segments one by one to crawl when the myofiber shrinks them all at one time to shorten and to pull the tendons attached to its surface. That is what happens at the parietal myotendinous junctions. It is worthy noticing that according to Grey's a human sarkomere length is approx.  $2\mu\text{m}$  at rest ( $1\mu\text{m}=1\times 10^{-6}\text{m}=1\times 10^{-3}\text{mm}$ ). That means there are about 500 parietal myotendinous junction levels at the length of 1 mm of the myofiber!!!

The interesting structural feature of myofiber is that the only myofibrils transmitting their contraction force directly onto the endomysium at PMTJ are those which are located peripherally within a myofiber (fig. 5). All other myofibrils within a myofiber transmit the contracting force through their outside neighbors or through terminal MTJ's. This may be the reason why myofibers trained so much to reach thickness close to  $100\mu\text{m}$  start to divide longitudinally as probably their internal myofibrils are no longer effective in force transmission.

The terminal myotendinous junction (TMTJ) is formed by endomysium fibers inserting in between the ends of myofibrils covered by typical myocell membranes but in this area sarcomeric actin filaments penetrate into a dense



Ryc. 6. Schemat złącza mięśniowo-ścięgnistego terminalnego (ZMST). Na czerwono zakodowane włókna endomysium z włóknami ścięgnistymi zakotwiczonymi pomiędzy dystalnymi/proksymalnymi sarkomerami włókienek mięśniowych. Na brązowo zakodowane elementy systemu nerwowego (propriocepcyjnego). Na podstawie Engel&Franzini-Armstrong (2005).

Fig. 6. Schematic terminal myotendinous junction (TMTJ). Red-coded are the fibers of the endomysium with fibers anchored between distal/proximal sarkomeres of the myofibrils. Nervous proprioceptive organ system is brown-coded. Based on Engel&Franzini-Armstrong.

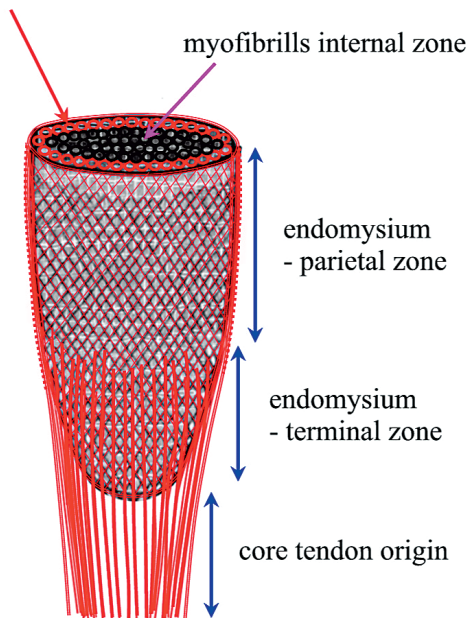


mii Gray's ludzki sarkomer ma  $2\mu\text{m}$  długości w stanie relaksacji ( $1\mu\text{m}=1\times 10^{-6}\text{m}=1\times 10^{-3}\text{mm}$ ). To oznacza, że na długości 1mm komórka mięśniowa posiada ok. 500 poziomów złącz mięśniowo-ścięgnistych!!!

Interesującą cechą strukturalną włókna mięśniowego jest to, że jedynymi włóknkami bezpośrednio przenoszącymi siłę skurczu na ścianę komórkową/endomysium (czyli rzeczywiście tworzącymi złącze mięśniowo-ścięgniste ścienne) są te położone na obwodzie włókna mięśniowego (ryc. 5). Wszystkie inne włóknka włókna mięśniowego przenoszą siłę swojego skurczu na złącze mięśniowo-ścięgniste ścienne (ZMSS) pośrednio przez sąsiadujące włóknka mięśniowe lub bezpośrednio poprzez złącza mięśniowo-ścięgniste terminalne (ZMST) położone na początku i końcu komórki mięśniowej. Być może to jest powodem, dla którego włókna wytrenowanego mięśnia osiągające średnicę  $100\mu\text{m}$  zaczynają się podłużnie dzielić. Przy takiej grubości włókna pakiety wewnętrznych włókienek przestają zapewne efektywnie funkcjonować w systemie przeniesienia siły skurczu na ścięgno/endomysium.

Złącze mięśniowo-ścięgniste terminalne (ZMST) tworzone jest przez włókna odchodzące od rdzeni ścięgnistych/przyczepów kotwiczonych pomiędzy końcowymi odcinkami włókienek mięśniowych powleczone jak palczaste wypustki przez błonę komórkową oraz endomysium (ryc. 6). Jednak w tym rejonie poza typowym systemem kotwienia błon granicznych Z poprzez kompleksy kostamerów i integryn do ściany komórkowej i endomysium dochodzi

myofibrills - peripheral ring



Ryc. 7. System ścięgnisty włókna mięśniowego – endomysium. Nożycowaty/siateczkowy układ włókien endomysium pozwala na elastyczność tej powłoki przy maksymalnym rozciągnięciu/wydłużeniu i skurczu/skróceniu, kiedy to włókno jest odpowiednio najcieńsze i najgrubsze.

Fig. 7. Tendinous system of the myofiber – endomysium. Criss-crossed fibers of the endomysium allow flexibility of the fiber between the state of maximum stretch/lengthening and a maximum contraction/shortening which make the fiber become thin or thick respectively.

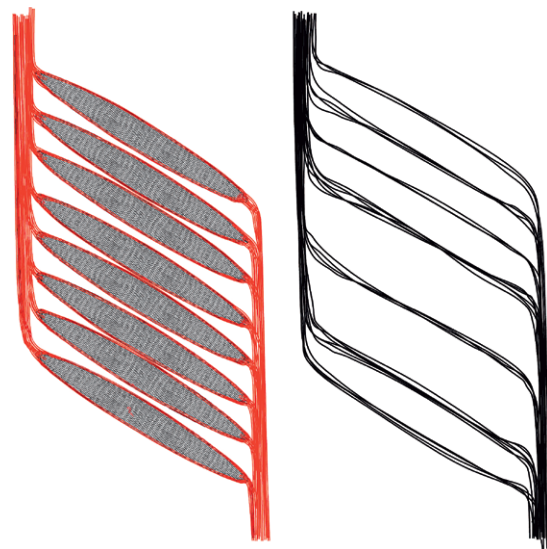
subsarcolemmal filamentous matrix that attaches to sarcolemma. Outside sarcolemma the force is transmitted onto basal lamina of endomysium by a dense complex of microfibrils – the extra cellular matrix (3) (fig. 6).

The region of terminal MTJ contains all four types of nerve endings: the Ruffini and Vater-Paccini corpuscles, Golgi organs and free nerve endings. That fact indicates the key role of this area in the proprioception and thus control of body movements (6).

Both endomysium covering the whole myofiber and it's fibers that anchor into both ends of it contribute to the core tendons or run directly to the bony insertions (fig. 6-16, 18).

In a myotendinous unit as structure from origin to attachment there is no such place where there would be no tendinous tissue. So it may be stated that a muscle is a tendon delaminated at the muscle belly level (fig. 8-10, 11-16, 18) where myofibers are fit to do the contraction job. The perimysial bands deriving/fusing into a core tendon are usually thicker than endomysial ones and they too have a multidirectional orientation to allow flexibility in shortening and elongation at the level of myofibers and the whole muscle. They are designed to protect structures equally important to myofibers – nerves and blood vessels. Failure of any of those systems means a serious distortion of muscle function and life. These tendinous fibers do not anchor at TMTJ, they run straight through a muscle reinforcing its whole structure, host and protect vessels and nerve trunks and being fused with endomysium also transmits force from contracting myofibers. It seems clear that a selective damage of any TMTJ without prior injury to endomysial and perimysial bands around it would be extremely unlikely during a stretch type injury.

It is also clear that when perimysial and endomysial or core tendon fibers tear, structures protected by them would be demolished completely no matter what structure it is. All structures protected by tendinous fibers in a musculo-tendinous unit are weaker than tendons. That is why they need tendinous protection.



Ryc. 8. Na czerwono zakodowany system ścięgnisty endomysium mięśnia, na czarno perimysium. Czysto teoretyczna separacja...

Fig. 8. Endomysial (red-coded) and perimysial (black-coded) tendinous systems of the muscle separated. A purely theoretical separation...



dotatkowy mechanizm. Filamenty aktynowe z jednej strony zespolone z błoną graniczną Z zaś z drugiej zamiast przeplatać się z filamentami miozynowymi penetrują do gęstej macierzy filamentowej bezpośrednio przy powierzchni sarkolemy zespalając je z tą błoną (3) (ryc. 6). Na zewnątrz sarkolemy siły przenoszone są na błonę podstawną endotenon przez gęsty kompleks mikrofilamentów „zatopionych” w glikozaminoglikanach - podobnie jak w innych strefach włókna mięśniowego.

W strefie złącza mięśniowo-ścięgnistego terminalnego (ZMST) obecne są wszystkie cztery typy zakończeń nerwowych: ciała Ruffiniego i Vater-Pacciniego, aparaty Golgiego oraz wolne zakończenia nerwowe (ryc. 6). Ten fakt dowodzi kluczowej roli tej strefy w propriocepcji, czyli kontroli ruchów ciała (6).

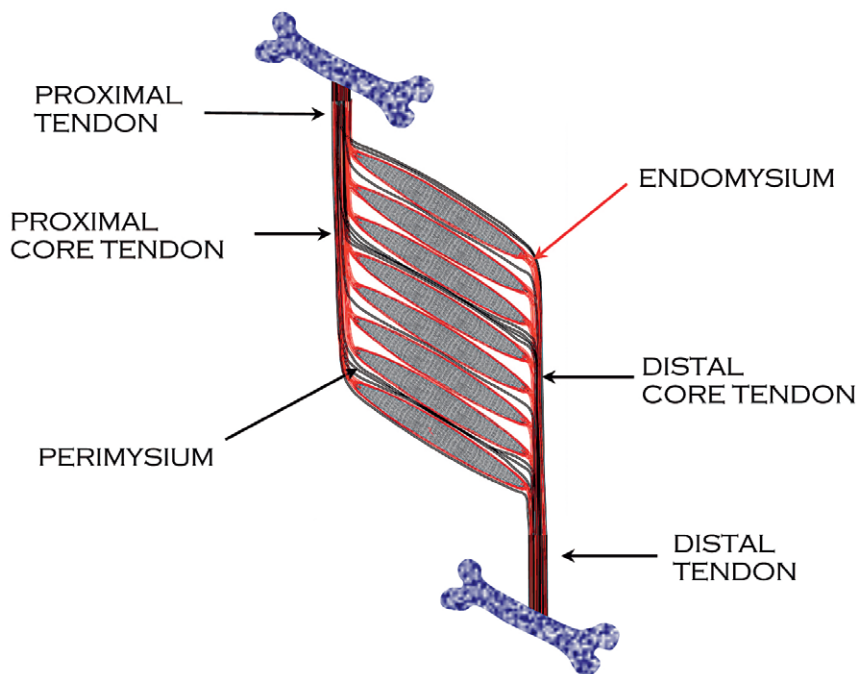
Zarówno włókna endomysium powlekające całą powierzchnię komórki mięśniowej/włókna mięśniowego, jak i te kotwiczące w obu jej końcach tworzą rdzenie ścięgnowe lub biegną bezpośrednio do przyczepów (ryc. 6-16, 18).

W obrębie dowolnej jednostki mięśniowo-ścięgnistej rozumianej jako kompleks położony pomiędzy swoimi przyczepami nie ma takiego miejsca, gdzie nie byłoby tkanki ścięgnowej. Można więc stwierdzić, że mięsień jest ścięgnem rozlaminowanym na poziomie brzośca mięśniowego w celu upakowania włókien mięśniowych wykonujących na tym poziomie pracę skurczową (ryc. 8-10, 11-16, 18). Włókna perimysium są zwykle grubsze od włókien endomysium. Mają one tak jak endomysium wielokierunkowy/nożycowaty układ włókien kolagenowych pozwalający na elastyczność mięśnia w skracaniu i wydłużaniu na poziomie komórek mięśniowych oraz

Muscle's core tendon morphology is in some muscles simple, in some complicated or rather picturesque. Figures 9 and 10 present only the simplest semipennate cores and most common types of bone origins/insertions. As one can see in the figure 10 some types of insertions do not require a core tendon. Endo- and perimysial fibers can be attached directly to the bone occupying large bony areas. That is the most simple option. Some muscles have both direct bony endo/perimysial inserts and core tendons (then we do not have a tendon) running in a muscle and distributing fibers in a pennate form. It is important to stress here that there is no such thing as “muscular direct insertion” to the bone. Muscle fibers do not have the means to do such a thing. They always attach to other structures by means of tendinous endomysium and perimysium, no matter how invisible to a bare eye these would be.

Analysis of muscle anatomy requires detailed approach to every single muscle including it's US assessment in static and dynamic state as well as crosssectional anatomy at all levels and is well beyond the scope of this paper.

Another tendinous muscle structure is epimysium, which is a thin membrane deriving from core tendons or direct insertions that covers the whole muscle. Epimysium is loosely attached to fascias that additionally cover a single or a group of muscles and may form fascial compartments. Fascias are loosely connected to muscles and allow gliding of muscle bellies between them and under fascial layers. Some muscle-generated forces are transmitted by fascias. Superficial core tendon tears are confused with fascial tears. Fascia can tear, of course. But we must bear in mind that fascia is not a direct part of a muscle, it is attached to it by loose bands



Ryc. 9. Schemat budowy mięśnia. Endomysium (kodowane na czerwono), perimysium (kodowane na czarno) tworzą/ powstają z rdzeni ścięgnistych, nieprzerwanie (z wyjątkiem włókien kotwiczonych w złączach mięśniowo-ścięgnistych terminalnych) łączą przyczep bliższy z dalszym. Schemat przedstawia najprostszy model budowy mięśnia/rdzeni ścięgnistych. Oba rdzenie biegną po powierzchni brzośca zbierając/dystrybuując włókna po jednej stronie (półpierszaste).

Fig. 9. A scheme of the muscle. Endomysium (red-coded), perimysium (black coded) forming/arising from core tendons, continuously running from the origin towards the insertion. The only fibers that end/begin at the proximal/distal end of the myofiber are those that anchor in the terminal myotendinous junctions. The scheme shows the most simplified version of a muscle – both core tendons are superficially distributing/collecting fibers (semipennate cores).

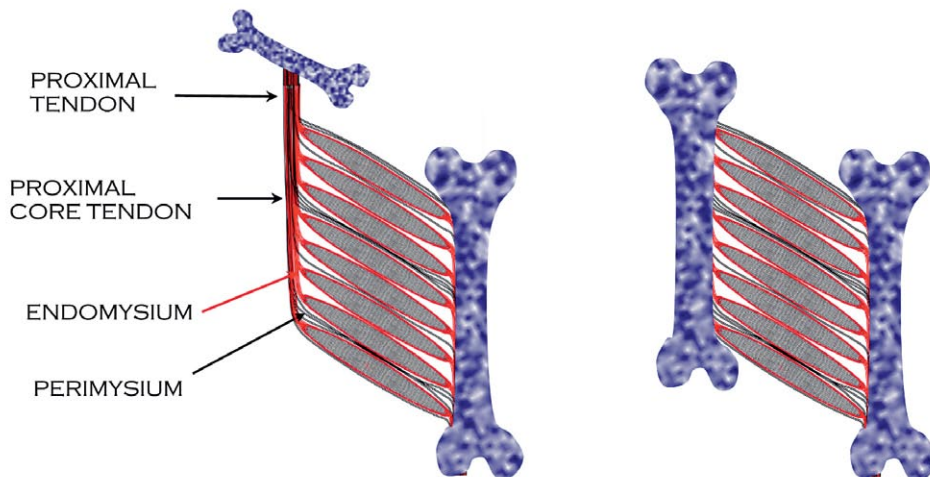
całego mięśnia. Ich główna rola to ochrona struktur równie istotnych dla mięśnia co same włókna mięśniowe – naczyń krwionośnych i nerwów. Włókna perimysium nie kotwiczą w złączy mięśniowo-ścięgnistym terminalnym (ZMST) tylko biegną przez mięsień równoległe do włókien mięśniowych brzośca, wzmacniając strukturę endomysium. Większe naczynia krwionośne i nerwy biegną w otulinie perimysium (ryc. 19-21). Jednocześnie perimysium poprzez ścisłe połączenie z systemem endomysium bierze udział w przenoszeniu sił wygenerowanych przez skurcz/napięcie mięśnia. Przerwanie włókien perimysium ma z reguły fatalne skutki dla integralności i funkcji mięśnia. Wydaje się oczywiste, że selektywne uszkodzenie ZMST bez przerywania ciągłości otaczają-

of connective tissue (muscles glide within fascias) so fascial tear is usually a part of massive muscular injury or not primarily associated with a muscle tear at all.

### Ultrasonographic anatomy of selected muscles

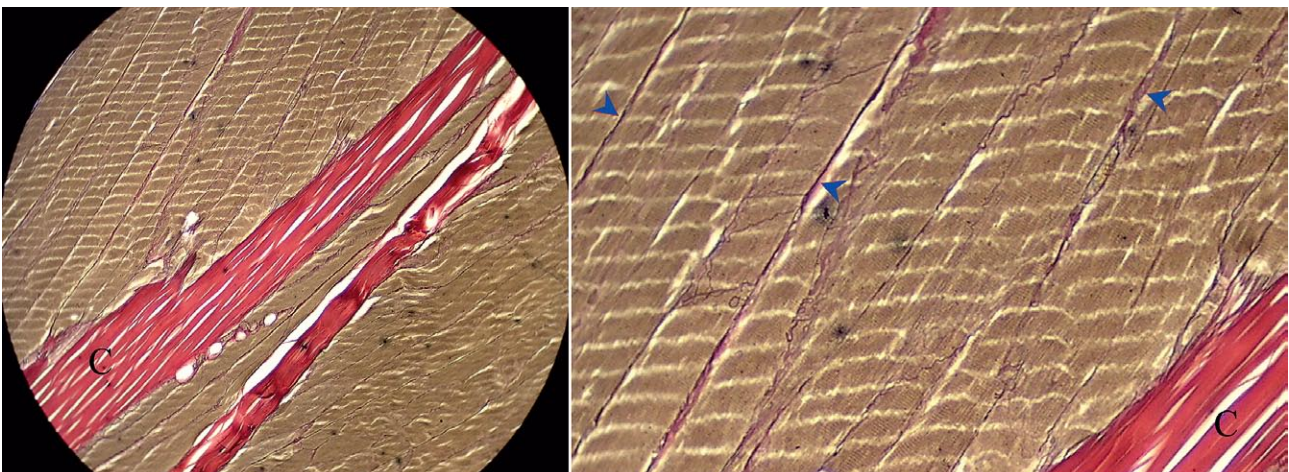
In author's opinion high resolution ultrasonography is so far the best method to show muscular myotendinous anatomy and stretch-type tears. Providing that one knows where to look for them.

In a muscle both tissues – muscular or myofibers and tendinous can be clearly depicted and observed during their natural activities.



Ryc. 10. Schemat budowy mięśnia. Różne typy przyczepów. Endomysium (kodowane na czerwono), perimysium (kodowane na czarno) powstające/tworzące rdzenie ścięgnowe lub przyczepiające się bezpośrednio do kości. Typ mieszany przyczepu, czyli przyczep szeroki (endomysium/perimysium przyczepiają się bezpośrednio) z drobnymi rdzeniami ścięgnistymi nie jest zaprezentowany głównie ze względu na ograniczony talent rysowniczy autora.

Fig. 10. A scheme of the muscle. Different types of origin/insertion. Endomysium (red-coded), perimysium (black coded) forming/arising from core tendons or directly inserting into the bone. Mixed insertion type, i.e. wide direct endomysium and perimysium insertion with core tendons too not presented mainly due to limited artistic abilities of the author.

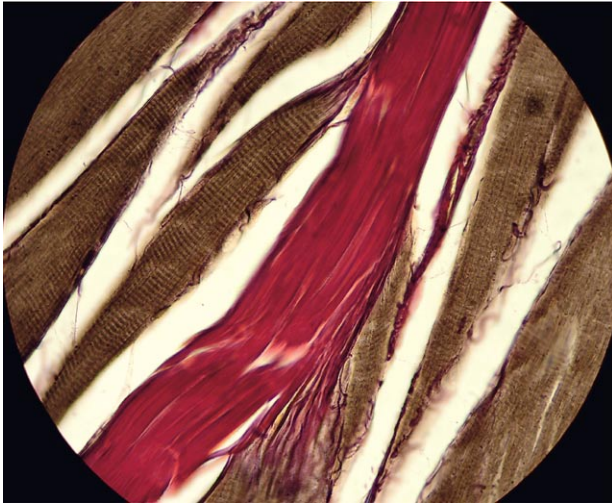


Ryc. 11. Podłużny przekrój przez mięsień trójgłowy tydki szczura, barwienie Gomori. Włókna ścięgnowe zabarwione na czerwono (C – rdzenie ścięgnowe), mięśniowe na brązowo. Rdzenie ścięgnowe stają się cieńsze z powodu „utrąty” włókien dystrybuowanych jako endomysium i perimysium. Część grubszych pasm perimysium wyróżniona niebieskimi grotami strzałek, na rycinie prawej, będącej powiększeniem centralnej strefy ryc. lewej.

Fig. 11. Longitudinal histological specimen of the rat muscle, Gomori stain. Tendon stained red (C – core tendons), “myotissue” stained brown. The core tendon becomes thinner as it distributes the tendinous fibers into each myofiber as endomysium and as perimysial strengthening tendinous bands. Thicker perimysial bands indicated by blue arrowheads on the enlarged right image.

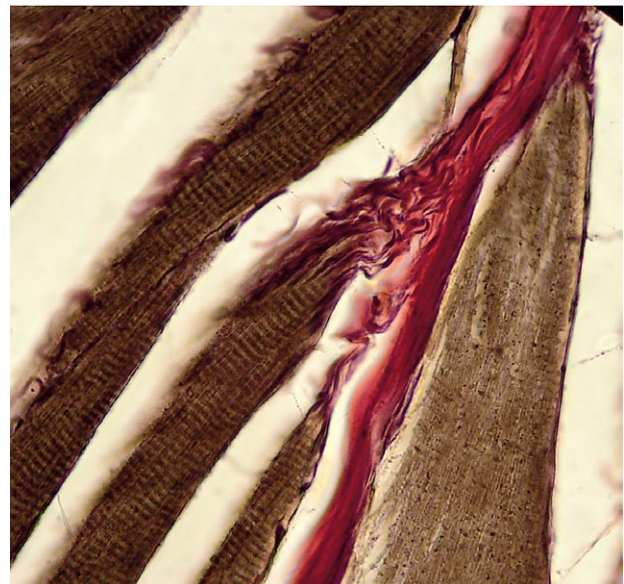


cych go endomysium i perimysium jest niezwykle mało prawdopodobne. Jasne jest również to, że przy rozerwaniu włókien endomysium, perimysium czy rdzeni ścięgniastych wszystkie chronione przez te elementy struktury ulegają zniszczeniu. Wszystkie struktury chronione przez różnego rodzaju elementy ścięgniaste w obrębie jednostki mięśniowo-ścięgniastej są słabsze od ścięgien, dlatego potrzebują takiej ochrony.



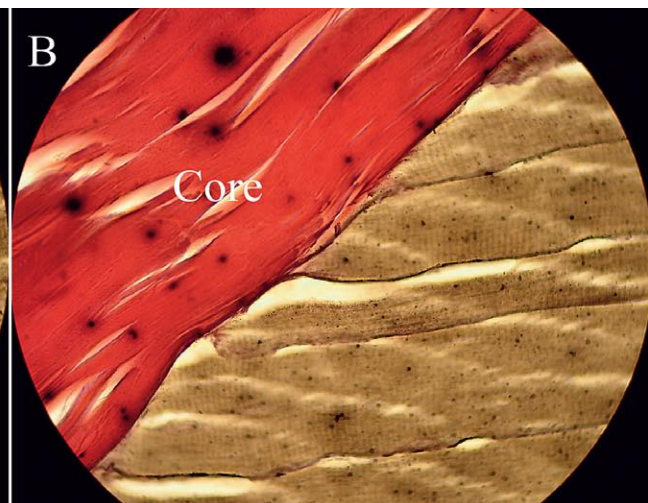
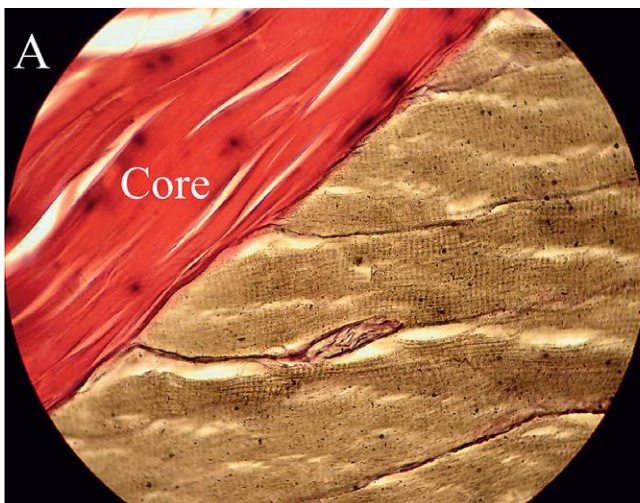
Ryc. 12. Podłużny przekrój przez mięsień trójgłowy tydki szczura, barwienie Gomori. Włókna ścięgniaste zabarwione na czerwono (C – rdzenie ścięgniaste), mięśniowe na brązowo. Endomysium i perimysium dołączające się do masy rdzenia ścięgniastego.

Fig. 12. Longitudinal histological specimen of the rat muscle, Gomori stain. Tendon stained red, "myotissue" stained brown. Myofiber's tendinous endomysium and perimysium contributing to the mass of the core tendon.



Ryc. 13. Podłużny przekrój przez mięsień trójgłowy tydki szczura, barwienie Gomori. Włókna ścięgniaste zabarwione na czerwono, mięśniowe na brązowo. Endomysium i perimysium dołączające się do masy rdzenia ścięgniastego. Na tym przekroju wydaje się, że złącze mięśniowo-ścięgniaste terminalne jest jedynym połączeniem mięśnia ze ścięgnem. Obraz jest zaprzeczeniem czy raczej dopełnieniem przekroju na następnej rycinie i wynika z przypadkowej głębokości przekroju uwydatniającego tę strefę ścięgniastą.

Fig. 13. Longitudinal histological specimen of the rat muscle, Gomori stain. Tendon stained red, "myotissue" stained brown. Myofiber's endo- and perimysium contributing to the mass of the core tendon. At this specific section it seems that the terminal myotendinous junction is really the only attachment zone of the tendon with the myocell/myofiber. A clear contradiction to the next image and of course a matter of luck in the sectioning process.



Ryc. 14. Podłużny przekrój przez mięsień trójgłowy tydki szczura, barwienie Gomori. Włókna ścięgniaste zabarwione na czerwono (Core – rdzenie ścięgniaste), mięśniowe na brązowo. Endomysium i perimysium dołączające się do masy rdzenia ścięgniastego. Na tym przekroju wydaje się, że złącze mięśniowo-ścięgniaste ścienne jest jedynym połączeniem mięśnia ze ścięgnem. Obraz jest zaprzeczeniem czy raczej dopełnieniem przekroju na poprzedniej rycinie i wynika z przypadkowej głębokości przekroju uwydatniającego tę strefę ścięgniastą.

Fig. 14. Longitudinal histological specimens of the rat muscle. Tendon stained red, "myotissue" stained brown. Myofiber's endo- and perimysium contributing to the mass of the core tendon. At this specific section it seems that the parietal myotendinous junction is the only attachment zone of the tendon with the myocell/myofiber. A clear contradiction to the previous image and of course a matter of luck in the sectioning process.



Morfologia rdzeni ścięgnistych bywa prosta lub skomplikowana, czy raczej malownicza. Ryciny 9 i 10 prezentują jedynie najprostsze modele rdzeni półprzestających i najbardziej typowe rodzaje przyczepów kostnych. Jak widać na rycinie 10 pewne typy przyczepów nie wymagają obecności rdzenia ścięgnistego. Włókna endo- i perimysium mogą w wersji najbardziej uproszczonej przyczepiać się bezpośrednio do rozległych pól przyczepów kostnych. Niektóre mięśnie posiadają przyczepy zarówno rdzeniowe jak i bezpośrednie endo- perimysialne. W takim przypadku nie ma ścięgna, a rdzenie biegną bezpośrednio od przyczepu kostnego najczęściej śródmięśniowo rozprawdzając włókna po obu swoich stronach w trybie pierzastym.

Istnieje również sytuacja, kiedy rdzeń ścięgnisty oprócz włókien endomysium i perimysium jest źródłem silnego pasma ścięgnistego oddzielającego się od rdzenia ścięgnistego śródbrzuscowo, nie będącego endomysium ani perimysium – pasma takie autor nazywa „rdzeniami ścięgnistymi drugorzędowymi”. Rdzeń ścięgnisty drugorzędowy to pierzasty z definicji dystrybutor włókien endomysium i perimysium.

Należy w tym miejscu podkreślić, że nie istnieje zjawisko przyczepu „mięśniowego”. Komórki mięśniowe potrzebują pośrednictwa endo-/perimysium do jakiegokolwiek przyczepu niezależnie od tego jak bardzo te struktury są „niewidzialne” dla nieuzbrojonego oka.

Dokładny opis anatomii mięśni wymaga szczegółowej analizy każdego mięśnia z osobna włącznie ze statyczną i dynamiczną oceną ultrasonograficzną oraz analizą przekrojów poprzecznych na wszystkich poziomach i przekracza znacznie założone ramy tej pracy.

Kolejną oprócz endo- i perimysium strukturą ścięgnistą mięśnia jest powlekające całą powierzchnię brzucha epimysium (namięsna).

Epimysium jest luźno powiązane z powięzią – strukturą opłaszczającą pojedynczy mięsień oraz całe grupy mięśni tworząc tzw. przedziały powięziowe. Uszkodzenia powierzchownie biegnących rdzeni ścięgnistych mylone są z uszkodzeniami powięzi. Powięź może oczywiście ulec uszkodzeniu jednak należy pamiętać, że nie jest to struktura ściśle z mięśniem połączona. Powięzi łączą się z mięśniami za pomocą luźnych błon i pasm łącznotkankowych pozwalając na ślizg brzusców pomiędzy sobą lub ślizg brzucha pod powięzią. Tak więc uszkodzenia powięzi są najczęściej elementem masywnych urazów mięśni lub nie są w ogóle bezpośrednio z nimi powiązane.

## Anatomia ultrasonograficzna wybranych mięśni

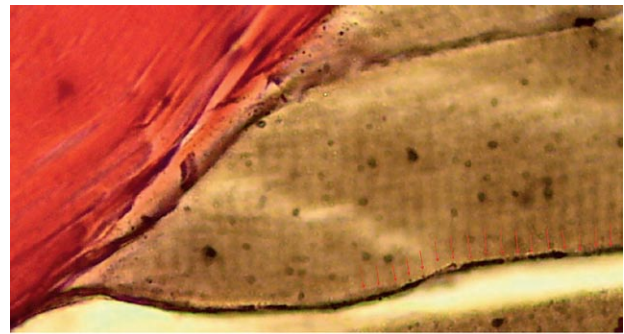
Najlepszą obecnie stosowaną metodą do obrazowania anatomii i diagnostyki uszkodzeń mięśni jest według autora badanie ultrasonograficzne wysokiej rozdzielczości. Przy założeniu, że badający zna strukturę badanego mięśnia i wie gdzie szukać uszkodzeń.

W badaniu usg w większości lokalizacji można łatwo uwidocznic oba rodzaje tkanek – mięśniową i ścięgnistą. Problematiczne są jedynie strefy położone głęboko pod grubymi warstwami tkanki tłuszczowej. Tkanka mięśniowa/włókna mięśniowe w niewielkim stopniu odbijają wiązkę ultradźwiękową, stąd na obrazie usg są hipoechogenne, czy wręcz bezechowe. Tkanka ścięgnista podczas napięcia tworzy warstwy bardzo dobrze odbija-

Only muscles located deep under thick layers of adipose tissue are difficult to diagnose especially when the adipose tissue is oedematic, which is frequent following contusions.

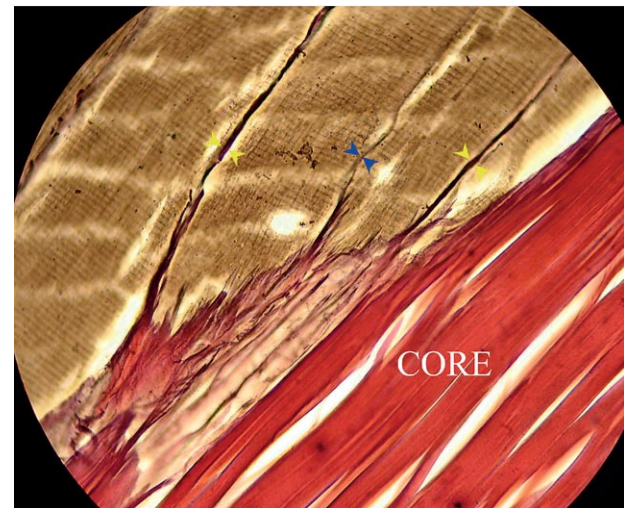
Muscular tissue reflects US beam poorly so it is coded dark or black in the US image (hypoechoic or anechoic). Tendinous tissue if stretched forms a band of tissue of very good reflective properties and appears as a bright (hyperechoic) line or group of lines which are interlaced by dark/black bands of muscular fibers. The more trained the muscle, the wider are dark/black bands of myofibers separated by relatively thin tendinous, endomysial and perimysial bright reflections.

On the contrary in poorly trained or atrophied muscles muscular tissue is much thinner than in a normally-trained unit so the tendinous tissue dominates in the volume of the muscle at the level of its belly. In US such muscles seem to be built of tendinous tissue



Ryc. 15. Podłużny przekrój przez mięsień trójgłowy łydki szczura, barwienie Gomori. Czerwone strzałki wskazują część złącz mięśniowo-ścięgnistych ściennych. Powiększenie ryciny 14B.

Fig. 15. Longitudinal histological specimen of the rat muscle, magnification of fig 14B. Red arrows indicate some PMTJ Gomori stain levels.



Ryc. 16. Podłużny przekrój przez mięsień trójgłowy łydki szczura, barwienie Gomori. Wyraźna różnica grubości ścian włókien mięśniowych tworzonej najpewniej przez endomysium (niebieskie groty strzałek) i endomysium+perimysium (żółte groty). Core – rdzeń ścięgnisty.

Fig. 16. Longitudinal histological specimen of the rat muscle, Gomori stain. There is a thickness difference of the walls of the two neighboring myofibers showing the difference between the endomysium (blue arrowheads) and endomysium+perimysium (yellow arrowheads).



jące ultradźwięki widoczne w postaci hiperechogennych linii przeplatanych ciemniejszymi pasmami włókien/pakietów włókien mięśniowych. Im bardziej wytrenowany mięsień tym szersze są strefy ciemnych pasm komórek mięśniowych poprzedzielanych relatywnie cieńszymi jasnymi elementami ścięgniastymi endo- i perimysium.

W mięśniu słabo wytrenowanym lub atroficznym tkanka mięśniowa zanika: hipoechogenne warstwy ulegają ścięgniastemu, na obrazie usg dominują jasne pasma ścięgniaste w obrazie mięśnia. W skrajnych przypadkach atroficzne brzośce mięśniowe wyglądają jak grube ścięgniaste generujące niemal wyłącznie jasne linijne odbicia z ledwie widocznymi ciemniejszymi pasmami włókien mięśniowych. Dodatkowym elementem „rozjaśniającym” obraz usg mięśnia może w takich przypadkach być obecność tkanki tłuszczowej będącej wyrazem degeneracji tłuszczowej komórek mięśniowych.

Mięśniem modelowym do prezentacji anatomii w badaniu usg jest zginacz kciuka krótki, ponieważ niemal w całości można go uwidocznnić przy pojedynczym przyłożeniu głowic liniowych o długości ok. 5 cm. Jest to prosty, dwurdzeniowy mięsień z rdzeniami pierzastymi (śródmięśniowymi) (ryc. 22).

Obok oceny statycznej, badanie usg daje również możliwość obserwacji mięśni podczas ich naturalnej aktywności. Ultrasonografia jest przy tym jedyną dostępną obecnie metodą zdolną do uwidocznienia włókien i pasm ścięgniastych mięśnia w ruchu. Niestety trudno zaprezentować tą cechę usg na zatrzymanym zdjęciu. Pewnym substytutem dokumentacji ruchu mięśnia są zdjęcia w zatrzymanych fazach ruchu (ryc. 23).

Mięsień brzuchaty łydki w większości przypadków występuje jako odmiana anatomiczna z półpierzastym rdzeniem bliższym i półpierzastym rdzeniem dalszym (ryc. 23). Co więcej, oba rdzenie mięśnia brzuchatego (głównie jego głowy przyśrodkowej) posiadają odmiany

only giving linear bright reflections typical for tendinous tissue with little or no dark stripes of muscular fibers. Additionally an image-brightening element of a muscle belly can be adipose tissue which appears as a reflection of degenerative process of muscular tissue.

A nice muscle for presentation of muscular anatomy is a flexor pollicis brevis since it nearly all fits within a 4-5 cm field of view transducer. It is a simple, two-core muscle with both cores pennate (inside the muscle) (fig. 22).

Ultrasound is the only available method to show dynamic behavior of muscles (fig. 23A,B).

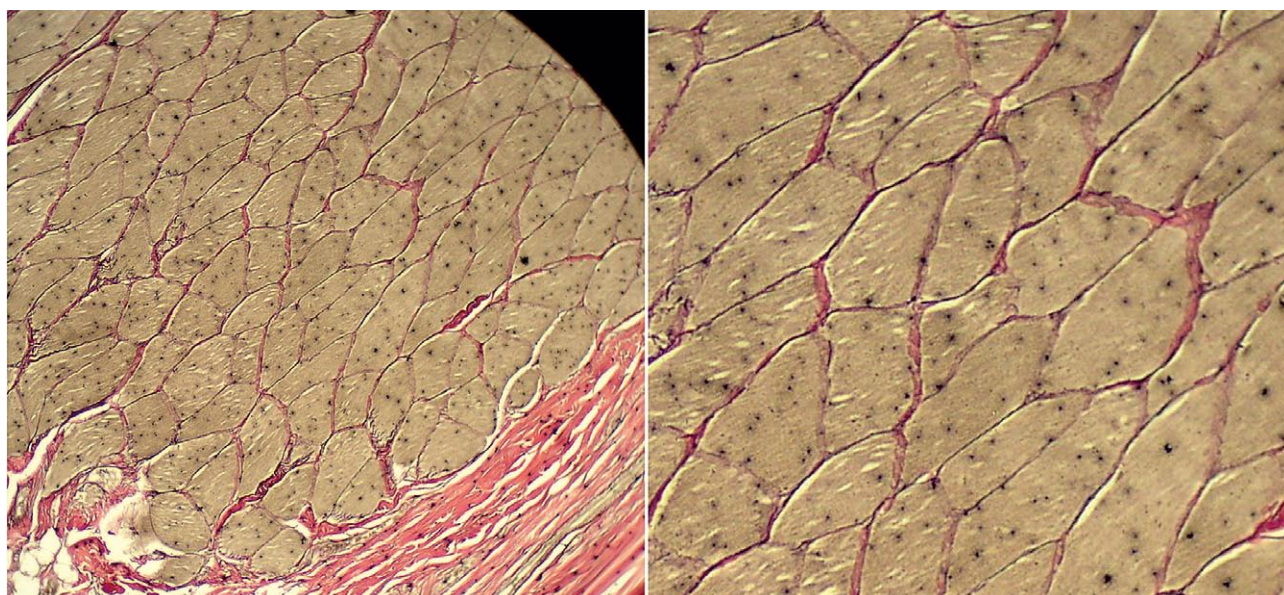
A gastrocnemius muscle in most cases has semipennate proximal and semipennate distal cores (fig. 23). But as muscles do not want to stop surprising with it's structure - secondary cores of both proximal and distal core can be at times seen (fig. 24). So again - individual assessment of muscles is a key to their full understanding.

And to finish a short anatomy presentation of skeletal muscles a proximal core of a semimembranosus muscle. Semimembranosus is a picturesque one as it's proximal core runs superficially at the proximal and midlevel of the muscle to dive into it and become a pennate distributor at the distal third with a horseshoe shape at the crosssection (fig. 25) (7).

## Discussion

Terminal myotendinous junction so far called myotendinous junction is not the only connection between the tendon and muscle.

Many sources go further and use term “end of the tendon, beginning of a muscle”. When “beginning of a muscle” is true, the “end of the tendon” is false because only a small part of endotenon anchors in the terminal MTJ, rest of endomysial and all perimysial fibers run continuously through a muscle and do not end until they



Ryc. 17. Poprzeczno-skośny przekrój histologiczny mięśnia trójgłowego łydki szczura, barwienie Gomori. Włókna ścięgniaste zabarwione na czerwono, mięśniowe na brązowo. Każde włókno mięśniowe otoczone ścięgniem. Grubsze pasma odpowiadają strefom wzmocnionym perimysium. Obraz prawy – powiększenie centralnej strefy obrazu lewego.

Fig. 17. Transverse/oblique histological specimen of the rat triceps surae muscle, Gomori stain. Tendon stained red, “myotissue” stained brown. Each myofiber with a surrounding tendinous sheath. The thicker ones represent the location of additional perimysial strengthening bands randomly and densely spread within the muscle. Right image - enlarged center left.



anatomiczne z rdzeniami drugorzędowymi. (ryc. 24). Jak widać na tym przykładzie – ocena mięśni musi być oparta o detaliczną znajomość ich anatomii i możliwych odmian strukturalnych rdzeni.

Kolejnym przykładem złożonej struktury anatomicznej rdzeni ścięgniastych jest bliższy rdzeń mięśnia półbłoniastego. Mięsień półbłoniasty jest malowniczym tworem między innymi z tego powodu, że jego bliższe ścięgno tworzy owalne, dalej szerokie pasmo, dalej biegnie jako półprzestawny rdzeń ścięgniasty po powierzchni brzuśca aby na odcinku dystalnym zanurkować w głąb brzuśca i stać się śródmięśniowym rdzeniem pierzastym o kształcie podkowy w przekroju poprzecznym (ryc. 25) (7).

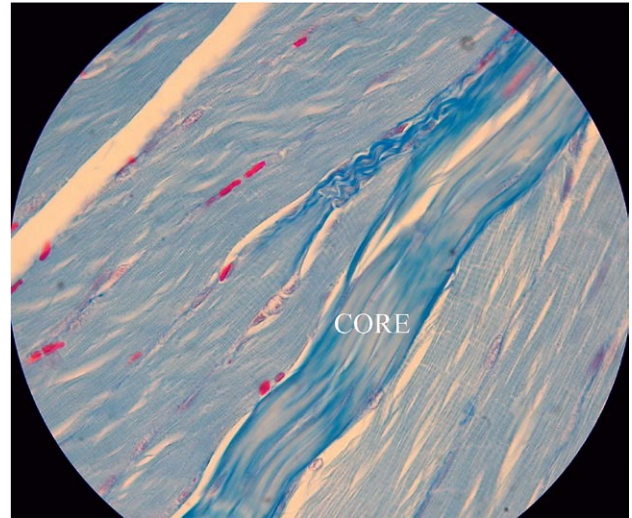
## Dyskusja

Złącze mięśniowo-ścięgniaste terminalne (proksymalne/dystalne), jak dotąd nazywane złączem mięśniowo-ścięgniastym nie jest jedynym połączeniem komórek mięśniowych ze ścięgnem mięśnia. Wiele źródeł upraszcza w sposób błędny anatomię stwierdzeniem „koniec ścięgna, początek mięśnia”. Podczas gdy „początek mięśnia” to rzeczywiście prawda, „koniec ścięgna” to fałsz, ponieważ tylko część włókien endomysium kotwicz się we włóknie mięśniowym i kończy swój bieg w ZMST. Pozostała część endomysium oraz całość perimysium biegnie nieprzerwanie do przyczepu mięśnia po drugiej stronie brzuśca.

Kolejną pułapką dla nieuzbrojonego oka jest wniosek, że ścięgno kończy się gdy znika nam z pola widzenia. Wysnuwanie z tego obrazu wniosku, że oto widoczny jest koniec ścięgna i początek mięśnia, czyli złącze mięśniowo-ścięgniaste jest błędne. Faktycznie jest to miejsce gdzie (na przykład w przypadku m. przywodziciela długiego, półbłoniastego i wielu innych mięśni)

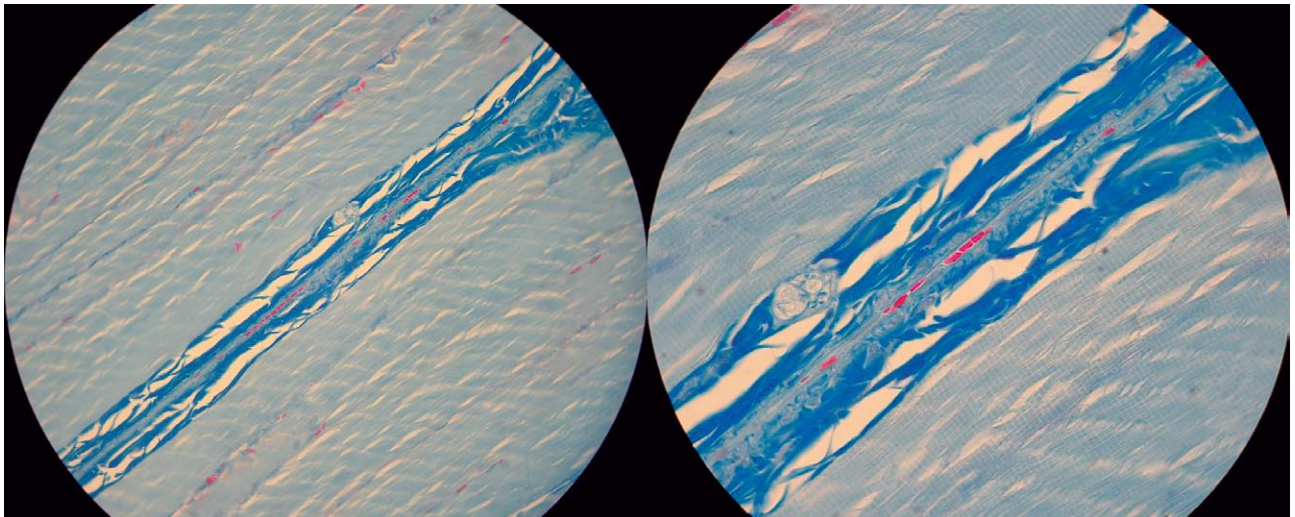
reach the other insertion site.

Another misinterpretation of reality is when an observer looks at the muscle (for example adductor longus) and sees that the core tendon ends at the surface – the



Ryc. 18. Podłużny przekrój histologiczny mięśnia trójgłowego łydki szczura, barwienie Azan. Ścięgna, ściany naczyń krwionośnych i włókna mięśniowe zabarwione na niebiesko z różną intensywnością barwy. Czerwone owalne/wydłużone elementy – erytrocyty w naczyniach włosowatych. Endo- i perimysium dołączają do rdzenia ścięgniastego (core).

Fig. 18. Longitudinal histological specimen of rat triceps surae muscle, Azan stain. Tendon, blood vessels and myofibers stained blue in different intensity. Red – erythrocytes. Many erythrocytes are along the walls of myofibers – the capillaries. Myofiber's endo- and perimysium contributing to the mass of the core tendon.



Ryc. 19. Podłużny przekrój histologiczny mięśnia trójgłowego łydki szczura, barwienie Azan. Ścięgna, ściany naczyń krwionośnych i włókna mięśniowe zabarwione na niebiesko z różną intensywnością barwy. Na tej rycinie nie ma rdzenia ścięgniastego, naczynie biegnie równoległe do włókien mięśniowych, wewnątrz wzmacniającego pasma perimysium. Czerwone owalne/wydłużone elementy – erytrocyty w naczyniu krwionośnym i włosowatych. Obraz prawy – powiększenie centralnej strefy obrazu lewego.

Fig. 19. Longitudinal histological specimen of the rat triceps surae muscle, Azan stain. Tendon, blood vessels and myotissue stained blue in different intensity. Red oval elements – erythrocytes. No core tendon at this image. The vessel with erythrocytes inside runs along a strengthening band of tendinous tissue (perimysium) parallel to the surrounding myofibers. Many erythrocytes are along the walls of myofibers – the capillaries. Capillaries must also be protected against overstretching by the tendinous muscle cell sheath – the endomysium.



rdzeń ścięgnisty zmienia lokalizację z powierzchniowej na śródmięśniową (półpierzasty-pierzasty) i jest daleki od swojego końca. To co jest interpretowane jako złącze mięśniowo-ścięgniste jest w tym i wielu innych przypadkach początkiem dwustronnej strefy dystrybucji włókien ścięgniastych tego samego rdzenia ścięgniastego.

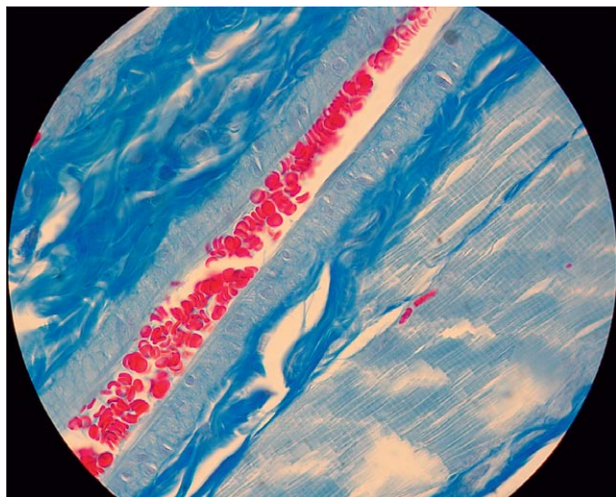
Pierwotnym elementem ulegającym uszkodzeniu w urazach mięśni o typie rozerwania jest jego ścięgno, rdzeń ścięgniasty, endomysium oraz perimysium; w skrajnych przypadkach wszystkie na raz. Nie dlatego, że te ele-

conclusion is: that is the end of tendon, beginning of muscle. The interface is myotendinous junction. In fact this is the place where the adductor longus core tendon dives into the muscle and from semipennate becomes a pennate fiber distributor and is far from ending. What is thought to be a myotendinous junction is the beginning of double-sided fiber distribution zone of continuously the same tendon.

Primarily torn part of a muscle is its tendon, core tendon, endomysium and perimysium. When the tear is located within the core tendon and deriving from it endomysium and perimysium it is interpreted as a myotendinous junction tear which is another level of reality misinterpretation. For that reason the TMTJ is regarded by many as the weakest part of the whole myotendinous unit, which seems to be another false conclusion especially that there is no scientific evidence which part of tendinous system of the muscle is weakest. That would be extremely difficult to measure. When we deal with the same tendinous system at different levels of it's integration the question is rather: which part of the system is the weakest at the moment of a contusion? And why? The answer to both questions will for long be a matter of speculation.

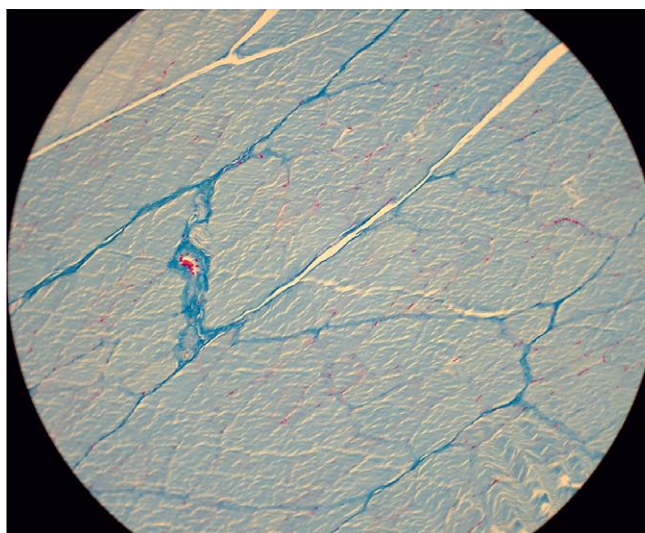
What we can deduct from evidence based science is that the strength of this area is not only depending on the endomysial inserts into the TMTJ but also on fibers contributing to endomysial tendinous cover tightly fused with the surface of myofiber, not to mention strong bundles of perimysium interweaved with endomysium at the whole length of those structures.

The tearing structure in a myotendinous unit is a tendon, no matter at what level. From author's experience based on over 1000 US examinations of muscle stretch-type contusion, surgical confirmations and direct observations of torn muscles during surgical procedures within the last 10 years it is clear that what tears in a



Ryc. 20. Podłużny przekrój histologiczny mięśnia trójgłowego łydki szczura, barwienie Azan. Obraz większego niż na rycinie poprzedniej naczynia krwionośnego biegnącego w grubej otulinie perimysium.

Fig. 20. Longitudinal histological specimen of the rat triceps surae muscle, Azan stain. The image of a larger than in previous figure blood vessel cuffed in a thick perimysium.



Ryc. 21. Poprzeczny/skośny przekrój histologiczny mięśnia trójgłowego łydki szczura, barwienie Azan. Ścięgna, ściany naczyń krwionośnych i włókna mięśniowe zabarwione na niebiesko z różną intensywnością barwy. Czerwone – erytrocyty. Grube relatywnie ciemniejsze niebieskie pasma odpowiadają obecności perimysium. Duże naczynie wewnątrz grubego pasma perimysium (powiększenie po stronie prawej). Wiele erytrocytów rozsianych pomiędzy włóknami mięśniowymi w naczyniach włosowatych.

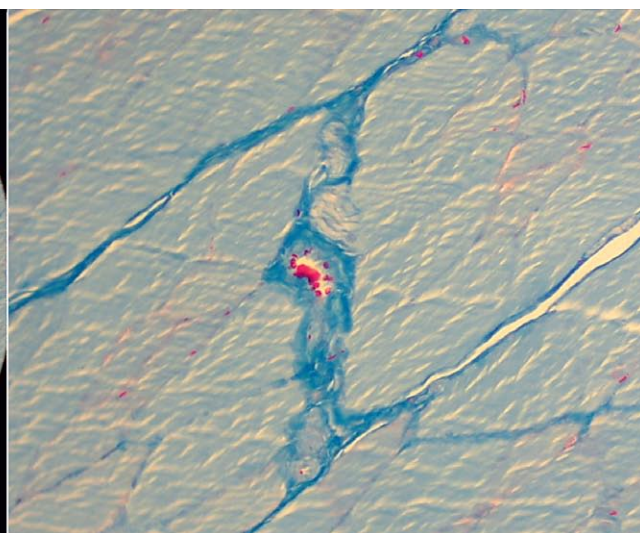


Fig. 21. Transverse/oblique histological specimen of the rat muscle, Azan stain. Tendon, blood vessels and myotissu stained blue in different intensity. Red – erythrocytes. The thicker relatively darker blue bands represent the location of perimysium. Large vessel within the strongest/thickest perimysial band (enlarged on the right). Many erythrocytes at the borders between myofibers – capillary system.

menty są najsłabsze, ale dlatego że są najsilniejsze i służą jako ochrona wszystkich pozostałych struktur mięśnia. Problemem interpretacyjnym w diagnostyce jest sytuacja rozerwania lub przerwania rdzenia ścięgniętego co dzieje się najczęściej w strefie odejścia od niego włókien endo- i perimysium. Jest to w wielu publikacjach i doniesieniach jedyna strefa połączenia mięśnia ze ścięgnem. I zapewne jest to powód dla którego tzw. złącze mięśniowo-ścięgnięte uważa się za najsłabszy element mięśnia. W światowej literaturze brakuje dowodu na poziom wytrzymałości różnych stref mięśnia. Parametry tego typu byłyby niezwykle trudne do pomiaru. To co możemy wywnioskować z udokumentowanych danych to fakt, że wytrzymałość złącza mięśniowo-ścięgniętego terminalnego nie zależy tylko od siły kotwiczących we włóknach mięśniowych pasm endomysium, ale również od jego pasm biegnących po powierzchni włókna przyczepiających się do niego co  $2\mu\text{m}$  (w przypadku mięśnia ludzkiego wg Gray's) oraz od pasm perimysium ściśle powiązanego z endomysium na całej długości obu systemów.

Strukturą ulegającą pierwotnie przerwowaniu w całej jednostce mięśniowo-ścięgniętej podczas urazu rozciągającego jest ścięgno niezależnie od poziomu mięśnia. Ponieważ z przyczyn anatomicznych rdzenie ścięgnięte położone są bezpośrednio przy początkowych/końcowych odcinkach endo- i perimysium uszkodzenia rdzeni w tych miejscach mylnie interpretowane są jako uszkodzenia tzw. „złącza mięśniowo-ścięgniętego”.

Noonan&Garrett potwierdzają w swojej pracy z 1997 roku (8), że uszkodzenie mięśnia przez jego nadmierne rozciągnięcie powoduje przerwanie włókien mięśniowych „w pobliżu złącza mięśniowo-ścięgniętego”. Cokolwiek „w pobliżu” czy „blisko” oznacza w pracy Nonana&Garretta, uszkodzenie które zostało w niej opisane dotyczy strefy brzuśca mięśniowego, a to oznacza zerwanie włókien endomysium i perimysium (plus oczywiście włókien mięśniowych, naczyń krwionośnych, włosowatych i nerwów).

Najbardziej bolesną częścią tego mięśniowego paradoksu jest to, że zerwaniu nie ulega najsłabsza lecz najsilniejsza część mięśnia. Dlaczego rwie się część najsilniejsza? Bo po to tam jest – żeby chronić.

## Wnioski

Struktury ścięgnięte mięśnia zachowują w swej większości (wyjątkiem są pasma endomysium kotwiczone w złączach mięśniowo-ścięgniętych terminalnych włókien mięśniowych) nieprzerwaną ciągłość pomiędzy przyczepami.

Budowa systemu ścięgniętego mięśnia wskazuje na to, że strefy złącz mięśniowo-ścięgniętych terminalnych nie są najsłabszym ogniwem jego struktury.

Zerwania w przebiegu urazów rozciągających mięśni zawsze dotyczą struktury ich tkanki ścięgniętej i mogą wystąpić na różnych poziomach – ścięgna, rdzenia ścięgniętego, endomysium oraz perimysium.

Mięsień na poziomie swojego brzuśca jest rozlaminowanym ścięgnem, do ścian którego za pomocą kompleksów o nazwie złącze mięśniowo-ścięgnięte ściennie i terminalne przyczepione są włókna mięśniowe.

skeletal muscle during a stretch-type injury are tendinous structures no matter if it is a tendon, core tendons or endomysium+perimysium deriving from the cores. Proximity of core tendons to TMTJ is usually misinterpreted as an “MTJ” tear.

Noonan&Garrett confirm in their work (6) that muscle strain injuries cause a disruption of muscle fibers “near the myotendinous junction”. Whatever “near” or “short distance” means in Nonan’s&Garrett’s paper the tears they described were located in the zone of muscle belly – and that means endomysium+perimysium (plus myofibers, nerves and vessels of course).

The most painful part of this muscular paradox whenever we put it is that what tears is not what is the weakest in a muscle-tendon unit. What tears is the strongest. Why it tears since it is the strongest? Because it is exactly why it is there – to protect.

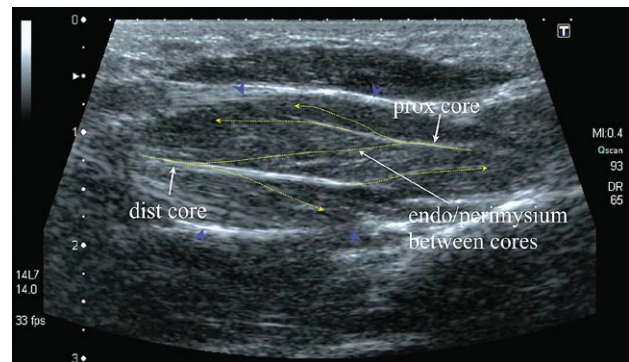
## Conclusions

Tendinous structures of a muscle are continuous from the origin to the insertion. The only exception are these fibers of endomysium that anchor at the terminal myotendinous junctions – at the beginning and end of the myofiber.

Built and tear patterns of muscles indicate that terminal myotendinous junctions are not the weakest link of muscle structure.

Tearing of muscle following overstretch injury always involve tendinous tissue and may occur at all tendinous levels – tendon, core tendon, perimysium and endomysium.

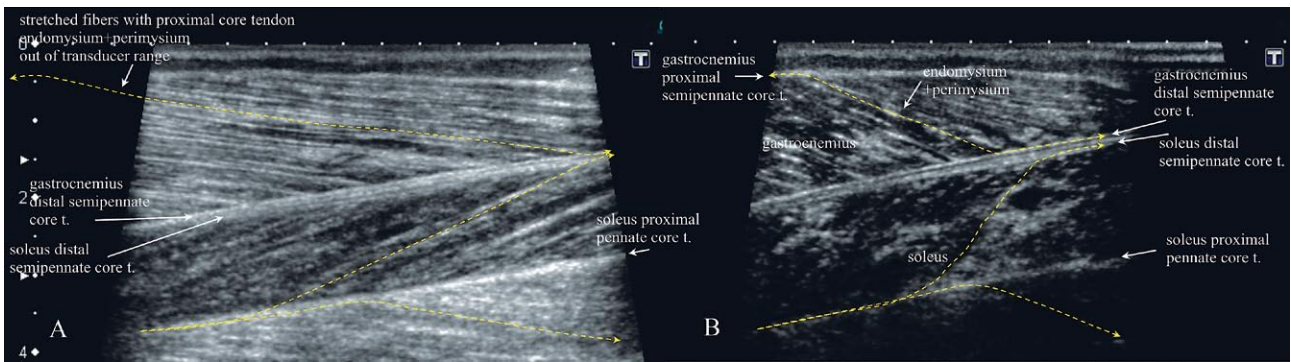
Muscle at the level of muscle belly is a delaminated tendon which hosts myofibers attached to it by a complex of structures called parietal and terminal myotendinous junctions.



Ryc. 22. Podłużny obraz usg mięśnia zginacza kciuka krótkiego; prawidłowa anatomia. Kropkowane żółte linie i strzałki pokazują dystrybucję włókien endomysium i perimysium przez rdzenie ścięgnięte. Jest to mięsień o rdzeniach pierzastych rozprowadzających/zbierających włókna po obu swoich stronach. Głowica liniowa 5-14 MHz.

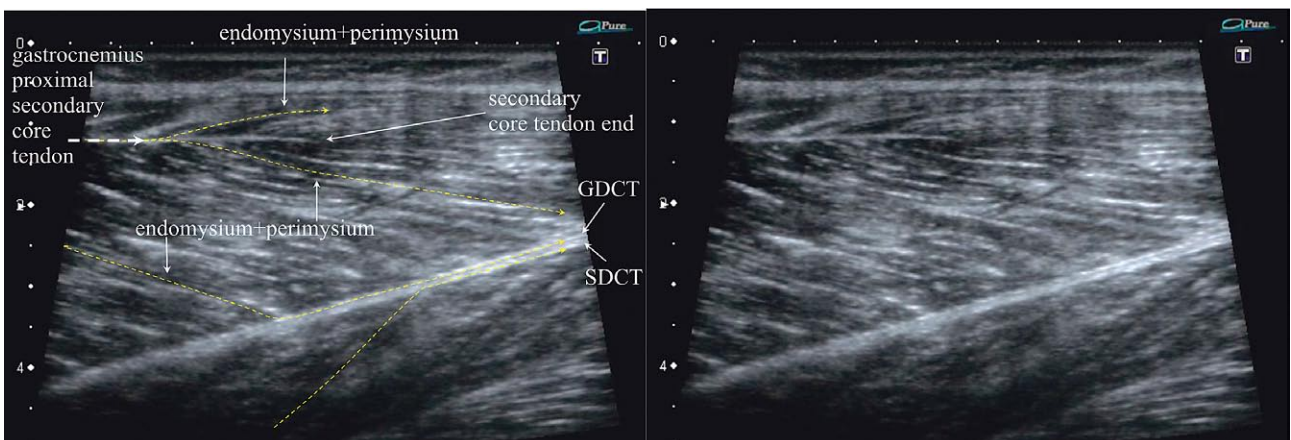
Fig. 22. Longitudinal image of the flexor pollicis brevis; normal anatomy. Dotted yellow line and arrows show distribution of endomysium and perimysium from/to core tendons. Both core tendons are pennate – double-sided distributors/collectors. Linear transducer 5-14 MHz.





Ryc. 23. Podłużny przekrój usg przez głowę przyśrodkową m. brzuchatego łydki i środkowo-dystalny odcinek m. płaszczkowatego w pozycji rozciągnięcia (A) i skurczu (B). Obraz A pokazuje mięśnie napięte/wydłużone, dlatego dominuje w nich obraz jasnych liniowych odbić napiętych włókien ścięgniętych endomysium i perimysium. Wydaje się również że w tym mięśniu jest mniej ciemnej tkanki mięśniowej co wynika z wydłużenia włókien mięśniowych, które w tym stanie stają się cieńsze. Podczas skurczu (B) włókna mięśniowe stają się krótsze, (czyli grubsze i ciemniejsze) a pasma endomysium i perimysium fałdują się i stają anizotropowe, czyli rozpraszają padające na nie ultradźwięki co objawia się na ekranie aparatu pod postacią jasno-ciemnych poprzerywanych nieregularnych odbić. Przerwane żółte linie na obu obrazach oznaczają przebieg włókien rdzeni bliższych, powstających z nich pasm endo- i perimysium przebiegających przez brzusec i tworzących rdzeń obwodowy. Głowica liniowa 5-12 MHz.

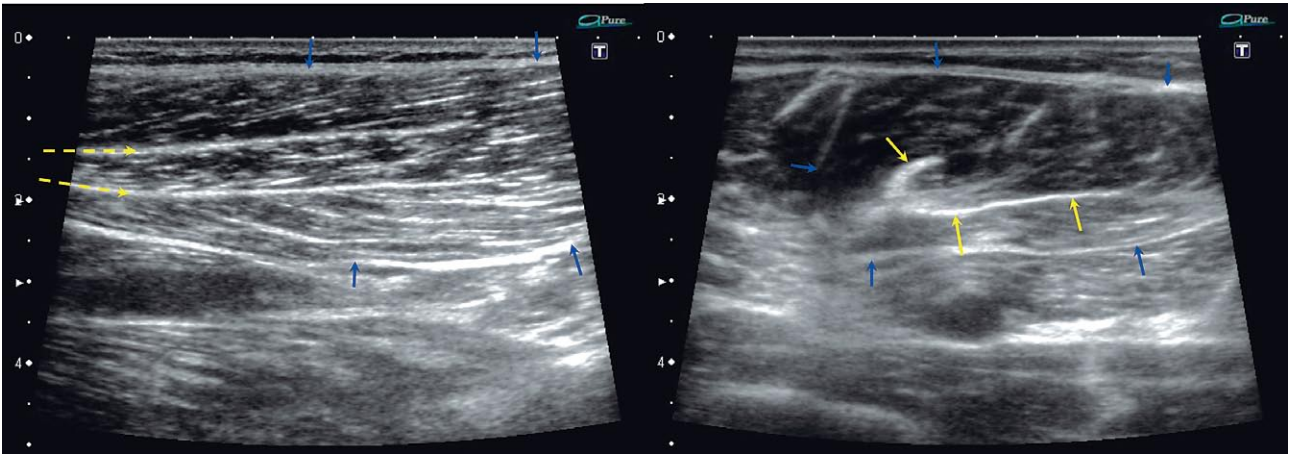
Fig. 23. A longitudinal section of the distal medial head of gastrocnemius muscle and mid-distal soleus during stretch (A) and contraction (B). Image A shows a stretched muscles, that is why they are bright – tendinous bands of stretched endomysium and perimysium fibers reflect US beam well. There also seems to be “less” black myotissue between them as they get elongated and thinner during stretch. On contraction (B) fibers get shorter, (thicker and darker – anisotropic) and the tendinous endo/perimysium is folded/wrinkled reflecting US beam much worse thus giving an image of dark breaks within the line of intramuscular tendinous fibers. Dashed yellow lines on both images represent a course of endomysial and perimysial fibers arising from proximal core tendon, running through a muscle belly and contributing to a core on the other side of it. Linear transducer 5-12 MHz.



Ryc. 24. Podłużny przekrój przez głowę przyśrodkową m. brzuchatego łydki i środkowo-dystalny odcinek m. płaszczkowatego w pozycji neutralnej. Zdjęcie po stronie prawej bez oznaczeń, dla ich lepszej klarowności na zdjęciu lewym. Przerwana gruba biała strzałka odpowiada lokalizacji drugorzędowego bliższego rdzenia mięśnia brzuchatego. Wychodzące spod niej dwie cienkie żółte przerywane strzałki odpowiadają pasmom endomysium i perimysium odchodzącym od rdzenia. Pozostałe żółte przerywane strzałki odpowiadają pasmom endo- i perimysium dochodzącym do dystalnego rdzenia głowy przyśrodkowej m. brzuchatego łydki (GDCT) i dystalnego rdzenia m. płaszczkowatego (SDCT). Głowica liniowa 5-12 MHz.

Fig. 24. A longitudinal section of the distal medial head of gastrocnemius muscle and mid-distal soleus in neutral position. The right is a raw image for better clarity of the left indicators. Dashed yellow lines on left image represent a course of endomysium/perimysium fibers arising from proximal secondary core tendon (white dashed arrow) and those contributing to distal gastrocnemius (GDCT) and soleus (SDCT) core tendons. Linear transducer 5-12 MHz.





Ryc. 25. Podłużny (lewa) i poprzeczny (prawa) przekrój mięśnia półbłoniastego w pozycji neutralnej. Przerwane żółte strzałki po stronie lewej wskazują na powierzchnią i głęboką część podkowiastego, pierzastego na tym poziomie rdzenia ścięgnistego bliższego, pełne żółte strzałki po stronie prawej wskazują cały podkowiastego kształtu przekrój poprzeczny rdzenia bliższego mięśnia. Niebieskie strzałki – zarysy mięśnia.

Fig. 25. A longitudinal (left) and transverse (right) scan of relaxed distal semimembranosus muscle. Pennate at this level proximal core tendon - dashed yellow arrows left showing superficial and deep part of the horseshoe, solid yellow arrows right showing a full horseshoe of the core tendon. Blue arrows – borders of the muscle.

## Definicje

**Mięsień** – całość jednostki mięśniowo-ścięgnistej od przyczepu (przyczepów) do przyczepu (przyczepów).

**Ścięgno** – pasma tkanki łącznej (ścięgnistej) pomiędzy przyczepem (przyczepami) mięśnia i początkiem brzośca mięśniowego.

**Brzusiec mięśniowy** – strefa mięśnia, gdzie obecne są włókna mięśniowe.

**Rdzeń ścięgnisty** – kontynuacja ścięgna na poziomie brzośca mięśniowego. Dystrybutor włókien ścięgnistych (endomysium) kotwiczonych w końcach włókna mięśniowego i biegnących po powierzchni każdego włókna mięśniowego oraz włókien ścięgnistych (perimysium) biegnących pomiędzy włóknami mięśniowymi i zespolonych z endomysium. Część powierzchniowych włókien rdzeni ścięgnistych powleka brzośce mięśniowe jako epimysium.

**Rdzeń ścięgnisty drugorzędowy** – pasmo ścięgna oddzielające się od rdzenia ścięgnistego śródbrzuscowo, nie będące endomysium, ani perimysium. Pierzasty z definicji dystrybutor włókien endomysium i perimysium.

**Endomysium** – pasma ścięgna zakotwiczone w końcach włókna mięśniowego i oplaszczające każde włókno mięśniowe na całej jego długości. Kontynuacja włókien ścięgna/rdzenia ścięgnistego lub włókna ścięgna przyczepiające się bezpośrednio do okostnej/kości. Włókna te mają dwie komponenty. Pierwsza kotwicz się w złączu mięśniowo-ścięgnistym terminalnym, druga przyczepia się do włókna mięśniowego na poziomie błon granicznych Z sarkomerów włókienek mięśniowych (złącze mięśniowo-ścięgna ścienne).

**Perimysium** – kontynuacja włókien ścięgna/rdzenia ścięgnistego lub włókna ścięgna przyczepiające się bezpośrednio do okostnej/kości. Włókna te bieżą pomiędzy włóknami mięśniowymi i są zespolone z endomysium. Ich grubsze pasma prowadzą naczynia krwionośne i nerwy.

## Definitions

**Muscle** – a full musculo-tendinous unit between origin/insertion.

**Tendon** – connective (tendinous) tissue bands between origin/insertion and muscle belly.

**Muscle belly** – a zone of a muscle where myofibers are present.

**Core tendon** – continuum of a tendon at the level of muscle belly. A distributor of tendinous fibers running into terminal myotendinous junction (TMTJ) and surface of every myofiber as endomysium and between endomysial layers as perimysium. Some superficial core tendon fibers are distributed as epimysium to cover a whole muscle belly.

**Secondary core tendon** – a band of strong tendinous tissue arising from a core tendon, not endomysium or perimysium. A distributor of endomysial and perimysial fibers, pennate by definition.

**Endomysium** – tendinous bands anchored into ends of myofibers and those covering every single myofiber along its whole length. It is a continuous structure to a tendon, core tendon or fiber arising directly from a bony insertion. Endomysium divides into two components. First ends and anchors in the terminal myotendinous junction at the beginning and end of a myofiber, second covers the whole myofiber attaching to it at Z membranes of myofibrils/sarcomeres (parietal myotendinous junction).

**Perimysium** – a continuous structure to a tendon, core tendon or fiber arising directly from a bony insertion. These fibers run between endomysial sheaths of myofibers and are intermingled with them reinforcing the structure of a muscle belly. Their thicker bands host and protect nerves and vessels.

**PMTJ** (parietal myotendinous junction) – a junction between sarcomeres/myofibrils and endomysium at the whole length of a myofiber.

**ZMSS** (złącze mięśniowo-ścięgniste ścienne) – połączenie włókien mięśniowych na każdym poziomie błony granicznej Z sarkomerów z endomysium na całej długości włókien. Strefa nocycepcji mięśnia.

**ZMST** (złącze mięśniowo-ścięgniste terminalne) – system kotwiczenia włókien endomysium w obu końcach włókna mięśniowego. Strefa propriocepcji mięśnia.

**TMTJ** (terminal myotendinous junction) – endomysial fibers anchoring system into both ends of the myofiber, a proprioceptive center of a muscle.

**Sugerowana literatura/Suggested readings:**

1. Engel AG, Franzini-Armstrong C, Myology third edition, McGraw-Hill, 2004
2. Ostrowski K; Histologia, PZWL, Warszawa 1988.
3. Gray's Anatomy, thirty ninth edition, Elsevier Ltd, 2005
4. DiGiacomo G, Pouliart N, Costanini A, De Vita Andrea, Atlas of Functional Shoulder Anatomy. Springer-Verlag, 2008
5. Bochenek A, Reicher M. Anatomia człowieka; PZWL, Warszawa 1990, wydanie X, Tom I.
6. Jozsa L, Kannus P, Human Tendons. Human Kinetics, 1997
7. Czyrny Z, US diagnostic imaging of selected lower limb muscles (Diagnostyka USG wybranych grup mięśniowych kończyny dolnej). Acta Clinica, Warszawa, 3/2004
8. Noonan TJ, Garrett WE Jr, Muscle injury of the posterior leg. Foot Ankle Clin 1997; 2: 457-471.
9. Visible Human Project, National Library of Medicine, 8600 Rockville Pike, Bethesda.