Strukturelle Veränderungen im trainierten menschlichen Skelettmuskel als Ausdruck eines erhöhten Dauerleistungsvermögen

Autor(en): **Howald, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Jugend und Sport : Fachzeitschrift für Leibesübungen der Eidgenössischen Turn- und Sportschule Magglingen**

Band (Jahr): **30 (1973)**

Heft 4

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-994829

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

FORSCHUNG TRAINING WETTKAMPF
Sporttheoretische Beiträge und Mitteilungen

RECHERCHE ENTRAÎNEMENT COMPÉTITION
Complément consacré à la théorie du sport

REDAKTION: FORSCHUNGSINSTITUT DER ETS

RÉDACTION: INSTITUT DE RECHERCHES DE L'EFGS

Nach internationalem wissenschaftlichem Brauch erscheinen Publikationen in dieser 8 Seiten umfassenden Beilage in der Originalsprache und werden durch die Redaktion lediglich mit einer anderssprachigen Zusammenfassung ergänzt.

Selon la coutume internationale dans les sciences, les publications de ce complément de 8 pages se font dans leur langue d'origine. La rédaction ajoute uniquement un bref résumé dans l'autre langue

Aus dem Forschungsinstitut der Eidgenössischen Turn- und Sportschule, Magglingen (Leitung: Dr. med. H. Howald)

Strukturelle Veränderungen im trainierten menschlichen Skelettmuskel als Ausdruck eines erhöhten Dauerleistungsvermögens

H. Howald

Leistungsphysiologie und Sportmedizin befassen sich seit Jahrzehnten mit der möglichst objektiven Ermittlung der durch körperliche Aktivität hervorgerufenen Veränderungen im menschlichen Organismus, und ihre Erkenntnisse haben wesentlichen Anteil an der Entwicklung moderner Trainingsmethoden gehabt. Von jeher wurden diejenigen Anpassungserscheinungen am meisten untersucht, welche mit einem erhöhten Dauerleistungsvermögen als einer für sehr viele Sportarten entscheidend wichtigen Komponente der körperlichen Leistungsfähigkeit einhergehen. Mit den Methoden der Spiroergometrie konnte nachgewiesen werden, dass der sportliche Erfolg in Prüfungen mit hoher körperlicher Belastung ab etwa zwei Minuten zeitlicher Dauer in zunehmendem Masse von der Fähigkeit des Organismus abhängig ist, Sauerstoff aus der Umgebungsluft aufnehmen zu können. Nachdem messbare, trainingsbedingte Veränderungen im Bereich der Atmung, des Herz-Kreislaufsystems und des Blutes beobachtet wurden, welche alle auf eine Verbesserung der Sauerstofftransportkapazität hinwiesen, wurde der limitierende Faktor für das Dauerleistungsvermögen allgemein in der Leistungsfähigkeit dieser sauerstofftransportierenden Organsysteme und speziell in deren engstem Querschnitt, nämlich der Förderleistung des Herzens als Pumpe gesehen. Da die arbeitende Muskulatur mit den bisherigen Untersuchungsmethoden nicht erfasst werden konnte, wurde den Problemen des Sauerstoffverbrauches gegenüber denjenigen des -transportes kaum Beachtung geschenkt. Hinweise darauf, dass der trainierte Skelettmuskel mehr Sauerstoff verbrauchen kann als der untrainierte, ergaben sich lediglich indirekt, das heisst aus Bestimmungen des Sauerstoffgehaltes im arteriellen und venösen Blut, und man erklärte sich die bei trainierten Individuen vergrösserte arteriovenöse Sauerstoffkonzentrationsdifferenz mit einer verbesserten Muskeldurchblutung.
Die vorliegende Arbeit soll zeigen, wie mit neu entwickelten Methoden nunmehr auch das Leistungsvermögen der sauerstoffverbrauchenden Skelettmuskulatur bestimmt werden kann und wie sich dadurch neue Erkenntnisse auf dem Gebiete des Leistungsstoffwechsels und seiner Trainierbarkeit gewinnen lassen.

1. Muskelbiopsie

Mit der im Jahre 1962 durch den Schweden *Bergström* eingeführten Nadelbiopsietechnik wurde es erstmals möglich, am lebenden Menschen Muskelgewebe ohne grösseren chirurgischen Eingriff und ohne Risiko zu entnehmen. Wir verwenden die von *Bergström* entwickelte Nadel mit 4,5 mm Aussendurchmesser, die nach lokaler Betäubung der Haut und des Unterhautgewebes durch eine mit dem Skalpell gesetzte 4 bis 5 mm lange Stichinzision in den zu untersuchenden Muskel eingeführt wird. Da der Muskel selbst nicht schmerzempfindlich ist, bereitet das anschliessende Herausstanzen von zirka 10 bis 30 mg Gewebe keine Schmerzen. Die kleine Hautwunde braucht nicht genäht zu werden und heilt innert weniger Tage. Der Verlust einer derart geringen Menge an Muskelgewebe ist für die Funktion des Gesamtmuskels ohne jede Bedeutung, und es kann sofort nach der Biopsie belastet und auch trainiert werden. Der kleine Eingriff ist auch Hochleistungssportlern zumutbar, und es sind uns bereits mehrere Gewinner von Olympia- und Weltmeisterschaftsmedaillen bekannt, welche sich der Muskelbiopsie unterzogen haben. Der seitliche Anteil der Oberschenkelstreckmuskulatur ist die geläufigste Entnahmestelle, doch wurde auch schon über Biopsien aus der Waden- und Schultermuskulatur berichtet. Ein wesentlicher Vorteil der Methode liegt unseres Erachtens gerade darin, dass sich mit ihr die je nach Sportart spezifisch trainierte Muskulatur untersuchen lässt, also zum Beispiel beim Läufer oder Radfahrer die Oberschenkelmuskulatur und beim Schwimmer oder Kanuspezialisten die Schultermuskulatur.

2. Elektronenmikroskopie

Das entnommene Muskelgewebe kann prinzipiell sowohl chemisch wie mikroskopisch untersucht werden, wobei wir uns in diesem Rahmen vorläufig auf die Darstellung der mikroskopischen Untersuchungstechniken beschränken müssen.
Die mikroskopische Untersuchung des trainierten Skelettmuskels musste so lange relativ unergiebig bleiben, als sich im konventionellen Lichtmikroskop auch bei stärkster, das heisst etwa tausendfacher Vergrösserung nur grobe Strukturen wie die Muskelfasern als Ganzes, die Kerne der Muskelzellen und die Kapillaren erkennen liessen. Die für die Stoffwechselleistung der Muskelzelle und speziell für ihren Sauerstoffverbrauch verantwortlichen feineren Zellstrukturen kommen mit ihren Details erst bei den durch das Elektronenmikroskop ermöglichten zwanzigtausend- bis zweihunderttausendfachen Vergrösserungen zur Darstellung. Als erste haben 1969 fast gleichzeitig *Gollnick* und *Kraus* über eine Zunahme von Zahl und Grösse der Mitochondrien im Skelettmuskel der trainierten Ratte berichtet, und 1971 wurden ihre Befunde von *Kiessling* und *Morgan* für den trainierten Skelettmuskel des Menschen bestätigt. Mit biochemischen Methoden konnte seit 1967 vor allem der Arbeitskreis von *Holloszy* in der Skelettmuskulatur der trainierten Ratte erhöhte Aktivitäten von Enzymen des Zitratzyklus, der Aktivation und des Transportes von Freien Fettsäuren sowie der Atemkette nachweisen. Nachdem sämtliche genannten Enzyme einerseits eng mit dem Sauerstoffverbrauch der Zelle gekoppelt und andererseits an die elektro-

nenmikroskopisch nachweisbaren Strukturen, insbesondere die Mitochondrien mit ihren verschiedenen Membranen gebunden sind, lag es nahe, diese Strukturen der Skelettmuskelzelle mit möglichst genauen Methoden quantitativ zu erfassen und das Ausmass der durch Dauerleistungstraining herbeigeführten morphologischen Veränderungen zu ermitteln.

3. Morphometrie

Sollen die im elektronenmikroskopischen Präparat nachweisbaren strukturellen Veränderungen, zum Beispiel mit den Ergebnissen leistungsphysiologischer oder biochemischer Untersuchungsmethoden in Zusammenhang gebracht werden, so ist ihre exakte quantitative Beurteilung unerlässlich. Das in den letzten Jahren von *Weibel* entwickelte System der stereologischen Morphometrie ermöglicht es, Volumina, Oberflächen und Zahl der verschiedenen Zellbestandteile zu messen. Die Methode beruht im wesentlichen auf Gesetzen der geometrischen Wahrscheinlichkeit und bedingt einen relatif grossen Rechenaufwand, welcher jedoch durch Einsatz von Computerprogrammen leicht zu bewältigen ist.

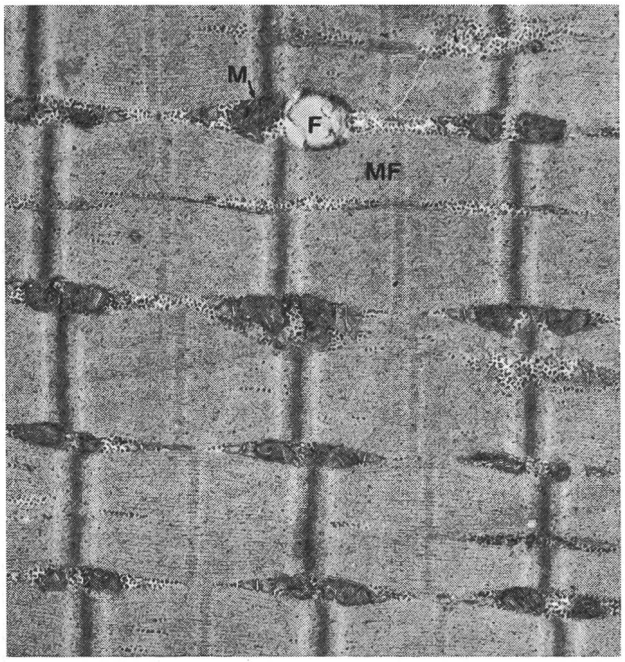
4. Muskulatur des gut trainierten Dauerläufers

Für eine erste Untersuchungsreihe stellten sich uns fünf guttrainierte Läufer und eine Läuferin der Schweizer Nationalmannschaft im Orientierungslauf zur Verfügung, welche einer gleichaltrigen Gruppe von neun nicht regelmässig trainierenden Männern und drei keinen Sport treibenden Frauen gegenübergestellt wurden. Die mit Hilfe der klassischen Spiroergometrie ermittelte und auf das Körpergewicht der Probanden bezogene maximale Sauerstoffaufnahme lag bei den Orientierungsläufern um einen Faktor 1,25 hochsignifikant höher als bei den nichttrainierenden Männern, und diese wiesen wiederum gegenüber den nicht Sport treibenden Frauen eine um den Faktor 1,4, ebenfalls hochsignifikant, bessere Sauerstoffaufnahmekapazität auf.

Im elektronenmikroskopischen Bild der untersuchten Oberschenkelmuskulatur ergeben sich zwischen trainierten und untrainierten Probanden schon rein aspektmässig gewaltige Unterschiede, welche sich durch die quantitative Morphometrie bestätigen lassen. In Abb. 1 a) ist die Muskulatur eines untrainierten Probanden und in Abb. 1 b) jene eines Spitzenläufers im genau gleich grossen Vergrösserungsmassstab im Längsschnitt dargestellt. Es lässt sich unschwer feststellen, dass der Skelettmuskel des trainierten Läufers bei strukturell unveränderten Muskelfibrillen einerseits ganz wesentlich vergrösserte Mitochondrien und andererseits wesentlich mehr Fetttröpfchen enthält.

4.1 Mitochondrienvolumen und Mitochondrienoberflächen

Der prozentuale Volumenanteil der Mitochondrien am Gesamtzellinhalt ist im Skelettmuskel der trainierten Orientierungsläufer hochsignifikant grösser als in demjenigen der nicht regelmässig trainierenden Männer und im Muskelgewebe der letzteren wiederum signifikant höher als in demjenigen der keinen Sport treibenden Frauen. In Abb. 2 sind die Gruppenunterschiede für die untrainierten und trainierten Männer graphisch dargestellt. Das totale Mitochondrienvolumen hat bei den Orientierungsläufern mit verbesserter Sauerstoffaufnahmekapazität um einen Faktor 1,4 zugenommen, die Aufgliederung



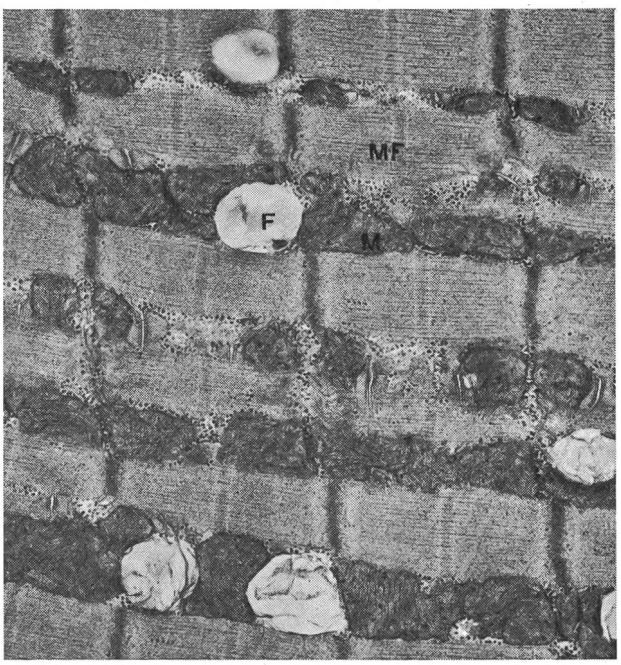


Abb. 1: Skelettmuskulatur im Längsschnitt:

a) untrainierter Mann

b) guttrainierter Orientierungsläufer

(MF = Muskelfibrillen – M = Mitochondrien – F = Fetttröpfchen)
Vergrösserung: 15 000 fach

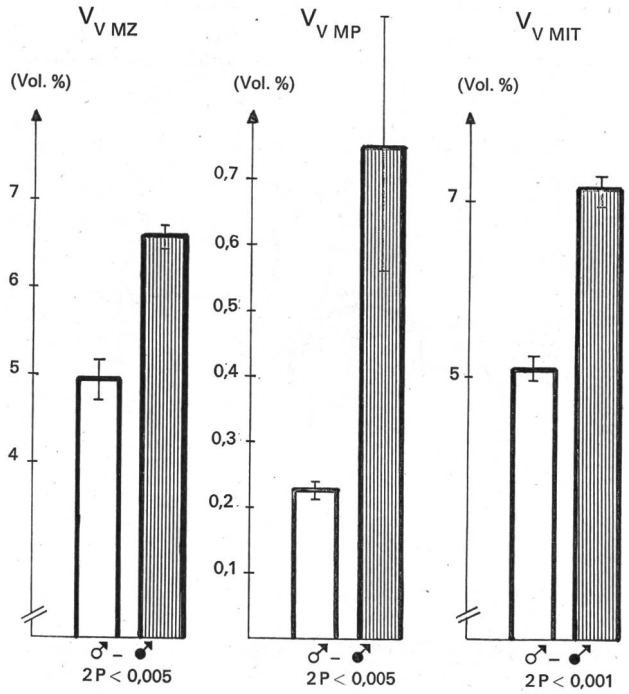


Abb. 2: Mitochondrienvolumina:
Mittelwerte und Standardfehler des Mittelwertes für Mitochondrienvolumina:
leere Säule = untrainierte Männer
schraffierte Säule = Orientierungsläufer
(V_{VM_Z} = zentrale Mitochondrien – V_{VM_P} – periphere Mitochondrien – V_{VMI_T} = totales Mitochondrienvolumen)

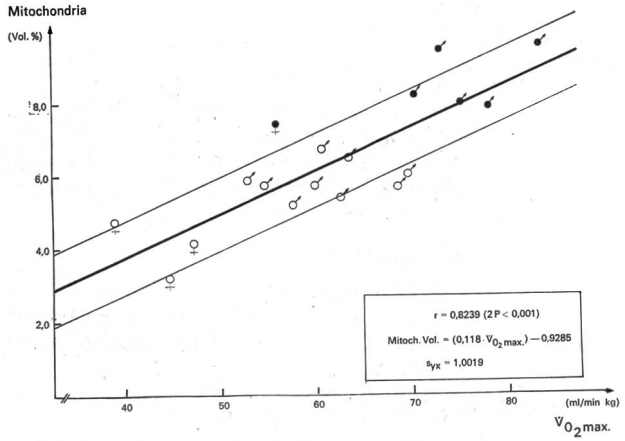


Abb. 3: Korrelation zwischen maximaler Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}_{O_2}$ max.) und Mitochondrienvolumen

♀ = Frauen, untrainiert
♂ = Männer, untrainiert
♀ = Frauen, trainiert
♂ = Männer, trainiert

nach zentral, das heisst zwischen den Muskelfibrillen gelegenen und peripher, das heisst unter der Zellmembran gelegenen Mitochondrien ergibt eine Zunahme um den Faktor 1,2, resp. 3,2. Die untrainierten Männer wiesen ein um den Faktor 1,25 grösseres totales Mitochondrienvolumen auf als die untrainierten Frauen. Zwischen dem totalen Mitochondrienvolumen und der spiroergometrisch ermittelten maximalen Sauerstoffaufnahme besteht eine hochsignifikante Korrelation (Abb. 3).
Eine ebenfalls vom Trainingszustand und vom Geschlecht abhängige Zunahme erfahren die Mitochondrienoberflächen, und zwar sowohl diejenige der Aussenmembran wie diejenige der in Form der sogenannten Cristae mehrfach gefalteten Innenmembran der Mitochondrien. Bei den Männern macht der durch das regelmässige Dauerleistungstraining bedingte Zuwachs für beide Membranoberflächen mehrere Quadratmeter pro cm^3 Muskelgewebe aus (Faktor 1,28 für die Aussenmembran und 1,63 für die Cristaeoberfläche). Bei den untrainierten Probanden haben wir eine um den Faktor 1,35 grössere Oberfläche der Aussenmembran und eine um den Faktor 1,45 grössere Cristaeoberfläche zugunsten des männlichen Geschlechtes ausgemessen. Wie für das Mitochondrienvolumen konnte auch für die Mitochondrienoberflächen eine signifikante Korrelation zur maximalen Sauerstoffaufnahmefähigkeit errechnet werden.

4.2 Fettreserven der Muskelzellen

Die quantitative Auswertung ergab in Bestätigung des optischen Eindruckes den auf den ersten Blick überraschenden Befund, dass die trainierten Muskelzellen im Durchschnitt um einen Faktor 2,5 mehr Fett enthalten als die untrainierten. Dagegen war in dieser Beziehung kein Unterschied zwischen den beiden Geschlechtern zu ermitteln. Bei den in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Mitochondrien eingelagerten Fetttröpfchen handelt es sich chemisch um Triglyceride, welche der Muskelzelle vor allem für Dauerleistungen als Nährstoff bei der Energiebereitstellung zur Verfügung stehen.

4.3 Übrige Zellstrukturen

Der Anteil der Muskelfibrillen am Gesamtzellinhalt nahm im trainierten Muskel zugunsten der Mitochondrien leicht ab. Die übrigen von uns vermessenen Zellstrukturen, nämlich Zellplasma, introzelluläres Röhrensystem (transversale und longitudinale Tubuli) und Glykogengehalt zeigten weder geschlechtsspezifische noch vom Trainingszustand abhängige Unterschiede.

5. Schlussfolgerungen

Mit der beschriebenen Untersuchungstechnik wurde zwischen Struktur und Funktion eine direkte Verbindung geschaffen, und es wurde das letzte Glied in der langen Kette der Sauerstoffübertragung von der Aussenluft bis in zu den die Energie für die Muskelarbeit produzierenden Elementen einer direkten quantitativen Untersuchung zugänglich gemacht.
Anhand der dargestellten Ergebnisse ist nicht mehr daran zu zweifeln, dass die bekannten geschlechtsspezifischen und vom Trainingszustand abhängigen Unterschiede im Sauerstoffaufnahmevermögen des Menschen zu einem wesentlichen Teil von der Feinstruktur der Muskelzelle abhängig sind. Mit andern Worten drückt sich das individuelle Dauerleistungsvermögen ganz klar im Volumen und in den Membranoberflächen

der Mitochondrien aus, in welchen bekanntermassen der oxydative Zellstoffwechsel abläuft. Ferner legt sich offenbar im Laufe des Trainingsprozesses der trainierte Skelettmuskel eine Energiereserve in Form von direkt in den einzelnen Zellen eingelagerten Fetttröpfchen an.
Es bestehen Anhaltspunkte dafür, dass die zelluläre Oxydationskapazität letztlich sogar der entscheidende Faktor für das Dauerleistungsvermögen ist und nicht wie bisher angenommen die Leistungsfähigkeit der Sauerstofftransportorganisation über Lunge, Herz und Blutkreislauf. Dabei liegt es auf der Hand, dass auch die Transportkapazität gesteigert werden muss, wenn in der arbeitenden Muskulatur mehr Sauerstoff pro Zeiteinheit umgesetzt werden kann. Eine optimale Leistung ist sicher nur dann möglich, wenn alle Elemente in ihrer funktionellen Kapazität aufeinander abgestimmt sind und reibungslos ineinandergreifen.
Wir sind überzeugt davon, dass sich mit Hilfe der Muskelbiopsie und der gezielten mikroskopischen oder biochemischen Weiterverarbeitung des entnommenen Muskelgewebes in den nächsten Jahren eine ganze Reihe von Fragen aus Leistungs- und Trainingsphysiologie werden lösen lassen, welche mit den bisher zur Verfügung stehenden Methoden offen bleiben mussten.

Literaturverzeichnis

Hoppeler, H., Lüthi P., Claassen H., Weibel E.R. und Howald H.: Die Ultrastruktur des normalen menschlichen Skelettmuskels – eine morphometrische Analyse bei untrainierten Männern und bei guttrainierten Dauerleistern. Hoppe-Seyler's Z. Physiol. Chem. (im Druck).

Howald, H.: Anatomische, physiologische und biochemische Grundlagen der Muskelkontraktion. Jugend und Sport 29, 11–13 (1972).

Howald, H. et Moesch H.: Fondements anatomiques, physiologiques et biochimiques de la contraction musculaire. Jeunesse et Sport 29, 167–170 (1972).

Weibel, E.R.: Stereological principles for morphometry in electron microscopic cytology. Int. Rev. Cytol. 26, 235–302 (1969).

Transformations structurelles dans le muscle squelettique entraîné témoignant d'une endurance accrue (résumé)

En complétant les méthodes traditionnelles pour déterminer l'état d'entraînement, le suédois *Bergström* fut le premier, en 1962, à introduire une nouvelle technique moyennant la biopsie musculaire. Cette méthode permet de prélever du tissu musculaire de l'homme vivant sans risque et sans intervention chirurgicale. La biopsie musculaire, adoptée et poursuivie par l'auteur, est décrite dans le présent article ainsi que les examens au microscope électronique du tissu musculaire prélevé. On a vu que le muscle de l'homme se distingue nettement de celui de la femme, présentant des mitochondries plus importantes en volume aussi bien qu'en surface de leurs membranes extérieures et intérieures. L'entraînement à l'endurance augmente ces mêmes volumes et surfaces mitochondriales sans rien changer aux autres structures cellulaires, à l'exception d'un réservoir accru en gouttelettes de graisse. Il existe une corrélation très significative entre le volume des mitochondries et la capacité maximale d'absorption d'oxygène.

Die elektronenmikroskopisch-morphometrischen Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden durch Frl. H. Claassen und die Herren cand. med. H. Hoppeler und P. Lüthi am Anatomischen Institut der Universität Bern (Direktor: Prof. Dr. med. E. R. Weibel) durchgeführt.

Institut de recherches de l'Ecole fédérale de gymnastique et de sport (Direction: Dr méd. H. Howald)

Au pas de course dans l'arthrose

H. Moesch

Tous les mouvements nécessaires à la vie courante, que ce soit la marche, la course à pied, les sauts ou même la position assise, mettent à contribution une articulation très importante: celle des hanches.

Articulation de la hanche

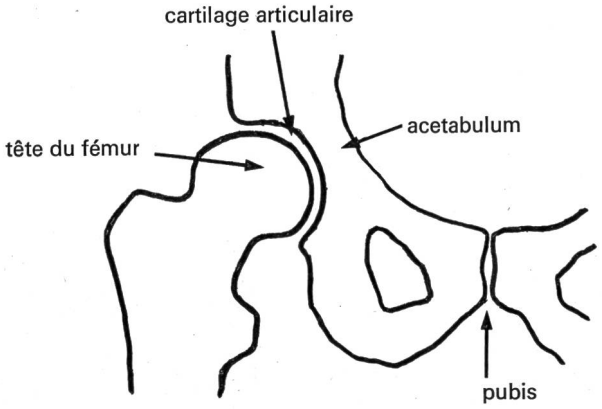


Fig. 1: Schéma de l'articulation de la hanche. Aspect normal.

Lors d'un saut, par exemple, cette articulation transmet des forces équivalentes à quatre fois le poids du corps. Il n'est donc nullement étonnant que cette articulation soit sujette à des troubles de natures diverses.
Les changements qui peuvent survenir s'expriment souvent par l'ostéo-arthrose, une cause importante de l'impotence articulaire. L'articulation des hanches peut donc être bloquée (dans les cas graves) par l'arthrose. Ces signes de maladie surviennent généralement dès la quarantaine chez les personnes qui en sont affectées.
L'importance économique de cette maladie n'est d'ailleurs pas négligeable, car elle rend impropres au travail des personnes autour de 50 à 60 années d'âge, période qui est en général celle de la productivité économique maximale.
Sous nos latitudes, on compte qu'environ le 13 pour cent de la population adulte au-dessus de 45 ans en est affectée.
Il est évident qu'une action tendant à diminuer cette proportion de gens fortement souffrants est à rechercher.
La question se pose alors de savoir d'où provient cette maladie, quelles en sont les causes majeures.
En examinant les articulations des malades, on constate qu'il s'agit de transformations dégénératives secondaires, provenant principalement des causes primaires suivantes:

– Dysplasie acétabulaire:

  Trouble dans le développement de l'acétabulum (os du bassin en opposition à la tête du fémur), entraînant une déformation de celle-ci. Il en résulte un fonctionnement réduit de l'articulation.

– Maladie de Perthes:

  aussi appelée arthrite déformante juvénile. Il s'agit d'un trouble de croissance de l'épiphyse (zone de croissance) de la tête fémorale, qui s'aplatit, se condense et prend un aspect fragmenté. C'est une maladie grave qui donne souvent une déformation de la hanche.