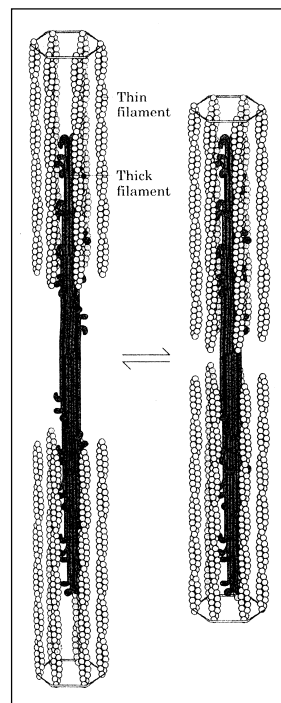


Musklers molvægte og andre principielle spørgsmål

De husker måske, at jeg sidst stillede spørgsmålet om muskler med mening kan tillægges molvægte? Jeg besvarede det med et rungende, radikalt »Hm, tja, bum, bum bum«. Dette svar vil jeg nu modificere en anelse over mod det positive: »Hm, tja måske«. Årsagen til spørgsmålet var, at mit Arrheniusudtryk for denaturerings-hastigheden af kød ellers ville savne mening. Hvad er meningen med aktiveringsenergi og -entropi, hvis disse parametre ikke refererer til bestemte molekyler (deres enheder er hhv. J og J/K pr. mol)? Men først må vi ud og kigge på bicepser. Se figur 1, som viser strukturhierarkiet for en typisk skeletmuskel.

Vi skal helt ned i bunden af hierarkiet, før der begynder at komme noget, der kandidater til at kunne kaldes molekyler. Her finder vi »de tykke filamenter« og »de tynde filamenter«. I en rumlig udgave er hvert tykt filament omgivet af seks tynde, der omgiver det tykke som en cylinder, se figur 2.

De tykke filamenter udgøres af hver ca. 400 myosinmolekyler – myosinmolekylet er den ene kandidat til vores muskelmolekyler – der er bundet sammen af proteinbånd med jævne mellemrum. Hvert myosinmolekyle ender i et lille hoved, som er ansvarlige for musklens kontraktion, når en nerveimpuls sætter denne i gang. Det sker ved, at hovederne nikker i takt indad mod midten, samtidig med at de griber fat i de tynde filamenter. Alt dette sker ved energitilførsel fra ATP, som både aktiverer hovedet så det sætter sig fast og efterfølgende nikker. Alt dette behøver man ikke at vide, for vi taler jo om døde muskler i denne sammenhæng, og det er nok de færreste, der vil synes om, at bøffen bevæger sig, når man skærer i den – al har det jo med den slags.



Figur 2. Hvert af de tykke filamenter er omgivet af 6 tynde; det hele fungerer som en cylinder med et stempel.

De tynde filamenter udgøres af F-actin, hvor F står for *fibrillær*. F-actin dannes ved en ejendommelig ATP-promoveret polymerisation af G-actin, hvor G står for *globulær*; se figur 3 – G-actin er den anden kandidat til vores muskelmolekyler.

Ifølge BGS [1] udgør myosinmolekylerne 50% af »det kontraktile apparat« (a good wænning). Det kan ekstraheres fra muskeltvæv med pufferopløsninger med høj ionstyrke – så man ville altså kunne udføre denatureringsforsøg med det – og har en molvægt(!) på ca. 500.000. Myosin består dog igen af to om hinanden snoede α -helixer med molvægte på 200.000 samt af fire mindre proteiner fra hovederne. Se figur 4.

G-actin består af 375 aminosyrer og har en molvægt på 42.000 og polymeren F-actin udgør 22% af apparatet. Nu har vi gjort rede for ca. 3/4 af selvsamme apparat.

Ser vi nu på musklen som helhed, så er proteinandelen disponeret som det ses i tabel 1.

Nu er der jo (mindst) to slags tilberedninger af kød: stegning af det møre (bindevævsfattige, typisk mørbrad) og kogning/braisering af det seje (bindevævsrige, typisk osso buco på okseskank). DIX-indexet – som jo var det, der satte alt dette i gang – er kun relevant for den første slags tilberedning. Under den sidste tilstræbes der jo 100°C overalt i kødet samt opløsning/kvældning af bindevævet hen ad vejen. Vi har derfor i denne sammenhæng med noget kød at gøre med mere muskeltvæv/sarkoplasma og mindre bindevæv.

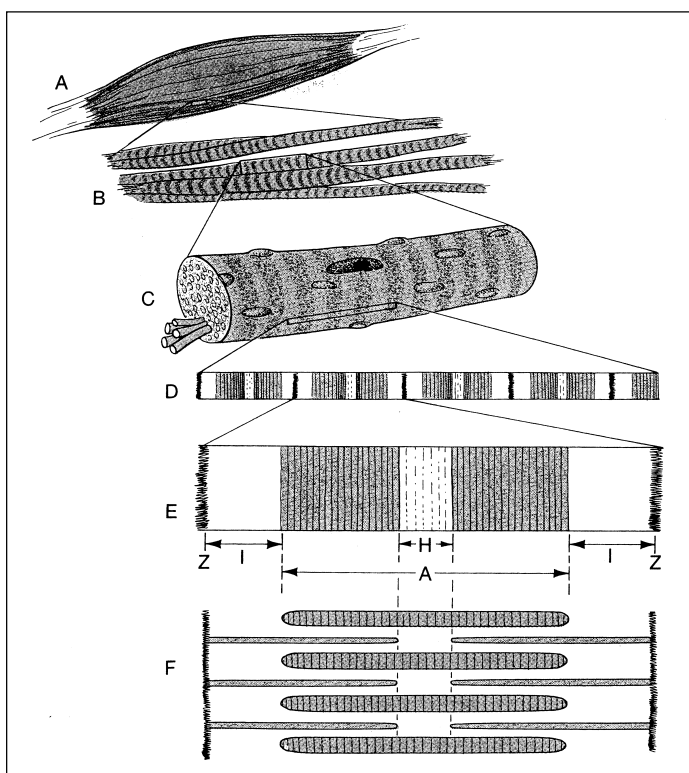
Muskelprotein	Andel af protein
Myofibrillært (filamenterne)	60,5%
Sarkoplasmaproteiner*	29%
Bindevævsproteiner	10,5%

*Sarkoplasmaet er det flydende indhold af musklen

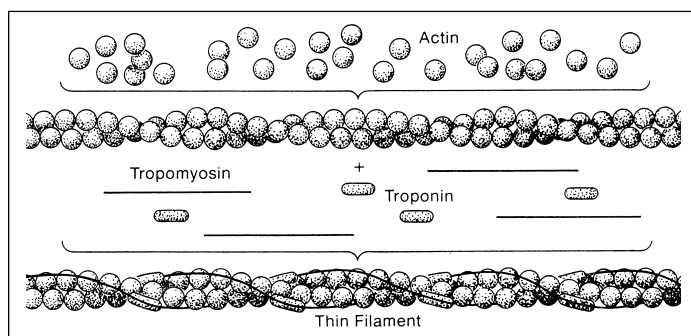
Tabel 1. Oversigt over musklers protein.

Hvad fisk angår så er selve det kontraktile apparat meget beslægtet med pattedyrs og fugles, men måden det er ophængt på er anderledes – i stedet for i Z-linien sidder sarkomererne fast i opløseligt bindevæv i enderne, hvilket betinger, at fiskekød har det med at falde fra hinanden i flager ved relativt lav temperatur, o. 55°C.

Vi har altså lokaliseret nogle molekyler, der med rimelighed



Figur 1. Strukturhierarkiet i en skeletmuskel.



Figur 3. G-actin samler sig til F-actin under medvirkning af ATP.

kan siges at »udgøre« musklerne, og som har molvægte hhv. o. 200.000 og o. 42.000. Men på en eller anden måde forekommer det ikke indlysende, at det skulle være nødvendigt. Det fik mig til at kigge lidt på, hvordan Arrhenius i grunden fandt på sin ligning. Iflg. Moore [2] skete det (i 1887) ved at Arrhenius kiggede på 1) Van't Hoffs ligning for ligevægtes temperaturafhængighed:

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{\Delta E}{RT^2}$$

og 2) massevirkningsloven, ifølge hvilken ligevægtskonstanten kunne ses som forholdet mellem hastighedskonstanterne for den frem- og den tilbagegående reaktion.

$$K = \frac{k_{\rightarrow}}{k_{\leftarrow}}$$

Han foreslog derfor et udtryk for hastighedskonstanten $k_{\rightarrow}$,

$$\frac{d \ln k_{\rightarrow}}{dT} = \frac{E_{a \rightarrow}}{RT^2}$$

$E_{a \rightarrow}$ kaldte han *aktiveringsenergien*. Det var så den teori, og herfra stammer gaskonstanten i udtrykket, og dermed den molekylære fortolkning. Det vender jeg tilbage til nedenfor.

Det år jeg blev født, fremsatte Eyring [3] så »Transition-state teorien«, som byggede på ideen om et »aktiveret kompleks«, som ifølge teorien skulle være i en pseudotermodynamisk ligevægt med reaktanterne. Hastighedskonstanten blev nu formuleret som pseudoligevægtskonstanten ganget med en universel frekvensfaktor kT/h :

$$k_{\rightarrow} = \frac{kT}{h} K^{\ddagger}$$

Ved at indføre den (pseudo) fri energi på dette sted fås denne formel:

$$k_{\rightarrow} = \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{-\Delta G^{\ddagger}}{RT}\right) = \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{\Delta S^{\ddagger}}{R}\right) \exp\left(\frac{-\Delta H^{\ddagger}}{RT}\right)$$

og nu har vi jo i det store og hele Arrhenius' udtryk – man kan godt få E ind i stedet for H, men glem det. A-faktoren bliver således noget med aktiveringsentropien som tidligere omtalt. »Pseudo« går på, at det aktiverede kompleks ikke er et stabilt molekyle, men henfalder med den universelle frekvens kT/h , idet en af molekylets (svingnings-) frihedsgrader formodes at få det til at henfalde til produkterne.

I biokemibøgerne har man slugt alt dette råt, formodentlig fordi det giver en rar måde at tænke over de biokemiske processer på. Og så går man i øvrigt lynhurtigt over til at tale om enzymkatalyse. Men hvad med denaturering af proteiner? Hvad er det aktiverede kompleks for et 110 nm langt myosin-

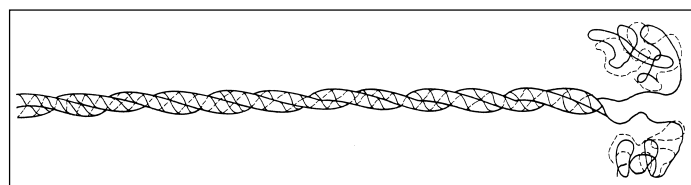
molekyle, som skal til at denaturere? Eller for det globulære G-actin for den sags skyld? Giver det overhovedet mening at tale om én bestemt frihedsgrad, der får molekylet til at gå fra aktiveret kompleks til denatureret molekyle?

Af en eller anden grund poppede udtrykket »at opgive ævred« op i hovedet på mig. Om dette udtryk lærte jeg i min skoletid, at når høsten var ovre, så væltede man de hegn – ævred – der skilte kvægets normalt tilmålte område fra kornmarkerne, hvorefter »Hornquæg og Heste« frydefuldt kastede ud over stubmarkerne for at tage for sig af retterne (hvorimod, som skrevet står: »Får skal holdes tøjret« [4]). Kunne man tænke sig, at den universelle frekvens kunne have at gøre med en svingning, der kunne medføre udløsningen af en sådan dominoeffekt? Hvis ja, vil jeg ubeskedent foreslå, at den kaldes TÆVE (Thorvalds Ævred Vælnings Effekt). Dyrene – på det molekylære plan – er de 10.000 - 100.000 vandmolekyler, der fosser ud af α -helicerne, så disse klasker sammen. (Antallet er skønnet ud fra et volumen for myosins ene α -helix beregnet af længden 114 nm og en diameter på 1 nm iflg. BGS og et volumen på 10^{-3} nm³ for 1 vandmolekyle).

Men det var det med Arrhenius' udledning. Det, jeg havde forventet at finde, var et mere generelt udtryk af typen

$$k = A \exp\left(-\frac{\Theta}{T}\right)$$

et udtryk der er rensat for molekylære fortolkninger. Q har her enheden K og kan ses som en »karakteristisk temperatur for materialet« (hvis man tager den E_a på 270 kJ/mol, jeg har brugt i mine DIX-beregninger, og dividerer den med gaskonstanten, så får man 32,5 kK, et tal der ligeledes er helt blottet for mening i sammenhængen). Ulempen er jo at udtrykket nu er rent empirisk, således at A og Q må bestemmes eksperimentelt for hvert materiale – og synes blottet for mening i sammenhængen.



Figur 4. Et myosinmolekyle bestående af 2 ca. 110 nm lange α -helicor som er snoet om hinanden samt et »hoved« i den ene ende.

Den molekylære fortolkning derimod kan give anledning til spekulationer om f.eks. størrelsen af den beregnede aktiveringsentropi, som jeg tillader mig at udlægge som vandmolekylernes frisættelse og deraf affødte forøgede uorden. Eller om den høje aktiveringsenergi (270 kJ/mol igen) som formentlig må ses som sammensat af småinkrementer fra de ca. 60.000 frihedsgrader (for et halvt myosinmolekyle – den ene af strengene).

Referencer:

1. H.-D. Belitz, W. Grosch og P. Schieberle: »Lehrbuch der Lebensmittelchemie«, 5. Udgave, Springer, Berlin 2001.
2. W.J. Moore »Physical Chemistry«, Longmans, Green og Co., London 1956 (den jeg brugte i sin tid).
3. H. Eyring J. Chem. Phys. 3, 107 (1935).
4. Nudansk Ordbog under opslaget »Ævred«

Berigtigelse

I sidste nummer refererede jeg til en samtale med apotekerens i Hobro. Han hedder Holger Ewald – ikke Ewert som jeg skrev. Undskyld.

ThP