

Energie

door **Dr. Jan A. Vos**, Inspanningsfysioloog.

Inleiding

Arbeid en energie zijn verwante grootheden. Energie wordt vaak gedefinieerd als de mogelijkheid van een systeem om arbeid te leveren.

In formule weergegeven: **Arbeid = Kracht x Weg**.

Energie en warmte zijn gelijkwaardige begrippen.

In dimensie weergegeven: **Newton x meter = Joule**.

Om te kunnen rekenen overeenkomstig het SI-stelsel kan men als volgt te werk gaan:

1 calorie = 4,184 Joule en 1 kcal (kilocalorie) = 4185 Joule = 4,185 kJ (kiloJoule). Om te kunnen leven zijn er processen van opbouw, afbraak en omzetting nodig. Alle stofwisseling processen kunnen niet zonder chemische reacties. Bij allerlei ziekten hebben we te maken met een verstoring van de normale fysiologische en biochemische processen in het lichaam. We verbruiken continu energie bijvoorbeeld voor te leveren arbeid, chemische reacties tijdens de stofwisseling maken dat mogelijk. De wetten in de natuur gelden ook voor ons mensen en de thermodynamica helpt ons dit meer duidelijk te maken. Om aan energie te komen zetten we de in chemische verbindingen in voedingsstoffen besloten energie voor een deel als vrije energie en voor een deel als warmte om.

We kunnen energie omzetten zoals o.a. bij chemische energie, arbeidsenergie, elektrische energie en warmte energie. Zo wordt chemische energie die bij hydrolyse van ATP beschikbaar komt, benut om een membraanpotentiaal op te bouwen in de vorm van elektrische energie of om mechanische arbeid zoals bij een spiercontractie plaatsvindt, mogelijk te maken.

Basis- of grondstofwisseling

Onder gestandaardiseerde omstandigheden kan de basisstofwisseling bepaald worden. Die voorwaarden zijn: nuchter; lichamelijk en geestelijk ontspannen; omgevingstemperatuur van 20 graden Celsius. Bij de mens nemen spieren en lever met ongeveer 25 %, het zenuwstelsel met ongeveer 18 % en de hartspier met ongeveer 10 % deel aan de basisstofwisseling. Deze basisstofwisseling wordt door geslacht, gewicht, lengte, leeftijd en hormoon huishouding beïnvloed. Dagritme (biologische klok), seizoen- en klimaatinvloeden spelen ook een rol.

Gemiddeld laat een volwassen man iets meer dan 7 MJ/dag als resultaat zien, dat komt overeen met 80 Watt. Men kan het ook uitdrukken als 1 kcal per uur per kg lichaamsgewicht. Zo komt een man, die 70 kg weegt, op een basisstofwisseling uit van 1680 kcal/24 uur. Gemiddeld komt de stofwisseling,

bij alledaagse bezigheden, uit op 2500 kcal/24 uur, bij een vrouw op 2200 kcal/24 uur.

Lichamelijke arbeid verhoogt de energie behoefte naar ongeveer 11 MJ/dag, dat komt overeen met 127 Watt. Bij zeer zware lichamelijke arbeid loopt de energie behoefte op naar 15 MJ/dag (=175 Watt) bij vrouwen en 20 MJ/dag (=230 Watt) bij mannen bij 70 kg lichaamsgewicht. Op losse topdagen kan bij zeer zware arbeid de behoefte stijgen tot maar liefst 50 MJ/dag (=600 Watt). Topsporters bereiken bij een marathon die in iets meer dan 2 uur afgelegd wordt ongeveer 1600 Watt en afhankelijk van de activiteit komen topsporters tot waarden van meer dan 5000 kcal (= meer dan 21000 kJ).

Energie verbruik bepalen

Zowel onder rust- als arbeidsomstandigheden wordt het energieverbruik bepaald. Met behulp van zogenoemde indirecte calorimetrie kan dat gebeuren. Ook kan men door directe calorimetrie (warmte afgifte direct meten) het energieverbruik meten. Met de indirecte methode wordt tijdens de oxidatie van het substraat het geproduceerde koolzuur en de verbruikte hoeveelheid zuurstof gemeten. 1 mol glucose reageert met 6 mol zuurstof tot 6 mol water en 6 mol koolzuur. Palmitinezuur is het meest voorkomende vetzuur in de triglyceriden. Daarom ziet men dit palmitinezuur altijd optreden in metabole berekeningen met triglyceriden. 1 mol palmitinezuur reageert met 23 mol zuurstof tot 16 mol water en 16 mol koolzuur. De vrijgekomen energie door de aërobe afbraak van 1 mol glucose is 2869 kJ, voor 1 mol palmitinezuur is dat met 9871 kJ echter duidelijk hoger.

Calorisch equivalent

Om tot verbranding van 1 mol glucose te komen moet er 6 mol zuurstof beschikbaar zijn. Bij de oxidatie van glucose is het volumen verbruikte zuurstof gelijk aan de geproduceerde hoeveelheid koolzuur. Bij de oxidatie van palmitinezuur zijn echter 23 mol zuurstof nodig en ontstaan slechts 16 mol koolzuur. Vetoxidatie gebruikt dus meer zuurstof dan koolhydraatoxidatie. Reden hiervoor is het feit dat vetzuurmoleculen minder O-atomen bezitten dan het glucosemolecuul. Bij 0° Celsius is het gemiddelde calorisch equivalent voor de verschillende koolhydraten 21,15 kJ/l zuurstof, voor vetten 19,6 kJ/l en voor eiwitten 19,65 kJ/l . Bij 37° Celsius worden de waarden voor koolhydraten 18,8 kJ/l, voor vetten 16,8 kJ/l en voor eiwitten 16,8 kJ/l.(Haugen,e.a.,2003).

Berekenen van energieverbruik

Voeding maakt drie belangrijke functies mogelijk die voortdurend energie nodig hebben. Koolhydraten en vetten vormen de belangrijkste energiebron voor het

lichaam om te kunnen functioneren. De eiwitten hebben we vooral nodig om het weefsel op te bouwen en de vitamines en mineralen benutten we om de stofwisseling goed te laten verlopen. Een zeer belangrijke bron is ook voldoende water, zonder water geen goed fysiologisch functioneren! Niet alleen tijdens rust zijn die functies belangrijk maar vooral ook tijdens inspanning of het leveren van een topprestatie. Een slechte voeding beïnvloedt het prestatievermogen aanzienlijk, maar een simpele verhoogde voedingsinname is ook geen garantie voor het leveren van een goede prestatie.

Men kan door het meten van verbruikte hoeveelheid zuurstof ($=VO_2$) en geproduceerde hoeveelheid koolzuur ($=VCO_2$) het energieverbruik van iemand in rust of tijdens inspanning berekenen. Tevens kan het aandeel van koolhydraten en vetten in het energieverbruik bepaald worden. Met behulp van spiroergometrie wordt het energieverbruik in calorieën uitgedrukt. Het absolute calorieverbruik per minuut is $3,941 \times VO_2$ (l/min) + $1,106 \times VCO_2$ (l/min) (Weir,1949).

De totale vetoxidatie bestaat uit een optelsom van het verbruik van plasmavetzuren uit de lipolyse van vetweefsel en verbruik aan spier triglyceriden ($=IMCL$). Uit de oxidatie van eiwit ontstaat ook energie, maar energie berekening van eiwitten in de stofwisseling met de indirecte methode laat geen exacte waarde toe. Het RQ (= respiratorisch quotiënt) is bij eiwit ongeveer 0.8. Wanneer men naast het RQ ook de stikstofuitwisseling in de urine per tijdseenheid (UN) in acht neemt, dan kan men het energieverbruik ($=E$) berekenen met de formule: $E = 3,78 \times VCO_2 + 1,16 \times VO_2 - 2,98 UN$.

Ook met behulp van MET's (Metabolic Equivalent) kan men het energieverbruik bepalen.

1 MET = 0,0175 kcal/kg/min. Wanneer iemand bijvoorbeeld 70 kg weegt en een activiteit van 4 MET's haalt, dat is bijvoorbeeld tijdens het fietsen naar je werk met een snelheid van 12 tot 15 km/uur, dan wordt het energieverbruik: $0,0175 \text{ kcal/kg/min} \times 4 \text{ MET's} \times 70 \text{ kg} = 4,9 \text{ kcal/min}$.

Hiermee is voor elke tijdsduur het energieverbruik te bepalen (Powers,1997).

Veldstudies energieverbruik

Een dure maar wel nauwkeurige methode om het energieverbruik buiten laboratorium omstandigheden te bepalen is die met behulp van dubbel gelabeld water (Ainslie,e,a,2003). Energieverbruik per tijdseenheid is daarmee goed mogelijk. Verder kan men aan portabel spirometrie systemen denken om te gebruiken, de meetgegevens worden dan telemetrisch overgedragen of aan bewegingssensoren ontleend. Vragenlijsten zijn minder nauwkeurig (Arvidsson,e.a.2005) om toe te passen. Men ziet ook vaker een combinatie van methoden zoals meten van de hartfrequentie ($=Hf$) en bewegen (stappenteller) (Strath,e,a,2002). Wanneer men bij een duurprestatie die onder constante omstandigheden, dus niet voortdurend tempowisselingen, plaatsvindt een

redelijk betrouwbare indruk over het energieverbruik wil hebben dan kan men de formule: $kJ = 4872 \times t \times 0,77$ nemen, waarbij t = tijd moet worden ingevuld (Francescato,e,a,2002).

Berekenen van energieverbruik met behulp van hartfrequentie metingen

Tot ongeveer 85 % van de maximale hartfrequentie (=Hfmax) verloopt de relatie Hf en VO₂ lineair, daarboven is die niet-lineair. Tussen indirecte calorimetrie en Hf methode is nauwelijks een onderscheid te maken (Spurr e,a,1988, Ekelund,e,a,2002).

De Hf horloges nemen de data net zo nauwkeurig op als een ECG apparaat en zijn tegenwoordig door verbeterde technieken in staat om vele uren aan data op te nemen. Wanneer lichaamsgewicht, geslacht, leeftijd en fitness niveau worden ingevoerd dan kan men het energieverbruik bij inspanning goed ingeschat worden (Keytel,e,a,2005). O.a. bij roeien, hardlopen, wielrennen is het energieverbruik met behulp van Hf metingen op die manier goed te bepalen. Men ziet echter grote inter- en intra individuele verschillen bij verschillend geslacht en manier van belasten. Bij vrouwen wordt het energieverbruik met behulp van de Hf metingen bijvoorbeeld ongeveer 12 % te hoog aangegeven (Crouter,e,a,2004).

Tussen de methode met gelabeld water en Hf. metingen is echter wel een flink verschil waarneembaar, namelijk de Hf. methode valt ongeveer 6 % hoger uit. (Davidson e,a,1997).

Nadelen van de Hf.methode

Emotionele stress, hoge omgevingstemperatuur, hoge luchtvochtigheid, dehydratie en ziekte (koorts) kunnen de Hf. sterk beïnvloeden. Bij intensieve belastingen is de relatie Hf. met VO₂ niet meer lineair, wat een duidelijke beperking van de methode genoemd moet worden. Bij warme weersomstandigheden neemt de Hf toe terwijl de VO₂ afneemt. Ook de omvang van de totaal deelnemende spiergroepen aan de inspanning is voor de hoogte van de te bereiken Hf. van belang.

Het respiratoir quotiënt

De verhouding tussen verbruikte zuurstof en geproduceerde hoeveelheid koolzuur noemt men het respiratoir quotiënt, een dimensieloze grootheid. Bij maximale belasting geeft het RQ mate van inspanning aan. Met behulp van het RQ kan men schatten welke energie substraten in het organisme verbrand worden en met welk calorisch equivalent het zuurstofverbruik vermenigvuldigd moet worden om het juiste energieverbruik te bepalen. Een zuivere koolhydraten verbranding door glycolyse laat een RQ zien van 1,0, een zuivere

vetverbranding door β -oxidatie tot een RQ van 0,71. Maar er is veelal sprake van een gemengde verhouding van koolhydraten en vetten, zodat het RQ dan ook anders uitvalt. Bijvoorbeeld wanneer er een RQ van 0,80 gemeten wordt dan is er sprake van een verhouding van 33,4 % koolhydraatverbranding en 66,6 % vetverbranding. Dit kan met de indirecte calorie methode niet praktisch uitgevoerd worden omdat we niet alleen glucose en palmitinezuur tot ons nemen maar verschillende koolhydraten, vetten en eiwitten. Het RQ kan in rust liggen tussen 0,718 en 0,927, een forse spreiding dus. Bij toenemende belasting richting maximale prestatie zien we een lactaat accumulatie die ertoe leidt dat het RQ boven 1,0 uit kan stijgen. Goed getrainde atleten die een goed ontwikkeld anaëroob vermogen hebben laten lactaatwaarden zien die de 10 mmol/l ruim te boven kunnen gaan en hebben een RQ van 1,15 of hoger (Meyer,2003). Bij uitgesproken duuratleten die weinig anaërobe training doen zien we een RQ dat de 1,0 nauwelijks overstijgt, hun acidose tolerantie daalt.

Aërobe ATP-resynthese

De belangrijkste energie leveranciers voor de ATP-resynthese in de skeletspier zijn de koolhydraten en vetten. Wanneer er voldoende zuurstof beschikbaar is dan worden de energierijke fosfaten door oxidatie van voedingsstoffen geresynthetiseerd. Deze resynthese vindt in de mitochondriën plaats. Uit de koolhydraten wordt energie gewonnen door de oxidatie van glucose uit het bloed en de glycogeen depots in spieren en lever. Verder worden vrije vetzuren (=FFA=Free Fatty Acids) in het bloed of uit de voeding voor energielevering afgebroken.

Anaërobe ATP-resynthese

Wanneer de aërobe energievoorziening ons in de steek laat dan brengt de anaërobe resynthese van ATP uitkomst. Splitsing van creatinefosfaat in creatine en fosfaat, maar ook de anaërobe glycolyse van glucose tot lactaat staan borg voor anaërobe energielevering. Deze anaërobe resynthese vindt in het cytoplasma plaats en levert meteen energie zij het ook in kleine hoeveelheden. De bij de ATP-splitsing ontstane ADP wordt door de mitochondriale creatinekinase direct weer omgezet in ATP en creatine.

De anaërobe glycolyse verloopt, bijvoorbeeld in vergelijking met de creatinekinase reactie, langzamer en bereikt zijn maximum na ongeveer 30 seconden inspanning. De in de spier opgeslagen glycogeen wordt in lactaat omgezet. Bij lichte arbeid wordt na ongeveer 60 seconden de aërobe glucose- en vetzuur leverantie dominant. Bij zware arbeid gaat de anaërobe glycolyse door en is vooral de in het bloed en lever aanwezige hoeveelheid glucose door glycogenolyse en gluconeogenese als energiebron beschikbaar.

Verschillen tussen aërobe en anaërobe processen zijn onder andere: A. Oxidatie van glucose en vetzuren verlopen in de mitochondriën bij aërobe processen en de anaërobe processen verlopen in het cytoplasma. B. De aërobe processen verlopen relatief langzaam en leveren per tijdseenheid minder ATP dan anaërobe processen. Wanneer 1 mol glucose anaëroob wordt afgebroken en er 2 mol lactaat gevormd wordt, dan ontstaat er ‘maar’ 2 mol ATP. Bij afbraak van 1 mol glucose onder aërobe omstandigheden ontstaan in de citraatcyclus en ademhalingscyclus 36 mol ATP. Omdat vetzuurmoleculen minder zuurstof dan een glucose molecuul bezitten is het duidelijk dat bij vetverbranding meer zuurstof nodig is.

Literatuurlijst:

1. **Ainslie**, P., T. Reilly, K. Westerterp. Estimating human energy expenditure: a review of technique with particular reference to doubly labelled water. *Sports Med*: 33: 683-698, 2003.
2. **Arvidsson**, D., F. Slinde, L. Hulthen. Physical activity questionnaire for adolescents validated against doubly labelled water. *Eur. J. Clin. Nutr.* 59: 376-383, 2005
3. **Crouter** S.E., C. Albright, D.R. Bassett. Accuracy of polar S410 heart rate monitor to estimate energy cost of exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 36: 1433-1439, 2004.
4. **Davidson**, L., G. McNeill, P. Haggerty, J.S. Smith, M.F. Franklin. Free-living energy expenditure of adult men assessed by continuous heart rate monitoring and doubly labelled water. *Br. J. Nutr.* 78: 695-708, 1997.
5. **Ekelund** U., A. Yngve, K. Westerterp, M. Sjostrom. Energy expenditure assessed by heart rate and doubly labelled water in young athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 1360-1366, 2002.
6. **Francescato**, M.P., P.E. Di Prampero. Energy expenditure during an ultra-endurance cycling race. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 42: 1-7, 2002.
7. **Haugen**, H.A., E.L. Melanson, Z.V. Tran, J.T. Kearney, J.O. Hill. Variability of measured resting metabolic rate. *Am. J. Clin. Nutr.* 78: 1141-1145, 2003.
8. **Keytel** L.R., J.H. Goedecke, T.D. Noakes, H. Hiilloskorpi, R. Laukkanen, L. van der Merwe, E.V. Lambert. Prediction of energy expenditure from heart rate monitoring during submaximal exercise. *J. Sports Sci.* 23: 289-297, 2005.
9. **Meijer** G.A., K.R. Westerterp, H. Kopter, R. ten Hoor. Assessment of energy expenditure by recording heart rate and body acceleration. *Med. Sci. Sports Exerc.* 21: 343-347, 1989.
10. **Powers**, S.K., E.T. Howley, *Exercise Physiology*, Uitg. McGraw-Hill, Boston, USA, 1997.
11. **Spurr**, G.B., A.M. Prentice, P.R. Murgatroyd, G.R. Goldberg, J.C. Reina, N.T. Christmas. Energy expenditure from minute-by-minute heart-rate recording: comparison with indirect calorimetry. *Am. J. Clin. Nutr.* 48: 552-559, 1988.

12. **Strath, S.J., D.R.Bassett, D.L.Thompson, A.M.Swartz.** Validity of the simultaneous heart rate motion sensor technique for measuring expenditure. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 888-894, 2002.
13. **Weir, J.B.** New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J. Physiol.* 109: 1-9, 1949.