

De natuurkunde van het fietsen; over energie, vermogen en snelheid

Fietsen is een efficiënte vorm van bewegen waarmee we als mensen veel sneller kunnen voortbewegen dan hardlopen en daarbij ook nog minder energie verbruiken. Maar hoeveel energie is nodig om een bepaalde snelheid te bereiken op de fiets?

Om een antwoord op deze vraag te kunnen geven worden eerst een aantal basisbegrippen uitgelegd.

Wat is energie?

Arbeid is een inspanning (een hoeveelheid energie) die door een krachtbron (in dit geval de mens) geleverd wordt om een voorwerp (massa) met een bepaalde kracht te verplaatsen over een afstand. Arbeid is de energie die nodig is om jezelf en de fiets over een bepaalde afstand te verplaatsen: arbeid = kracht x afstand. De eenheid van kracht is newton (N), de eenheid van afstand is meter (m), arbeid (energie) is newtonmeter (Nm) ook wel joule (J) genoemd. Een andere eenheid van energie die veel gebruikt wordt is calorie, vooral in de voedingsindustrie. Wat is 1 calorie? Dat is de hoeveelheid energie die nodig is om 1 gram water met 1 graad (Celsius of Kelvin) op te warmen. Dit is gelijk aan 4,18J.

Dus 1 cal = 4,18 J (of 1 kcal = 4,18 kJ)

Wat is vermogen?

Vermogen is de hoeveelheid energie die per tijdseenheid (seconde) wordt geleverd. Hoe meer energie per seconde wordt geproduceerd, hoe hoger het vermogen. Bij fietsen met een constante kracht op de pedalen is het vermogen dat wordt geleverd:

(kracht x afstand)/tijd.

Afstand/tijd is gelijk aan snelheid daarom geldt vermogen = kracht x snelheid.

Eenheid van vermogen is joule per seconde (J/s) en dat heet ook Watt (W).

De natuurkunde van fietsen

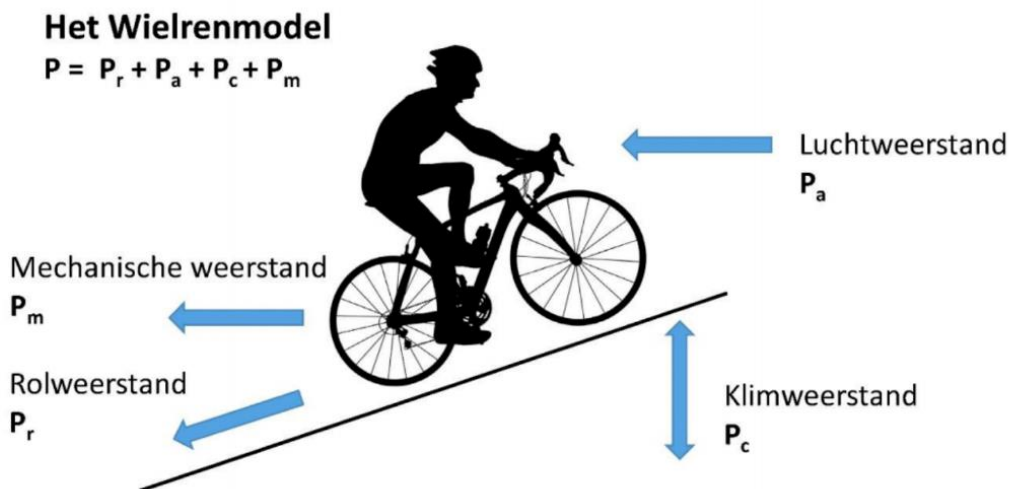


FIG 1: Welke weerstanden moet er als fietser overwonnen worden om vooruit te komen?

Weerstand:

Rolweerstand (=P_r)

De rolweerstand is de kracht die nodig is om de wrijvingsweerstand die de wielen met het aardoppervlak hebben te overwinnen en is afhankelijk van de rolweerstand coëfficiënt c , die heel afhankelijk is van het type band, maar ook van de luchtdruk in de band. De rolweerstand neemt recht evenredig toe met de snelheid (FIG 2)

$$P_r = C \times M \times G \times V$$

Voorbeeld:

C = rolweerstand coëfficiënt = 0,004

M = lichaamsgewicht = 75 kg

G = zwaartekracht constante = 9,81 m/s²

V = snelheid = 36 km/u (10 m/s)

$$\rightarrow P_r = 0,004 \times 75 \times 9,81 \times 10 = 29,43 \text{ W}$$

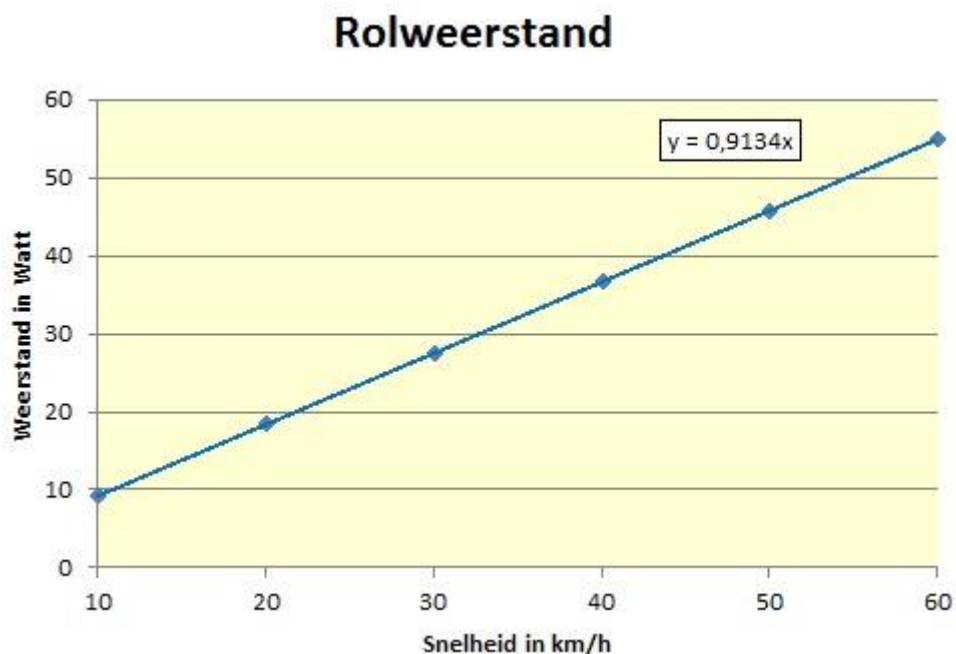


FIG 2: Relatie rolweerstand en snelheid

Luchtweerstand (=P_a)

De luchtweerstand is de kracht die nodig is om "door de lucht" heen te bewegen en is van meerdere factoren afhankelijk. Dit zijn de dichtheid (ρ) van de lucht, de CdA waarde van de fietser+fietser (hoe aerodynamisch is de fietser+fietser?), de snelheid die wordt gereden (V) en de windsnelheid (V_w). In formule is de luchtweerstand:

$$P_{\text{lucht}} = 0,5 \times \rho \times CdA \times (V + V_w)^2 \times V$$

De CdA waarde van de fietser is hierbij een belangrijke factor die bestaat uit 2 factoren namelijk de Cd waarde (luchtweerstand coëfficiënt) en de A (frontale oppervlakte). Hoe lager de CdA waarde, hoe minder invloed van luchtweerstand.

Hierbij nog in acht nemend dat luchtdichtheid afhankelijk is van de temperatuur van de lucht, de luchtdruk en de luchtvochtigheid.

De luchtweerstand neemt tot de macht 3 toe met de snelheid (FIG 3).

Voorbeeld:

ρ = luchtdichtheid = 1,205 kg/m³

CdA = luchtweerstand coëfficiënt × frontale oppervlakte = 0,3 m²

V = snelheid = 36 km/u (10 m/s)

V_w = windsnelheid = 18 km/u (5 m/s) (tegenwind kracht 3)

$$\rightarrow 0,5 \times 1,205 \times 0,3 \times (10+5)^2 \times 10 = 407 \text{ W}$$

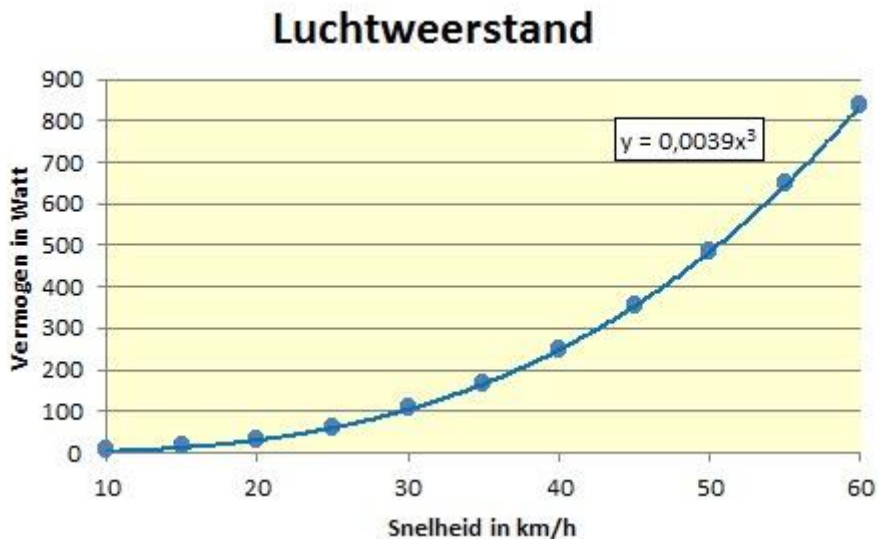


FIG 3: Relatie luchtweerstand en snelheid

Klimweerstand (=P_c):

De klimweerstand is de kracht die nodig is om de zwaartekracht te overwinnen en is afhankelijk van het hellingspercentage (%) van de klim, het gewicht van de fietser + fiets en de snelheid.

In formule is de klimweerstand:

$$P_{\text{klim}} = i/100 \times M \times G \times V$$

De klimweerstand is recht evenredig met de snelheid (FIG 4):

Voorbeeld:

i = hellingspercentage = 10%

M = gewicht fietser + fiets = 75 + 8 = 83 kg

V = snelheid: 18 km/u (5 m/s)

$$\rightarrow 0,1 \times 83 \times 9,81 \times 5 = 407 \text{ W}$$

Zo is te zien dat fietsen tegen de wind in (met windkracht 3 tegenwind) met een snelheid van 36 km/u (wel rekening houdend met positie op racefiets onder in de beugel, CdA waarde ongeveer 0,3), gelijk is aan een berg op fietsen met hellingspercentage van 10% met snelheid 18 km/u (bij windstil weer).

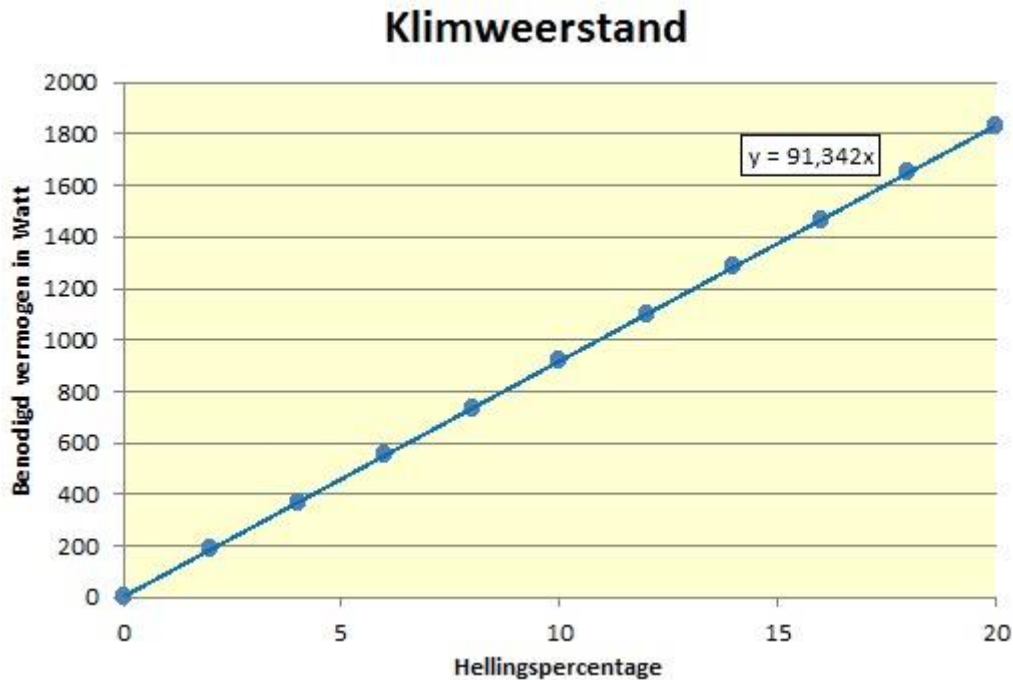


FIG 4: Relatie klimweerstand en snelheid.

Mechanische weerstand (=P_m):

De mechanische weerstand is de kracht die nodig is om de weerstand van alle draaiende onderdelen te overwinnen zoals ketting, lagers etc. Dit wordt uitgedrukt in het percentage van het totale beschikbare vermogen. Het rendement ligt meestal in de orde van 0,97-0,98. Dus het verlies ligt in de orde van grootte van 2-3 %

Uiteindelijk komt het er dan op neer dat het totale vermogen van de fietser wordt geformuleerd zoals in onderstaande vergelijking ¹:

De natuurkunde van het fietsen:

Rolweerstand: $P_r = C_r \times M \times G \times V$

Luchtweerstand: $P_a = 0,5 \times \rho \times CdA \times (V + V_w)^2 \times V$

Klimweerstand: $P_c = i/100 \times M \times G \times V$

Mechanische weerstand: $P_m \times (1 - \eta)$

De vergelijking van fietsen:

$$P \times \eta = C_r \times M \times G \times V + 0,5 \times \rho \times CdA \times (V + V_w)^2 \times V + i \div (100 \times M \times G \times V)$$

De energiesystemen van het menselijke lichaam

Om kracht te kunnen leveren moeten de mens ervoor zorgen dat onze spieren contraheren. Dat kan met behulp van energie in de vorm van ATP.

In de spier is een kleine voorraad van ATP aanwezig voor snelle acties (sprints). Maar als er langduriger kracht geleverd moet worden dan zijn er energiesystemen nodig die ervoor zorgen dat er voldoende ATP aanwezig blijft in de spieren.

Naargelang het type en de intensiteit van de geleverde inspanning doet het menselijk lichaam beroep op verschillende energiesystemen. Bij elke vorm van bewegen worden de verschillende energiesystemen aangesproken, maar afhankelijk van de duur en de intensiteit van de inspanning verschilt hun relatieve bijdrage tot de energielevering (FIG 5).

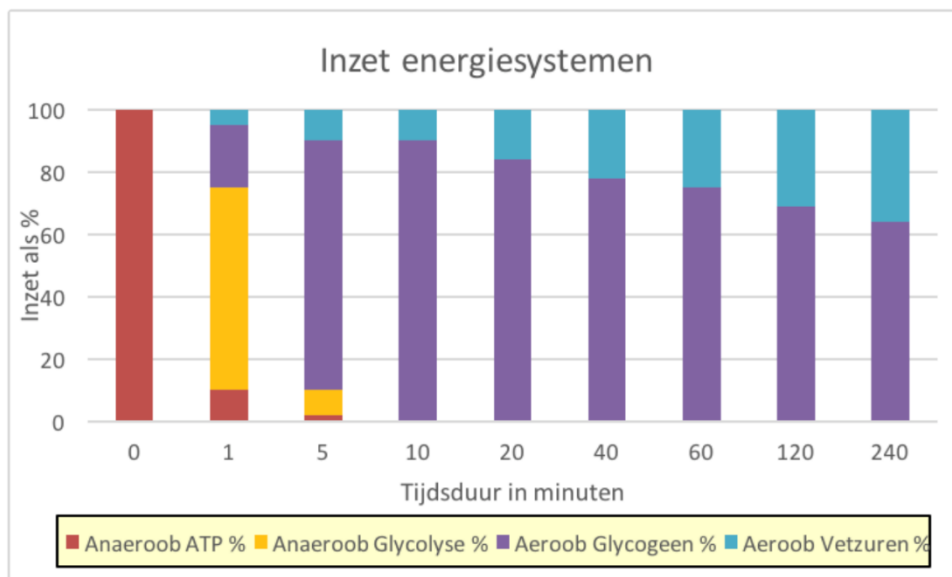


FIG 5: Verhouding aerobe en anaerobe energielevering bij inspanning.

Men kan drie systemen onderscheiden:

Sprint systeem:

Dit gebruikt de aanwezige ATP. Met dit systeem kan er heel veel energie per seconde worden geleverd, maar de voorraad is heel beperkt (ongeveer 10 sec)

Met behulp van fosfocreatine (CP) kan er snel weer ATP worden aangevuld zodat een hoge energielevering nog langer gehandhaafd kan worden tot ongeveer 30 seconde (afhankelijk van de getraindheid van dit systeem). Dit wordt ook het anaerobe alactische systeem genoemd.

Anaerobe glycolyse:

De anaerobe afbraak van glycogeen is de energiebron voor korte periodes van heel hard fietsen (demarreren). Glycogeen bestaat uit glucose (suiker) eenheden die aan elkaar gekoppeld zijn tot lange ketens. Glycogeen is opgeslagen in de spieren en de lever. Daarnaast bevat ook het bloed een kleine hoeveelheid glucose. Bij de anaerobe afbraak wordt glycogeen omgezet via pyruvaat in lactaat. Dit wordt het anaerobe lactische systeem genoemd. Afhankelijk van hoe goed een fietser getraind is om dit systeem goed te gebruiken

kan dit kort/lang worden volgehouden. De anaerobe afbraak van glycogeen levert minder energie per tijdseenheid dan het sprint systeem, maar we kunnen er wel wat langer gebruik van maken. Namelijk in de orde van grootte van enkele minuten. Dit is afhankelijk van de mate van getraindheid en van het type spiervezels.

Aerobe glycolyse en aerobe vetoxidatie

De aerobe afbraak van glycogeen is de voornaamste energiebron voor fietsers. Hierbij wordt glycogeen met zuurstof omgezet in kooldioxide (CO_2) en water. Het CO_2 wordt via het bloed en de longen afgevoerd en het benodigde zuurstof wordt via de longen en het bloed aangevoerd naar de spieren. Dit is dus een zeer duurzaam en stabiel proces, dat lang kan worden volgehouden als het zuurstoftransportvermogen van het hart-longstelsel voldoende groot is. De aerobe afbraak levert minder energie per tijdseenheid dan de anaerobe afbraak, maar de voorraad glycogeen is voldoende voor 1 tot 1,5 uur. Langere inspanningen die veel gebruik maken van aerobe glycolyse vereisen inname van koolhydraten tijdens de inspanning.

De aerobe afbraak van vetzuren is de energiebron voor de echte diesels. Hierbij worden vetzuren met zuurstof omgezet in (uiteindelijk) CO_2 en water. Het is net zo duurzaam en stabiel als de aerobe omzetting van glycogeen. De aerobe afbraak van vetzuren levert minder energie dan de aerobe afbraak van glycogeen en er is meer zuurstof voor nodig. Als je voorraad aan glycogeen in je spieren uitgeput is, schakelt het lichaam over op de verbranding van vetzuren. De snelheid neemt dan dramatisch af want de energielevering per tijdseenheid is ook wel 3 maal lager dan de aerobe afbraak van glycogeen. De voorraad aan vetzuren in ons lichaam is zeer groot en voldoende voor vele dagen fietsen. De vetverbranding wordt ook gebruikt in het dagelijks leven, bij inspanningen op laag niveau. Bij toenemende intensiteit schakelt het lichaam naar behoefte over op de andere energiesystemen. Dit is afhankelijk van de intensiteit aerobe afbraak glycogeen, anaerobe afbraak glycogeen of ATP/CP. De vetverbranding is trainbaar en wel door langdurige inspanningen op lage intensiteit en daarbij ook te kiezen voor een voedingspatroon met minder inname van koolhydraten. Rustige trainingen op nuchtere maag kunnen de vetverbranding verbeteren. Dit kan zinvol zijn voor veel fietsers, omdat in de praktijk de vetverbranding altijd een rol speelt. Als we langzaam fietsen, gebruiken we relatief veel vetverbranding: soms wel meer dan 50%. Als we harder gaan, neemt het belang van glycogeen toe, tot zo'n 90-95% bij topsnelheid.

In onderstaande tabel staat de snelheid van energielevering in mmol ATP/sec per energiesysteem. Zo is duidelijk te zien dat er een flinke afname is in vermogen per energiesysteem (aerobe energie systeem is ook nog gesplitst in omzetting glycogeen en omzetting vetzuren). In FIG 6 is het maximale menselijke vermogen uitgezet tegen de tijd.

Vermogen van de 4 menselijke motoren			P
			mmol ATP/s
ATP/CP			
ATP→ADP	$C_{10}H_{16}N_5O_{13}P_3 \rightarrow C_{10}H_{15}N_5O_{10}P_2$		73
Anaerobe omzetting glycogeen			
$C_6H_{12}O_6 + 3 ADP \rightarrow 2 C_3H_6O_3 + 3 ATP$			40
Aerobe omzetting glycogeen			
$C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 + 38 ADP \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + 38 ATP$			23
Aerobe omzetting vetzuren			
$CH_3(CH_2)_{14}COOH + 23 O_2 + 130 ADP \rightarrow 16 CO_2 + 16 H_2O + 130 ATP$			7

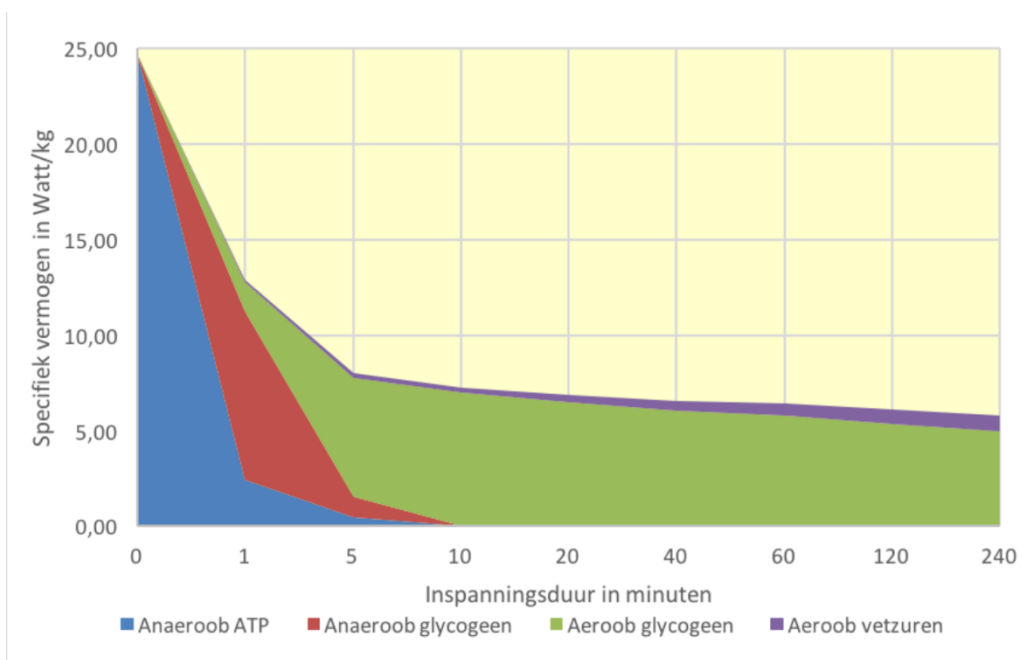


FIG 6: Grenzen menselijke vermogen uitgezet tegen de tijd

Energie inname en energie verbruik:

Calorimetrie:

Door middel van ademgas-analyse kunnen we bepalen hoeveel zuurstof een fietser opneemt en hoeveel CO₂ wordt uitgeademd tijdens een inspanningstest met CPET. Aan de hand van deze metingen kan ook worden berekend wat de geleverde metabole energie is. De calorische waarde van 1 liter opgenomen zuurstof is ongeveer 4,825 kcal (dit is wel afhankelijk van de exacte samenstelling van de brandstof (glycogeen of vetzuren) en wel een

gemiddelde waarde die heel goed bruikbaar is). Dit komt overeen met $4,825 \times 4,18 = 20,17$ kJ. Als tijdens een inspanningstest met ademgas-analyse bij een bepaald vermogen een zuurstofopname gemeten wordt van 2400 ml/min, dan kan het metabole vermogen uitgerekend worden: $2400 \text{ ml/min} = 40 \text{ ml/sec}$, wat overeenkomt met $0,04 \times 20170 = 807 \text{ J/s}$ (W). Als het geleverde mechanische vermogen op de ergometer 200W is, dan is de efficiency van de fietser $200/807 = 0,248$, bijna 25%. De mens als energiebron is niet heel erg efficiënt en voor de meeste fietsers ligt deze tussen 20 en 25%. 3 uur fietsen met gemiddeld 200W geeft een totaal energieverbruik van: $3 \text{ uur} = 10800 \text{ sec}$, per seconde 200J ($200\text{W} = 200 \text{ J/s}$), totale energie is 2160 kJ. Dit komt overeen met $2160/4,18 = 517\text{kcal}$ aan mechanische energie. Metabole energie is 4 maal (bij rendement 25%) groter: 2067 kcal. Aangezien er door 4,18 gedeeld wordt bij omrekening naar kcal en vervolgens met 4 vermenigvuldigd wordt (rendement), kan gesteld worden dat het aantal verbruikte kJ aan mechanische energie gelijk is aan verbrande metabole energie in kcal (bij efficiency van 24% komt dit helemaal goed uit). Om 1000 kcal in 1 uur te verbranden moet er ongeveer 278W gemiddeld mechanisch vermogen geleverd worden ².

Hoe lang kan er een bepaalde hoeveelheid energie geleverd worden?

Critical power model: CP en W'

Het uithoudingsvermogen is simpelweg de tijdsduur die je een bepaalde intensiteit kunt volhouden. Bij een hoog vermogen (hoge energieproductie per tijdseenheid) zul je sneller uitgeput zijn dan bij een lager vermogen. Een sprint kun je niet lang volhouden, maar door langzamer te rijden kun je wel doorfietsen. Het maximale vermogen dat je kan trappen gedurende 60 min wordt ook wel Functional Threshold Power (FTP) genoemd. Wordt er rustiger gereden dan kan dit wel meerdere uren vol gehouden worden (dan wordt de beperkende factor vooral de energie intake tijdens de rit om voldoende brandstof voor handen te hebben).

Wat is het Critical Power Model?

Dit model gaat uit van de aerobe en anaerobe energiesystemen en laat een verband zien tussen de hoeveelheid energie die een wielrenner kan produceren enerzijds en de tijd anderzijds. Het is een zogenaamde vermogen-tijd curve. Zoals gezegd, hoe korter de tijd hoe meer energieproductie (hoger vermogen). Het Critical Power Model kan gebruikt worden om een goede inschatting te maken van de aerobe en anaerobe capaciteiten van een wielrenner. Er worden een aantal maximaal testen uitgevoerd die in de verschillende intensiteit domeinen liggen van de curve. Om een goede betrouwbare curve te krijgen zijn er minimaal 3 testen nodig: één in het gebied tussen 60-120 seconde (dit is voor bepaling van de maximale capaciteit van het anaerobe glycolyse systeem), één tussen de 3 en 5 min om de maximale capaciteit van het aerobe systeem te bepalen en een 3e tussen de 10 en 20 min

om een goede inschatting te maken van het verval bij langdurige inspanning naar steady state toe (FIG 7)

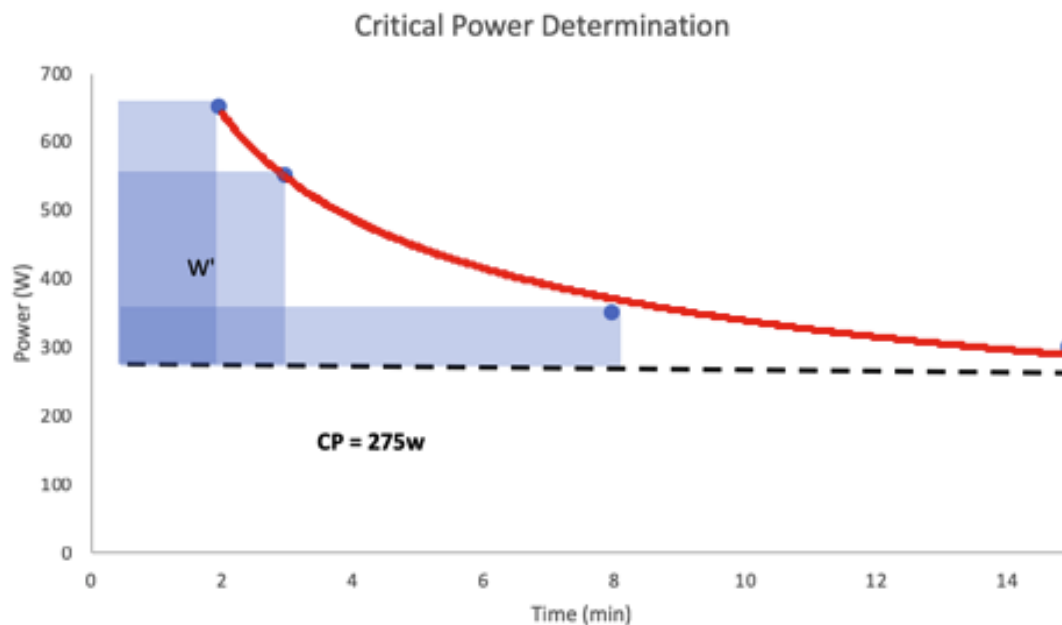


FIG 7: Critical Power model.

Met dit model kan voor verschillende (niet geteste) tijdsperiodes bepaald worden hoeveel vermogen kan worden volhouden. Critical Power (CP) is de hoogste intensiteit (vermogen) die in een min of meer steady state vol kan worden gehouden. Dit is de steady state tussen lactaat aanmaak en lactaat verbruik (omzetting in energie). De CP voor 60 min komt overeen met je FTP. In figuur 7 is te zien wat het aandeel is van de anaerobe motor, dit is het aandeel dat onder de grafieklijn ligt en boven de stippellijn die het Critical Power niveau voorstelt. Als je de curve beter bekijkt dan is te zien dat het niet uitmaakt hoe lang de duur is want overall is de grootte van de anaerobe tank (W') gelijk. Deze hoeveelheid wordt uitgedrukt in Joule. Een W' van 15000 J wil dus zeggen dat er boven CP-niveau een hoeveelheid van 15000J energie kan worden geproduceerd. Bijvoorbeeld met CP van 300W kan uitgerekend worden hoe lang 450W volgehouden kan worden. Dat is namelijk 150W boven CP en dit kan 100 seconde vol gehouden worden ($150 \text{ J/sec} \times 100 \text{ sec} = 15000 \text{ J}$). Daarna zal de energielevering terugvallen naar niveau van CP of lager. In die (herstel)tijd zal de anaerobe tank wel weer kunnen opladen (vullen). Zo kan deze meerdere malen worden gebruikt (leeg maken) en weer worden opgeladen (vullen). Hoe verder de intensiteit onder CP-niveau zit, hoe sneller W' weer vult. Dit is een goed trainbare eigenschap die vooral met herhaalde hoog-intensieve korte intervallen kan worden verbeterd. Maar is het dan ook zo dat hoe hoger de W' hoe beter de wielrenner? Bij een gelijke CP is dat het geval. De wielrenner met een hogere W' kan dan op de korte (vaak beslissende stukken) een groter vermogen leveren

door het grotere anaerobe aandeel. Maar wordt bekeken wat er voor een wielrenner beter is, afhankelijk welke wedstrijden deze gaat rijden, dan moet er een keuze gemaakt worden tussen verbeteren van de CP of verbeteren van de W' . Veel trainingen afstemmen op verbeteren van CP zal ervoor zorgen dat dit ten koste zal gaan van de W' en andersom geldt dit ook. Veel hoog intensieve intervaltrainingen zal de W' vergroten, maar dit zal een negatieve invloed hebben op de CP. Hier is het zaak om slimme keuzes te maken in welk deel van de opbouw welk systeem moet worden verbeterd (denk hier vooral aan de verschillende disciplines in het wielrennen zoals cyclocross, wegwielrennen, mountainbiken die allemaal hun eigen specifieke voorbereiding vereisen) ^{3,4,5}.

In een recent verschenen artikel (Leo P, et al 2022) wordt er dieper in gegaan op de vermogen-tijd relatie in het wielrennen. In de bijbehorende figuur 8 wordt ook onderscheid gemaakt in de verschillende intensiteit domeinen (moderate-heavy-severe-extreme) en diverse modellen uitgelegd ⁶.

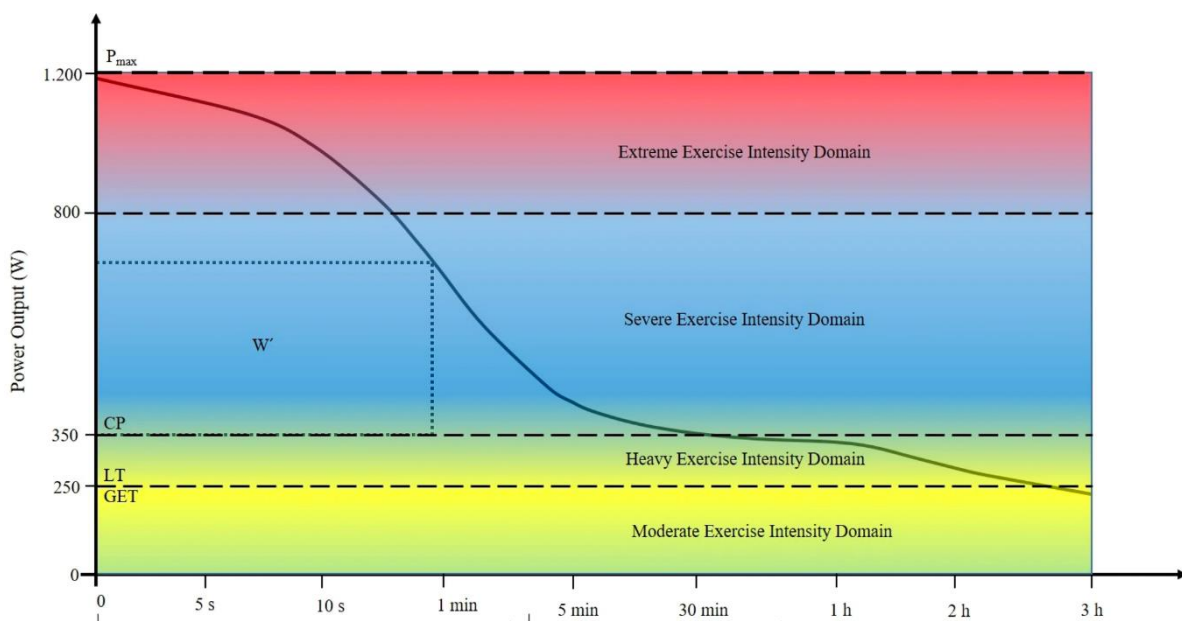


FIG 8: Intensiteit domeinen (gemiddeld-zwaar-hevig-extreem)

Hoeveel vermogen kan een fietser leveren?

Deze vraag is heel erg afhankelijk over welke tijdsduur het gaat.

Om de diverse energie systemen te kunnen meten zijn er een aantal kritieke periodes genomen. Zo is voor het sprint (explosieve) systeem de 5-seconden waarde belangrijk. Voor het anaerobe glycolyse systeem is de 60-seconden waarde belangrijk, voor het VO₂max systeem (maximale aerobe vermogen) is er gekozen voor de 5-minutenwaarde en voor FTP waarde (maximale steady state tussen anaerobe glycolyse en aerobe systeem) is de 60-minutenwaarde gekozen. Dit zijn allemaal gemiddelde vermogen waarden.

In de tabel kan worden afgelezen wat de wereldtop over deze tijdperiodes presteert en zo verder worden opgezocht in welke categorie een test van een wielrenner uitkomt.

Wat is het niveau in vergelijking met andere fietsers en met de wereldtop ?

Benchmarks Power Profile Test Allen & Coggan								
Gemiddeld vermogen in watt/kg	Mannen				Vrouwen			
Kritieke periode	5 sec.	1 min.	5 min.	FTP	5 sec.	1 min.	5 min.	FTP
Wereldrecord	25,18	11,50	7,60	6,40	19,42	9,29	6,74	5,69
Wereldklasse	24,00	11,04	7,19	6,04	18,56	8,93	6,36	5,36
Exceptioneel	22,22	10,35	6,57	5,51	17,26	8,38	5,79	4,87
Uitstekend	20,44	9,66	5,95	4,98	15,97	7,84	5,21	4,38
Zeer goed	18,66	8,97	5,33	4,44	14,68	7,30	4,64	3,88
Goed	16,59	8,17	4,60	3,82	13,17	6,66	3,98	3,31
Matig	14,81	7,48	3,98	3,29	11,88	6,12	3,40	2,82
Heel matig	13,04	6,79	3,36	2,75	10,58	5,57	2,83	2,32
Ongetraind	10,08	5,64	2,33	1,86	8,43	4,67	1,88	1,50

Het relatieve vermogen (W/kg) is in het wielrennen de meest gebruikte prestatie maat, maar is niet geschikt om prestaties van verschillende renners op korte en middellange kritieke periodes met elkaar te vergelijken en om onderscheid te maken tussen de klim- en tijdrit kwaliteiten van een renner. Het Power Speed Profile model en het bijbehorende testprotocol bieden hiervoor een oplossing ⁷. Dit is een gecombineerd profiel om zowel vermogen als snelheid mee te nemen in de afweging of een wielrenner goed (snel) is. Ook online te vinden op: <https://powerspeedprofile.com/> met protocol om de diverse kritieke periodes te testen en Powerspeed Profile te vervaardigen met de bepaalde waardes.

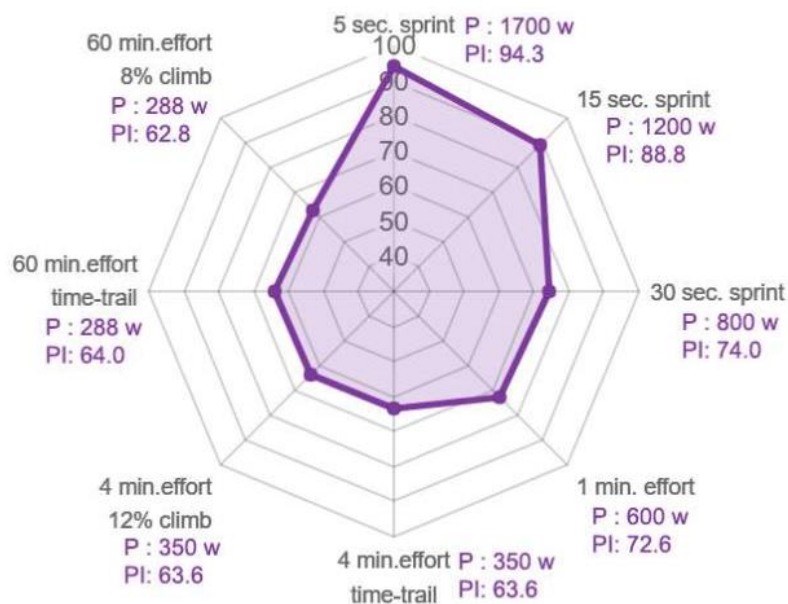


FIG 9: Voorbeeld Powerspeed Profile sprinter

Fietsen is voor de wetenschap een ideale sport omdat er zo veel gemeten kan worden door gebruik te maken van een vermogen meter en door het toepassen van de diverse modellen. Tegenwoordig wordt dit niet alleen maar in de absolute wereldtop toegepast maar ook de serieuze wielrenner maakt hier gebruik van. Het draait allemaal om energie. In de wedstrijdsport gaat het om absolute of relatieve hoeveelheden energie per tijdseenheid, maar fietsen is vooral een bewegingsvorm die door veel mensen kan worden uitgevoerd en kan helpen bij een gezonde leefstijl.

Bronnen:

- 1: Dijk van H, Megen van R, Vroemen G. Het geheim van wielrennen. NedRUN, 2015
- 2: Hooren van B, Cox M, Rietjens G, Plasqui G. Determination of energy expenditure in professional cyclists using power data: Validation against doubly labeled water. *Scand J Med Sci Sports*.2022;00:1–13.
- 3: Dotan, R. A critical review of critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 122, pages 1559–1588 (2022).
- 4: Karsten B, Petrigna L, Klose A, Bianco A, Townsend N, Triska C. Relationship Between the Critical Power Test and a 20-min Functional Threshold Power Test in Cycling. *Front. Physiol.*, 22 January 2021, Sec. Exercise Physiology Volume 11 – 2020.
- 5: Jones AM, Vanhatalo A. The ‘Critical Power’ Concept: Applications to Sports Performance with a Focus on Intermittent High-Intensity Exercise. *Sports Med* (2017) 47 (Suppl 1): S65–S78DOI 10.1007/s40279-017-0688-0
- 6: Leo P, Spragg J, Podlogar T, Lawley JS, Mujika I. Power profiling and the power-duration relationship in cycling: a narrative review. *European Journal of Applied Physiology*, 122, pages 301–316 (2022)
- 7: Bon van M, Vroemen G. Power Speed Profile: Performance model for road cycling. *Sportgericht* 2018;5(72):8-15. *Sportgericht* 2018;6(72):2-8.

Guido Vroemen

Sportarts en trainer/coach

www.guidovroemen.nl

Guido@sportarts.org