

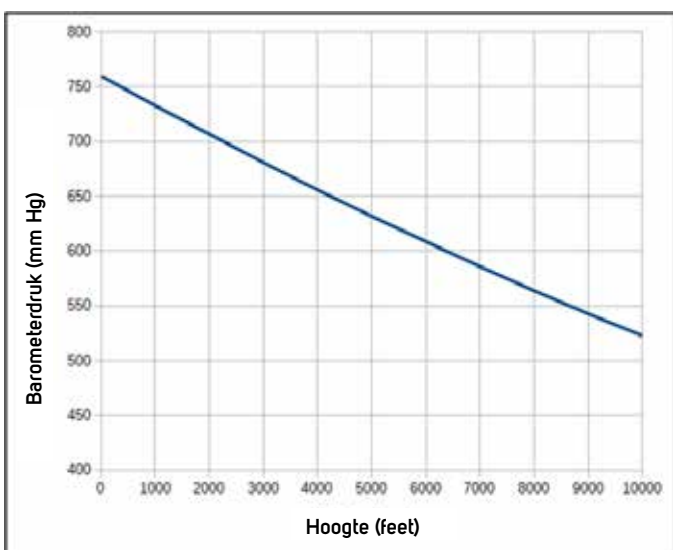
Jaarlijks verblijven miljoenen mensen in het hooggebergte, permanent, als toerist of voor hun job. Enkele wereldsteden zoals bijvoorbeeld Mexico city (2240 m), liggen zelfs hoog genoeg om last te krijgen van hoogteziekte. Maar daarnaast zijn er ook hogere bestemmingen en populaire trekkings in Zuid-Amerika en Azië, die zelfs binnen een dag te bereiken zijn. Toppen van meer dan 5500 meter worden steeds populairder en het commerciële aanbod blijft groeien. Een groeiend aantal reizigers en moderne transportmiddelen met (te) hoge stijgsnelheden impliceert ook een groter aantal reizigers dat in de problemen komt op grote hoogte. In dit artikel willen we de fysiologische processen en aanpassingen die het lichaam doormaakt verder in detail bespreken.

Lichaamsveranderingen op (grote) hoogte

Hoogteziekte of meer gebruikelijk bij zijn Engelse term HAI (High Altitude Illness) is een verzamelterm voor verschillende ziektebeelden: plotse hoogteziekte AMS (Acute mountain sickness), HACE (High altitude cerebral edema) en HAPE (High altitude pulmonary edema). Deze ziektebeelden of syndromen zijn verschillend en kunnen elkaar overlappen. Er is niet steeds een onderscheid te maken. Het ziekteproces van HAI begint met een tekort aan zuurstof. Om het zuurstofgebrek op grote hoogte te verklaren moeten we terug naar de les fysica.

HET VERBAND TUSSEN ZUURSTOFSPANNING EN HOOGTE

Een kolom lucht is op te splitsen in zijn verschillende componenten waarbij de aardse atmosfeer voor 20.94% uit zuurstof, 78% uit stikstof en kleinere aantallen edelgasen bestaat. Deze verhouding is op elke hoogte identiek. Naarmate we stijgen daalt de barometrische luchtdruk (Pb): zie afbeelding 1.



Afbeelding 1: Het verband tussen de barometrische luchtdruk en de hoogte (1 feet = 0.30 m)

Dit is van belang voor het transport van zuurstof vanuit de lucht naar de alveoli (longblaasjes) in de long. Het transport vanuit de longblaasjes naar het bloed en de finale stap: tot in de cellen. In de cel zetten de mitochondriën zuurstof om in bruikbare energie. Dit is beter bekend als de zuurstofcascade. Zuurstof moet vanuit de ingeademde lucht tot in elke cel geraken.



De partiële druk van zuurstof van de ingeademde lucht (PIO) wordt bepaald door de volgende formule: $PIO = FIO \times (Pb - 47\text{mmHg})$

- Waarbij FIO het aandeel zuurstof in de ingeademde lucht is (21%)
- 47mmHg is de gasdruk van water bij 37°C, omdat ingeademde lucht voor 100% bevochtigd wordt door de bovenste luchtwegen voordat het in de longalveoli aankomt
- Wanneer iemand zuurstof vanuit een fles extra inademt via neusbriil of masker stijgt de FIO2

Belangrijke opmerking hierbij is, dat de FIO altijd 20.94% blijft en de zuurstoftransportcascade dus in belangrijke mate wordt beïnvloed door de barometrische druk (Pb), zie onderstaande tabel voor een aantal referentiewaarden.

Populatie	Hoogte (in meter)	Pb
Zeeniveau	0	670
	1646	630
Hooggebergte	4700	429
	6140	356
	8000	284
	8848	253

Op zeeniveau is er een grote differentiaal druk tussen de PIO van zuurstof in de lucht, en de zuurstofspanning in de cellen. Naarmate de hoogte stijgt wordt deze differentiaal druk kleiner en de gasuitwisseling moeilijker. Bovendien stijgt door de hogere fysieke inspanning op grote hoogte ook het zuurstof verbruik in de cel.

Als gevolg wordt de zuurstofspanning in het bloed lager (hypoxemie) en ook de zuurstofspanning in de individuele cellen (hypoxie). Deze hypoxie is de directe oorzaak van het scala aan symptomen dat we HAI (high altitude illness) noemen.

ACCLIMATISATIE

Door het verminderde zuurstofaanbod in de cellen (Hypoxie) stelt er zich een hele cascade van adaptatiemechanismen in gang. Die zijn nog steeds niet helemaal begrepen, maar de belangrijkste organen die er een rol in spelen zijn de longen, nieren, hart en het bloed.

Acclimatisatie en de fysiologische aanpassingen hebben als doel de PIO in de longblaasjes te verhogen en op die manier de hypoxie tegen te gaan.

Bij sommige individuen gaan deze processen erg snel, van minuten tot uren, waar bij anderen dit weken kan duren voor ze volledig aangepast zijn.

De mate waarin acclimatisatie mogelijk is, is sterk individueel en moeilijk voorspelbaar. Het gaat zowel over conditie, lichaamsbouw als onderliggende (aangeboren) aandoeningen.

Acclimatisatie kan het zuurstoftransport in het lichaam en de zuurstofafgifte aan de weefsels verbeteren, maar kan nooit de situatie van op zeeniveau herstellen.

Toch zijn er individuen die door langzame adaptatie er in slagen de top van Mount Everest te bereiken zonder extra zuurstof. Op 8848 meter hoogte is PIO2 43.1mmHg, overeenkomend met 6% zuurstof op zeeniveau.

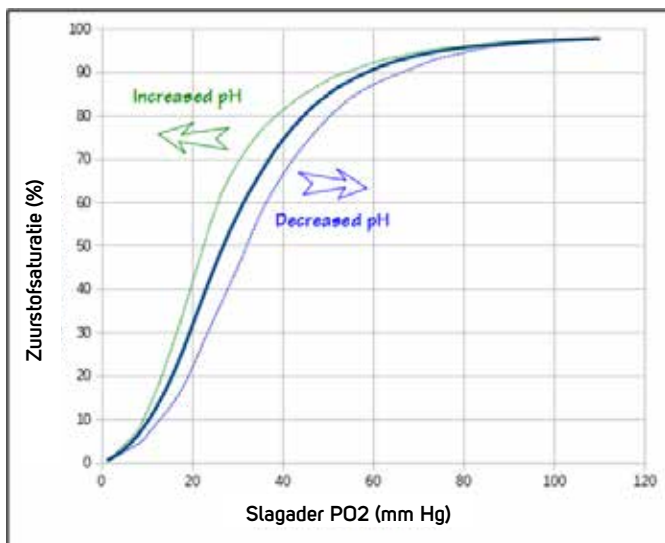
DE AANPASSINGEN IN HET LICHAAM

Het lichaam is een complex geheel dat er in slaagt om in zeer uiteenlopende omstandigheden steeds weer een evenwicht te vinden. De belangrijkste adaptatie van zuurstoftekort is de HVR (Hypoxic Ventilatory Respons). De HVR bestaat er in, dat door stimulatie van de specifieke cellen in de halsslagaders en de hartslagader (aorta) er een stimulus is van het ademhalingscentrum om sneller en dieper te gaan ademen. Hierdoor stijgt in de alveoli van de longen de PaO₂ (Partiële druk van O₂) en daalt de PCO₂ (Partiële druk van CO₂). Deze zuurstofmoleculen verspreiden zich vanuit de alveoli naar het bloed waar ze zich binden aan het hemoglobine. Elke moleculen heeft ruimte om 4 x O₂ moleculen te binden, het aandeel gebonden moleculen (saturatie of SpO₂) wordt uitgedrukt in procent. De saturatie is afhankelijk van verschillende factoren waaronder de PAO₂, PCO₂, en pH van het lichaam. Beter bekend als zuurstofdissociatiecurve. CO₂ en H⁺ zijn de belangrijkste zuren van het lichaam met een invloed op de pH (naast lactaat of melkzuur bij inspanning). CO₂ wordt geëlimineerd door uitademing. Bicarbonaat (HCO₃⁻) wordt uitgescheiden door de nieren. De basis is de Henderson-Hasselbalch-vergelijking: $CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$

Vanaf de eerste momenten op hoogte gaat het lichaam zich aanpassen door sneller te ademen. Deze hyperventilatie zorgt voor meer uitademing van CO₂ en zal onze bovenstaande formule naar de linkerkant doen verschuiven, zorgen voor een overschot aan water (H₂O) in het lichaam. Dit overschot aan water wordt door het lichaam uitgeplast (hoogtediurese) door de nier. Op hetzelfde moment zal de nier ook meer bicarbonaat (HCO₃⁻) gaan uitscheiden in de urine. Verlies aan CO₂ via de uitademing zorgt voor een daling van de pH (alkalisch), het uitscheiden van bicarbonaat via de nieren en de verhoogde urineaanmaak gaat dit (voor een deel) compenseren, maar verloopt over een periode van enkele dagen.

EFFECT VAN PH OP HET ZUURSTOFTRANSPORT

Een vermindering van de hoeveelheid CO₂ bij sneller ademen in het lichaam zorgt voor een meer alkalische omgeving (lagere pH), wetenschappelijk een respiratoire alkalose. In deze veranderde balans van het lichaam is de binding van O₂ aan het hemoglobinemoleculen makkelijker. Wanneer we kijken naar de zuurstofdissociatiecurve (zie grafiek) van hemoglobine wordt dit visueel duidelijk. Deze specifieke invloed van pH op het hemoglobine is de belangrijkste reden waarom tot ongeveer 3000 meter de zuurstofsaturatie in de gunstige regio van meer dan 90% kan gehouden worden, maar door de sigmoidale vorm van de curve (zie onderstaande curve) ook de verklaring waarom de saturatie boven 3000 meter zo snel daalt ondanks een lineaire daling van P_b (en bijgevolg ook PAO₂).



Afbeelding 2: Bij een daling van de pH kan de saturatie van de hemoglobinemoleculen toch hoog gehouden worden door de sigmoidale vorm van de zuurstofdissociatiecurve.

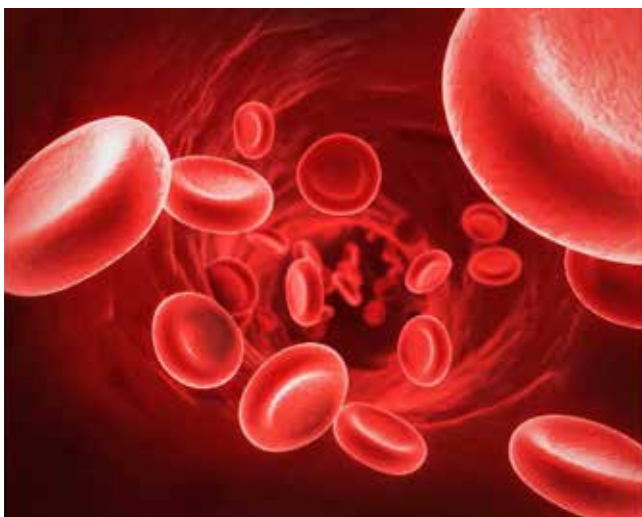


BLOED EN HART: DE GEOLIEDE MOTOR VAN HET LICHAAM

Hierboven hebben we beschreven waarom we een verhoogde urine-productie hebben. Deze zorgt wel voor een relatief vochttekort in het lichaam. Deze tekorten vertalen zich in minder bloed- en plasmavolume in het bloedvatstelsel. De eerste 24 uur gaat ongeveer 12% van het volume verloren. Het aantal hemoglobine moleculen blijft echter constant (deze worden niet uitgeplast). Relatief gezien stijgen deze. We meten dit met het hematocriet (gekend vanuit de duursport). Door het zuurstoftekort in het lichaam gaat de nier meer erythropoëtine (EPO) aanmaken. Deze EPO stimuleert het beenmerg om meer rode bloedcellen en hemoglobine aan te maken. Dit is zeer nuttig voor het zuurstoftransport, want de efficiëntie daarvan is direct afhankelijk van het aantal hemoglobinemoleculen. We noemen we dit de snelheidsbeperkende stap van de zuurstoftransportcascade.

Als gevolg van het lagere circulerend bloedvolume daalt het volume bloed dat bij elke hartslag vooruit wordt gepompt. Het totale volume bloed dat rondgepompt wordt op een minuut noemen we de cardiac output: $c\text{Cardiac output} = \text{slagvolume} \times \text{slagfrequentie}$.

- Slagvolume: de hoeveelheid bloed die bij 1 hartslag vooruit wordt gepompt
- Slagfrequentie: aantal hartslagen op 1 minuut



De cardiac output blijft constant wanneer het circulerend bloedvolume daalt door de hartfrequentie te verhogen en bij een fysieke inspanning de efficiëntie en kracht van elke hartslag te verhogen (positief chronotroop en positief inotroop effect). Een hoger aantal hartslagen per minuut zijn meer contracties van de hartspier en dus ook een hoger zuurstofverbruik door het hart, met een hogere belasting van het hart, zeker bij sporters met hartziekten. Te noteren valt dat de negatieve effecten van een verminderd circulerend volume niet te compenseren zijn door meer te drinken om zo het bloedvolume aan te passen.

HET LICHAAM BLIJFT IN BALANS, BINNEN INDIVIDUELE GRENZEN

Al deze kleine aanpassingen in de fysiologische balans van het lichaam worden door het individu wel of niet goed verdragen. Het lichaam functioneert enkel binnen bepaalde fysiologische grenzen optimaal, maar deze zijn echter voor elk individu verschillend. Wanneer deze grenzen overschreden worden, krijgen we een scala aan klachten en symptomen dat we acute mountain sickness (AMS) noemen. Deze symptomen zijn erg divers en voor een stuk te vergelijken met een kater na een stevig avondje stappen: hoofdpijn, vermoeid, duizeligheid, geen eetlust, slapeloosheid, misselijkheid/braken, kortademigheid, ...

Wanneer echter deze alarmsymptomen van het lichaam niet of niet correct worden geïnterpreteerd kan de kleine onbalans in het lichaam verder escaleren. Bij verdere belasting en onbalans in het lichaam kan AMS overgaan in ernstigere vormen van High Altitude Illness zoals longoedeem of inklemming van de hersenen. In een volgend artikel gaan we dieper in op deze processen en de behandeling/preventie van hoogteziekte. ▲

OVER DE AUTEUR

Michiel Boon is van kinds af gepassioneerd door bergen en wintersport. Hij ging toerskiën in het hoge noorden en beklom in 2017 zijn eerste 4000-er. Hij werkt momenteel als anesthesist-urgentiearts in de Antwerpse regio. Met deze rubriek brengt hij beide werelden samen. Heb je een specifieke vraag of suggestie? Laat het ons weten via info@kbfvzw.be.



Pagina 32: Grosser Geiger 3360m – enkel dankzij de adaptatiemechanismen van ons lichaam met de glimlach haalbaar.
Pagina 33: neusbriil om de FiO2 te verhogen.
Pagina 34: skiën in de omgeving van Lac de Moiry.
Pagina 35: rode bloedcellen doorheen het bloedvatstelsel.