

VAN HOESERLANDE Patrick, Ir
Wandelweg 21
2980 HALLE-ZOERSEL
Tel. : 03/385.17.10
Fax : 03/385.17.10
e-mail :
Patrick.VanHoeserlande@advalvas.be



Cursusboek

'Duikfysica'

Cursusboek voor de Ondernemersopleiding ACEBE "Operator voor Onderwaterwerken"

Dit boek is gebaseerd op de cursus Duikfysica gegeven aan de Duikmeesters van de Krijgsmacht en aangevuld met de NELOS cursus en de US Navy Diving Manual.

Lesgever : Patrick VAN HOESERLANDE, Ir
CMAS 2* Instructeur, Inshore Diver

(Rev 1) Oktober 2005

0 INHOUDSTABEL

0	INHOUDSTABEL.....	2
1	ALGEMENE THEORETISCHE BEGRIPPEN	4
1.1	HET SI-STELSEL (SYSTÈME INTERNATIONAL)	4
1.2	DE FUNDAMENTELE EENHEDEN.....	4
1.2.1	Meter (m): afstand.....	4
1.2.2	Seconde (s): tijd	5
1.2.3	Kelvin (K): temperatuur	5
1.2.4	Kilogram (kg): massa	5
1.2.5	Ampère (A): stroom	6
1.2.6	Candela (cd): lichtsterkte	6
1.2.7	Mol (mol): hoeveelheid stof.....	6
1.2.8	Afgeleide eenheden.....	6
1.2.9	Belang	7
2	DE 3 AGGREGATIETIESTANDEN EN DE MOLECULAIRE VERKLARING.....	8
2.1	DE MOLECULEN EN ATOMEN	8
2.2	DE 3 AGGREGATIETOESTANDEN	9
2.3	ONDOORDRINGBAARHEID VAN EEN STOF	9
2.4	VERKLARING VAN DE 3 AGGREGATIETOESTANDEN.....	9
3	DE SAMENSTELLING VAN LUCHT	10
3.1	STIKSTOF (N ₂).....	10
3.2	ZUURSTOF (O ₂).....	10
3.3	KOOLZUURGAS (CO ₂).....	11
3.4	KOOLMONOXIDE (CO).....	12
3.5	HELIUM (He).....	12
3.6	WATERSTOF (H ₂).....	12
3.7	ARGON (Ar)	13
3.8	NEON (Ne).....	13
4	DE BELANGRIJKE WETTEN	14
4.1	INLEIDING	14
4.2	DEFINITIE	14
4.3	WET VAN PASCAL	15
4.4	DE SOORTEN DRUKKEN	16
4.4.1	De barometrische of atmosferische druk.....	16
4.4.2	De hydrostatische druk.....	16
4.4.3	De relatieve en absolute druk.....	16
4.5	DE PARTIELE DRUK (WET VAN DALTON).....	17
4.6	DE GASWETTEN.....	18
4.6.1	Inleiding	18
4.6.2	De Wet van Boyle en Mariotte.....	18
4.6.3	De Wet van Guy-Lussac	20
4.6.4	De algemene gaswet.....	20
4.6.5	Toepassing 1 : duikgrens in apnee	21
4.6.6	Toepassing 2 : Equivalente luchtdiepte.....	21
4.7	HET OPLOSSEN VAN GASSEN IN VLOEISTOFFEN EN DE WET VAN HENRY	21
4.7.1	Definitie	22
4.7.2	Verzadiging (saturatie).....	22
4.7.3	Ontzadiging.....	22
4.7.4	Periode	23
4.7.5	Oververzadiging (sursaturatie).....	24
4.8	DIFFUSIE EN OSMOSE.....	24
5	HET DRIJVERMOGEN EN DE WET VAN ARCHIMEDES.....	25
5.1	DEFINITIE	25
5.2	SCHIJBBAAR GEWICHT.....	25

5.3	SOORTELIJK GEWICHT	25
5.4	DRIJFVERMOGEN	25
5.5	OEFENINGEN	26
6	HET LICHT	28
6.1	REFLECTIE EN REFRACTIE.....	28
6.2	LICHTABSORPTIE	29
6.3	ZICHT ONDER WATER.....	29
7	HET GELUID	31
7.1	ALGEMEEN.....	31
7.2	SNELHEID VAN HET GELUID.....	31
7.3	SCHOKGOLVEN.....	31
8	DE WARMTE	32
8.1	WARMTE OVERDRACHT.....	32
8.2	Toepassing : GEVOLGEN VOOR DE DUIKER.....	32
9	VOORBEELD VAN EEN SYNTHESE OEFENING.....	34

1 ALGEMENE THEORETISCHE BEGRIPPEN

1.1 HET SI-STELSEL (SYSTÈME INTERNATIONAL)

Elke grootte G wordt gekenmerkt door twee factoren:

zijn grootte g en zijn eenheid E .

$$G = g \times E$$

Om internationale samenwerking en uitwisseling te bevorderen werden er in 1960 fundamentele en afgeleide eenheden vastgelegd in het internationale SI-stelsel.

1.2 DE FUNDAMENTELE EENHEDEN

1.2.1 *Meter (m): afstand*

De Franse hoofdstad speelde een belangrijke rol in het standaardisatieproces. In 1791 bijvoorbeeld werd de meter gedefinieerd als het tien miljoenste deel van de afstand van de Noordpool tot de evenaar, uiteraard gemeten over Parijs. De resulterende lengtemaat werd in een platinastaaf gekrast, de voorloper van de latere standaardmeter. Het precies opmeten van dat aardkwadrant, met driehoeksmetingen tussen bijvoorbeeld kerktorens, bleek echter een probleem. Uit latere berekeningen bleek dat zo in de meter een fout was geïntroduceerd van 0,22 millimeter. Pas in 1875 werden er internationale afspraken gemaakt over de standaardmeter gebaseerd op een platina-iridium staaf. Die definitie heeft tot 1958 stand gehouden. Materialen kunnen veranderen onder invloed van omgevingsfactoren zoals de luchtvochtigheid en de temperatuur, waardoor de staaf honderdsten van een millimeter uitzet en krimpt.

Sinds 1984 luidt de definitie van de meter de weg die 'licht in vacuüm aflegt in een tijdsbestek van $1/29979458$ seconde.' De meting gebeurt met het rode licht van een stabiel helium-neon laser. De seconde is met een cesiumklok met een extreem hoge nauwkeurigheid te meten. Het is wat de meter betreft voor het eerst dat een onveranderlijke natuurconstante, de lichtsnelheid, wordt gehanteerd. De keuze van het getal is niet toevallig. De oude meter van de platina-iridium legering blijft zo nog steeds een meter lang, de nauwkeurigheid wordt echter flink opgevoerd.

Op basis van de laserdefinitie is de meter overal op aarde precies even lang, mits er met een zelfde laser wordt gemeten. De golflengte van de He/Ne laser is extreem stabiel en daardoor uitstekend reproduceerbaar.

1.2.2 *Seconde (s): tijd*

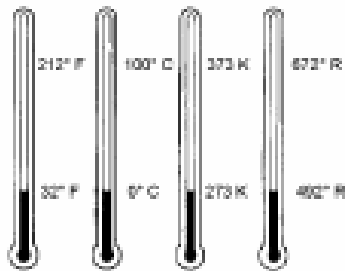
De tijd is de nauwkeurigst meetbare grootte van het SI-eenhedenstelsel. De tijdmeting zelf was echter tot de eerste decennia van deze eeuw een aangelegenheid van vooral astronomen, die uit sterdoorgangen en de zonnestand zo precies mogelijk de duur van het jaar – en dus van de dag, het uur, de seconde - afleidden. Eind jaren vijftig werd de seconde officieel gedefinieerd als exact het 1/31556925,97474ste deel van het tropische zonnejaar op 31 december 1899.

Rond 1920 kwam het kwartskristal in zwang als trillend hart van elektrische klokken. Meer dan één tiende seconde per jaar weken die niet af.

In een atoomklok wordt een bundeltje cesium 133 atomen gebruikt waarin alle elektronen in dezelfde toestand verkeren. Vervolgens wordt dit door een microgolfbundel geschoten. Het aantal overgangen van de ene naar de andere toestand is maximaal als de microgolven precies de gezochte frequentie hebben. De seconde is vervolgens, sinds 1967 officieel, gedefinieerd als de duur van 9.192.631.770 golfjes van die straling, bij het absolute nulpunt.

1.2.3 *Kelvin (K): temperatuur*

Fysisch is pas in de negentiende eeuw goed begrepen wat temperatuur eigenlijk betekent: een maat voor de gemiddelde energie waarmee de deeltjes in een stof bewegen. Het was William Thompson, de latere Lord Kelvin, die inzag dat er in dat geval een absoluut laagste temperatuur moet bestaan, het punt waarbij er niets meer beweegt: min 273,15 graden Celsius.



Eén Kelvin, afgekort K en zonder het woord 'graad', werd officieel ' het 1/273,15de deel van het smeltpunt van ijs'. De vorige definitie van de Kelvin uit 1948, 'het éénhonderdste deel van het temperatuurverschil tussen het vriespunt en het kookpunt van water' raakte daarmee op een zijspoor. Sinds 1990 wordt ook het smeltpunt van ijs niet langer gebruikt, maar het zogeheten tripelpunt van water, dat per definitie op 273,16 K ligt.

Kortweg wordt de temperatuur uitgedrukt in Kelvin waarbij:

$$T \text{ K} = T \text{ }^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K}$$

1.2.4 *Kilogram (kg): massa*

Maak nu niet de klassieke fout. We hebben het dus over het begrip massa en niet over gewicht. Dat laatste is de kracht die de massa uitoefent. In de ruimte, onder gewichtloosheid, heeft een kilo nog steeds dezelfde massa als op aarde, maar het gewicht ervan is nul.

De cilindervormige standaardkilo – eenheid voor massa - staat onder drie glazen stolpen in een kluis in het heilige der heiligen in standaardland, het "Bureau International des Poids et Mesures" (BIPM) in Sèvres bij Parijs. De kilo was in 1795 gedefinieerd als de massa van een liter water met de hoogste dichtheid, bij vier graden Celsius dus. De ultieme standaardkilo is er één van de veertig die tussen 1885 en 1889 door een Franse instrumentenmaker werden gemaakt van een platina-iridium legering (10 procent iridium, voor de stevigheid). Hij draaide eerst een cilinder uit een gietstuk, om die vervolgens nauwkeurig te polijsten tot de gewenste massa.

1.2.5 *Ampère (A): stroom*

In 1954 werd een ingewikkelde definitie aangenomen: 'een ampère is de stroom die een kracht van 2 maal 10^{-7} Newton per meter uitoefent tussen twee oneindig lange draden met een verwaarloosbaar kleine doorsnede, op precies één meter afstand van elkaar, in vacuüm.

Rest nog slechts één probleem: het experiment is niet uit te voeren, omdat oneindig en verwaarloosbaar klein niet te realiseren zijn. In praktijk komt daarom de ampèrestandaard indirect tot stand, op basis van een nauwkeurig bekende spanning en weerstand.

1.2.6 *Candela (cd): lichtsterkte*

Al vanaf de zeventiende eeuw werden voor de meting van lichtsterkte letterlijk kaarsen gebruikt. Kaarsen produceren van nature betrekkelijk onafhankelijk van het soort vet en lont hun licht. De kaars is een zelfcorrigerend systeem; beperkte vetverdamping houdt vanzelf de vlam in toom. Elektrische gloeilampen kunnen daar wat betreft stabiliteit niet aan tippen. In het jaar 1909 werd, met elektrisch licht in opkomst, voor het eerst internationaal een exact recept voor de standaardkaars overeengekomen.

Maar de moderne tijd diende zich onvermijdelijk aan. Fysici als Planck en Wien ontdekten de natuurwetten die de straling van verhitte objecten beheersen. Daarmee was een methode gevonden om een verband te leggen tussen lichtsterkte en temperatuur, zij het dat de gevoeligheid van het oog een onzekere factor bleef. Licht bleek maar een deel van een breed spectrum, waarvan het grootste deel onzichtbaar is.

Op grond hiervan werd in 1933 een nieuwe standaard gedefinieerd: de lichtuitstraling loodrecht op een blok platina van 1/600.000 vierkante meter bij zijn smeltpunt (2045 Kelvin). Sinds 1979 is de candela, letterlijk: de kaars, officieel 'de lichtsterkte, in een bepaalde richting, van een bron die monochromatische straling met een frequentie van 540 tera-hertz (THz) uitzendt en waarvan de stralingssterkte in die richting 1/683 watt per steradiaal is'.

1.2.7 *Mol (mol): hoeveelheid stof*

Deze eenheid is pas in 1971, als laatste, officieel aan het SI-stelsel toegevoegd. Maar die standaard is er slechts in de vorm van een papieren definitie: 'een mol van een bepaalde stof bevat een zelfde aantal stofdeeltjes als het aantal atomen in een monster puur koolstof-12 (^{12}C) met een massa van exact 0,012 kilogram.' Het is een hypothetische definitie zonder dat er een tastbaar voorwerp bij hoort omdat er namelijk geen puur ^{12}C bestaat. Koolstof in de natuur bevat naast ^{12}C , ook ^{13}C en ^{14}C , wat sinds 1995 resulteert in een gemiddeld atoomgewicht van 12,0107. De mol is een vreemde eend in de bijt, het is een chemisch getinte eenheid, terwijl de andere zes fysische constanten zijn, van seconde tot kilogram.

1.2.8 *Afgeleide eenheden*

Iedere eenheid die uit de fundamentele eenheden volgt, zoals:
Oppervlakte = 1 m^2

$$\text{Volume} = 1 \text{ l} = 1 \text{ m}^3$$

$$\text{Snelheid} = 1 \text{ m/s}$$

$$\text{Druk} = 1 \text{ Pa}$$

1.2.9 Belang

Het is in de fysica uiterst belangrijk om op de dimensie van de formules te letten (controle!). Dit betekent dat de grootheden links en rechts van het gelijkheidsteken steeds dezelfde dimensies moeten hebben.

2 DE 3 AGGREGATIE-TOESTANDEN EN DE MOLECULAIRE VERKLARING

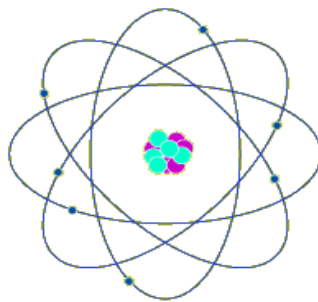
2.1 DE MOLECULEN EN ATOMEN

Elk lichaam kan in kleine deeltjes verdeeld worden bv. olie op water, krijt op bord, ...

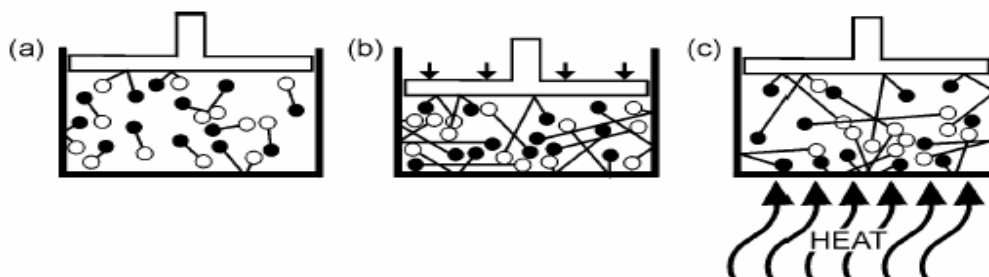
Molecule is het kleinste deeltje waarin men een stof kan verdelen en het bezit nog steeds de eigenschappen van die stof vb. H_2O , N_2 , ...

Een molecule is opgebouwd uit atomen. Deze atomen (Grieks voor ondeelbaar) zijn de kleinste samenstellende delen van een element.

Het simpelste atoommodel is dat van een kern met daar rond elektronen (model van Bohr). Moderne modellen geven deze elektronen niet weer als orbitalen rond de kern, maar als energieniveaus (model van Rutherford) waarbij de elektronen zich gedragen als golven en/of als deeltjes (De Broglie).



Een stof kan een zuivere stof zijn bestaande uit gelijke moleculen (vb. water) of een mengsel uit verschillende moleculen (vb. lucht).



Een stof is opgebouwd uit moleculen, die steeds in beweging zijn (a) waarbij de snelheid toeneemt met de vermindering van het volume (b) of de verhoging van de temperatuur (c). Dit is de THERMISCHE BEWEGING. Ondanks de beweging blijven de moleculen bij elkaar door:

- Cohesie: aantrekkingskracht tussen moleculen van dezelfde soort bv. in water, metaal, ...
- Adhesie: aantrekkingskracht tussen moleculen van verschillende soort bv. water aan het raam.

2.2 DE 3 AGGREGATIETOESTANDEN

- VASTE toestand (*vaste vorm + volume*)
 - > *vorm door de mens* eraan gegeven
 - > *vorm door de natuur* tot stand gebracht
- VLOEIBARE toestand
 - > *vorm van het vat* waarin het zich bevindt met een horizontaal, vrij vloeistofoppervlak
 - > *vast volume* (weinig samendrukbaar)
 - Opmerking: in zeer kleine hoeveelheden neemt vloeistof wel een bepaalde vorm aan nl. de bolvorm (waterdruppels).
- GASVORMIGE toestand
 - > *vorm van het vat* waarin het gas zich bevindt (vervoeren in een afsluitbaar vat)
 - > *veranderlijk volume*(zeer goed samendrukbaar)



Voor elke stof bestaat er in functie van de temperatuur en de druk een fazendiagram.

2.3 ONDOORDRINGBAARHEID VAN EEN STOF

Waar een stof is, is geen andere stof, dus de makkelijkst verplaatsbare stof zal wijken voor een andere stof.

bv. vaste stof in een vloeistof brengen -> vloeistof wijken

2.4 VERKLARING VAN DE 3 AGGREGATIETOESTANDEN

- VASTE STOF:
 - moleculen trillen rond vaste stand = *vaste vorm*
 - grote cohesie die de moleculen bij elkaar houden = *onveranderd volume*
 - vloeibaar maken door vaste stof te verwarmen waardoor de beweging vergroot
- VLOEISTOF:
 - moleculen van de vaste stof gaan door het verwarmen trillen en losschieten + vrij bewegen
 - onderlinge botsingen wijzigt voortdurend hun richting = *veranderlijke vorm*
 - nog cohesie: *onveranderd volume*
 - gasvormig maken door energie toe te voeren
- GAS:
 - snelheid van de moleculen vergroot en schieten uit de vloeistof = damp
 - geringe cohesie = vrij rond bewegen van de moleculen = *geen vaste vorm, noch volume*

3 DE SAMENSTELLING VAN LUCHT

Component	Symbol	Vol %	Moleculaire Massa	Narcotisch vermogen	Opmerkingen
Stikstof	N₂	78,084	28	1	Veilige limiet : 70 m
Zuurstof	O₂	20,946	32		Veilige limiet zuivere O ₂ : 8 m
Argon	Ar	0,934	40	2,32	Veilige limiet : 30 m
Koolzuur	CO₂	0,033			Hypercapnie
Waterstof	H₂	0,003	2	0,55	Explosief indien % > 4%
Helium	He		4	0,23	Vluchtig, warmteverlies
Neon	Ne		20	0,28	Veilige limiet : 90 m
Krypton	Kr		84	7,14	
Xenon	Xe		131	25,64	
Radon	Rn				
Koolstofmonoxide	CO				Uitlaat motoren!

3.1 STIKSTOF (N₂)

Stikstof vormt één der twee hoofdbestanddelen van lucht. Het is een inert gas dat kleur-, geur- en smaakloos is. Op zich, is het niet in staat om leven of verbranding in stand te houden. Stikstof beschikt over een bedwelmend vermogen die afhangt van zijn partiële druk in de lucht, of het ingeademde mengsel. Bij diepe duiken zal een autonome luchtduiker psychische stoornissen ondervinden, meestal te zien aan de gedragingen van de duiker, maar soms zonder enig uiterlijk symptoom. Deze stoornissen kunnen echter op elk moment een onbedachtzame handeling of een paniecreactie met catastrofale gevolgen met zich meebrengen.

3.2 ZUURSTOF (O₂)

Tweede bestanddeel van lucht, eveneens kleur-, geur- en smaakloos. Het is onontbeerlijk voor elk dierlijk leven. Indien dit gas alleen, of in een mengsel ingeademd wordt, dan moet, om de functies van het organisme normaal te laten verlopen, de partiële druk rond de 0,21 bar liggen (normoxie). De partiële O₂ druk mag niet lager komen dan 0,17 bar om beschermd te zijn tegen de gevaren van zuurstoftekort (hypoxie). Deze toestand is niet voelbaar bij een normaal individu, aangezien het mogelijk is om met een pp O₂ van 0,155 bar te leven (dit is de zuurstofwaarde van lucht op 2500 m hoogte, die het drukevenwichtsniveau vormt van de meeste verkeersvliegtuigen op lange afstandsvluchten).

De eerste symptomen van hypocapnie kunnen verschijnen bij een pp O₂ van 0,12 bar. Indien deze drukwaarde niet bereikt wordt, kan dit gevaar opleveren, zoals bij het beklimmen van een berg. Wanneer de drukwaarde slechts 0,10 bar bedraagt, kan er een bewustzijnsverlies optreden. Dit is niet onmiddellijk het geval wanneer de druk progressief daalt.

Zuurstof kan ook giftig worden indien het onder te hoge pp ingeademd wordt. Het optreden van deze verschijnselen hangt af van de pp O₂, van de tijdsperiode en van de individuele gevoeligheid. Het kan al optreden vanaf een pp O₂ van 1,5 bar.

Het menselijk lichaam verbruikt zuurstof volgens zijn stofwisseling en zijn longventilatie en in functie van de geleverde spierarbeid. De volgende tabel geeft de dubbele verhouding weer tussen het geleverde werk, de verbruikte O₂ en de longventilatie.

Activiteit	O ₂ verbruik (l/min)	Ventilatie (l/min)
Rust	0,4	8
Licht werk	0,8	18
Middelmatig werk	1,3	30
Zwaar werk	1,7	40
Heel zwaar werk	2,5	60

3.3 KOOLZUURGAS (CO₂)

Dit gas wordt geproduceerd door de normale verbranding van voedsel in het lichaam. We weten dat warmte en energie voortgebracht worden in het lichaam dankzij de oxidatie van de koolstof en waterstof, aangevoerd door het voedsel. Dit ingewikkeld proces, stofwisseling genaamd, heeft als afvalproducten water en koolzuurgas die respectievelijk langs de nieren en de longen afgevoerd worden. Aangezien een gedeelte van de zuurstof gebruikt wordt voor de oxidatie van waterstof, zal het volume van het terug afgevoerde koolzuurgas gewoonlijk kleiner zijn dan het verbruikte zuurstofvolume. In rust wordt er bij elke 250 ml verbruikte zuurstof slechts 200 ml koolzuurgas afgevoerd. Het koolzuurgas, fysiologisch noodzakelijk voor ons lichaam, wordt, indien nodig, afgevoerd maar kan soms per ongeluk aangevoerd worden. Ons organisme behoudt het nodige en elimineert het overbodige gas via de ademhaling, dit in het geval dat de ademhaling normaal verloopt. Deze toestand wordt "normocapnie" genoemd.

De "hypercapnie" (koolzuurvergiftiging) kan voorkomen als gevolg van:

- inwendige oorzaken: (de stofwisseling) bv. buiten adem zijn.
- uitwendige oorzaken: bv. slechte vulling van de flessen.

De giftigheid van CO₂ zal in functie zijn van zijn partiële druk in de ingeademde lucht en ze zal dus verhogen met de diepte. De hypercapnie ademhaling, schijnbaar onbeduidend aan de oppervlakte, kan hinderlijke en vervolgens gevaarlijke gevolgen hebben op diepte. De volgende tabel geeft de verhouding weer tussen de partiële CO₂ druk en de fysiologische effecten op de mens.

DIEPTE	ABSOLUTE DRUK	% CO ₂	PD CO ₂	FYSIOLOGISCHE EFFECTEN
0m	1 bar	1	0.01	niet voelbaar
10m	2 bar	1	0.02	lichte hyperventilatie
30m	4 bar	1	0.04	buiten adem, hoofdpijn
50m	6 bar	1	0.06	buiten adem, bedwelming
60m	7 bar	1	0.07	buiten adem, duizeligheid braakneigingen, zware bedwelming
70m	8 bar	1	0.08	duizeligheid, verwarring, bewustzijnsverlies

3.4 KOOLMONOXIDE (CO)

Dit is een uiterst giftig gas, gevormd door de onvolledige verbranding van koolstofhoudend materiaal. De toevallige aanwezigheid van CO met een waarde van méér dan 1% in de samengeperste lucht in duikflessen, is een vervuiling die meer voorkomt dan men denkt. De oorzaak hiervan is de slechte opstelling van de luchtaanzuiging van de compressor, zoals te dicht bij een motoruitlaat of in een slecht geventileerde ruimte, of zonder rekening te houden met de wind zodat deze laatste uitlaatgassen meevoert naar de luchtaanzuiging.

3.5 HELIUM (He)

Lichter gas dan stikstof, gebruikt bij het duiken op grote diepten. Het is aanwezig in de atmosfeer maar uiterst duur om te vervaardigen. Gemengd met zuurstof (heliox) of met zuurstof en stikstof (trimix) wordt er een kunstmatig ademhalingsgas gecreëerd, waarvan de vergiftigingsverschijnselen veel minder zijn dan met lucht (Helium verwekt slechts neurologische verschijnselen tussen 200m en 300m). Buiten dit voordeel zijn er toch ook enkele nadelen aan verbonden:

- Helium geleidt warmte veel beter dan lucht zodat de temperatuur van het ademhalingsgas een grote rol speelt bij het duiken en dat het gas moet voorverwarmd worden;
- De viscositeit brengt een stemverhoging (Donald Duck stemmetje) met zich mee die het gebruik van een apparaat, om de verstaanbaarheid te verbeteren, noodzakelijk maakt;
- Het gas is erg vluchtig, zodat lekken moeilijk te dichten zijn.

3.6 WATERSTOF (H₂)

Gemakkelijk te winnen gas door middel van elektrolyse van water. Het was lang het monopoly van de Zweedse Marine, maar tegenwoordig wordt het weinig gebruikt. Waterstof heeft als groot voordeel dat het zelfs lichter is dan Helium, zodat bedwelmende symptomen nog dieper optreden, maar heeft als groot nadeel dat een mengsel van zuurstof en waterstof enorm explosief wordt indien het zuurstofpercentage meer dan 4% bedraagt.

3.7 ARGON (Ar)

Door het hoog moleculair gewicht wordt het niet gebruikt om duikmengsels te maken. Het veroorzaakt al bedwelmingsverschijnselen bij een kleinere partiële druk dan stikstof (30m). Dit gas is een goede isolator en wordt in het technisch duiken soms als isolatiegas in droogpakken gebruikt.

3.8 NEON (Ne)

Uiterst zeldzaam gas, het werd enkele keren experimenteel gebruikt (diepte van bedwelmingsverschijnselen: 90m).

4 DE BELANGRIJKE WETTEN

4.1 INLEIDING

Wanneer een duiker de waterspiegel doorbreekt, bevindt hij zich zonder overgang in een volledig verschillend milieu. Een wereld die bijzonder gunstig is voor de vermenigvuldiging van levende cellen, zoals plankton, fauna en flora enz., maar vijandig voor de mens. Water (H₂O) is nu eenmaal een compleet andere materie dan gas, met een grotere dichtheid, (1 l water weegt 773 maal méér dan 1 l lucht aan 0 °C bij atmosferische druk) betrekkelijk onsamendrukbaar en begiftigd met verschillende eigenschappen tegenover het licht, het geluid en de warmte.

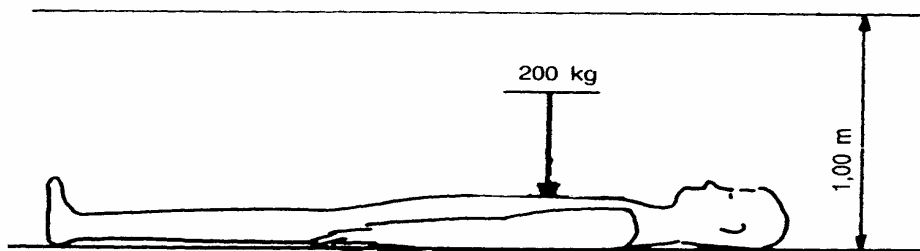
Aangezien het duiken gebeurt in deze omgeving, die zo veel verschilt met ons gewoon milieu, is het kennen van enkele wetten en basisprincipes van de fysica is daarom noodzakelijk.

4.2 DEFINITIE

**DRUK IS DE HOEVEELHEID KRACHT PER
OPPERVLAKTE EENHEID**

$$P = \frac{F}{A}$$

De eenheid van druk is $\frac{N}{m^2}$ of Pascal (Pa).



- Oppervlak van de borstkas :
55 cm × 35 cm = 2.000 cm²
- Gewicht van het volume water op de borstkas :
1 m × 0,2 m² = 0,2 m³ of 200 kg water

Om praktische redenen gebruiken we soms de "kg/cm²" en de "bar". Deze laatste eenheid is nauw verbonden met de kg/cm² (1 bar = 1,02 kg/cm²) en wordt normaal gebruikt om de luchtdruk aan te geven. Deze luchtdruk komt overeen met 1013 mbar (millibar of 1/1000 bar) of 760 mm kwik. Om

praktische redenen zullen we voor onze berekeningen aannemen dat de kg/cm² en de bar evenwaardig zijn.

OMREKENTABEL VAN DE DRUKEENHEDEN

	ATM.	BAR	kg/cm ²	m _{sw}	mm Hg	f _{sw}	lb/in ²
1 atm	1	1,013	1,033	10,08	760	33	14,696
1 bar	0,987	1	1,02	9,95	750	32,6	14,504
1 kg/cm ²	0,968	0,98	1	9,75	735	31,9	14,223
1 m _{sw}	0,99	0,1005	0,1025	1	75,4	3,28	1,458
1 mm Hg	0,00131	0,00133	0,00135	0,0132	1	0,043	0,0193
1 f _{sw}	0,03	0,0307	0,0313	0,305	23,03	1	0,445
1 lb/in ²	0,068	0,069	0,07	0,68	51,73	2,25	1

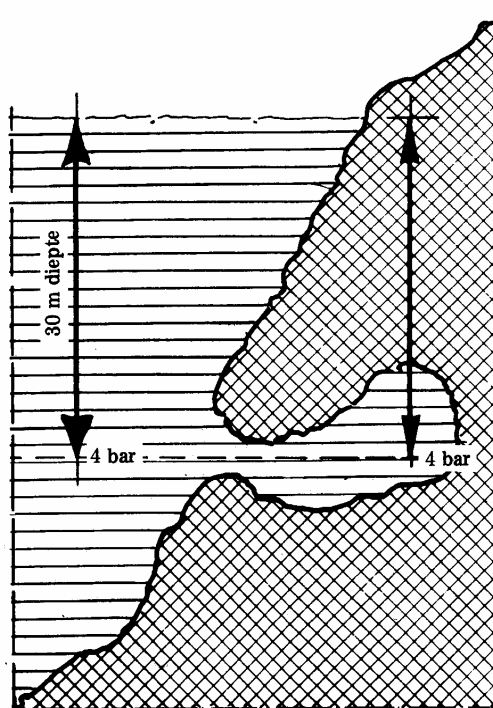
m_{sw} = meter of seawater

f_{sw} = foot of seawater

lb/in² of PSI = pound square inch (pond per vierkante duim)

4.3 WET VAN PASCAL

EEN DRUK UITGEOEFEND OP EEN DEEL VAN EEN VLOEISTOF PLANT ZICH IN ALLE RICHTINGEN VOORT MET DEZELFDE GROOTTE.



4.4 DE SOORTEN DRUKKEN

4.4.1 *De barometrische of atmosferische druk*

De atmosfeer, die de aardbol omringt, is samengesteld uit lucht. Deze lucht, die een gewicht heeft, oefent een bepaalde druk uit op de aarde. De barometer laat toe deze waarde op te meten (uitvinding van Toricelli, wis- en natuurkundige °1608 - †1647).

Een barometrische buis, gevuld met kwik, met een lengte van één meter wordt omgekeerd in een bad met kwik geplaatst. Het kwik in deze buis, dat dus in verticale positie staat, zakt en stabiliseert zich vervolgens op 760 mm boven het kwikniveau in het bad (dit op zeeniveau). Een evenwicht zal bereikt worden wanneer de atmosferische druk gelijk is aan de druk, uitgeoefend door het gewicht van de kwikzuil d.i. 1013 mbar.

De dichtheid van deze luchtlagen, samengedrukt door de erboven gelegen luchtlagen, verhoogt gelijkmatig tot aan het aardoppervlak. Men moet stijgen tot ongeveer 5000 m om een atmosferische waarde te meten, welke gelijk is aan de helft van die op de grond.

4.4.2 *De hydrostatische druk*

Eén liter lucht weegt aan de oppervlakte van onze aardbol 1,293 g. Daarentegen weegt één liter water 1 kg. De drukveranderingen zullen zich in het water dus veel vlugger opvolgen dan in lucht. De oppervlakte eenheid wordt uitgedrukt in vierkante centimeter (cm²). Er is dus een waterzuil van 10 m hoogte nodig om één dm³ te bekomen (0,1 dm x 0,1 dm x 100 dm = 1 dm³) die op zich dan evenwaardig is aan 1 kg. Rekening houdend met de verschillende soortelijke gewichten en het feit dat water bijna onsamendrukbaar is, is het bewezen dat elke 10 m de druk met 0,981 bar verhoogt in zoet water en 1,007 bar in zout water.

Gemakshalve stellen we dat de druk, uitgeoefend door een 10 m lange waterzuil, weergegeven op de opmeetapparatuur, gelijk is aan 1 bar.

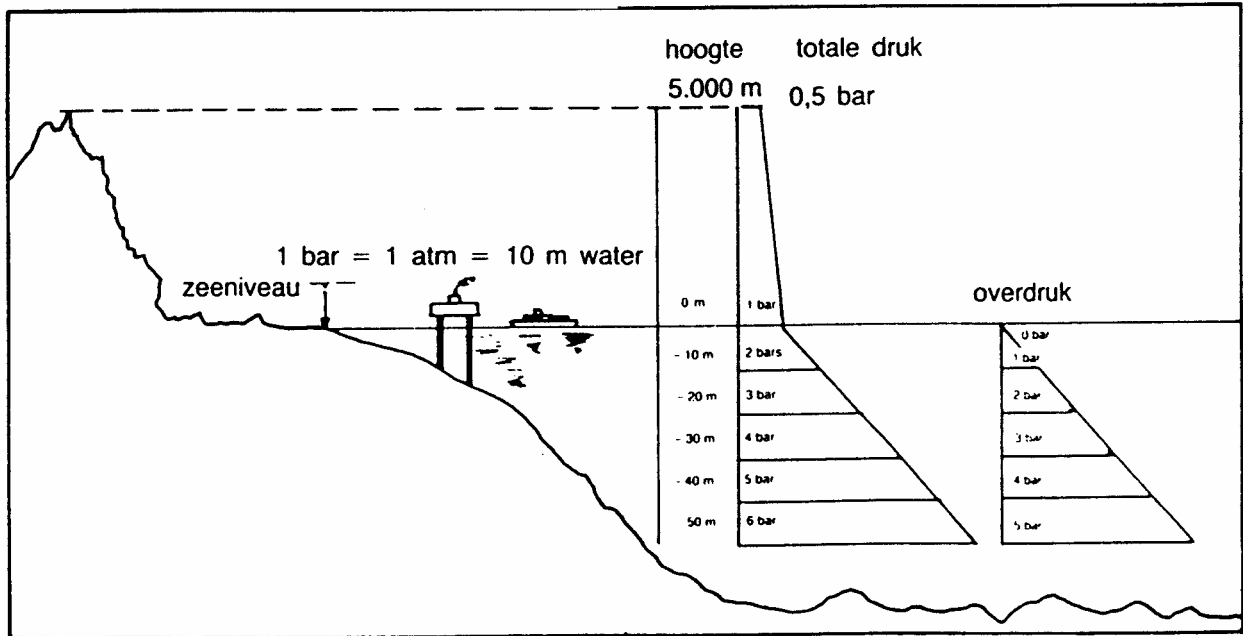
4.4.3 *De relatieve en absolute druk*

In de praktijk wordt de druk opgemeten d.m.v. een manometer die het nulpunt aangeeft bij atmosferische druk. Met dit apparaat meten we het verschil tussen de omgevende druk en de atmosferische druk m.a.w. de "relatieve druk". Indien we de omgevende druk meten in verhouding met het vacuüm bekomen we de absolute druk. Dit onderscheid is belangrijk, zodat we steeds nauwkeurig moeten omschrijven, indien het een druk betreft, als het om relatieve (ATU) of absolute druk (ATA) gaat.

Men kan dus stellen dat de absolute druk gelijk is aan de relatieve druk (bv. water = 1 bar per 10 m) verhoogt met de atmosferische druk (lucht = 1 bar).

$$p_{\text{abs}} = p_{\text{atm}} + (d / 10)$$

DIEPTE	RELATIEVE DRUK	+	ATMOSFERISCHE DRUK	=	ABSOLUTE DRUK
OPPERVLAKTE	0	+	1bar	=	1bar
-10m	1bar	+	1bar	=	2bar
-20m	2bar	+	1bar	=	3bar
-25m	2,5bar	+	1bar	=	3,5bar
-90m	9bar	+	1bar	=	10bar



4.5 DE PARTIELE DRUK (WET VAN DALTON)

In om het even welk mengsel van gassen is het nuttig om te weten hoeveel druk er door ieder afzonderlijk gas uitgeoefend wordt, m.a.w. de "partiële druk".

De biologische effecten van een gas ten opzichte van ons organisme zullen bepaald worden door de partiële druk van het betreffende gas zelf en niet door de totale druk van het gasmengsel. De giftigheid, de oplosbaarheid of de diffusie van een gas zal afhangen van zijn eigen druk. De partiële druk (pp) is bepaald door de wet van DALTON (Engelse scheikundige °1766 -†1844).

BIJ EEN GEGEVEN TEMPERATUUR, IS DE TOTALE DRUK, UITGEOEFEND DOOR EEN GASMENGSEL, GELIJK AAN DE SOM VAN DE DRUKKEN, UITGEOEFEND DOOR IEDER GAS AFZONDERLIJK, WANNEER DIT ALLEEN AANWEZIG ZOU ZIJN EN HET TOTALE VOLUME ZOU INNEMEN.

De partiële druk is dus gelijk aan het product van de beschouwde gasfractie en de absolute druk van het gasmengsel

PARTIELE DRUK = FRACTIE X ABSOLUTE DRUK

Deze formule wordt soms ook de T van Dalton genoemd:
$$\frac{PP_{gas}}{f_{gas} | P_{abs}}$$

Voorbeeld

Bij lucht, samengesteld uit 21% zuurstof en 79% stikstof, heeft de partiële O₂ druk aan de oppervlakte een waarde van: 0,21 x 1 bar = 0,21 bar. De partiële N₂ druk aan de oppervlakte bedraagt dus 0,79 x 1 bar = 0,79 bar. De som van de partiële drukken geeft dan de absolute druk van het gasmengsel: 0,21 bar O₂ + 0,79 bar N₂ = 1 bar lucht. Op 20 m diepte (abs. druk 3 bar) bedraagt de partiële druk van de O₂: 0,21 x 3 bar = 0,63 bar, terwijl de pp N₂: 0,79 x 3 bar = 2,37 bar is. De som van deze partiële drukken geeft dus: 0,63 bar + 2,37 bar = 3 bar.

Voor een ingeademd mengsel van 40% O₂ en 60% N₂ zal de pp O₂ op 30m (pp abs. = 4 bar) een volgende waarde hebben: 0,4 x 4 bar = 1,6 bar.

4.6 DE GASWETTEN

4.6.1 Inleiding

In de natuur hebben we de gewoonte om drie verschillende aggregatietoestanden te onderscheiden: vaste stoffen, vloeistoffen en gassen. In de duikwereld spelen gassen een zeer belangrijke rol. Het is dus noodzakelijk de gaswetten te kennen en te begrijpen.

De gaswetten (dus ook de Wet van Dalton) zijn gebaseerd op wat we een ideaal gas(mengsel) noemen, dit betekent dat de moleculen van het gas(mengsels) noch chemisch, noch fysisch met elkaar reageren (dus lage druk en hoge temperatuur).

4.6.2 De Wet van Boyle en Mariotte

Terwijl de vloeistoffen en de vaste stoffen als onsamendrukbaar beschouwd worden, ondergaan gassen bij drukveranderingen een volumeverandering, omgekeerd evenredig met de drukveranderingen, op voorwaarde dat de temperatuur constant blijft. Dit verschijnsel wordt weergegeven in de wet van Boyle en Mariotte.

BIJ EEN CONSTANTE TEMPERATUUR, IS HET VOLUME VAN EEN GAS OMGEKEERD EVENREDIG AAN DE

ABSOLUTE DRUK, TERWIJL DE DICHTHEID DIRECT EVENREDIG IS AAN DE ABSOLUTE DRUK.

of $P \times V = \text{constant}$

Voorbeelden

Indien we een met lucht gevulde vaas omdraaien en hem geleidelijk verticaal onderdompelen, zal het luchtvolume in deze vaas evenredig met de druk verminderen. Stel dat het volume 24 l bedraagt bij atmosferische druk, dus aan de oppervlakte, dan zal het:

V/2 of 12 l bedragen op 10 m (2 bar)

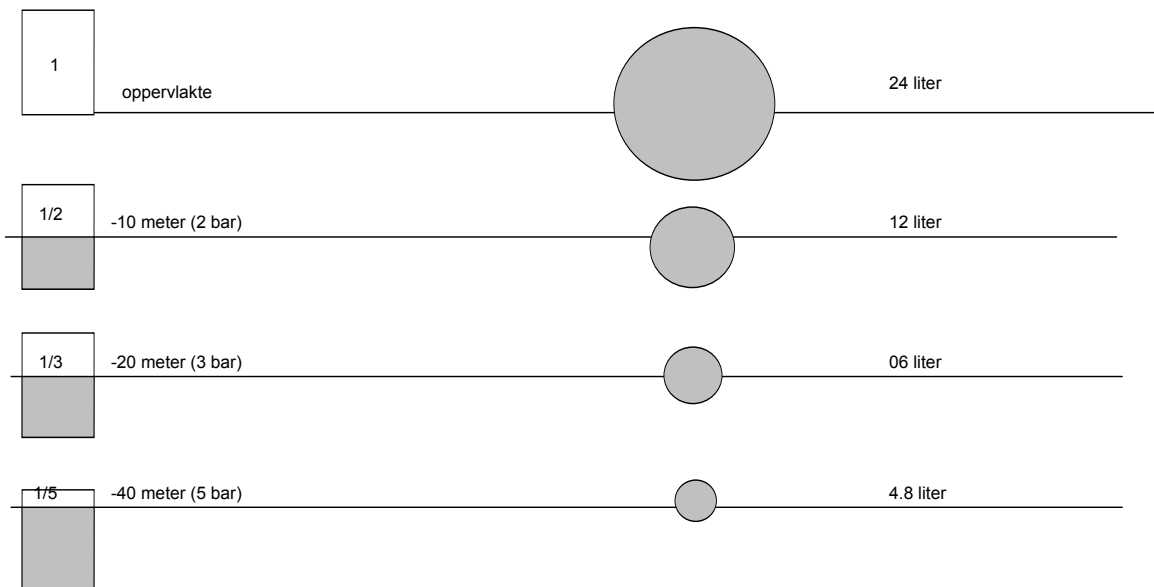
V/3 of 8 l bedragen op 20 m (3 bar)

V/4 of 6 l bedragen op 30 m (4 bar)

Wanneer een ballon met hetzelfde volume ondergedompeld wordt, zal zijn omhulsel, dat samendrukbaar is, de volumeveranderingen ondergaan die het gevolg zijn van de drukvariaties. Aangezien de lichaamstemperatuur van de mens bijna steeds constant is, zullen gasvolumes in ons lichaam enkel veranderen tengevolge van eventuele drukwijzigingen. Door bovenstaand voorbeeld kunnen we afleiden dat tussen de 0 m en de 10 m de drukverhoging tijdens het dalen en de volumetoename tijdens het stijgen 100 % bedraagt, terwijl bijvoorbeeld tussen de 40 m en de 50 m er enkel een 25% verhoging optreedt. Dit fysisch gegeven verklaart de ernst en het gevaar van barotraumatische (te wijten aan druk) ongevallen tussen de 3 m en de 20 m.

niet samendrukbaar lichaam

samendrukbaar lichaam



4.6.3 De Wet van Guy-Lussac

Door de botsing van moleculen op een wand wordt er druk gecreëerd. Deze druk staat in relatie tot de temperatuur.

BIJ CONSTANT VOLUME IS DE DRUK VAN EEN HOEVEELHEID GAS RECHT EVENREDIG MET ZIJN TEMPERATUUR IN KELVIN.

Of $\frac{p}{T} = \text{constante}$

Dezelfde wet geldt ook voor het volume en luidt dan:

BIJ CONSTATE DRUK IS HET VOLUME VAN EEN HOEVEELHEID GAS RECHT EVENREDIG MET ZIJN TEMPERATUUR IN KELVIN.

Of $\frac{V}{T} = \text{constante}$

4.6.4 De algemene gaswet

De combinatie van de Wet van Boyle-Mariotte en de Wet van Guy-Lussac geeft de Algemene Gaswet:

Voor een ideaal gas geldt:

$$PV = nRT$$

Voorbeeld

Nemen we een duikfles van 15 l, 's morgens gepompt tot 200 bar bij een temperatuur van 10 °C.

Hoeveel zal de druk in de fles bedragen bij een middagtemperatuur van 40 °C?

$$\frac{P1 \times V1}{T1} = \frac{P2 \times V2}{T2} \Rightarrow \frac{200 \text{ bar} \times 15 \text{ l}}{283 \text{ K}} = \frac{X \times 15 \text{ l}}{313 \text{ K}} \Rightarrow X = 221 \text{ bar}$$

Hoeveel l lucht bevindt er zich in een duikfles van 20 l gepompt tot 200 bar?

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \Rightarrow 200 \text{ bar} \times 20 \text{ l} = 1 \text{ bar} \times X \Rightarrow \frac{200 \text{ bar} \times 20 \text{ l}}{1 \text{ bar}} = X \Rightarrow X = 4000 \text{ l}$$

4.6.5 Toepassing 1 : duikgrens in apnee

Bij het afdalen zal het longvolume verminderen, door de drukverhoging van de omgeving, tot de volumewaarde van het residu bereikt wordt. Wanneer het longvolume nog kleiner wordt, zal de soepelheid van de weefsels ontoereikend zijn om het voortgebrachte "zuigefect" tegen te gaan, met een mogelijk longoedeem als gevolg. Via een eenvoudig voorbeeld, en zonder rekening te houden met de lucht, bevat in de pneumatische holten in het gezicht en het volumeverlies van het zuurstofverbruik en de CO₂ vorming (dit zal de theoretische duiklimiet nog verminderen) kunnen we stellen dat, indien een duiker, met een vitale capaciteit van 6 l en een residu van 1,5 l (samen dus een longvolume van 7,5 l) afdaald, de druk met 1 bar zal verhogen per 10 m waterdiepte. Volgens de wet van Boyle-Mariotte bekomen we dan volgende waarden:

opp.	1 bar	7,5 l
10 m	2 bar	3,75 l
40 m	5 bar	1,5 l

Op 40 m zal het longvolume volledig gelijk zijn aan het residueel volume. Indien men dieper duikt, zal een inwendige longonderdruk zich voordoen. Indien de duiker, om gemakkelijker te dalen, niet volledig inademt, beschikt hij niet meer over een groot deel van zijn inademingvolume (nl. ± 2 l) en zal de theoretische apneegrens verminderen van 40 m naar 26 m.

4.6.6 Toepassing 2 : Equivalente luchtdiepte

Het principe van equivalente lucht diepte (ELD) ook genoemd EAD (Equivalent Air Depth) gaat op als we een mengsel gebruiken met minder stikstof. We kunnen dit dan gelijkstellen voor trapbepaling met het ondieper gebruiken van lucht. Bijvoorbeeld: we gebruiken een 28% mengsel op 40 meter, met welke diepte komt dit overeen indien we lucht zouden gebruiken (21%)? We rekenen de ppN₂ uit: (1-0.28) x 5=3.6 bar ppN₂. Om uit te rekenen met welke AP dit overeenkomt rekening houdend met een ppN₂ van 0.79 (lucht) maken we de bewerking: 3.6 bar /0.79= 4.556962 bar, we bekomen dus een equivalente lucht diepte van 35.6 meter.

Om dit in formulevorm uit te drukken:

$$\text{ELD} = (((1 - f_{rO_2}) \times p_{\text{abs}}) / 0.79) - 1) \times 10$$

4.7 HET OPLOSSEN VAN GASSEN IN VLOEISTOFFEN EN DE WET VAN HENRY

Wanneer een gas in aanraking komt met een vloeistof zal er door middel van diffusie een gedeelte van dit gas oplossen in deze vloeistof. De hoeveelheid van dit opgeloste gas wordt begrensd door de verzadiging van de vloeistof en wordt bepaald door de wet van Henry.

4.7.1 Definitie

BIJ EEN CONSTANTE TEMPERATUUR EN BIJ VERZADIGING, ZAL DE HOEVEELHEID VAN HET OPGELOSTE GAS IN EEN VLOEISTOF EVENREDIG ZIJN MET DE DRUK UITGEOEFEND DOOR DIT GAS IN CONTACT MET DIE VLOEISTOF.

Invloedsfactoren op het oplossen (DRAATT):

- de druk
- het raakoppervlak
- de aard van het gas (bv. O₂, N₂, He)
- de aard van de vloeistof (bv. bloed, vetten, spieren)
- de temperatuur
- de tijd van het contact

Er is steeds gas dat oplost in de vloeistof en dat vrijkomt uit de vloeistof. Dit evenwicht verschuift volgens de verzadigingstoestand.

Indien we een mengsel van gassen hebben, zal de hoeveelheid gas evenredig zijn aan de partiële druk.

Er is geen enkele beïnvloeding van het ene gas ten opzichte van het andere die de oplosbaarheid verhoogt of verlaagt.

Volgende tabel geeft de oplosbaarheid weer van verschillende gassen in water en in vetten.

	H ₂	He	N ₂	Ar
Oplosbaarheid in water	0,017	0,009	0,013	0,027
Oplosbaarheid in vetten	0,036	0,015	0,067	0,140

4.7.2 Verzadiging (saturatie)

Verzadiging is de maximale hoeveelheid gas, die een vloeistof kan opnemen bij een constante druk en temperatuur. De verzadiging wordt niet onmiddellijk bereikt, de boog die de verzadiging weergeeft, heeft een exponentiële vorm.

4.7.3 Ontzadiging

De wijze van elimineren van een gas uit een vloeistof gebeurt identiek als het oplossen. De desaturatieboog zal omgekeerd en symmetrisch zijn ten opzichte van de verzadigungsboog.

4.7.4 Periode

Een periode is de verlopen tijd, wanneer de hoeveelheid opgelost gas gelijk is aan de helft van de opgeloste hoeveelheid bij een volledige verzadiging.

Nemen we een bepaalde hoeveelheid vloeistof in een vat met om het even welke vorm, en stellen we dit bloot aan een gas met een bepaalde druk p . We zullen dan een onmiddellijke oplossing krijgen aan de gescheiden oppervlakte.

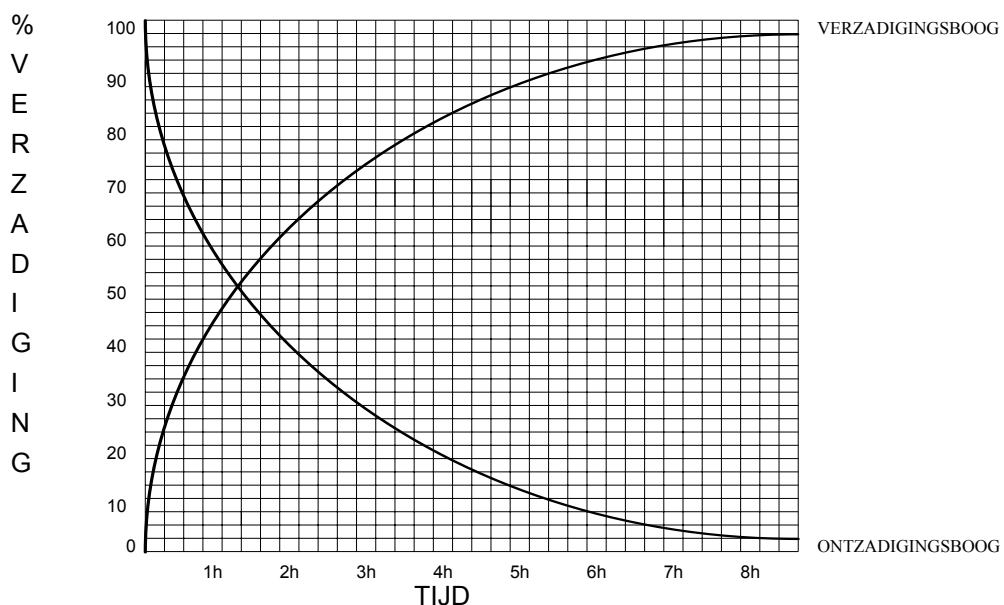
Dit fenomeen zal des te sneller gebeuren naargelang de oppervlakte en het drukverschil groter is. De uitwisseling gebeurt snel bij het begin, wanneer het verschil in spanning tussen de buitenomgeving en de weefsels groter is, maar zij vertraagt progressief naargelang het verschil in spanning verkleint en de verzadiging nadert.

We kunnen dus aannemen dat:

- a/ Gedurende de eerste periode, 50% van het gas zich in de vloeistof oplost en deze laatste dus een verzadiging van 50% zal bereiken.
- b/ Dat gedurende de tweede periode, de helft van het overgebleven, niet opgelost gas m.a.w. 50% van 50% = 25% zal oplossen en dat de vloeistof dus een verzadiging van 75% zal bereiken.
- c/ Enz.

Initiële verzadiging

1 ste periode:	.....	50% verzadiging
2 de periode:	.....	75% verzadiging
3 de periode:	.....	87,5% verzadiging
4 de periode:	.....	93,75% verzadiging
5 de periode:	.....	96,87% verzadiging
6 de periode:	.....	98,43% verzadiging



Praktisch spreken we van volledige verzadiging of ontzadiging na 6 periodes.

4.7.5 Oververzadiging (*sursaturatie*)

Indien er te veel gas in de vloeistof opgelost is, is er een toestand van oververzadiging. Indien de druk van het gas te snel afneemt, kunnen er bellen gevormd worden (vb. Spa fles).

Toepassing : decompressieongeval.

4.8 DIFFUSIE EN OSMOSE

Het basismechanisme dat een vloeistof doorheen een buis laat stromen, is het drukverschil tussen beide uiteinden van de buis. Dit drukverschil is verantwoordelijk voor de verplaatsing van een massa vloeistof van de ene plaats naar de andere.

Een tweede mechanisme dat dit zelfde resultaat bereikt, is het bestaan van een concentratieverschil tussen twee punten in plaats van een drukverschil. Wanneer de concentratie (het aantal moleculen per volume eenheid) hoger is in één gebied dan in het andere, dan zullen de moleculen vloeien van het gebied van hoge concentratie naar het gebied met lage concentratie.

De twee fundamentele processen die gebruik maken van dit transportfenomeen zijn diffusie en osmose, waarbij osmose kan omschreven worden als een diffusie van water doorheen een membraam. Eenmaal er een concentratie evenwicht bereikt is, houdt het proces op.

Toepassingen: gasuitwisseling ter hoogte van de longen.

5 HET DRIJVERMOGEN EN DE WET VAN ARCHIMEDES

5.1 DEFINITIE

EEN LICHAAM, GEHEEL OF GEDEELTELIJK ONDERGEDOMPELD IN EEN VLOEISTOF, ONDERGAAT EEN OPWAARTSE KRACHT, GELIJK AAN HET GEWICHT VAN DE VLOEISTOF, VERPLAATST DOOR HET LICHAAM.

5.2 SCHIJNBAAR GEWICHT

Het schijnbaar gewicht is gelijk aan het gewicht van het voorwerp, verminderd met de opwaartse kracht van Archimedes.

5.3 SOORTELIJK GEWICHT

Het soortelijk gewicht is het gewicht van een voorwerp per volume van 1 dm³.

5.4 DRIJVERMOGEN

Het drijfvermogen is gelijk aan het verschil tussen de opwaartse kracht van Archimedes en het gewicht van het voorwerp. Men kan dus stellen dat, indien het gewicht van de verplaatste vloeistof (= opwaartse kracht) groter is dan het gewicht van het voorwerp, deze laatste zal drijven en omgekeerd zal het voorwerp zinken indien het meer weegt dan de verplaatste vloeistof.

Voorbeelden

Een metalen kubus met een volume van 2 dm³ en een massa van 10 kg (100 N) wordt ondergedompeld in zoet water (het soortelijk gewicht van het metaal is dus gelijk aan 50 N/dm³). De kubus neemt de plaats in van 2 dm³ water, wat een gewicht van 20 N vertegenwoordigt. Het schijnbaar gewicht van de kubus is dus 100 N - 20 N = 80 N. De opwaartse kracht is hier dus kleiner dan het gewicht van het voorwerp, dus de kubus zal zinken.

Welke inhoud moet mijn hefparachute minimaal hebben om, in zoet water, een blok van 100 N, met een volume van 5 dm³ op te lichten van de bodem?

Gewicht blok = 10 kg

Volume blok = 5 dm³

Verplaatste volume zoet water = 5 dm³

Gewicht verplaatste water (of opwaartse kracht) = 50 N/dm³ x 1 dm³ = 50 N

Schijnbaar gewicht: 100 N - 50 N = 50 N

Noodzakelijk te verplaatsen gewicht water om 50 N te compenseren is min. 50 N

1 dm³ = 10 N = 1 l zoet water, dus met een ballon van 5 l verplaatst men 5 l zoet water en kan men 50 N compenseren. Om nu het blok te heffen volstaat het om méér dan 5 dm³ water te verplaatsen.

In zout water:

Gewicht blok = 100 N

Volume blok = 5 dm³

Verplaatste volume zout water = 5 dm³

Gewicht verplaatste water (of opwaartse kracht) = 5 dm³ x 10,30 N/dm³ = 51,5 N

Schijnbaar gewicht: 100 N - 51,5 N = 48,5 N

Noodzakelijk te verplaatsen gewicht water om 48,5 N te compenseren is min. 48,5 N maar: 1 dm³ of 1 l zee water weegt 10,30 N; dus om 10,30 N te compenseren in zout water heb ik een ballon van 1 dm³ of 1 l nodig om 10 N te compenseren in zout water heb ik een ballon van 1 / 1,030 dm³ of 1 nodig om 48,5 N te compenseren in zout water heb ik een ballon van 1 x 48,5 / 1,030 dm³ = 4,70 dm³ of 1 nodig.

5.5 OEFENINGEN

a/ Welk luchtvolume is er nodig om, vanop de zeebodem op 40 m, een bronzen anker van 704 kg te bergen (SG van koper = 8,8). De parachute heeft een neutraal drijfvermogen.

Oplossing

Een liter of 1 dm³ zee water weegt 1,030 kg.

Het ankergewicht bedraagt 7040 N.

Het soortelijk gewicht is gelijk aan 88 N/dm³.

Daaruit volgt:

Ankervolume : 7040 / 88 dm³ = 80 dm³.

Opwaartse kracht (gewicht van het verplaatste water): 80 x 10,30 N = 824,0 N.

Schijnbaar gewicht van het anker: 7040 N - 824 N = 6216 N

Benodigd luchtvolume aan de opp: 621,6 : 1,030 l = 603,5 l (603,5 l of dm³ zee water weegt 6216 N).

Benodigd luchtvolume op 40 m: 603,5 l x 5 = **3017,5 l**.

b/ Een vlot van 6 m op 3 m heeft een vrijboord van 30 cm en bevindt zich in zoet water. Hoeveel dieper zal het vlot zakken wanneer men op dit vlot een compressor wil plaatsen van 1500 kg?

Oplossing

Gewicht van het te verplaatsen water: 15000 N (of dm^3)

Daaruit volgt: $60 \text{ dm} \times 30 \text{ dm} \times X \text{ dm} = 1500 \text{ dm}^3$ (X = diepte van het vlot)

$$\begin{aligned} \Rightarrow X &= \frac{1500}{60 \times 30} \text{ dm} = \frac{1500}{1800} \text{ dm} = 0,83 \text{ dm} \\ \Rightarrow & \end{aligned}$$

Het vlot zal 8,3 cm zakken in zoet water.

In zout water wordt het te verplaatsen volume:

$$\begin{aligned} \Rightarrow 1500 : 1,030 \text{ dm}^3 &= 1456 \text{ dm}^3 \\ \Rightarrow \frac{1456}{1800} \text{ dm} &= 0,8 \text{ dm} \text{ (het vlot zakt 8 cm)} \end{aligned}$$

c/ Welk verschil in drijfkracht ondervindt een duiker op het moment dat hij zijn reserve moet trekken, indien hij met een gevulde bi vertrokken is ($2 \times 10 \text{ l} - 200 \text{ bar}$)?

Oplossing

Gewicht van de lucht bij het vertrek:

$$4000 \text{ l} \times 0,013 \text{ (gewicht 1 l lucht)} = 52 \text{ N}$$

Gewicht van de lucht bij het overgaan op reserve:

$$600 \text{ l (60 bar op één fles 10 l)} \times 0,013 = 7,8 \text{ N}$$

$$\text{Verskil in drijfkracht} = \underline{\underline{44,2 \text{ N}}}$$

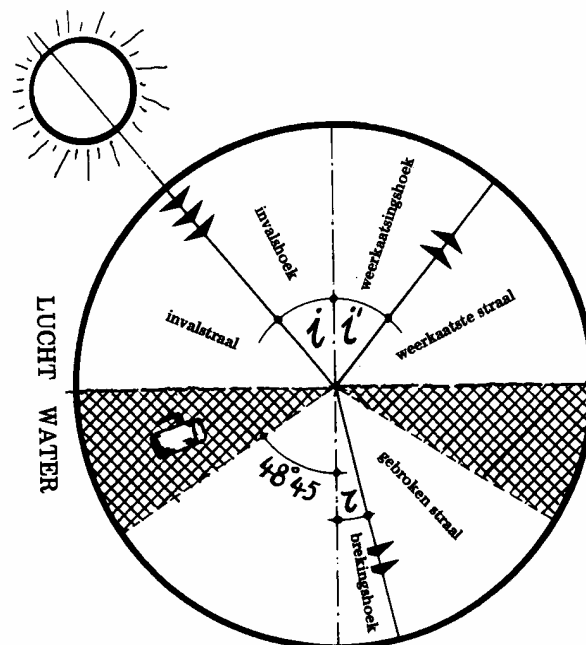
6 HET LICHT

6.1 REFLECTIE EN REFRACTIE

Een lichtstraal gaande van één milieu naar een ander transparant milieu wordt deels teruggekaatst in het eerste milieu en dringt deels door in het tweede milieu. Experimenteel werd vastgesteld dat de invalshoek gelijk is aan de terugkaatsinghoek terwijl de hoek waarmee de lichtstraal doordringt in het tweede milieu, de zogenaamde refractiehoek, afhankelijk is van de eigenschappen van de twee milieus en de invalshoek. Zo zal de refractiehoek kleiner dan de invalshoek zijn, indien het licht gaat van een milieu waar zijn snelheid groter is naar een milieu waar de snelheid trager is (bv. van lucht naar water) en omgekeerd zal in het geval een lichtstraal gaat van een medium waar de lichtsnelheid kleiner is naar een medium met een hogere snelheid de refractiehoek groter zijn dan de invalshoek (bv. water naar lucht). Deze hoeken worden weergegeven door de Wet van Snellius:

DE VERHOUDING TUSSEN DE INVALSHOEK EN DE BREKINGSHOEK IS:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$



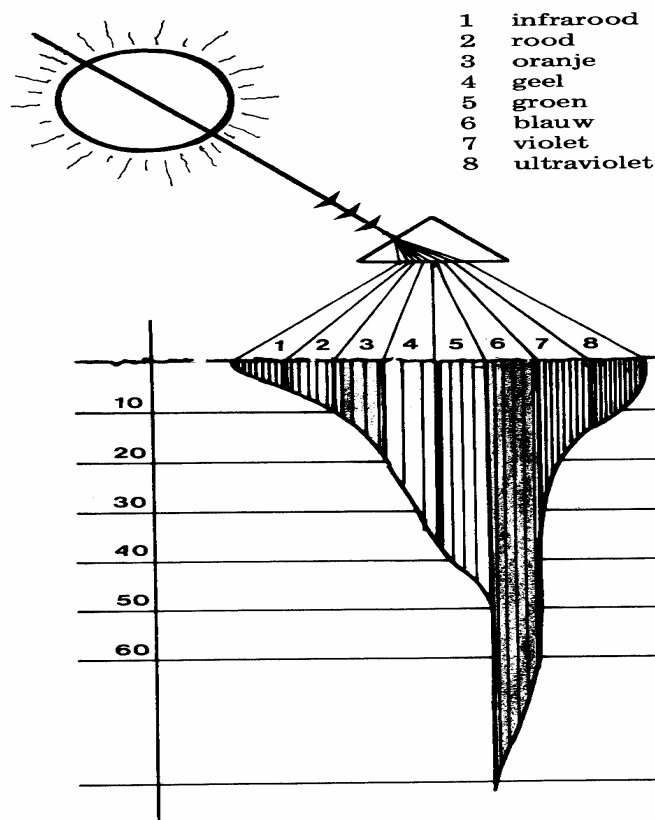
De lichtstralen die door een wateroppervlak schijnen, zullen beter indringen naarmate ze zich dichter bij de loodlijn bevinden. De stralen die de waterspiegel doordrongen zijn, wijken af met de refractiehoek. Men kan dus stellen dat voor een waarnemer vanaf de oppervlakte het ondergedompelde

voorwerp dichter bij de loodlijn schijnt te komen terwijl de zon, door een duiker waargenomen door het wateroppervlak, zich verder van het zenith schijnt te bevinden.

6.2 LICHTABSORPTIE

Het doordringen van licht onder water wordt snel verminderd door de absorptie. De lichtsterkte vermindert reeds bij de eerste meters en zal nog afnemen naarmate het water plankton, zwevende deeltjes of opgeloste stoffen bevat. De duisternis is dus veranderlijk in functie van de troebelheid.

Water gedraagt zich eveneens als een optische filter tegenover kleuren, die dan ook volgens hun golflengte zullen verdwijnen tijdens de afdaling. Gedurende de eerste 20 m verdwijnen de rode en oranje tinten, vervolgens de violet en gele tot 40 m en een beetje dieper de groene, tot we overblijven met blauw, dat onverdeeld heerst over de grote diepten. Indien er een lichtbron gebruikt wordt onder water komen de kleuren terug, maar licht verhoogt niet altijd de zichtbaarheid.



6.3 ZICHT ONDER WATER

Wanneer het menselijk oog in contact komt met water wordt het verziend en het beeld wazig. De diopterkromming is aangepast om het beeld op het netvlies te projecteren in een luchtmilieu. Door het verschil in straalbrekingsindex tussen lucht en water vormt, onder water, het beeld zich achter het netvlies en is dus wazig op de hoogte van deze laatste. Een duikmasker corrigeert deze verziendheid, maar met een paar andere nadelen als gevolg:

- voorwerpen schijnen groter te zijn onder water;

- de afstand tussen waarnemer en voorwerp vermindert met $\frac{1}{4}$;
- de gezichtshoek vermindert tot 97° door de refractie terwijl in normale omstandigheden het menselijk oog tot 130° verticaal kan waarnemen en tot 200° horizontaal;
- het lateraal zicht wordt vervormd.

7 HET GELUID

7.1 ALGEMEEN

Geluid bestaat, net als licht, uit golven. Het zijn echter drukgolven in plaats van stralingsgolven en ze worden opgewekt door vibraties van een voorwerp.

7.2 SNELHEID VAN HET GELUID

De snelheid van het geluid is afhankelijk van de samendrukbaarheid en de inertie van het medium waardoor het zich beweegt en van de temperatuur.

Onder water bedraagt de snelheid, afhankelijk van diepte, temperatuur, zoutgehalte, enz. rond de 1500 m/s. In de lucht echter, bedraagt de snelheid slechts 330 m/s. Dit heeft als belangrijkste gevolg voor een duiker dat het lokaliseren van een geluidsbron onder water veel moeilijker is, aangezien onze hersenen daarvoor het tijdsverschil van waarnemen tussen het ene en het andere oor beschouwen. Door het feit dat de snelheid onderwater bijna vijf maal hoger ligt dan in lucht, schijnt voor een duiker het geluid van alle kanten te komen. Daarbij komt nog dat we het geluid ook via het volledig lichaam ontvangen.

7.3 SCHOKGOLVEN

Onderwater zijn mechanische schokgolven veel sterker dan elektromagnetische golven zoals licht, radar enz. Onderwaterexplosies vormen dan ook een groot gevaar voor duikers. 1 kg explosief kan een gevaar vormen tot 300 m.

De ultrasone golven zoals krachtige sonaruitzendingen kunnen tot 100 m ernstige fysiologische stoornissen veroorzaken bij duikers.

8 DE WARMTE

8.1 WARMTE OVERDRACHT

Warmte energie kan op vier manieren overgebracht worden van de ene plaats naar de andere:

- a. door radiatie: bijvoorbeeld de hitte van een straalkachel;
- b. door convectie: om convectie beter te begrijpen beschouwen we het opwarmen van onze handen boven een open vuur. In deze situatie wordt de lucht boven de vlammen opgewarmd en zet uit. Vermits de dichtheid vermindert, stijgt de opgewarmde lucht. De warme luchtmassa verwarmt de handen in het voorbijgaan;
- c. door conductie: Door direct contact. Deze manier van warmte overdracht is wellicht de belangrijkste voor de duiker. De hoeveelheid warmte, verloren door conductie is afhankelijk van de materie die opgewarmd wordt. Deze warmte overdracht heeft slechts plaats, wanneer er een temperatuursverschil heerst en is afhankelijk van de geleidbaarheid van de stof die een constante is. Het feit dat verschillende stoffen een verschillende geleidbaarheid voor warmte hebben, wordt goed geïllustreerd door volgend voorbeeld. Wanneer men een metalen schotel met een diepgevroren kartonnen doos voedsel erop, uit de diepvries haalt, voelt de schotel kouder aan dan de doos. Beiden hebben echter dezelfde temperatuur. Dit fenomeen wordt verklaard door het feit dat metaal een hogere thermische geleidbaarheid heeft dan karton. De schotel zal dus veel vlugger warmte wegtrekken uit je hand. Dit is ook de reden waarom tapijt warmer aanvoelt dan een tegelvloer. Sommige stoffen zijn goede warmtegeleiders zoals water, helium (7 x meer dan lucht) en ijzer. Andere, zoals lucht, zijn slechte warmtegeleiders. Een slechte geleider, geplaatst tussen de warmtebron en de omgeving, zal de warmteoverdracht door conductie vertragen (bv. neopreen);
- d. door verdamping: verdamping van water vergt veel energie en dus warmte (vb. lucht in longen).

8.2 Toepassing : GEVOLGEN VOOR DE DUIKER

De mens is een warmbloedig wezen, dit wil zeggen dat de kerntemperatuur van het lichaam, ondanks temperatuurschommelingen, constant op 37°C wordt gehouden. De huid en de ledematen echter, gedragen zich veranderlijk naargelang de omgevingstemperatuur, inspanning enz. Het constant houden van de kerntemperatuur houdt in dat er een evenwicht is tussen de warmteopname, en -afgifte en de warmteproductie. De thermostaat bij de mens noemt men de hypothalamus en zijn werking noemt men de thermoregulatie.

Het onderdompelen van de duiker brengt een groot calorieverlies met zich mee. Het warmte-evenwicht bij de mens komt overeen met een kerntemperatuur van 37 °C en een huidtemperatuur van 33 tot 34 °C. Dit wordt bereikt bij een luchttemperatuur van 25 °C. Voor een naakte persoon in rustig water ondergedompeld echter, moet het water 33 à 34 °C warm zijn alvorens men een evenwicht bereikt.

De temperaturen van grote watermassa's zijn in functie van de straling van de zon en gedeeltelijk van de constante bewegingen, zoals getijden en stroming. Deze temperatuur, die in sommige zeeën tot 40

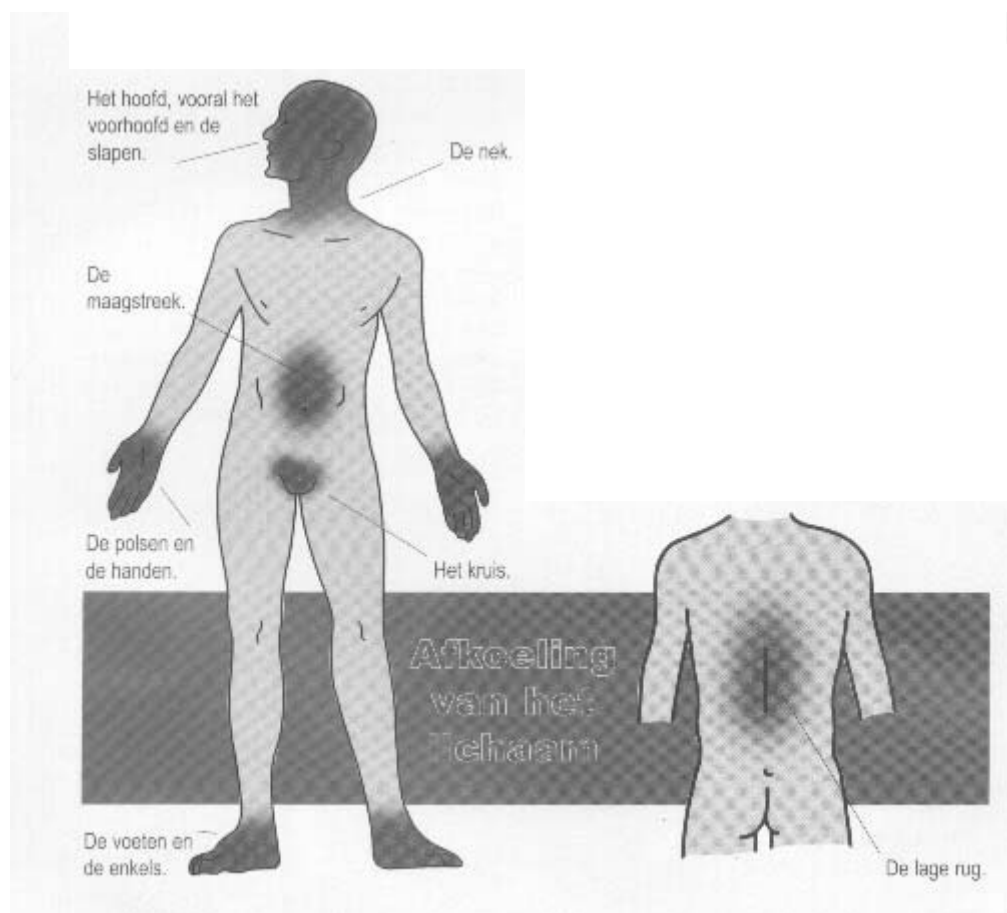
°C aan de oppervlakte kan bereiken, vermindert met de diepte tot het moment dat de temperatuur constant blijft.

Deze diepte verschilt per zee en bedraagt bijvoorbeeld 90 m in de Middellandse Zee waar de temperatuur een constante 14 °C bedraagt, niettegenstaande de oppervlaktetemperatuur in de zomer tot 30 °C kan oplopen.

In werkelijkheid is het echter niet mogelijk om een gelijkmatige temperatuurscurve te bereiken. Seizoenen, meteorologische fenomenen, stromingen en het temperatuursverschil in waterlagen zorgen ervoor dat de duiker tijdens een afdaling aan grote temperatuursverschillen wordt onderworpen. Niettegenstaande ons warmbloedig organisme relatief weinig last ondervindt van deze temperatuurschommelingen moet men toch rekening houden met bepaalde factoren teneinde het warmtebehoud van een duiker op een aanvaardbaar peil te houden:

- de samendrukbaarheid van de natte pakken en onderkledij (zo verliest een nat pak al 60% van zijn isolerende werking op –10 m);
- de verhoogde gasdichtheid en het verlies van warmte door de ademhaling (vooral met helium).

Aangezien het duidelijk is dat er weinig plaatsen zijn waar we een warmte-evenwicht zullen bereiken, zal de duiker dus bijna altijd verplicht zijn om zich te isoleren door middel van aangepaste kledij.



9 VOORBEELD VAN EEN SYNTHESE OEFENING

De situatie

Een duiker moet een anker op de bodem van een 30 meter diep *zoetwatermeer* naar boven brengen. Het anker heeft een volume van 100 dm^3 en een soortelijke massa van $9,5 \text{ kg/dm}^3$. De temperatuur beneden bedraagt 4°C .

Voor het lichten van het anker kan hij slechts hefparachutes gebruiken. Deze parachutes zijn uitgerust met een overdruksventiel.

Op het ponton (*op zeeniveau*) liggen een fles lucht van 50 liter met een druk van 200 bar en een fles Nitrox 32 van 50 liter en 150 bar. De fles lucht dient om de luchtzakken op te blazen en de Nitrox als duikmengsel voor het duiken met een luchtslang. Bij het begin van de duik is het prachtig weer en de thermometer heeft 30°C aan.

Gevraagd

1. Wat is de partiële zuurstofdruk op de maximum diepte (30 m)? Hoe lang kan hij met zijn NITROX voorraad op die diepte duiken (verbruik is 30 liter per minuut aan het oppervlak, dus bij 1 bar)
2. Aangezien we verwachten dat we zware arbeid zullen verrichten, willen we de 1,4 bar partiële zuurstofdruk niet overschrijden. Wat is de maximale toegelaten diepte opdat de partiële zuurstofdruk niet boven de 1,4 bar zou stijgen?
3. Hoeveel liter lucht op 30 meter is er in de hefparachute nodig om het anker te lichten?
4. Indien de duiker op 30 meter 1000 liter lucht in de parachute moet blazen, hoeveel druk is er dan uit de luchtfles op het ponton?

Nuttige formules

$$T \text{ (in K)} = T \text{ (in } ^\circ\text{C)} + 273,15 \text{ K}$$

Partiële Druk van een Gas =

Fractie van het Gas \times Absolute Druk van het Gasmengsel

$$(p \times V)/T = \text{constante}$$

Bijkomende raadgevingen

Het gebruik van een rekenmachine wordt sterk aangeraden.

Geef ook de redenering en de berekeningen.

De woorden in *italic* hebben een invloed op de gegevens.

Bijlage A : EENHEDEN

A.1 : ANGELSAKSISCHE EENHEDEN

Een aantal Angelsaksische eenheden blijven door de E.E.G.-lidstaten tijdelijk erkend. Het gaat om de volgende eenheden (en hun samenstellingen), gerangschikt volgens de overeenkomstige grootte.

lengte:	inch	1 in	= 0.0254 meter.
	foot	1 ft	= 0.3048 meter
	fathom (scheepsvaart)	1 fm	= 1.729 meter.
	Mile (landmijl)	1 mile	= 1609 meter.
	yard	1 yd	= 0.9144 meter.
oppervlakte:	square foot	1 sq ft	= 0.0929 m ²
	acre	1 ac	= 4047 m ²
	square yard	1 sq yd	= 0.8361 m ²

A.2 : ENKELE VEEL GEBRUIKTE VEELVOUDEN

Voorvoegsel	Symbool	Betekenis (maal de eenheid)
mega	M	1.000.000
kilo	k	1000 (10 ³)
hecto	h	100 (10 ²)
deca	da	10 (10)
EENHEID	EENHEID	1
deci	d	0,1
centi	c	0,01
milli	m	0,001
micro	μ	0,000001

Bijlage B : ALGEBRA
(basisregels & internationale wiskundige tekens).

De volgende regels van het vermenigvuldigen, delen, optellen en aftrekken van breuken zijn van toepassing (a, b en c stellen getallen voor).

vermenigvuldigen $a/b \times c/d = ac/bd$ vb. $2/3 \times 4/3 = \frac{2 \times 4}{3 \times 3} = 8/9$

delen $a/b : c/d = ad/bc$ vb. $2/3 : 4/5 = \frac{2 \times 5}{3 \times 4} = \frac{10}{12}$

optellen $a/b + c/d = \frac{ad + bc}{bd}$ vb. $2/3 - 4/5 = \frac{2 \times 5 - 4 \times 3}{3 \times 5}$

machten :

a) $x^n \times x^m = x^{n+m}$

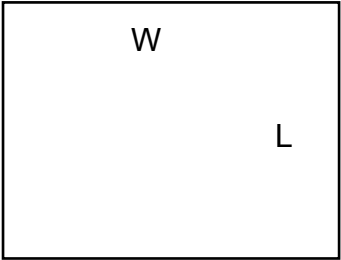
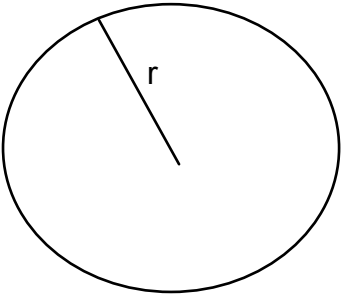
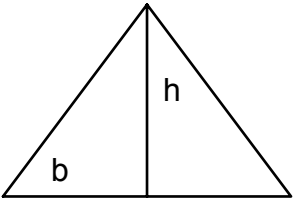
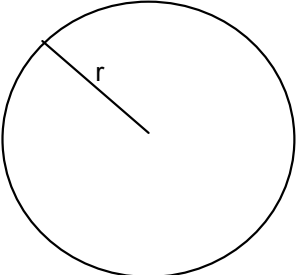
e) $x^0 = 1$

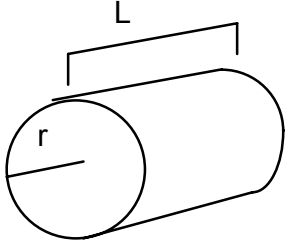
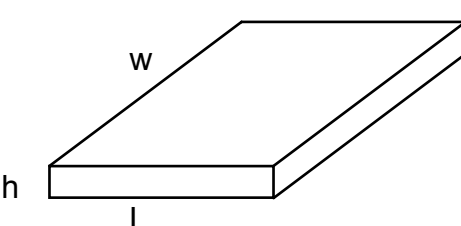
b) $\frac{x^n}{x^m} = x^{n-m}$

f) $x^1 = x$

c) $x^{1/n} = n^{\text{de}} \text{ wortel van } x$

d) $(x^n)^m = x^{n \cdot m}$

VORM	OPPERVLAKTE OF VOLUME
<p>a)</p>  <p>RECHTHOEK</p>	<p>oppervlakte = $W \times L$</p>
<p>b)</p>  <p>CIRKEL</p>	<p>omtrek = $2 \pi \cdot r$ oppervlakte = πr^2</p>
<p>c)</p>  <p>DRIEHOEK</p>	<p>oppervlakte = $1/2 b \times h$</p>
<p>d)</p>  <p>BOL</p>	<p>oppervlakte = $4\pi \cdot r^2$ volume = $\frac{4\pi \cdot r^3}{3}$</p>

e)		$\text{volume} = \pi \cdot r^2 \cdot L$
CYLINDER		
f)		$\text{oppervlakte} = 2 (Lh + Lw + hw)$ $\text{volume} = L \cdot w \cdot h$
BALK		

$>$	betekent	" is groter dan"
$<$	betekent	" is kleiner dan"
\approx	betekent	" is ongeveer gelijk aan"
\neq	betekent	" is niet gelijk aan"
\Leftrightarrow	betekent	" komt overeen met"
\rightarrow	betekent	" leidt tot"
\uparrow	betekent	" wordt vermeerderd tot"
\downarrow	betekent	" wordt verminderd tot"
\Rightarrow	betekent	" daaruit volgt....."

$A + B = C$	$A = ?$ $B = ?$	\rightarrow \rightarrow	$A = C - B$ $B = C - A$
$A - B = C$	$A = ?$ $B = ?$	\rightarrow \rightarrow	$A = C + B$ $B = A - C$
$A \times B = C$	$A = ?$ $B = ?$	\rightarrow \rightarrow	$A = C / B$ $B = C / A$
$A / C = B$	$A = ?$ $B = ?$	\rightarrow \rightarrow	$A = B \times C$ $B = A / C$
$A \times B = C \times D$	$A = ?$ $B = ?$	\rightarrow \rightarrow	$A = \frac{C \times D}{B}$ $B = \frac{C \times D}{A}$
$\frac{A}{B} = \frac{C}{D}$	$A = ?$ $B = ?$	\rightarrow \rightarrow	$A = \frac{C \times B}{D}$ $B = \frac{A \times D}{C}$