

Dykkefysikk

2.1 INNLEDNING

Sikkerheten er den viktigste enkeltfaktor ved alle dykkeoperasjoner. En viktig faktor for sikkerheten er å forstå de fysiske lover som gjelder ved dykking (Figur 2.1) Fysikk er det

fagområdet der man jobber med stoff og energi – og sammenhenger mellom disse. Dette kapitlet forklarer fysiske lover og prinsipper som gjelder i dykkerens omgivelser, og hvordan disse påvirker dykkeren. Viktige prinsipper i dykkefysikk danner grunnlaget for å forstå ulike prosedyrer og virkemåter for dykkerutstyr, samt viktige medisinske problemstillinger.



Figur 2.1 Mye kan gå galt om man ikke er obs på fysikkens lover.



2.2 DEFINISJONER OG MÅLEENHETER

Det finnes to ulike enheter for å beskrive kraft, lengde og tid; det engelske systemet og det internasjonale systemet (SI) – bedre kjent som det metriske system. Det engelske systemet er basert på pund, fot og sekunder og brukes blant annet i USA. Det internasjonale systemet brukes stort sett i hele verden, og er basert på kg, meter og sekunder.

2.2.1 Masse

Dette er den viktigste egenskapen for et stoff, og er et mål på mengden stoff som et fast stoff, en væske eller gass inneholder. Benevnelsen på enheten for masse er ett kilogram (Kg).

2.2.2 Kraft

Dette er definert som masse ganger aksellerasjon, og ble først beskrevet matematisk av Isac Newton. Derfor er benevnelsen på kraft målt i *newton*, og definert som en kraft som aksellererer en masse på ett kg med en meter per sekund i sekundet.

2.2.3 Vekt

Vekt er målet på tyngdekraften til et legeme, og er definert som massen til legemet ganger aksellerasjonen til tyngdekraften (10 m/sek/sek). Vekt er en kraft som måles i newton, men da tyngdekraften på overflaten regnes som konstant, kan vi i stedet bruke enheten kg (som egentlig er måleenheten for masse). Derfor forenkler vi bruken av ”vekt” i denne manualen.

Kilogram er standard masse i det internasjonale system, mens pund er standard i det engelske system. En liter vann ved 4 °C veier 1 kg eller nesten 2,2 pund.

1 liter (l) = 1 kg = 2,2 pund (lbs)

Eksempel:

Gjør om 180 pund til kg.

Svar: 180 lbs \times 1 kg/2,2 lbs = 81,8 kg


Eksempel:

Gjør om 82 kg til pund.

Svar: 82 kg \times 2,2 lbs/1 kg = 180,4 lbs

2.2.4 Trykk

Definisjonen på trykk (P) er kraft (F) pr flateenhet (A). Matematisk kan det uttrykkes slik:


$$\text{Trykk} = \text{Kraft/Areal}$$


eller

$$P = F/A$$

SI-enheten på trykk er *pascal*, som er definert som én Newton pr kvadratmeter. Denne enheten er veldig liten, og i dykkesammenheng er enheten for trykk vanligvis oppgitt i bar (ca 10^5 pascal). Under vann vil to typer trykk påvirke dykkeren: Trykket forårsaket av vekten til vannet som omgir dykkeren og vekten av atmosfæren over vannet. En dykker må, uansett dybde, alltid være i trykkløst med kreftene som virker på en gitt dybde.

2.2.5 Tetthet

Tetthet defineres som masse per volumenhet til et stoff. Matematisk kan det uttrykkes slik:


$$\text{Tetthet} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volum}}$$

eller

$$D = \frac{m}{V}$$

Enheten for tetthet er gram per kubikkmeter (g/m^3).

Gasstetthet er relatert til det absolutte trykket. Når dybden øker vil tettheten på gassen som pustes inn øke og bli tyngre per volum. Høy gasstetthet øker anstrengelsen ved å puste og begrenser dermed dykkerens mulighet til å ventilere lungene, særlig ved anstrengende dykking og ved store dybder. Se Tabell 2.1.



Dybde	Trykk	Gassvolum	Gass-tetthet
Havnivå 0 m	1 bar	1 m ³	1x
10 m	2 bar	1/2 m ³	2x
20 m	3 bar	1/3 m ³	3x
30 m	4 bar	1/4 m ³	4x
40 m	5 bar	1/5 m ³	5x
50 m	6 bar	1/6 m ³	6x
90 m	10 bar	1/10 m ³	10x

Tabell 2.1 Forholdet mellom trykk, volum og tetthet av gasser

Ferskvann har en tetthet på ca 1000 g/l. Sjøvann har en tetthet på ca 1026 g/l. Dette fører til at ferskvann flyter oppå saltvann og at en dykker flyter bedre i saltvann enn i ferskvann.

2.2.6 Lengde

SI-enheten på lengde er meter (m) (39,37 tommer). Mindre enheter måles i centimeter (cm) eller millimeter (mm). Større lengder måles i kilometer (km). 1 meter = 3,28 fot.

Eksempel:

Gjør om 10 fot til meter

Svar:

$$\frac{10 \text{ fot} \times 1 \text{ m}}{3,28 \text{ fot}} = 3,05 \text{ m}$$

Eksempel:

Gjør om 10 meter til fot.

Svar:

$$\frac{10 \text{ m} \times 3,28 \text{ fot}}{1 \text{ m}} = 32,8 \text{ fot}$$

2.2.7 Areal

Arealet er definert som kvadrert lengde. Et rom på for eksempel 3 × 4 meter vil ha et areal på 12 m².

2.2.8 Volum

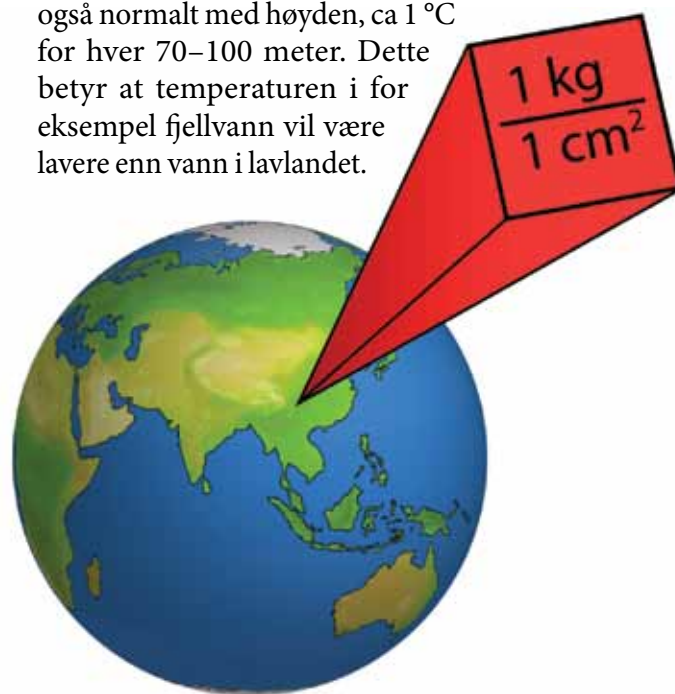
Volum er angitt i kubikk lengde. Ved å bruke data fra forrige eksempel, men å legge til en

tredje dimensjon, en høyde på to meter, vil vi få 24 m³. I SI-systemet kan kubikk også angis i liter. En liter tilsvarer 1000 cm³.

2.3 ULIKE FORMER FOR TRYKK

2.3.1 Atmosfærisk trykk

Gasslaget som omgir jordkloden kalles atmosfæren (gresk: athmos = damp + sphaira = kule). Atmosfæren har ingen øvre grense, men går gradvis over i det tomme rom. Gassen som atmosfæren består av kalles med et felles ord for luft. Luftrykket, som bestemmes av vekten av den overliggende atmosfæren, avtar med høyden, tilnærmet halvert for hver 5000 meter over havet. Luftrykket oppgis normalt i millibar (mB), der det gjennomsnittlige atmosfæretrykk ved havets overflate er 1013,2 mB. Atmosfærens trykk varierer også med hva slags vær vi har. Lavtrykk og høytrykk forårsaker normalt variasjoner i atmosfæretrykket på et par-tre prosent, men kan i enkelte tilfeller gi 5% avvik fra normaltrykket. Dette tilsvarer likevel ikke mer enn en vannsøyle på 0,5 meter. Temperaturen avtar også normalt med høyden, ca 1 °C for hver 70–100 meter. Dette betyr at temperaturen i for eksempel fjellvann vil være lavere enn vann i lavlandet.



Figur 2.2 Vekten av en luftsøyle på 1 cm² gjennom hele atmosfæren veier ca 1 kg



Alle gasser har en vekt, alt etter den molekylære sammensetning. Luft ved 1 bar og romtemperatur (15 °C) veier ca 1,3 gram/liter. At lufta har vekt kan observeres direkte ved for eksempel å fylle en ballong med en gass som er lettere enn luft, for eksempel helium, og måle oppdriften.

Tenker vi oss en luftsøyle med tverrsnitt 1 cm² fra havflaten og opp gjennom hele atmosfæren, blir vekten av denne luftsøylen 10,13N (ca 1 kg kraft) (Figur 2.2).

Trykket virker i alle retninger, og forplanter seg gjennom kroppens vev, slik at vi til daglig ikke merker noe til det.

Lufttrykket i atmosfæren måles med et barometer, og oppgis normalt i enheten millibar (mB), som er 1/1000 Bar. Andre enheter benyttes også (mm kvikksølv). Én bar (B) er temmelig nøyaktig lik én atmosfære (se Tabell 2.2). Merk forskjellen mellom ”teknisk atmosfære” (at) og ”atmosfære” (atm). Mens det første er definert ut fra vekten på en timeters vannsøyle, er det andre definert ut fra den gjennomsnittlige vekten på den overliggende atmosfæren. Absolutt trykk benevnes ata og overtrykk benevnes ato. I dykkesammenheng regner vi én atmosfæres trykk lik ti meter vannsøyle.

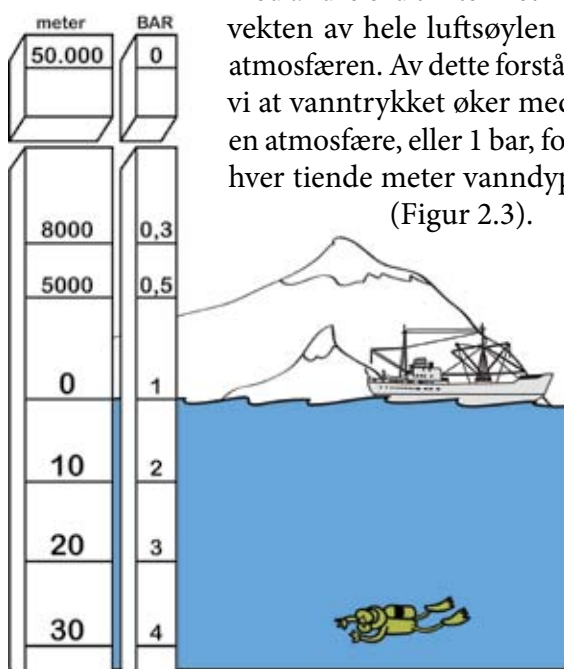
Benevnelse	Enhet	Definisjon
Pascal	Pa	1N/m ²
Bar	B	100000 N/m ² = 0,1 MPa = 100 Kpa = 1000 mB
Atmosfære	Atm/ ATM	760 mm Hg = 101,325 Kpa = 1013,25 mB
Teknisk atmosfære	At/ AT	10 m vannsøyle = 98,067 Kpa = 0,981 B

Tabell 2.2 Forskjellige måleenheter for trykk

2.3.2 Hydrostatisk trykk

Trykk som oppstår på grunn av vekten av vannet kalles hydrostatisk trykk eller vanntrykk. Vekten av vannet er kumulativ, det vil si jo dypere man går, jo mer vann vil være over dykkeren og desto større er vekten av vannet. Denne vekten påvirker dykkeren fra alle retninger samtidig og øker med 1 bar pr ti meter. Vekten av bare ti meter vannsøyle er

med andre ord tilnærmet lik vekten av hele luftsøylen i atmosfæren. Av dette forstår vi at vanntrykket øker med en atmosfære, eller 1 bar, for hver tiende meter vandndyp (Figur 2.3).



Figur 2.3 Trykk i forhold til dybde og høyde over havnivå

Trykk til dybde:

$$(\text{trykk i bar} - 1) \times 10 = \text{dybde i meter}$$


Eksempel:

Hvor dypt befinner du deg hvis totaltrykket er 7 bar?

Svar:

$$[7 - 1] \times 10 = 60 \text{ m}$$

Dybde til trykk:



$$\text{Trykk (bar)} = \left[\frac{\text{Dybde (m)}}{10} \right] + 1$$


Eksempel:

Hva er det totale trykket på 40 meter?

Svar:

$$\left[\frac{40}{10} \right] + 1 = 5 \text{ bar}$$

2.3.3 Absolutt trykk

Summen av atmosfæretrykket pluss det hydrostatiske trykket utgjør det vi kaller det "absolutte trykket" eller totaltrykket. Absolutt trykk kan uttrykkes på mange måter, for eksempel atmosfæretrykk absolutt (ata), meter sjøvann absolutt (msva) eller millimeter kvikksølv absolutt (mmHga).

2.3.4 Måletrykk

Differansen mellom atmosfæretrykket og det trykket som skal måles, kalles måletrykket. Ta for eksempel et flaskesett. Manometeret viser 0 bar før kranen åpnes og representerer det omgivende trykket. Sagt på en annen måte: Når manometeret viser 0 bar ved havnivå er det egentlige trykket 1 bar – atmosfæretrykket. For å finne det absolutte trykket på et flaskesett trenger man derfor bare å legge til 1 bar.

2.3.5 Deltrykk

I en gassblanding vil andelen av hver enkeltgass i forhold til totaltrykket utgjøre denne gassens deltrykk. Selv om det finnes spor av mange gasser i luft, forenkler vi dette her og sier at luft består av 20% oksygen og 80% nitrogen – noe som utgjør en total på 100% eller en atmosfære absolutt. Innvirkningen av deltrykk på en dykker er forklart senere i kapitlet.

2.4 VANN

Fysiske lover som påvirker en person på overflaten, vil også påvirke denne personen under vann. Når en dykker svømmer nedover, vil vanntrykket øke.

2.4.1 Ferskvann

Vann, H₂O, er hovedbestanddelen for alt levende liv. Det er uten lukt, smak, koker ved 100 °C og fryser ved 0 °C. I sin reneste form er vann en svak leder av elektrisitet.

2.4.2 Saltvann

Saltvann inneholder nesten alle kjente stoffer. Natrium klorid (NaCl) eller vanlig bordsalt er det vanligste kjemikaliet. På grunn av alle komponentene er saltvann en god leder av elektrisitet.

2.4.3 pH

pH-nivået i vann uttrykker nivået av syre eller base i løsningen. pH-nivået kan variere mellom 0 (svært surt) til 14 (svært basisk), der verdien 7 er nøytral. pH-nivået i blodet er med på å kontrollere åndedrettet vårt. For mye CO₂ i blodet får pH-nivået til å forandre seg ved å gjøre blodet mer surt. En måte for kroppen å redusere syrenivået i blodet på, er økt ventilasjon, som reduserer CO₂-nivået og dermed reduserer syrenivået. Viktigheten av pH i dykking er utdypet nærmere i kapitlet om dykkemedisin.

2.5 TEMPERATUR

Kroppstemperatur er et mål på varmen som opprettholdes i kroppen vår. Varme er assosiert med bevegelse av molekyler. Jo raskere molekylerne beveger seg, desto høyere blir temperaturen. Temperatur måles enten i Celsius (°C) eller Fahrenheit (°F), som er vanlig i USA (engelsk system).

Ved regneoppgaver med temperatur må vi konvertere temperatur til en enhet som ikke har negative verdier. Det gjøres ved å bruke enheten Kelvin (K). 0 Kelvin er det absolutte nullpunkt (den laveste temperaturen som er mulig å oppnå). 0 °C tilsvarer 273 K. Kokepunktet for vann ved havnivå er 100 °C, noe som tilsvarer 373 K.



For å gjøre om Celsius (°C) til Kelvin må vi bruke følgende formel:

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

For å gjøre om Fahrenheit til Celsius, bruk følgende formel:

$$^{\circ}\text{C} = 5/9 \times (^{\circ}\text{F} - 32)$$

For å gjøre om Celsius til Fahrenheit, bruk følgende formel:

$$^{\circ}\text{F} = (9/5) \times ^{\circ}\text{C} + 32$$

2.6 OPPDRIFT (ARKIMEDES LOV)

(Figur 2.4) Hvis vekten av et nedsenket objekt er mindre enn vekten av den fortrengte væskemengden, vil det flyte (positiv oppdrift). Hvis vekten er større, vil det synke (negativ oppdrift). Et objekt som veier det samme – eller som kan justeres til det samme – vil verken flyte eller synke. Det vil ha nøytral oppdrift.



Arkimedes lov

”Når et legeme senkes ned i en væske, vil vekten av legemet avta like mye som vekten av den fortrengte væskemengde”

Oppdriften er avhenging av tettheten til væsken. Saltvann (1,026 kg/liter) har som sagt større tetthet enn ferskvann (1,00 kg/liter). Derfor vil oppdriften bli større i saltvann enn i ferskvann.



$$m = \rho \times V$$

der:

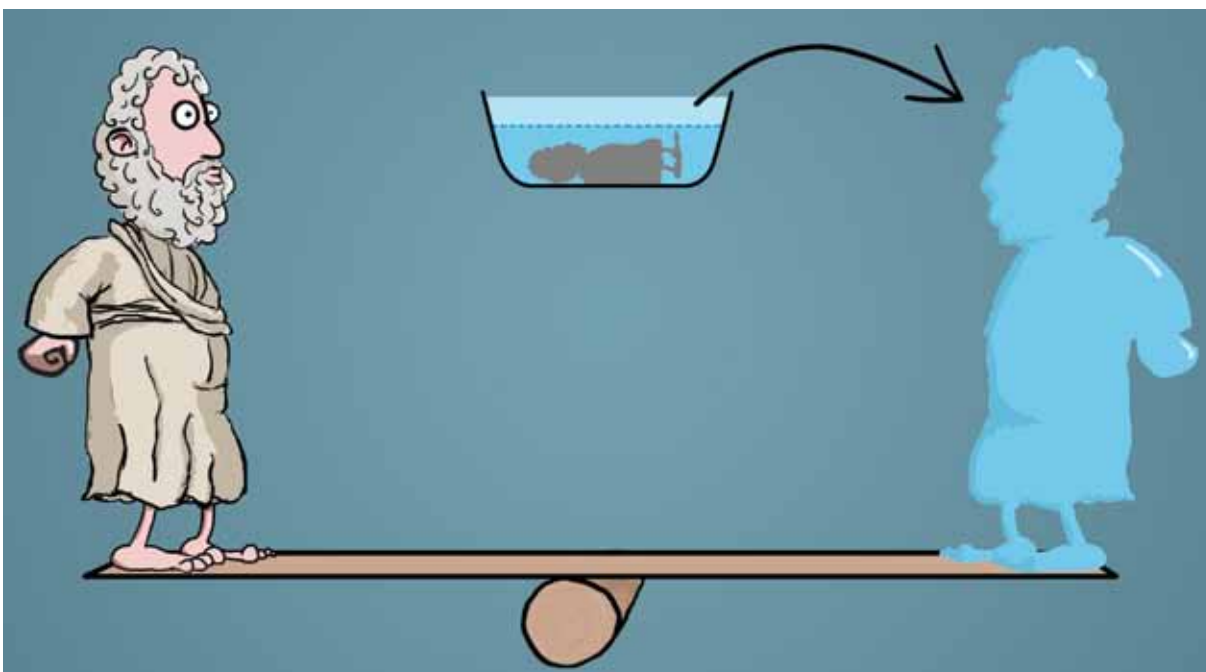
ρ = **masse**tetthet (kg/l)

V = **Volum** (l)

m = **vekt** (kg)

ρ_{sv} = 1,026 kg/liter (saltvann)

ρ_{fv} = 1,000 kg/liter (ferskvann)



Figur 2.4 Arkimedes lov



Eksempel:

Vi har en stein som på land veier 10 kg. Steinen har et volum på seks liter.

Hvor mye veier steinen nedsenket i

a) ferskvann og b) saltvann?

a) Vi regner at vann veier 1,00 kg/liter.

Steinens vekt - Vekten av fortrenget væske

= Steinens vekt i vann

$$10 \text{ kg} - (6 \text{ liter} \times 1 \text{ kg/liter}) = 4 \text{ kg}$$

b) Vi regner at vann veier 1,026 kg/liter.

Steinens vekt

- Vekten av fortrenget væske

= Steinens vekt i vann

$$10 \text{ kg} - (6 \text{ liter} \times 1,026 \text{ kg/liter}) = 3,84 \text{ kg}$$

Et legeme (for eksempel en dykker) kan endre sin oppdrift på to måter:

1. Endre vekten uten å endre volumet. Det er det som skjer når en dykker puster luft fra flasken. Flasken blir lettere, uten at volumet endres. Oppdriften øker.

2. Endre volumet uten å endre vekten. En dykker gjør dette under hele dykket bare ved å puste. Når han puster inn, økes oppdriften, når han puster ut, reduseres den. Dykkeren lærer fort å korrigere små endringer i oppdriften med å puste inn eller ut. En dykker ønsker normalt å ha litt negativ oppdrift. For en overflateforsynte dykker vil dette gjøre arbeidet lettere under vann. For en SCUBA-dykker gjør det at han uanstrengt kan svømme, forandre dybde og å holde seg på samme dybde.

En dykker kan variere sin oppdrift på flere måter. Ved å ta på mer vekt vil han lett synke. Med en tørrdrakt kan han øke eller minske mengden av luft i drakten, og dermed forandre sin oppdrift. Forandring av volum kan føre til en vesentlig endring av dykkerens oppdrift.

Eksempel:

En dykker veier 132 kg med alt dykkerutstyr. Dykkeren har et volum på 130 liter. Beregn dykkerens oppdrift i sjø.

$$\rho_{sv} = 1,026 \text{ kg/liter}$$

Dykkeren fortrenger

$$(130 \text{ l} \times 1,026 \text{ kg/l}) = 133,4 \text{ kg}$$

$$\text{Dykkerens vekt på land: } 132,0 \text{ kg}$$

$$\text{Dykkerens oppdrift} = + 1,4 \text{ kg}$$

2.7 GASSER

2.7.1 Luft

Luft er en sammensetning av ulike gasser og består i prinsippet av gasser fra samtlige kjemiske stoffer som finnes på Jorden, selv om det bare er noen få som er viktige for oss mennesker. Denne sammensetningen varierer fra sted til sted, og fra tid til tid. Således er lufta på Sydpolen litt forskjellig fra lufta over havene (tørr/høyt vandampinnhold), og lufta i en skog er litt forskjellig fra lufta på snau fjellet (mer/mindre oksygeninnhold). Noen av gassene skyldes menneskeskapt aktivitet, og kalles da gjerne forurensninger. I praksis kan en si at gassene i lufta er i *fysisk og kjemisk balanse* med de nære omgivelser. I snitt er luftas viktigste bestanddeler (for tørr luft) i volumprosent (Tabell 2.3):

Gasstype	Symbol	Volum%
Oksygen	O ₂	20,945
Nitrogen	N ₂	78,076
Karbondioksid	CO ₂	0,043
Hydrogen	H ₂	0,00005
Ozon	O ₃	0,000007
Nitrogenoksider	NO, NO ₂	0,00005
Helium	He	0,0005
Metan	CH ₄	0,0002
Neon	Ne	0,0018
Argon	Ar	0,9339
Krypton	Kr	0,0001
Xenon	Xe	0,000008
Sum (tørr luft)		100,00

Tabell 2.3 Luftas bestanddeler (gjennomsnitt, tørr luft).



Ettersom lufta normalt inneholder 0,5–1% vanddamp, vil volumprosentandelene for de andre gassene være noe lavere enn angitt i tabellen, uten at deres innbyrdes forhold endres. Gassene i pusteluften kan deles inn i to hovedgrupper:

- Gasser som aktivt deltar i kroppens forbrenningsprosess (aktive gasser).
- Gasser som ikke deltar i denne (inertgasser).

Vanligvis er det kun edelgasser som er inertgasser, grunnet sin stabile form, men nitrogen regnes også med, grunnet sin reaksjonstregthet.

Ved blandingsgassdykking vil det være forskjellige typer av inertgasser i bruk, for eksempel helium og nitrogen. Små mengder hydrogen kan også benyttes. I dykkesammenheng regner vi vanligvis bare på to av de gassene som luften inneholder:

Oksygen (O₂) 20,95% (avrundet til 20%)

Nitrogen (N₂) 78,08% (avrundet til 80%)

2.7.2 Oksygen (O₂)

Oksygenet er helt nødvendig for å opprettholde livsprosessen. Den underholder forbrenningen i kroppen og må være med i alle typer pustegass som benyttes til dykking. Ved én atmosfæres trykk (1 bar) i luft har vi ca 0,2 bar O₂-deltrykk. Oksygenets deltrykk i pusteluften må holdes innenfor bestemte grenser. Ved deltrykk under ca 0,1 bar vil vi miste bevisstheten, og ved deltrykk på over ca 1,6 bar kan vi få akutt O₂-forgiftning. Ved deltrykk på over ca 0,5 bar kan vi få kroniske lungeskader, dersom vi puster inn denne gassen over lengre tid (flere timer). Oksygen vil neppe gi årsak til trykkfallssyke, fordi gassen deltar aktivt i vevenes forbrenning.

2.7.3 Nitrogen (N₂)

Nitrogenet deltar normalt ikke i cellenes kjemiske livsprosess. Vi kan derfor unnvære nitrogenet og eventuelt erstatte denne med andre typer gasser. Ved en atmosfæres trykk i luft har vi ca 0,8 bar N₂-deltrykk.

Dersom nitrogenets deltrykk i pustegassen overstiger ca. 3,6 bar, vil nitrogenet virke tiltagende narkotisk på kroppen (nitrogen-narkose, dybderus). Ved luft som pustegass vil dette trykket oppnås ved en dybde på rundt 35 meter. Virkningen opphører så snart nitrogenets deltrykk reduseres under ca 3,6 bar. Imidlertid opptas nitrogen i kroppens vev med økende trykk. Når så trykket faller, vil vevene kvitte seg med nitrogenet igjen gjennom blodet over litt tid. Dersom trykket synker for fort, slik at vevene ikke rekker å kvitte seg med nitrogenet raskt nok, kan nitrogenet skilles ut som gassbobler, som gir årsak til trykkfallssyke. Nitrogenoverskudd i kroppens vev er primærårsaken til trykkfallssyke.

2.7.4 Karbondioksid (CO₂)

Karbondioksid finnes naturlig i små mengder i fri luft. Den er et avfallsprodukt ved forbrenningen i kroppen og er også den gassen som i hovedsak styrer åndedrettet vårt. For mye CO₂ i pustegassen kan utgjøre en stor fare ved dykking. Gassen kan forårsake øket pustetrang, hodepine, svette, kvelningsfølelser og panikk. Større mengder CO₂ i pustegassen kan medføre bevissthetstap uten forvarsel. CO₂ regnes som biologisk ”aktiv” siden den påvirker pH-nivået i blodet. For dykkere som bruker lukkede eller halvlukkede pusteapparater (rebreathere) er det svært viktig å få fjernet CO₂ fra pustegassen.

2.7.5 Karbonmonoksid (CO)

Målbare mengder av karbonmonoksid skal ikke forekomme i pusteluft, men kan komme inn i flaskene av følgende årsaker:

- Gjennom kompressorens luftinntak (eksos, røyk eller forurensning)
- Genereres i selve kompressoren ved at smøreoljen forbrennes. Dette kan skje dersom kompressoren er dårlig vedlikeholdt, eller det benyttes feil smøreolje.

Karbonmonoksid binder seg til blodet ca 300 ganger sterkere enn oksygen, og kan derfor fortrenge oksygenet fra blodet. Virkningen



blir omtrent den samme som ved for lavt oksygeninnhold i pustelufta, det vil si hodepine og øresus, sløvhetsstilstand, ev. plutselig besvimelse.

2.7.6 Helium (He)

Helium er en edelgass, og har vesentlig lavere atomvekt enn nitrogen, det vil si egenvekta er mindre. Den brukes som erstatning for nitrogen ved dykking til store dyp, ettersom den ikke gir dybderus på samme måte som nitrogen. Hensikten ved å bruke helium i pustegassen er derfor å redusere særlig nitrogenets deltrykk. Imidlertid er oppløseligheten av helium i kroppens vev høyere enn for nitrogen, slik at faren for trykkfallssyke øker. Således må spesielle tabeller benyttes ved dykking med helium i pustegassen. En annen ulempe med helium er at den gir en svært forvrengt stemme, og den kan gi nerveforstyrrelser på store dyp: Høytrykks-nervesyndromet – HTNS (High pressure nervous syndrome – HPNS).

Helium har ca fem ganger høyere varmeledningsevne enn luft. Dette fører ofte til at

heliumblandinger føles kaldere å puste, men man mister ikke mer varme. Helium varmes opp i øvre del av luftrøret hvor det kan føles, mens vanlig luft varmes i lungene som er mer ufølsomme for varmetap. Det totale varmetapet avhenger ikke hvor varmen er tatt fra. Luft har faktisk høyere varmekapasitet enn helium, noe som fører til at energikostnaden av å varme en gitt mengde luft er høyere. Hvilken som helst gass som pustes inn, varmes til kjernetemperatur før den pustes ut. Spørsmålet er derfor ikke ”hvor godt leder gassen varme?” men heller ”hva er kostnaden ved å varme den?”. Siden alle gasser med høy tetthet har en høy varmekapasitet, må den forvarmes ved dypdykking.

2.7.7 Vanndamp (H₂O)

Den største variasjon i vanlig luft skyldes innholdet av vanndamp, som kan variere fra nesten 0 til 4–5% avhengig av værtype og temperatur. Vanndampmengden i lufta oppgis vanligvis på en av to måter:

- Relativ fuktighet (RH = relative humidity), som er forholdet, i prosent, mellom



det faktiske vanddampinnhold og den mengden lufta maksimalt kan inneholde ved angjeldende temperatur (metningstrykket). Ved 100% relativ fuktighet (RH = 100) er lufta mettet med vanddamp.

- Duggpunktet (DP = Dew Point), som er den temperatur der lufta med et bestemt vanninnhold når metningspunktet. Dersom lufta ikke er mettet med vanddamp vil duggpunktet ligge under omgivelses-temperaturen.

Den faktiske mengden vanddamp mettet luft inneholder, øker med temperaturen. Således kan lufta være ganske "tørr" (inneholde lite vanddamp) en kald vinterdag, til tross for at RH = 100. Både duggpunkt og relativ fuktighet øker dersom lufta komprimeres, fordi vanddampens tetthet stiger.

Duggpunktet er uavhengig av temperaturen, mens relativ fuktighet synker med stigende temperatur. Varm luft kan holde på mer vann enn kald luft. Dette kan gi kondens dersom temperaturen faller. Ettersom vann er en naturlig bestanddel av kroppen vår, vil vanddamp verken gi symptomer på trykkfallssyke eller forgiftning.

Dykkermasken blir ofte duggete på grunn av fuktigheten i den utåndede luften, eller på grunn av fordampning (svetting) gjennom huden i ansiktet. Man kan forhindre eller begrense dugging i masken ved å smøre inn maskeglasset med spytt eller tannpasta. Utpust gjennom munnen istedenfor gjennom nesen vil også hjelpe.

2.8 GASSLOVER

Gasser påvirker hverandre gjennom tre forskjellige faktorer: trykk, volum og temperatur. Forandringer i en av disse faktorene vil føre til forandringer i de andre. Dette gjelder både for en enkelt gass og for gassblandinger. Forholdet mellom disse faktorene er beskrevet i gasslovene.

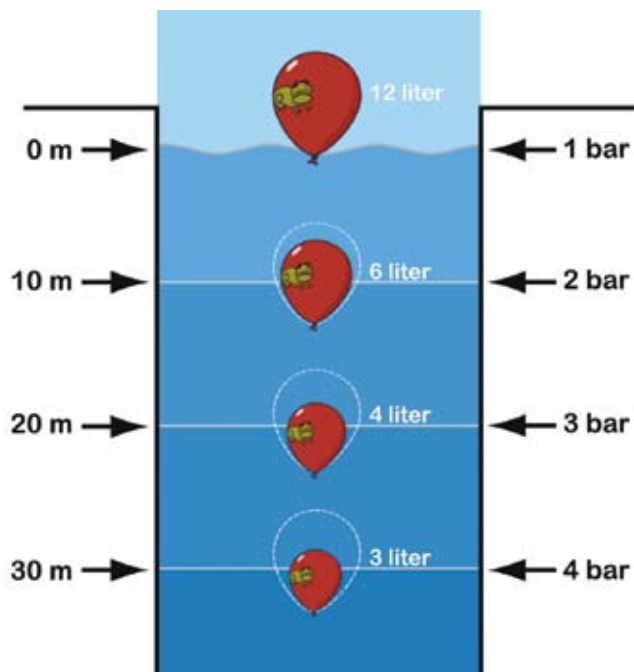
Når en dykker beveger seg opp og ned i vannet, vil trykkforandringer påvirke både utstyr og dykker. En dykker trenger derfor en grunnleggende forståelse av gasslovene.

2.8.1 Boyle-Mariottes lov – loven om trykk og volum

Ved dykking vil en rekke luftrom påvirkes hos dykkeren, for eksempel kroppens lunger og bihuler eller luftrom tilknyttet utstyret (maske, drakt). Disse påvirkes av vanntrykket, og under nedstigning må dykkeren utligne trykket i ører og bihuler. I tillegg må han blåse luft i maske og drakt for å få utlignet trykket. Under oppstigning vil luften utvide seg, og dykkeren må slippe ut overskytende luft.



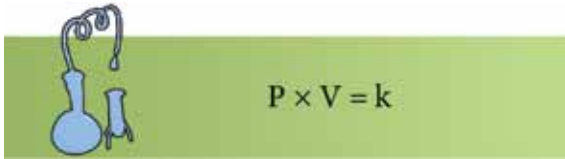
Det vil si: Hvis trykket øker, minker volumet, og omvendt (Figur 2.5).



Figur 2.5 Sammenhengen mellom trykk og volum illustrert med en nedsenket ballong i vann



Matematisk kan dette uttrykkes slik:



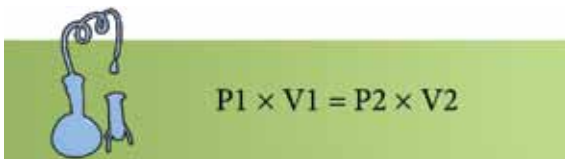
Der:

P = trykk (bar)

V = volum (liter)

k = konstant

Som arbeidsformel benytter vi heller:



Der:

P₁ = trykk før det har skjedd en forandring

V₁ = volum før det har skjedd en forandring

P₂ = trykk etter at det har skjedd en forandring

V₂ = volum etter at det har skjedd en forandring

Eksempel:

En løfteballong har et volum på tre liter. Den trekkes ned til 20 meter. Hvilket volum har ballongen da?

Svar:

P₁ = 1 bar (overflaten)

V₁ = 3 liter

P₂ = 3 bar (20 m)

V₂ = x

$$V_2 = \frac{P_1 \times V_1}{P_2} = \frac{1 \text{ bar} \times 3 \text{ liter}}{3 \text{ bar}} = 1 \text{ liter}$$

Vi ser at trykket tredobles og volumet reduseres til en tredjedel

Eksempel:

Lungevolumet hos menn er ca. fem liter. En dykker foretar en oppstigning fra 20 meter uten å puste ut. Hvilket lungevolum vil denne da ha på overflaten?

Svar:

P₁ = 3 bar

V₁ = 5 liter

P₂ = 1 bar

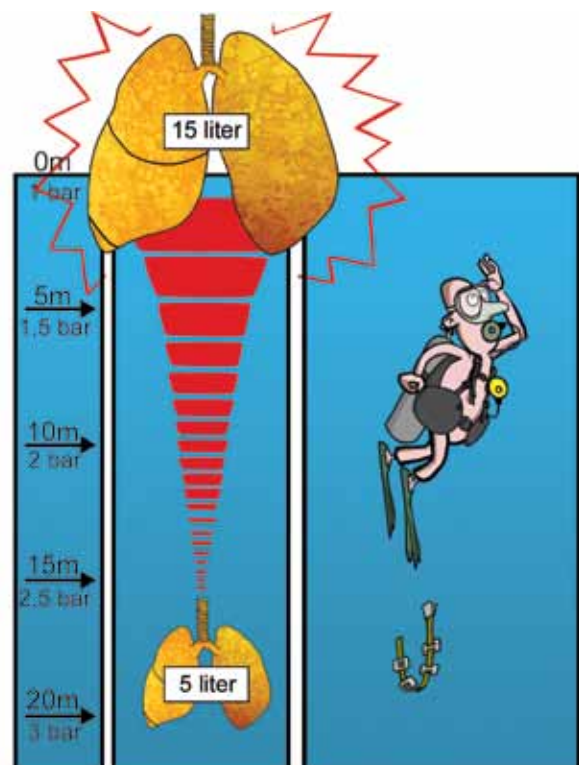
V₂ = x

$$V_2 = \frac{3 \text{ bar} \times 5 \text{ liter}}{1 \text{ bar}} = 15 \text{ liter}$$

Lungene kan ikke få et volum på 15 liter, så dette vil føre til lungebrist (Figur 2.6).

Eksempel:

Anta at lungene tåler en utvidelse på maks. 10% før de brister. Hva er da grunneste dyp man kan risikere lungebrist fra? Vi regner med et lungevolum på seks liter.



Figur 2.6 Forholdet mellom trykk og volum illustrert ved en dykker som ikke puster ut under oppstigning.



Svar:

$$P_1 = x$$

$$V_1 = 6 \text{ liter}$$

$$P_2 = 1 \text{ bar}$$

$$V_2 = 6 \text{ liter} + 10\% = 6,6 \text{ liter}$$

$$P_1 = \frac{P_2 \times V_2}{V_1} = \frac{1 \text{ bar} \times 6,6 \text{ liter}}{6 \text{ liter}} = 1,1 \text{ bar} = 1 \text{ m}$$

Relativ volumforandring

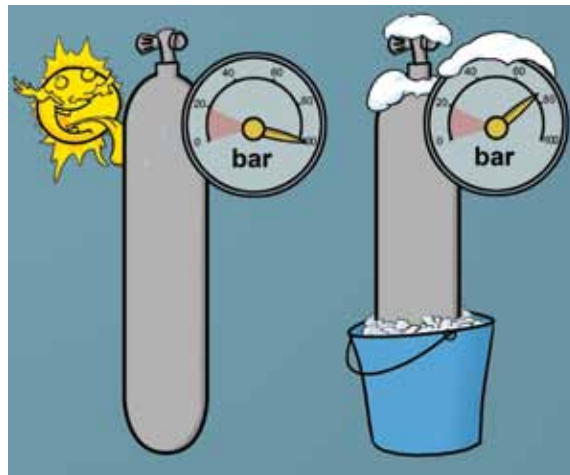
I følge Boyle-Mariottes lov vil volumet halveres fra overflaten (1 bar) og ned til ti meter (2 bar). For at dette volumet igjen skal halveres må dybden økes til 30 meter. I det første tilfellet halveres volumet i løpet av ti meter, i det andre halveres volumet i løpet av 20 meter. Det vil si at trykket øker jevnt med økende dybde, mens den relative volumforandringen vil avta gradvis med økende dybde. Hvis man for eksempel fyller en ballong med luft på 30 meter og slipper den til overflaten, vil volumet dobles første gang fra 30 til ti meter og dobles andre gang fra ti meter til overflaten. Bytter man ballongen ut med lungene våre forstår man at faren for lungebrist blir større på grunne dyp sammenliknet med større dyp. Man må dessuten utligne trykket i ører og bihuler oftere i begynnelsen av nedstigningen i forhold til når man kommer dypere.

2.8.2 Charles' / Gay-Lussacs lov

Temperaturen har effekt både på trykket og volumet i en gass (Figur 2.7). Det er viktig å vite effekten av temperaturen siden temperaturen på ulike dybder er forskjellig fra overflaten.



Charles'/Gay-Lussac lov
"For enhver gass med konstant trykk, vil volumet av gassen variere i samme forhold som absolutt temperatur. For enhver gass med konstant volum vil trykket variere i samme forhold som den absolutte temperatur"



Figur 2.7 Trykket avtar når temperaturen avtar

Forklaringen er som følger. I en lukket gassblanding vil antall molekyler være konstant. Molekylene fordeler seg rundt i gassen. Deres volum av gassblandingen minker til det halve, vil det fremdeles være det samme antall molekyler til stede. De må imidlertid nøye seg med halvparten av volumet. Massen vil også bli den samme, men tettheten vil bli dobbelt så stor. Den økede tettheten vil innebære at gassens kinematiske viskositet, det vil si luftas "seighet" vil øke, jo større trykket er. Som følge av dette blir en pustegass tyngre å puste i jo dypere vi dykker.

Som følge av at pustegassens tetthet øker med trykket, vil pustearbeidet og dermed faren for overanstrengelse og derav medfølgende CO₂-oppbygging øke med dybden. Vi må derfor stille strenge krav til gjennomstrømningskapasitet og pustemotstand på pusteutstyret (kran, førstetrinn og andretrinn, samt slanger og koblinger), samt være nøye med puste-teknikken.

Eksempel:

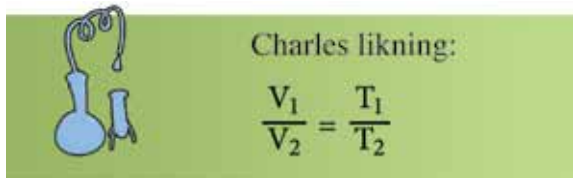
Charles lov – Volumforandring.

For å illustrere Charles lov kan vi ta for oss en ballong som er fylt med ti liter luft på overflaten (temperaturen 20 °C). Denne trekkes ned på ti meter der temperaturen er 5 °C. Hva er volumet på ti meter dyp?



Svar:

Fra Boyle-Mariottes lov vet vi at volumet blir halvert når trykket dobles. Det vil si at volumet på ti meter vil være fem liter. En ytterligere reduksjon i volumet på grunn av temperatur kan forklares slik:



$$V_1 = \text{Volum på 10 m} = 5 \text{ l}$$

$$T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C} + 273\text{K} = 293\text{K}$$

$$T_2 = 5 \text{ }^\circ\text{C} + 273\text{K} = 278\text{K}$$

$$V_2 = \text{Ukjent}$$

$$V_2 = \frac{V_1 T_2}{T_1}$$

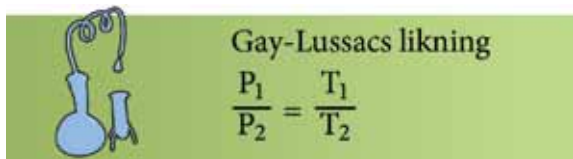
$$V_2 = \frac{51 \times 278\text{K}}{293\text{K}}$$

$$V_2 = 4,74 \text{ l}$$

Eksempel:

Gay-Lussacs lov – Trykkforandring

Et flaskssett inneholder 200 bar ved 10 °C. Det blir stående i solen på en varm sommerdag. Hva vil trykket være hvis temperaturen øker til 40 °C.



$$P_1 = 200 \text{ bar}$$

$$T_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C} + 273\text{K} = 283\text{K}$$

$$T_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C} + 273\text{K} = 313\text{K}$$

$$P_2 = \text{Ukjent}$$

$$P_2 = \frac{P_1 T_2}{T_1}$$

$$P_2 = \frac{200 \text{ bar} \times 313\text{K}}{283\text{K}}$$

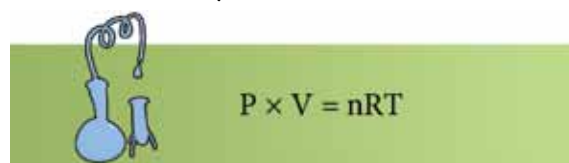
$$P_2 = 221 \text{ bar}$$

Vær oppmerksom på at et flasksett ikke er fleksibelt. Etter hvert som den kinetiske energien (bevegelsesenergi) øker med temperaturen vil molekylene bevege seg raskere. De vil treffe veggene i flasksettet oftere og oftere. Trykket vil altså øket med temperaturen. Ved høyt nok trykk kan flasksettet til slutt eksplodere. For å unngå dette (for eksempel ved en brann) er Sjøforsvarets flasksett (Inter-spiro) utstyrt med et sikkerhetsblikk som ødelegges ved et bestemt trykk (ca 450 bar) og slipper ut luften av flasksettet.

I en lukket gassmengde vil som sagt temperaturen innvirke på trykket, slik at trykket øker/faller etter som temperaturen øker/faller. Trykkendringen er lik for alle ideelle gasser (med en ideell gass menes en gass som følger tilstandsligningen nedenfor for alle trykk og temperaturendringer. De fleste gasser kan regnes som ideelle dersom endringene skjer over et lite område. Dersom gassen utsettes for større endringer i trykk/temperatur, vil den normalt vise større eller mindre grad av ulinearitet, det vil si tilstandsligningen kan ikke brukes direkte).

Tilstandsligningen

Trykk ganger volum delt på temperatur i én tilstand er lik trykk ganger volum delt på temperatur i en annen tilstand. Dette kan matematisk uttrykkes slik:



Der:

P = trykk

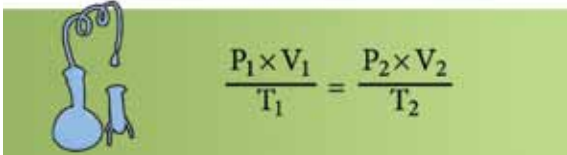
V = volum

n = antall molekyler

T = temperatur

R = den universelle gass konstant

Denne kalles også for den ideelle gassligningen og kan forenkles slik:



Der:

P_1 = trykk før det har skjedd forandring.

V_1 = volum før det har skjedd forandring.

T_1 = temperaturen før det har skjedd forandring.

P_2 = trykk etter at det har skjedd forandring

V_2 = volum etter at det har skjedd forandring.

T_2 = temperatur etter at det har skjedd forandring.

Eller:



Eksempel:

Vi har et flaskesett på 15 liter, fylt til 200 bar, ved 20 °C. Hva blir trykket dersom temperaturen i lufta på flaskesettet faller til 10 °C?

P_1 = 200 bar

V_1 = 15 liter

T_1 = (273 + 20 °C) = 293K

V_2 = 15 liter

T_2 = (273 + 10 °C) = 283K

P_2 = ?

$$\frac{200 \text{ bar} \times 15 \text{ l}}{293 \text{ K}} = \frac{P_2 \times 15 \text{ l}}{283 \text{ K}}$$

$$P_2 = \frac{200 \text{ bar} \times 15 \text{ l} \times 283 \text{ K}}{293 \text{ K} \times 15 \text{ l}} = \frac{200 \text{ bar} \times 283 \text{ K}}{293 \text{ K}}$$

Det vil si $P_2 = 193,17$ bar

Når vi fyller flaskene, blir de varme. Dette skyldes en virkning som kalles adiabatisk oppvarming. En del av den energi som skal til for å komprimere lufta går over til varme, og gjør at trykket stiger mer enn det Boyle-Mariottes lov skulle tilsi for komprimering av en gitt luftmengde. Denne varmemengden må ledes bort ved at flaskene kjøles. Trykket vil da synke i henhold til tilstandsligningen ovenfor. Denne virkningen er viktig å være oppmerksom på ved fylling av flasker. Kompressorens sikkerhetsventil slår ut på et bestemt trykk. Når temperaturen i flaskene faller på grunn av vanntemperaturen, vil trykket synke tilsvarende. På en kald vinterdag kan trykket synke så mye som 20% etter fylling. Normalt vil man ”toppe” flaskene (etterfylle dem) under slike forhold. Videre må man være oppmerksom på faren ved å oppbevare flaskesett med fullt arbeidstrykk i bagasjerommet på bilen en varm sommerdag.

Det motsatte skjer når man tapper luft av flasken. Temperaturen i flasken vil da synke inntil varme blir tilført utenfra og temperaturen igjen stabiliserer seg. Ved hurtig tømming av en dykkeflaske kan temperaturen bli så lav inne i flasken at ev. fuktighet kan avsettes som kondens og gi årsak til korrosjon. Tømming av flasken skal derfor fortrinnsvis skje langsomt. Den hurtige trykkreduksjonen i ventilen gir et kraftig temperaturfall i puste-luften. Dette kan forårsake frysing av ventilen på en kald vinterdag, dersom man ikke tar passende forholdsregler.

Det er for øvrig viktig å være klar over krav til merking av sted hvor flaskesett oppbevares – i tilfelle brann. Det skal ifølge brannforskriftene merkes med rødt trekantet skilt der brennbar gass under trykk oppbevares, og med grønt trekantet skilt hvor ikke-brennbar gass under trykk oppbevares.



2.8.3 Kompressibilitetsfaktoren

Kompressibilitetsfaktoren er et mål for gassens evne til å komprimeres, og forteller oss hvor stort trykk vi må øve på gassen for å presse sammen en viss mengde.

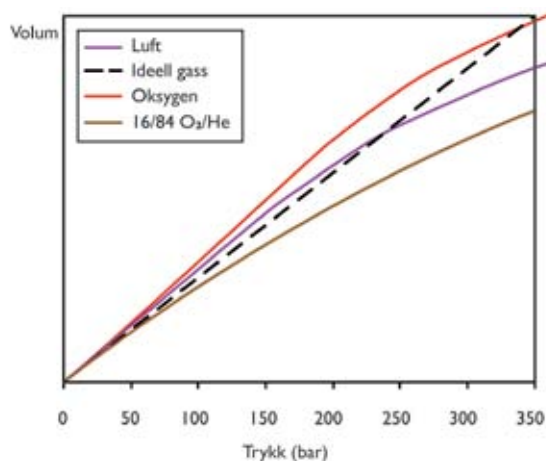
Når man har regneoppgaver med gasser, er det vanlig å betrakte gassene som ideelle, det vil si at dersom man dobler flasketrykket så vil dykkeren ha dobbelt så mye gass tilgjengelig. Det viser seg imidlertid at de fleste gasser ikke følger denne forutsetningen, og dermed gir feil resultat i forhold til hvor mye gass man faktisk har. Dette avviket kalles kompressibilitetsfaktoren, og er et mål på gassens sammenpressbarhet.

Figur 2.8 viser det frie volumet (ved standard trykk og temperatur) av ulike gasser i forhold til fylletrykket. Den prikkete linjen viser den "ideelle" gassen/gassblandingen.

Gassene som ligger over denne linjen, kan lagre en større mengde gass enn den ideelle gassligningen predikerer. Gasser som ligger under linjen kan derimot lagre mindre gass.

- Rent oksygen gir en større mengde gass enn forutsatt for trykk opp til 340 bar.
- Vanlig luft gir en større mengde gass enn beregnet opp til 240 bar – over dette vil mindre gass være tilgjengelig. Ved 350 bar må man regne ca 15% reduksjon i volum.
- En oksygen/helium blanding gir et mindre volum av gass enn beregnet med den ideelle gassligningen uansett trykk.

Kompressibilitetsfaktoren er en funksjon av trykk og temperatur, og kan for enkelte gasser være meget ulineær. For alle gasser vil vi imidlertid før eller siden nå et tak hvor vi ikke klarer å minske volumet av en bestemt gassmengde mer, uansett hvor mye vi øker trykket. Gassen har gått over til å oppføre seg som en væske. Vi kan sammenligne gassen med en spiralfjær (med lineær fjærkraft). Vi holder endene på fjæren i hver hånd, og



Figur 2.8 Forholdet mellom trykk og volum for luft, oksygen og heliox i forhold til en "ideell" gass.

presser sammen til fjæren så vidt begynner å komprimeres. Deretter dobler vi trykket, og fjæren vil da innta halvparten av sin opprinnelige lengde. Hvis vi igjen dobler trykket vil vi igjen halvere lengden. Slik kan vi holde på til alle spiralene i fjæren ligger tett inntil hverandre og det ikke er mulig å komprimere den mer, uansett hvor hardt vi trykker.

Hvis en gass er av en slik art at volumet halveres når trykket dobles (følger Boyles/Mariottes lov, det vil si komprimering ved konstant temperatur), sier vi at den er lineær eller ideell, det vil si den har en kompressibilitetsfaktor lik 1. Dersom trykket øker mer enn det Boyle-Mariottes lov skulle tilsi vil kompressibilitetsfaktoren være mindre enn 1, og gassen oppfører seg ikke lenger lineært. Kompressibilitetsfaktoren kan aldri bli større enn 1. For luft vil kompressibilitetsfaktoren være tilnærmet lik 1 til ca. 200 bar for deretter å avta merkbart med økende trykk. Dette betyr at komprimering av luft fra 200 til 300 bar bare vil fylle flasken med ca 75% av den luftmengde vi kunne forvente. For et flasks sett på 300 bar vil dette utgjøre ca. 10% av den totale luftmengde som ville vært på flasks settet hvis faktoren hele tiden hadde vært lik 1. Dersom en dykker med 300 bars flasks sett må en være oppmerksom på at de



første 100 bar (fra 300 bar til 200 bar) gir ca 25% mindre luft per bar enn de neste 200.

Eksempel:

Du har et flaskesett på 2×10 liter fylt til 200 bar. Hvor mange normalliter vil dette utgjøre?

Svar:

$$P_1 = 1 \text{ bar}$$

$$P_2 = 200 \text{ bar}$$

$$V_2 = 20 \text{ l}$$

$$V_1 = x$$

$$V_1 = \frac{200 \text{ bar} \times 20 \text{ l}}{1 \text{ bar}} = 4000 \text{ l}$$

Vi sier at flasken inneholder 4000 liter "fri luft" (normalliter)

Eksempel:

Et 2×6 liters flaskesett fylles til 300 bar. Hvor mange normalliter vil dette utgjøre?

Svar:

$$P_1 = 1 \text{ bar}$$

$$P_2 = 200 \text{ bar} + [(75/100) \times 100 \text{ bar}]$$

$$V_1 = x$$

$$V_2 = 12 \text{ l}$$

$$V_1 = \frac{[200 + (0,75 \times 100) \text{ bar}] \times 12 \text{ l}}{1 \text{ bar}} = 3300 \text{ l}$$

Dette vil utgjøre 3300 normalliter ("fri luft").

2.9 DALTONS LOV – LOVEN OM DELTRYKK


Kroppen vår har et bredt spekter av reaksjoner på gasser eller gassblandinger under ulike forhold eller trykk. Daltons lov brukes til å beregne forandringer i deltrykk (partialtrykk) mellom den gassen vi puster på overflaten og den vi puster under trykk.



Loven om deltrykk
 "I en gassblanding vil gassblandingen totaltrykk være lik summen av de enkelte gassers deltrykk"

Arbeidsformel:

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = P_{\text{tot}}$$



Deltrykksformelen:

$$P_x = \frac{V\% \times P}{100\%}$$

der:

P_x = Deltrykk til en gass i en blanding

V% = Volumprosent gass i blandingen

P = Totaltrykket

Enhver gassblanding, for eksempel luft, følger Daltons lov, det vil si at delgassenes volum til sammen utgjør hele gassblandingen volum. Videre har denne gassblandingen et totaltrykk som er lik summen av enkeltgassenes trykk (Figur 2.9).

Spesialtilfelle

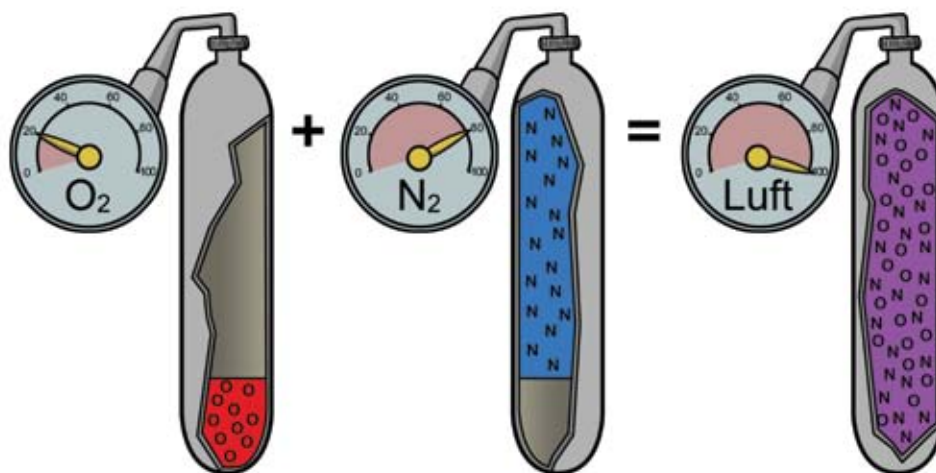
Hvis trykket i en lukket gassblanding øker, forandres verken delgassenes mengde eller prosentvis andel, men delgassenes deltrykk øker proporsjonalt med totaltrykket.

Dersom vi tilsetter en gitt gasmengde til en gass i et lukket volum, stiger totaltrykket tilsvarende den gasmengden vi tilsetter, uten at deltrykket i den opprinnelige gassen stiger (under forutsetning at man bruker forskjellige gasser). Dette har stor betydning ved fremstilling av teknisk pustegass (nitrox).

Vi har tidligere sagt at luft består av 20% oksygen og 80% nitrogen. Ved havoverflaten har vi 1 bar, deltrykket til oksygen blir da: $0,2 \times 1 \text{ bar} = 0,2 \text{ bar}$.

Dette skrives som $p_{O_2} = 0,2 \text{ bar}$





Figur 2.9 Daltons lov: Summen av de enkelte gassers deltrykk er lik totaltrykket

Eksempel:

Finn deltrykket til nitrogen i en luftblanding på 30 meters dyp?

Svar:

$$p_{N_2} = 0,8 \times 4 \text{ bar} = 3,2 \text{ bar}$$

Hvis vi i tillegg regner ut deltrykket for O_2 , kan vi se om dette stemmer med formelen.

$$p_{O_2} = 0,2 \times 4 \text{ bar} = 0,8 \text{ bar}$$

$$\text{Totaltrykk: } p_{O_2} + p_{N_2} = 0,8 + 3,2 = 4,0 \text{ bar}$$

Vi ser da at summen av de enkelte gassers trykk er lik totaltrykket.

Dersom vi ønsker å finne det dyp der oksygenets partialtrykk er lik 1,7 bar i en luftblanding, får vi følgende:

$$1,7 \text{ bar} = \frac{20\% \times \text{totaltrykket (P)}}{100\%}$$

$$P = \frac{1,7 \text{ bar}}{0,2} = 8,5 \text{ bar}$$

Dette representerer en dybde på 75 meter. På 75 meter vil altså oksygenets partialtrykk i denne pustegassen være 1,7 bar, og gi fare for akutt oksygenforgiftning.

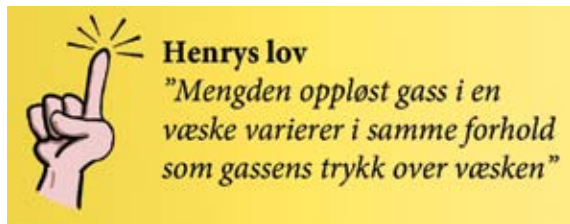
Ved blandingsgassdykking brukes deltrykks- (partialtrykks-) formelen til å finne ut hvor stor volumprosent man ønsker å ha av de forskjellige gassene i pustegassblandingen. Dette for å ha et gunstig fysiologisk utgangspunkt og/ eller ikke overskride de medisinske grensene for de forskjellige gassene. Dette står detaljert forklart i avsnittet om blandingsgasteori.

Konsekvens av Daltons Lov

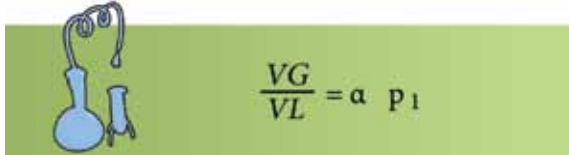
De fleste gasser vil være giftige eller gi problemer dersom gassens deltrykk stiger over bestemte verdier. Dette bestemmer hvor dypt man kan dykke med en bestemt pustegassblanding (for eksempel luft), og hvordan man eventuelt skal blande gassen for å begrense problemene som kan forårsakes av en eller flere av delgassene.



2.10 HENRYS LOV – LOVEN OM OPPLØSELIGHET AV GASSER I VÆSKE



Matematisk kan Henrys lov forklares slik:



der:

VG: Volum av oppløst gass

VL: Volum av væske

α : Løselighetskoeffisienten (fra tabell)

p_1 : Partialtrykk til gassen over væsken

Den mengde gass som er oppløst i en væske avhenger av fire faktorer:

- Gassens trykk over væsken
- Tiden trykket har virket over
- Temperaturen
- Gassens oppløselighetskonstant for den gjeldende væsken

Oppløseligheten av gassen tar tid og vi sier at væsken mettes med gass. På samme måte tar det tid før gassen forsvinner fra væsken når trykket reduseres. Vi sier at væsken er overmettet når væsken inneholder mer oppløst gass enn deltrykket av gassen over væsken skulle tilsi. Overmetningen frigjøres ved hurtig trykkreduksjon, risting eller oppvarming.

Det er to måter å øke trykket i en beholder:

- Øke temperaturen
- Fylle mer gass på beholderen

Når vi øker gassmengden vil også antall molekyler øke.

Hvis denne gassen ligger over en væske vil dette føre til at det blir presset flere molekyler ned i væsken. Når en reduserer trykket over væsken vil dette føre til at molekylerne vil gå fra væsken og over til gassen. Som et eksempel på dette kan vi bruke en brusflaske. Det som i dagligtalen omtales som kullsyre er karbondioksid (CO_2). Denne gassen ligger med et visst trykk under korken, slik at CO_2 blir presset ned i væsken. Dette medfører likevekt mellom antall molekyler i væsken og i gassen over væsken. Når man så åpner brusflasken, reduseres trykket over væsken, og gass vil strømme ut fra væsken. Gassen frigjøres som bobler (Figur 2.10).

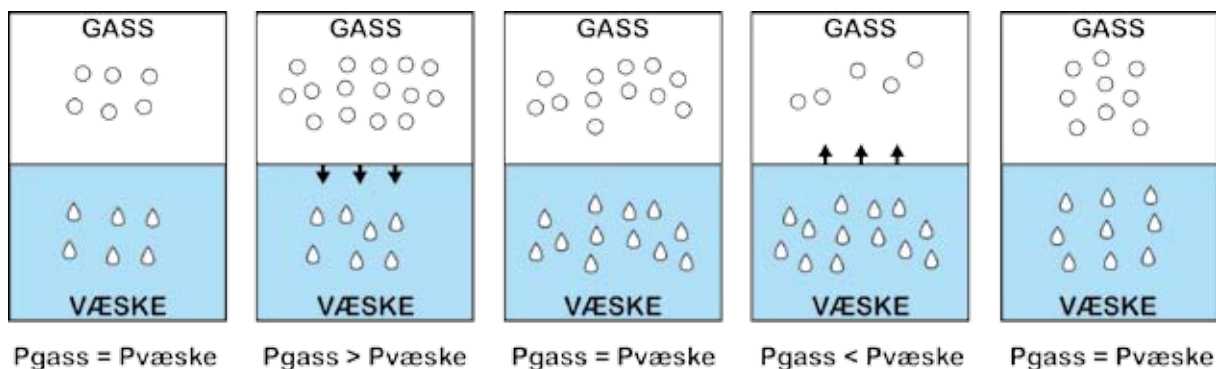


Figur 2.10 Frigjøring av gass i væske illustrert med en brusflaske

2.10.1 Metning

En stor prosentandel av kroppen består av vann. Når en gass kommer i kontakt med væske vil en viss andel av gassen oppløses i væsken til likevekt er nådd. Gass kan løses i vann og fett i kroppen siden dette utgjør en stor del av kroppsmassen. Jo dypere man går, desto høyere blir trykket på gassen som pustes inn. Dermed vil mer gass løses i kroppens vev. Gasser vil løses ulikt i hurtige og langsomme vev i kroppen. Denne prosessen kalles metning. Noen gasser er mer løselige enn andre, og noen væsker er bedre løsemidler enn andre. Nitrogen, for eksempel, er fem ganger mer løselig i fett enn i vann. Dette, i tillegg til forskjeller i blodforsyning til de ulike vev, har ført til at vevene er gitt ulike halvmetningstider (5-minuttsvev, 10-minuttsvev, 20-, 40-, 75-, osv). Dette danner grunnlaget for dykketabellene.





Figur 2.11 Når trykket i en gass i en væske endrer seg, vil også løseligheten av gassen endre seg i takt med denne trykkendringen til det innstilles likevekt

Etter en viss tid vil alle vevene i kroppen fullmettes. Dette skjer for eksempel med arbeidsdykkere som driver metningsdykking. Disse kan oppholde seg under trykk i flere uker, og må derfor ha en svært langsom dekompresjon.

Ved dykking i Forsvaret er det normalt de hurtige vevene som fullmettes, og disse vevene avmettes også nokså raskt. For å unngå problemer med dette er det utviklet dykketabeller som regulerer tiden vi kan være på et gitt dyp og for gjentatte dykk. Ved oppstigning må vi gå langsomt opp (10 m/min) for å skille ut overskudd av nitrogen. Dersom vi blir for lenge nede på et gitt dyp, opptar kroppen mer nitrogen enn den klarer å skille ut. Da må vi foreta dekompresjonsstopp, det vil si stopp på grunne dybder (normalt tre–seks meter) for å skille ut overskudd av nitrogen.

Vi vil dessuten opparbeide et overskudd av nitrogen i kroppen etter et dykk. Dette fører til at vi i bare begrenset omfang kan dykke gjentatte ganger etter hverandre. Ved brudd på tabellgrensene vil ikke nok nitrogen skilles ut av kroppen, og vi kan få trykkfallssyke.

I nyere tid er det dessuten utviklet dykkecomputere, som er regnemaskiner basert på de samme tabellene. En mikroprosessor beregner nøyaktige tabellverdier som dykkeren må forholde seg til. En dykkecomputer må således brukes med samme aktsomhet som en vanlig

tabell (for eksempel ta hensyn til dykkeprofil, kulde, alder, etc.). Dykkecomputere er svært vanlig i forbindelse med sportsdykking og teknisk dykking, men er i dag også i bruk av noen nasjoner i forbindelse med militær dykking.

2.11 LUFTFORBRUK

Vi har lært at et 2×10 liters flaskssett fylt til 200 bar inneholder ca 4000 liter. ”fri luft”.

Ut fra dette kan en si at:



Der:

P = Flasketrykket (bar)

V = Flaskevolumet (l)

Dette gjelder for flasketrykk opp til 200 bar. Ved trykk høyere enn dette må man som sagt ta hensyn til kompressibilitetsfaktoren. Luftforbruk avhenger av situasjonen, og varierer fra person til person. Generelt kan man bruke følgende verdier:

Menneske i fullstendig hvile: ca 8–10 l/min

Utrenet elev i sjøen: ca 50–80 l/min

Trenet elev i sjøen: ca 30–45 l/min

Rutinert apparatdykker: ca 15–20 l/min

Gasslovene

Boyles lov

Henrys lov

Daltons lov

0 m
1 bar



Ballongens volum = 5 liter



2 liter



10 m
2 bar



= 2.5 liter



4 liter



20 m
3 bar



= 1.67 liter



6 liter



30 m
4 bar



= 1.25 liter



8 liter




De viktigste faktorene som bestemmer luftforbruket er:

- Aktivitet
- Dybde
- Tid
- Vanntemperatur
- Fysisk form
- Individuelle fysiologiske faktorer
- Dagsform
- Stress/psykisk balanse

Luftforbruket øker proporsjonalt med det omgivende vanntrykk. Det vil si at 20 l/min på 30 meter dyp tilsvarer 80 l/min på overflaten fordi totaltrykket på 30 meter er fire ganger større enn på overflaten.


Beregning av luftforbruk

Ved beregning av luftforbruk bruker vi følgende formel:



$$\frac{(P_1 - P_2) \times V}{t} = \text{Liter/min "fri luft"}$$

Hvis vi vil vite hvor mye luft vi bruker på en gitt dybde, må vi i tillegg ta hensyn til dybden (P_{tot}). Vi får:



$$\frac{(P_1 - P_2) \times V}{t \times P_{\text{tot}}} = \text{Liter/min}$$

- P_1 :** Flasketrykk før dykket (bar)
- P_2 :** Flasketrykket etter dykket (bar)
- V:** Flaskevolum (l)
- t:** Dykketid (min)
- P_{Tot} :** Totaltrykk på gjennomsnittlig dybde (bar)

Eksempel:

Du har et 2 × 6 liters apparat fylt til 280 bar. Du dykker til 20 meter med bunntid 35 min. Når

du kommer til overflaten har du 50 bar igjen på flaskesettet ditt. Regn ut luftforbruket ditt.

Svar:

- P_1 :** 280 bar
- P_2 :** 50 bar
- V:** 12 l, t = 35 min + 2 min (oppstigning),
- P_{Tot} :** 3 bar

Ser vi bort fra kompressibilitetsfaktoren får vi:

$$(280 - 50) \times 12 = 2760$$

$$\frac{2760 \text{ l} \times 1 \text{ bar}}{37 \text{ min} \times 3 \text{ bar}} = 24,9 \text{ l/min} \approx 25 \text{ l/min}$$


Hvis vi også tar hensyn til kompressibilitetsfaktoren får vi:

$$[(200 - 50) + \{(280 - 200) \times 0,75\}] \times 12 = 2520$$

$$\frac{2520 \text{ l} \times 1 \text{ bar}}{37 \text{ min} \times 3 \text{ bar}} = 22,7 \text{ l/min} \approx 23 \text{ l/min}$$

Beregning av dykketid:

Hvis man snur litt på forrige formel kan vi finne ut omtrentlig hvor lang tid vi har til rådighet på en planlagt gjennomsnittlig dybde. Dette forutsetter at vi kjenner til omtrent hvor mye luft vi bruker basert på egne erfaringer.



$$\frac{(P_1 - P_R) \times V}{LF \times P_{\text{tot}}} = \text{Tid (min)}$$

- P_1 :** Flasketrykk før dykket (bar)
- P_R :** Reserverluft (bar)*
- V:** Flaskevolum (l)
- LF:** Luftforbruk (l/min)
- P_{Tot} :** Totaltrykk på snittdybde (bar)

* Reserverluft: Det trykket reserverluftmekanismen holder tilbake (vanligvis ca 40 bar på 326-apparatet)



Eksempel:

Du skal dykke til 30 meter med et 2×6 liters apparat fylt til 300 bar. Reserven slår inn ved 40 bar. Du har beregnet at du har et luftforbruk på 25 l/min. Hvor lenge kan du være nede på denne dybden?

Svar:

P_1 : 300 bar
 P_2 : 40 bar
 V : 12 l
 P_{Tot} : 4 bar
LF: 25 l/min
 t : x

$$[(200-40) + \{(300-200) \times 0,75\}] \times 12 = 2820 \text{ l}$$

$$\frac{2820 \text{ l} \times 1 \text{ bar}}{25 \text{ l/min} \times 4 \text{ bar}} = 28,2 \text{ min} \approx 28 \text{ min}$$

I tillegg må man ta høyde for dekompressjonsstopp og oppstigningstid.

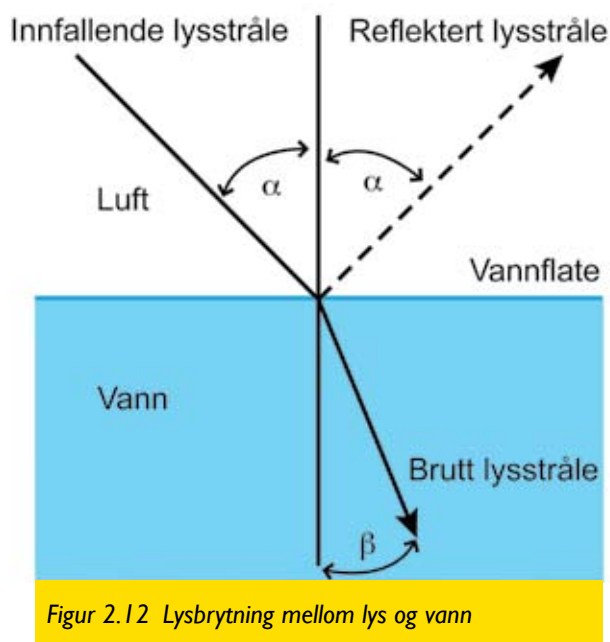
2.12 LYS I VANN

2.12.1 Lysbrytning – refleksjon

Når lyset treffer vannflaten blir mye reflektert, og bare en liten del av lysstrålene trenger ned i vannet. Når en lysstråle går fra ett medium til et annet med større brytningsindeks, for eksempel fra luft til vann, der vannet har større brytningsindeks enn luft, vil lyset brytes *mot* innfallsloddet. Referert til Figur 2.12 vil vinkelen β (i vann) være mindre enn vinkelen α (i luft).

Ettersom vannspeilet er vannrett, vil innfallsloddet her være loddrett. En lysstråle vil altså ha en brattere vinkel under vann enn over. For en observatør på land vil fenomenet gi inntrykk av det motsatte, for han er vant til at lyset beveger seg i rett linje. Lysbrytningen vil gi inntrykk av at en gjenstand "løftes" opp under vann.

En dykker som befinner seg like under overflaten, og ser på skrå oppover, vil observere at



ved en viss vinkel (49° på vannflaten) brytes lyset slik at det er som å se et speil. Det er lyset som reflekteres tilbake. Dette fenomenet kalles for totalrefleksjon.

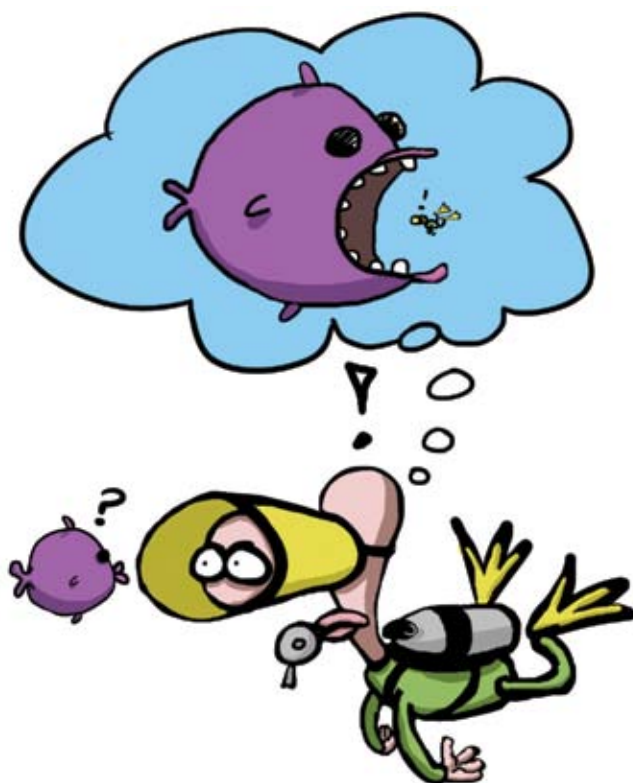
Når man bruker dykkermaske, vil lyset gå fra vann til luft, og dermed brytes *fra* innfallsloddet, som står vinkelrett på glassflaten. Dykkeren vil dermed oppleve at ting ser større ut, og virker nærmere enn de i virkeligheten er. Dette kan virke forvirrende, da det er vanskelig å bestemme avstanden til, eller størrelse på, et objekt.

I tillegg vil det område man kan se gjennom maska med (synsvinkelen) innsnevre seg under vann. Dette gjør at synsvinkelen under vann blir mindre enn den man har gjennom maska på land. Den "kjempestore" krabben du fanget er ikke så stor når du kommer opp og viser den til de andre. Forholdet mellom virkelig avstand og tilsynelatende avstand, og mellom størrelser vil være 4:3, som tilsvarer forholdet mellom brytningsindeksene i luft og i vann (Figur 2.13).

Eksempel:

En gjenstand som ligger fire meter unna vil se ut som om den har en avstand på tre meter.





Figur 2.13 En fisk under vann vil se større og nærmere ut enn i virkeligheten på grunn av lysbrytning mellom luft og vann gjennom maskeglasset.

Forholdet mellom virkelig størrelse og synlig størrelse vil være 3:4.

For å øke synsvinkelen under vann er mange masker utstyrt med sideglass, som er plassert på siden av maska og i en vinkel med hovedglasset. Selv om dette gir en form for ”dobbelt-syn”, som for enkelte kan virke sjenerende, gir denne type maske godt utsyn til siden. Man ser også lett bakover, uten å måtte snu seg.

2.12.2 Farger i vann

Det er som nevnt bare noen av solstrålene som trenger ned i vannet. Dersom det er mye bølger på overflaten, eller sola står lavt på himmelen, vil enda mindre lys trenge igjennom. Jo dypere man går, dess mørkere blir det. På 15 meters dyp er lyset i våre farvann bare ca. en åttendedel av hva det er på overflaten. Under gode forhold kan det fremdeles være litt lys igjen på 70–90 meters dyp. På ca. 300 meter er det konstant mørkt. Grunnene til at lyset blir svakere er mange. Mye av lyset reflekteres i overflaten. Plankton og forurensning reflekterer og sprer lyset nede i vannet. Ferskvann har en mye større evne til



Figur 2.14 Fargespekteret under vann.



og absorbere lys enn sjøvann. Gode lysforhold er vanskelig å få, selv ved bruk av lykt.

Fargespekteret

Hvitt lys består av alle farger: Rødt, orange, gult, grønt, blått, indigo og fiolett. Disse fargene kalles for Newtons sju farger.

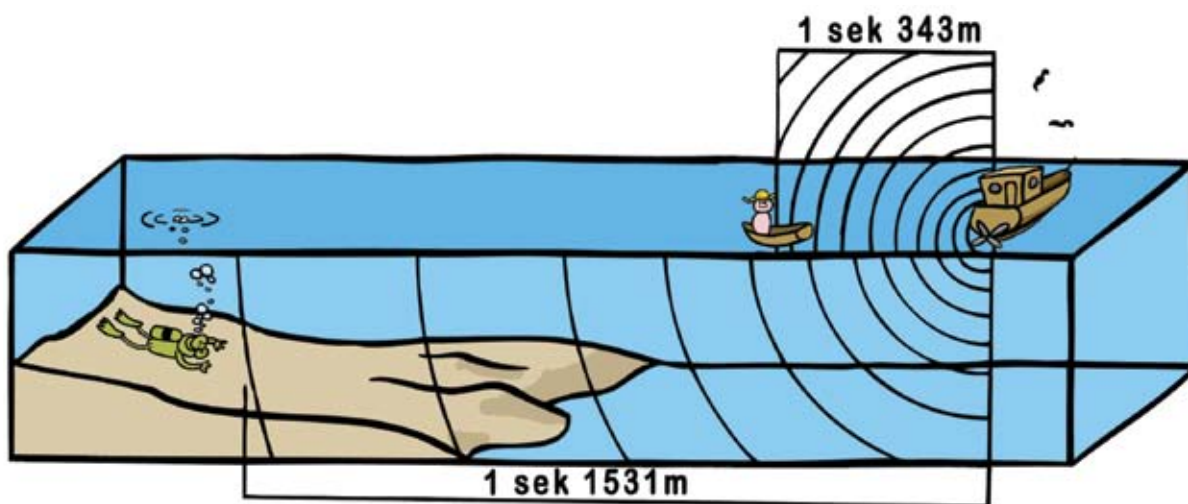
Når lyset trenger ned i vannet, vil fargene filtreres bort forskjellig. I våre farvann forsvinner fargene som forklart i Figur 2.14.

Dette medfører at dypere enn ca. ti meter forsvinner all rødfargen. Videre nedover vil alt vi ser virke blått, for deretter å gå over i grønt. Tilstrekkelig dypt vil alt fortone seg grått. Skal vi ha fram igjen fargene må vi ha med kunstig lys. Bruk av lykt, selv midt på dagen, på dybder dypere enn ti meter vil gi en fin opplevelse. Det er utrolig hvor mange fine farger det egentlig er, selv om det ser grønt og trist ut. Ønsker man å fotografere, bør blitz brukes selv på moderate dyp. I sterkt forurenset vann blir fiolett, rødt og blått absorbert raskt, mens det gule lyset trenger lengst ned. I meget klart vann (for eksempel Middelhavet og Rødehavet) blir rødt, orange og gult filtrert bort først, mens fiolett, indigo og blått trenger lengst ned.

2.13 LYD I VANN

I luft har lyden en hastighet på ca 343 m/sek som tilsvarer 1235 km/t. I vann er lyd hastigheten ca. 1531 m/sek som tilsvarer 5512 km/t. Lyd i vann beveger seg altså 4,5 ganger raskere enn i luft (Figur 2.15).

I tillegg svekker lyden seg mindre i vann enn i luft. Dette betyr at lyd (særlig de lave frekvensene) kan bevege seg over store avstander under vann. De høye frekvensene svekkes imidlertid mye raskere, slik at den hvinende lyden fra en båt med påhengsmotor ofte ikke høres før den er like ved eller rett over. Det kan være meget vanskelig eller umulig å retningsbestemme lyd under vann. Dette skyldes at det menneskelige hørselssystem (ørene og hørselsapparatet) er laget for å oppfatte lyd på land. Som følge av ørets fasong og plassering på hodet vil de to ørene normalt oppfatte litt forskjellig lydbilder, avhengig av hvordan hodet er plassert i forhold til lydkilden. Over millioner av år har den menneskelige hjerne lært seg til å tolke denne lille forskjellen. Under vann er mennesket uvant med å tolke lyder. Samtidig går lydbølgene stort sett uhindret gjennom hodet, det vil si de to lydbildene som ørene oppfatter er svært like. Resultatet er at det er omtrent umulig å retningsbestemme en lydkilde under vann bare ved hjelp av hørselen.



Figur 2.15 Lyd under vann er ca fire ganger raskere enn på overflaten.

