

Wat je moet kennen en kunnen aan het eind van blok 17

1 Je moet de zes algemene kenmerken van het molekuul-model kennen. [P1, T1, W1]

2 Je moet de bijzondere kenmerken kennen van het model van een stof in de vaste, in de vloeibare en in de gasvormige fase. [P1, T1, W1]

3 Je moet weten dat de gemiddelde snelheid van molekulen toeneemt als de temperatuur stijgt. [P1, T1, W1]

4 Je moet weten dat molekulen géén snelheid hebben bij een temperatuur van 0 K. [P1, T1, W1]

5 Je moet weten in welke drie fasen een stof kan voorkomen. [P1, T1, W1]

6 Je moet de namen weten van alle zes de fase-overgangen. [P1, T1, W1]

7 Je moet weten bij welke fase-overgangen warmte vrijkomt en voor welke fase-overgangen warmte nodig is. [P1, T1, W1]

8 Je moet het verschijnsel 'uitzetting bij temperatuurverhoging' in de drie fasen kunnen verklaren met het molekuul-model. [T1, W1]

9 Je moet weten wat 'koken' inhoudt en de invloed van de druk op het kookpunt kunnen verklaren. [T1, W1]

10 Je moet weten dat een damp kan condenseren door verlaging van de temperatuur. [P1, T1, W1]

11 Je moet weten hoe bij elke fase-overgang de bewegingsvrijheid van de molekulen verandert. [P1, T1, W1]

12 Je moet weten wat we met het smeltpunt en het stolpunt van een stof bedoelen. [P1, T1, W1]

13 Je moet weten dat het effect van een kracht groter is, naarmate deze op een kleiner oppervlak wordt uitgeoefend. [P2, T2, W2]

14 Je moet weten wat we met de grootheid 'druk' bedoelen. [P2, T2, W2]

15 Je moet weten dat de druk wordt gemeten in pascal en dat 1 Pa gelijk is aan 1 N/m². [P2, T2, W2]

16 Je moet weten dat de druk in een vloeistof groter wordt naarmate je dieper onder de vloeistofspiegel komt. [P2, T2, W2]

17 Je moet weten dat de druk die wordt uitgeoefend op een vloeistof, zich in alle richtingen even sterk voortplant. [P2, T2, W2]

18 Je moet weten dat de druk op alle plaatsen, die op dezelfde diepte in dezelfde vloeistof liggen even groot is. [P2, T2, W2]

19 Je moet de vloeistofdruk op een bepaalde plaats in een vloeistof kunnen berekenen. [P2, T2, W2]

20 Je moet weten dat gasen druk uitoefenen omdat molekulen in een vat tegen de wand botsen. [P2, T2, W2]

21 Je moet weten dat de luchtdruk het gevolg is van het gewicht van de lucht boven je. [P3, T3, W3]

22 Je moet weten dat de luchtdruk afneemt naarmate je hoger boven het aardoppervlak komt. [P3, T3, W3]

23 Je moet weten dat de luchtdruk gemeten wordt in millibar (mbar); dat de luchtdruk op aarde schommelt rond 1000 mbar en dat dit overeenkomt met 100 000 Pa. [P3, T3, W3]

24 Je moet weten dat je met een barometer de luchtdruk kunt meten, en je moet de werking van een barometer kunnen uitleggen. [P3, T3, W3]

25 Je moet weten dat je met een manometer de druk van een gas kunt meten. [P3, T3, W3]

26 Je moet de wet van Boyle ($p \cdot V = \text{constant}$) en de algemene gaswet ($\frac{p \cdot V}{T} = \text{constant}$) kennen en met die wetten kunnen rekenen. [P4, T4, W4]

27 Je moet weten dat: waterdamp in de lucht onzichtbaar is; mist bestaat uit zeer kleine waterdruppeltjes; sneeuw bestaat uit aaneengegroeide ijskristallen; dauw ontstaat door condensatie van waterdamp op koude oppervlakken. [T5, W5]

28 Je moet weten dat: een vaste stof kan direct in gas overgaan; een vloeistof kan verdampen en dat waterdamp direct kan overgaan in ijs (rijpen). [T5, W5]

29 Je moet weten dat lage- en hogedrukgebieden ontstaan door temperatuurverschillen op aarde. [T5, W5]

Blok 17

Weer of geen weer

Basisstof

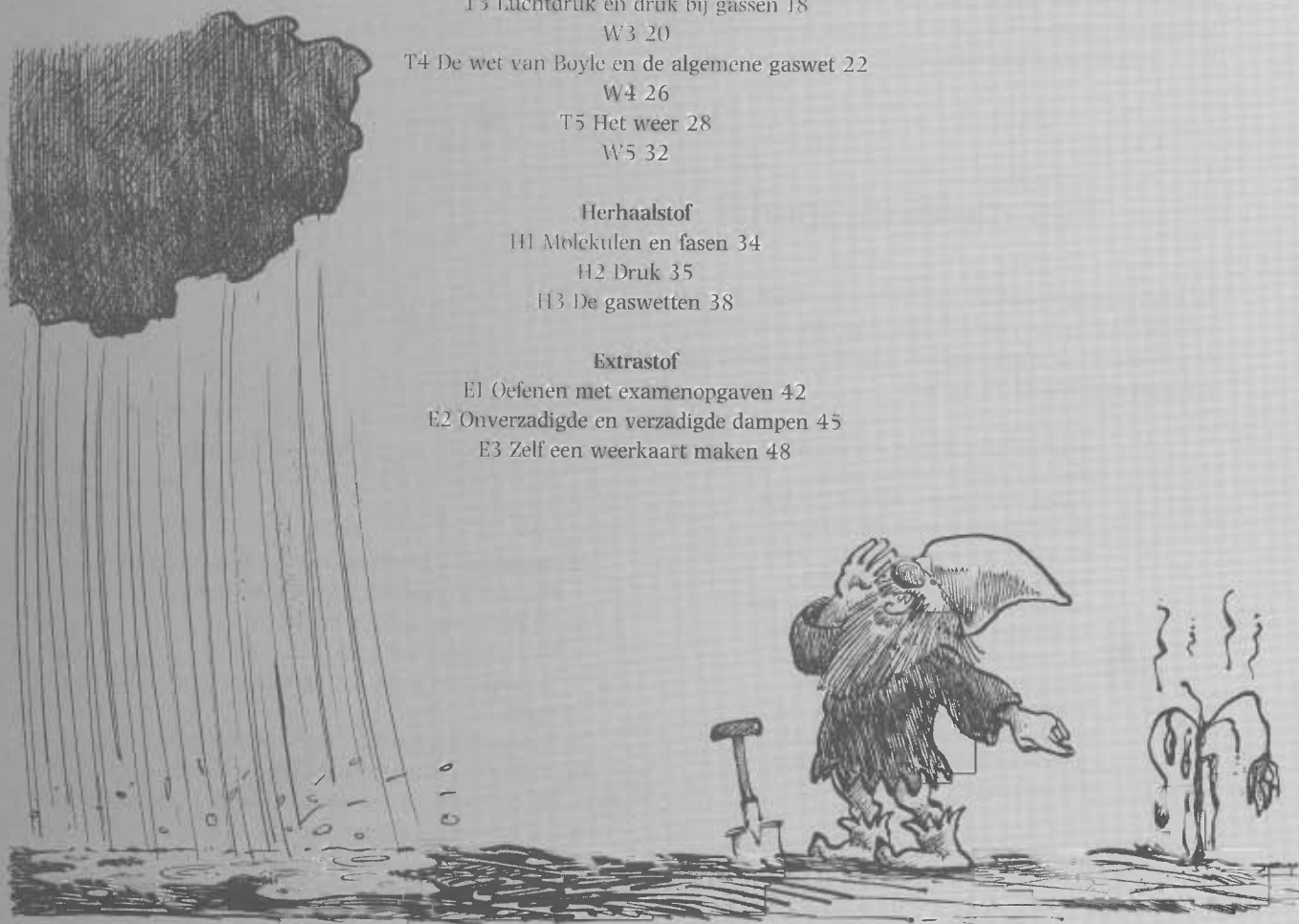
- T1 Molekullen en fase-overgangen 6
 - W1 10
- T2 Druk bij vaste stoffen en vloeistoffen 12
 - W2 16
- T3 Luchtdruk en druk bij gassen 18
 - W3 20
- T4 De wet van Boyle en de algemene gaswet 22
 - W4 26
- T5 Het weer 28
 - W5 32

Herhaalstof

- H1 Molekullen en fasen 34
- H2 Druk 35
- H3 De gaswetten 38

Extrastof

- E1 Oefenen met examenopgaven 42
- E2 Onverzadigde en verzadigde dampen 45
- E3 Zelf een weerkaart maken 48



Inleiding

In het practicum P0 hebben we, aan de hand van een aantal vragen, onderwerpen besproken die te maken hebben met het weer. Om de natuurkundige processen die bij het weer een rol spelen beter te begrijpen, herhalen we hier het model van een stof in de verschillende fasen: het molekuulmodel. In T5 'Het weer' bekijken we het molekuulmodel van een stof in de verschillende fasen nog een keer, maar nu in samenhang met de verschijnselen die we in de natuur tegenkomen.

Blok 17

T1 Molekullen en fase-overgangen

Water komt in de natuur in verschillende fasen voor: gasvormig in de lucht, als vloeistof in de vorm van regen en als vaste stof in de vorm van ijs (hagel, sneeuw of rijp). In blok 7, *Vast, vloeibaar en gas*, heb je kennis gemaakt met molekullen en het molekuulmodel. Hieronder komt het molekuulmodel opnieuw aan de orde en gaan we na hoe molekullen zich gedragen bij de fase-overgangen van een stof.

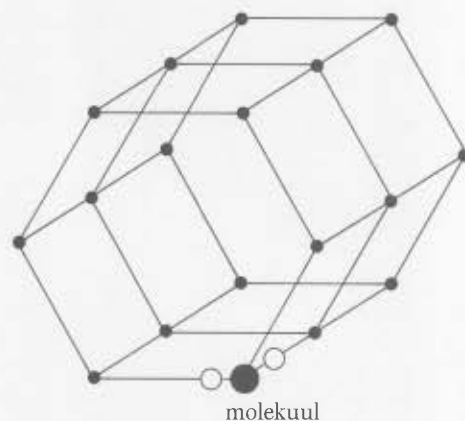
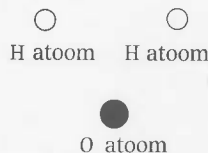
Het molekuulmodel

Elke stof is opgebouwd uit molekullen. De molekullen zijn de kleinste deeltjes met eigenschappen die van belang zijn voor de opbouw en de eigenschappen van een stof. Molekullen zelf zijn weer opgebouwd uit atomen.

In het verleden hebben onderzoekers, door veel proeven te doen, eigenschappen van stoffen ontdekt. Om deze eigenschappen te verklaren stelden ze een model op: het *molekuulmodel*. Door nog meer proeven te doen konden ze het model aanpassen en verbeteren. Het model werd daardoor zó goed dat men niet meer over een model sprak, maar aannam dat de molekullen echt bestonden. Pas veel later heeft men met behulp van speciale microscopen de (grotere soorten) molekullen écht kunnen waarnemen.

fig. 1

De rangschikking van watermolekullen in een ijskristal.



De algemene kenmerken van het molekuulmodel:

- 1 Elke stof is opgebouwd uit kleine deeltjes: de molekullen.
- 2 De molekullen hebben massa.
- 3 De molekullen bewegen.
- 4 Door het toevoeren van energie gaan de molekullen sneller bewegen.
- 5 Tussen de molekullen bevindt zich ruimte, waarvan de grootte sterk afhangt van de fase waarin de stof verkeert.
- 6 Op korte afstand van elkaar trekken de molekullen elkaar aan. Op zeer korte afstand van elkaar stoten ze elkaar echter af.

De aantrekking tussen de molekullen van stoffen heet cohesie of adhesie:

- cohesie is het gevolg van de aantrekkingskracht tussen molekulen van dezelfde stof (in een waterdruppel worden de molekulen door cohesie bij elkaar gehouden).
- adhesie is het gevolg van de aantrekkingskracht tussen molekulen van verschillende stoffen (adhesie zorgt ervoor dat een regendruppel aan een brillleglas blijft hangen).

Temperatuur en snelheid van de molekulen

De temperatuur van een stof is een maat voor de gemiddelde snelheid van de molekulen. Als de temperatuur daalt, bewegen de molekulen minder snel door elkaar (in gas en vloeistof) of trillen ze minder snel op hun plaats (in vaste stof). Bij steeds verdere verlaging van de temperatuur blijken de molekulen op een gegeven moment niet meer te bewegen. Deze

temperatuur heet het absolute nulpunt. Het absolute nulpunt ligt bij $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Een lagere temperatuur bestaat niet, want de molekulen kunnen niet 'stiller staan dan stil'. Daarom heeft Kelvin het absolute nulpunt gebruikt als beginpunt voor een nieuwe temperatuurschaal. Die temperatuurschaal is later naar hem genoemd; de temperatuur bij het absolute nulpunt is dus 0 K .

Kelvin deelde zijn temperatuurschaal zo in, dat als de temperatuur volgens een thermometer van *Celsius* een graad steeg, ook zijn thermometer een graad hoger aanwees. Op die manier ontstond er een eenvoudig verband tussen beide temperatuurschalen. Zo werd $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dus 273 K en $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ werd 373 K . Je kunt een temperatuur in $^{\circ}\text{C}$ dus gemakkelijk omrekenen in K met de formule: $T_{\text{in K}} = T_{\text{in }^{\circ}\text{C}} + 273$.

De drie fasen

Een stof kan in drie verschillende fasen voorkomen: de vaste, de vloeibare en de gasvormige fase.

Een stof in de vaste fase

In een vaste stof zitten de molekulen op vaste plaatsen in een rooster. De afstand tussen de molekulen is klein. Ze trillen rond een evenwichtsstand. De aantrekkende kracht tussen de molekulen is groot. Het regelmatige rooster verklaart de kristalstructuur van veel vaste stoffen.

Hoe lager de temperatuur van een vaste stof is, hoe minder de molekulen trillen. Ze duwen elkaar dan dus minder ver opzij. Je kunt óók zeggen: 'Hoe lager de temperatuur van een vaste stof, hoe dichter de molekulen bij elkaar zitten.' Daarom krimpen vaste stoffen als de temperatuur daalt. Als de temperatuur stijgt, geldt natuurlijk het omgekeerde. De molekulen gaan heftiger trillen en duwen elkaar verder opzij. Daarom zet een vaste stof bij temperatuurstijging uit.

Hoeveel een stof uitzet of krimpt, wordt bepaald door de *uitzettingscoëfficiënt*. Die coëfficiënt geeft aan hoeveel het volume van een stof toeneemt (of afneemt) als de temperatuur een graad stijgt (of daalt). De uitzettingscoëfficiënt hangt af van de soort stof (behalve bij gassen). De uitzettingscoëfficiënt van vaste stoffen is niet groot; de aantrekkingskracht tussen de molekulen is immers groot en de molekulen zitten 'vast' in het rooster.

Een stof in de vloeibare fase

In de vloeibare fase bewegen de molekulen van een stof heftiger dan in de vaste fase. De afstand tussen de molekulen in de vloeibare fase is iets groter dan in de vaste fase. De aantrekkende kracht is door die iets grotere onderlinge afstand óók kleiner. De molekulen in de vloeistof kunnen daarom vrij langs elkaar bewegen.

Ook vloeistoffen zetten uit bij temperatuurstijging. De heftiger trillende molekulen duwen elkaar weer verder opzij. De uitzettingscoëfficiënt van vloeistoffen is gemiddeld wel tien keer

zo groot als die van vaste stoffen. Hiervan maken we gebruik bij de thermometer. Doordat de vloeistof – meestal kwik of alcohol – veel sterker uitzet dan het glas, zal de vloeistof in het *capillair* stijgen.

Een stof in de gasvormige fase

In een gas vertonen de molekulen onderling geen samenhang meer en kunnen zij zich in alle richtingen vrij verspreiden. De gemiddelde snelheid van de molekulen is groot; daardoor is er véél ruimte tussen de molekulen. De aantrekkende kracht tussen de molekulen is als gevolg van hun grote onderlinge afstand te verwaarlozen. Bij kamertemperatuur is de gemiddelde snelheid van zuurstof- en stikstofmolekulen ongeveer 500 m/s ; dat is 1,5 maal de geluidssnelheid.

Bij temperatuurstijging zullen de heftiger bewegende molekulen elkaar nog verder opzij duwen: het gas zet uit. Het volume van een hoeveelheid gas hangt af van de temperatuur én van de druk.

Het volume van een hoeveelheid gas hangt niet alleen af van de temperatuur, maar ook van de druk. Daarom is de uitzettingscoëfficiënt van gassen ook gedefinieerd bij constante druk. Gassen zetten niet alleen veel sterker uit dan vloeistoffen en vaste stoffen, maar zij hebben óók allemaal dezelfde uitzettingscoëfficiënt: $\frac{1}{273}$. Dat betekent dat 1 m^3 van een gas, bij constante druk, per graad temperatuurstijging $\frac{1}{273}\text{ m}^3$ in volume toeneemt.

Fase-overgangen

De overgang van de ene fase van een stof in de andere fase heet een fase-overgang. Daarbij veranderen de eigenschappen van die stof, dus ook de kenmerken van het molekuulmodel van die stof. Zo'n fase-overgang vindt plaats bij een bepaalde temperatuur. In het uiterlijk van de stof treedt dan een duidelijke verandering op.

Smelten

Ijs smelt bij 0°C . In de vaste stof ijs zitten de watermolekulen op een vaste plaats. Maar wanneer bij 0°C energie (in de vorm van warmte) aan het ijs wordt toegevoerd, wordt de beweging van de molekulen heftiger. Hun onderlinge afstand neemt weer toe, waardoor de aantrekkende kracht tussen de molekulen afneemt. De molekulen kunnen hun vaste plaats in het rooster daardoor gaan verlaten. De vaste stof ijs gaat over in de vloeistof water. Bij het smeltpunt gaat een stof dus over van de vaste fase in de vloeibare fase.

Stollen

De temperatuur waarbij een stof van de vloeibare fase overgaat in de vaste fase heet het stolpunt. Hierbij gebeurt eigenlijk het tegenovergestelde als bij smelten: door het onttrekken van energie (warmte) daalt de temperatuur en neemt de gemiddelde snelheid van de molekulen af. Daardoor wordt de afstand tussen de molekulen kleiner en neemt de onderlinge aantrekkingskracht toe. Bij het stolpunt dwingt de aantrekkende kracht de molekulen in een rooster: de stof stolt. Smeltpunt en stolpunt van een stof liggen uiteraard bij dezelfde temperatuur. De overgang van water naar ijs heet eigenlijk ook stollen, maar we noemen het meestal bevriezen.

Verdampen, vervluchtigen en koken

Het verdampen van water en andere vloeistoffen gebeurt bij *elke* temperatuur. Er zijn namelijk aan de oppervlakte van de vloeistof altijd wel molekulen, die voldoende snelheid hebben om de vloeistof te verlaten. De aantrekkende kracht tussen die molekulen in de dampruimte boven de vloeistof wordt dan verwaarloosbaar klein.

Boven een vloeistof bevindt zich dus altijd damp van die vloeistof. Zoals elk gas oefent die damp een druk uit. Als de temperatuur van de vloeistof stijgt, krijgen steeds meer molekulen genoeg snelheid om aan de vloeistof te ontsnappen. De vloeistof verdampt dus gedeeltelijk en daardoor neemt de dampdruk sterk toe. Als de temperatuur maar genoeg stijgt, wordt die dampdruk tenslotte even groot als de luchtdruk boven de vloeistof. Dat heeft tot gevolg dat er nu niet meer alleen verdamping *aan het oppervlak* van de vloeistof kan plaatsvinden, maar ook *in* de vloeistof. Er kunnen zich overal in de vloeistof dampbellen vormen; we zeggen nu dat de vloeistof kookt. Bij het kookpunt hebben zeer veel molekulen voldoende snelheid om de vloeistof te verlaten. De verdampingssnelheid is dan het grootst.

Je kunt nu ook begrijpen waarom water alléén blijft koken als je doorgaat met warmte toevoeren, hoewel de temperatuur gelijk blijft. Er blijft veel energie nodig om de molekulen zóveel snelheid te geven dat ze kunnen ontsnappen.

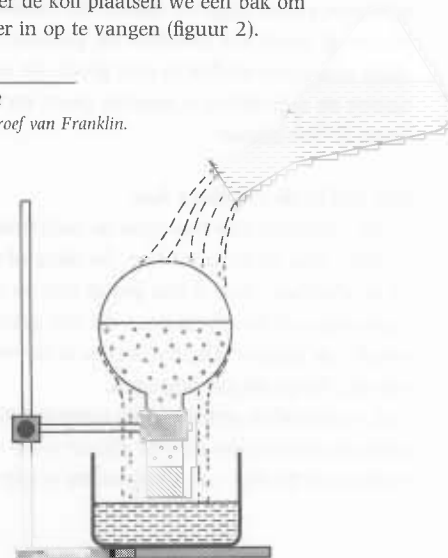
Als je de luchtdruk boven de vloeistof verlaagt, ontstaan er natuurlijk al bij een lagere temperatuur dampbellen in de vloeistof. Het kookpunt bij een lagere luchtdruk ligt dus bij een lagere temperatuur. Omgekeerd geldt: als je de druk boven de vloeistof verhoogt, ontstaan er pas bij een hogere temperatuur dampbellen. Het kookpunt bij een hogere luchtdruk ligt dus bij een hogere temperatuur. Zo kun je de werking van een snelkookpan of hogedrukpan verklaren: door de hoge druk in de pan stijgt het kookpunt van water. Het eten wordt bij een hogere temperatuur gekookt en is dus sneller gaar.

Algemeen geldt: een vloeistof zal koken als de druk van zijn damp even groot is als de luchtdruk boven de vloeistof. Je hebt dan ook het antwoord gevonden op de vraag: 'Waarom kookt water bij 100°C en ether al bij 35°C ?' Dat is blijkbaar zo omdat bij die temperaturen de dampdruk boven die vloeistoffen even groot is als de (gemiddelde) luchtdruk: circa 100 kPa.

Dat water bij lagere druk veel eerder kookt wordt fraai gedemonstreerd door de proef van Franklin.

Een stevige rondbodemkolf van pyrexglas, die goed is af te sluiten met een rubber stop, wordt half gevuld met water. We brengen dit water aan de kook en laten het een paar minuten flink doorkoken, zodat de waterdamp de lucht grotendeels uit de kolf verdrijft. We halen de brander weg en sluiten de kolf snel af met de rubber stop. Dan keren we de kolf met de ronde bodem naar boven en plaatsen hem in een ring, die aan een statief is bevestigd. Onder de kolf plaatsen we een bak om water in op te vangen (figuur 2).

fig. 2
De proef van Franklin.



Als we nu uit een bekersglas kraanwater over de kolfbodem laten lopen, begint het water in de gesloten kolf enige tijd heftig te koken. Telkens als we dit herhalen gebeurt hetzelfde, ook langere tijd (15 minuten) na het verwijderen van de brander.

De verklaring is als volgt: toen de brander werd verwijderd, bevond zich boven het water voornamelijk waterdamp van circa 100 °C. (De snel geplaatste stop voorkwam dat er weer veel lucht bij kwam.) Als we wat water over de kolfbodem laten lopen, condenseert

een deel van de damp. Daardoor daalt de druk boven de vloeistof, zodat er weer dampbellen in de hele vloeistof kunnen ontstaan. Het kraanwater koelt de damp elke keer sneller af dan het water in de kolf, zodat de druk van de gekoelde waterdamp telkens kleiner wordt dan de dampdruk, die bij de temperatuur van het water in de kolf hoort. Zolang het water in de kolf nog circa 20 graden warmer is dan het kraanwater dat we voor de koeling gebruiken, blijft het verschijnsel optreden.

Niet alleen vloeistoffen verdampen. Er zijn ook vaste stoffen die kunnen verdampen. Ijs is zo'n vaste stof. Blijkbaar zijn er – bij 0 °C of lagere temperaturen – molekulen waarvan de snelheid zó hoog is, dat ze aan de vaste stof kunnen ontsnappen. Het verdampen van een vaste stof noemen we ook wel vervluchtigen.

Condenseren en rijpen

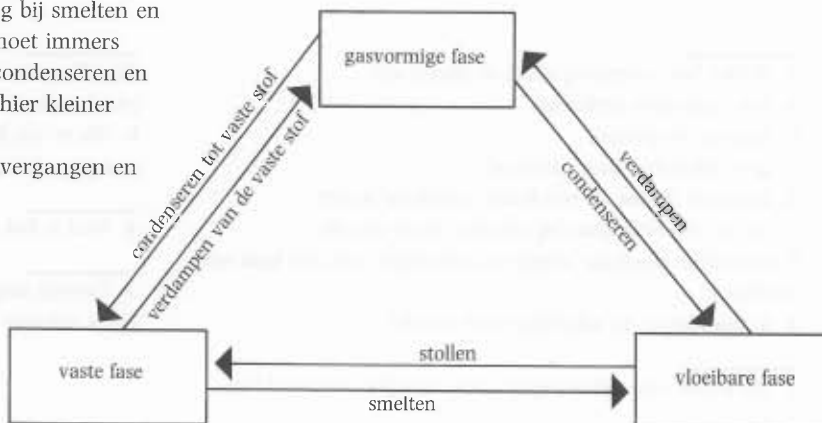
Condenseren is het tegenovergestelde van verdampen. Door het onttrekken van energie (warmte) aan een gas daalt de gemiddelde snelheid van de molekulen. De afstand tussen de molekulen wordt dus kleiner en de aantrekkingskracht groter. Het gas gaat daardoor over in de vloeibare fase. Het condenseren van een gas kan gebeuren door temperatuurverlaging en/of drukverhoging. Soms condenseert een gas direct tot een vaste stof. Bijvoorbeeld: als jodiumdamp condenseert tegen een koude glaswand, worden er duidelijk jodiumkristallen zichtbaar. Ook waterdamp kan op voorwerpen, die een temperatuur van 0 °C of lager hebben, direct condenseren tot ijs. Dit heet rijpen.

Tijdens een fase-overgang geldt in het algemeen dat de temperatuur constant blijft: de gemiddelde snelheid van de molekulen verandert niet. Toch is bij een fase-overgang energie nodig, of moet er energie worden onttrokken. Dat komt omdat bij een fase-overgang de afstand tussen de molekulen moet toenemen (door energie-toevoer) of afnemen (door het onttrekken van energie). Zo is er energie nodig bij smelten en verdampen: de afstand tussen de molekulen moet immers toenemen. Er komt energie (warmte) vrij bij condenseren en stollen: de afstand tussen de molekulen moet hier kleiner worden.

In figuur 3 zie je een overzicht van alle fase-overgangen en de bijbehorende namen.



fig. 3
De fase-overgangen.



Damp of gas

Of we een stof in de gasvormige fase een damp of een gas noemen, hangt af van de soort stof. Is de stof bij normale druk en kamertemperatuur (20 °C) een vloeistof, dan noemen we die stof in de gasvormige fase een damp. Een vloeistof kan immers verdampen, waardoor dus damp ontstaat. Is de stof bij normale druk en kamertemperatuur in de gasvormige fase, dan spreken we van een gas.

Voorbeelden van dampen zijn water-, alcohol- en etherdamp: deze stoffen kennen we immers bij 20 °C óók in vloeistofvorm. Voorbeelden van gassen zijn stikstof, koolstofdioxide en waterstof: deze komen bij 20 °C uitsluitend in de gasfase voor. Alleen onder hoge druk en/of bij lage temperatuur zijn gassen tot vloeistoffen te verdichten.

Als water verdampst, moeten we oppassen dat we waterdamp en stoom niet met elkaar verwarren. Het verschil is goed te zien als we water koken in een fluitketel: vlak bij de opening is er nog alleen waterdamp, die daarna snel overgaat in stoom. De waterdamp van 100 °C koelt door botsing met de omringende – veel koudere – lucht af, waardoor condensatie optreedt. Uit figuur 4 blijkt duidelijk dat de waterdamp niet is te zien, maar de stoom wél. Stoom bestaat namelijk uit minuscule druppeltjes water. Mist is dus ook een vorm van stoom.

Niet alle vloeistoffen verdampen bij kamertemperatuur even snel. Hoe lager hun kookpunt, hoe sneller ze verdampen. Ether, met een kookpunt van 35 °C, zal bij kamertemperatuur snel verdampen.

fig. 4

Een fluitketel met kokend water.



Het verdampen kunnen we op vier manieren bevorderen:

- door de damp die boven de vloeistof ontstaat steeds te verwijderen. (Wasgoed droogt sneller als het waait);
- door de damp zo snel weg te pompen dat er onderdruk ontstaat. (Suikerstroop wordt ingedikt in vacuümketels);
- door het oppervlak te vergroten. (Vloeistof verdampst op een schoteltje sneller dan uit een flesje);
- door de temperatuur te verhogen. (Saus kun je indikken door hem, zonder deksel op de pan, te laten koken).

Blok 17

W1

1 Welke fase-overgang vindt er plaats als:

- a een regenplas opdroogt;
- b sneeuw wegvriest;
- c door afkoeling mist ontstaat;
- d kaarsvet boven op een kaars vloeibaar wordt;
- e vet in een braadpan bij afkoelen hard wordt;
- f soldeertin vloeibaar wordt na aanraken met een hete solderbout;
- g jodiumdamp na afkoeling vast wordt?

2 Bij welke fase-overgangen komt energie (warmte) vrij?

3a Waarom moet je bij het koken van eten het deksel op de pan houden?

b Als er via het deksel water verdwijnt, is dit dan in de vorm van gas, damp of stoom?

4 Wat is het verschil tussen een damp en een gas?

5 Zweten zorgt ervoor dat de lichaamstemperatuur niet te hoog oploopt. Geef hiervoor een verklaring.

6 Wat gebeurt er bij de fase-overgang van vloeistof naar gas met:

- a de afstand tussen de molekulen?
- b de aantrekkingskracht tussen de molekulen?

7 Verklaar met het molekuulmodel de fase-overgang van vloeistof naar vaste stof.

8 Verklaar met het molekuulmodel wat er met de molekulen gebeurt als we de temperatuur van een gas verhogen.

9 - Vloeistoffen vertonen diffusie.

- Bij het mengen van water en spiritus wordt het totale volume kleiner.

Verklaar deze verschijnselen met behulp van het molekuulmodel.

10 Waterdruppels blijven aan een ruit plakken. Het is moeilijk om de druppels samen te voegen. Water in een maatcilinder heeft een holle meniscus.

a Hoe heet het verschijnsel dat twee verschillende stoffen elkaar aantrekken?

Kwikdruppels daarentegen zijn op een glasplaat gemakkelijk bij elkaar te voegen en kwik heeft in een maatcilinder een bolle meniscus.

b Geef hiervoor een verklaring.

fig. 5
Een druppelende waterkraan.



11 Als een kraan niet goed wordt dichtgedraaid, komen er druppels uit. Kennelijk vormen de watermolekulen eerst druppels voor ze naar beneden vallen.

a Met welke eigenschap van molekulen kun je verklaren dat er druppels worden gevormd?

b Waarom zijn de druppels steeds even groot als ze van de kraan af vallen?

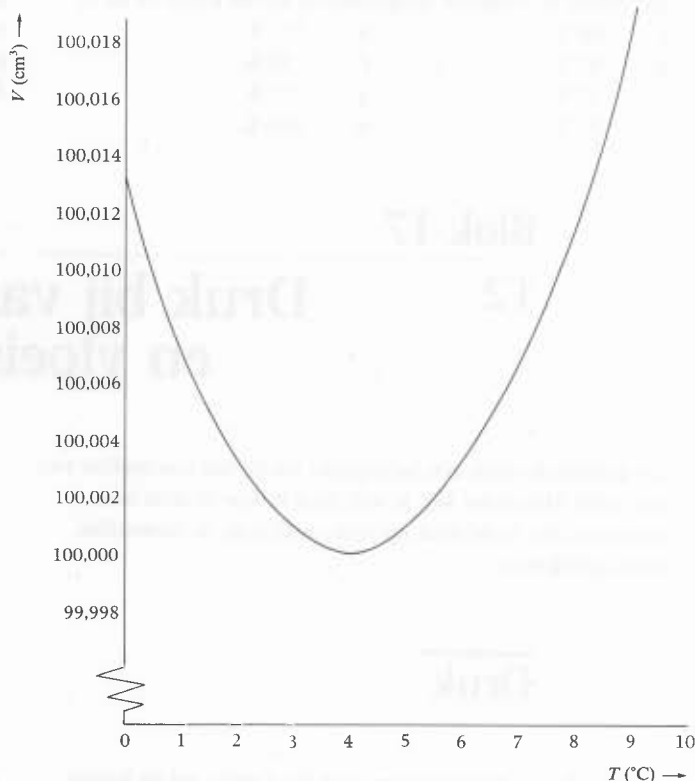
12 Voor de meeste stoffen geldt: als je een hoeveelheid van die stof in de vloeibare fase en een hoeveelheid in de vaste fase bij elkaar doet, zinkt de vaste stof in de vloeistof. (IJs is hierop een uitzondering.)

a Wat zegt dit over de dichtheden van de meeste stoffen in de vaste respectievelijk vloeibare fase?

b Verklaar dit met behulp van het molekuulmodel.

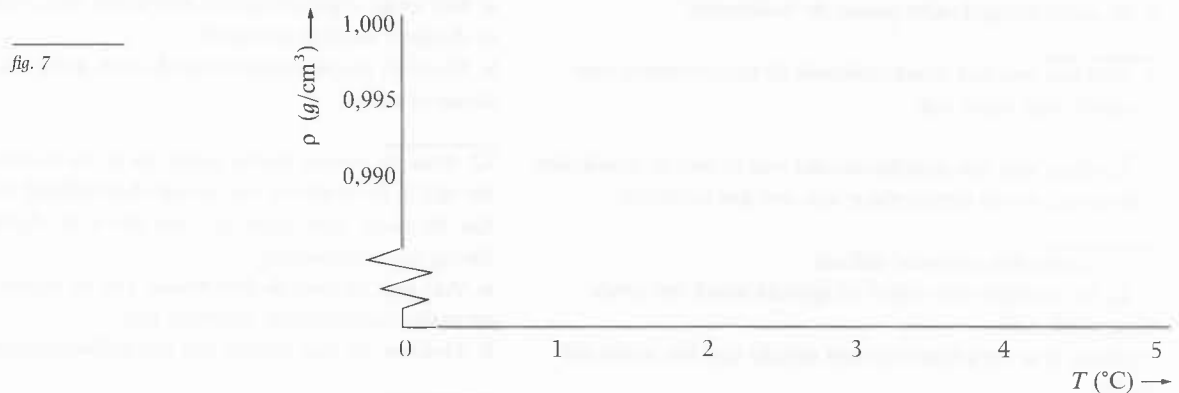
13 Een hoeveelheid water heeft een massa van 100 g en een temperatuur van 10 °C. Dit water wordt afgekoeld tot 0 °C. Na elke graad temperatuurdaling wordt het volume van het water gemeten. Het resultaat is in het diagram weergegeven (figuur 6). De verdamping van het water is te verwaarlozen.

fig. 6
Het verband tussen de volume-
verandering van water en de
temperatuur.



a Uit de grafiek blijkt dat de volumeverandering van water bij afkoeling van 4 °C tot 0 °C anders verloopt dan bij de meeste stoffen. Licht dit toe.

b Neem het diagram van figuur 7 over en schets in het diagram hoe de dichtheid van water afhangt van de temperatuur tussen 0 °C en 5 °C (niet rekenen).



14 Op de bodem van diepe ijszeen is de temperatuur van het water 4 °C. Verklaar dit.

15a Wat is de laagst bereikbare temperatuur en hoe wordt dit punt genoemd?

b Welke temperatuurschaal heeft dit punt als nulpunt?

c Maak duidelijk waarom er geen lagere temperatuur kan bestaan.

16 Reken de volgende temperaturen om in kelvin of in °C:

- | | |
|----------|-----------|
| a 100 °C | e -273 °C |
| b 52 °C | f 99 K |
| c 237 °C | g 273 K |
| d -20 °C | h 295 K |

17 Stel dat de uitzettingscoëfficiënt van kwik even groot was als die van het glas van de thermometer en die thermometer wijst 20 °C aan. Wat zou hij dan gaan aanwijzen als je hem in een bekeerglas met water van 80 °C dompelde?

18 Bij de proef van Leslie wordt een klein schaalpje met 10 cm³ water van 30 °C onder de stolp van een vacuümpomp gezet. Daarna worden lucht en waterdamp met een sterke pomp weggezogen. Het water in het schaalpje begint al snel heftig te koken, en na enige minuten gaat het resterende water in het schaalpje plotseling over in ijs. Er wordt wel gezegd dat 'het water zichzelf heeft koud gekookt'. Verklaar deze proef.

Blok 17

T2

Druk bij vaste stoffen en vloeistoffen

De luchtdruk speelt een belangrijke rol bij het voorspellen van het weer. Hieronder leer je wat druk is, hoe je druk kunt meten en hoe je de druk op vaste stoffen en in vloeistoffen kunt uitrekenen.

Druk

Als je met een hamer op een stuk hout slaat, zal de hamer nauwelijks in het hout doordringen. Sla je echter met de hamer even hard op een spijker die op het hout staat, dan zal de spijker wél een eind in het hout doordringen. Hoe kun je dit nu verklaren?

Als we de oppervlakten vergelijken waarop de kracht wordt uitgeoefend, dan blijkt dat de oppervlakte van de spijkerpunt vele malen kleiner is dan de oppervlakte van de hamer. De kracht werkt bij de spijker op een veel kleinere oppervlakte. De kracht die per cm² of per mm² wordt uitgeoefend, is bij de

spijker dus veel groter dan bij de hamer.

Om dit verschil aan te geven, gebruiken we de grootte druk. De druk is de kracht die per oppervlakte-eenheid wordt uitgeoefend. Het symbool van druk is de p (van *pressure*). Je kunt de druk uitrekenen, door de kracht te delen door de oppervlakte (symbool: A van *area*).

In formulevorm: $p = \frac{F}{A}$

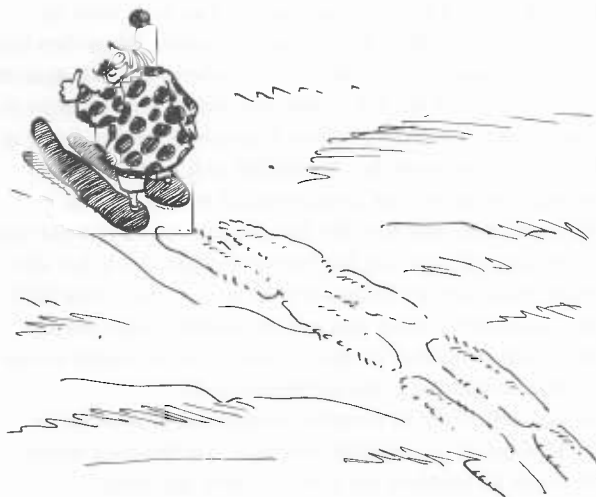
De eenheid van druk is de pascal (Pa).

Een druk van 1 Pa komt overeen met een kracht van 1 N per m^2 . Dus: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$.

Soms wordt de druk echter weergegeven in N/cm^2 of in N/mm^2 .

Uit de volgende voorbeelden blijkt dat de oppervlakte waarop de kracht werkt een belangrijke rol speelt.

Als een dame op schoenen met naaldhakken over een zandpad loopt, zal zij heel andere afdrukken achterlaten dan wanneer zij schoenen met platte hakken draagt. De afdrukken van de naaldhakken zijn veel dieper dan de afdrukken van de platte hakken. De kracht is in beide gevallen hetzelfde (het gewicht van de dame). Maar de oppervlakte van de naaldhakken is veel kleiner dan de oppervlakte van de platte hakken. De druk die de naaldhakken uitoefenen is dus groter.



Een ander voorbeeld is het lopen over een dikke laag sneeuw. In een dikke vers gevallen sneeuwlaag zak je diep weg. Maar als je sneeuwschoenen onder je schoenen draagt (een soort tennisrackets die je onder je schoen bindt), zak je veel minder diep weg. Met die sneeuwschoenen heb je de oppervlakte waarop je staat vergroot. De druk wordt daardoor veel kleiner.

Druk bij vaste stoffen

Vaste stoffen oefenen druk uit door hun eigen gewicht. Het gewicht van een hoeveelheid stof berekenen we met:

$$G = m \cdot g;$$

waarin m de massa is in kg en g de valversnelling. De valversnelling is $9,8 \text{ m/s}^2$, maar we gebruiken vaak de afgeronde waarde 10 m/s^2 . Omdat een voorwerp alleen drukt op de

ondergrond waarop het rust, kunnen we de uitgeoefende druk eenvoudig berekenen met de formule:

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

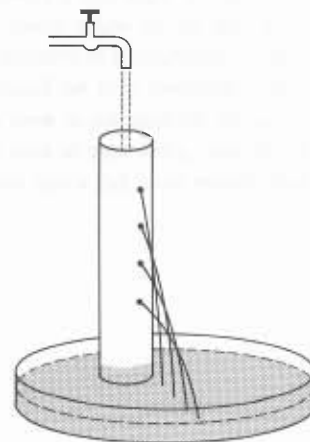
De kracht F is hier dus het gewicht van het voorwerp, A is de grootte van het contactoppervlak.

Druk bij vloeistoffen

Ook vloeistoffen hebben gewicht en oefenen daardoor druk uit. Hoe dieper je in een vloeistof bent, hoe meer vloeistof er boven je zit, dus hoe groter de druk is. Maar een vloeistof oefent ook druk uit op de wanden. Figuur 8 laat dit zien; uit de onderste gaatjes spuit het water verder.

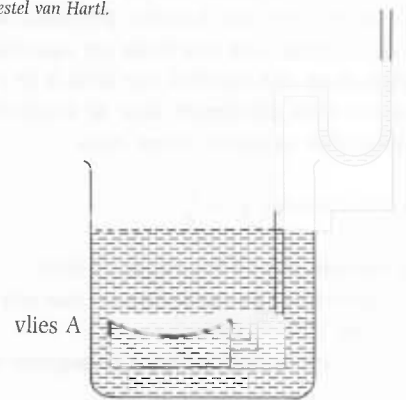
Je kunt dit verklaren met het molekuulmodel: de molekulen bewegen in alle richtingen en botsen daarbij ook tegen de wanden. De druk die op de wand wordt uitgeoefend, is het gevolg van de botsingen van de molekulen. Omdat er tegen elke cm^2 van de wand per seconde zéér veel molekulen botsen, wordt dit als een constante druk ervaren.

fig. 8



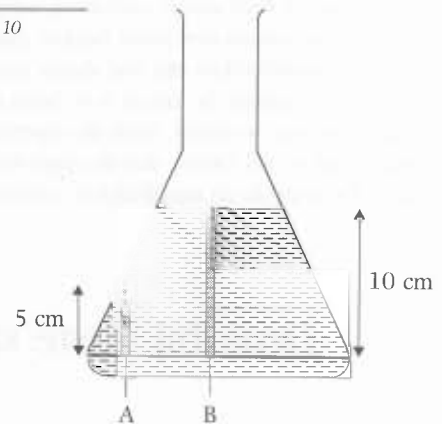
Met het toestel van Hartl uit figuur 9 kun je de druk op verschillende hoogten in een vloeistof meten. Bovendien kun je het vlak waarop de druk werkt, in allerlei standen draaien. Doordat het vlies dat het trommeltje afsluit wordt ingedrukt, treedt er een verschil op tussen de niveaus van het water in de U-buis. Hoe dieper het trommeltje zich in de vloeistof bevindt, hoe groter het hoogteverschil in de U-buis is. Het trommeltje met het vlies kan draaien ter hoogte van punt A (het zwaartepunt van het vliesoppervlak). Als je het vlies draait, blijkt dat het niveauverschil in de U-buis gelijk blijft (het zwaartepunt moet dan wel op dezelfde diepte blijven). Met andere woorden: de druk op een bepaalde diepte in een vat met vloeistof is in alle richtingen gelijk. Ook zal blijken dat in hetzelfde horizontale vlak onder de vloeistofspiegel, in éénzelfde vloeistof, dezelfde druk heerst. Dit wordt de *hoofdwet van de hydrostatica* genoemd.

fig. 9
Het toestel van Hartl.



In figuur 10 is een taps toelopend glazen vat getekend, een zogenaamde erlenmeyer. Er zit water in. De dikke lijn geeft een niveau 10 cm onder de waterpiegel aan. Op vlakje B drukt een kolom van 10 cm water. Op vlakje A drukt een kolom van 5 cm water. Maar ook nu blijkt de hoofdwet van de hydrostatica te kloppen: als je de druk meet, vind je dat de druk bij A gelijk is aan de druk bij B. Boven A staat wel een kolom water van 5 cm hoogte, maar A ligt wél 10 cm onder de waterpiegel!

fig. 10

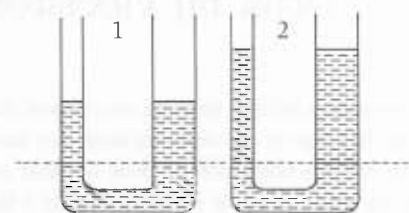


Een U-buis

In een U-buis, gevuld met het water, staat het water links en rechts even hoog. Het maakt daarbij niet uit of het ene been dikker is dan het andere.

In figuur 11 zie je zo'n met water gevulde U-buis. Door de U-buis is een stippellijn getrokken. In het linkerbeen staat een even hoge kolom water boven de stippellijn als in het rechterbeen. Blijkbaar is er evenwicht, want er stroomt geen water. Wanneer je in het linkerbeen water bijgiet, dan gaat het water stromen tot er weer evenwicht is. De druk links wordt weer gelijk aan de druk rechts (op dezelfde hoogte). In beide benen staat het water dan weer even hoog.

fig. 11
Een U-buis met water.



na toevoeging van
water in het linkerbeen

Het berekenen van de vloeistofdruk

In figuur 12 is een glas getekend dat is gevuld met water. Het water staat 10 cm hoog. De druk die de vloeistofkolom op het bodemvlak *A* uitoefent, bereken je als volgt. Boven elke cm^2 van vlak *A* staat een kolom water van 10 cm hoogte, met een doorsnede van één cm^2 . Als we het gewicht van deze kolom berekenen, weten we hoe groot de kracht is die op één cm^2 werkt.

We berekenen eerst de massa van de kolom. Daarna berekenen we uit de massa het gewicht. Dit gewicht is gelijk aan de druk die de vloeistofkolom uitoefent.

$$\begin{aligned}\text{De massa: } m &= \rho \cdot V \\ V &= 10 \text{ cm}^3 \\ \rho &= 1 \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$

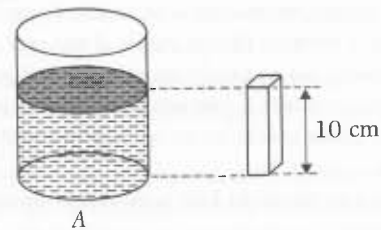
Invullen:

$$m = 1 \cdot 10 = 10 \text{ g}$$

$$\begin{aligned}\text{Het gewicht: } G &= m \cdot g \text{ (} m \text{ in kg)} \\ G &= 0,01 \cdot 10 = 0,1 \text{ N}\end{aligned}$$

Op 1 cm^2 werkt een kracht van 0,1 N. De druk is dus:
 $0,1 \text{ N/cm}^2 = 1000 \text{ N/m}^2 = 1000 \text{ Pa} = 1,0 \text{ kPa}$.

fig. 12



$1 \text{ m}^2 = 100 \cdot 100 = 10\,000 \text{ cm}^2$. Als op 1 cm^2 een kracht werkt van 0,1 N, dan werkt op 1 m^2 een kracht van $0,1 \cdot 10\,000 = 1000 \text{ N}$.

Druk op vloeistoffen

Bij vloeistoffen is de aantrekkende kracht tussen de molekulen veel kleiner dan bij vaste stoffen. De molekulen kunnen vrij langs elkaar bewegen. Als er een kracht op een vloeistof wordt uitgeoefend, geven de molekulen deze kracht in alle richtingen door. De Franse natuurkundige en filosoof Pascal (1623-1662) heeft dit ontdekt en in een wet vastgelegd.

Wet van Pascal:

Een kracht op een vloeistof wordt in alle richtingen doorgegeven, zodat de druk in de vloeistof overal even groot is.

Het hydraulische remsysteem

Een toepassing van deze wet is het hydraulische remsysteem in een auto (figuur 13).

Bij remmen drukt het rempedaal de zuiger van de hoofdremcilinder in. Deze is via dunne remleidingen verbonden met de remcilinders bij de vier wielen. Remcilinders en -leidingen zijn gevuld met olie. Bij het remmen wordt de kracht van het rempedaal overgebracht naar alle vier de remcilinders.

De druk die (via het rempedaal) op de hoofdremcilinder wordt uitgeoefend, is even groot als de druk die op de remcilinders bij de wielen wordt uitgeoefend.

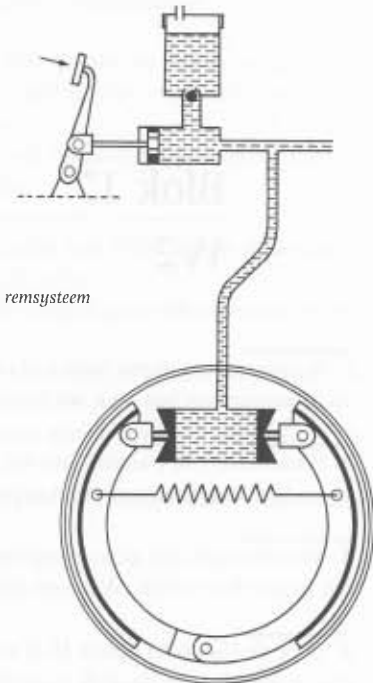


fig. 13
Het hydraulische remsysteem van een auto.

T3 Luchtdruk en druk bij gassen

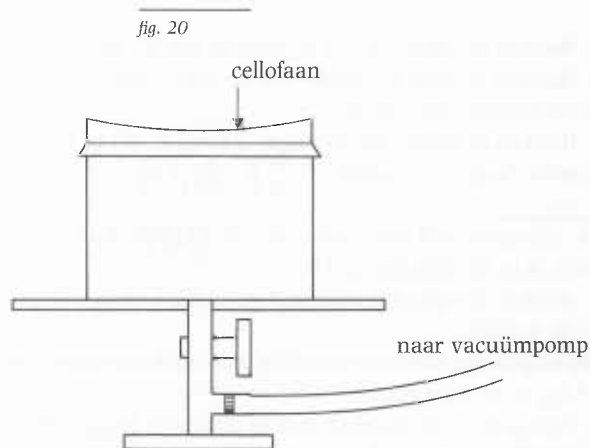
De luchtdruk speelt een belangrijke rol bij het weer. Bij hoge luchtdruk kunnen we meestal goed weer verwachten en bij lage luchtdruk is het weer vaak slecht. Hieronder gaan we na hoe de luchtdruk ontstaat en hoe je de druk van lucht (en andere gassen) kunt meten.

Luchtdruk

De lucht van onze dampkring bestaat hoofdzakelijk uit de gassen stikstof (78 %) en zuurstof (21 %). Andere gassen – zoals waterdamp, koolstofdioxide en enkele edelgassen – komen slechts in kleine hoeveelheden in de lucht voor; in totaal maken zij 1 % van de lucht uit.

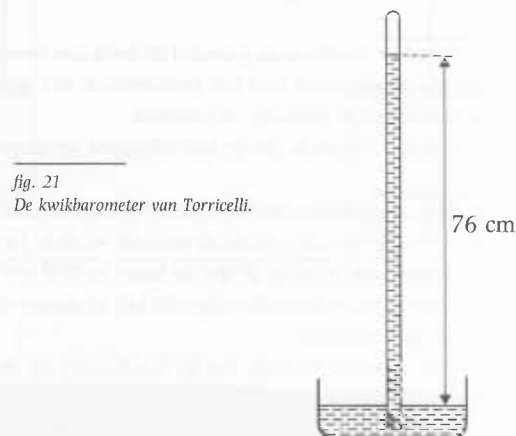
De gassen in de dampkring veroorzaken een bepaalde druk op aarde: de luchtdruk. Deze luchtdruk ontstaat door het gewicht van de lucht, dus door de zwaartekracht die er op werkt. Omdat de molekulen van de lucht naar alle kanten bewegen, werkt die druk in alle richtingen. Zo werkt de luchtdruk zowel op de boven- als op de onderkant van je (horizontaal gehouden) hand. Theoretisch is de druk op de onderkant iets groter, omdat die zich 'dieper in de luchtzee' bevindt. Maar dat drukverschil is over zo'n klein hoogteverschil natuurlijk te verwaarlozen.

Dat de lucht een druk uitoefent, blijkt bijvoorbeeld als we de lucht wegzuigen uit een vat, dat aan de bovenkant is afgesloten met cellofaanfolie (figuur 20).



Door de druk van de buitenlucht wordt het folie eerst naar binnen gedrukt. Het scheurt als het drukverschil te groot wordt.

Lucht kun je gemakkelijk samenpersen. De druk wordt dan vergroot. Als je die samengeperste lucht in je fietsband pompt wordt de band dus hard.



In 1643 maakte de Italiaan Torricelli als eerste een instrument waarmee de luchtdruk kan worden gemeten: de kwikbarometer (figuur 21). Hij gebruikte een aan één kant afgesloten buis, die hij tot aan de rand vulde met kwik. De afgesloten buis plaatste hij omgekeerd in een bakje met kwik en hij maakte de opening pas vrij, toen deze zich onder het kwikniveau bevond. Het kwik in de buis bleef 75 cm boven het vloeistofniveau in de bak staan.

Boven in de buis heerst een vacuüm. Als de luchtdruk verandert, verandert ook het hoogteverschil tussen het kwik in de buis en het kwik in de bak.

De Fransman Pascal verklaarde dit verschijnsel als volgt: de buitenlucht drukt op het kwik in de bak en drukt het kwik in de buis omhoog. De zwaartekracht werkt echter in tegengestelde richting op de kwikkolom. Er is evenwicht als de druk van de buitenlucht gelijk is aan de druk, die de kwikkolom op het kwik in de bak uitoefent. De luchtdruk komt dus overeen met de druk die een kolom kwik met een lengte van 75 cm uitoefent.

De druk van een kwikkolom van 75 cm kwikdruk is gelijk aan 100 kPa.

De massa van een 75 cm hoge kwikkolom met een doorsnede van 1 cm^2 is gelijk aan: $75 \text{ cm}^3 \cdot 13,6 \text{ g/cm}^3 = 1020 \text{ g}$ of $1,02 \text{ kg}$. Het gewicht daarvan is: $1,02 \cdot 9,8 = 10 \text{ N}$. Deze kracht van 10 N werkt dus op 1 cm^2 en veroorzaakt een druk van $10 \text{ N/cm}^2 = 100\,000 \text{ N/m}^2 = 100 \text{ kPa}$.

5 Beschrijf met het molekuulmodel waarom vloeistoffen op de wanden van een vat druk uitoefenen.

6a Wat is de eenheid van druk?

b Op welke manier kan die eenheid worden uitgedrukt in N en m^2 ?

Bereken in de vragen 7 t/m 13 de druk in Pa of kPa.

7 Een kist staat op de grond. Hij heeft een massa van 150 kg. De oppervlakte van het grondvlak is $0,3 \text{ m}^2$.

a Bereken het gewicht van de kist.

b Bereken de druk die de kist uitoefent op de grond.

8 Een vrachtauto met zes wielen weegt 30 000 N. Het gewicht is gelijkmatig verdeeld over de wielen. De oppervlakte waarmee één wiel op de grond staat is 200 cm^2 .

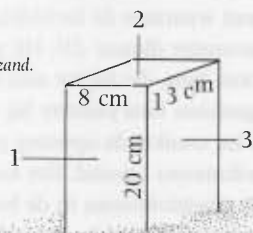
a Hoe groot is de totale oppervlakte waarmee de vrachtauto op de grond staat?

b Hoe groot is de druk, die de vrachtauto op de grond uitoefent?

9 Een blok koper ligt in het zand. De afmetingen van het blok staan in figuur 17. De massa van het blok is 16 kg.

fig. 17

Een blok koper ligt in het zand.



a Bereken het gewicht van het blok.

b Bereken de druk die het blok op het zand uitoefent als kant 1 onder ligt.

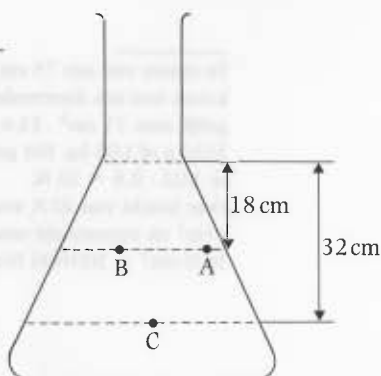
c Bereken de druk als kant 2 onder ligt.

d Bereken de druk als kant 3 onder ligt.

e In welk van de gevallen (b, c of d) zakt het blok het verst weg in het zand? Licht je antwoord toe.

10 In figuur 18 is een erlenmeyer met water getekend. Het wateroppervlak staat bij de hoogste stippellijn. Bereken de druk in de punten A, B en C, als gegeven is dat een kolom water met een hoogte van 1 cm een druk uitoefent van 100 N/m^2 .

fig. 18



11 In een glas zit $0,6 \text{ dm}^3$ water. De oppervlakte van de bodem is 12 cm^2 .

a Hoe groot is de dichtheid van water?

b Bereken de massa van het water in het glas.

c Bereken het gewicht van het water.

d Bereken de druk van het water op de bodem.

12a Waarom kan bij een hydraulisch systeem de kracht over een grote afstand worden uitgeoefend?

b Waarom werkt een gesloten systeem, gevuld met gas, veel minder goed dan zo'n systeem gevuld met vloeistof?

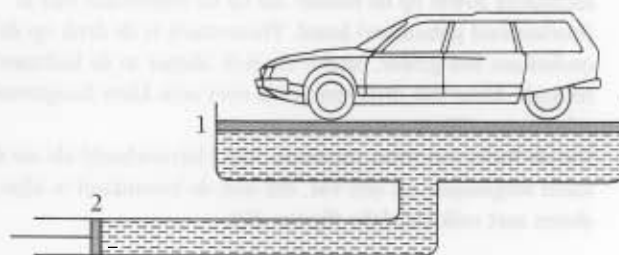
13 Op zuiger 1 van een hydraulische hefbrug (figuur 19) staat een auto. Met zuiger 2 wordt een zodanige kracht uitgeoefend, dat het geheel in evenwicht is.

Gegevens:

Massa auto = 700 kg; massa zuiger 1 = 100 kg. Oppervlakte zuiger 1 = $8,0 \text{ m}^2$; oppervlakte zuiger 2 = $0,010 \text{ m}^2$; massa zuiger 2 is te verwaarlozen.

fig. 19

Een hydraulische hefbrug.



a Bereken het gewicht van de auto en van de zuiger.

b Bereken de druk die zuiger 1 en de auto samen op de olie in het systeem uitoefenen.

c Bereken de kracht die op zuiger 2 nodig is om de auto op dezelfde hoogte te houden.

14 Een auto heeft een massa van 1400 kg. De druk van de lucht is in alle banden 200 kPa.

a Bereken hoe groot het contactoppervlak is tussen de grond en de banden.

Vervolgens gaan er vier personen, ieder met een massa van 75 kg, in de auto zitten.

b Wat gebeurt er daardoor met de druk van de lucht in de banden?

c Bereken opnieuw hoe groot het contactoppervlak is tussen grond en banden.

T3 Luchtdruk en druk bij gassen

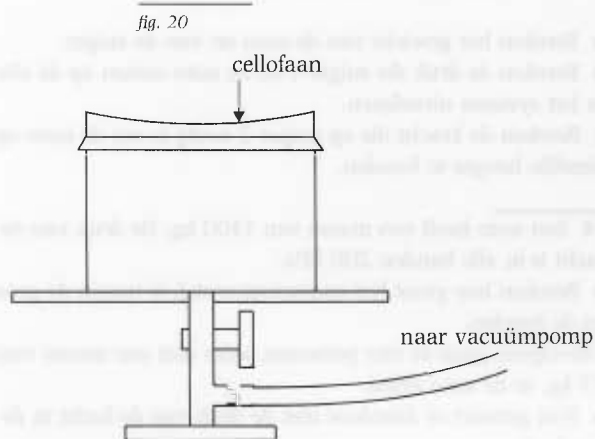
De luchtdruk speelt een belangrijke rol bij het weer. Bij hoge luchtdruk kunnen we meestal goed weer verwachten en bij lage luchtdruk is het weer vaak slecht. Hieronder gaan we na hoe de luchtdruk ontstaat en hoe je de druk van lucht (en andere gassen) kunt meten.

Luchtdruk

De lucht van onze dampkring bestaat hoofdzakelijk uit de gassen stikstof (78%) en zuurstof (21%). Andere gassen – zoals waterdamp, koolstofdioxide en enkele edelgassen – komen slechts in kleine hoeveelheden in de lucht voor; in totaal maken zij 1% van de lucht uit.

De gassen in de dampkring veroorzaken een bepaalde druk op aarde: de luchtdruk. Deze luchtdruk ontstaat door het gewicht van de lucht, dus door de zwaartekracht die er op werkt. Omdat de molekulen van de lucht naar alle kanten bewegen, werkt die druk in alle richtingen. Zo werkt de luchtdruk zowel op de boven- als op de onderkant van je (horizontaal gehouden) hand. Theoretisch is de druk op de onderkant iets groter, omdat die zich 'dieper in de luchtzee' bevindt. Maar dat drukverschil is over zo'n klein hoogteverschil natuurlijk te verwaarlozen.

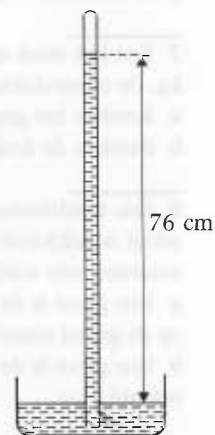
Dat de lucht een druk uitoefent, blijkt bijvoorbeeld als we de lucht wegzuigen uit een vat, dat aan de bovenkant is afgesloten met cellofaanfolie (figuur 20).



Door de druk van de buitenlucht wordt het folie eerst naar binnen gedrukt. Het scheurt als het drukverschil te groot wordt.

Lucht kun je gemakkelijk samenpersen. De druk wordt dan vergroot. Als je die samengeperste lucht in je fietsband pompt wordt de band dus hard.

fig. 21
De kwikbarometer van Torricelli.



In 1643 maakte de Italiaan Torricelli als eerste een instrument waarmee de luchtdruk kan worden gemeten: de kwikbarometer (figuur 21). Hij gebruikte een aan één kant afgesloten buis, die hij tot aan de rand vulde met kwik. De afgesloten buis plaatste hij omgekeerd in een bakje met kwik en hij maakte de opening pas vrij, toen deze zich onder het kwikniveau bevond. Het kwik in de buis bleef 75 cm boven het vloeistofniveau in de bak staan.

Boven in de buis heerst een vacuüm. Als de luchtdruk verandert, verandert ook het hoogteverschil tussen het kwik in de buis en het kwik in de bak.

De Fransman Pascal verklaarde dit verschijnsel als volgt: de buitenlucht drukt op het kwik in de bak en drukt het kwik in de buis omhoog. De zwaartekracht werkt echter in tegengestelde richting op de kwikkolom. Er is evenwicht als de druk van de buitenlucht gelijk is aan de druk, die de kwikkolom op het kwik in de bak uitoefent. De luchtdruk komt dus overeen met de druk die een kolom kwik met een lengte van 75 cm uitoefent.

De druk van een kwikkolom van 75 cm kwikdruk is gelijk aan 100 kPa.

De massa van een 75 cm hoge kwikkolom met een doorsnede van 1 cm^2 is gelijk aan: $75 \text{ cm}^3 \cdot 13,6 \text{ g/cm}^3 = 1020 \text{ g}$ of $1,02 \text{ kg}$. Het gewicht daarvan is: $1,02 \cdot 9,8 = 10 \text{ N}$.

Deze kracht van 10 N werkt dus op 1 cm^2 en veroorzaakt een druk van $10 \text{ N/cm}^2 = 100\,000 \text{ N/m}^2 = 100 \text{ kPa}$.

Luchtdruk wordt in de weerkunde uitgedrukt in mbar (milli-bar).

$1 \text{ mbar} = 0,001 \text{ bar}$; $1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$, dus $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$.

De gemiddelde luchtdruk op zeeniveau is $100\,000 \text{ Pa}$. Dit komt dus overeen met 1000 mbar .

Voor het meten van de luchtdruk gebruikt men meestal geen kwikkolom, maar een zogenaamde metaalbarometer; die is veel gemakkelijker in het gebruik. Dit door Vidi uitgevonden instrument (figuur 22) reageert op *veranderingen* van de luchtdruk, en moet dus met een kwikbarometer worden geijkt. Pas dan kun je er mee *meten*!

Deze barometer bestaat uit een (bijna) luchtledig metalen doosje met een dun, gegolfd deksel. Als de luchtdruk verandert, wordt het deksel méér of mínder ingedrukt. Een wijzer, die via een systeem van hefboomen met het deksel is verbonden, geeft de verandering van de druk weer. De luchtdruk op een barometer wordt aangegeven in mbar en/of in cm kwikdruk (cm Hg).

De gemiddelde luchtdruk op de aarde is op zeeniveau ongeveer 1000 mbar . In de onderste lagen van de dampkring neemt de luchtdruk van beneden naar boven af met ongeveer

fig. 22
De metaalbarometer van Vidi.



10 mbar per 100 meter . Zo is de druk op 2000 meter hoogte nog ongeveer 800 mbar . De bovenste luchtlagen worden steeds ijler. Ze bevatten steeds minder molekulen per m^3 vergeleken met de onderste lagen. Daardoor neemt de luchtdruk in de hoger gelegen lagen steeds minder af per 100 m .

Druk bij gassen

De molekulen van een gas kunnen vrij bewegen. De druk van een gas ontstaat dan ook door botsingen van de molekulen tegen de wanden van de ruimte, waarin het gas zich bevindt. Wordt de ruimte kleiner gemaakt, dan zullen er meer botsingen per cm^2 per seconde tegen de wanden plaatsvinden, waardoor de druk van het gas toeneemt.

De druk van een gas kan óók toenemen door temperatuurverhoging. De molekulen gaan dan sneller bewegen: hun gemiddelde snelheid neemt dus toe. Daardoor botsen ze per cm^2 per seconde harder én vaker tegen de wanden van de ruimte. (Let op: er zijn nu *twee* oorzaken voor de druktoename!)

Als de druk in een ruimte lager is dan de luchtdruk, zegt men dat er een *onderdruk* heerst. Is er een hogere druk, dan spreekt men van een *overdruk*.

Gasdruk meet je met een manometer. Een voorbeeld hiervan is de vloeistofmanometer in de vorm van een U-buis.

Als je de U-buis via een slang op de gaskraan aansluit, ontstaat er een hoogteverschil tussen de vloeistofniveaus in de benen van de U-buis (figuur 23). Ter hoogte van de stippellijn geldt (hoofdwet hydrostatica):

$$p_{\text{links}} = p_{\text{rechts}}$$

Links drukt alleen het gas: p_{gas} .

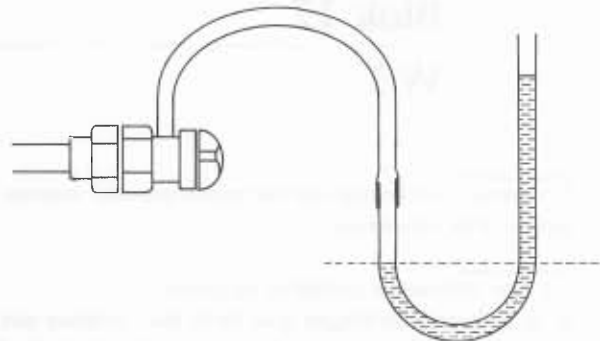
Rechts drukken de lucht én de vloeistofkolom:

$$p_{\text{lucht}} + p_{\text{vloeistof}}$$

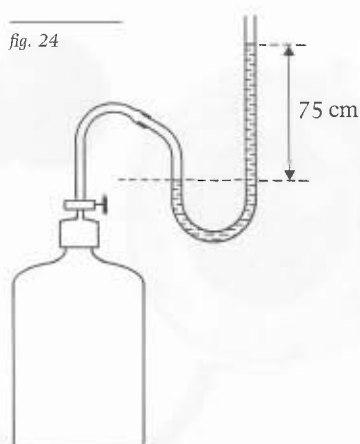
Als je de luchtdruk weet en het hoogteverschil meet, kun je de druk van het gas berekenen met:

$$p_{\text{gas}} = p_{\text{lucht}} + p_{\text{vloeistof}}$$

fig. 23
Een U-buis als vloeistofmanometer.



Voorbeeld



Een U-buis, gevuld met water, is aangesloten op een vat met gas (figuur 24). Als de gaskraan wordt geopend, stijgt het water in het rechterbeen. Het niveauverschil is 75 cm. Ter hoogte van de stippellijn is de druk in het linker- en rechterbeen gelijk: $p_{\text{links}} = p_{\text{rechts}}$. p_{links} is de druk van het gas. p_{rechts} is de druk van het water plus de druk van de buitenlucht. De druk van de buitenlucht is 10 N/cm^2 . De druk van het water kunnen we berekenen. De massa van een waterkolom van 75 cm hoogte met een doorsnede van 1 cm^2 is 75 gram. Het gewicht daarvan is 0,75 N. De druk is dus $0,75 \text{ N/cm}^2$.

De druk van het gas is nu te berekenen:

$$p_{\text{links}} = p_{\text{rechts}}$$

$$p_{\text{gas}} = p_{\text{lucht}} + p_{\text{water}}$$

$$p_{\text{gas}} = 10 + 0,75 = 10,75 \text{ N/cm}^2.$$

Vloeistofmanometers zijn voor technisch gebruik veel te kwetsbaar. Men gebruikt dan metaalmanometers, meestal een membraanmanometer (figuur 25). De veranderende druk van het gas duwt het gegolfde membraan wat meer of wat minder omhoog. Een wijzer, die via een overbrenging verbonden is met het membraan, geeft de druk aan. Net als de barometer van Vidi moet een membraanmanometer met een vloeistofmanometer worden geijkt om ermee te kunnen meten. Tegenwoordig zijn ook druksensoren te koop die op een computer kunnen worden aangesloten. Zo kun je drukmeting automatiseren.

fig. 25
Een metaalmanometer met membraan.



Blok 17

W3

1 Verklaar met behulp van het molekuulmodel waarom gassen druk uitoefenen.

2a Hoe ontstaat de luchtdruk op aarde?

b In de hogere luchtlagen is de lucht ijler. Verklaar met behulp van het molekuulmodel waarom de luchtdruk afhangt van de hoogte boven het aardoppervlak.

3 Beschrijf een proef waarmee je kunt aantonen dat lucht een druk uitoefent.

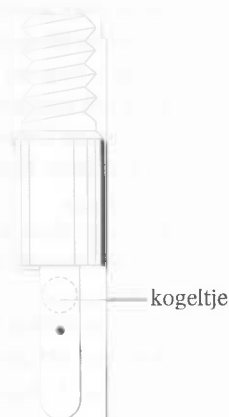
4 Het ventiel van de band van een racefiets bestaat uit een busje, waarin een kogeltje zit dat vrij kan bewegen. Het kogeltje kan de luchtdoorvoer afsluiten. Een ventiel met een ventielslangetje is vanwege de hogere bandenspanning hier

niet geschikt (figuur 26).

a Waarvoor dient het ventiel in een fietsband?

b Waarom stroomt de lucht tijdens het oppompen niet direct terug?

fig. 26
Het ventiel van de band van een racefiets.



5a In welke eenheid wordt luchtdruk in de weerkunde gemeten?

b Hoe groot is de luchtdruk die op aarde gemiddeld het meest voorkomt?

c Noem twee apparaten waarmee de luchtdruk kan worden gemeten.

d Met hoeveel pascal komt 1000 mbar overeen?

6 Welk instrument was er eerder: de kwikbarometer van Torricelli of de metaalbarometer van Vidi? Verklaar je antwoord. (Opmerking: het juiste antwoord heeft niets met kennis van jaartallen te maken!)

7 Verklaar met de molekuultheorie waardoor de druk van een afgesloten hoeveelheid gas verandert als je dit gas:

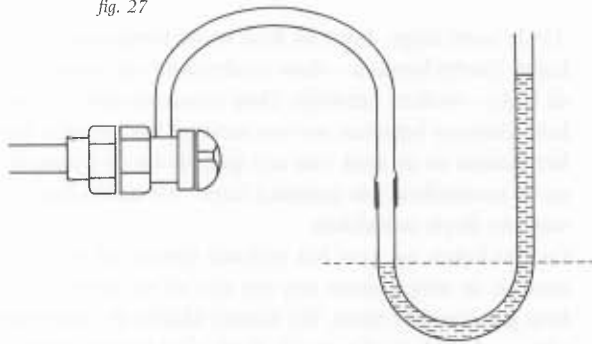
a samenperst bij constante temperatuur;

b verwarmt bij constant volume.

8 In figuur 27 zie je een U-buis, die is verbonden met een gaskraantje. Door de gasdruk staat het water in het ene been 15 cm hoger dan in het andere been. De luchtdruk is 10 N/cm^2 .

Bereken de druk van het gas in N/cm^2 en in kPa.

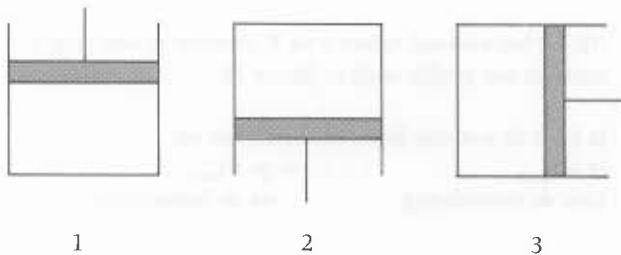
fig. 27



9 In figuur 28 zie je een vat, afgesloten door een zuiger die in drie verschillende standen is getekend. De oppervlakte van de zuiger is 10 cm^2 , de massa van de zuiger is $2,0 \text{ kg}$. De luchtdruk is 10 N/cm^2 .

Bereken de druk van het gas onder de zuiger in de standen 1, 2 en 3.

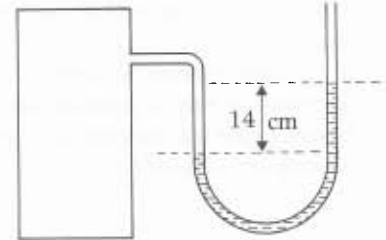
fig. 28



10 Met een vloeistofmanometer meten we de druk van het gas in een vat. De manometer in figuur 29 is gevuld met kwik. Het kwik in het rechterbeen staat 14 cm hoger dan het kwik in het linkerbeen.

De luchtdruk is 10 N/cm^2 . De dichtheid van kwik is $13,6 \text{ g/cm}^3$.

fig. 29

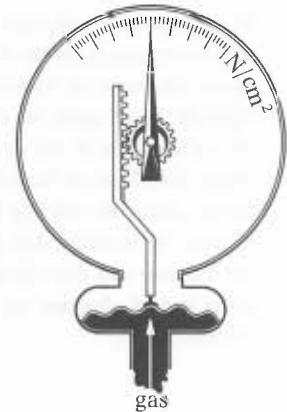


a Bereken de druk van een kolom kwik van 14 cm hoogte met een doorsnede van $1,0 \text{ cm}^2$ in N/cm^2 en in kPa.

b Bereken de druk van het gas in N/cm^2 en in kPa.

11 In figuur 30 is een metaalmanometer met een membraan getekend. (Je kwam deze op pagina 20 ook al tegen.) Leg de werking van dit apparaat uit, en verklaar wat er nodig is om ermee te kunnen meten.

fig. 30
Een metaalmanometer met membraan.



12 De druk in een vat met gas wordt gemeten met een met kwik gevulde U-buis (figuur 31). De doorsnede van de buis is $2,0 \text{ cm}^2$. De luchtdruk is 10 N/cm^2 .

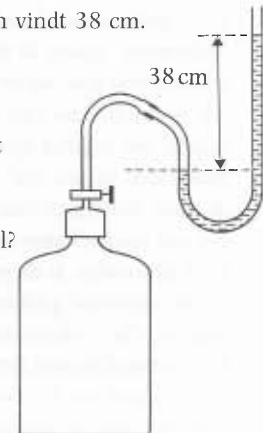
Iemand leest het hoogteverschil af en vindt 38 cm.

a Bereken de druk van het gas in N/cm^2 en kPa.

Vervolgens neemt hij een U-buis met een doorsnede van 4 cm^2 en meet opnieuw de druk.

b Hoe groot is nu het hoogteverschil? Licht je antwoord toe.

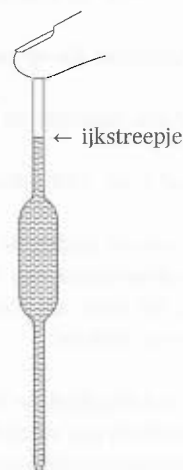
fig. 31



13 Met een pipet (figuur 32) kun je vloeistof uit een vat opzuigen. Als je de pipet tot het ijkstreepje vult kun je het volume van de vloeistof nauwkeurig afmeten. Door de bovenkant af te sluiten kan de vloeistof er niet uitstromen.

- a Is de druk boven de vloeistof in de pipet gelijk aan of kleiner dan de druk van de buitenlucht?
- b Verklaar waarom er geen vloeistof uit de pipet stroomt.
- c Als je een vloeistof met een grotere dichtheid opzuigt, moet je dan harder zuigen om de pipet te vullen? Verklaar je antwoord.
- d Verklaar waarom het afmeten van de hoeveelheid vloeistof waarvoor de pipet is gemaakt (bijvoorbeeld 25 cm^3) nauwkeuriger gaat met die pipet dan met een maatcilinder. (Bekijk eerst figuur 32 goed!)

fig. 32
Een pipet.



Blok 17

T4

De wet van Boyle en de algemene gaswet

In de atmosfeer van onze aarde vinden niet alleen horizontale luchtstromingen plaats (evenwijdig aan het aardoppervlak), maar ook verticale luchtstromingen, zowel stijgende als dalende. In T5 gaan we daar dieper op in.

De oorzaak van al die stromingen zijn drukverschillen. Nu weten we al dat de luchtdruk op grotere hoogte altijd afneemt, maar die afname kan ook abnormaal groot (of klein) worden. Er ontstaat dan een verticale luchtstroming. Ook kan het volume van een bepaalde hoeveelheid lucht in de dampkring toe- of afnemen als de temperatuur van die lucht stijgt of daalt.

Als de lucht stijgt, dalen de druk en de temperatuur van de lucht. Hierbij kunnen – door condensatie van waterdamp uit de lucht – wolken ontstaan. Deze processen zijn erg ingewikkeld. Daarom beperken we ons eerst tot het verband tussen het volume en de druk van een gas, als we de temperatuur en de hoeveelheid gas constant laten. We zullen daarbij de wet van Boyle ontdekken.

Daarna kijken we naar het verband tussen het volume, de druk en de temperatuur van een gas als we alleen de hoeveelheid gas constant laten. We komen daarbij de zogenaamde algemene gaswet (of wet van Boyle–Gay-Lussac) tegen.

De wet van Boyle

De Engelse natuurkundige Robert Boyle heeft het verband onderzocht tussen de druk en het volume van een afgesloten hoeveelheid gas, als de temperatuur constant blijft.

Als je het volume van een afgesloten hoeveelheid gas kleiner maakt, zal de druk groter worden. Er zitten dan immers meer molekulen in een cm^3 . Zodoende zullen er per cm^2 per seconde meer botsingen van de molekulen tegen de wanden van het vat plaatsvinden. Als je daarbij de temperatuur constant hebt gehouden, is de gemiddelde snelheid van de molekulen echter constant gebleven. De druk is dus *alleen* toegenomen omdat je het volume hebt verkleind.

Het verband tussen het volume en de druk van een afgesloten hoeveelheid gas bij constant blijvende temperatuur wordt gegeven door de wet van Boyle:

Het produkt van druk en volume van een gas is constant, mits de temperatuur en de hoeveelheid gas niet veranderen. In formulevorm: $p \cdot V = \text{constant}$.

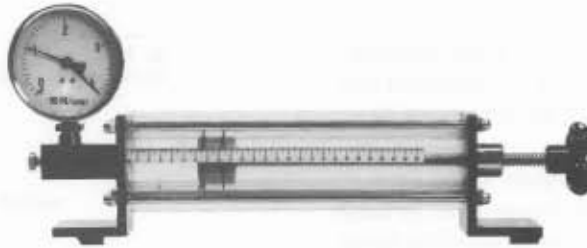
Als we het verband tussen p en V uitzetten in een diagram, ontstaat een grafiek zoals in figuur 34.

Je kunt de wet van Boyle ook schrijven als:

$$(p \cdot V)_{\text{begin}} = (p \cdot V)_{\text{eind}}$$

voor de verandering na de verandering

fig. 33



We onderzoeken het verband tussen druk en volume als volgt: in een cilinder bevindt zich 30 cm^3 lucht met een druk van 10 N/cm^2 (figuur 33). De cilinder is afgesloten door een beweegbare zuiger. Als we het volume lucht in de cilinder halveren, loopt de druk op tot 20 N/cm^2 . Als we het volume daarna nogmaals halveren, zal de druk oplopen tot 40 N/cm^2 . Dus als het volume twee maal zo klein wordt, wordt de druk twee maal zo groot.

Als we nu kijken naar het produkt van druk en volume, $p \cdot V$, dan zien we dat dit steeds gelijk blijft:

Uitgangssituatie: $p \cdot V = 10 \cdot 30 = 300$
 Eerste halvering: $p \cdot V = 20 \cdot 15 = 300$
 Tweede halvering: $p \cdot V = 40 \cdot 7,5 = 300$

Met andere woorden: $p \cdot V$ blijft constant. (We vinden dit verband alléén als de hoeveelheid lucht en de temperatuur van de lucht niet veranderen.)

Het verband tussen druk en volume heeft ook een wiskundige betekenis. Als het produkt van twee grootheden gelijk blijft, zeg je dat die grootheden *omgekeerd evenredig* zijn. Dus hier: druk en volume van een constante hoeveelheid gas zijn – bij gelijkblijvende temperatuur – omgekeerd evenredig. Ofwel: als de druk n keer zo groot wordt is het volume $1/n$ keer zo groot geworden. Voor n mag je elk geheel of gebroken getal invullen.

Voorbeeld

Een afgesloten hoeveelheid gas heeft een druk van 20 N/cm^2 en een volume van 50 cm^3 . We persen het gas samen tot 25 cm^3 , terwijl de temperatuur gelijk blijft.

Bereken de druk na het samenpersen.

Oplossing:

Omdat het hier gaat om een afgesloten hoeveelheid gas, waarvan de temperatuur gelijk blijft, mogen we de wet van Boyle toepassen.

$$\begin{aligned} p_{\text{begin}} &= 20 \text{ N/cm}^2 \\ V_{\text{begin}} &= 50 \text{ cm}^3 \\ V_{\text{eind}} &= 25 \text{ cm}^3 \\ (p \cdot V)_{\text{begin}} &= (p \cdot V)_{\text{eind}} \end{aligned}$$

Invullen:

$20 \cdot 50 = p_{\text{eind}} \cdot 25$ (Let op dat je links en rechts in de vergelijking dezelfde eenheden gebruikt voor dezelfde grootte: als je in het linkerlid van de vergelijking (het gedeelte links van het '='-teken) de druk invult in N/m^2 , moet je dat ook in het rechterlid doen. Vul je het volume in het linkerlid in m^3 in, dan moet dat ook in het rechterlid. Maar je mag het volume aan beide kanten óók in cm^3 invullen.)

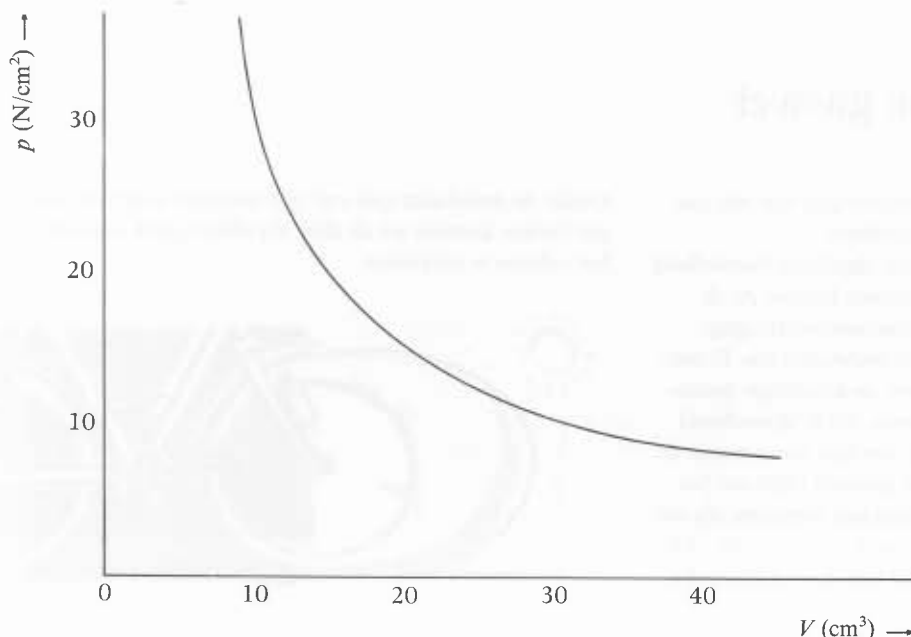
Dus:

$$p_{\text{eind}} = \frac{20 \cdot 50}{25} \text{ N/cm}^2 = 40 \text{ N/cm}^2$$

De druk wordt dus 40 N/cm^2 .

fig. 34

Het verband tussen volume en druk, als de temperatuur en de hoeveelheid gas gelijk blijven.



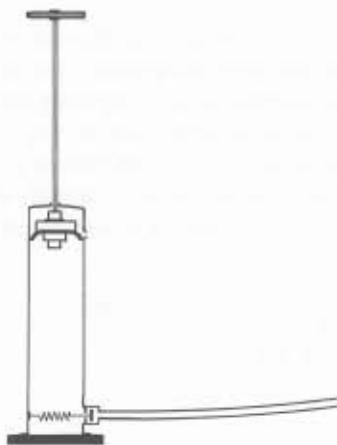
Enkele apparaten waarbij de wet van Boyle wordt toegepast, zijn de *luchtpersomp* (die je gebruikt voor het oppompen van een luchtbed) en een *vloeistof-zuigpomp* (de waterpomp die vroeger op elk dorpsplein stond).

In de cilinder van een luchtpersomp (figuur 35) kan een zuiger op en neer bewegen. Als je het volume onder de zuiger vergroot, wordt de druk daar kleiner dan de luchtdruk boven de zuiger. Daardoor kan de buitenlucht langs de zuigerstang en de zuiger in de cilinder stromen, want de grotere druk van de buitenlucht duwt de leren zuiger opzij.

Als je het volume daarna verkleint, wordt de druk onder de zuiger groter dan de luchtdruk. De samengeperste lucht kan *niet* weg langs de zuiger, want de leren zuiger wordt nu juist tegen de wand geperst, zodat hij goed afsluit. De lucht kan dus alleen via het ventiel naar de andere ruimte (bijvoorbeeld een voetbal of een luchtbed) stromen.

Een fietspomp heeft geen ventiel bij de uitlaat, want dat zit in de binnenband van de fiets.

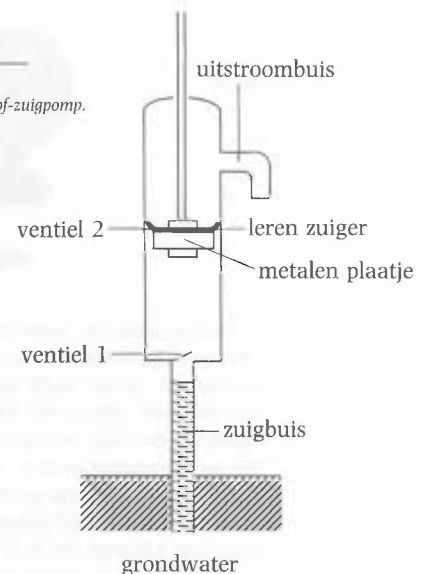
fig. 35
Een luchtpersomp.



De algemene gaswet

Vaak zal bij druk- en/of volumeveranderingen van een gas ook de temperatuur van het gas veranderen. Uit proeven blijkt dat de druk van een afgesloten hoeveelheid gas toeneemt, als we het volume constant houden en de temperatuur verhogen. Want bij temperatuurverhoging neemt de gemiddelde snelheid van de molekulen toe. Er ontstaan dan (per cm^2 per seconde) méér en krachtiger botsingen. Dit betekent dat de druk toeneemt. Als je bijvoorbeeld een opgepompte fietsband in de felle zon laat staan neemt de druk in de band flink toe. Uit andere proeven blijkt dat het volume van een afgesloten hoeveelheid gas toeneemt, als we de druk constant houden en de temperatuur verhogen. Ook nu neemt dus de gemiddelde snelheid van de molekulen toe.

fig. 36
Een vloeistof-zuigpomp.

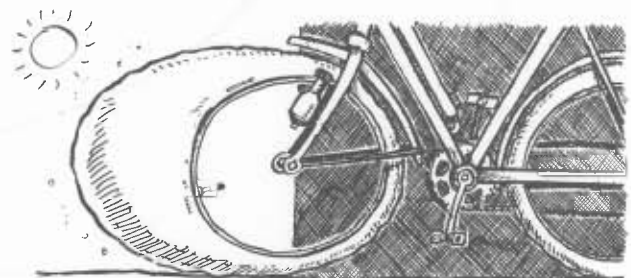


Bij de vloeistofpomp (figuur 36) werken twee ventielen tegengesteld. Als de zuiger omhoog beweegt, gaat ventiel 1 open en ventiel 2 dicht. Immers: de druk onder de zuiger wordt kleiner dan de luchtdruk; de luchtdruk op het grondwater perst dit water door de zuigbuis omhoog. Dus ventiel 1 wordt open gedruwd (eerst door de lucht, later door het opstijgende grondwater). Maar de grotere luchtdruk duwt de leren zuiger van ventiel 2 juist tegen de cilinderwand.

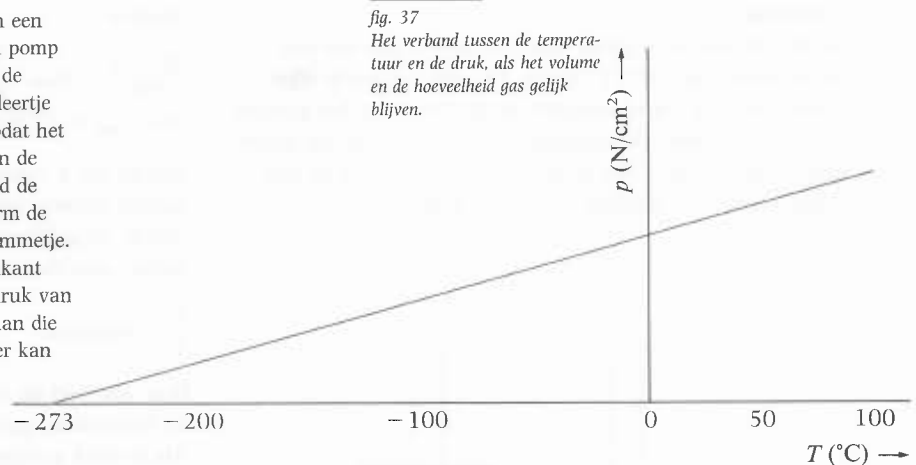
Wordt de zuiger omlaag gedrukt, dan sluit ventiel 1 en gaat ventiel 2 open, want de grotere druk onder de zuiger duwt ventiel 1 dicht. Maar als de druk onder de zuiger groter is dan de luchtdruk, zal ventiel 2 open gaan: de leren zuiger wordt opzij gedruwd, zodat de lucht kan ontsnappen.

Na enkele slagen heeft de buitenlucht het grondwater tot in de pompcilinder gedrukt, boven ventiel 1. Bij de volgende slag omlaag zal de laatste lucht langs ventiel 2 ontsnappen, waarna er óók water boven ventiel 2 komt. Bij de volgende slag omhoog zal het water boven ventiel 2 mee omhoog gaan en komt het bij de uitstroombuis uit de pomp.

Omdat de molekulen (per cm^2 per seconde) vaker en krachtiger botsen, kunnen we de druk nu alléén gelijk houden door het volume te vergroten.



Voorbeeld: je duwt de zuiger van een metalen fietspomp – dus *niet* een pomp van plastic – tot op de helft van de pompbuis omlaag. Zorg dat het leertje van de zuiger goed is ingevet, zodat het goed afsluit. Sluit de opening aan de onderkant met je vinger af. Houd de pompbuis horizontaal en verwarm de opgesloten lucht met een gasvlammetje. De zuiger zal dan naar de bovenkant van de pompbuis bewegen. De druk van de opgesloten lucht blijft gelijk aan die van de luchtdruk, want de zuiger kan vrij bewegen.



Als we bij deze proeven berekeningen willen uitvoeren, moeten we de temperatuur niet in graden Celsius uitdrukken maar in de absolute temperatuur: in K (kelvin).

In de grafiek van figuur 37 zie je hoe – voor een afgesloten hoeveelheid gas – de druk verandert, als bij constant gehouden volume de temperatuur verandert.

Bij het absolute nulpunt wordt de druk nul, zoals je in figuur 37 kunt aflezen. De molekulen hebben dan immers geen snelheid meer.

In T1 is al over het absolute nulpunt gesproken. Bedenk dat 0 K overeenkomt met $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ en dat een temperatuurverschil van 1 K gelijk is aan een temperatuurverschil van $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

In de twee soorten proeven die hiervoor werden besproken, werd – naast de hoeveelheid gas – óf het volume óf de druk constant gehouden; de temperatuur veranderde. De Franse onderzoeker Gay-Lussac heeft uit die twee soorten proeven kunnen afleiden welke wetmatigheid er geldt, als *alleen* de hoeveelheid gas constant blijft. Hij vond dus welk verband er tussen de druk p , het volume V en de absolute temperatuur T van een afgesloten hoeveelheid gas bestaat als p , V en T *alle drie* veranderen. Zijn wet is bekend als de *algemene gaswet*.

In formulevorm zegt die wet dat $\frac{p \cdot V}{T}$ constant is, als de hoeveelheid gas gelijk blijft.

In deze formule is T dus de temperatuur in K.

We kunnen deze wet ook schrijven als:

$$\left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{begin}} = \left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{eind}}$$

Het doet er niet toe welke eenheden je voor p en V gebruikt, mits je aan beide kanten dezelfde eenheden invult. Dus als p in het linkerlid in N/cm^2 wordt ingevuld, moet dat rechts ook. Voor V geldt hetzelfde (zie de opmerking bij de wet van Boyle op bladzijde 23). Maar de temperatuur mag *alleen* in K worden ingevuld; als je de temperatuur in $^{\circ}\text{C}$ invult, klopt de wet niet!

Voorbeeld 1

Als de zuiger van de fietspomp in de hoogste stand staat (figuur 38), is het volume onder de zuiger $2,5\text{ dm}^3$. We houden de slang dicht en duwen de zuiger naar beneden. Het volume onder de zuiger wordt dan $0,5\text{ dm}^3$. De temperatuur van de lucht stijgt daarbij van $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ naar $25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. De druk van de buitenlucht is 10 N/cm^2 .

Bereken de druk van de lucht onder de zuiger als deze naar beneden is geduwd.

fig. 38



Oplossing:

Je moet hier de algemene gaswet gebruiken, want zowel T als V en p veranderen.

$$\left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{begin}} = \left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{eind}}$$

$$p_{\text{begin}} = 10\text{ N/cm}^2 \text{ (gelijk aan de luchtdruk)}$$

$$V_{\text{begin}} = 2,5\text{ dm}^3$$

$$V_{\text{eind}} = 0,5\text{ dm}^3$$

$$T_{\text{begin}} = (20 + 273)\text{K} = 293\text{ K}$$

$$T_{\text{eind}} = (25 + 273)\text{K} = 298\text{ K}$$

Invullen:

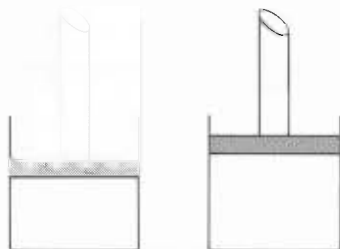
$$\frac{10 \cdot 2,5}{293} = p_{\text{eind}} \cdot \frac{0,5}{298}$$

dus: $p_{\text{eind}} = 51\text{ N/cm}^2$ (de eenheid is N/cm^2 omdat p_{begin} in N/cm^2 werd ingevuld).

Voorbeeld 2

In een vat met een volume van 1,0 l zit een gas met een temperatuur van 20,0 °C (figuur 39). Het vat wordt afgesloten door een vrij beweegbare zuiger, waarvan het gewicht is te verwaarlozen. De luchtdruk is 10 N/cm². Het vat wordt verwarmd tot 150 °C. De zuiger wordt geblokkeerd bij een volume van 1,2 l. Bereken de nieuwe druk.

fig. 39



$$\begin{aligned} p_{\text{begin}} &= 10 \text{ N/cm}^2 & p_{\text{eind}} &= ? \\ V_{\text{begin}} &= 1,0 \text{ l} & V_{\text{eind}} &= 1,2 \text{ l} \\ T_{\text{begin}} &= 293 \text{ K} & T_{\text{eind}} &= 423 \text{ K} \end{aligned}$$

Oplossing:

Ook hier moet je weer de algemene gaswet gebruiken, want zowel p , V als T veranderen.

$$\left(\frac{p \cdot V}{T} \right)_{\text{begin}} = \left(\frac{p \cdot V}{T} \right)_{\text{eind}}$$

$$\begin{aligned} p_{\text{begin}} &= 10 \text{ N/cm}^2 \\ V_{\text{begin}} &= 1,0 \text{ l} \\ V_{\text{eind}} &= 1,2 \text{ l} \\ T_{\text{begin}} &= (20 + 273) \text{ K} = 293 \text{ K} \\ T_{\text{eind}} &= (150 + 273) \text{ K} = 423 \text{ K} \end{aligned}$$

Invullen:

$$\frac{10 \cdot 1,0}{293} = p_{\text{eind}} \cdot \frac{1,2}{423}$$

dus: $p_{\text{eind}} = 12 \text{ N/cm}^2$

Stel nu dat V constant blijft. Dan kan V uit de algemene gaswet worden weggelaten, want deze factor is in beide leden van de vergelijking dezelfde. De formule van de algemene gaswet gaat dan over in:

$$\frac{P}{T} = \text{constant.}$$

Deze wet heet de *drukwet van Gay-Lussac* en geldt als volume en hoeveelheid gas constant blijven.

Als de druk p constant blijft, gaat de algemene gaswet over in:

$$\frac{V}{T} = \text{constant.}$$

Deze wet heet de *volumewet van Gay-Lussac*, en geldt als de druk en hoeveelheid gas constant blijven.

Wanneer tenslotte naast de hoeveelheid gas ook de temperatuur constant blijft, gaat de formule voor de algemene gaswet over in:

$$p \cdot V = \text{constant.}$$

Deze wet hebben we al leren kennen als de *wet van Boyle*.

De druk- en de volumewet van Gay-Lussac en de wet van Boyle waren eerder bekend dan de algemene gaswet. Je hebt gezien dat de formules voor deze wetten uit die voor de algemene gaswet zijn af te leiden. De naam *algemene gaswet* is daarmee verklaard.

Je kunt de algemene gaswet dus altijd toepassen. Als – naast de hoeveelheid gas – één van de drie grootheden p , V of T óók constant blijft, kun je deze in de formule voor de algemene gaswet gewoon weglaten.

Blok 17

W4

1 Als een afgesloten hoeveelheid gas wordt verwarmd, neemt de druk toe. Verklaar dit met het molekuulmodel.

2 Bij een proef wordt het verband tussen de druk en het volume van een hoeveelheid gas onderzocht. De meetresultaten zijn in de tabel weergegeven (figuur 40).

a Maak met behulp van deze gegevens een (p, V) -diagram.

b Wat kun je zeggen van de grootte van p als V zeer groot wordt?

fig. 40

p in N/cm ²	V in cm ³
4	4500
6	3000
10	1800
16	1125
24	750
30	600

3 Een vat dat is afgesloten door een zuiger, heeft een volume van 120 cm^3 . De druk in het vat is 5 N/cm^2 . Het volume wordt verkleind tot 85 cm^3 . Bereken de druk in het vat.

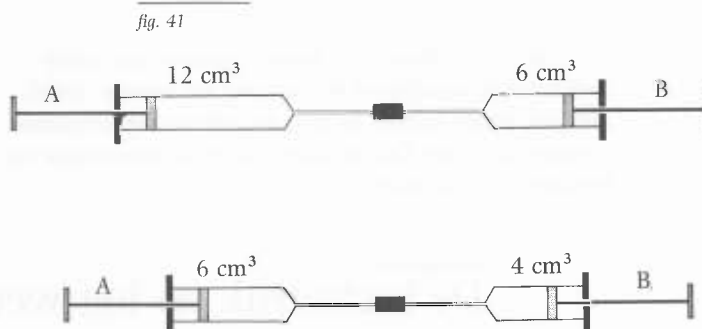
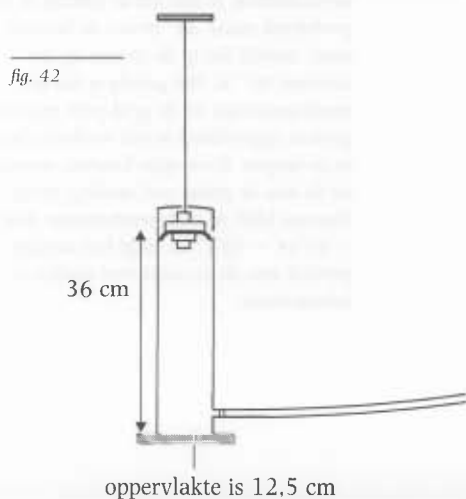
4 Twee injectiespuiten A en B zijn met elkaar verbonden (figuur 41). De druk in beide spuit is 10 N/cm^2 . Bij de beginstand is het volume van spuit A 12 cm^3 en van spuit B 6 cm^3 . De zuigers van de spuit A en B worden beide ingedrukt. Het volume van A is dan 6 cm^3 , en het volume van B is 4 cm^3 geworden. Bereken de druk in de injectiespuiten.

5 In een vat bevindt zich een hoeveelheid stikstofgas. De druk is 10 N/cm^2 , de temperatuur is 27°C . Het volume blijft tijdens de proef constant.

- Bereken de temperatuur van het gas in K.
- Bereken de druk, als de temperatuur van het vat wordt verhoogd tot 127°C .
- Bereken de druk als de temperatuur tot 167°C wordt verhoogd.
- Bereken de temperatuur in $^\circ\text{C}$, als de druk is opgelopen tot 18 N/cm^2 .

6 Linda pompt haar fietsband op. Als de zuiger in zijn hoogste stand staat, is de luchtkolom onder de zuiger 36 cm hoog (figuur 42). Bij de eerste pompslag moet ze de zuiger 20 cm omlaag drukken, voordat er lucht in de band begint te stromen. De druk van de buitenlucht is $10,0 \text{ N/cm}^2$.

- Waarom komt er pas lucht in haar band als de zuiger al een eind is ingedrukt?
- Bereken de druk in de pomp als er net lucht in de band begint te stromen.
- Na een aantal pompslagen moet Linda de zuiger vanuit de hoogste stand 26 cm omlaag drukken, voordat er lucht in de band stroomt. Waarom moet Linda de zuiger nu verder omlaag drukken dan bij de eerste pompslag voordat er lucht in de band stroomt?
- Bereken de druk in de pomp als de zuiger 26 cm omlaag is gedrukt.
- De pomp – dus ook de lucht erin – is door het pompen echter warmer geworden. Beredeneer of daardoor in de situatie bij vraag d de werkelijke druk groter of kleiner is dan de druk die je hebt berekend.



7 In een afgesloten metalen cilinder zit stikstofgas met een druk van 30 N/cm^2 , een temperatuur van 34°C en een volume van $70,0 \text{ dm}^3$.

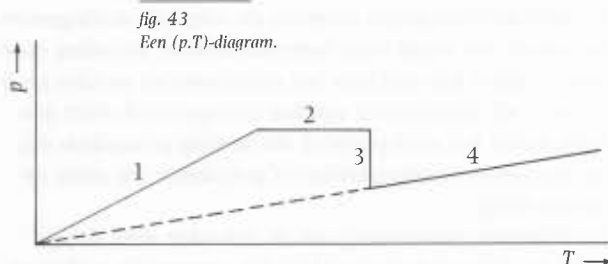
Door de cilinder in een bak met heet water te plaatsen, neemt de temperatuur van het gas toe en zet de metalen cilinder uit. De druk loopt op tot 33 N/cm^2 en het inwendig volume van de cilinder wordt $73,4 \text{ dm}^3$. Het water en de cilinder met gas hebben dan dezelfde temperatuur gekregen.

- Bereken de temperatuur van het gas in de cilinder (in $^\circ\text{C}$).
- Hoe had je – zonder een berekening te maken – toch de temperatuur van het gas in de cilinder te weten kunnen komen?

8 Een hoeveelheid lucht heeft een druk van 20 N/cm^2 , een temperatuur van 40°C en een volume van 15 dm^3 .

- Bereken de temperatuur (in $^\circ\text{C}$) als de druk 30 N/cm^2 en het volume 10 dm^3 wordt.
- Bereken de druk als de temperatuur 80°C en het volume 23 dm^3 wordt.
- Bereken het volume als de druk 28 N/cm^2 en de temperatuur 75°C wordt.

9 Een constante hoeveelheid gas heeft achtereenvolgens vier verschillende processen 1 t/m 4 ondergaan. Bij die processen konden de grootheden p , V en T toenemen, afnemen of constant blijven. De meetresultaten van de vier proeven zijn weergegeven in één (p,T) -diagram (figuur 43). Geef aan wat er gebeurde met p , V en T bij elk van de processen 1, 2, 3 en 4.

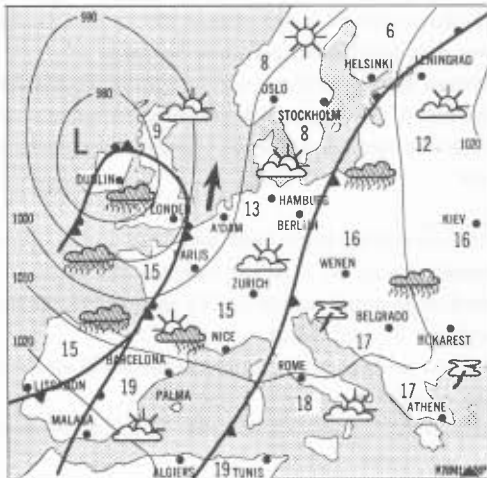


De verschillende fasen en de fase-overgangen van water spelen een belangrijke rol bij het weer. Ijs, sneeuw, hagel, rijp, ijzel, regen, wolken en mist zijn allemaal verschijningsvormen van water. Ook de luchtdruk en de temperatuur zijn bepalend voor het weer.

De luchtdruk en het weer

Temperatuurverschillen veroorzaken allerlei stromingen in de lucht. Daardoor ontstaan luchtdrukverschillen. In de weerkunde spreekt men van 'hogedrukgebieden' en 'lagedrukgebieden'.

fig. 44
Een weerkaartje.



Op een weerkaartje worden de hoge- en lagedrukgebieden altijd aangegeven met de luchtdruk in mbar. Rond het centrum van zo'n gebied zijn vaak lijnen getekend (figuur 44). Deze lijnen heten *isobaren* en verbinden plaatsen met dezelfde luchtdruk. Aan de getallen kun je zien, dat in het centrum van een lagedrukgebied de druk het laagst is.

In principe kun je twee soorten bewegingen in de lucht onderscheiden: verticale en horizontale bewegingen.

Verticale luchtbewegingen ontstaan als volgt. De stralingsenergie van de zon wordt bijna helemaal door de atmosfeer doorgelaten, maar kan wel door het aardoppervlak worden geabsorbeerd; de temperatuur van het aardoppervlak stijgt dan. Soms kaatst het aardoppervlak die straling grotendeels (bij een besneeuwd aardoppervlak) of gedeeltelijk (bij zeeën en meren) terug.

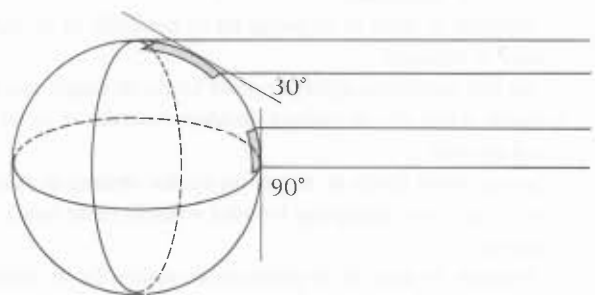
Rechtstreekse verwarming van de atmosfeer door de zon vindt dus bijna niet plaats. Maar het verwarmde aardoppervlak kan de lucht die met de aarde in contact is, wél via geleiding verwarmen. Hoe hoger de temperatuur is van het aardoppervlak, des te sterker stijgt de lucht erboven in temperatuur.

Sommige delen van het aardoppervlak stijgen sterker in temperatuur dan andere delen. Dat heeft twee oorzaken.

1 Het verschil in hoogte van de gemiddelde zonnestand.

Hoe hoger de gemiddelde zonnestand op een bepaalde plaats op aarde is, hoe meer stralingsenergie die plaats per m² ontvangt. (De gemiddelde zonnestand is de gemiddelde hoogte van de zon, in graden, boven de horizon.)

fig. 45
Twee even brede bundels zonlicht; de een valt op de tropen en de ander op de poolstreek.



In figuur 45 zie je twee even brede bundels zonlicht getekend. De ene bundel valt op de tropen, de andere op de poolstreek. Je ziet dat de bundel in de poolstreek maar 30° boven de horizon staat, terwijl dat in de tropen op dat moment 90° is. Het gevolg is dat de stralingsenergie bij de pool over een veel grotere oppervlakte wordt verdeeld dan in de tropen. Bovendien kaatsen sneeuw en ijs aan de polen veel straling terug. Daarom blijft de luchttemperatuur daar -40 tot -50 °C, en stijgt het aardoppervlak aan de evenaar veel sneller in temperatuur.

Het verschil in hoogte van de gemiddelde zonnestand geldt niet alleen voor de poolstreken en de tropen, maar ook voor een zelfde plaats op aarde gedurende de dag. Bij zonsopgang en zonsondergang is de zonnestand laag, dus valt er weinig stralingsenergie op 1 m^2 . We zeggen: 'de zon geeft nog niet/niet meer veel warmte'.

Tussen 12 en 13 uur is de zonnestand het hoogst; er valt op dat tijdstip dus de meeste stralingsenergie op 1 m^2 .

Je kunt de situatie goed vergelijken met iemand die in het donker met een zaklantaarn een landkaart wil lezen. Als hij de lamp loodrecht boven de kaart houdt verlicht hij maar een deel van de kaart, maar dit deel ontvangt véél licht per cm^2 ('hoge zonnestand').

Als hij de lichtbundel bijna langs de kaart laat scheren ('lage zonnestand')

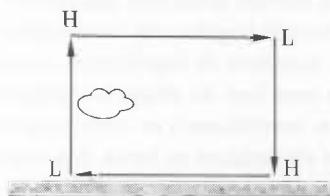
verlicht hij een veel groter deel van de kaart, maar de hoeveelheid licht per cm^2 op de kaart is nu veel kleiner.

2 Het verschil in soortelijke warmte van de stof aan het aardoppervlak. De soortelijke warmte is de energie die nodig is om 1 kg stof één graad te doen stijgen. Zand en steen hebben een veel kleinere soortelijke warmte dan water. Bij dezelfde energietoevoer per m^2 stijgen zand en steen dus veel sneller in temperatuur dan water. Dit verklaart het betrekkelijk kleine verschil ΔT tussen de laagst en hoogst voorkomende luchttemperaturen in een etmaal bij een 'zeeklimaat': het water stijgt en daalt maar langzaam in temperatuur, waardoor ΔT maar 10 tot 20 graden is. In de Sahara kan ΔT wel 50 tot 60 graden zijn.



We nemen als voorbeeld een eiland, waarvan het oppervlak veel zand en steen bevat. De lucht die door het warme eiland wordt verwarmd, zet uit. Boven het eiland ontstaat dus een warme luchtbel. De dichtheid in die bel is veel kleiner dan de dichtheid van de koudere zeelucht boven de omringende zee. Volgens de wet van Archimedes ondervindt de warme bel een opwaartse kracht die gelijk is aan het gewicht van de hoeveelheid koude zeelucht die op de plaats van de bel zou kunnen zitten. De zwaartekracht op de lichtere luchtbel is kleiner dan de opwaartse kracht. De warme luchtbel stijgt dus op. Na zonsondergang dalen zand en steen op het eiland snel in temperatuur, want: het temperatuurverschil tussen het hete zand en de toegestroomde koude zeelucht is groot. Bovendien dalen zand en steen – bij het uitstralen van warmte-energie – snel in temperatuur omdat ze een kleine soortelijke warmte hebben. De lucht boven het eiland koelt dus 's nachts snel af en krimpt daarbij in. Daardoor ontstaat 's nachts een dalende luchtstroom boven het eiland.

fig. 46
Opstijgende en dalende lucht.



Verticale stromingen veroorzaken lage- en hogedrukgebieden. Als de lucht opstijgt, neemt de luchtdruk bij het aardoppervlak af (lagedrukgebied); als de lucht daalt, neemt de luchtdruk toe (hogedrukgebied). Opstijgende warme lucht komt in koudere lagen en koelt dus af. Daardoor condenseert waterdamp: er vormen zich wolken.

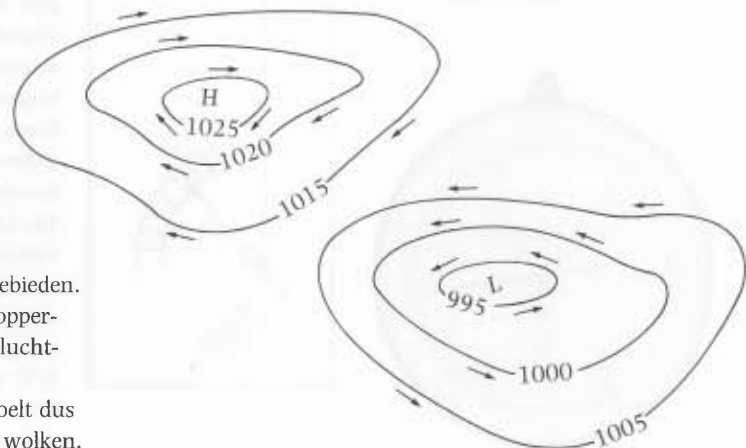
Een lagedrukgebied gaat daarom vaak gepaard met slecht weer: depressies.

Op plaatsen waar de lucht daalt, stijgt de luchtdruk en het aardoppervlak verwarmt de lucht. Warmere lucht kan meer waterdamp bevatten, dus is het gevolg dat aanwezige wolken verdampen. Hogedrukgebieden betekenen dan ook vaak: mooi weer.

Als een hogedrukgebied en een lagedrukgebied bij elkaar in de buurt liggen, stroomt er lucht van het hogedrukgebied naar het lagedrukgebied. Dat is een horizontale luchtverplaatsing die we voelen als wind.

Door de draaiing van de aarde stroomt de lucht niet in een rechte lijn van het hoge- naar het lagedrukgebied, maar beweegt de wind met de wijzers van de klok mee om een hogedrukgebied, en tegen de wijzers van de klok in rond een lagedrukgebied (figuur 47).

fig. 47
Draaiing van de wind rond hoge- en lagedrukgebieden.



Vocht en het weer

De waterdamp in de lucht is onzichtbaar omdat waterdamp, net als stikstof en zuurstof, het licht ongehinderd doorlaat. De hoeveelheid waterdamp die in de lucht kan zitten, is beperkt en afhankelijk van de luchttemperatuur.

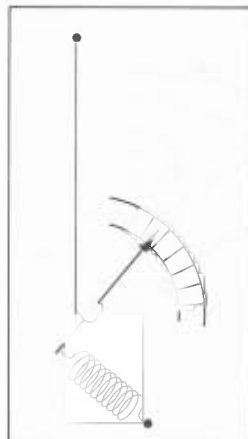
Uit vochtige lucht kan bij afkoeling waterdamp gaan condenseren. Dat komt doordat de lucht bij een hoge temperatuur meer waterdamp kan bevatten dan bij een lage temperatuur. Als de lucht afkoelt, vormt het teveel aan waterdamp in de lucht waterdruppeltjes: er ontstaat *mist*. De waterdamp kan ook gemakkelijk condenseren op 'voorwerpen' zoals bomen en grassprietten: er vormt zich *dauw*. Als de oppervlakken waarop waterdamp condenseert kouder zijn dan het vriespunt, zet de waterdamp zich als *rijp* daarop af. In koude wolken ontstaan ijskristallen.

Een apparaat waarmee de vochtigheid van de lucht kan worden gemeten, is de hygrometer.

Een veel gebruikte hygrometer is de haarhygrometer (figuur 48). Een ontvette haar heeft namelijk de eigenschap langer te worden als de vochtigheid toeneemt. Een haar wordt met het ene uiteinde aan een vast punt bevestigd. Het andere uiteinde wordt enkele malen rond de as van een wijzer gedraaid. Een veertje draait de as zó dat de haar altijd gespannen staat. Als de luchtvochtigheid verandert, wordt de haar langer of korter en verandert de uitslag van de wijzer dus ook. De uitslag is een maat voor de luchtvochtigheid. Het instrument moet met een 'echte' hygrometer worden geijkt.

De vochtigheid van de lucht wordt uitgedrukt in de grootte 'relatieve vochtigheid' en aangegeven in procenten. Als bij 20 °C de relatieve vochtigheid 40 % is, wil dat zeggen dat de hoeveelheid waterdamp in de lucht 40 % is van de maximale hoeveelheid waterdamp die lucht bij 20 °C kan bevatten.

fig. 48
Een haarhygrometer.



Een bel warme en vochtige lucht stijgt op in koude luchtlagen. Tijdens het opstijgen zet de bel uit, waardoor de temperatuur in de bel daalt. De lucht kan daardoor minder waterdamp bevatten. De *relatieve* luchtvochtigheid neemt dus toe, tenslotte tot 100 %. Daardoor condenseert de waterdamp tot zeer kleine druppeltjes: er ontstaan *wolken*. Omdat de temperatuur in de hogere luchtlagen meestal onder het vriespunt ligt, vormen de gevormde waterdruppeltjes in de wolken ijskristallen. Op de ijskristallen condenseert weer waterdamp. Als de temperatuur van de ijskristallen niet te laag is (van -5 °C tot 0 °C), vriezen ze aan elkaar vast en ontstaan er *sneeuwvlokken*. Is de snelheid van de stijgende lucht in de wolk kleiner dan de valsnelheid van de vlokken, dan gaat het sneeuwen. Als de temperatuur vlak boven de aarde te hoog is, smelten de sneeuwvlokken en bereiken ze als regendruppels de aarde.

Hagelkorrels ontstaan doordat gesmolten ijskristallen opnieuw bevriezen. Op de gevormde hagelkorrels condenseert vervolgens waterdamp, waardoor de hagelkorrels aangroeien. Soms kunnen ze een paar keer na elkaar in opstijgende en dalende luchtstromen terecht komen en sterk aangroeien. Ze worden dan zo groot als knikkers en heten dan *hagelstenen*. Die kunnen grote schade veroorzaken aan gewassen en de ruiten van broeikassen. Regendruppels kunnen een temperatuur krijgen beneden het vriespunt zonder dat ijsvorming optreedt. We spreken dan van *onderkoelde regen*. Als deze druppels op grond vallen met een temperatuur iets beneden 0 °C, vindt de fase-overgang plaats en stolt het water tot ijs. Er ontstaat dan *ijzel*. Ijzel kan óók ontstaan als regen van ca. 0 °C op bevroren grond valt.

Luchtverontreiniging

De dampkring bestaat voor het grootste gedeelte uit de gasen stikstof (circa 78 %) en zuurstof (circa 21 %). De overige gasen komen slechts in heel kleine hoeveelheden voor (figuur 49). Enkele van die gasen zijn ook bepalend voor het weer en het klimaat. Verder bevat de dampkring plaatselijk – vooral in industriegebieden – nog allerlei vaste stoffen en gasen die voor mens, dier en plant schadelijke effecten kunnen hebben.

fig. 49
Gasen die in lucht voorkomen.

gas	%
N ₂	78,09
O ₂	20,95
Ar	0,93
CO ₂	0,03
Ne	18 · 10 ⁻⁴
He	5,2 · 10 ⁻⁴
CH ₄	2,2 · 10 ⁻⁴
Kr	1 · 10 ⁻⁴
NO	1 · 10 ⁻⁴
H ₂	0,5 · 10 ⁻⁴
Xe	0,8 · 10 ⁻⁵
O ₃	wisselend
H ₂ O	wisselend

Luchtverontreiniging kan gasvormig zijn (koolstofdioxide, zwaveldioxide, stikstofoxiden) of vast (roet, vliegias en dergelijke). De verontreiniging wordt onder meer veroorzaakt door verbranding van fossiele brandstoffen (zoals kolen, olie, benzine) en van hout.

Elektriciteitscentrales, verwarmingsinstallaties, fabrieken en auto's zijn de grote vervuilers.

Ook de landbouw heeft een flink aandeel in de luchtverontreiniging. Met name de grote hoeveelheden mest (waaruit veel ammoniakgas vrijkomt) zorgen voor de nodige problemen.

Zure regen

Zwaveldioxide (SO₂) en stikstofoxiden (NO_x), afkomstig van industrie en verkeer, kunnen met het water in de lucht reageren en zuren vormen. Zo ontstaat zure regen. Zure regen is schadelijk; naaldbomen verliezen hun naalden en heidevelden worden door grassen overwoekerd. Veel meren en vennen verzuren, waardoor het leven in het water wordt bedreigd. Ook de landbouw is voor een deel verantwoordelijk voor de zure regen. Bij de afbraak van dierlijke mest ontstaat veel

Koolstofdioxide (CO₂) is een gas dat planten nodig hebben om te groeien. Mensen ademen zuurstof in en CO₂ uit. Door verbranding van hout en van fossiele brandstoffen, zoals steenkool en olie, neemt de hoeveelheid CO₂ in de dampkring toe. Dat kan één van de oorzaken zijn van het zogenaamde *broeikas* effect. Koolstofdioxide laat namelijk wel het invallende zonlicht door, maar houdt de warmtestraling van de aarde tegen. Daardoor gaat de dampkring als een soort broeikas werken. Men verwacht dat door het broeikas effect de gemiddelde temperatuur op aarde zal stijgen. In dat geval smelten grote hoeveelheden poolijs en stijgt de zeespiegel aanzienlijk. Voor Nederland zou dit ernstige gevolgen hebben: de dijken zouden aanzienlijk moeten worden verhoogd.

Een ander gevolg van het broeikas effect kan zijn dat de klimaten op aarde veranderen.

Ozon is een gas dat voorkomt in de hogere luchtlagen (tussen 15 en 30 km boven de aarde). Het maakt de schadelijke ultraviolette straling (UV-straling) van de zon voor ons onschadelijk: ozon absorbeert deze UV-straling. De ozonlaag heeft veel te lijden van drijfgassen uit spuitbussen. In veel drijfgassen zitten chloor- en fluorhoudende koolwaterstoffen (de zogenaamde CFK's) die de ozonlaag aantasten. Als de ozonlaag dunner wordt, of als er gaten in komen, neemt de ultraviolette straling op aarde toe. Dat vergroot de kans op huidkanker. De ozonlaag is dus erg nuttig, hoewel het op zichzelf schadelijk is om ozon in te ademen.

De zeer kleine vaste deeltjes roet en vliegias kunnen heel lang in de lucht blijven zweven. Ze bevorderen onder meer mistvorming, doordat waterdamp op deze microscopisch kleine deeltjes kan condenseren.

Luchtverontreiniging kan ademhalingsproblemen opleveren en de zure regen kan bijdragen tot bodem- en drinkwaterverontreiniging.

ammoniakgas (NH₃). Dit ammoniakgas lost gemakkelijk in water op – dus ook in het water dat in de lucht zit. Via de regen komt de ammoniak in de grond terecht, waar het door bacteriën wordt omgezet in stikstofoxiden (NO_x) die salpeterzuur vormen. Zuren zijn in staat metalen op te lossen. Bekend is dat aluminium, dat in kleine hoeveelheden in de grond voorkomt, wordt opgelost door het zuur. Dit opgeloste aluminium is zeer schadelijk voor planten en bomen.

Corrosie en verwerking

Sommige metalen, vooral ijzer, roesten snel in vochtige lucht. Door zure regen lossen deze metalen op, waardoor roestvorming (corrosie) en verwerking in verontreinigde lucht nog sneller gaat. Ijzer is te beschermen door een laklaag of een galvanisch aangebracht tinlaagje. Maar zuren lossen dat tinlaagje weer op.

Zure regen lost ook kalksteen op. Kalksteen komt voor in diverse soorten natuursteen. Veel monumenten en gebouwen zijn door zure regen al flink beschadigd.

Steensoorten zijn meestal niet afdoende tegen zure regen te beschermen.

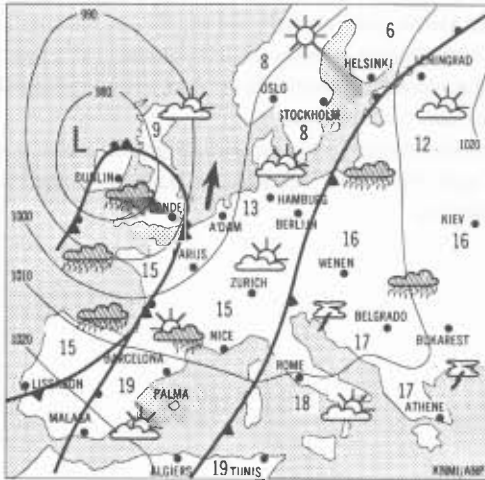


Blok 17

W5

- 1 Op een weerkaart zie je vaak een groot aantal lijnen getekend (figuur 50). Deze lijnen heten isobaren. Wat stellen deze isobaren voor?

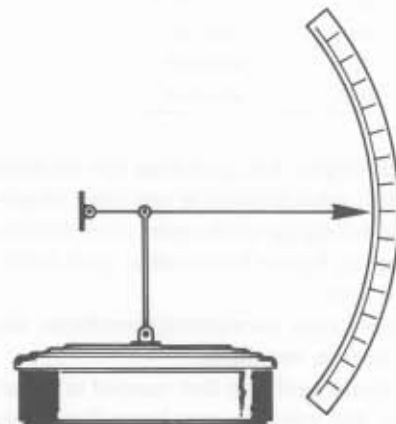
fig. 50
Een weerkaartje.



- 2 Na nachtvorst zie je 's morgens vaak ijs op auto's.
a Welke fase-overgangen hebben hier achtereenvolgens plaatsgevonden?
b Geef hiervoor een verklaring.

- 3 In figuur 51 is een metaalbarometer getekend. Met een goed geijkte metaalbarometer kun je de luchtdruk meten.
a Leg de werking van dit toestel uit.
b Wat versta je onder het iken van een instrument?
c Waarmee moet de metaalbarometer worden geijkt?

fig. 51
De metaalbarometer van Vidi.



- 4 Wat is de belangrijkste oorzaak van het ontstaan van hoge- en lagedrukgebieden?
5 Geef een korte verklaring voor het ontstaan van wind.
6 In de Sahara komen 's zomers overdag temperaturen tot 57 °C voor. Maar 's nachts kan het – vooral in de hoger gelegen gebieden – vriezen. Geef hiervoor een verklaring.
7a Hoe ontstaat rijp?
b Hoe ontstaat ijs? (Er zijn twee mogelijkheden!)

8 Op een mooie dag verwarmt de zon de aarde. De lucht aan de grond wordt daardoor ook verwarmd. Een hoeveelheid lucht met een volume van 2000 m^3 wordt verwarmd van 290 K tot 300 K . De luchtdruk op de grond is (en blijft) 1000 mbar .

a Bereken het volume van de lucht na verwarming.

b Beredeneer wat er met de dichtheid van de verwarmde lucht is gebeurd.

De verwarmde lucht stijgt op tot een hoogte van 2 km . De druk op deze hoogte is 800 mbar . De temperatuur is echter tijdens het stijgen van de lucht gedaald met $1,0^\circ\text{C}$ per 100 meter .

c Bereken de temperatuur van de luchtbel op 2 km hoogte.

d Bereken het volume van de luchtbel op 2 km hoogte.

Bij deze temperatuur begint de waterdamp in de lucht te condenseren.

e Waaraan kun je dat zien als je omhoog kijkt?

9 Vanaf de Atlantische Oceaan en de Noordzee waait vaak een westenwind. De Ardennen in België en de Vogezen en Jura in Frankrijk zijn, vanaf de Europese westkust, de eerste hoger gelegen gebieden. Verklaar de grote hoeveelheden neerslag in die streken.

10a Welke lucht kan meer waterdamp bevatten, warme of koude lucht?

b Welke lucht heeft de grootste dichtheid, warme of koude lucht?

11 Voor een goede tijd op de marathon zijn de omstandigheden waaronder wordt gelopen, van groot belang. Heuvels in het parcours, de weersomstandigheden en de kwaliteit van het wegdek beïnvloeden de snelheid van de atleten. Het is ook belangrijk dat een atleet tijdens het lopen de warmte die zijn lichaam produceert, voldoende kwijt kan. Om vóór een wedstrijd daarover iets te weten te komen, meet men de zogenaamde 'natte-boltemperatuur'. Het vloeistofreservoir van een thermometer wordt omwikkeld met een vochtig lapje. Men kijkt nu in een *thermometerhut* (géén invloed van rechtstreekse zonnestraling; wél vrije doorstroming van lucht) wat de laagste temperatuur is die de thermometer aanwijst. Dit is de 'natte-boltemperatuur'.

Verklaar waarom deze meting inzicht geeft in de vraag of een atleet tijdens de marathon voldoende warmte kan kwijtraken.



Het molekuulmodel

Om de eigenschappen van stoffen te kunnen verklaren, hebben natuurkundigen een model bedacht: het molekuulmodel. Elke stof is opgebouwd uit molekulen. Molekulen zijn de kleinste deeltjes van een stof die nog alle eigenschappen van die stof bepalen.

De kenmerken van het molekuulmodel zijn:

- molekulen zijn heel klein;
- molekulen hebben massa;
- er zit ruimte tussen de molekulen;
- molekulen bewegen en botsen; de snelheid van de molekulen hangt af van de temperatuur;
- molekulen oefenen krachten uit op elkaar. Op korte afstand trekken molekulen elkaar aan; op zéér korte afstand stoten ze elkaar af.

Een molekuul zelf is weer opgebouwd uit atomen.

Het is natuurlijk onzin om te spreken van de temperatuur, de hardheid of het smeltpunt van één molekuul. Je kunt dus *niet* zeggen: het molekuul *heeft* alle eigenschappen van de stof, maar wel: het molekuul *bepaalt* alle eigenschappen van de stof. Stofeigenschappen als hardheid, smeltpunt enzovoort kun je alleen aan een grote *verzameling* van die molekulen toekennen.

1 Met welk(e) kenmerk(en) van het molekuulmodel kun je verklaren dat:

- a lucht samendrukbaar is;
- b water druk uitoefent;
- c kwik druppels vormt;
- d aardgas zich vanzelf verspreidt?

Stoffen in verschillende fasen

De fase waarin een stof verkeert, bepaalt de manier waarop de molekulen van die stof zijn gerangschikt.

- In een *vaste stof* zijn de molekulen gerangschikt in een rooster. Zij kunnen zich niet verplaatsen, maar maken een trillende beweging op een vaste plaats in het rooster. De aantrekkende kracht tussen de molekulen is heel groot. De stof heeft dan ook een *vaste vorm* en – bij één bepaalde temperatuur – een *vast volume*.
- In een *vloeistof* bevinden de molekulen zich wat verder van elkaar af, zodat ze langs elkaar kunnen bewegen. De aantrekkende kracht tussen de molekulen is nog groot, maar kleiner dan bij een vaste stof. De aantrekkende kracht tussen de molekulen blijkt onder meer uit de vorming van druppels. Een vloeistof heeft *geen vaste vorm*, maar – bij één bepaalde temperatuur – *wel een vast volume*.
- In een *gas* kunnen de molekulen ongehinderd langs elkaar bewegen. De afstand tussen de molekulen is groter dan in de vloeibare fase. Deze afstand hangt ook af van de druk. Hoe groter de druk, des te kleiner is (bij een bepaalde temperatuur) de gemiddelde afstand. De aantrekkende kracht tussen de molekulen is bij een gas te verwaarlozen. Een gas heeft dan ook *geen vaste vorm* en *geen vast volume*: het verspreidt zich over de hele ruimte waar het zich bevindt.

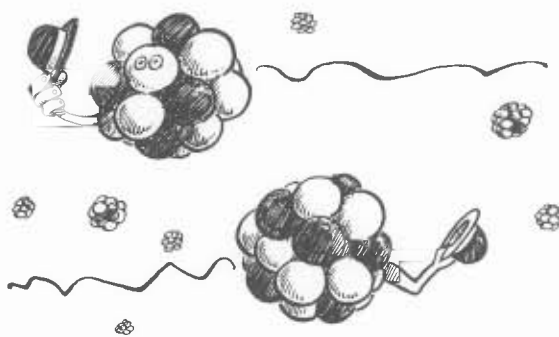
2 In een stof zitten de molekulen heel dicht op elkaar, en ze trillen. Is het een vaste stof, een vloeistof of een gas?

3 In een stof bewegen de molekulen vrij langs elkaar, maar de molekulen trekken elkaar onderling nog wel aan. Is het een vaste stof, een vloeistof of een gas?

4a Op welke twee manieren kun je druk van een gas verhogen?

b Wat gebeurt er bij drukverhoging met de gemiddelde afstand tussen de molekulen?

c Wat gebeurt er bij temperatuurverhoging met de gemiddelde snelheid van de molekulen?



Fasen en fase-overgangen

Stoffen kunnen in drie fasen voorkomen:

- in de vaste fase;
- in de vloeibare fase;
- in de gasvormige fase.

De fase waarin een bepaalde stof zich bevindt, is afhankelijk van de temperatuur en van de druk. Als de temperatuur en de druk (of één van beide) veranderen, kan de stof in een andere fase overgaan (we spreken dan van een fase-overgang). Zo kan ijs door temperatuurstijging smelten, maar óók door drukverhoging: als een auto over (niet te koude) sneeuw rijdt, blijkt de sneeuw in het spoor te zijn gesmolten. Als koolstofdioxide van 31 °C of kouder wordt samengeperst, wordt het gas bij een bepaalde druk vloeibaar. Met stikstofgas kan dat óók, maar dan moet de temperatuur lager zijn dan - 147 °C!

Bij de fase-overgangen *smelten* en *verdampen* is energietoevoer (warmte) nodig: de molekulen gaan sneller bewegen en duwen elkaar dus verder opzij. De aantrekkende kracht tussen de molekulen neemt af. Daardoor valt, als een stof smelt, het rooster uiteen. Als een stof verdampt, verlaten de molekulen de vloeistof en gaan zich - in de gasvormige fase - vrij door de ruimte bewegen.

Bij de fase-overgangen *stollen*, *condenseren* en *rijpen* komt juist warmte (energie) vrij. Door het onttrekken van energie daalt de gemiddelde snelheid van de molekulen, de gemiddelde afstand tussen de molekulen wordt kleiner en de onderlinge aantrekkingskracht neemt toe. Daardoor zal bij een bepaalde temperatuur damp in vloeistof overgaan (condenseren) en vloeistof in vaste stof (rijpen en stollen).

Bij een fase-overgang verandert de gemiddelde afstand tussen de molekulen altijd sterk.

- Bij de overgang van vaste stof naar vloeistof verlaten de molekulen het rooster en gaan ze langs elkaar bewegen;
- bij de overgang van vloeistof naar gas krijgen de molekulen 'echt de vrijheid' en kunnen ze zich vrij door de ruimte gaan bewegen.

De bewegingsvrijheid van de molekulen zegt dus iets over de fase waarin een stof zich bevindt.

Als de temperatuur daalt tot het absolute nulpunt (0 kelvin of - 273 °C), bewegen de molekulen helemaal niet meer.

Het absolute nulpunt is de laagst mogelijke temperatuur, want molekulen kunnen niet 'stiller staan dan stil'. Daarom heeft Kelvin het absolute nulpunt gekozen als beginpunt van een nieuwe temperatuurschaal, waarop een temperatuurverschil van 1 K overeenkomt met een temperatuurverschil van 1 °C. 0 °C komt dan overeen met 273 K. Omrekenen van °C naar K gaat als volgt:

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

5 We laten ijs smelten.

- Wat gebeurt er met de gemiddelde afstand tussen de molekulen?
- Hoe verandert de aantrekkingskracht tussen de molekulen?

6 Water wordt verwarmd.

- Wat gebeurt er met de gemiddelde snelheid van de molekulen?
- Verklaar waarom het water nu sneller verdampt.

7 Op een wintermorgen kunnen de takjes van struiken en bomen en het gras met rijp bedekt zijn.

- Geef daarvoor een verklaring.

Als daarna de zon gaat schijnen, verdwijnt de rijp langzaam maar zeker.

- Hoe komt het dat de rijp verdwijnt zonder dat er water ontstaat?

8 Verklaar waarom het koud aanvoelt als je een vluchtige stof - zoals ether of alcohol - op je huid druppelt.

Blok 17

H2

Druk

De scherpe punt van een potlood kun je verder in een stuk gum drukken dan de stompe achterkant, terwijl je toch dezelfde kracht uitoefent. Dit kun je verklaren met de grootte van de druk.

Onder druk wordt verstaan: de kracht per oppervlakte-eenheid, uitgedrukt in N/m² of N/cm².

De eenheid van druk is de pascal.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2; 1000 \text{ Pa} = 1 \text{ kPa}.$$

Als een kracht van 10 N werkt op een oppervlakte van 1 cm², dan is de druk op die cm²: 10 N/cm².

Als een kracht van 10 N werkt op een oppervlakte van 10 cm² zal er op elke cm² een kracht werken van 1 N. De druk op die oppervlakte is dan 1 N/cm².

Als een kracht van 10 N werkt op een oppervlakte van 100 cm², werkt er op elke cm² een kracht van $\frac{10}{100} = 0,1 \text{ N}$. De druk is op die oppervlakte dan 0,1 N/cm².

Als je een druk in N/cm^2 moet omrekenen naar een druk in Pa (dus in N/m^2) moet je bedenken dat 1 m^2 gelijk is aan $100 \cdot 100 = 10\,000 \text{ cm}^2$. Omdat 1 m^2 een 10 000 maal zo grote oppervlakte is, zal daarop ook een 10 000 maal zo grote kracht werken. Dus 1 N/cm^2 komt overeen met een druk van $10\,000 \text{ N/m}^2$, ofwel $10\,000 \text{ Pa} = 10 \text{ kPa}$.

1 Wanneer oefent je lichaam een grotere druk uit: als je ligt of als je staat? Licht je antwoord toe.

Druk bij vloeistoffen

Een vloeistof is – in tegenstelling tot een gas – vrijwel niet samendrukbaar. Maar de druk op een vloeistof plant zich, net als in een gas, in alle richtingen voort (wet van Pascal). De moleculen botsen tegen elkaar en tegen de wanden van het vat.

Voorbeeld

Twee injectiespuiten 1 en 2 zijn met elkaar verbonden door een slangetje. De zuiger van spuit 1 heeft een oppervlakte van 1 cm^2 ; de zuiger van spuit 2 heeft een oppervlakte van 10 cm^2 (figuur 52).

Als we op zuiger 1 een kracht uitoefenen van 10 N , is de druk die de zuiger uitoefent 10 N/cm^2 (de oppervlakte is immers 1 cm^2). De druk plant zich in alle richtingen door de vloeistof voort, dus ook op zuiger 2 wordt een druk uitgeoefend van 10 N/cm^2 . Omdat zuiger 2 een tien maal zo grote oppervlakte heeft als zuiger 1, werkt op zuiger 2 een 10 maal zo grote kracht. Om zuiger 2 op zijn plaats te houden, is dus een kracht nodig van $10 \cdot 10 = 100 \text{ N}$.

De druk die een vloeistof door zijn eigen gewicht uitoefent (bijvoorbeeld op de bodem van een glas), hangt af van de hoogte van de vloeistofkolom en van de dichtheid van de vloeistof. Omdat de druk op een vloeistof zich in alle richtingen voortplant, wordt er ook een druk op de wand van het

2 Een kist met een gewicht van 500 N staat op een oppervlakte van 250 cm^2 . Bereken de druk die de kist uitoefent.

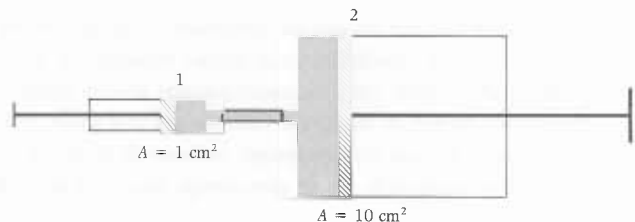
3 Het ijs op een sloot kan een maximale druk verdragen van 2 N/cm^2 . De oppervlakte van de zolen en hakken van Jan is in totaal 350 cm^2 . Hij zakt net niet door het ijs.

a Bereken het gewicht van Jan.

b Hoe groot is de massa van Jan?

c Kan Jan zonder problemen één voet optillen? Licht je antwoord toe.

fig. 52



vat uitgeoefend. Deze druk neemt toe naarmate de vloeistofkolom hoger en de dichtheid van de vloeistof groter worden.

Voor de druk die vloeistoffen uitoefenen, zijn drie punten van belang:

- hoe dieper je in een vloeistof komt, hoe groter de vloeistofdruk wordt;
- een vloeistof oefent – door zijn gewicht – druk uit in alle richtingen. Op een bepaalde plaats in de vloeistof is die druk in alle richtingen even groot;
- de hoofdwet van de hydrostatica: in een vat met vloeistof is op alle plaatsen die op dezelfde diepte liggen, de druk even groot.

Het berekenen van de vloeistofdruk

Om de druk te kunnen berekenen die een vloeistof op een bepaald horizontaal vlak uitoefent, moeten we kennen:

- de afstand van de vloeistofspiegel tot aan dat vlak;
- de dichtheid van de vloeistof.

Met deze gegevens kun je het gewicht van de vloeistofkolom boven 1 cm^2 (of 1 m^2) berekenen, en dus de druk.

Voorbeeld

Bereken de druk, die het water uitoefent op de bodem van een zwembad, $2,5 \text{ m}$ onder de waterspiegel. De dichtheid van water is 1 g/cm^3 .

We moeten hiervoor dus het gewicht berekenen van een waterkolom van $2,5 \text{ meter}$ (250 cm) hoogte, die boven een oppervlakte van 1 cm^2 staat.

Het volume van de waterkolom (hoogte \times oppervlakte) is:
 $250 \cdot 1 = 250 \text{ cm}^3$.

De massa van de waterkolom (volume \times dichtheid) is:
 $250 \cdot 1 = 250 \text{ g} = 0,25 \text{ kg}$.

Het gewicht van de waterkolom berekenen we met de formule $G = m \cdot g$, waarin g de valversnelling is. Deze is afgerond: 10 m/s^2 .

Het gewicht van de waterkolom is: $0,25 \cdot 10 = 2,5 \text{ N}$.

De druk van de waterkolom is dus $2,5 \text{ N/cm}^2 =$

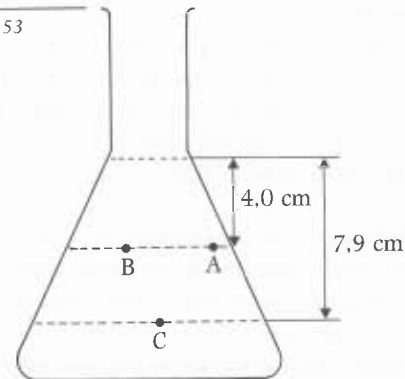
$2,5 \cdot 10\,000 \text{ N/m}^2 = 25\,000 \text{ N/m}^2 = 25 \text{ kPa}$.

4 Het waterniveau in het reservoir van een watertoren ligt 51 m boven de grond. De opening van een kraan in de waterleiding heeft een doorsnede van $2,0 \text{ cm}^2$, en ligt op 1,0 m boven de grond. De dichtheid van water is 1 g/cm^3 . Je sluit de opening van de kraan met je handpalm af en draait de kraan daarna open.

a Bereken de druk die het water op je hand uitoefent.

b Bereken de kracht die je op de kraanopening moet uitoefenen om het water tegen te houden.

fig. 53



5 In het naar boven taps toelopende glas van figuur 53 zit glycerol. De dichtheid van glycerol is $1,26 \text{ g/cm}^3$. De punten P en Q zitten beide 7,9 cm onder de vloeistofspiegel, R zit 4,0 cm onder de vloeistofspiegel.

a Bereken de druk in P, uitgeoefend door de vloeistof.

b Bereken de druk in Q.

c Bereken ook de druk in R.

Druk bij gassen

De druk van een gas wordt veroorzaakt door de botsingen van de molekulen tegen de wand van de ruimte, waarin het gas zich bevindt.

Als we een fietspomp afsluiten en daarna de zuiger indrukken, wordt het volume van het gas kleiner. Hetzelfde aantal molekulen bevindt zich dan in een kleiner volume. Het gevolg is dat het aantal botsingen van de molekulen tegen de wand

per cm^2 per seconde toeneemt: de druk wordt groter.

De druk wordt óók groter als we een gas in een afgesloten ruimte verwarmen. Door de grotere gemiddelde snelheid van de molekulen zal het aantal botsingen tegen de wand per cm^2 per seconde toenemen. Maar ook de kracht van de botsingen neemt dan toe. De druk wordt nu dus om twee redenen groter!

Een vloeistofmanometer: de U-buis

Als je één been van een U-buis aansluit op de gaskraan, ontstaat een hoogteverschil tussen de vloeistofniveaus in beide benen. Het hoogteverschil wordt veroorzaakt door de druk van het gas. Met behulp van dit hoogteverschil kan de druk van het gas worden berekend.

Een U-buis kun je dus gebruiken als manometer. Op de stippe lijn in figuur 54 heerst in beide benen dezelfde druk (hoofdwet van de hydrostatica). We kunnen dan zeggen:

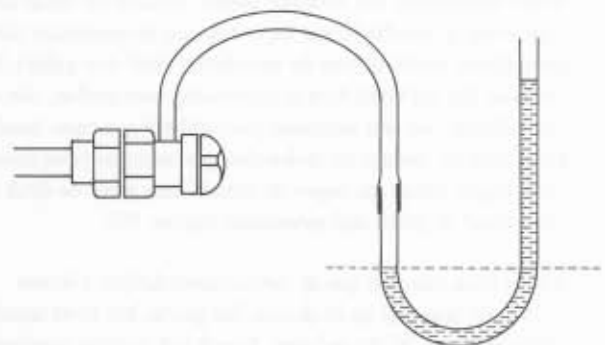
$$p_{\text{links}} = p_{\text{rechts}}$$

Links drukt alleen het gas; rechts drukken de lucht én de kolom water. Dus:

$$p_{\text{gas}} = p_{\text{lucht}} + p_{\text{water}}$$

Als p_{lucht} en het hoogteverschil van de vloeistofkolommen bekend zijn, kunnen we de druk van het gas berekenen.

fig. 54



Voorbeeld

Een met water gevulde U-buis (figuur 54) is aangesloten op een gaskraan. In het rechterbeen van de U-buis staat het water 50 cm hoger dan in het linkerbeen. De dichtheid van water is 1 g/cm^3 . De luchtdruk is 10 N/cm^2 . Bereken de gasdruk in N/cm^2 en in Pa.

Oplossing:

Op het water in het rechterbeen werkt de luchtdruk. Op de plaats van de stippellijn in het rechterbeen drukt dus op elke cm^2 een kolom water van 50 cm hoogte plus de luchtdruk van 10 N/cm^2 .

De massa van de waterkolom met een oppervlakte van 1 cm^2 is $50 \cdot 1 = 50 \text{ g} = 0,050 \text{ kg}$.

Het gewicht van het water is: $0,050 \cdot 10 = 0,50 \text{ N}$.

De druk van het water is dan $0,50 \text{ N/cm}^2$.

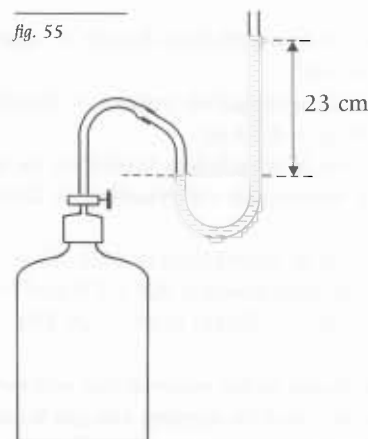
$$p_{\text{gas}} = p_{\text{lucht}} + p_{\text{water}}$$

$$p_{\text{gas}} = 10 + 0,50 = 10,5 \text{ N/cm}^2, \text{ ofwel:}$$

$$10,5 \cdot 10\,000 = 105\,000 \text{ Pa} = 105 \text{ kPa}.$$

6 Een met water gevulde U-buis is aangesloten op een gasfles (figuur 55). Het hoogteverschil tussen de niveaus van het water in beide benen is 23 cm. De luchtdruk is $10,12 \text{ N/cm}^2$. Bereken de druk van het gas in N/cm^2 en in Pa.

fig. 55



7 Een U-buis is gevuld met kwik. De dichtheid van kwik is $13,6 \text{ g/cm}^3$. Het linkerbeen van de U-buis wordt aangesloten op de gaskraan. In het rechterbeen blijkt het kwik dan 10 cm hoger te staan dan in het linkerbeen. De luchtdruk is $10,3 \text{ N/cm}^2$.

Bereken de gasdruk in N/cm^2 en in Pa.

Blok 17

H3

De gaswetten

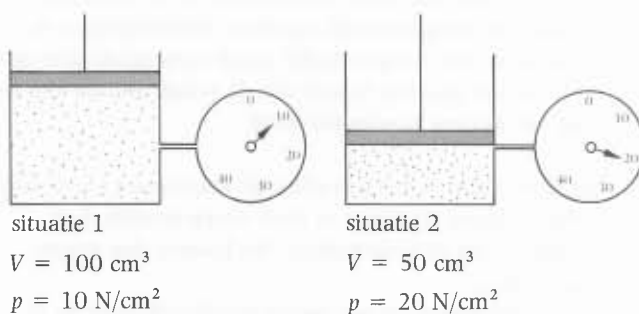
De wet van Boyle

De druk van een gas wordt bepaald door het aantal botsingen (per cm^2 per seconde) van de molekulen tegen elkaar en tegen de wand van het vat. We weten ook dat de gemiddelde snelheid van de molekulen groter wordt als de temperatuur wordt verhoogd. In dezelfde ruimte zullen de molekulen dan *vaker én krachtiger* botsen.

Boyle onderzocht het verband tussen volume en druk van een afgesloten hoeveelheid gas bij constante temperatuur (de gemiddelde snelheid van de molekulen blijft dus gelijk). Het verband dat hij vond kun je eenvoudig voorspellen. Als we het volume van een bepaalde hoeveelheid gas twee maal zo klein maken, botsen de molekulen per seconde twee maal zo vaak tegen elkaar en tegen de wand. Dan moet de druk dus twee maal zo groot zijn geworden (figuur 56).

Als de druk van het gas in het oorspronkelijke volume 10 N/cm^2 was, zal de druk van het gas in het twee maal zo kleine volume 20 N/cm^2 zijn. Wordt het volume opnieuw twee maal zo klein, dan zal de druk wéér twee maal zo groot worden, dus 40 N/cm^2 .

fig. 56



We kunnen zeggen dat druk en volume *omgekeerd evenredig* zijn: als het volume n maal zo groot wordt, wordt de druk n maal zo klein (voor n mag je elk heel of gebroken getal invullen). Uit de tabel blijkt dat het produkt van volume en druk constant is (figuur 57).

fig. 57

	volume V	druk p	$p \cdot V$
situatie 1	100 cm ³	10 N/cm ²	1000 Ncm
situatie 2	50 cm ³	20 N/cm ²	1000 Ncm
situatie 3	25 cm ³	40 N/cm ²	1000 Ncm

Als het volume $n \cdot V$ wordt, wordt de

$$\text{druk } \frac{p}{n}. \text{ Je ziet nu dat } (n \cdot V) \cdot \left(\frac{p}{n}\right)$$

= $p \cdot V$, ongeacht de waarde van n .

Anders gezegd: als p en V omgekeerd evenredig zijn, blijft het produkt $p \cdot V$ steeds hetzelfde.

Dit verband wordt de wet van Boyle genoemd:

Het produkt van druk en volume van een afgesloten hoeveelheid gas is constant, mits de hoeveelheid gas en de temperatuur niet veranderen.

Je kunt deze wet in formulevorm op twee manieren schrijven:

- $p \cdot V = \text{constant}$
- $(p \cdot V)_{\text{begin}} = (p \cdot V)_{\text{eind}}$

Eenheden

Het maakt niet veel uit welke eenheden je gebruikt bij de wet van Boyle. Je moet er alleen voor zorgen dat links en rechts van het '='-teken dezelfde eenheden staan. Druk je p bij het linkerlid uit in N/cm², dan moet je dat rechts ook doen. Vul je V in het linkerlid in dm³ in, dan moet je dat rechts ook doen.

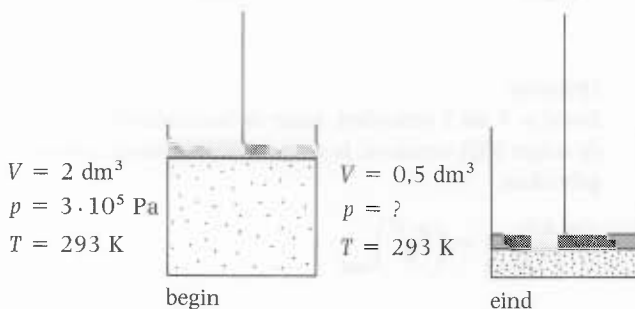
Voorbeeld

In een vat dat is afgesloten door een zuiger, bevindt zich 2,0 dm³ lucht met een druk van $3,0 \cdot 10^5$ Pa. De temperatuur is 293 K (figuur 58).

De lucht wordt samengeperst tot een volume van 0,50 dm³. De temperatuur blijft 293 K.

Bereken de nieuwe druk.

fig. 58



We mogen natuurlijk de wet van Boyle gebruiken want:

- de temperatuur verandert niet;
- de hoeveelheid gas blijft constant.

Dus er moet gelden: $p \cdot V = \text{constant}$.

$$\text{Ofwel: } (p \cdot V)_{\text{begin}} = (p \cdot V)_{\text{eind}}$$

Vul je nu de bekende grootheden in, dan kun je p berekenen.

$$(3,0 \cdot 10^5 \cdot 2,0)_{\text{begin}} = (p \cdot 0,50)_{\text{eind}} \Rightarrow$$

$$6,0 \cdot 10^5 = 0,50 \cdot p \text{ en } p = \frac{6 \cdot 10^5}{0,5} = 12 \cdot 10^5 \text{ Pa.}$$

Omdat p in het linkerlid in Pa werd ingevuld, vind je de druk in het rechterlid ook in Pa.

1 In figuur 59 zie je een injectiespuit die wordt afgesloten met een vinger. Het volume onder de zuiger is 3,0 cm³. De druk is $1,0 \cdot 10^5$ Pa. We drukken de zuiger naar beneden, zodat de druk $2,5 \cdot 10^5$ Pa wordt. De temperatuur verandert niet.

Bereken het nieuwe volume.

fig. 59
Een injectiespuit.



2 Een ballon heeft een volume van 3,0 dm³. De druk in de ballon is 10 N/cm². Je blaast de ballon op. Het volume wordt dan 8,0 dm³. De temperatuur verandert niet.

Waarom kun je de druk in de opgeblazen ballon hier niet uitrekenen?

3 Met een manometer wordt de gasdruk in een vat gemeten. Het vat heeft een inhoud van 100 cm³. Nadat het is gevuld met een gas, is de druk in het vat opgelopen tot 1100 mbar. Met een injectiespuit wordt 20 cm³ vloeistof toegevoegd, zonder dat er gas kan ontsnappen. De verdamping van deze vloeistof in het vat is te verwaarlozen. De temperatuur blijft constant. Bereken de druk die direct na het inbrengen van de vloeistof in het vat heerst.

De algemene gaswet

Als van een afgesloten hoeveelheid gas het volume en de druk veranderen, zal – in veel gevallen – óók de temperatuur veranderen. Als de temperatuur stijgt, neemt de gemiddelde snelheid van de molekulen toe. Daardoor neemt het *aantal botsingen* van de molekulen tegen de wand (per cm^2 per seconde) toe net als de kracht van de botsingen. De druk wordt daardoor hoger. Bij een temperatuurdaling neemt de druk af; de molekulen hebben dan immers een lagere gemiddelde snelheid.

Als we de temperatuur steeds verder verlagen (dat is beslist niet eenvoudig!), blijken de molekulen bij een bepaalde temperatuur niet meer te bewegen. Er zijn dan geen botsingen meer en de druk is nul geworden. De temperatuur waarbij de molekulen niet meer bewegen, is de laagst mogelijke temperatuur. Deze temperatuur wordt daarom het absolute nulpunt genoemd.

Het absolute nulpunt ligt bij -273°C . Kelvin gebruikte het absolute nulpunt als beginpunt voor een nieuwe temperatuurschaal. Hij koos de schaal zó, dat een temperatuurverschil van één graad van die nieuwe schaal overeenkomt met een temperatuurverschil van één celsiusgraad (op dezelfde thermometer). Later is die nieuwe schaal naar Kelvin genoemd. Nu is 0 K gelijk aan -273°C en 0°C is dus gelijk aan 273 K . Algemeen geldt: $T_{\text{in K}} = T_{\text{in }^\circ\text{C}} + 273$.

De formulevorm van de algemene gaswet is alléén geldig als de temperatuur in kelvin is uitgedrukt.

Die formule luidt:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{constant, ofwel:}$$

$$\left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{begin}} = \left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{eind}}$$

Uit deze formule blijkt:

- als de temperatuur (in kelvin) van een afgesloten hoeveelheid gas bij constant blijvend volume n maal zo groot wordt, dan wordt de druk óók n maal zo groot. In de formule wordt dan immers zowel de teller als de noemer n maal zo groot. De uitkomst van de breuk blijft daardoor hetzelfde.
- als de temperatuur in kelvin bij constant blijvende druk n maal zo groot wordt, dan wordt het volume óók n maal zo groot.

De algemene gaswet mag je toepassen op elk proces waarbij de hoeveelheid gas constant blijft, maar ook op elk proces waarbij bovendien óf de druk, óf het volume, óf de temperatuur niet verandert.

In de formule $\left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{begin}} = \left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{eind}}$ kan die gelijk-

blijvende factor in beide leden van de vergelijking worden weggedeeld.

Dus:

- als naast de hoeveelheid gas ook de druk niet verandert,

wordt de formule: $\frac{V}{T} = \text{constant};$

- als naast de hoeveelheid gas ook het volume niet verandert,

wordt de formule: $\frac{p}{T} = \text{constant};$

- als naast de hoeveelheid gas ook de temperatuur niet verandert, wordt de formule: $p \cdot V = \text{constant}$. Deze laatste formule kennen we al als de wet van Boyle.

Voorbeeld

In een cilinder bevindt zich lucht onder een zuiger. Het volume onder de zuiger is 30 cm^3 . De druk in de cilinder is 15 N/cm^2 en de temperatuur is 27°C . We verhogen de temperatuur tot 127°C en we persen de lucht samen tot het volume 20 cm^3 is geworden (figuur 60).

Bereken de druk onder de zuiger.

Gegeven:

$$V_1 = 30\text{ cm}^3$$

$$p_1 = 15\text{ N/cm}^2$$

$$T_1 = 27^\circ\text{C}$$

Na verwarmen en samenpersen:

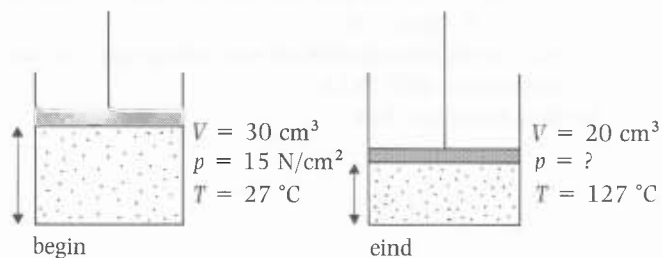
$$V_2 = 20\text{ cm}^3$$

$$T_2 = 127^\circ\text{C}$$

Gevraagd:

p_2 na verwarmen.

fig. 60



Oplossing:

Zowel p , V als T verandert, maar de hoeveelheid lucht onder de zuiger blijft constant. Je mag dus de algemene gaswet gebruiken.

$$\left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{begin}} = \left(\frac{p \cdot V}{T}\right)_{\text{eind}}$$

Je weet al:

$$p_{\text{begin}} = 15 \text{ N/cm}^2$$

$$V_{\text{begin}} = 30 \text{ cm}^3$$

$$T_{\text{begin}} = (27 + 273) \text{ K} = 300 \text{ K}$$

$$V_{\text{eind}} = 20 \text{ cm}^3$$

$$T_{\text{eind}} = (127 + 273) \text{ K} = 400 \text{ K}$$

Invullen:

$$\frac{15 \cdot 30}{300} = \frac{p_{\text{eind}} \cdot 20}{400} \Rightarrow$$

$$1,5 = 0,05 p_{\text{eind}} \Rightarrow$$

$$p_{\text{eind}} = \frac{1,5}{0,05} \Rightarrow$$

$$p_{\text{eind}} = 30 \text{ N/cm}^2.$$

4 In een vat met een beweegbare zuiger bevindt zich 100 cm^3 gas met een druk van 12 N/cm^2 . De temperatuur van het gas is 20°C . Het volume wordt verkleind tot 65 cm^3 en de temperatuur wordt verhoogd tot 34°C .

a Bereken de nieuwe druk.

Om het volume op 65 cm^3 te houden, moest er een kracht op de zuiger worden uitgeoefend. Deze kracht valt weg, waarna het volume groter wordt. De druk wordt nu 11 N/cm^2 . De temperatuur blijft gelijk.

b Bereken het volume van het gas na het wegvallen van de kracht.

5 Een goed afsluitbare fles met een volume van $1,0 \text{ dm}^3$ wordt zonder de stop erop in een koelkast gezet. De temperatuur in de koelkast is 5°C . De druk van de buitenlucht tijdens de proef is en blijft $10,2 \text{ N/cm}^2$. Na enkele uren wordt de fles uit de koelkast gehaald en onmiddellijk afgesloten. Vervolgens wordt de fles in een warme omgeving geplaatst, waardoor zijn temperatuur 44°C wordt. Vervolgens wordt de stop voorzichtig losgemaakt.

a Wat zul je waarnemen bij het losmaken van de stop?

b Bereken de druk in de fles vlak voordat hij wordt geopend.

6 In een pomp zit gas met een druk van $10,6 \text{ N/cm}^2$. De temperatuur van het gas in de pomp is 21°C . De zuiger van de pomp wordt met kracht ingedruwd. Daardoor stijgt de temperatuur van het gas tot $23,5^\circ\text{C}$. Het volume van het gas is op dat moment 115 cm^3 en de druk is opgelopen tot $24,8 \text{ N/cm}^2$. Bereken het volume in de pomp voordat de zuiger werd ingedrukt.

E1 Oefenen met examenopgaven

In deze extrastof (en in de extrastof van blokken die hierna komen) kun je oefenen voor het eindexamen met een aantal opgaven van vorige examens.

Probeer de opgaven steeds te maken zoals je dat hebt geleerd:

- lees eerst het vraagstuk rustig door;
- noteer de gegevens en het gevraagde;
- bedenk hoe je de opgave ongeveer zou kunnen oplossen (maak zonodig een tekening);
- schrijf de formules op die je nodig hebt en vul de gegevens in;
- vergeet vooral niet je antwoord te controleren (let op de eenheid).

Geef bij elk meerkeuze-antwoord een korte toelichting. (Dat wordt op je examen overigens *niet* van je gevraagd.)

1 Vroeger hadden sommige mensen een 'donderglas' (figuur 61) aan de muur hangen. Als de luchtdruk plotseling daalt, verandert de hoogte van het waterniveau in de 'tuit' van het donderglas. Dit betekende meestal dat er onweer op komst was.

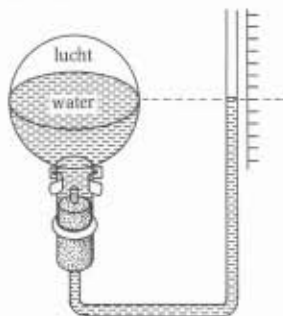
a Bereken of het water in de tuit stijgt of daalt als de luchtdruk daalt.

fig. 61
Een donderglas.



Een leerling heeft een donderglas nagebouwd (figuur 62).

fig. 62
Een nagebouwd donderglas.



In het begin staat het water in de buis en in de kolf even hoog.

De dichtheid van water is $1,00 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

De druk van de buitenlucht is $1,03 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

Na enige tijd daalt de luchtdruk tot $1,02 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. De temperatuur verandert niet. De verandering van het waterniveau in de kolf mag je verwaarlozen.

b Bereken hoeveel het water in de buis stijgt of daalt door deze luchtdrukdaling.

De druk van de buitenlucht blijft nu enige tijd constant. De ramen van het lokaal worden opengezet. Daardoor treedt een flinke temperatuurdaling op.

c Bij deze temperatuurdaling zal het water in de buis:

- A dalen.
- B gelijk blijven.
- C stijgen.

Kies het juiste antwoord en beredeneer deze keuze.

2 In een bekeerglas bevindt zich een hoeveelheid fijn gemalen ijs van -40°C .

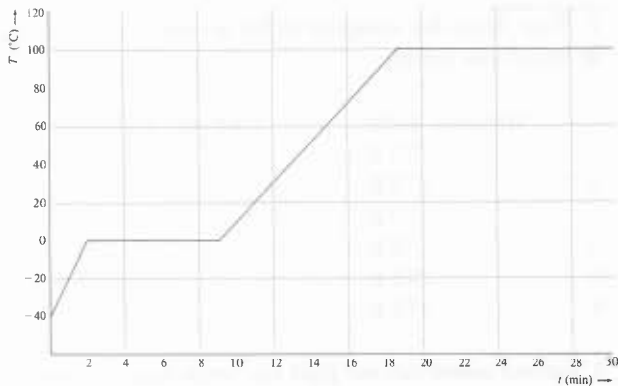
Onder voortdurend roeren wordt het glas met inhoud verwarmd. Daarbij wordt iedere minuut evenveel warmte aan de inhoud van het bekeerglas toegevoegd. Elke minuut wordt de temperatuur gemeten. Uit de meetresultaten is een grafiek gemaakt (figuur 63).

a Wat bevindt zich na 5 minuten verwarmen in het glas?

- A Alleen ijs.
- B Alleen water.
- C Zowel ijs als water.
- D Dat is uit de grafiek niet te bepalen.



fig. 63
Grafiek van het verwarmen van ijs.



b Welke van de volgende beweringen is juist?

- I Het water is tijdens de proef gaan koken.
II De luchtdruk was tijdens de proef lager dan normaal op zeeniveau.

- A Zowel I als II.
B Alleen I.
C Alleen II.
D Geen van beide.

c In kokend water stijgen grote bellen op. Deze bellen zijn vooral gevuld met:

- A koolstofdioxide.
B lucht.
C stikstof.
D waterdamp.
E waterstof.
F zuurstof.

3 In figuur 64 zie je een tekening van de benzinetoevoer bij een brommer. De benzine uit de tank gaat via de vlotterkamer naar de motor. In de vlotterkamer drijft de vlotter. Deze wordt gebruikt om de benzinetoevoer te regelen. Als het niveau in de vlotterkamer daalt (door de verbranding in de motor), zakt de vlotter. De punt van de vlotter sluit nu de opening niet meer af. Daardoor stroomt opnieuw benzine naar beneden, totdat de vlotter weer zover omhoog is gekomen dat de punt de opening weer afsluit.

Boven de vlotter staat een kolom benzine van 30 cm.

De dichtheid van benzine is $0,8 \text{ g/cm}^3$.

De doorsnede van de verticale buis is $0,5 \text{ cm}^2$.

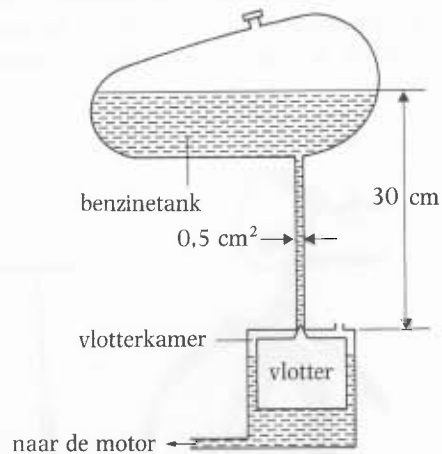
a Hoe groot is de kracht die de benzine die boven de vlotter staat, uitoefent op de vlotter?

- A $0,12 \text{ N}$.
B $0,15 \text{ N}$.
C $0,24 \text{ N}$.
D $0,30 \text{ N}$.

b Hoe groot is de druk die de benzine die boven de vlotter staat, uitoefent op de vlotter?

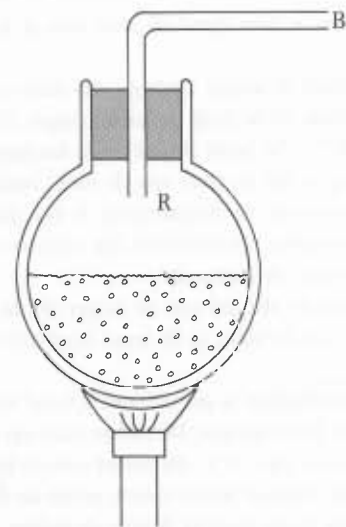
- A $0,24 \text{ N/cm}^2$.
B $0,30 \text{ N/cm}^2$.
C $0,375 \text{ N/cm}^2$.
D $2,4 \text{ N/cm}^2$.

fig. 64
De benzinetoevoer bij een brommer.



4 In een kolf zit water, dat al geruime tijd heeft gekookt (figuur 65).

fig. 65
Een kolf met kokend water.



a Wat bevindt zich voornamelijk boven de vloeistof in ruimte R?

- A Lucht.
B Waterdamp.
C Waterstof.
D Zuurstof.

We draaien de vlam uit. Het water houdt onmiddellijk op met koken. Direct daarna wordt het gas in R via buis B afgezogen.

b Welke van de volgende uitspraken is juist?

- I Het water gaat opnieuw koken.
II De temperatuur wordt weer 100°C .

- A Zowel I als II.
B Alleen I.
C Alleen II.
D Geen van beide.

5 Een fietspomp is aangesloten op een fietsband (figuur 66). De doorsnede van de zuiger in de fietspomp is 15 cm^2 . De massa van de zuiger, de stang en het handvat is samen $0,75 \text{ kg}$. De barometerstand is 100 kPa . In de situatie in figuur 66 'hangt' de zuiger vrij in de buis. De wrijving moet je verwaarlozen.

fig. 66



a Bereken in deze stand de druk van de lucht onder de zuiger.

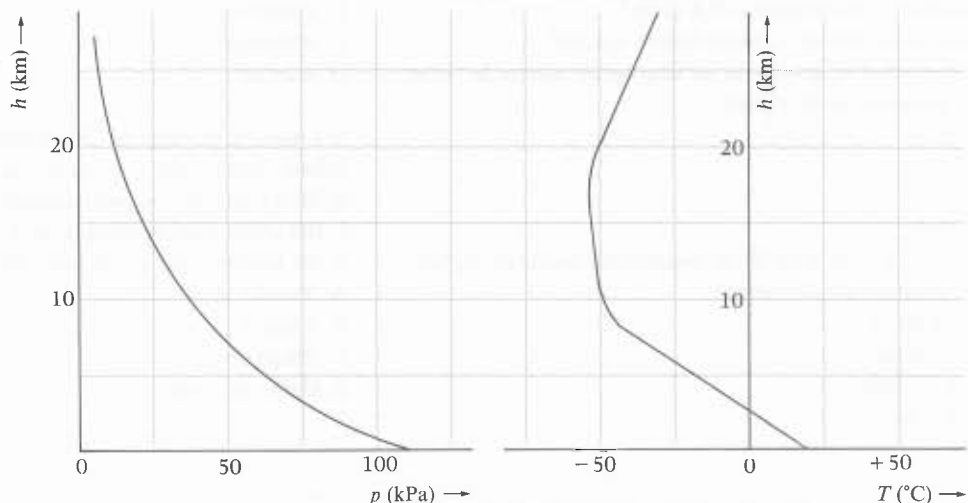
Josette duwt de zuiger omlaag. Als deze op 32 cm van de bodem staat, is de druk onder de zuiger 127 kPa . De temperatuur is 17°C . De lucht begint in de fietsband te stromen, op het moment dat de druk van de lucht onder de zuiger 340 kPa wordt. De temperatuur is dan door het samenpersen 21°C geworden. Verwaarloos het volume van de lucht in de slang die aan de pomp zit.

b Bereken de afstand van de zuiger tot de bodem, op het moment dat de lucht in de band begint te stromen.

6 Een weerballon is gevuld met $5,0 \text{ m}^3$ waterstofgas en stijgt naar zeer grote hoogte. De ballon start op zeeniveau bij een temperatuur van 15°C . De wand van de ballon mag je als volkomen rekbaar beschouwen, zodat de druk in de ballon even groot is als de druk buiten de ballon.

In de diagrammen in figuur 67 kun je het verband aflezen tussen hoogte h en luchtdruk p en tussen hoogte h en temperatuur T in $^\circ\text{C}$.

fig. 67



Bereken met behulp van deze diagrammen hoe groot het volume van de weerballon is op een hoogte van 10 km .

7 Waar liggen het vriespunt en het kookpunt van water op de schaal van Kelvin?

	Vriespunt water	Kookpunt water
A	-273 K	-173 K
B	-273 K	0 K
C	0 K	100 K
D	0 K	273 K
E	273 K	100 K
F	273 K	373 K

8 Iemand neemt met een pipet een beetje water uit een rivier. De pipet wordt afgesloten met de vinger en dan uit het water gehaald (figuur 68).

fig. 68



Tussen het water en de vinger zit lucht.

a Vergelijk de druk van de lucht in de pipet met de druk van de buitenlucht. De druk van de lucht in de pipet is:

- A lager.
- B gelijk.
- C hoger.

Door de pipet vast te houden, wordt de lucht erin warmer.

b Wat gebeurt daardoor met het waterniveau in de pipet?

- A Het waterniveau daalt.
- B Niets; het waterniveau blijft gelijk staan.
- C Het waterniveau stijgt.

9 Een eenvoudige drinkbak voor kippen bestaat uit een bak en een reservoir met een opening in de rand (figuur 69). Het reservoir wordt met water gevuld, de bak wordt er ondersteboven opgezet en het geheel wordt daarna ook omgekeerd (figuur 69). Figuur 70 is een doorsnede van de drinkbak met de opening naar rechts. De ruimte bovenin het reservoir noemen we R. De punten P en Q liggen op dezelfde hoogte.

fig. 69
Een drinkbak voor kippen.

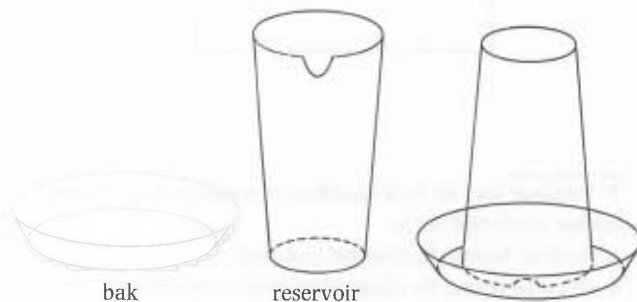
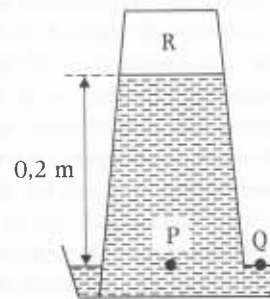


fig. 70
Een doorsnede van de drinkbak.



a Vergelijk de druk in ruimte R met de druk van de buitenlucht. In R is de druk:

- A kleiner dan de druk van de buitenlucht.
- B gelijk aan de druk van de buitenlucht.
- C groter dan de druk van de buitenlucht.

b Hoe komt het dat het reservoir niet leegloopt?

- A In R is een vacuüm en dat houdt het water omhoog.
- B De luchtdruk in Q is groter dan de druk in P.
- C De luchtdruk in Q is gelijk aan de druk in R + de druk van de waterkolom in het reservoir boven P.
- D De luchtdruk in Q is gelijk aan de druk van een waterkolom met een hoogte van 20 cm.

Gegeven: de dichtheid van water is 1000 kg/m^3 .

c De waterkolom van 0,20 m tussen R en P oefent een druk uit van:

- A 20 N/m^2 .
- B 200 N/m^2 .
- C 2000 N/m^2 .

Blok 17

E2

Onverzadigde en verzadigde dampen

Het verdampen van een vloeistof

Als we in een open bakje ether gieten, is na korte tijd alle vloeistof verdwenen. Overal in het vertrek is dan de typische etherlucht te ruiken. De ether is van de vloeibare fase overgegaan in de gasvormige fase; de ether is verdampt. Vloeistoffen als ether, aceton, benzine en alcohol verdampen snel. We noemen deze vloeistoffen *vluchtig*. Kwik en olie daarentegen verdampen (bij kamertemperatuur) juist heel langzaam.

Het verdampen van een vloeistof kunnen we verklaren met het molekuulmodel.

In een vloeistof bevinden de molekulen zich op gemiddeld veel kleinere afstand van elkaar dan in een gas. Er is cohesie, want de vloeistof vormt druppels. Toch kunnen de molekulen zich nog vrij ten opzichte van elkaar bewegen. Door deze beweging botsen de molekulen in de vloeistof ook tegen elkaar. Daardoor maken ze een 'kris-kras'-beweging. Omdat de molekulen tegen elkaar botsen, veranderen de

richting en de grootte van hun snelheid voortdurend. Als een molecuul een paar keer na elkaar een 'duw' in dezelfde richting krijgt, neemt de snelheid van dat molecuul toe.

Die snelheid kan ervoor zorgen dat het molecuul aan de vloeistof ontsnapt, maar dan moet de snelheid wel groot genoeg zijn om de cohesie te overwinnen. Op elk molecuul werken immers de aantrekkende krachten van de molekulen er omheen. Als een molecuul zich midden in de vloeistof bevindt (figuur 71), is de resulterende kracht op het molecuul nul: er wordt van alle kanten even hard aan het molecuul getrokken. Maar bevindt het molecuul zich aan de oppervlakte van de vloeistof, dan ondervindt het molecuul een aantrekkende kracht die naar beneden is gericht (figuur 72). Om aan de vloeistof te kunnen ontsnappen, moet de snelheid van een molecuul dus groot genoeg zijn om de aantrekkende kracht van de molekulen in het vloeistofoppervlak te overwinnen.

Vanuit de damp boven een vloeistof kunnen de molekulen weer in de vloeistof terugkeren. Als ze naar beneden bewegen, ondervinden ze bij het oppervlak weer de aantrekkingskracht van de vloeistofmolekulen en keren ze in de vloeistof terug. Een vloeistof in een niet afgesloten ruimte verdampt als er per tijdseenheid meer molekulen uit de vloeistof ontsnappen dan terugkeren.

Omdat alleen de snelste molekulen aan de vloeistof kunnen ontsnappen, neemt de gemiddelde snelheid van de in de vloeistof achtergebleven molekulen af. Maar zoals we al hebben gezien, is de gemiddelde snelheid van de molekulen een maat voor de temperatuur van de vloeistof. Dat verklaart waarom de temperatuur van een vloeistof daalt als die vloeistof verdampt.

Ether verdampt veel sneller dan water. Kennelijk oefenen ethermolekulen kleinere aantrekkende krachten op elkaar uit dan watermolekulen. De snelheid die ethermolekulen nodig hebben om aan de vloeistof te ontsnappen, is dus ook kleiner dan de snelheid die watermolekulen daarvoor nodig hebben.

fig. 71
Een molecuul in vloeistof.

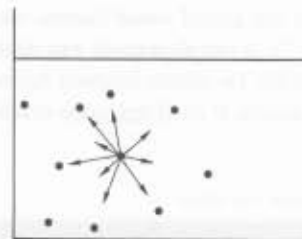
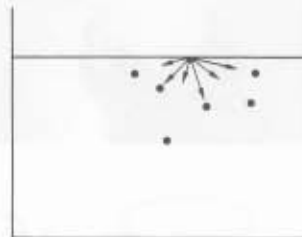


fig. 72
Een molecuul aan het vloeistofoppervlak.



1 Verklaar met de molekuultheorie waarom een vloeistof sneller verdampt als je:

- a de druk boven de vloeistof verlaagt;
- b de lucht boven de vloeistof voortdurend ververs;
- c het oppervlak vergroot.

2 Als je ether in een tochtvrije ruimte laat verdampen, blijkt dat het bij de grond veel sterker naar ether ruikt dan bij het plafond.

Welke conclusie kun je hieruit trekken?

3 Als je een paar druppels ether op je hand laat vallen, verdampen die druppels heel snel. Verklaar met het molekuulmodel waarom dat op je hand zo koud aanvoelt.

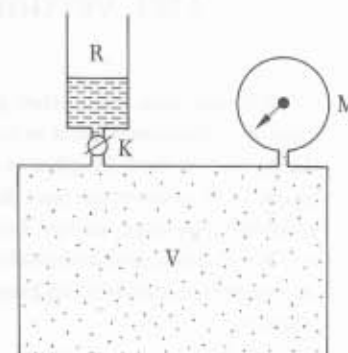
4 Verklaar waarom de was sneller droogt als het waait.

Onverzadigde en verzadigde dampen

Als een vloeistof in een gesloten vat verdampt, treden er andere verschijnselen op dan wanneer de vloeistof in een open vat verdampt.

Vat V is een luchtledig glazen vat, waarop een reservoir R met een druppelkraan (half doorboorde kraan) en een manometer M zijn aangesloten (figuur 73).

fig. 73



In het reservoir R zit ether. Elke keer als we het kraantje K een halve slag draaien, valt er één etherdruppel in vat V. Tijdens de proef zorgen we ervoor dat de temperatuur constant blijft.

Als de eerste druppel in het vat valt, verdampt deze onmiddellijk. Ook de volgende druppels verdampen helemaal. Na elke druppel neemt de druk, die wordt aangegeven op de manometer M, evenveel toe.

Als het volume en de temperatuur van vat V constant blijven, stijgt de druk omdat er steeds meer etherdamp in het vat komt. De druk ontstaat immers door botsingen van de moleculen tegen elkaar en tegen de wanden van het vat. Dus hoe meer etherdamp er ontstaat, hoe groter de druk wordt.

Na enige tijd neemt de druk steeds minder toe per druppel ether die in het vat valt. Op een gegeven moment neemt de druk helemaal niet meer toe. Ook zien we dat er op de bodem van het vat steeds meer vloeistof komt te liggen, die niet meer verdampt. Bij de heersende temperatuur kan dus blijkbaar geen ether meer verdampen. Bij die temperatuur blijft het aantal ethermoleculen in de damp per volume-eenheid (bijvoorbeeld per cm^3) constant. Het aantal moleculen dat dan per seconde uit de vloeistof ontsnapt, is gelijk aan het aantal moleculen dat terugkeert in de vloeistof. Er is dus een 'beveeglijk' evenwicht ontstaan.

We zeggen dan dat de ruimte bij die temperatuur met damp is *verzadigd*. De damp zelf noemen we een *verzadigde damp*. Zolang de vloeibare ether in het vat helemaal verdampte, was de damp onverzadigd. Als in een afgesloten vat – behalve damp – ook de bijbehorende vloeistof aanwezig is, weet je dus dat de damp verzadigd is.

Als we het volume van het vat – waarin behalve etherdamp ook vloeibare ether aanwezig is – verkleinen, neemt de druk aanvankelijk even toe. Maar snel zal de druk weer gelijk worden aan de druk, die heerste voordat het volume werd verkleind. De hoeveelheid vloeibare ether is dan wel groter geworden. Er is blijkbaar etherdamp gecondenseerd.

De verzadigde damp heeft een bepaalde druk: de *verzadigingsdruk*. Maar als we (terwijl er voldoende vloeistof is) de temperatuur van de vloeistof verhogen, neemt de gemiddelde snelheid van de moleculen toe, dus verdampt er per seconde méér vloeistof. Als de ruimte afgesloten blijft, komen er daardoor ook meer moleculen per cm^3 boven de vloeistof. De kans dat moleculen uit de damp weer in de vloeistof terugkeren, wordt óók groter. Er zal zich bij een constante hogere temperatuur dus een nieuw evenwicht instellen. Ofwel: er ontstaat opnieuw een verzadigingsdruk. Deze nieuwe verzadigingsdruk is nu echter groter dan de verzadigingsdruk bij de lagere temperatuur.

Zo horen bij de damp van iedere vloeistof – voor alle temperaturen tussen het smelt- en het kookpunt – een reeks verzadigingsdrukken; de verzadigingsdruk neemt dus altijd toe als de temperatuur stijgt.

Maar de verzadigingsdruk hangt óók af van de soort moleculen (dus de soort stof). Als we de verzadigingsdrukken van de damp van allerlei vloeistoffen vergelijken bij *dezelfde* tempera-



tuur, heeft de damp van de vluchtigste vloeistof de grootste verzadigingsdruk. Dit bepaalt weer de ligging van het kookpunt: hoe vluchtiger de vloeistof, des te lager is zijn kookpunt.

Bij het weer speelt het ontstaan van verzadigde waterdamp een rol als mist, dauw of rijp wordt gevormd. Op een zonnige dag kan er veel water verdampen. Na zonsondergang koelt de aarde door warmte-uitstraling af. De lucht die met de aarde in contact is, koelt dus ook af. Daarbij kan voor de vochtige lucht het verzadigingspunt worden bereikt. Als de temperatuur dan nog iets verder daalt, condenseert de waterdamp en vormt zich mist. Op gras en kleine takjes (groot oppervlak!) vormt zich boven 0°C dauw. Als de luchttemperatuur lager dan 0°C is geworden, ontstaat rijp in plaats van dauw.

Ook wolkvorming vindt plaats door het ontstaan van verzadigde waterdamp: opstijgende vochtige lucht koelt af. De verzadigingsdruk daalt dus, waardoor de lucht verzadigde waterdamp kan bevatten. De bijbehorende vloeistof bestaat uit waterdruppeltjes die samen een wolk vormen.

5 Verklaar met de molekuultheorie waarom de druk in het vat met ether gelijk blijft, als we het volume verkleinen bij gelijkblijvende temperatuur.

6 In een afgesloten vat bevinden zich een vloeistof én de verzadigde damp van die vloeistof.

a Wat gebeurt er met de druk als de temperatuur van dat vat wordt verhoogd?

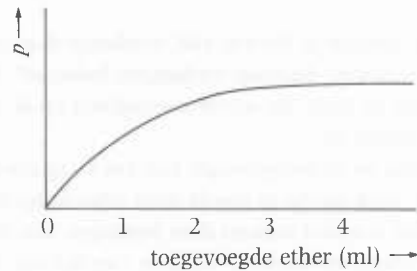
b Verklaar je antwoord.

7 We hebben de gegevens genoteerd van de proef die op bladzijde 46 en 47 werd beschreven: het verdampen van vloeibare ether in een luchtledig vat bij constante temperatuur. In het diagram van figuur 74 is het verband weergegeven tussen de druk van de etherdamp en het aantal ml toegevoegde ether.

a Wat bevond zich in het vat, nadat er 1 ml ether was toegevoegd?

b Wat bevond zich in het vat, nadat er 4 ml ether was toegevoegd?

fig. 74



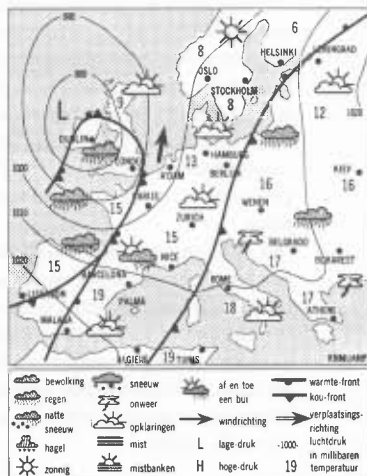
Blok 17

E3 Zelf een weerkaart maken

Bij het KNMI in De Bilt worden alle gegevens uit binnen- en buitenland over het weer verzameld. Daarna wordt er een weersverwachting voor de komende dagen opgesteld (figuur 75). Alle gegevens over luchtdruk, windrichting, neerslag, bewolgingsgraad en temperaturen worden verwerkt in een weerkaart. Na enkele uren wordt met nieuwe gegevens een nieuwe kaart gemaakt. Je kunt dan zien in welke richtingen de hoge- en lagedrukgebieden zich verplaatsen en hoe fronten zich bewegen.

Uit een aantal gegevens ga je nu zelf een weerkaart samenstellen.

fig. 75
Een weerkaart.



Weerrapporten van woensdag 3 april 20 uur:

In de eerste kolom de weerstations, in de tweede de weersgesteldheid, in de derde de windrichting en windsnelheid in meters per seconde, in de vierde kolom de maximumtemperatuur, in de vijfde de minimumtemperatuur, en in de laatste de neerslag in millimeters.

station	weer	wind	+ °C	mm	station	weer	wind	+ °C	mm
Amsterdam	onbew.	wzw 7	11	9 0.7	Locarno	zw. bew.	wzw 1	18	7 0
De Bilt	zw. bew.	zw 4	13	9 0.2	Londen	licht bew.	zww 5	13	5 1
Deelen	regenbui	wzw 4	13	8 0.2	Luxemburg	zw. bew.	w 3	12	4 0.1
Eelde	licht bew.	wzw 4	13	7 0.5	Madrid	licht bew.	wnw 8	24	7 0.1
Eindhoven	licht bew.	zww 2	14	8 0.8	Malaga	regenbui	wnw 4	20	8 0.1
Den Helder	onbew.	zw 7	10	8 0.8	Malorca	half bew.	wzw 2	21	10 0
Rotterdam	licht bew.	wzw 8	12	9 0.5	Malta	licht bew.	w 5	17	11 0.1
Twente	regenbui	z 5	13	8 0.3	Moskou	zw. bew.	z 1	12	6 0.1
Vlissingen	onbew.	wzw 9	11	8 1	Munchen	zw. bew.	nnw 1	19	4 0
Zuid Limburg	regenbui	zw 4	12	8 2	Nice	zw. bew.	zw 1	16	10 0
Aberdeen	regenbui	nnw 4	10	2 1	Oslo	licht bew.	z 6	11	6 0.1
Athene	half bew.	n 3	14	10 0.1	Parjs	half bew.	w 5	15	7 0.9
Barcelona	zw. bew.	windst	17	6 0	Prägg	zw. bew.	nnw 1	21	6 0
Berlijn	zw. bew.	w 4	19	7 0	Rome	licht bew.	wnw 3	17	6 0
Bordeaux	licht bew.	w 5	14	9 4	Split	zw. bew.	windst	17	5 0
Brussel	half bew.	zw 5	14	8 4	Stockholm	zw. bew.	z 2	13	8 0.1
Budapest	onbew.	n 2	14	7 0.1	Warschau	zw. bew.	z 3	15	9 0.1
Dublin	regenbui	wzw 6	11	3 1	Wenen	zw. bew.	zwo 4	12	8 0.1
Frankfurt	zw. bew.	zww 6	18	5 0	Zurich	zw. bew.	wnw 6	17	3 0
Geneve	zw. bew.	nnw 2	18	5 0	Casablanca	half bew.	nw 3	18	11 1
Helsinki	zw. bew.	zw 8	7	4 0.1	Cyprus	licht bew.	w 5	20	16 0.1
Innsbruck	regenbui	w 3	19	4 0.1	Istanbul	zw. bew.	n 2	9	5 3
Klagenfurt	regenbui	o 4	15	5 0.1	Las Palmas	half bew.	n 9	21	16 2
Kopenhagen	zw. bew.	wzw 6	13	7 0.1	Tei Aviv	licht bew.	wzw 3	22	18 0
Lissabon	onbew.	nw 6	15	11 0.1	Tunis	onbew.	nnw 4	19	8 0

Weersvooruitzichten voor de komende dagen:

voor:	donderdag	vrijdag	zaterdag	zondag	maandag
zon in proc.:	50	10	30	40	50
neerslagkans:	30	70	60	20	10
minimumtemp.:	12	6	5	3	3
middagtemp.:	12	11	10	11	12
wind:	z 5	zw 4	zw 4	w 4	w 3

Zon en maan vrijdag 5 april:

Zon op: 07.07 onder: 20.19 Maan op: 02.40 onder: 09.45

Hoogwater donderdag 4 en vrijdag 5 april:

Vlissingen: do 18.05 vr 6.21 - 18.39, Harlingen: do 18.15 vr 6.33 - 18.49, Rotterdam: do 20.03 vr 8.25 - 20.39, Scheveningen: do 18.35 vr 6.55 - 19.09, IJmuiden: do 7.31 - 19.56 vr 8.08 - 20.25, Den Helder: do 11.10 - 23.15 vr 11.25 - 23.40, Haringen: do 13.14 do 1.45 - 13.40, Delfzijl: do 15.45 vr 4.06 - 16.20

De weerkaart

Op een weerkaart worden allerlei symbolen gebruikt om druk, windrichting, fronten, bewolkingen en dergelijke aan te geven (figuur 76).

Op een weerkaart worden twee soorten hulplijnen getrokken:

- isobaren (de lijnen die plaatsen verbinden met gelijke luchtdruk);
- fronten (de lijnen die de scheiding aangeven tussen warme en koude lucht).

Er zijn twee verschillende frontlijnen; één die een koufront aangeeft en één die een warmtefront aangeeft. Bij een warmtefront wordt koude lucht verdreven door warme lucht. Bij een koufront wordt warme lucht verdreven door koude lucht. De driehoekjes en de halve bolletjes op de frontlijnen geven de richting aan waarin het front zich beweegt (figuur 75). Achter een frontlijn met driehoekjes bevindt zich een meestal bewolkt gebied met lage temperaturen. Achter een frontlijn met halve bolletjes bevindt zich een meestal onbewolkt gebied met hoge temperaturen.

Gebieden met veel bewolking en regen (depressies) zijn heel goed te zien op satellietfoto's. Vooral op de 'bewegende' satellietfoto's, die tijdens het weerpraatje in het journaal van 8 uur worden vertoond, kun je de verplaatsingen van zulke gebieden mooi zien.

In de tabel van figuur 78 staan alle gegevens die in jouw weerkaart moeten worden verwerkt. Vraag om een kopie van het blanco kaartje (figuur 77).

Opdracht

- Vermeld op de weerkaart de luchtdruk bij de plaatsnamen. Gebruik de gegevens uit de tabel.
- Schets de isobaren, die een druk aangeven van 990, 1000, 1010, 1020 en 1030 mbar. (Als bij een plaatsnaam een druk wordt aangegeven van bijvoorbeeld 1001, schat dan aan de hand van de ligging van andere isobaren, waar de druk 1000 mbar is.)
- Geef met een L aan waar het centrum van het lagedrukgebied ligt en geef met een H aan waar het centrum van het hogedrukgebied ligt.
- Geef met pijltjes de windrichting en de temperatuur aan bij de plaatsen.
- Geef aan welke bewolking (zie symbolen in figuur 76) aanwezig is en of er veel of weinig regen in die plaats valt.
- Ga aan de hand van de gegevens na waar zich een front van koude lucht bevindt en geef dit aan op de weerkaart.
- Geef een voorspelling voor het weer in ons land.

fig. 76
De symbolen op een weerkaart.

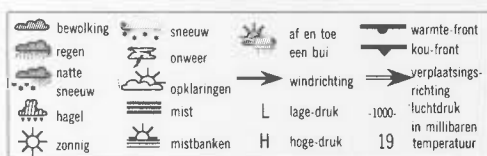


fig. 77



fig. 78
Tabel met gegevens voor de weerkaart.

plaats	druk (mbar)	bewolking	wind	temp. (°C)	neerslag (mm)
Dublin	1000	lichte	nnw	8	1
Edinburgh	990	weinig	nno	9	0
Londen	992	zware	nnw	10	8
Plymouth	1000	zware	nw	9	11
Rotterdam	988	lichte	w	15	0
Brussel	994	zware	w	11	6
Parijs	1002	zware	nw	12	7
Oslo	990	geen	zo	7	0
Stockholm	1001	lichte	zo	8	0
Berlijn	1002	weinig	zw	15	0
Bonn	996	lichte	w	14	2
München	1010	lichte	zw	15	1
Luxemburg	1000	lichte	w	14	1
Praag	1010	weinig	zw	16	0
Wenen	1020	weinig	zw	18	0
Genua	1010	lichte	z	16	3
Rome	1021	weinig	z	15	1
Sarajevo	1030	geen	wzw	18	0
Boekarest	1030	weinig	w	18	0
Istanbul	1032	geen	n	17	0
Warschau	1010	lichte	w	17	2
Moskou	1009	lichte	w	16	4