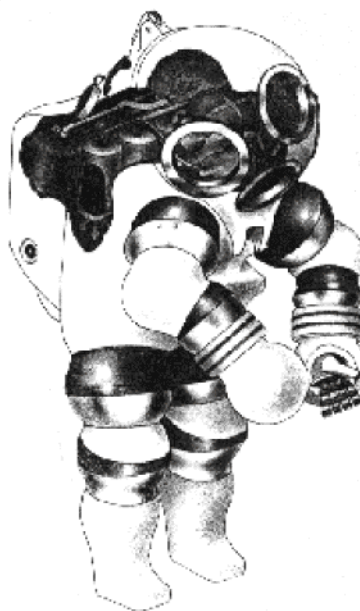


# DRUK

een lessenserie voor 4VWO  
docentenhandleiding



Project Bèta Profielen in het Studiehuis  
Centrum voor Didactiek van Wiskunde en  
Natuurwetenschappen  
Universiteit Utrecht

## Docentenhandleiding

DRUK, een lessenserie voor 4 VWO. ....	1
Inleiding .....	1
Het onderwerp 'Druk' .....	2
Werkwijze in de lessen .....	3
Paragraafsgewijze handleiding .....	4
I Waterdruk .....	4
II Luchtdruk .....	10
III Een eenheid voor Druk.....	15
IV Druk van opgesloten lucht .....	18
V Druk, Volume en Temperatuur van opgesloten lucht .....	22
VI Waterdruk en Luchtdruk: de duikerklok.....	25

voorbeeld lesmateriaal voor het vak natuurkunde voor 4VWO  
ontwikkeld door Rupert Genseberger, m.m.v. Kees Klaassen  
in het kader van het BPS-project  
3e herziene versie  
copyright: CDB, Universiteit Utrecht  
februari 1999

## **DRUK, een lessenserie voor 4 VWO.**

### ***Inleiding***

Dit is de derde versie van een lestekst met docentenhandleiding over "Druk". Ze is gebaseerd op ervaringen met de vorige versies op drie scholen en bij vijf docenten.

Het begrip "druk" wordt ontwikkeld aan de hand van water. Vervolgens worden verworven inzichten toegepast op "lucht", de bestudering daarvan mondt via de wetten van Boyle en Gay-Lussac uit in de "Algemene luchtwet". Afgerond wordt met een paragraaf waarin zowel lucht als water aan bod komen.

Er is gepoogd de opgaven zo op te zetten dat de leerlingen zoveel mogelijk inhoudelijk gemotiveerd worden voor een volgende opgave of les. We trachten aan te sluiten bij vragen die leerlingen zich gaandeweg gaan stellen (of zich zouden kunnen gaan stellen). Zij hebben een vrijheid in het zelf bedenken van vragen en in het zoeken van oplossingen (constructievrijheid). Het sociale proces, namelijk de wisselwerking met de docent en met elkaar, speelt hierbij een centrale rol. De docent daagt de leerlingen uit actief te zijn, hij moedigt hen aan zelf vragen en oplossingen te bedenken. De leerlingen kunnen elkaar daarin stimuleren en onderling hun ideeën bediscussiëren.

Deze handleiding geeft geen beschrijving per les, vanwege de verschillen in lestijd op de diverse scholen (variërend van 45 minuten tot 80 minuten per les) en omdat het af zal hangen van de groep leerlingen hoe lang men met een bepaald onderdeel door gaat. Gepoogd is wel om per opdracht aan te geven hoe er in de klas aan gewerkt kan worden, welke rol de docent daarbij speelt, welke activiteiten eraan vooraf moeten gaan en welke activiteiten er op (moeten) volgen. Bij een gemiddelde lesduur van 50 à 60 minuten kan men zich richten naar het volgende tijdsschema:

### **Globale planning**

Waterdruk.....	2 lessen
Luchtdruk.....	2 lessen
Een eenheid voor druk.....	2 lessen
Druk van opgesloten lucht.....	2 lessen
Temperatuurverandering van lucht.....	3 lessen
Waterdruk en luchtdruk: de duikerklok.....	2 lessen
Toets.....	1 les
Totaal.....	14 lessen

## ***Het onderwerp 'Druk'***

Het begrip "druk" wordt in de meeste leerboeken behandeld door uit te gaan van vaste stoffen. De olifant versus de dame met naaldhakken op het tapijt en het al of niet wegzakken in de sneeuw, zijn bekende voorbeelden. Ze sluiten aan op de notie die leerlingen hebben van het "maken van lokale indrukken". De boekenschrijvers willen hiermee duidelijk maken waarom het vaak zinvoller is om te spreken over kracht per oppervlakte-eenheid (het begrip "druk" in fysische betekenis) dan over kracht in totaal. Vervolgens komt "druk in vloeistoffen en gassen" aan de orde, o.a. in de gaswetten.

Hierbij plaats ik twee kanttekeningen. Om te beginnen wordt bij deze introductie van het begrip "druk", voorbijgegaan aan hoe dit woord in het dagelijks leven meestal gebruikt wordt, namelijk in situaties waarbij vloeistoffen of gassen in het spel zijn, of waarbij "op iets gedrukt" wordt. Denk maar aan de druk onder water, op de oren, op een duikboot, op een diepzeevis. Of aan luchtdruk. Daar wordt het woord niet in de eerder omschreven fysische betekenis gebruikt, maar sluit aan bij iets als "globaal/omringend" drukken. Bij de voorbeelden met de vaste stoffen is dat niet het geval.

De tweede kanttekening betreft het essentiële verschil tussen druk bij vaste stoffen enerzijds en vloeistoffen en gassen anderzijds. Bij vloeistoffen en gassen wordt de druk in alle richtingen doorgegeven, iets dat bij vaste stoffen niet het geval is. Dat heeft bijvoorbeeld tot gevolg dat het gewicht van de dame helemaal op de naaldhak kan worden gezet. Een dikkere, even lange, dame zal dan ook een grotere druk kunnen uitoefenen. Bij een vloeistof gaat het daarentegen niet om alle vloeistof die boven een klein oppervlak staat, maar slechts om de hoogte (en de dichtheid) van de vloeistof. Druk inleiden aan de hand van de bekende vaste voorbeelden, levert daarom mijns inziens bij vloeistoffen en gassen geen begripsverheldering op.

Om deze twee redenen pleit ik ervoor bij de verheldering en uitbreiding van het begrip "druk", van drukverschijnselen bij vloeistoffen en gassen uit te gaan. Daarbij kan het beste worden begonnen met vloeistoffen omdat die zichtbaar zijn en beter hanteerbaar dan gassen. Vervolgens kan voor gassen het "vloeistofmodel voor lucht" ingevoerd worden, om aan te geven dat enkele voor vloeistof gevonden regels nu op lucht worden toegepast.

Het begrip "druk" bij vloeistoffen en lucht wordt in mijn voorstel aan de hand van door de docent geleide discussies en proeven ontwikkeld. De docent speelt daarbij dus een centrale rol in de klas. Deze rol is echter niet zozeer inhoudelijk van aard (zoals gebruikelijk) maar veeleer procedureel en faciliterend.

In het volgende deel, de luchtwetten, treedt hij wat meer terug. De leerlingen doen dan zelfstandiger onderzoek, met als inzet dat ze de luchtwetten (Boyle, Gay-Lussac) begrijpen en kunnen hanteren. Tevens komen daarbij het absolute nulpunt en de algemene luchtwet aan de orde. De laatste in de vorm:  $pHV/T=C$ , waarbij  $C$  in principe nog van de hoeveelheid lucht afhangt.

In het laatste deel wordt hetgeen voor water en lucht apart gevonden is gecombineerd. Hierbij worden ook 'onzorgvuldigheden' en 'onvolledigheden' uit de vorige paragrafen gerepareerd.

## ***Werkwijze in de lessen***

Bij het ontwerpen van dit materiaal is uitgegaan van een totale integratie van practicum, onderwijsleergesprek, onderlinge discussies van leerlingen, demonstratie door docent, schriftelijk werk en groepswork. De voor het moment en de betreffende opdracht meest geëigende werkvorm moet ingezet worden. Hoewel een afwisseling van werkvormen vaak het werkplezier van de leerlingen stimuleert, wil ik hier ook pleiten voor een paar constanten.

Ten eerste: begin iedere les klassikaal, in een kring of een andere opstelling waarin een gesprek tussen leerlingen en docent mogelijk is. Hierbij kan even teruggekeken worden op de vorige les, onduidelijkheden kunnen aan bod komen, misschien hebben leerlingen intussen vragen.

Het is vaak zinvol om de les af te sluiten met een klassikale bespreking van de gevonden resultaten. Dat kan de voortgang in de volgende les ten goede komen.

Ten tweede: vorm vaste groepjes van leerlingen die in ieder geval gedurende dit project met elkaar samenwerken. Er kan dan in opeenvolgende lessen een doorlopend gesprek ontstaan over de thematiek omdat ze gezamenlijk proeven uitvoeren en daarover discussiëren.

Ten derde: laat in klasgesprekken (of onderwijsleergesprekken) de leerlingen veel aan het woord over hun opvattingen. Uit motivationeel oogpunt is het belangrijk dat zij het gevoel krijgen dat ze van alles ontdekken, dat ze een waardevolle inbreng hebben. Allerlei zaken hoeven nog niet meteen fysisch correct geformuleerd te worden. De lessenserie is zo opgezet dat de leerlingen de gelegenheid krijgen om begrippen langzaam te laten ontwikkelen.

Ten vierde: laat geregeld als huiswerk een uitgebreide samenvatting maken van wat aan bod is gekomen. Dit dwingt de leerlingen tot individuele bezinning, bovendien is het een goede voorbereiding op de volgende les. In deze opzet is het een belangrijk element in hun studeren. Steeds als er een belangrijk nieuw onderdeel is behandeld, staat in de leerlingentekst een aanwijzing voor de samenvatting. Het werkt stimulerend als leerlingen hun samenvatting of een stukje daarvan voorlezen. Dit kan als start genomen worden van een volgende les. In het leerlingenmateriaal zijn onder het kopje 'aanwijzingen voor de samenvatting' geregeld tips voor het maken van die samenvatting gegeven. Er is naar afwisseling in de vorm gestreefd. Zo is een paar keer een proefverslag als vorm voorgesteld. In de laatste 'samenvatting' kijken de leerlingen terug op hun werk en geven ze daar zelf commentaar op.

**Opmerking:** Bij een paar opgaven in paragraaf IV en V wordt verwezen naar de grafische rekenmachine (GR). Een instructieblad voor de GR is als bijlage in het leerlingenmateriaal opgenomen.

## Paragraafsgewijze handleiding

### *I Waterdruk*

#### **Doelstellingen paragraaf I: 'Inleiding' en 'Waterdruk'**

In de **inleiding** krijgen de leerlingen een overzicht van de lessenserie. Met name dat "druk" het centrale thema is, dat de eerste reeks lessen over waterdruk gaat, de volgende reeks over luchtdruk en dat daarbij kennis toegepast wordt die in de eerste reeks is ontwikkeld.

In **opgave 1** maken de leerlingen, aan de hand van het ontwerpen van een duikboot als praktische toepassing, kennis met het fenomeen "druk" in vloeistoffen. Aan de orde komt dat de "druk op een wand" (in de zin van "hoe hard er tegen aan geduwd wordt") in vloeistoffen wél afhankelijk is van de diepte van die wand onder de vloeistofspiegel, echter niet van de oriëntatie van die wand, niet van de hoeveelheid vloeistof boven de wand en niet van de vorm van de ruimte waar de wand zich in bevindt.

"Druk" wordt nog niet in de fysische betekenis ("kracht per oppervlakte-eenheid") gebruikt. We sluiten zoveel mogelijk aan bij het gebruik van het woord "druk" in het dagelijks leven.

Het laatste deel van deze opgave helpt het inzicht te bevestigen dat de "druk" op een oppervlak onder water alleen afhankelijk is van de diepte waarop het oppervlak zich onder de vloeistofspiegel bevindt.

**Opgave 2** leidt naar het kunnen berekenen van de kracht die op een bepaalde welomschreven wand op een gegeven diepte drukt. (Nog geen "formalisering" van de begrippen druk en kracht in een vloeistof, zoals  $p = \rho H h$  en  $F = p A$ .)

**Opgave 3 en 4** helpen de leerlingen hun nieuw verworven inzichten te consolideren met praktische en grappige toepassingen.

#### **Over de 'Inleiding'**

Bij de "Inleidende opgave" schrijven de leerlingen op waaraan ze bij het woord "druk" denken en welke ervaringen ze daar mee hebben. Vervolgens inventariseert de docent in een klasgesprek hun associaties. Ik verwacht dat er dingen genoemd worden als "ergens op drukken", "doordrukken", "luchtdruk en weersverwachting", "druk op de oren bij het dalen van een vliegtuig", "druk van de band", "druk op de oren bij het duiken onder water", "druk op de gas/waterleiding", "caissonziekte", "spuitbus".

Naar aanleiding van de bespreking vertelt de docent:

- met behulp van de inhoudsopgave van de lessenreeks welke van de door de leerlingen genoemde dingen en toepassingen in de komende lessen op een of andere manier aan de orde zullen komen en welke niet;

- dat het de bedoeling is dat de leerlingen beter gaan begrijpen wat druk is en hoe die veroorzaakt wordt;

Vervolgens geeft hij aan hoe daar in het begin aan gewerkt wordt en waarom:

- in het begin besteden we vooral aandacht aan water en lucht omdat in veel van de genoemde verschijnselen water of lucht drukt (of algemener een vloeistof of een gas);
- we beginnen met een reeks lessen rondom waterdruk, omdat water goed zichtbaar en hanteerbaar is;
- omdat er belangrijke overeenkomsten lijken te zijn tussen waterdruk en luchtdruk (en wellicht ook belangrijke verschillen), komt er vervolgens een reeks lessen over luchtdruk, waarbij we nader ingaan op overeenkomsten en verschillen met waterdruk.

## Over opgave 1

### Demonstratieproef

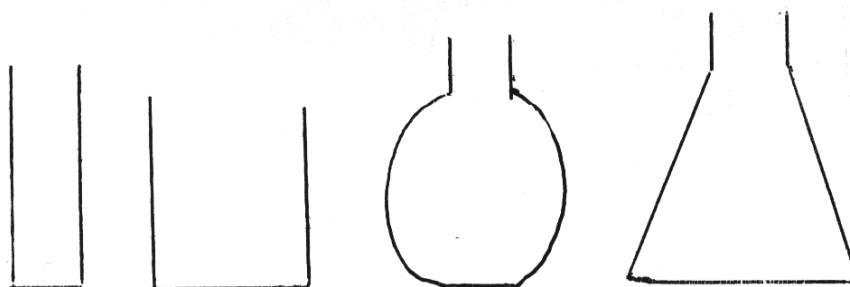
Om iets over druk in vloeistoffen te weten te komen, hebben we een apparaat nodig om die druk "zichtbaar" te maken. Het toestel van Hartl lijkt hieraan te voldoen. De docent demonstreert dat als het rubber vliesje met de vinger ingedrukt wordt, de vloeistof in het U-buisje reageert. Hij stelt ter discussie of hiermee het groter of kleiner worden van de druk in water zichtbaar gemaakt kan worden. (Omdat we steeds dezelfde oppervlak gebruiken, is het niet nodig het formele begrip "druk" te hanteren. Leerlingen kunnen zo inzicht krijgen in het fenomeen "druk", zonder in rekenen verstrikt te raken.) Deze demonstratie leidt het groepswerk van opgave 1 in.

### Groepswerk.

Na de demonstratie worden opgave 1a t/m e in groepjes gemaakt. Bij 1a formuleren de leerlingen in hun eigen woorden waarom het toestel van Hartl bruikbaar is voor het gestelde doel: uitzoeken waar druk op een wand in een vloeistof van afhangt. Zij kunnen de test zelf doen (opgave 1c), als er meerdere toestellen van Hartl aanwezig zijn. (Het kan ook in een klasgesprek, ondersteund met demonstratieproeven.)

Ik verwacht dat leerlingen bij 1b opperen dat de druk kan afhangen van hoe de wand van de duikboot georiënteerd is (dus boven-, zij- en onderkant), van de diepte, van de hoeveelheid water. Als de leerlingen deze mogelijkheden niet noemen, brengt de docent ze zelf als vragen naar voren. Hier wordt immers in de komende opgaven onderzoek naar gedaan.

Het effect van diepte en oriëntatie van de wand kan in één bak uitgezocht worden. Voor meer of minder water is een brede en een smalle bak nodig. Zet bakken van zoveel mogelijk verschillende vormen en afmetingen klaar, dat brengt de leerlingen op het idee diverse mogelijkheden te onderzoeken. (Zie schets voor suggesties, afhankelijk van wat op school voorhanden is.)



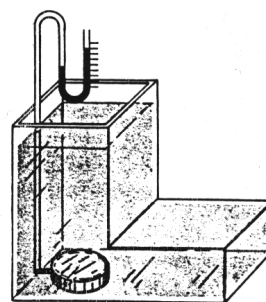
### Klasgesprek

Als alle groepen opgave c af hebben, last de docent een centraal moment in om de resultaten uit te kunnen wisselen. Dit om te voorkomen dat sommige groepen op een dwaalspoor blijven. Het is noodzakelijk dat iedereen nu al een globale notie heeft waar de druk onder water van afhangt. Vervolgens kunnen de leerlingen de opgaven d en e afmaken. (Als groepswerk of als huiswerk.)

De voorspellingen van de druk bij de in opdracht d en e geschetste situaties worden nu besproken. Het is niet te verwachten dat de leerlingen in alle situaties al de goede antwoorden weten. Proeven die daar uitsluitsel over geven zijn geschikt als demonstratie, dat houdt tevens het tempo erin.

Vraag d dient als bevestiging van bevindingen die waarschijnlijk in de vragen b en c al aan bod zijn gekomen. Toch verwachten veel leerlingen waarschijnlijk nog dat het van boven smalle vat een lagere druk zal geven dan het van boven brede vat. Een proef met het zogenaamde "toestel voor de hydrostatische paradox", kan hier uitsluitsel geven.

Bij vraag e verwacht ik dat de meningen verdeeld zijn: zowel leerlingen die denken dat in de grot minder druk op het luik staat als leerlingen die verwachten dat de druk overal gelijk is. Dit kan getest worden met behulp van een bak die de hiernaast geschetste vorm heeft.



(In een klas werd geopperd dat de druk binnen en buiten de grot misschien niet gelijk is als er boven in de grot lucht is. Als dit naar voren komt, kan gezegd worden dat het een goede vraag is, die in paragraaf VI ('Een duikerklok en lucht onder water') aan bod komt. De leerlingen kunnen hem vast voor later noteren. Als het niet naar voren komt kan de docent er beter nog niet over beginnen.)

### Over de samenvatting

De samenvatting maken de leerlingen individueel, bijvoorbeeld als huiswerk.

Vóórdat aan de volgende opgaven begonnen wordt, moet de samenvatting besproken worden. Bijvoorbeeld door enkele leerlingen hun samenvatting voor te laten lezen. Luisteropdracht voor de andere leerlingen:



- Hoor ik iets wat ik zelf niet heb?
- Heb ik zelf iets wat nog niet verteld is?
- Ben ik het eens met wat er verteld wordt?

Aan de hand van deze punten kan er opbouwend commentaar gegeven worden. Er moet iets komen als:

De waterdruk op een oppervlak hangt alleen af van hoe diep dat oppervlak zich onder de waterspiegel bevindt. Ze hangt niet af van de oriëntatie van dat oppervlak, noch van de vorm van de zee, enz.

Het is belangrijk dat de leerlingen dit, voor ze verder gaan met de volgende opdrachten, in hun eigen woorden formuleren. Het hoeft natuurkundig niet perfect te zijn, het komt later nog wel terug.

Misschien oppert een leerling dat bij een groter oppervlak de kracht op dat oppervlak tengevolge van de waterdruk groter zal zijn. Dan kan verwezen worden naar de volgende opgaven en het groepswerk.

## Over opgave 2, 3 en 4

### Groepswerk

In opdracht 2 wordt de grootte van de kracht op een oppervlak tengevolge van de waterdruk bepaald middels een evenwichtsprincipe en vergeleken met een gewicht. (Leerlingen die de Newton kennen, kunnen die eenheid gebruiken. Het mag echter ook in kilogram, blijf zo dicht mogelijk bij hun vertrouwde taal.)

Ik verwacht dat de leerlingen bij 2a zullen inzien dat het water in de cilinder even hoog moet staan als in de bak om het plaatje los te krijgen. Misschien zeggen sommigen: "iets lager, want het plaatje zelf heeft ook gewicht". Wanneer het plaatje licht is, bijvoorbeeld papier, zeggen ze misschien "iets hoger". Bij nauwkeurig kijken blijkt dat inderdaad het water dan iets (één of enkele millimeters) hoger moet staan dan het waterniveau in de bak.

Opgave 2b introduceert een evenwichtsprincipe als denkwijze.

Bij 2c verwacht ik dat de meeste leerlingen inderdaad zullen inzien dat in plaats van water ook gelijkwaardige "gewichtjes" op het plaatje kunnen staan. Deze laatste opgave is lastig om experimenteel te controleren, maar dat blijkt in de praktijk ook niet nodig te zijn. De leerlingen zien zo wel dat dit gewicht gelijk aan (of iets groter) moet zijn dan het gewicht van het water dat ze in de cilinder moesten gieten om de bodem los te krijgen. In opgave 2d wordt nog gesproken over het 'drukken' van het gewicht op aarde, in de betekenis waarin dat woord in het dagelijks leven gebruikt wordt.

In opgave 2e wordt de term 'kracht' geïntroduceerd omdat de situatie daar, vanwege het gebruik van spierkracht, dat oproept. Het is de bedoeling dat leerlingen niet alleen de krachten op een oppervlak onder water kunnen uitrekenen, maar zich ook gaan realiseren welke gigantische krachten er onder water kunnen werken, zelfs al op 1 meter diepte. Ik verwacht dat de leerlingen vrij snel zullen zien dat ze naar analogie met opgave 2c moeten berekenen hoeveel gewicht aan water in een kolom boven het

luik staat. Waarschijnlijk zullen ze het vrij verrassend vinden dat zelfs op 1 meter diepte niemand het luik zonder hulp open kan krijgen.

Bij opgave 2f verwacht ik dat ze toepassen dat de druk alleen van de diepte afhangt en niet van de oriëntatie. Deze vraag is bedoeld als reminder.

Bij opgave 2g wordt nogmaals de kennis toegepast, nu op een wat groter oppervlak en op verschillende dieptes. Ik verwacht dat veel leerlingen er niet aan denken voor de zijwanden de gemiddelde diepte te nemen. Deze opdracht helpt hen waarschijnlijk hun kennis te consolideren.

Bij de laatste vragen denken misschien sommige leerlingen aan een auto die te water raakt. Als er weinig water in de auto zit, is het niet mogelijk om de deur te openen. Je moet de auto langzaam vol laten lopen en pas op het allerlaatste moment, als het water bijna bovenin staat, proberen een deur open te maken. Als leerlingen hiermee komen, kan weer verwezen worden naar één van de komende lessen, waarin dit probleem aan de orde komt (paragraaf VI). Als leerlingen dit niet naar voren brengen, begint de docent er zelf ook niet over.

Opgave 3 wijst op een verrassende consequentie van het feit dat de druk niet afhangt van de hoeveelheid maar alleen van de hoogte van het water dat er boven staat. Ik weet niet of hij praktisch eenvoudig is uit te voeren. Misschien met een plastic zak i.p.v. een regenton?

Opgave 4 is hier een vervolg op, 4b wijst op een praktische toepassing.

### **Klasgesprek**

Opgaven 2 en 3 moeten in ieder geval klassikaal besproken worden.

Het in opgave 2 toegepaste evenwichtsprincipe is een belangrijke denkwijze, ook bij andere, toekomstige, problemen. Bij de bespreking moet dat principe dan ook duidelijk naar voren komen. Ik verwacht niet dat leerlingen met de luchtdruk rekening willen houden. De docent hoeft daar ook niet over te beginnen, de leerlingen kunnen immers bij opgave 2 wel het goede antwoord berekenen. Als er leerlingen zijn die wel de luchtdruk naar voren brengen, kan de docent zeggen dat het heel slim is, maar dat we die (om de zaak niet al te gecompliceerd te maken) nu buiten beschouwing laten. We komen er in paragraaf VI op terug.

Bij opgave 2 kan als afrondende conclusie iets geformuleerd worden als:

De kracht op een horizontaal oppervlak is gelijk aan het gewicht dat een tot aan het wateroppervlak reikende kolom water boven dat oppervlak zou hebben.

Bij opgave 3 wordt de berekening gecontroleerd. Ik verwacht niet dat leerlingen hier problemen mee hebben.

De bespreking gaat tot de laatste vraag die alle leerlingen nog gemaakt hebben. Het is ook mogelijk om opgaven 3 en 4 als huiswerk te maken.

**Over de samenvatting**

De samenvatting maakt iedere leerling in eerste instantie weer individueel, als een bezinning op wat er geleerd is.

Er wordt hen daarnaast nog gevraagd een praktische toepassing te beschrijven: de watertoren. Dit als extra oefening en om de samenvatting wat meer 'cachet' te geven.

Hoewel watertorens niet meer veel gebruikt worden, zullen de meeste leerlingen er toch wel eens één gezien hebben. Misschien heeft iemand zichzelf wel eens afgevraagd waarom de toren niet helemaal gevuld is met water. Wanneer het begrip "druk" voldoende ontwikkeld is, kunnen de leerlingen begrijpen dat er maar een smalle waterkolom in de toren hoeft te staan om het hele waterleidingnet onder druk te houden. Boven zal de buis uitmonden in een brede bak, om schommelingen in waterverbruik op te vangen.

## ***II Luchtdruk***

### **Doelstellingen paragraaf II: Luchtdruk**

Veel drukverschijnselen in lucht lijken op die in water. Daarom wordt nu nagegaan of de gevonden regels voor waterdruk ook op lucht toegepast kunnen worden. Met andere woorden: er wordt een "watermodel voor lucht" ontworpen. Dit is voor leerlingen een "theoretische" motivering, na de praktijkgerichte motivering van de vorige lessen. Uit het model volgt een voorspelling over de grootte van de luchtdruk. Praktische consequenties hiervan worden nagegaan met als insteek: is het watermodel voor lucht een zinvol model?

In de **inleiding** introduceert de docent met een klasgesprek het watermodel voor lucht.

In **opgave 1** wordt met behulp van dit model berekend hoe groot de kracht op een oppervlak ter grootte van een hand ter hoogte van het aardoppervlak is, uitgaande van de dichtheid van lucht en een gegeven hoogte van de atmosfeer (opgave 1).

De leerlingen bezinnen zich vervolgens aan de hand van **opgave 2** op consequenties van dit resultaat en bedenken daar tests voor. De **opgaven 3 en 4** gaan daar nog wat op door, evenals op het luchtledige.

### **Over de 'Inleiding'**

#### **Klasgesprek**

Als de laatste opgaven van de vorige paragraaf nog niet klassikaal besproken zijn, gebeurt dat nu. Met name aan de samenvatting moet de nodige zorg besteed worden: begrijpen de leerlingen de kern van wat tot nu toe behandeld is, welke vragen zijn nog open? De antwoorden op deze vraag geven gelegenheid de resultaten m.b.t. druk in water, nog eens op een rij te zetten:

- De **kracht** op een oppervlak onder water hangt niet af van de oriëntatie van dat oppervlak en ook niet van de "vorm" van het water erboven.
- De **kracht** op een horizontaal oppervlak onder water is even groot als het gewicht dat een tot aan de waterspiegel reikende kolom water boven dat oppervlak zou hebben. (Ook wanneer het oppervlak op dezelfde diepte een andere oriëntatie heeft, is de kracht erop dus zo groot.)

Het watermodel kan als volgt ingeleid worden: *We zouden het nu over lucht en luchtdruk gaan hebben. Dat is lastiger, want lucht kun je veel moeilijker vastpakken dan water, bovendien zie je lucht niet. We weten echter dat om de aarde een laag lucht zit: de atmosfeer. Als we maar hoog genoeg gaan, is er op een gegeven ogenblik geen lucht meer. We zouden dus kunnen zeggen dat we op de bodem van een oceaan van lucht leven. Misschien passen de regels voor water ("wetten") dan ook wel voor lucht. We zeggen dan dat we een "watermodel van lucht" maken.*

*Zouden we, op soortgelijke wijze als bij water, de luchtdruk kunnen berekenen? Hoe moet dat dan en wat hebben we daarvoor nodig?*

Ik verwacht dat leerlingen zullen zeggen dat dit alleen kan als lucht ook gewicht heeft.<sup>1)</sup> Als eenmaal duidelijk is dat lucht gewicht heeft, hoeven we volgens het watermodel van lucht alleen de dichtheid van lucht en de hoogte van de luchtlaag om de aarde te weten om de kracht op een oppervlak uit te kunnen rekenen.

Er kunnen dan voor lucht de volgende **aannames** geformuleerd worden, analoog aan de gevonden regels voor water:

- De **kracht** op een oppervlak in lucht hangt niet af van de oriëntatie van dat oppervlak en ook niet van de "vorm" van de luchtlaag erboven.
- De **kracht** op een horizontaal oppervlak in lucht is even groot als het gewicht dat een tot aan de "luchtspiegel" reikende kolom lucht boven dat oppervlak zou hebben. (Ook wanneer het oppervlak op dezelfde hoogte een andere oriëntatie heeft, is de kracht erop dus zo groot.)

De leerlingen gaan nu in groepjes opgave 1 maken.

## Over opgave 1

### Groepswerk

Om het goed voorstelbaar te houden, wordt de kracht uitgerekend die op het oppervlak van een hand staat. Eerst schrijven de leerlingen hun verwachting daarover op (opgave 1a). Een luchtlaag met een hoogte van 17 km komt goed uit bij de berekening: 200 kg bij het eenvoudige watermodel, 100 kg wanneer gecorrigeerd wordt voor de geleidelijk afnemende dichtheid van lucht. Helemaal eerlijk is het natuurlijk niet, want op 17 km is er nog wel lucht. Maar leerlingen kennen waarschijnlijk nauwelijks of geen verschijnselen die zich op zo'n grote hoogte in de lucht afspelen. De dichtheid is daar al zo klein dat mensen er niet kunnen leven en vliegtuigen er niet kunnen vliegen.<sup>2)</sup>

Bij de eerste berekening (opgave 1b) moet ongeveer 200 kg als gewicht op de hand gevonden worden.<sup>3)</sup> Een onwaarschijnlijk groot getal. Om een nieuwe, betere,

---

1) Als dat nog niet aan bod is geweest, is te verwachten dat sommige leerlingen denken dat lucht geen gewicht heeft. Voor het vervolg is het nodig dat alle leerlingen beseffen dat lucht gewicht heeft. Het is waarschijnlijk voldoende als de docent gewoon mededeelt dat lucht gewicht heeft en hoeveel dat is (voor "normale" lucht ongeveer 1,2 gram/liter). Alleen als veel leerlingen hier moeite mee hebben, is het te overwegen lucht te wegen. Anders leidt het teveel af van de hoofdlijn.

2) Dat stratosfeerballonnen wel zo hoog komen, zou een enkele leerling bekend kunnen zijn. Als er bezwaar gemaakt wordt tegen de 17 km, kan overigens best een grotere hoogte genomen worden. Voor de vervolgoopdrachten is het vooral belangrijk dat leerlingen beseffen hoe geweldig groot de luchtdruk is. Wat meer is dan niet erg: na het meten van de luchtdruk in les 5 wordt de aangenomen hoogte bijgesteld.

3) Het is hier niet relevant om in Newton te rekenen. Als leerlingen dat liever doen of dat zo gewend zijn, mag dat natuurlijk wel.

schatting te krijgen nemen we aan dat de dichtheid van de begane grond tot 17 km geleidelijk tot 0 afneemt. Dat deze aanname nu voor een gewicht van 100 kg op de hand zorgt, wordt waarschijnlijk gemakkelijk ingezien. Veel leerlingen zullen dit nog steeds een verontrustend groot getal vinden.

Vragen die leerlingen waarschijnlijk bij opgave 1d formuleren:

- hoe kan het dat we van die grote druk niets merken;
- zijn er proeven te bedenken om die druk aan te tonen?

(Opgave 1d is een overgang naar opgave 2.)

### **Klasgesprek**

De berekeningen van opgaven 1a t/m c worden besproken. Het is belangrijk dat alle leerlingen de berekening kunnen maken en zich de grootte van de luchtdruk realiseren.

## **Over opgave 2**

### **Groepswerk**

Het is te verwachten dat veel leerlingen verbaasd zijn over het grote gewicht dat op hun hand zou staan. Velen kunnen dat waarschijnlijk niet geloven, je merkt daar immers niets van! Opgave 2 geeft de leerlingen de gelegenheid zelf een uitweg uit de contradictie van "grote druk maar het niet merken" te vinden.

Wat leerlingen hierop antwoorden hangt enigszins van hun voorkennis af. Ik verwacht dat ze bij opgave 2a iets zullen zeggen als: de lucht drukt aan alle kanten, de lucht is ijl, daarom merken we het niet. Het gaat erom dat leerlingen hun eigen verklaringen zoeken en die in hun eigen woorden formuleren.

### **Klasgesprek en Demonstratieproeven**

Als de meeste groepjes klaar zijn met opgave 2 (niet iedereen hoeft alles af te hebben, er moet ook tempo in zitten), wordt deze opgave klassikaal besproken. Het gaat erom dat de leerlingen zoveel mogelijk met elkaar in discussie komen, dat zij hun antwoorden en oplossingen met elkaar bespreken.

De antwoorden bij opgave 2b zullen sterk afhangen van proeven die leerlingen vroeger hebben gezien. Er zijn eenvoudige antwoorden mogelijk, zonder natuurkundige hulpmiddelen zoals: zuignap, wc-plopper, glazen platen die niet van elkaar gaan, vacuümverpakte levensmiddelen, het omgekeerde bekeerglas waar het water in blijft zitten.

Als leerlingen met een proef komen, is het aan te bevelen dat ze die zelf voor de klas kunnen uitvoeren. Als resultaat moeten de proeven de leerlingen er van overtuigen dat de luchtdruk inderdaad heel groot is, ook al konden ze zich dat eerst misschien nog niet voorstellen.

Een spectaculaire proef is het wegpompen van de lucht onder een laagje aluminiumfolie, dat knapt dan met een flinke knal. Ook indrukwekkend is de klok die niet meer van de tafel loslaat (en/of Maagdenburger halve bollen),

Bij een zuignapje kan met het watermodel voorspeld worden hoe hard er aan getrokken moet worden om het los te krijgen. Een oppervlak van ongeveer  $1/5 \text{ dm}^2$  moet ongeveer 20 kg kunnen dragen. Het bleek maximaal 6 kg te zijn. Diverse leerlingen konden dat wel verklaren: er zit nog lucht onder het zuignapje, het is niet goed vacuüm.

(Andere proeven met de vacuüm klok, zoals het plastic zakje dat opzet wanneer de omringende lucht wordt weggepompt, het pak koffie dat opzet, .... kunnen misschien beter naar aanleiding van opgave 4 gedemonstreerd worden, bij de vraag wat er gebeurt met mensen wanneer de omringende lucht wegvalt.)

Stel bij het omgekeerde bekersglas de vraag, hoe hoog dat glas mag zijn zonder dat het water er uit loopt. Uit de berekeningen die de leerlingen in paragraaf "I. Waterdruk" gemaakt hebben, moeten ze het antwoord kunnen voorspellen.

Het is illustratief om deze proef ook te doen met een tuinslang van minstens 12 meter lengte. Die moet gevuld worden met gekookt water, daar is de lucht uit. (Op de Breul kan de videoband gedraaid worden die daar een aantal jaren geleden gemaakt is van deze proef.)

De conclusie uit de redeneringen bij opgave 2a en de proeven bij 2b en 2c (opgave 2d) moeten de leerlingen zo veel mogelijk zelf formuleren.

## **Over opgave 3 en 4**

Deze opgaven kunnen weer in de groepen (of thuis) gemaakt worden.

### **Klasgesprek**

Opgave 3 zal wel geen probleem meer vormen. Ik verwacht dat nagenoeg alle leerlingen inzien dat de lucht aan alle kanten op de hand drukt, waardoor we hem horizontaal kunnen houden.

Opgave 4b laat leerlingen nog eens met het model oefenen. Hier kunnen ze zien dat vanwege de geleidelijk afnemende dichtheid, de druk op halve hoogte in de atmosfeer niet de helft is van die op de grond maar  $1/4$  daarvan. Wat dit betekent voor bergbeklimmers hebben velen wel eens op de TV gezien: mensen gaan hijgen (sneller adem halen), nemen zuurstofflessen mee. Niet alle leerlingen zullen deze opgave vlot maken. Wie de redenering en berekening niet goed begreep, krijgt hier nogmaals de gelegenheid daarvoor.

Opgave 4c, wat er met ons zou gebeuren als er geen lucht was, kan verrassende antwoorden opleveren. Bijvoorbeeld: "We worden dan lichter". Dit is een veel voorkomend antwoord op deze vraag, waarschijnlijk geïnspireerd door films over ruimtevaarders die in het luchtledige leven én lichter zijn geworden waarbij kennelijk een oorzakelijk verband tussen beide feiten wordt gelegd. In één klas zeiden diverse leerlingen: "Het is niet goed voor je huid". In een biologieles hadden ze geleerd dat de huid zuurstof nodig heeft om gezond te blijven. Ze leken zich niet te

realiseren dat dit een lange termijn effect is, vergeleken met onmiddellijke effecten die optreden wanneer de lucht om je lichaam wegvalt. Als derde antwoord kan men iets verwachten als: "De mens knalt uit elkaar". Een demonstratie van een plastic handschoen onder de vacuüm klok toont aan dat het laatste antwoord het meest waarschijnlijk is. Sommige leerlingen vroegen zich af of dit ook met vissen gebeurt die naar boven worden gehaald.

Aan een pak vacuüm koffie kan gedemonstreerd worden waarom zo'n grote luchtdruk ons niet in elkaar drukt: de koffie binnen de zak duwt terug. Dit inzicht is ook belangrijk om de vervolggaven te begrijpen.

### **Over de samenvatting**

De samenvatting in eigen woorden van wat ze geleerd hebben, is geschikt als huiswerk.



### **III Een eenheid voor Druk**

#### **Doelstellingen paragraaf III: Een eenheid voor druk**

In de vorige lessen hebben de leerlingen geleerd uit te rekenen hoe groot de kracht van de water- of luchtdruk op een bepaald oppervlak is. Het woord "druk" werd daarbij steeds intuïtief gebruikt, in de zin van "ergens op drukken".

In deze paragraaf wordt eerst die berekening geformaliseerd om expliciet te maken dat de grootte van de kracht bij een gegeven oppervlak alleen afhangt van de hoogte en de dichtheid van de "drukkende stof".

Daarna wordt "druk" ingevoerd als een grootheid om, onafhankelijk van het oppervlak, iets te kunnen zeggen over "hoe hard er gedrukt" wordt door een vloeistof of door lucht.

Als vervolg op het vorige worden de "meter water", "cm kwik" etc. als eenheden van druk ingevoerd. Omdat de bar uit het dagelijks leven bekend zal zijn, wordt ook aangegeven dat een druk van één bar ongeveer overeenkomt met een druk van 10 meter water. Deze eenheid is niet van een soort stof afhankelijk. Tot slot komt de 'moderne' definitie van druk als 'kracht per oppervlakte-eenheid' aan bod.

#### **Over de 'Inleiding'**

Laat leerlingen samenvatten wat ze tot nu toe over druk in water en lucht gevonden hebben of stukjes uit hun samenvatting voorlezen. In het kort zal dat erop neerkomen dat je kunt uitrekenen hoe groot de kracht op een oppervlak is wanneer je weet hoe diep dat oppervlak onder de "waterspiegel" of onder de "luchtspiegel" zit.

Misschien komen leerlingen met de opmerking dat iets weten over "druk" ook wel bij andere vloeistoffen belangrijk kan zijn. De docent kan ook zelf als vraag stellen of de leerlingen nog situaties met andere stoffen dan water en lucht kennen waarbij het belangrijk kan zijn iets over druk te weten. Tevens wordt in deze les wat preciezer afgesproken wat we onder "druk" verstaan.

#### **Over opgave 1 en 2**

##### **Groepswerk**

De leerlingen werken in groepen aan de eerste twee opdrachten: berekeningen met druk in andere situaties dan met water en lucht. De uiteenlopende berekeningen kunnen hen motiveren deze in een eenvoudige regel samen te vatten. Ik verwacht dat de leerlingen snel het verband tussen hun berekeningen en de gegeven formule zien.

Het "snappen" van de formule is niet voldoende, er volgen daarom enkele vraagstukken om daarmee te oefenen (opgave 2). Ik verwacht dat zich hierbij met name problemen zullen voordoen betreffende het gebruik van cm en m door elkaar.

Bij vraag 2e is een inzichtsprobleem te verwachten betreffende de druk op dezelfde diepte in een vloeistof. Waarschijnlijk zullen niet alle leerlingen direct zien dat de kracht op het stopje gelijk is de kracht op dezelfde hoogte aan de linkerkant van de buis.

### **Klasgesprek**

Als de meeste leerlingen de vraagstukken van opgave 1 en 2 af hebben, wordt een klassikaal moment ingelast om eventuele problemen te bespreken.

Vervolgens wordt de formule uit opgave 1 nogmaals ter sprake gebracht. Daarin is te zien dat bij een bepaalde vloeistof op een bepaalde diepte alleen maar het oppervlak nodig is om de kracht uit te rekenen. Als we nu alleen de diepte en de soort vloeistof geven, kan de kracht op ieder oppervlak uitgerekend worden. Bijvoorbeeld de mede

deling "10 meter water" is voldoende om voor ieder oppervlak uit te kunnen rekenen hoe groot de kracht op dat oppervlak is. We noemen die mededeling nu "de druk". Dat kan met iedere stof gedaan worden, gebruikelijk is echter om de druk met water te vergelijken, ook als het een druk in lucht of in olie betreft.

Er kan een omrekening worden gemaakt, bijvoorbeeld: met hoeveel meter water komt een druk van 10 meter olie overeen? Leerlingen kunnen ook zelf dergelijke omrekeningen aandragen.

Tot slot van het klasgesprek wordt de 'bar' geïntroduceerd, als stof-onafhankelijke eenheid voor druk.

## **Over opgave 3, 4 en 5**

### **Groepswerk**

De leerlingen maken nu de opgaven 3 t/m 5 van deze paragraaf af. Ik verwacht dat wie die het voorgaande goed begreep, hier geen probleem meer mee heeft.

Opgave 3f, die nogmaals gaat over de druk door lucht, wijst de leerlingen erop dat wanneer je niet een hoge berg opklimt maar slechts een klein beetje omhoog gaat, je geen rekening hoeft te houden met de vermindering van de dichtheid van lucht. Lucht kan in een niet al te hoge ruimte dus als homogeen beschouwd worden. (Dit inzicht is nodig voor de berekeningen in paragraaf VI.)

Opgave 5 introduceert de druk in de formele fysische zin, als kracht per oppervlakte-eenheid. Ook hier verwacht ik nu geen problemen, na de aanschouwelijke introducties in deze en de voorgaande paragrafen. Al die verschillende eenheden kunnen natuurlijk wel verwarrend zijn. Het gaat hier en in het volgende echter ook om het inzicht dat je een eenheid kiest die handig is voor de situatie waarin je werkt. Ook hierna hoeft niet altijd onder 'druk' deze fysische definitie verstaan te worden. Dat doet immers zelfs de natuurkundeleraar niet in zijn gewone dagelijkse gesprekken.

Opgaven die niet af zijn, kunnen als huiswerk gemaakt worden.

**Over de samenvatting**

Het doel van deze samenvatting is dat de leerlingen al het rekenwerk en alle ingevoerde eenheden voor zichzelf nu eens op een rij zetten. Dit is een belangrijk moment, er komen nu veel dingen bij elkaar. Het is aan te raden op dit moment wat meer aandacht aan de samenvattingen te besteden, bijvoorbeeld door enkele te laten voorlezen, ze na te kijken of leerlingen ze onderling laten uitwisselen en becommentariëren.

## IV Druk van opgesloten lucht

### Doelstelling van paragraaf IV: 'Druk van afgesloten lucht'

In de vorige paragrafen is onderzocht hoe hard water of lucht van **buitenaf** ergens op drukken. In deze paragraaf wordt nagegaan hoe hard van **binnenuit** op de wanden van een ruimte gedrukt wordt en wat de relatie is tussen druk en volume van een bepaalde hoeveelheid lucht. Onderzoek naar deze vragen leidt vervolgens naar de **wet van Boyle (opgaven 4 en 5)**. Deze paragraaf staat tevens in het teken van "**leren onderzoek doen**". Hier behandelde aspecten zijn:

- het opstellen van een onderzoeksvraag en een hypothese (**opgave 2**);
- het testen van de hypothese, het uitvoeren en verwerken van metingen en het trekken van een conclusie (**opgave 3 en 4**);
- een niet-lineair verband tussen gemeten grootheden (**opgave 4**);
- het optreden en behandelen van systematische fouten (**opgave 6 en 7**).

De **opgaven 8, 9 en 10** dienen als oefening voor het rekenen met de wet van Boyle en de 'systematische fout'.

### Over de inleiding

Leid deze nieuwe paragraaf bijvoorbeeld als volgt in (zie ook de leerlingentekst): *De vorige paragrafen behandelden de druk in niet-afgesloten ruimtes: de zee en de atmosfeer. Er is daarbij uitgerekend hoe hard water of lucht van **buitenaf** ergens op drukken. Met name lucht (en andere gassen) zitten echter vaak ook opgesloten onder hoge druk. Dan wordt er van **binnenuit** op de wanden van een ruimte gedrukt. In deze en de volgende paragraaf gaan jullie onderzoeken waar deze druk allemaal van afhangt. Als praktisch nut van zo'n onderzoek kun je bijvoorbeeld denken aan een fabrikant van gascilinders. Voor hem is het belangrijk om te weten hoeveel gas hij in een cilinder van een bepaalde sterkte mag persen. De cilinders zijn voorzien van manometers, waarop men kan aflezen hoe groot de druk is.*

Laat als afsluiting van de inleiding een gascilinder met zo'n manometer zien. Ook opendraaien en laten horen hoe het gas eruit stroomt. Laat de leerlingen ook een opengewerkte manometer zien. Als je daarop blaast, is te zien dat de holle buis zich een beetje strekt. Dit kan vergeleken worden met een feest- of kermisfluitje van papier: als je daarop blaast rolt het zich helemaal af.

Vervolgens kunnen de leerlingen aan het werk gaan met opgave 1 en 2.

## Over opgave 1 en 2

### Groepswerk

In opgave 1 krijgen de leerlingen informatie over de werking van een manometer. Bovendien krijgen ze een indruk van de kracht op de wand van een cilinder. Opgave 2 helpt de leerlingen na te denken over de relatie tussen de druk en het volume van een bepaalde hoeveelheid van een gas in een afgesloten ruimte. Misschien kunnen ze zelf al een onderzoeksvraag en een hypothese opstellen. Ik verwacht echter dat de meeste leerlingen dit moeilijk vinden. Misschien formuleren enkele leerlingen iets als: "Bij tweemaal zo grote druk, kan er twee keer zoveel lucht in". Dit is niet de gebruikelijke formulering bij de wet van Boyle. Daarbij wordt immers de hoeveelheid lucht constant gehouden. Ik verwacht echter dat de vraag 'hoeveel lucht kan er in een cilinder samengeperst worden?' meer aanspreekt. De wet van Boyle geeft daar natuurlijk ook antwoord op. Aan de gebruikelijke proef die naar de wet van Boyle leidt, kleven wel een paar bezwaren:

- de proef wordt op kleine schaal gedaan, met doorgaans onnauwkeurige bepaling van druk en volume;
- het is met de gebruikelijke schoolapparatuur praktisch niet mogelijk een grotere druk dan ongeveer 4 bar te bereiken;
- de schaalgrootte: het is niet a priori duidelijk dat een zo gevonden regel ook geldt voor lucht in grote cilinders met zeer hoge druk.

Er is echter geen alternatief, er zal toch een proef moeten worden gedaan om het verband tussen volume en druk te bepalen. Van de onnauwkeurigheid wordt in deze paragraaf juist gebruik gemaakt door leerlingen te wijzen op het vóórkomen van fouten in metingen en hoe ze daarmee om kunnen gaan. Een leerling die met het bezwaar van de schaalgrootte komt, moet geprezen worden om zijn inzicht. Er kan dan gezegd worden dat een gevonden regel dus onder voorbehoud geldt, een heel wetenschappelijk gezichtspunt. Wanneer er geen leerling is die hier op wijst, moet de docent het zeker niet aankaarten.

Een duidelijk tonen van het apparaat waarmee het onderzoek gedaan wordt, kan de leerlingen helpen de onderzoeksvraag te formuleren. De afbeelding in opgave 2d moet dat ondersteunen. Licht eventuele afwijkingen hiervan met het werkelijk gebruikte apparaat toe.

Met behulp van dit apparaat wordt tevens het begrip '**onderdruk**', naar analogie met 'overdruk', ingevoerd. Dat is hiermee immers eenvoudig te realiseren.

## Over opgaven 3, 4 en 5

### Klasgesprek + demonstratieproef

Na bespreking met de leerlingen over hun formulering van de onderzoeksvragen en hypothesen, voert de docent de proef uit (of laat dit een leerling voor de klas doen). (Als er voldoende apparatuur beschikbaar is, kunnen de leerlingen ook zelf de proef doen.) Opgave 3 structureert dit. Noteer de meetresultaten op het bord, de leerlingen kunnen die overnemen. Er is snel te zien of de opgestelde hypothesen enigszins

kloppen. (De metingen zullen niet precies naar de wet van Boyle leiden, niet alleen vanwege de onnauwkeurigheid maar ook vanwege het niet meegetelde eigen volume van de manometer.)

Bij opgave 3c gaan de leerlingen na in hoeverre de opgestelde hypothesen bevestigd worden. Hier kan nog een (korte) klassikale bespreking aan gewijd worden. Vervolgens werken de leerlingen in groepjes aan de rest van de opgaven van deze paragraaf.

### **Groepswerk**

Waarschijnlijk kunnen de leerlingen nu tamelijk zelfstandig opgaven 4 en 5 maken. Opgave 4 leidt de wet van Boyle in, aan de hand van een gefingeerde reeks ideale metingen. Ik verwacht dat de leerlingen willen weten waarom hun metingen (of die van de docent) zo afwijken van de wet van Boyle. In deze opgave wordt daarom tevens aangekondigd dat dit probleem in het vervolg aangepakt gaat worden.

Vanaf opgave e maken de leerlingen gebruik maken van de grafische rekenmachine (GR). Opgave d leidt dit in, door te vragen om twee formules op te stellen, een voor de eigen metingen en een voor de gegeven reeks bedachte metingen. Het verschil is uiteraard alleen de constante. Toch zullen de leerlingen dit waarschijnlijk als verschillende formules zien. De constante voor de eigen metingen is het gemiddelde van  $pV$ , dit zal overigens niet voor iedereen meteen vanzelfsprekend zijn. Deze formules en de reeksen metingen worden vervolgens ingevoerd in de GR. Hiervan worden de grafieken in één assenstelsel getekend. Dit wordt zowel voor de eigen als e bedachte metingen gedaan. Hierbij kan in de groep het werk verdeeld worden.

Een extra opgave maakt de leerlingen vertrouwd met een manier om een omgekeerd evenredig verband grafisch snel te kunnen zien. Ook hier bewijst de GR weer goede diensten. De opdracht is 'extra' genomen omdat ze van de hoofdlijn afwijkt. Ze kan overgeslagen worden, misschien alleen voor de snelle leerlingen.

Opgave 5 geeft nog wat rekenoefeningen met de wet van Boyle.

### **Over opgave 6 t/m 10**

(Deze opgaven kunnen overgeslagen worden. Ze zijn niet noodzakelijk voor een begrip van de rest van 'druk'. Ze geven wel de gelegenheid het verschijnsel 'systematische fouten' bij proeven te behandelen met een zeer concreet voorbeeld. Men kan daartoe 6 en 7 wel laten maken, maar de oefeningen hiermee in opgaven 8 t/m 10 overslaan.)

### **Klasdiscussie**

Deze opgaven behandelen waarom de metingen van de vorige keer niet precies overeenstemden met de wet van Boyle. Misschien bedenken leerlingen een aantal mogelijke oorzaken. Ik verwacht dat ze doorgaans iets zullen zeggen als: "niet nauwkeurig gemeten", of "slechte apparatuur". Maak dan duidelijk dat "slecht meten" natuurlijk altijd voor kan komen en dat apparatuur altijd beter kan, maar dat ze nu leren dat er ook nog andere oorzaken kunnen zijn.

Als je onderzoek doet, krijg je vaak uitkomsten die niet kloppen met wat je verwachtte of met wat ze volgens de theorie zouden moeten zijn. Als je gewoon slecht gekeken hebt, mag je het een "meetfout" noemen. Maar vaker is er wat anders aan de hand, waardoor een meting steeds dezelfde soort afwijking heeft: een "systematische fout". We bekijken nu een systematische fout die op treedt bij metingen die met de wet van Boyle zouden moeten kloppen.

### **Groepswerk**

De rest van de opgaven kunnen de leerlingen waarschijnlijk zonder veel problemen en met onderlinge hulp wel maken.

### **Over de samenvatting**

De samenvatting is deze keer opgegeven in de vorm van een proefverslag. De leerlingen zullen daar al wel aanwijzingen voor hebben. Die moeten ze hierbij opvolgen. Daarnaast kunnen ze in het verslag alle tips uit de opgaven gebruiken.

## ***V Druk, Volume en Temperatuur van opgesloten lucht***

### **Doelstelling van paragraaf V: Druk, volume en temperatuur van opgesloten lucht**

Ook deze lessen staan deels in het teken van "onderzoek leren doen". Het probleem is nu welke invloed temperatuursverandering heeft op eerst druk en later het volume van afgesloten lucht. Bij **opgave 1** worden onderzoeksvraag en hypothese opgesteld. Bij **opgave 2** wordt het experiment gedaan.

**Opgave 3** wijst leerlingen erop hoe ze hun metingen met een formule kunnen benaderen. Het absolute nulpunt en de drukwet van Gay-Lussac worden geïntroduceerd. **Opgave 4** laat de leerlingen over de fysische betekenis van het absolute nulpunt nadenken. **Opgave 5** geeft enkele oefeningen met de drukwet van Gay-Lussac. **Opgave 6** poneert de algemene luchtwet. In **opgave 7** laat de leerlingen een voorspelling doen op grond van de algemene luchtwet en die vervolgens experimenteel toetsen. Het resultaat is de volumewet van Gay-Lussac. **Opgave 8** bevat enkele oefeningen met de algemene luchtwet.

### **Over opgave 1 t/m 4**

#### **Klasgesprek**

Bij het afleiden van een verband tussen druk en volume in de vorige paragraaf, hebben we geen rekening gehouden met mogelijke temperatuurveranderingen. Toch is daarvan vaak sprake bij opgesloten lucht of gassen. Ik verwacht dat leerlingen met voorbeelden aankomen als: een band in de zon, gasflessen die bij vorst eerst verwarmd moeten worden voor ze druk geven.

Het nieuwe onderzoek, de temperatuurafhankelijkheid van druk bij een vast volume, wordt vervolgens geïntroduceerd. De eerste opgave wordt gezamenlijk gemaakt en besproken. De uitvoering van het onderzoek (opgave 2) is groepswerk. Aan de hand van opgave 3 en 4 verwerken de leerlingen hun metingen en trekken ze conclusies. Het is de bedoeling dat de leerlingen dit onderzoek nu nog wat zelfstandiger uitvoeren en uitwerken dan in de vorige paragraaf.

#### **Groepswerk**

De leerlingen gaan in groepen zelf de drukwet van Gay Lussac na. Hiervoor worden erlenmeijers gebruikt, luchtdicht afgesloten met een rubberen kurk waarin een metaalmanometer steekt. De erlenmeijer wordt au-bain-marie verwarmd.

Het is belangrijk te beseffen dat de temperatuur van de lucht niet onmiddellijk gelijk wordt aan de watertemperatuur. De brander moet vóór iedere meting weggehaald worden. Vervolgens even wachten tot de druk niet meer verandert. Dan temperatuur en druk aflezen.



Het komt nogal eens voor dat er lekkage optreedt, bijvoorbeeld doordat de rubber stop niet stevig genoeg op de erlenmeijer zit. Bij temperatuurverhoging kan door de grotere druk de stop er afvliegen.

Er zal in de klas waarschijnlijk geen tijd meer zijn om de proef na te bespreken. Opgave 3 helpt de leerlingen een formule op te stellen die het verband tussen druk en temperatuur geeft. Hierbij wordt de GR weer ingeschakeld. Ik verwacht dat daar formules uit volgen als  $p = c \cdot (T + 250)$  en aanverwante vormen. De in natuurkundeboeken gebruikelijke formulering is hier nog niet te verwachten, die wordt in opgave 3e gepresenteerd. Het absolute nulpunt wordt ingevoerd als het snijpunt van de grafiek met de temperatuur. Op de fysische betekenis daarvan wordt pas in opgave 4 gewezen.

In opgave 3d wordt de absolute temperatuurschaal van Kelvin ingevoerd. Hiermee worden enkele omrekenoefeningen gemaakt.

Tot slot berekenen de leerlingen in hoeverre de eigen metingen voldoen aan de drukwet van Gay-Lussac (opgave 3f). Afwijkingen en problemen hiermee worden besproken. Ik verwacht dat veel leerlingen het gesprek met de docent en elkaar nodig hebben om het verband te zien tussen de grafiek en de formule, ook al hebben ze een dergelijk eenvoudig lineair verband vaak bij wiskunde gehad. Het blijkt niet zo vanzelfsprekend te zijn om die wiskunde toe te passen op een gemeten reële situatie. Ook het gebruik van andere letters dan bij wiskunde maakt het verband voor leerlingen niet triviaal.

### **Over de samenvatting**

De samenvatting krijgt hier weer de vorm van een proefverslag, dat aan de bekende eisen moet voldoen.

## **Over opgave 5 t/m 8**

### **Groepswerk**

Opgave 5 zijn rechtstreekse oefeningen met de al gevonden drukwet van Gay-Lussac. In opgave 6 wordt de 'algemene luchtwet' gegeven. We noemen het nog geen 'algemene gaswet' omdat de experimenten tot nu toe alleen met lucht zijn gedaan. Waarschijnlijk geeft dit de leerlingen niet veel problemen.

Opgave 7 laat de leerlingen voorspellingen doen met behulp van de algemene luchtwet over een verandering van het volume bij temperatuurverandering. Daarna gaan ze hun voorspelling experimenteel toetsen. Hier vervult het experiment dus een andere rol dan bij het opstellen van de drukwet, waarbij de theorie uit een experiment werd afgeleid.

Voor het experiment worden gasmeetspuiten gebruikt. Ze bewegen soepel, zodat de druk steeds redelijk constant is vanwege de snelle volume-aanpassing. De grootte van de druk is bij dit experiment niet belangrijk, alleen maar dat hij niet verandert.

Aan te bevelen is om in de klas een aantal emmers met water van verschillende temperatuur (ijswater tot bijna kokend) klaar te hebben staan. De leerlingen lopen

dan met hun spuiten langs de bakken. Dit werkt veel sneller dan het experiment in opgave V.2.

In het tweede deel van deze opgave stellen de leerlingen de volumewet van Gay-Lussac op, naar analogie van de drukwet. Hier zijn weinig problemen te verwachten.

In opgave 8 worden enkele oefeningen met de algemene luchtwet gegeven.

### **Over de samenvatting**

De samenvatting heeft nu de vorm van een aanvulling op het eerder gemaakte verslag.

## ***VI Waterdruk en Luchtdruk: de duikerklok***

### **Doelstelling van paragraaf VI: Waterdruk en luchtdruk: de duikerklok**

In deze paragraaf komen alle onderwerpen uit de vorige paragrafen op herhaling. De bedoeling is dat het inzicht verdiept wordt en dat de stof beter beklijft. In vorige lessen zijn waterdruk en luchtdruk apart behandeld. Nu moet het inzicht ontstaan dat de druk onder water deels veroorzaakt wordt door de luchtdruk die op het water staat. De duikerklok wordt daarbij gebruikt als tussenstap. Uit het inzicht dat in een duikerklok evenwicht heerst tussen de krachten van het water en de lucht op elkaar, kan het inzicht volgen dat de kracht onder water op een oppervlak door waterdruk en luchtdruk veroorzaakt wordt.

### **Over de inleiding**

De samenvatting van de vorige paragraaf wordt besproken. Kondig aan dat in deze paragraaf alles nog eens aan bod komt. Introduceer vervolgens de duikerklok als een voorloper van de duikboot. Demonstreer een glazen model-duikerklok in een doorzichtige bak. Laat eerst voorspellen wat er met het waterniveau zal gebeuren, de demonstratie laat vervolgens zien dat het waterniveau maar weinig stijgt. De meeste leerlingen verwachten wel dat er lucht in de duikerklok blijft, maar sommigen verrast het misschien dat het water niet hoger komt.

De duikerklok roept waarschijnlijk vragen op bij de leerlingen, anders gebeurt dat bij opgave 1 wel. Ik verwacht dat leerlingen in ieder geval een vraag naar de druk en het waterniveau in de duikerklok hebben. (Zo niet, dan brengt de docent die vragen naar voren.) Waarschijnlijk komen er ook nog andere vragen. (Zo verwacht ik een vraag over hoe lang de mensen in die klok kunnen ademen. Die vraag wordt hier niet behandeld, leerlingen kunnen manieren bedenken om er zelf achter komen.) Als de leerlingen geen andere vragen naar voren brengen, dan hoeft de docent dat ook niet te doen. De leerlingen gaan vervolgens in groepen aan het werk met de opgaven.

### **Over opgave 1 t/m 5**

#### **Groepswerk**

Ik verwacht dat de leerlingen nu niet veel problemen meer zullen hebben met de opgaven. Opdracht 2 heeft de bedoeling de link te leggen met de wet van Boyle en leerlingen te laten beseffen dat in een duikerklok evenwicht heerst tussen de druk van de lucht in de klok en de druk op het water. Dit wordt in a t/m d voorbereid en in e geformuleerd. Bij f worden leerlingen erop attent gemaakt dat de extra druk veroorzaakt wordt door de druk van het water.

Bij g moet het antwoord in m water worden gegeven, in dit geval dus 50 cm water. In opgave f wordt de watermanometer geïntroduceerd, een voor de leerlingen nieuw instrument. Het stijgen van de manometer komt precies overeen met hoeveel het

water in de duikerklok onder de waterspiegel zit. In opgave i testen de leerlingen hun voorspelling uit g experimenteel. Dit is alleen inzichtelijk als ze de watermanometer begrijpen.

Er moeten voldoende watermanometers en model-duikerklokken in de klas zijn om de leerlingen de gelegenheid te geven zelf hun antwoorden te verifiëren, ook al zal dat waarschijnlijk niet met precies 50 cm water gaan. In k wordt gevraagd naar de luchtdruk in de klok, ik verwacht dat de leerlingen nu zullen zien dat die gelijk is aan de 'gewone' luchtdruk plus de overdruk. Ze kunnen hierbij bedenken dat de krachten van lucht en water met elkaar in evenwicht zijn. Bovendien moeten ze inzien dat de druk in de klok overal even groot is. Dat kleine hoogteverschillen bij de druk van lucht niet veel uitmaken, is in opgave III.3.f berekend.

Opgaven l en m herhalen dit nog eens, maar dan met de bar als eenheid. In opgave m wordt pas de algemene regel gevraagd.

In opgave 3 maakt de leerlingen bewust van de correctie die bij de berekening van de waterdruk toegepast moet worden: ook de luchtdruk moet er nog worden bijgeteld.

In opgave 4 passen de leerlingen de luchtwetten toe om het volume van de lucht en de hoogte van de waterspiegel in de duikerklok uit te rekenen, uitgaande van de druk die ze in opgave 2 gevonden hebben.

Opgaven 5 is een wat lastiger toepassing, hij kan als extra opgave gegeven worden.

### **Over de samenvatting**

Voor de samenvatting lezen de leerlingen nu hun vorige samenvattingen door en kijken in hoeverre hun inzichten nu veranderd zijn. Ze schrijven nu een terugblik op hun werk, zowel inhoudelijk als wat manier van werken betreft.

De nog niet beantwoorde vragen kunnen in de klas geïnventariseerd worden. Ook andere punten uit deze samenvatting zijn geschikt als start voor een klassikale terugblik op de lessenserie.