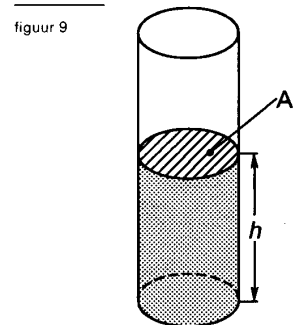


**Opgave 1**                      **Adiabatische expansie**

Een verticale cilinder is voor een deel gevuld met vloeistof.  
 De dichtheid van de vloeistof is  $\rho$ . De hoogte van de vloeistofkolom is  $h$ .  
 De doorsnede van de kolom is  $A$ . Zie figuur 9.  
 Voor de druk  $p$  die de vloeistof op de bodem van de cilinder uitoefent, geldt



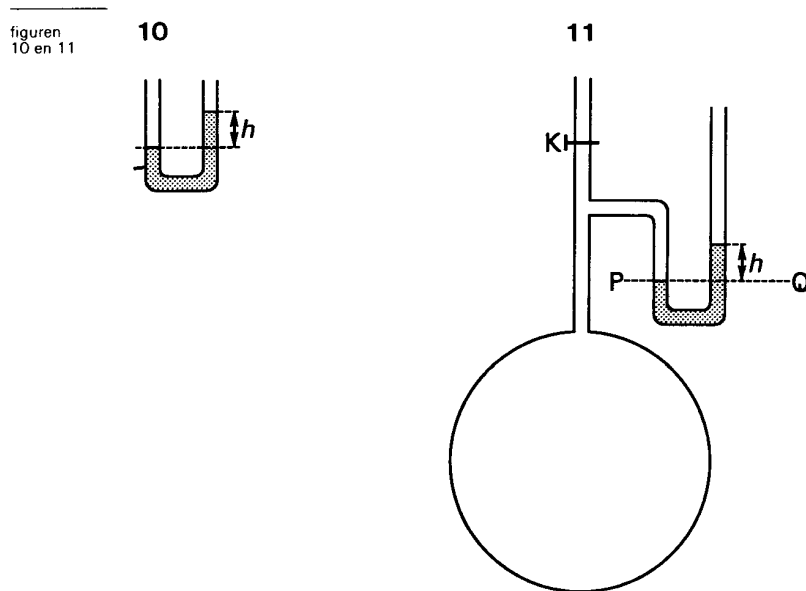
$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Hierin is  $g$  de valversnelling.

4p      a      Leid deze formule af.

Deze formule kan worden gebruikt als men de druk van een afgesloten hoeveelheid gas bepaalt met behulp van een open kwikmanometer. Dat is een gedeeltelijk met kwik gevulde U-vormige buis.

Zie figuur 10.



Het hoogteverschil tussen de kwikniveaus in de manometer wordt  $h$  genoemd.  
 Men heeft de beschikking over een bol met een ideaal gas, verbonden met een open kwikmanometer. Het gas in de opstelling kan in verbinding worden gebracht met de buitenlucht met behulp van kraan K. Zie figuur 11.

De druk van de lucht buiten de opstelling is steeds  $1,013 \cdot 10^5$  Pa.

In de beginsituatie (toestand A) is  $h = 4,5$  cm. Het kwik staat aan de rechterkant van de manometer het hoogst. De temperatuur is  $20^\circ\text{C}$ . De druk ter hoogte van lijn PQ in de linkerkant van de manometer is gelijk aan de druk op dezelfde hoogte in de rechterkant van de manometer. In de linkerkant is die druk gelijk aan de druk van het gas in de bol. In de rechterkant is die druk gelijk aan de luchtdruk buiten de opstelling plus de druk van het kwik boven lijn PQ.

3p      b      Bereken de druk van het afgesloten gas.

De kraan K wordt geopend. Er stroomt dan zó snel gas naar buiten dat de expansie van het gas als adiabatisch mag worden beschouwd.

- 4p c Leg met behulp van de eerste hoofdwet van de warmteleer uit waardoor de temperatuur van het gas daalt tijdens het ontsnappen van een deel van het gas.

Zodra het kwik in de manometer aan beide zijden even hoog staat, wordt de kraan gesloten. Het nu afgesloten gas bevindt zich dan in toestand B.

Hierna stroomt warmte het gas in totdat de temperatuur van het gas gelijk is aan de temperatuur van de omgeving. De gasdruk is dan gelijk aan  $1,037 \cdot 10^5$  Pa. Het gas bevindt zich dan in toestand C. Het volume van het gas in de manometer mag worden verwaarloosd.

- 4p d Bereken de temperatuur van het gas in toestand B.

Men herhaalt de proef. Men laat het gas nu echter *langzaam* ontsnappen, zodat de uitzetting niet adiabatisch is.

- 3p e Leg uit dat de temperatuur ook nu eerst even moet dalen.

## Opgave 2

## Vacuümglas

Lees het volgende artikel.

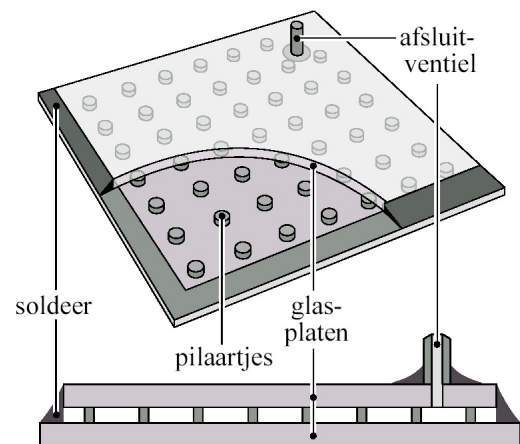
### Dubbelglas

In plaats van ruiten van gewoon dubbelglas worden tegenwoordig in woningen ook ruiten van zogenaamd vacuümglas toegepast. Bij gewoon dubbelglas bevindt zich droge lucht tussen de twee glasplaten.

De ruit is 12 mm dik.

Bij vacuümglas is de ruimte tussen de twee glasplaten vacuüm. Minuscule pilaartjes voorkomen dat de glasplaten tegen elkaar aangedrukt worden.

De ruit is nauwelijks dikker dan 6 mm en isoleert beter dan een ruit van gewoon dubbelglas.



De warmtegeleiding via de pilaartjes is verwaarloosbaar.

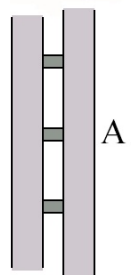
- 2p a Leg uit waarom vacuümglas beter isoleert dan gewoon dubbelglas.

Een ruit van vacuümglas heeft een oppervlakte van  $1,20 \text{ m}^2$ .

Tussen de glasplaten bevinden zich 60 pilaartjes. Deze pilaartjes vangen samen de totale kracht op die de buitenlucht op de ruit uitoefent. In de figuur hiernaast is een gedeeltelijke doorsnede van het vacuümglas met drie pilaartjes getekend.

De buitenluchtdruk is 1013 hPa.

- 3p b Bereken de kracht die de rechter glasplaat op het pilaartje bij A uitoefent.



Voor  $P$ , de hoeveelheid warmte die per seconde door een ruit gaat, geldt:

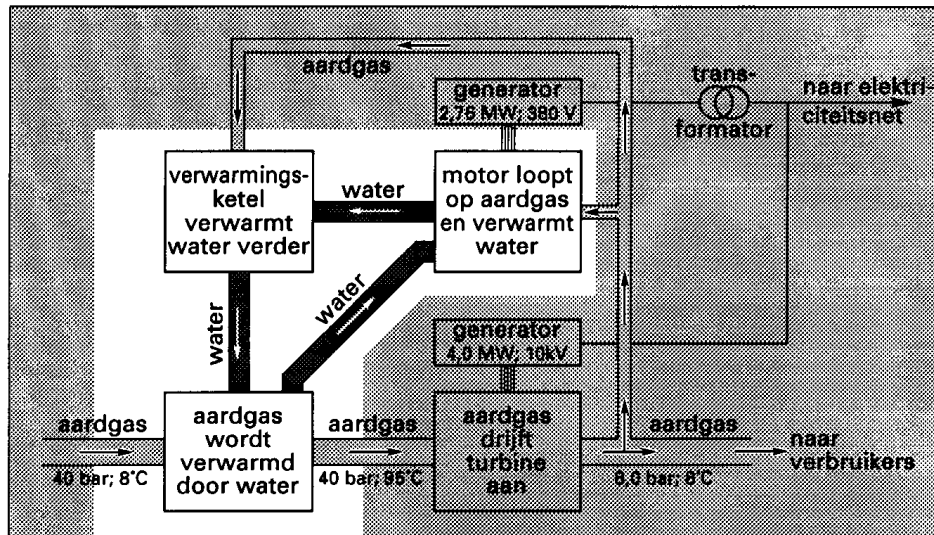
$$P = \mu A \Delta T$$

Hierin is:

- $\mu$  de warmtedoorgangscoefficiënt van de ruit;
- $A$  de oppervlakte van de ruit;
- $\Delta T$  het temperatuurverschil tussen binnen- en buitenkant van de ruit.



figuur 10

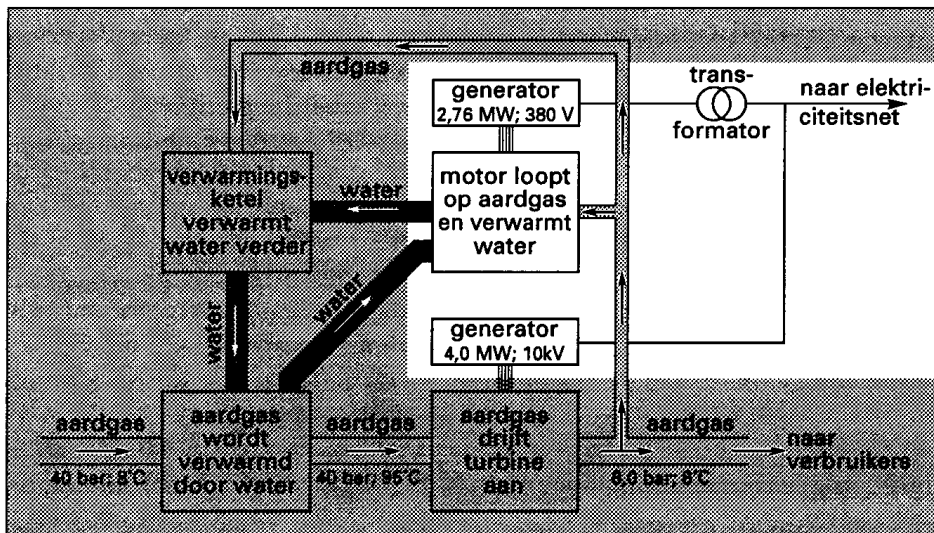


Het water staat per seconde 6,4 MJ warmte af aan het gas en daalt daarbij 35°C in temperatuur.

3p b Bereken hoeveel kg water per seconde wordt rondgepompt.

De motor drijft een tweede generator aan die een vermogen levert van 2,76 MW bij een spanning van 380 V. Zie het lichte deel van figuur 11.

figuur 11



Het elektrische rendement van de motor-generatorcombinatie is 41%. Neem aan dat het aardgas in de motor volledig verbrandt.

2p c Bereken hoeveel warmte per seconde in deze combinatie wordt ontwikkeld.

## Opgave 4 Tropische plantenkas

Een tropische plantenkas heeft in een jaar een totale hoeveelheid energie van  $2,0 \cdot 10^{12}$  J nodig. Deze energie wordt geleverd door een aardgascentrale die gebruikmaakt van warmtekrachtkoppeling.

2p a Leg uit wat er bedoeld wordt met de term warmtekrachtkoppeling.

Het rendement van de centrale is 75%.

3p b Bereken hoeveel m<sup>3</sup> Gronings aardgas de centrale per jaar verbruikt om in de energiebehoefte van de kas te voorzien.

's Nachts houdt men de temperatuur in de kas op  $17^{\circ}\text{C}$ . Overdag laat men de temperatuur stijgen tot  $33^{\circ}\text{C}$ . Tijdens het opwarmen blijft de luchtdruk constant doordat er lucht door kieren en gaten wegstroomt.

De lucht in de kas mag beschouwd worden als een ideaal gas.

- 4p c Bereken welk percentage van het oorspronkelijke aantal mol lucht tijdens het opwarmen wegstroomt uit de kas.

Een koelinstallatie voorkomt dat de temperatuur in de kas op zomerse dagen te hoog wordt.

De installatie bestaat uit een groot aantal sproeiers die water vernevelen aan de buitenkant van de kas. Als de installatie aanstaat, wordt de kas omhuld door een wolk (nevel) van kleine waterdruppeltjes die verdampen.

- 3p d Op welke twee manieren levert deze wolk een bijdrage aan de koeling in de kas? Licht beide manieren toe.

## Opgave 5

## Asfaltwarmte

Lees het artikel.

artikel

De winning van warmte uit asfalt is technisch geen probleem meer. In Driel wordt een wijk van 370 woningen gebouwd die de warmte van het asfalt van een naburige verkeersweg gebruikt. De gemiddelde eengezinswoning heeft op jaarbasis ongeveer 30 gigajoule

nodig voor verwarming. De opbrengst van het asfalt is ongeveer 0,75 gigajoule per vierkante meter per jaar, waarvan 80% voor de huizen gebruikt kan worden.

*naar: Technisch Weekblad, 10 januari 2001*

- 4p a Bereken met behulp van een schatting de lengte van het wegdek die nodig is voor de verwarming van deze wijk in Driel. Geef aan welke grootte je moet schatten.

Het asfalt wordt verwarmd door de straling van de zon. Veronderstel dat op een zonnige middag het gemiddelde vermogen van de zonnestraling die op een vierkante meter asfalt valt gelijk is aan  $6,0 \cdot 10^2 \text{ W}$  en dat al deze zonne-energie gelijkmatig wordt opgenomen door een laag asfalt van 15 cm dikte.

- 4p b Bereken de temperatuurstijging van het asfalt per uur indien er geen warmte aan de omgeving wordt afgestaan.

# EINDE

### Opgave 1 Adiabatische expansie

4p 
$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot g}{A} = \rho \cdot g \cdot h$$

(waarin  $F$  = de kracht die het water op de bodem uitoefent,  $m$  = de massa van het water en  $V$  = het volume van het water).

3p Voor de druk  $p$  van het afgesloten gas geldt:  $p = p_{\text{kwik}} + b$ , waarin:  
 $p_{\text{kwik}}$  = de druk van de kwikkolom boven  $Q = \rho \cdot g \cdot h$  (zie antwoord 14), met:  
 $\rho$  = de dichtheid van kwik =  $13,5 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (BINAS, tabel 11),  
 $g$  = de valversnelling =  $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  (BINAS, tabel 7) en  
 $h$  =  $4,5 \text{ cm} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ ,  
 zodat:  $p_{\text{kwik}} = 13,5 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 4,5 \cdot 10^{-2} = 0,0596 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  en

$b$  = de druk van de buitenlucht =  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Invullen:  $p = 0,0596 \cdot 10^5 + 1,013 \cdot 10^5 = 1,073 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

4p De eerste hoofdwet van de warmteleer luidt:

$Q = \Delta U_k + \Delta U_p + W_u$  (BINAS, tabel 35.5), waarin:

$$\left. \begin{array}{l} Q = 0 \\ \Delta U_p = 0 \\ W_u > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta U_k < 0, \text{ dus de temperatuur van het gas daalt.}$$

Toelichting:

$Q$  = de toegevoerde warmte. Omdat het proces zo snel verloopt geldt:  $Q = 0$

$\Delta U_k$  = de verandering van de kinetische energie van de gasmolekulen

$\Delta U_p$  = de verandering van de potentiële energie van de gasmolekulen. In dit geval is  $\Delta U_p = 0$ , vanwege de zeer kleine onderlinge aantrekkingskrachten van de gasmolekulen

$W_u$  = de arbeid die door de gasmolekulen wordt verricht. Daar de kracht van de buitenlucht over zekere afstand moet worden overwonnen, geldt:  
 $W_u > 0$

4p We berekenen de temperatuur  $T_B$  van het gas in toestand B met de spanningswet van Gay Lussac (BINAS, tabel 35.5):

$$\frac{p_B}{T_B} = \frac{p_C}{T_C} \rightarrow T_B = \frac{p_B}{p_C} \cdot T_C, \text{ waarin: } p_B = b = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa,}$$

$$p_C = 1,037 \cdot 10^5 \text{ Pa en}$$

$$T_C = 20 \text{ }^\circ\text{C} = (20 + 273) \text{ K} = 293 \text{ K}$$

Invullen:  $T_B = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,037 \cdot 10^5} \cdot 293 = 286 \text{ K} (= 13 \text{ }^\circ\text{C})$

3p Beschouw opnieuw de eerste hoofdwet van de warmteleer (BINAS; tabel 35.5 en ook antwoord 16):  $Q = \Delta U_k + \Delta U_p + W_u$

Vóór het uitvoeren van de proef is de temperatuur van het gas even hoog als de buitentemperatuur. Als tijdens het uitvoeren van de proef de temperatuur niet zou veranderen, zou gelden:

$\Delta U_k = 0$ ,  $\Delta U_p = 0$  en  $W_u > 0$ , zodat:  $Q > 0$ . Er zal dus warmte uit de omgeving naar het gas moeten stromen. Dit kan alleen als de temperatuur van het gas lager is dan de temperatuur van de omgeving. De temperatuur van het gas moet dus eerst even dalen. De veronderstelling:  $\Delta U_k = 0$  was dus niet correct:  $\Delta U_k < 0$ !

## Opgave 2

## Vacuümglas

- 2p a Bij dubbelglas met een luchtlaag kan de lucht warmte van de ene naar de andere glasplaat transporteren door geleiding en/of stroming. Dat kan bij vacuümglas niet.
- inzicht dat er bij warmteverlies sprake is van warmtetransport tussen de glasplaten 1p
  - inzicht dat bij gewoon dubbelglas meer warmtetransport plaatsvindt door stroming *en* geleiding van de lucht dan bij vacuümglas 1p

- 3p b De kracht op één kant van de ruit volgt uit:

$$p = \frac{F}{A} \rightarrow F = pA = 1013 \cdot 10^2 \cdot 1,20 = 1,22 \cdot 10^5 \text{ N.}$$

Er zijn 60 pilaartjes. Op elk pilaartje staat daarmee een kracht van

$$\frac{1,22 \cdot 10^5}{60} = 2,03 \cdot 10^3 \text{ N.}$$

- gebruik van  $p = \frac{F}{A}$  1
- factor 60 in rekening gebracht 1
- completeren van de berekening 1

- 5p c De hoeveelheid energie die per seconde bespaard wordt, is

$$P_{\text{dubbelglas}} - P_{\text{vacuümglas}} = (\mu_{\text{dubbelglas}} - \mu_{\text{vacuümglas}}) A \Delta T =$$

$$(3,5 - 1,4) \cdot 6,0 \cdot (19 - 3,0) = 202 \text{ J.}$$

De besparing over 4,0 uur is  $202 \cdot 4 \cdot 60 \cdot 60 = 2,9 \cdot 10^6 \text{ J.}$

90% van de stookwaarde wordt nuttig gebruikt:

$$0,90 \cdot 32 \cdot 10^6 = 28,8 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3}.$$

De besparing met vacuümglas is daarmee:  $\frac{2,9 \cdot 10^6}{28,8 \cdot 10^6} = 0,10 \text{ m}^3.$

- gebruik van  $P = \mu A \Delta T$  met  $\Delta T = 16 \text{ K}$  1
- inzicht dat de besparing per seconde gelijk is aan  $P_{\text{dubbelglas}} - P_{\text{vacuümglas}}$  1
- opzoeken van de stookwaarde van (Gronings) aardgas 1
- in rekening brengen van het rendement 1
- completeren van de berekening 1

### Opgave 3

### Gasdistributie

3p

Het aantal  $\text{m}^3$  gas dat per uur de turbine verlaat ( $V_2$ ) wordt berekend met de

algemene gaswet (BINAS, tabel 35.5):  $\frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} \rightarrow V_2 = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot V_1$

Hierin is:

$V_1$  = het aantal  $\text{m}^3$  gas dat per uur de turbine binnenstroomt =  $56 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ ,

$p_1$  = de druk van het gas vóór de turbine = 40 bar,

$p_2$  = de druk van het gas na de turbine = 8,0 bar,

$T_1$  = de temperatuur van het gas vóór de turbine =  $95 \text{ }^\circ\text{C} = (273 + 95) \text{ K} = 368 \text{ K}$  en

$T_2$  = de temperatuur van het gas na de turbine =  $8 \text{ }^\circ\text{C} = (273 + 8) \text{ K} = 281 \text{ K}$

Invullen:  $V_2 = \frac{40}{8,0} \cdot \frac{281}{368} \cdot 56 \cdot 10^3 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ m}^3$

3p

De massa  $m$  van het water dat per seconde wordt rondgepompt, berekenen we met:

$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \rightarrow m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T}$  (BINAS, tabel 35.5), waarin:

$Q$  = de hoeveelheid warmte die het water per seconde afstaat aan het gas =  
 $= 6,4 \text{ MJ} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ J}$ ,

$c$  = de soortelijke warmte van water =  $4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (BINAS, tabel 11) en

$\Delta T$  = de temperatuurdaling =  $35 \text{ }^\circ\text{C} = 35 \text{ K}$

Invullen:  $m = \frac{6,4 \cdot 10^6}{4,18 \cdot 10^3 \cdot 35} = 44 \text{ kg}$

2p

Van het totaal beschikbare vermogen  $P_{\text{totaal}}$  wordt 41% omgezet in elektrisch vermogen  $P_{\text{gen}}$  van de generator ( $P_{\text{gen}} = 2,76 \text{ MW}$ )  $\rightarrow$  59% van  $P_{\text{totaal}}$  wordt dus omgezet in warmte.

De hoeveelheid warmte die per seconde wordt ontwikkeld  $P_{\text{thermisch}}$  bedraagt dus:

$$\frac{59}{41} \cdot 2,76 = 4,0 \text{ MW}$$

## Opgave 4 Tropische plantenkas

- 2p a Met warmtekrachtkoppeling wordt bedoeld dat de centrale bij het opwekken van (elektrische) energie (een deel van) de daarbij ontstane restwarmte nuttig gebruikt.
- noemen van rest- of afvalwarmte 1
  - completeren van de uitleg 1
- 3p b De energie die het aardgas per jaar moet leveren is:  $2,0 \cdot 10^{12} / 0,75 = 2,67 \cdot 10^{12}$  J  
 Bij de verbranding van  $1 \text{ m}^3$  Gronings aardgas komt  $32 \cdot 10^6$  J energie vrij (Binas tabel 28).  
 Per jaar moet dan:  $2,67 \cdot 10^{12} / 32 \cdot 10^6 = 8,3 \cdot 10^4 \text{ m}^3$  aardgas worden verbrand.
- inzicht dat er  $1 / 0,75$  maal zoveel verbrandingswarmte in rekening moet worden gebracht 1
  - opzoeken van de verbrandingswarmte van aardgas 1
  - completeren van de berekening 1
- 4p c Uit de algemene gaswet  $pV = nRT$  met  $p$ ,  $V$  en  $R$  constant volgt  $\frac{n_2}{n_1} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{290}{306}$ .
- Hieruit volgt  $n_2 = 0,948 \cdot n_1$ .  
 Er moet dus 5,2% van het oorspronkelijke aantal mol wegstromen.
- gebruik van  $pV = nRT$  1
  - inzicht dat  $\frac{n_2}{n_1} = \frac{T_1}{T_2}$  1
  - temperaturen in kelvin 1
  - completeren van de berekening 1
- Opmerking*  
 Voor een oplossing in de trant van  $(\frac{306}{290} - 1) \cdot 100\% = 5,5\%$ : 2 punten.
- 3p d Voor het verdampen van de waterdruppeltjes is energie nodig (want de inwendige potentiële energie van de watermoleculen neemt toe omdat hun onderlinge afstand toeneemt). Deze energie wordt (deels) onttrokken aan de plantenkas. Bovendien vormt de nevel een laag om de kas, die de warmtestraling van de zon naar de kas (deels) tegenhoudt.
- inzicht dat voor verdamping van water energie nodig is 1
  - inzicht dat de warmte voor deze verdamping (deels) aan de kas onttrokken wordt 1
  - inzicht dat de wolk de warmtestraling van de zon (deels) tegenhoudt 1

## Opgave 5 Asfaltwarmte

- 4p a Er moet gelden:  $A \cdot 0,75 \cdot 0,80 = 370 \cdot 30$ , zodat geldt:  $A = 18,5 \cdot 10^3 \text{ m}^2$ .  
 De weg wordt ongeveer 6 meter breed geschat, zodat de lengte van het stuk asfaltweg 3 km bedraagt.
- inzicht dat asfalt  $370 \cdot 30 (= 1,11 \cdot 10^4)$  gigajoule warmte moet opbrengen 1
  - inzicht dat de breedte van de weg geschat moet worden (tussen 3 en 30 m) 1
  - inzicht dat een nuttige opbrengst gelijk is aan  $\eta \cdot l \cdot b \cdot 0,75$  1
  - completeren van de berekening 1
- 4p b Op  $1 \text{ m}^2$  asfalt valt per uur een zonne-energie van  $6,0 \cdot 10^2 \cdot 60 \cdot 60 = 2,16 \cdot 10^6$  J.  
 De massa van dat stuk asfalt is  $m = \rho Ah = 1,2 \cdot 10^3 \cdot 0,15 = 1,8 \cdot 10^2 \text{ kg}$ .  
 Invullen van de vergelijking  $Q = cm \cdot \Delta T$  met  $c = 0,92 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$  levert:  
 $2,16 \cdot 10^6 = 0,92 \cdot 10^3 \cdot 1,8 \cdot 10^2 \cdot \Delta T$ . Hieruit volgt:  $\Delta T = 13 \text{ K}$ .
- gebruik van  $Q = cm \cdot \Delta T$  met opzoeken van  $c_{\text{asfalt}}$  1
  - gebruik van  $m = \rho V$  met opzoeken van asfalt  $\rho$  1
  - inzicht  $Q = Pt$  1
  - completeren van de berekening 1