



### Her lærer du mere om

- Densitet 200
- Effekt 201
- Indre energi og varmekapacitet 202
- Strålingsenergi 208



Overvej, hvorfor vand udvider sig, når dets temperatur stiger.

## 1.5

# Klimaændringer - et fysisk problem?

Klimaet ændrer sig om ørerne på os! Tusindvis af forskere verden over søger at kortlægge, hvad der sker med klimaet, og undersøge, hvorfor der sker ændringer. Det er komplekst, og forskerne må arbejde på tværs af faggrænser. Men nogle af de grundlæggende elementer i Jordens klima er faktisk ikke så svære at forstå.

## Vandet stiger

FN's klimapanel (IPCC) udgav i 2013 en klimarapport, som slår fast, at temperaturen på Jorden er steget gennem de seneste 100 år, at havniveauet er steget, samt at snedækket på den nordlige halvkugle er faldet gennem de seneste 50 år. Der er markante forskelle på stigningerne. Det viser sig nemlig, at temperaturen er steget næsten dobbelt så meget i det arktiske område som på kloden generelt.

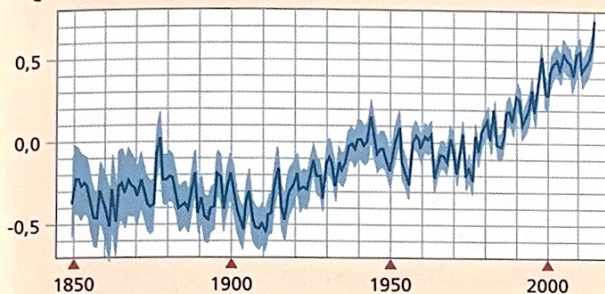
## Hvorfor stiger vandstanden i havene?

Det er nærliggende at se på de store iskapper og gletsjere, som smelter og derved sender store mængder vand ud i verdenshavene. Grønland og Antarktis antages således hver især at være ansvarlig for en vandstandsstigning på 0,21 mm pr. år gennem de sidste 10 år.

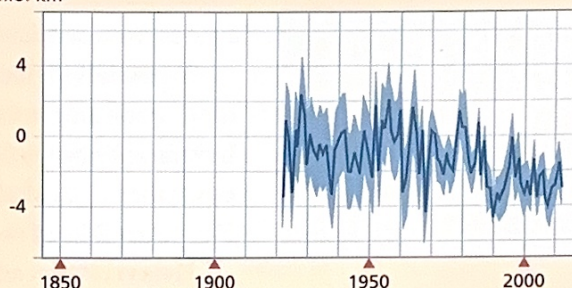
Men faktisk skyldes omkring halvdelen af vandstandsstigningen i verdenshavene udelukkende, at vand udvider sig, når det varmes op (bortset fra i intervallet fra 0 til 3,8 °C, hvor vand trækker sig sammen ved opvarmning). Havet opvarmes ved overfladen, hvorfra varme langsomt breder sig til større dybder. Det kan tage 100-1000 år for varme at trænge ned på større dybder.

Umiddelbart kan det virke betryggende, at det ikke går så hurtigt. Problemet er bare, at opvarmningen af havet vil fortsætte mod større dybder, selv hvis der ikke sker yderligere opvarmning af overfladen. Det tyder på, at den tidsskala, man er nødt til at se på i forbindelse med fremtidens havniveau, er mere end de 50-100 år, som ofte er den yderste grænse for vores tanker om fremtiden.

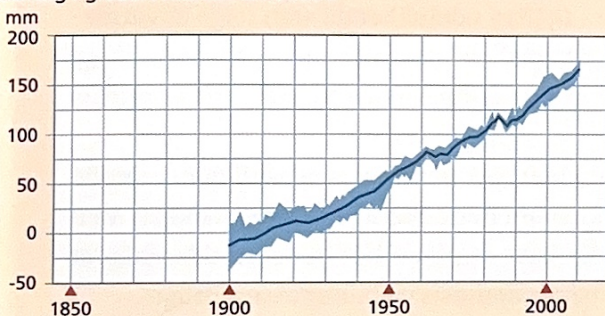
Ændring i global middeltemperatur ved jordoverfladen  
°C



Ændring i snedække om sommeren på den nordlige halvkugle  
mio. km<sup>2</sup>



Ændring i globalt middelhavniveau  
mm



**Fig. 1.28** Data fra IPCC, som øverst viser ændringen i den globale middeltemperatur ved jordoverfladen, i midten vises ændringen i det globale middelhavniveau og nederst ændringen i snedækket på den nordlige halvkugle i sommerhalvåret. Nul er gennemsnit af data fra 1961-1990.

### ⚙ Aktivitet IPCC klimarapport

Figur 1.28 er fra IPCC klimarapporten 2013.

I skal bruge graferne til at svare på følgende spørgsmål

- Hvad viser y-akserne på de tre grafer?
- Hvorfor går data ikke lige langt tilbage i tid for de tre sæt målinger?
- Hvor meget er den globale middeltemperatur steget i løbet af de seneste 100 år? Hvilken årlig stigning svarer det til?
- Hvor meget er den globale middeltemperatur steget i løbet af de sidste 50 år? Hvilken årlig stigning svarer det til? Kommentér resultatet.
- Beskriv ændringen i det globale havniveau gennem de seneste 100 år.
- Hvad repræsenterer de blå områder omkring den sorte linje?

## En simpel model for varmeudvidelsen

Vi vil nu lave en simpel model for varmeudvidelsen af verdenshavene som konsekvens af den globale opvarmning. Klimaforskere benytter avancerede computermodeller som baggrund for deres forudsigelser, men vi kan få en idé om størrelsesordenen af varmeudvidelsen med en simpel model.

$$\text{Varmeudvidelsen: } 1000 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 88 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}\cdot^\circ\text{C}} = 0,18 \text{ m}$$

### Vores antagelser

Vi antager, at

- alt havvand har samme temperatur til at begynde med, nemlig 10 °C.
- kun de øverste 1000 meter af havet opvarmes.
- temperaturen af havet samlet kun stiger 2 °C.



**Fig. 1.29** Overalt i de arktiske egne er der tegn på klimaforandringer. Øverst en gletsjer med mindre udbredelse end de foregående år og nederst et isbjerg brækket af fra Grønlands iskappe.

### Model for varmeudvidelsen

Undersøgelser viser, at hvis vands temperatur er  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vil det for hver meter udvide sig  $88\text{ }\mu\text{m}$ , når temperaturen stiger  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Størrelsen  $88\frac{\mu\text{m}}{\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}}$  kaldes *varmeudvidelseskoefficienten* for vand og kan findes i tabeller.

Varmeudvidelsen afhænger af temperaturen af vandet og fortæller altså, hvor meget vandet i et bassin med en vanddybde på  $1\text{ m}$  vil stige, hvis det opvarmes  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Da vores antagelse er, at en vandsøjle på  $1000\text{ m}$  opvarmes  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , skal vi altså regne med, at vandstanden stiger  $0,18\text{ m}$ . Det virker ikke af meget, men måske skyldes det vores forudsætninger.

Hvis vi i stedet antager en gennemsnitstemperatur af vandet på  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , giver den tilsvarende beregning  $0,41\text{ m}$ . Ifølge IPCC-rapporten vil havet i år 2100 være steget  $0,11\text{ m} - 0,45\text{ m}$  udelukkende som følge af varmeudvidelsen. Intervallet skyldes dels, at man har regnet på forskellige temperaturstigninger, dels at forskellige modeller ikke giver præcis samme resultat.

Smeltede iskapper på land bidrager naturligvis også til den samlede havniveaustigning. Vores viden om dette bidrag er stadig usikker, men forskerne er enige om, at det især er på en lidt længere tidsskala, at afsmeltning af den grønlandske indlandsis vil bidrage væsentligt.

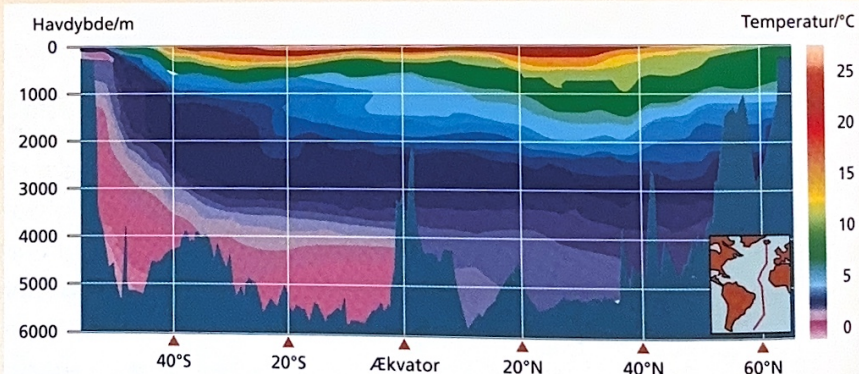
### ⚙️ Hvor meget stiger havet som følge af opvarmning?

Ovenstående model for varmeudvidelse er en kraftig forenkling af virkeligheden. I skal nu lave en bedre model for opvarmningen af havvandet.

- Forklar, hvad figuren til højre viser.
- Benyt data fra nedenstående tabel samt figuren til at vurdere, hvor meget havniveaueet stiger, hvis temperaturen stiger med 2 grader.
- Hvilke antagelser gør I for at kunne vurdere havniveaustigningen?

### ⚙️ Vis at vand udvider sig


Design og udfør et eksperiment, som viser, at vand udvider sig, når dets temperatur øges.



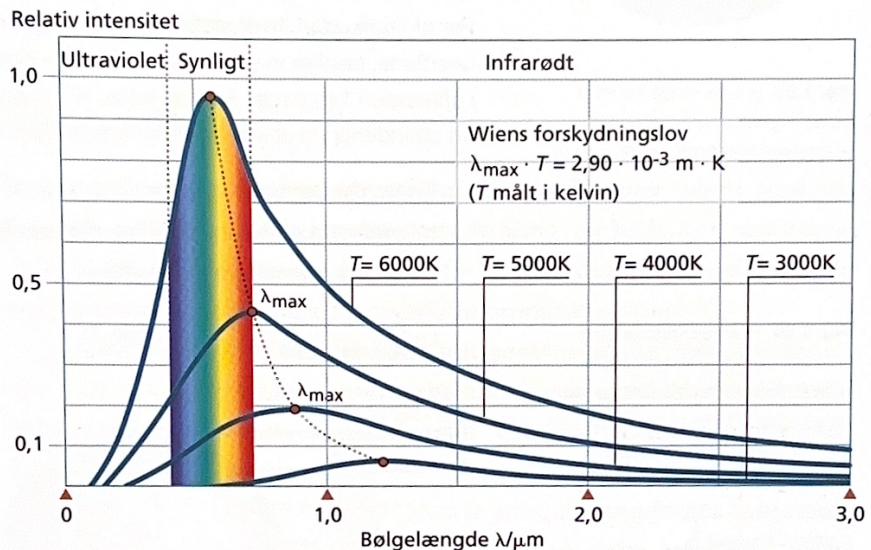
**Fig. 1.30** Temperaturen i Atlanterhavet baseret på målinger langs den midtatlantiske ryg.

Vandets temperatur i $^{\circ}\text{C}$ .	1	4	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Varmeudvidelseskoefficienten i $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}}$	-50	0	88	207	303	385	457	522	582	640	695

**Fig. 1.31** Vands varmeudvidelseskoefficient. Skrivemåden skal læses sådan, at når vandets temperatur for eksempel er  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , er varmeudvidelseskoefficienten  $207\text{ }\mu\text{m}$  pr.  $\text{m}$  pr.  $^{\circ}\text{C}$ .

 - Havis bidrager ikke til en øget vandstand – hvorfor ikke?

**Fig. 1.32** Graferne viser, hvordan intensiteten af stråling udsendt fra fire sorte legemer afhænger af bølgelængden af strålingen. Bemærk, at jo højere temperatur legemet har, jo mere dominerer de korte bølgelængder i strålingen.



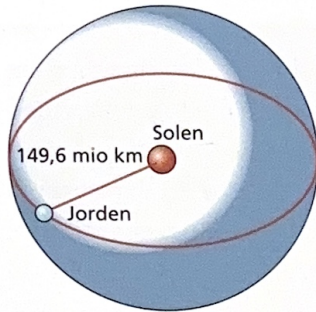
### Sorte og grå legemer

Selvom Solen befinder sig 149,6 mio. km væk fra Jorden, er det Solen, der er den vigtigste energikilde for Jorden. En forståelse af Jordens klima må derfor tage udgangspunkt i, hvordan Solens energi overføres til Jorden.

Når et legeme – en vilkårlig genstand – rammes af stråling, kan det enten absorbere strålingen, reflektere strålingen eller lade strålingen passere igennem sig. Et legeme, som udelukkende absorberer strålingen, kaldes et *sort legeme*, mens et legeme, som både reflekterer og absorberer stråling, kaldes et *gråt legeme*. Solen er med god tilnærmelse et sort legeme, mens Jorden er et gråt legeme.

Strålingen, som udsendes fra et sort legeme, er bestemt af legemets overfladetemperatur. Solens overflade har temperaturen 5770 K, hvilket bevirker, at strålingen fra Solen især har bølgelængder mellem 200 nm og 2000 nm. Det meste af strålingen udsendes som synligt lys med bølgelængder omkring 500 nm. Sammenhængen mellem temperaturen af det sorte legeme og den bølgelængde, hvor intensiteten af den udsendte stråling er størst, kaldes *Wiens forskydningslov*.

Wiens forskydningslov  
 $\lambda_{\max} \cdot T = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$



**Fig. 1.33** Solens effekt fordeles på en kugleoverflade, hvor radius er lig afstanden fra Solen til Jorden.

**Fig. 1.34** Solstrålingen rammer vinkelret på Jordens atmosfære, men strålingen skal fordeles over hele kuglen. Derfor modtager  $1 \text{ m}^2$  af Jorden på oversiden af atmosfæren i gennemsnit kun  $\frac{1}{4}$  af den indkomne effekt, nemlig cirka  $342 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

## Så meget energi tilføres

Solen udsender stråling med en effekt på  $3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$ , men kun en lille del af denne stråling rammer Jorden. Normalt taler vi om strålingens *intensitet*, hvilket blot er strålingens effekt pr. kvadratmeter vinkelret på stråleretningen.

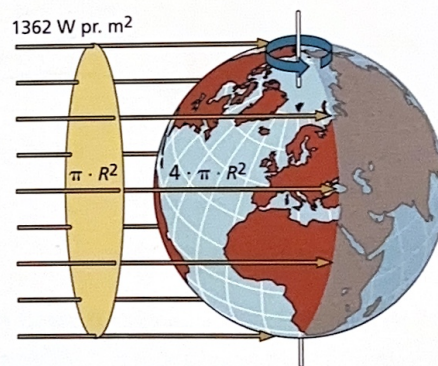
### Beregn solindstråling

For at finde ud af, hvor stor intensitet solstrålingen har her ved Jordens overflade, tænker vi os et areal på  $1 \text{ m}^2$  anbragt vinkelret på solstrålerne i afstanden 149,6 mio. km fra Solen. Vi forestiller os, at Solens effekt fordeles ud på indersiden af en kugleskal med radius 149,6 mio. km.

En kugleskal har overfladen  $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$ .

Intensiteten af Solens stråling, når den fordeles på en kugleskal i Jordens afstand fra Solen, bliver

$$I = \frac{P}{A} = \frac{3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi \cdot (149,6 \cdot 10^9 \text{ m})^2} = 1362 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$



Intensiteten af Solens stråling vinkelret på  $1 \text{ m}^2$  af kugleskallen er  $1362 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

### Stråling fra Jorden

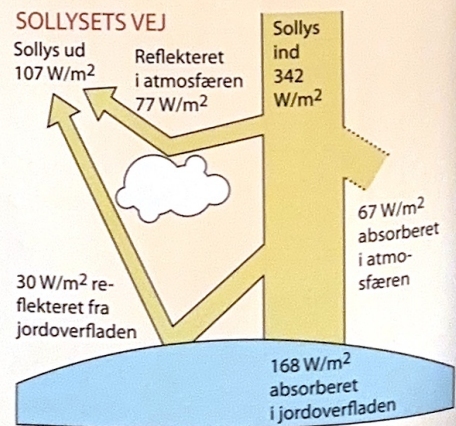
Wiens forskydningslov er angivet på s. 33 samt i figur 1.30.

- Brug Wiens forskydningslov til at beregne bølglængden  $\lambda_{\text{max}}$  i den stråling, jordoverfladen med en temperatur på  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  udsender. Husk først at omregne temperaturen til Kelvin.
- I det område, hvor drivhusgasserne befinder sig, har atmosfæren temperaturen  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Beregn  $\lambda_{\text{max}}$  for drivhusgasserne.
- Overvej hvilken type stråling, der er tale om i de to situationer.

### Jorden er grå

Jorden er et gråt legeme, som reflekterer en del af den indkomne stråling. Brug figur 1.35 til at besvare følgende spørgsmål:

- Hvor stor en del af Solens stråling reflekteres tilbage til rummet? Dette tal kaldes Jordens *albedo*.
- Hvor i atmosfæren sker refleksionen af Solens stråler?
- Begrund ud fra figuren, at Jorden og atmosfæren tilsammen absorberer  $235 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .



**Fig. 1.35** Figuren viser intensiteten af de reflekterede og absorberede dele af sollyset, som rammer Jorden.

Uden for Jordens atmosfære er solstrålingens intensitet derfor  $1362 \text{ W pr. m}^2$  vinkelret på solstrålingen. Vi kalder denne størrelse for *solar-konstanten*. Når der tages højde for årstidsvariationer samt dag og nat betyder det, at hver kvadratmeter af Jorden i gennemsnit modtager strålingsenergi svarende til  $342 \text{ Joule hvert sekund}$ , altså  $342 \text{ W}$ .

Det er dog ikke al strålingen, som absorberes af Jorden. I gennemsnit er det kun cirka  $70\%$ , som absorberes, mens resten reflekteres. Forholdet mellem intensiteterne af den reflekterede stråling og den indkomne stråling kaldes *albedo*.


## Drivhuseffekten

Jorden udstråler i gennemsnit over lang tid lige så meget energi, som den modtager. Jorden udsender altså selv stråling, og både den modtagne og den udstrålede intensitet er på  $235 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Med denne intensitet skulle Jorden have en gennemsnitlig overfladetemperatur på  $-18^\circ\text{C}$ .

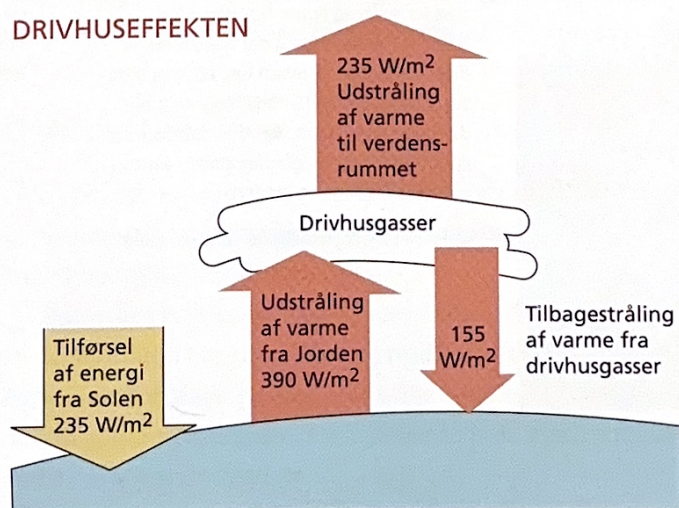
I virkeligheden er gennemsnitstemperaturen ved jordoverfladen  $15^\circ\text{C}$ . Modellen for Jordens strålingsbalance passer altså ikke særlig godt. Men faktisk ved vi godt, hvad der er galt! Vi har glemt at medregne *drivhuseffekten*.

Ud over ilt,  $\text{O}_2$ , og kvælstof,  $\text{N}_2$ , består atmosfæren af store dele vanddamp samt små mængder af andre stoffer som f.eks. kuldioxid,  $\text{CO}_2$ , og methan,  $\text{CH}_4$ . Vanddamp, kuldioxid og methan kaldes *drivhusgasser*.

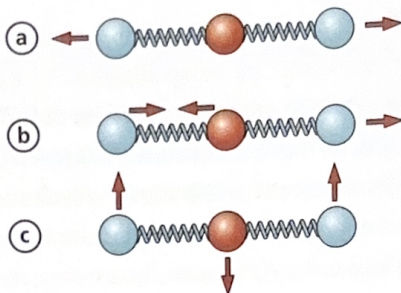
Strålingen fra drivhusgasserne "genudsendes", men kun halvdelen af strålingen kommer ud i verdensrummet. Den anden halvdel sendes tilbage mod jordoverfladen, som altså modtager endnu mere stråling. Overfladetemperaturen på  $-18^\circ\text{C}$  er derfor ikke jordoverfladens temperatur, men en temperatur et stykke oppe i atmosfæren. Jordoverfladens temperatur er cirka  $33^\circ\text{C}$  højere, og drivhusgasserne virker som en dyne for Jorden – en naturlig dyne vi helst ikke ville være foruden.

 Overvej, hvad der vil ske med temperaturen, hvis Jordens samlede albedo falder.

**Fig. 1.36** Figuren viser intensiteten af den varmestråling, som Jorden udsender fra overfladen og fra atmosfæren. Varmestrålingen er en konsekvens af det absorberede sollys og drivhuseffekten.



**Fig. 1.37** De tre grundlæggende vibrationsmåder for et gasmolekyle med tre atomer som eksempelvis  $\text{CO}_2$ .



### Hvorfor er $\text{CO}_2$ en drivhusgas?

Eftersom der findes masser af kvælstof,  $\text{N}_2$ , og ilt,  $\text{O}_2$ , i atmosfæren, kan det undre, at disse ikke fungerer som drivhusgasser, men at det er den forholdsvis lave koncentration af især kuldioxid,  $\text{CO}_2$ , vi bekymrer os om. En fuld forståelse kræver en omfattende indsigt i kvantemekanik, men kort fortalt hænger det sammen med antallet af atomer i molekylet.

$\text{N}_2$  og  $\text{O}_2$  består begge af to atomer holdt sammen af en binding. Derimod er der tre atomer i  $\text{CO}_2$ -molekylet. Som illustreret på figur 1.37 kan disse atomer bevæge sig i forhold til hinanden på forskellige måder.  $\text{N}_2$  og  $\text{O}_2$  kan også bevæge sig som under (a), men ikke som vist på (b) og (c), da disse bevægelser kræver 3 atomer.

Når stråling absorberes af et molekyle, sker det ved, at strålingsenergi bliver omdannet til kinetisk energi i molekylet. Den type varmestråling, som drivhusgasserne absorberer, har netop den egenskab, at energien kan overføres til bevægelserne (b) og (c), men ikke til (a). Derfor kan hverken  $\text{N}_2$  eller  $\text{O}_2$  absorbere varmestrålingen og dermed ikke fungere som drivhusgasser.



Overvej, hvorfor vanddamp er en drivhusgas.



#### Poulstrup sø

Syd for Aalborg ligger Poulstrup Sø. Søen er dannet efter sidst istid, fordi en stor isblok blev efterladt her, da isen trak sig tilbage. Isen smeltede langsomt og dannede søen, som har et overfladeareal på  $6.000 \text{ m}^2$  og en gennemsnitlig vanddybde på  $2,0 \text{ m}$ .

a) Hvor stor er massen af vandet i søen?

En flot solrig sommerdag skinner Solen på søen i hele 12 timer. Vandet modtager i dette tidsrum energi fra Solen med en gennemsnitlig effekt på  $700 \text{ W pr. m}^2$ .

- b) Hvor meget energi modtager søoverfladen  $\text{pr. m}^2$  i løbet af denne sommerdag?
- c) Hvor meget energi modtager så vandet i hele søen i løbet af denne sommerdag?
- d) Beregn, hvor meget vandet varmes op af Solen, hvis vi antager, at al vandet varmes lige meget op.
- e) I virkeligheden er temperaturstigningen lavere. Prøv, om I kan finde årsager til dette.