SUMMER IN THE CITY



WEERSVERSCHIJNSELEN EN LUCHTKWALITEIT IN DE STAD

NLT MODULE VOOR HET VWO

WAGENINGEN UNIVERSITY
WAGENINGEN UR

De module “Summer in the city – weersverschijnselen en luchtkwaliteit in de stad” is bestemd voor de lessen Natuur, Leven en Technologie (NLT). De module is op 16 september 2010 gecertificeerd door de Stuurgroep NLT voor gebruik op het vwo in domein C (Aarde). Het certificeringsnummer van de module is X213-063-VC.
De originele gecertificeerde module is in pdf-formaat downloadbaar via http://www.betavak-nlt.nl . Op deze website staat uitgelegd welke aanpassingen docenten aan de module mogen maken, voor gebruik in de les, zonder daardoor de certificering teniet te doen.

Auteurs:
Daniel Kunne- Wageningen University
Rogier Floors- Wageningen University
Liesbeth Meijer- Docente Natuurkunde Gymnasium Apeldoorn
Hendrik Jan Wolters- Docent Aardrijkskunde Gymnasium Apeldoorn

Hoofdredacteur:
Jeroen Sijbers- NLT steunpunt Wageningen University

Wetenschappelijk Expert:
Arnold Moene- Leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit van Wageningen University

Met medewerking van:
Janneke Elberse- Wageningen University
Simon Hageman- Wageningen University
Guido Linssen- NLT steunpunt Wageningen University
Mia Drummen- Taalkundig adviseur
Andries de Vries- Wageningen University
Lisette Klok -TNO Bouw en Ondergrond afdeling Urbane Leefomgeving
Theo Brandsma- KNMI

Aangepaste versies van deze module mogen alleen verspreid worden, indien in dit colofon vermeld wordt dat het een aangepaste versie betreft, onder vermelding van de naam van de auteur van de wijzigingen.

De digitale bronnen die leerlingen nodig hebben bij deze module zijn beschikbaar via het vaklokaal NLT:
http://www.vaklokaal-nlt.nl/
© 2010. Versie 1.0
Het auteursrecht op de module berust bij Wageningen University. Wageningen University is derhalve de rechthebbende zoals bedoeld in de hieronder vermelde creative commons licentie.
De auteurs hebben bij de ontwikkeling van de module gebruik gemaakt van materiaal van derden en daarvoor toestemming verkregen. Bij het achterhalen en voldoen van de rechten op teksten, illustraties, enz. is de grootst mogelijke zorgvuldigheid betracht. Mochten er desondanks personen of instanties zijn die rechten menen te kunnen doen gelden op tekstgedeeltes, illustraties, enz. van een module, dan worden zij verzocht zich in verbinding te stellen met Wageningen University.
De module is met zorg samengesteld en getest. Wageningen University, Landelijk Ontwikkelpunt NLT, Stuurgroep NLT, SLO en auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de module. Ook aanvaarden Wageningen University , Landelijk Ontwikkelpunt NLT, Stuurgroep NLT, SLO en auteurs geen enkele aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit (het gebruik van) deze module.

Voor deze module geldt een
Creative Commons Naamsvermelding-Niet-commercieel-Gelijk delen 3.0 Nederland Licentie http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/nl

Inhoudsopgave

1 Inleiding 5
1.1 In deze module 5
1.2 Een zinderende wereldreis 7

2 Deel I Straling & Energie 10
2.1 Landgebruik 10
2.2 Metingen 11
2.3 Stralingsbalans 11
2.3.1 Straling van de zon 11
2.3.2 Emissie en absorptie van straling. 12
2.3.3 Zwarte stralers 13
2.3.4 Zonnestraling in de atmosfeer 16
2.3.5 Kortgolvige stralingsbalans 18
2.3.6 Langgolvige stralingsbalans 20
2.3.7 Stralingsbalans aan het oppervlak 21
2.4 Warmtetransport en de energiebalans 23
2.4.1 Energiebalans van het aardoppervlak 23
2.4.2 Stofeigenschappen 24
2.4.3 Soortelijke warmte 24
2.4.4 Warmtegeleiding 25
2.4.5 Verdampingswarmte 26
2.4.6 Voelbare warmtestroom (H) 26
2.4.7 Latente warmtestroom (L_vE) 26
2.4.8 Bodem warmtestroom (G) 27
2.4.9 Bowen-verhouding 28
2.4.10 Uiteindelijke energiebalans 29
Practicum 1 32
Intermezzo, interview met Gerrit Hiemstra 34

3 Deel II Klimaat in de stad 36
3.1 Temperatuur in de stad 36
3.2 Straling en energie in de stad 38
3.2.1 Kortgolvige straling 38
3.2.2 Langgolvige straling 40
3.2.3 De energiebalans 40
3.3 Windsnelheid en wrijving 42
3.4 Relatieve luchtvochtigheid 45
3.5 Gevoelstemperatuur 47
3.5.1 Koudestress 47
3.5.2 Hittestress 48
Practicum 2 51
Computerpracticum 1 55
Intermezzo, interview met Bart van den Hurk 63

4 Deel III Luchtkwaliteit in de stad 65
4.1 Toestand van de atmosfeer 65
4.2 Effecten van natuurlijke stoffen in de atmosfeer 67
4.2.1 Het broeikaseffect 67
4.2.2 Stratosferisch ozon 67
4.3 Effecten veroorzaakt door de mens 70
4.3.1 Emissies door de mens 70
4.3.2 Afbraak van stratosferisch ozon door CFK's 70

4.3.3 Vorming van troposferisch ozon 71
4.3.4 Fijnstof problematiek 71
4.3.5 Smogvorming 72
4.4 Transport en verblijftijd 74
4.4.1 Transport in de atmosfeer 74
4.4.2 Verblijftijd van stoffen in de atmosfeer 75
4.5 Slot 76
Computerpracticum 2 77

5 Slotopdracht: de ideale stad 80
Intermezzo, interview met Sanda Lenzholzer 85

6 Begrippenlijst 87

1 Inleiding

1.1 In deze module

“Hot town, summer in the city” zijn de openingsregels van een Amerikaans lied dat in 1966 een hit was. In het tweede couplet wordt gezongen “Cool town, evening in the city”. Maar wordt het ’s avonds inderdaad wel zo koel in de stad? Jullie gaan het onderzoeken in deze module.

Je gaat op wereldreis langs vier grote steden: Rotterdam, Singapore, Santiago en Stockholm. In iedere stad leer je een ander aspect van het stadsklimaat kennen. En je gaat na hoe het komt dat het stadsklimaat in deze vier steden zo verschillend is. Je maakt kennis met belangrijke basisbegrippen uit de meteorologie zoals stralings- en energiebalans, relatieve luchtvochtigheid en gevoelstemperatuur. Ook problemen met de luchtkwaliteit in de stad, waaronder smogvorming, komen aan de orde. Meteorologische fenomenen kun je ook in het klaslokaal onderzoeken: dat zul je zien in twee practica. Verder ga je in computeropdrachten het effect van de stad op klimaatverandering bekijken en ga je de luchtkwaliteit bij een schoorsteen analyseren. Aan het eind van de module zet je in de slotopdracht de kennis die je hebt opgedaan over het stadsklimaat om in concrete maatregelen voor een aangename ‘summer in the city’. Naast de theorie en de practica zijn er als intermezzo’s interviews opgenomen met mensen die dagelijks te maken hebben met de lesstof uit deze module. Op deze manier krijg je een idee van wat je hier later mee zou kunnen doen.

Vereiste voorkennis:
Scheikunde: schrijfwijze elementen en rekenen met concentraties
Natuurkunde: basiskennis van straling, energie en optica.
Wiskunde: basiskennis van logaritmische en exponentiële functies.

Indeling
Deze module bestaat uit drie delen met theorie, opdrachten en practica. Je docent zal de tijdsindeling en de eventuele groepsindeling voor de opdrachten en practica aangeven. De module wordt afgesloten met een schriftelijke toets.

Leerdoelen
Deel I

- Je kunt uitleggen wat het begrip Urban Heat Island betekent;
- Je kent de elementen in de stralingsbalans en in de energiebalans;
- Je weet waarvan de elementen in deze balansen afhankelijk zijn;
- Je kunt uitleggen wat voor invloed het landgebruik heeft op de stralings- en energiebalans.

Deel II

- Je kent de begrippen microklimaat en gevoelstemperatuur en de 4 factoren die hiervoor verantwoordelijk zijn;
- Je kunt uitleggen wat de invloed van de stadsstructuur op de stralings- en energiebalans is;
- Je kunt uitleggen wat het windprofiel is en welke eigenschappen van het aardoppervlak hiervoor belangrijk zijn;
- Je kunt rekenen met de hoeveelheid vocht in de lucht;
- Je weet welke factoren belangrijk zijn voor een hoge en voor een lage gevoelstemperatuur.

Deel III

- Je kent de verticale structuur van de atmosfeer;
- Je kunt uitleggen wat het (natuurlijk) broeikaseffect inhoudt
- Je kunt het belang van de ozonlaag uitleggen

- Je kunt uitleggen hoe fijnstof en ozon in de stad ontstaan en welke invloed ze hebben op de mens;
- Je kunt van de twee soorten smog beschrijven wat voor eigenschappen ze hebben en hoe ze ontstaan;
- Je kent de invloed van atmosferische (in)stabiliteit op luchtvervuiling.

1.2 Een zinderende wereldreis

Hoi allemaal,
Goed om jullie te zien! Mijn naam is Peter Haarschop, geboren in Rotterdam, vlakbij de Euromast. Ik heb het er altijd erg naar mijn zin gehad. Een schitterende stad met een bruisend stadsleven en alle voorzieningen die je maar wenst. Tegenwoordig studeer ik meteorologie. Ik zal jullie in deze module met veel plezier meenemen naar mijn stad Rotterdam.



We beginnen onze wereldreis dicht bij huis, in Rotterdam. Rotterdam is in de afgelopen eeuw explosief gegroeid. De werkgelegenheid in de haven en in de overige industrie trok veel mensen naar deze stad. Voor al deze mensen moesten heel veel woningen en winkels, cafeetjes, restaurants en andere uitgaansgelegenheden gebouwd worden. Momenteel is Rotterdam een moderne stad waar meer dan 600.000 mensen wonen.

Peter Haarschop studeert aan de universiteit van Wageningen. Hij hoorde dat er een project over het klimaat in de stad werd opgezet in zijn geboorteplaats Rotterdam. Enthousiast meldde hij zich aan om mee te helpen. Een paar maanden later, op een mooie zomerdag, reed hij op een fiets kriskras door Rotterdam. Op die fiets zaten allerlei meetinstrumenten, zoals een thermometer, een stralingsmeter, een windsnelheidsmeter en een luchtvochtigheidsmeter. Alle gemeten gegevens werden achteraf geanalyseerd. Wat bleek uit dit onderzoek? In het centrum van Rotterdam was het een stuk warmer dan aan de rand van de stad.
Dit verschijnsel, waarbij de stad warmer wordt dan het platteland eromheen noemen we het **Urban Heat Island-effect**. Het woord zegt het al: de stad is als een eiland, een hitte-eiland, waar het warmer is dan in de omgeving.

Zo'n Urban Heat Island kan problematisch worden, als de temperaturen daardoor te hoog oplopen: dit kan tot hogere sterfte leiden, met name onder ouderen. Zo zijn er in de zomer van 2006 in Nederland zeker 1000 mensen overleden aan de gevolgen van een hittegolf (www.nrc.nl).

Op andere plaatsen op de wereld, waar de temperaturen vaker hoog zijn dan in Rotterdam, spreekt men dan ook met recht van een Urban Heat Island probleem. Bijvoorbeeld in Singapore, waar Peters vriend Siao Lee woont. Hij studeert environmental engineering aan de technische universiteit van Singapore.



Figuur 1.1 Het centrum van Singapore.

Selamatsiang!

Singapore is een fantastische stad om in te wonen. Downtown heb je fantastische kroegen en disco's. Het hectische leven in zo'n grote stad spreekt me erg aan. Om te ontspannen en af te koelen ga ik soms naar de boulevard of het park om te genieten van het water en de natuur. Daar is het altijd een stuk koeler dan in het zakencentrum waar ik woon.
Tot snel! Siao



Singapore is het kleinste land van Zuid-Oost-Azië, maar er wonen wel bijna 5 miljoen mensen. Doordat er zo weinig ruimte is voor al deze mensen, is Singapore 'de lucht in gegaan'. Enorme wolkenkrabbers bepalen het straatbeeld. Het is een rijke stad, die veel jonge mensen trekt, op zoek naar succes en het grote geld. Maar ..... het kan er wel verschrikkelijk warm zijn!

Hitte is niet het enige probleem van dichtbevolkte steden. Ook **smog** is in veel grote steden een ernstig probleem: donkere wolken van vervuiling die in de stad hangen en die een verstikkend effect hebben op de inwoners. Bijvoorbeeld in Santiago, de hoofdstad van het Zuid-Amerikaanse land Chili. Santiago is een metropool aan de voet van het Andesgebergte. Er wonen ongeveer 7 miljoen mensen. Maria Valdez woont er al haar hele leven en ze is absoluut niet van plan om er ooit definitief weg te gaan, hoe vervelend de smog ook is. Toen ze voor haar stage in Wageningen was, waar ze Peter ontmoette, verlangde ze al snel terug naar haar geboortestad.



Hola!
Hou je van de Zuid-Amerikaanse cultuur, zang en dans midden op straat? Of hou je meer van bergbeklimmen in het Andesgebergte? Het kan allemaal hier en daarom vind ik Santiago zo'n leuke stad. We hebben hier alleen heel vaak problemen met de luchtkwaliteit, dus vergeet je mondkapje niet!
Adios, xx
Maria

Rotterdam, Singapore, Santiago: drie grote steden waar problemen met het stadsklimaat voorkomen. De meeste bewoners zijn blij met hun stad, ook al hebben ze last van de hitte en de smog. Hebben álle grote steden die problemen? Laten we eens kijken naar een stad in het noorden: Stockholm, de hoofdstad van Zweden. Daar woont Anna Pærson, de Zweedse vriendin van Peter.



God dag!
Ik woon in Stockholm en ik heb Peter leren kennen toen hij een half jaar vakken heeft gedaan op onze universiteit. Stockholm heeft een mooie oude binnenstad waar je heerlijk door de straten kunt slenteren en álle winkeltjes af kunt gaan, maar we hebben ook veel parken en water. Als jullie langskomen, gaan we zeker een keertje door de stad varen!

Kus! Anna

Stockholm is de grootste stad van Zweden. Er wonen bijna 2 miljoen mensen. De stad is gebouwd op veertien eilanden, die via bruggen met elkaar verbonden zijn. Er is dus veel water midden in de stad en men kan zich in de stad per boot verplaatsen. Stockholm wordt daarom wel het 'Venetië van het Noorden' genoemd. In Stockholm wordt het stadsklimaat veel minder beïnvloed door het Urban Heat Island-effect en er is veel minder smogvorming. Komt dit door het vele water in de stad? Of is er een andere reden?

We beginnen, in deel I, bij Peter in Rotterdam en kijken naar het verschil in temperatuur tussen stad en platteland. Waar komt dit verschil vandaan? De locatie op aarde, de tijd van het jaar en het landgebruik blijken essentiële factoren te zijn bij het ontstaan van het temperatuurverschil tussen stad en platteland. We zullen zien dat dit te maken heeft met de stralingsbalans en de energiebalans.

Daarna pakken we het vliegtuig naar Azië en logeren we een tijdje bij Siao in Singapore. Het stadsklimaat (ook wel microklimaat genoemd) van Singapore wordt bepaald door tal van factoren, bijvoorbeeld wind, straling, temperatuur en luchtvochtigheid. Deze factoren hebben ook invloed op de gevoelstemperatuur. Hoe het klimaat van de stad eruitziet en hoe we de gevoelstemperatuur kunnen bepalen zullen we bekijken in deel II.

In deel III gaan we naar de andere kant van de wereld, naar Chili. We gaan op bezoek bij Maria in Santiago. Haar opa heeft veel last van zijn longen en Maria zelf kan soms ook moeilijk ademen. De smog die vaak boven Santiago hangt is een groot probleem en maakt het leven in deze mooie stad soms erg lastig. Wat is smog precies en hoe ontstaat het? We zullen bekijken welke stoffen van invloed zijn op de luchtkwaliteit in Santiago en hoe ze zich gedragen in de lucht.

Uiteindelijk komen we weer terug in Europa. We eindigen onze wereldreis bij Anna in Stockholm. Hier zullen we zien dat een grote stad niet per se problemen hoeft te hebben met het stadsklimaat. Anna hoorde via Peter dat de overheid in Nederland de steden wil aanpassen aan de verwachte warme zomers van het klimaat rond 2050. Anna wil graag laten zien dat Stockholm de ideale stad is! Ze daagt jullie uit om zelf aan de slag te gaan en zelf met oplossingen te komen. Dit ga je doen door middel van een debat tussen vier groepen uit de maatschappij, met als uitkomst een plan voor de ideale 'summer in the city'.

Opdracht 1.

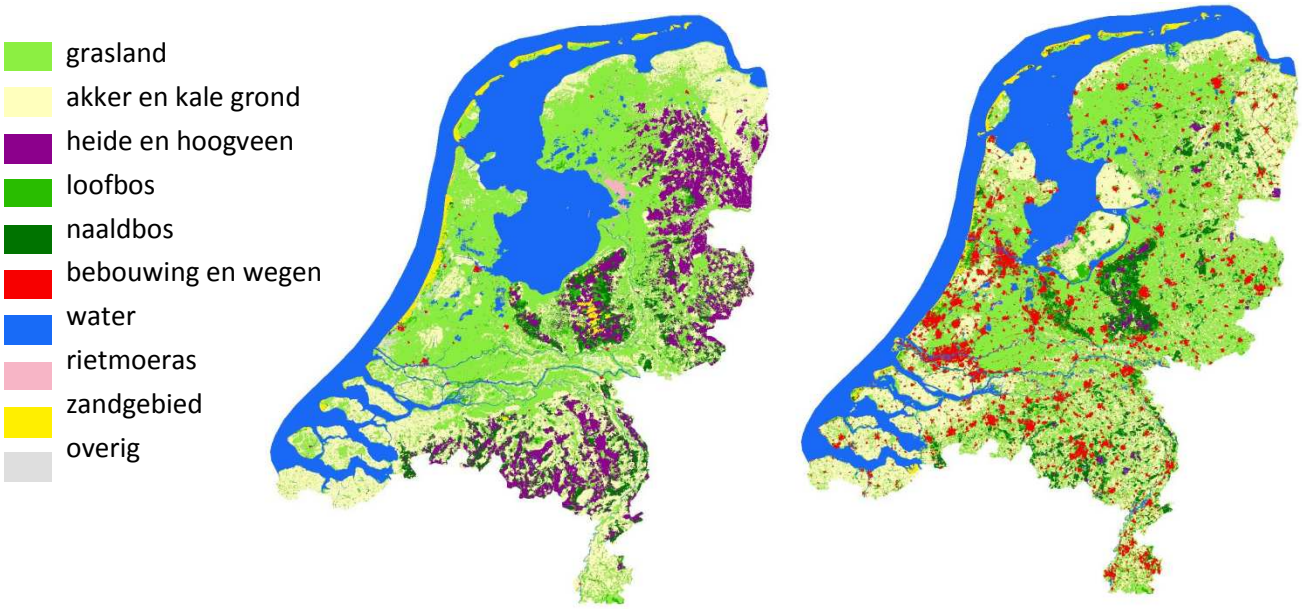
Zoek van alle vier de steden op waar ze op de wereld liggen (hun breedte- en lengtegraad), en wat voor klimaat er heerst. Probeer er ook achter te komen hoeveel neerslag er valt in deze steden en wat de gemiddelde dagtemperaturen in de zomer en in de winter zijn.

2 Deel I Straling & Energie

In dit eerste deel van de module gaan we op bezoek bij Peter. Zoals gezegd, is hij in het kader van zijn studie in Wageningen betrokken geraakt bij een project dat zich richt op het Urban Heat Island-effect in Rotterdam, zijn geboorteplaats.
We zullen zien dat het verschil in **landgebruik** tussen stad en platteland de directe oorzaak is van het ontstaan van het Urban Heat Island-effect. Hoe komt dit? Verschillen in ondergrond, vegetatie en bebouwing hebben invloed op de **stralingsbalans** en de **energiebalans**. Het gevolg is dat de temperatuur in de stad hoger is dan in het gebied eromheen: Urban Heat Island. En waarom is dit effect in de ene stad veel sterker dan in de andere? We zullen zien dat dit te maken heeft met de ligging van de betreffende steden op aarde. Ook dat is te verklaren door de stralings- en energiebalans te bestuderen.

2.1 Landgebruik

Een belangrijk verschil tussen stad en platteland is het **landgebruik**. Met landgebruik bedoelen we de functie die een stuk land heeft: denk aan landbouwgrond (er worden bijv. aardappels op verbouwd) of natuurgebied (bijv. een bos). Ook het stedelijk gebied is een aparte categorie van landgebruik. Een stuk land hoeft niet voor altijd dezelfde functie te hebben. Zo is bijvoorbeeld de omvang van het stedelijk gebied in Nederland flink toegenomen naarmate de bevolking groeide. Dit kunnen we goed zien in figuur 2.1, waar het landgebruik in Nederland in 1900 en in 2000 is weergegeven.



Figuur 2.1 Landgebruikkaart van Nederland. Links: 1900; rechts: 2000

Opdracht 2.

Vergelijk de kaartjes in figuur 2.1. Welke vorm van landgebruik is het meest toegenomen tussen 1900 en 2000? En welke vorm(en) van landgebruik zijn het meest afgenomen?

Veel van de natuurlijke ondergrond is in de stad veranderd in beton, asfalt en tegels. Een andere ondergrond betekent andere eigenschappen. Zo is het je vast wel eens opgevallen dat het asfalt van de weg in de zomer een stuk heter wordt dan het gras in het weiland ernaast. Regenwater dat op de grond valt, verdwijnt minder vlot de bodem in op een verharde ondergrond dan op een omgeploegde akker. Stel dat we heel Nederland zouden bedekken met huizen, wegen en parkeerplaatsen, hoeveel warmer zou het dan op een mooie zonnige dag worden? En waar moet het regenwater dan naar toe?

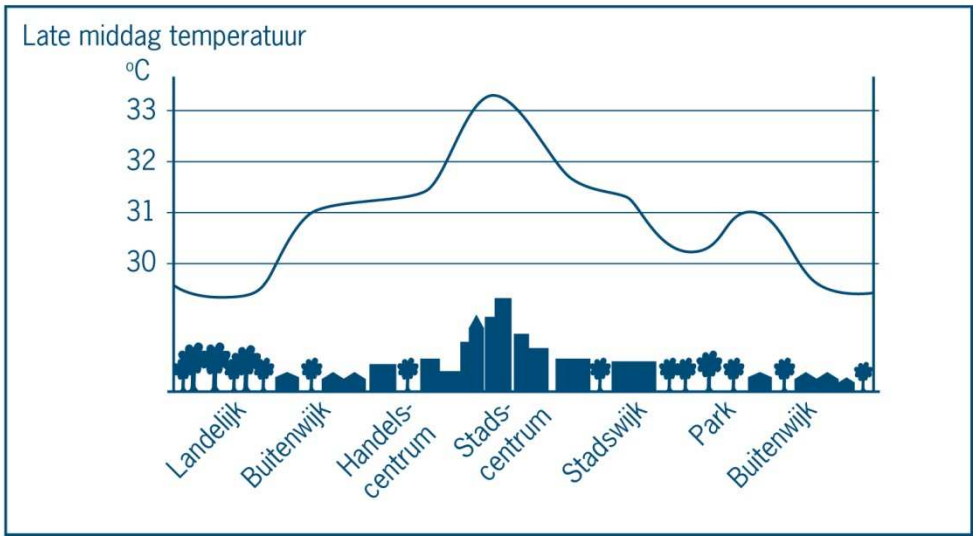
2.2 Metingen

Over de hele wereld doen meteorologische instituten metingen. Voor deze metingen hebben ze speciaal ingerichte meetvelden, die buiten de stad liggen. Ook zijn er weeramateurs die met een klein meetstation nauwkeurig de temperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid bijhouden. Voor metingen binnen de stad laten weeronderzoekers mensen via een bepaalde route door de stad fietsen op een bakfiets met allerlei meetapparatuur erop, zoals ook Peter heeft gedaan.



Figuur 2.2 Meetstation van een weeramateur in de stad (KNMI)

Uit al die waarnemingen is gebleken dat het in steden een stuk warmer is dan in het buitengebied. Tijdens rustig en windstil weer kan ’s nachts de temperatuur in de stad tot wel 5° C hoger zijn dan daarbuiten. Overdag is het verschil minder groot, maar kan het in de stad toch nog een paar graden warmer zijn. Ook binnen de stad zijn er verschillen. Zo is het in het stadscentrum het warmst en wordt het koeler naarmate je in de buitenwijken komt (waar vaak meer parken zijn en de huizen verder van elkaar staan). Figuur 2.3 is een schematische weergave van het temperatuurverloop dat je meet wanneer je van het platteland door een stad heen gaat en aan de andere kant weer op het platteland terechtkomt.



Figuur 2.3 Voorbeeld van temperatuurverloop in een stad

2.3 Stralingsbalans

We hebben nu kennisgemaakt met het Urban Heat Island-effect. We gaan nu op zoek naar een verklaring voor dit verschijnsel. In dat kader onderzoeken we de stralingsbalans op lokaal niveau: hoe zit deze stralingsbalans in elkaar en welke factoren spelen een rol bij deze balans?
We beginnen met straling in het algemeen. De zon zendt straling uit, waarvan een gedeelte het aardoppervlak bereikt. Maar ook de aarde en de atmosfeer zenden straling uit. Wat gebeurt er met de uitgezonden straling? En waarom is die zo belangrijk voor ons?

2.3.1 Straling van de zon

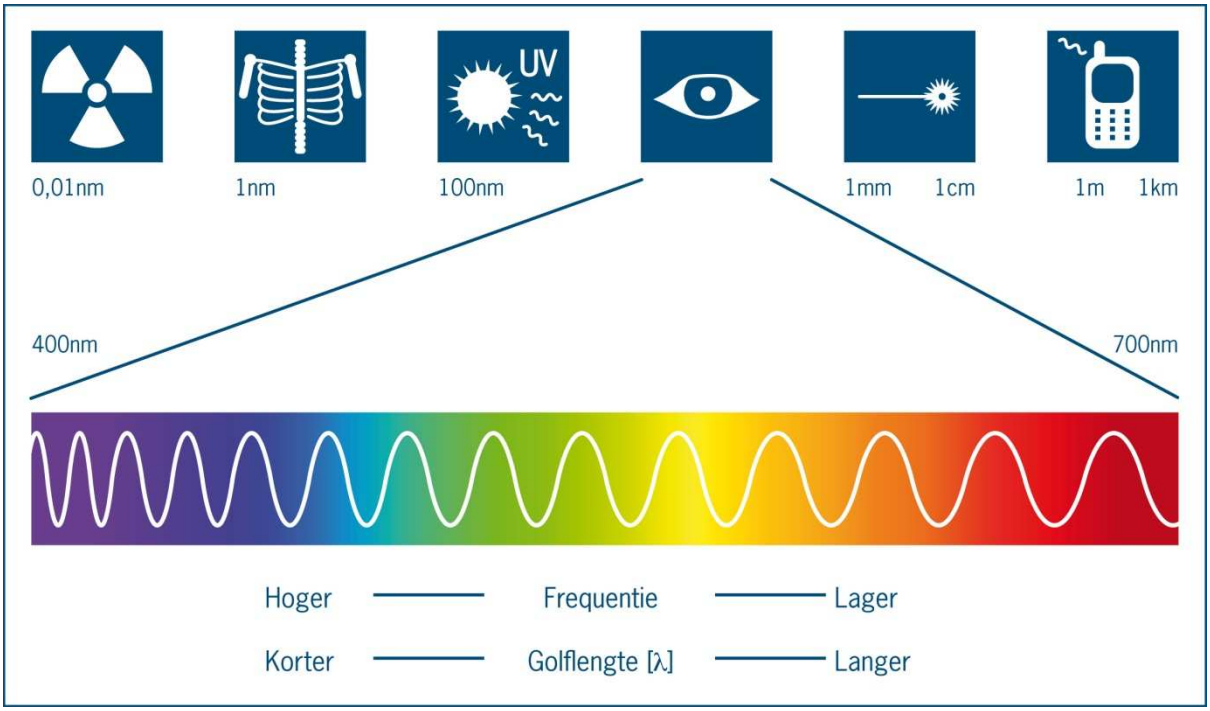
De zon zendt drie soorten straling uit die invloed hebben op klimaat en weer:

- **Zichtbaar licht:** de regenboog geeft aan uit welke kleuren het zonlicht bestaat.

- **Infraroodstraling (IR)**: dit is warmtestraling. Onze ogen zijn niet gevoelig voor deze vorm van straling maar we hebben een ander zintuig waarmee we deze straling kunnen voelen.
- **Ultravioletstraling (UV):** dit is straling waarvoor we geen zintuigen hebben. De straling richt schade aan. Het menselijk lichaam gebruikt pigment om de straling op te vangen en onschadelijk te maken. Daarom worden we bruin als we in de zon zitten.

Naast deze vormen van straling zendt de zon nog andere vormen van straling uit maar die spelen in deze module geen rol van betekenis. Al deze vormen van straling maken deel uit van het elektromagnetische spectrum waarvan de eigenschappen in de 19^{e} eeuw zijn ontrafeld. Elektromagnetische straling zoals licht, IR en UV planten zich met grote snelheid (c = 3,0*10^{5}km/s) in een golvende beweging voort. De golven transporteren energie. Het is deze stralingsenergie die de verschillende weersverschijnselen veroorzaakt waarover deze module gaat.

In onderstaande figuur is het elektromagnetische spectrum gegeven.



Figuur 2.4 Het spectrum van zichtbaar licht is een onderdeel van het totale elektromagnetische spectrum.

2.3.2 Emissie en absorptie van straling.

De zon is dus een bron van stralingsenergie. Maar dat geldt voor veel meer objecten. Denk maar eens aan een zomerse situatie in de stad als de zon is ondergegaan en je naast een muur staat. De muur straalt warmte uit die je kunt voelen. Hetzelfde geldt voor het asfalt. Er is hier sprake van emissie. Het gaat hier om een heel algemeen verschijnsel. Bij elk voorwerp met een temperatuur hoger dan 0 Kelvin vindt stralingsemissie plaats. Dat de voorwerpen om je heen door het uitzenden van stralingsenergie naar de omgeving niet afkoelen komt omdat uit de omgeving ook weer stralingsenergie naar de voorwerpen gaat.

Als straling op een object valt kunnen er drie dingen gebeuren:

1. Een deel van de straling gaat door het object heen (**transmissie**). Deze fractie wordt aangegeven met t (als getal tussen 0 en 1).
2. Een deel van de straling wordt weerkaatst door het object (**reflectie**). Deze fractie wordt aangegeven met r (als getal tussen 0 en 1).

3. Een deel van de straling wordt opgenomen door het object (**absorptie**). Deze fractie wordt aangegeven met a (als getal tussen 0 en 1). De geabsorbeerde straling kan eventueel daarna weer worden uitgezonden (volgens de stralingswetten van Wien en Stefan-Boltzmann).

De hoeveelheid straling die binnenkomt, wordt op 1 gesteld. Dit betekent dat de som van t, r en a ook altijd gelijk aan één moet zijn. Hoe de verhoudingen zijn tussen de drie fracties is afhankelijk van de eigenschappen van het object waarop de straling valt.

1 = t + r + a

Als de absorptie van stralingsenergie even groot is als de emissie van stralingsenergie, is er sprake van een **stralingsevenwicht**. De temperatuur van het voorwerp blijft dan gelijk.

2.3.3 Zwarte stralers

Een wit voorwerp is wit omdat het alle golflengtes van opvallend wit licht goed reflecteert. Een voorwerp dat geen enkele kleur goed reflecteert ziet er dan ook zwart uit. Een voorwerp dat alle opvallende straling absorbeert, wordt een **zwart lichaam** of een **zwarte straler** genoemd.

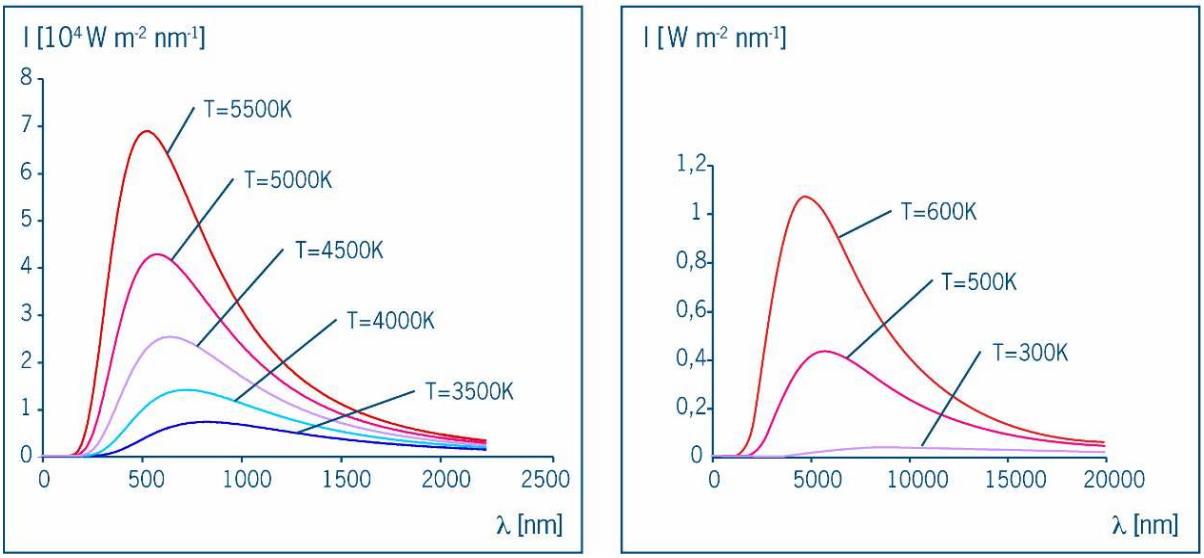
Het is zelfs zo dat er geen betere stralers zijn dan zwarte stralers, omdat alle geabsorbeerde stralingsenergie weer moet worden afgestaan via stralingsemissie vanwege het stralingsevenwicht. Een zwarte straler is een ideaaltype. In werkelijkheid zal een lichaam alleen bij benadering op een zwarte straler kunnen lijken. De zon gedraagt zich in hoge mate als een zwarte straler. De straling die de zon uitzendt en die wordt uitgezonden door de buitenste schil van de zon lijkt sterk op die van een zwarte straler van ongeveer 6000 K.

De hoeveelheid straling die een zwarte straler per seconde uitzendt (P in J/s), wordt berekend met de stralingswet van Stefan-Boltzman.

Stralingswet van Stefan-Boltzmann: $\mathbf{P = A * \sigma * T^4}$ **(1)**

met P : vermogen [W]
A: oppervlak van het stralende lichaam [m^2].
σ: constante van Stephan Boltzman: $5{,}67 * 10^{-8}$ [$W / (m^2 * K^4)$]
T: Temperatuur [K]

De straling die een object uitzendt is verdeeld over het gehele spectrum, maar de hoeveelheid straling van één bepaalde golflengte hangt af van de temperatuur van de straler. De wet van Planck geeft aan op welke manier een zwarte straler de uitgezonden energie verdeelt over verschillende golflengtes en hoe dit afhangt van de temperatuur (in Kelvin). Door deze energieverdeling ontstaan de **Planckkrommen**. Enkele Planckkrommen zijn weergegeven in figuur 2.5.



Figuur 2.5 Planckkrommen van verschillende temperaturen.

De Planckkrommen laten ook zien bij welke golflengte de maximale intensiteit optreedt (λ_{max}). Een object met een temperatuur van 4000 K zendt vooral licht uit met een golflengte van 700 nm (zie figuur 2.5). Dit komt overeen met rood licht.

Hoe warmer het object, hoe korter de golflengte met de maximale intensiteit. Ook neemt de intensiteit van alle golflengtes toe als het object een hogere temperatuur heeft. Wilhelm Wien heeft aangetoond dat de golflengte waarbij de straling het sterkst is, λ_{max} , omgekeerd evenredig is met de temperatuur van de zwarte straler.

Verschuivingwet van Wien: $\mathbf{\lambda_{max} * T = k_w}$ **(2)**

met λ_{max} : de golflengte met maximale intensiteit [m]
T: temperatuur van de zwarte straler [K]
kw: de constante van Wien: $2{,}90 * 10^{-3}$ [m * K]

Als de temperatuur van een object bekend is, kan door middel van de verschuivingswet van Wien worden berekend bij welke golflengte de meeste straling wordt uitgezonden. Als deze golflengte lang is (rond λ_{max} = 10.000 nm) heet deze **langgolvige straling**. De straling bevat in dit geval weinig energie. De aarde is een voorbeeld van een object dat langgolvige straling uitzendt.

Als deze golflengte laag is (rond λ_{max} = 500 nm) heet deze **kortgolvige straling**. Deze kortgolvige straling bevat veel energie. De zon is een voorbeeld van een object dat kortgolvige straling uitzendt. De grens tussen langgolvige en kortgolvige straling ligt bij een golflengte van 3000 nm. De scheiding tussen kort- en langgolvige straling is gebaseerd op het verschil tussen de zon als stralingsbron en de aarde als stralingsbron.

Opdracht 3.

Geef een schatting van de t (transmissie), r (reflectie) en a (absorptie) in onderstaande situaties.

Situatie	t	r	a
Zonlicht valt op een grasveld Zonlicht valt op een ruit Rood licht valt op een rood dak Groen licht valt op een blauwe auto Wit licht valt op een volmaakt zwart lichaam			

Opdracht 4.

Het licht van de zon bestaat uit alle kleuren van de regenboog. Welke kleuren zijn dit? Waarom noemen we de zon dan toch een zwarte straler?

Opdracht 5.

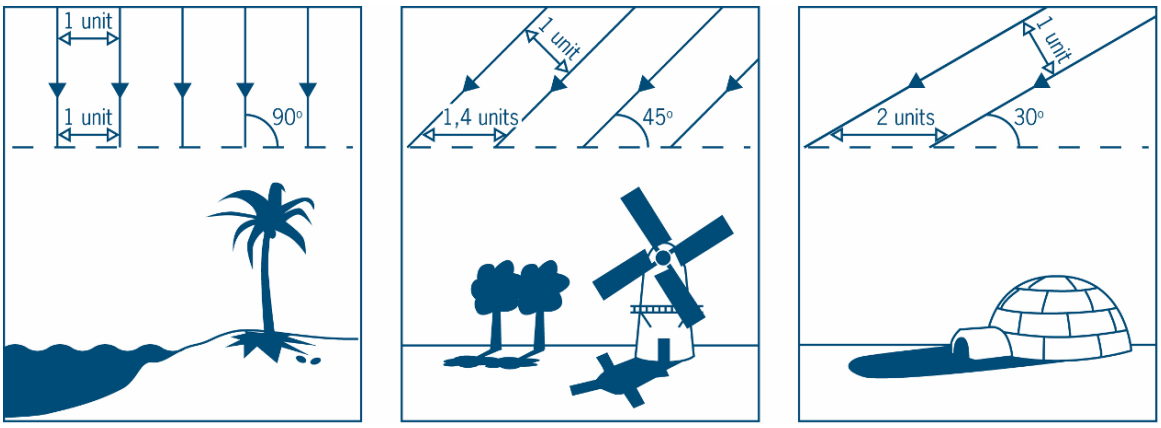
a. Bereken voor zowel de zon als de aarde het stralingsvermogen via de wet van Stefan-Boltzmann. Neem aan dat de gemiddelde temperatuur van de zon 5796K is, en dat die van de aarde gemiddeld 288K is.

b. Bepaal met behulp van de Planckkrommen in welke golflengte de zon en de aarde het meeste licht uitzenden. Ga na of dit klopt met de wet van Wien.

c. Laat via een berekening zien hoeveel energie van de zon de gehele aarde bereikt (=bovenkant van de atmosfeer, bereken ook de zonneconstante!). Denk er hierbij aan dat de energie die de zon aanstraalt over een steeds groter boloppervlak wordt verdeeld.

2.3.4 Zonnestraling in de atmosfeer

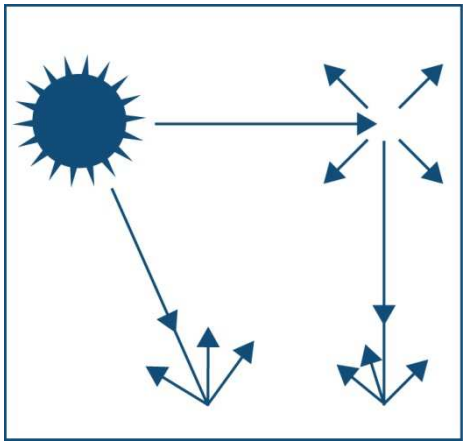
De intensiteit van de instraling van de zon aan de bovenkant van de atmosfeer wordt de **zonneconstante** genoemd. De hoeveelheid straling die daadwerkelijk het aardoppervlak bereikt, is afhankelijk van de toestand van de atmosfeer en de **zonshoogte**, ofwel de hoek die de zonnestralen met het aardoppervlak maken. De zonshoogte is afhankelijk van het tijdstip van de dag, de dag van het jaar en de locatie op aarde. Wat betreft de locatie op aarde wordt de zonshoogte bepaald door de breedtegraad. Rotterdam, Stockholm, Singapore en Santiago liggen op verschillende breedtegraden en de hoeveelheid straling die ze ontvangen is daardoor verschillend.



Figuur 2.6 De hoek die de zonnestraling met het aardoppervlak maakt verschilt per breedtegraad

Wanneer de zon recht boven Singapore staat, waardoor de zonnestralen daar invallen onder een hoek van 90^0, maken de zonnestralen in Stockholm juist een kleine hoek met het aardoppervlak (zie figuur 2.6).

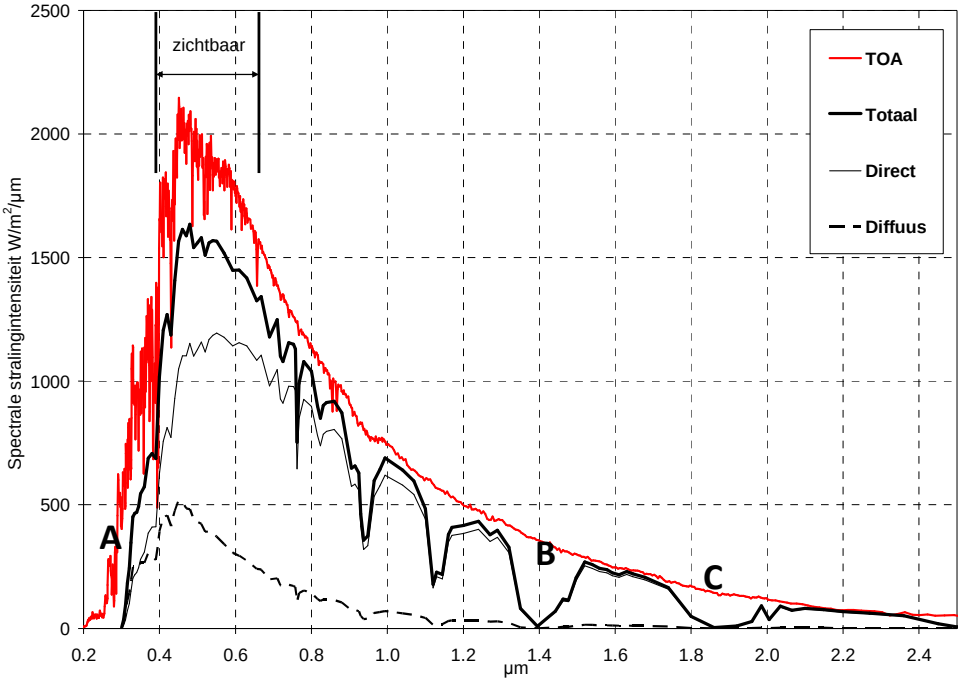
De hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak in onze steden bereikt is niet alleen afhankelijk van de locatie van deze steden. De aanwezigheid van een atmosfeer en wolken heeft ook effect op de inkomende zonnestraling. Van de kortgolvige zonnestraling die de atmosfeer binnenkomt, bereikt slechts een gedeelte rechtstreeks het aardoppervlak. Dit gedeelte heet de **directe straling**. Een ander gedeelte van de straling wordt door lucht en stof in de atmosfeer weerkaatst (verstrooid) in alle richtingen. Een deel van deze weerkaatste straling verlaat de atmosfeer. Een ander deel van de weerkaatste straling bereikt alsnog de aarde: dit noemen we de **diffuse straling**. Een deel van de (weerkaatste) straling wordt geabsorbeerd in de atmosfeer. In figuur 2.7 is schematisch weergegeven wat er gebeurt met de straling die de atmosfeer binnenkomt.



Figuur 2.7 Wat gebeurt er met de straling in de atmosfeer?

Figuur 2.8 laat zien dat er een groot verschil is tussen de straling die aan de bovenkant van de atmosfeer binnenkomt (TOA) en de hoeveelheid straling die het oppervlak van de aarde bereikt (Totaal). Zelfs op zonnige dagen zijn er veel gassen in de atmosfeer die straling kunnen absorberen. Dit zien we bijvoorbeeld bij de letters B en C. In de grafiek is ook te zien welk deel van de straling op een heldere dag verstrooid wordt en vervolgens de aarde als diffuse straling bereikt.
De zonshoogte speelt hier ook een rol: hoe lager de zon aan de horizon staat, des te langer is de weg van de straling door de atmosfeer waardoor er des te meer straling wordt geabsorbeerd resp.

verstrooid. Op geheel bewolkte dagen wordt nagenoeg alle straling weerkaatst en/of geabsorbeerd door de wolken, waardoor alleen diffuse straling binnenkomt op het aardoppervlak.



Figuur 2.8 Absorptiepatroon van de atmosfeer op een heldere dag voor verschillende golflengtes; uitleg: zie tekst

Opdracht 6.

De maximale **instralinghoek** van de zonnestraling op het aardoppervlak midden op de dag hangt af van de breedtegraad en de tijd van het jaar. Vergelijk in de onderstaande tabel de instralinghoek van de zon voor enkele locaties op aarde voor vier dagen in het jaar en vul de lege plekken in.

Tabel 2.1 instralinghoek op verschillende plaatsen

Datum	**Rotterdam** (52°NB)	**Stockholm** (59°NB)	**Evenaar** (0°NB)	**Noordpool** (90°NB)
21 maart			90°	
21 juni	61°	54°		23°
21 september		31°		0°
21 december	15°		67°	

Opdracht 7.

Neem Figuur 2.7 over en schrijf in deze afbeelding op de juiste plaats de volgende begrippen:

- Verstrooiing
- Reflectie (2x)
- Absorptie (2x)
- Diffuse straling
- Directe straling

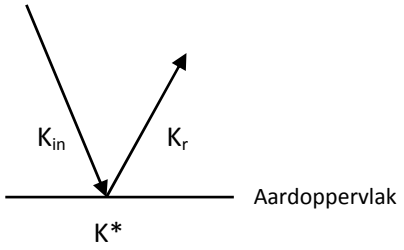
Opdracht 8.

Waarom zie je op bewolkte dagen bijna geen schaduwen van objecten?

2.3.5 Kortgolvige stralingsbalans

De directe en de diffuse straling vormen samen het totaal wat aan kortgolvige straling binnenkomt op het aardoppervlak. Deze straling wordt K_{in} genoemd. Het is in de praktijk niet gemakkelijk te schatten hoe groot K_{in} is. Deze hoeveelheid hangt af de zonshoogte en van eventueel aanwezige wolken. Ook speelt de afstand tussen de aarde en de zon een kleine rol.

Van K_{in} wordt een deel gereflecteerd door het aardoppervlak. Dit gedeelte noemen we K_r. K_r hangt o.a. af van de hoek van de inkomende straling en van de structuur en andere eigenschappen van het aardoppervlak.
De *fractie* van de inkomende straling die gereflecteerd wordt, noemen we het **albedo** A.
Het albedo is dus:



Figuur 2.9 Kortgolvige straling

$$A = K_r / K_{in} \qquad \textbf{(3)}$$

met A: albedo [-]
K_r: gereflecteerde kortgolvige straling [W/m^2]
K_{in}: inkomende kortgolvige straling [W/m^2].

De **netto kortgolvige straling** op het aardoppervlak is nu:

$$K^* = K_{in} - K_r = K_{in} * (1 - A) \qquad \textbf{(4)}$$

met K^*: netto kortgolvige straling aan het aardoppervlak [W / m^2].

Deze netto kortgolvige straling wordt door het aardoppervlak geabsorbeerd. In figuur 2.9 is de **kortgolvige stralingsbalans** grafisch weergegeven.

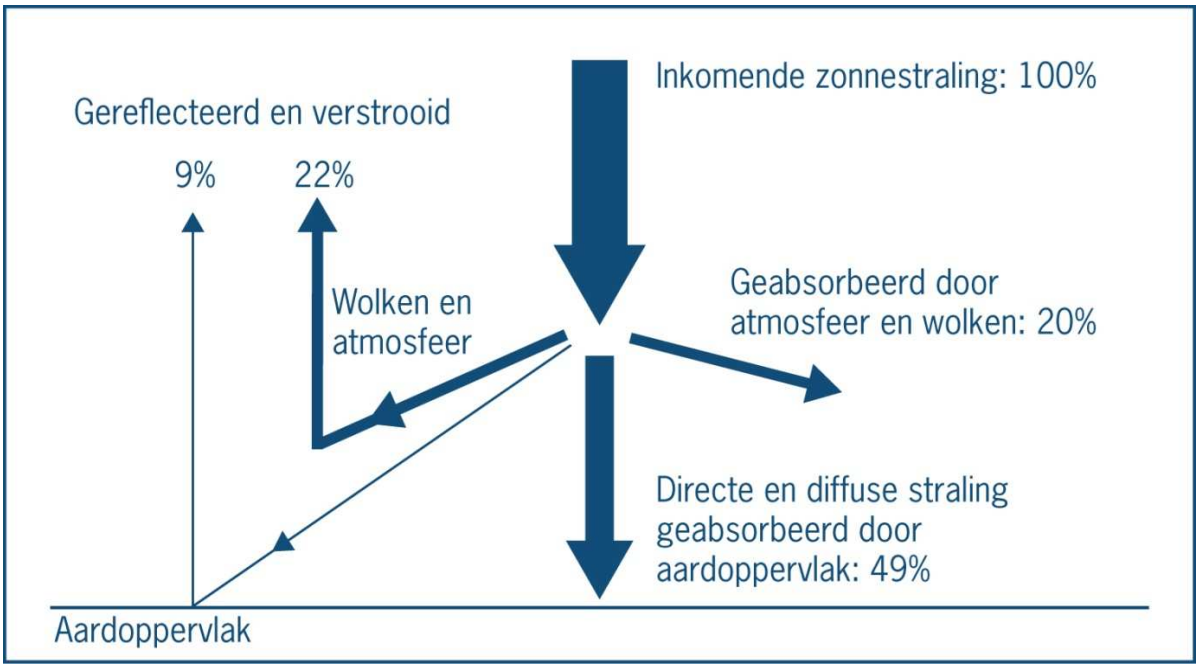
Enkele lokale albedo's van verschillende soorten landgebruik zijn weergegeven in Tabel 2.2. In deze tabel kun je zien dat het voor de fractie van de zonnestraling die gereflecteerd wordt, uitmaakt of de straling op een gletsjer, op een voetbalveld of op een winkelstraat valt. Voor het verschil tussen stad en platteland is het lokale albedo dus belangrijk. In de tabel zien we bijvoorbeeld dat sneeuw en ijs een enorm hoog albedo hebben en dus heel veel zonnestraling reflecteren. In Stockholm ligt er in de winter altijd sneeuw op de daken en in de straten, terwijl in Singapore de temperatuur nooit onder het vriespunt duikt. Je kunt je voorstellen dat er in Singapore in de winter veel minder zonnestraling gereflecteerd wordt, resp. dat een groter deel van deze straling geabsorbeerd wordt.

Tabel 2.2 Albedo per type oppervlak

Oppervlak	**Albedo (A)**
bomen	0,15
sneeuw / ijs	0,90
bebouwing	0,15
water	0,10
kale bodem	0,30
gras	0,25
woestijn	0,25

We kunnen ook kijken naar het gemiddelde albedo van de hele aarde. Dit staat in Figuur 2.10 weergegeven. Het gemiddelde albedo van het aardoppervlak (**aardoppervlak albedo**) is beduidend

lager dan het albedo van de aarde als planeet (**planetair albedo**). Dit komt doordat de wolken en de atmosfeer veel kortgolvige straling reflecteren, verstrooien en absorberen.



Figuur 2.10 Gemiddelde kortgolvige stralingsbalans van de gehele aarde over 24 uur (bron: IPCC)

Opdracht 9.

Geef in Figuur 2.10 aan wat het aardoppervlak albedo is en wat het planetair albedo is en geef de waarde van beide.

Opdracht 10.

Bereken met de waarden die je ingevuld hebt in Tabel 2.1 hoe groot K_{in} is voor elke **instralinghoek**, gegeven dat de beschikbare energie per vierkante meter loodrecht op de zonnestraling 1367 Watt is, aan de bovenkant van de atmosfeer. Neem aan dat het overal zonnig is en dat 70% van de straling door de atmosfeer komt en het aardoppervlak bereikt.

Tabel 2.3 Inkomende energie op verschillende plaatsen

Datum	Rotterdam (52°NB)	Stockholm (59°NB)	Evenaar (0°NB)	Noordpool (90°NB)
21 maart 21 juni 21 september 21 december				

Opdracht 11.

Stel dat het aardoppervlak voor 70% uit water bestaat. Van het landoppervlak is 15% bebouwd, 10% sneeuw/ijs en 10% woestijn. 25% van het landoppervlak bestaat uit bos en de rest wordt opgevuld door grasland. Wat zou het gemiddelde albedo van het aardoppervlak zijn van deze aarde? Wat zou er met dit albedo gebeuren wanneer een groot deel van het bos gekapt wordt en er kale grond voor in de plaats komt? En wat gebeurt er met het albedo wanneer al het ijs smelt?

2.3.6 Langgolvige stralingsbalans

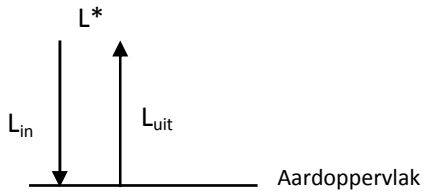
Omdat het aardoppervlak een temperatuur boven het absolute nulpunt heeft (gemiddeld 288 Kelvin), zendt de aarde ook straling uit. Het aardoppervlak zendt **langgolvige straling** uit (volgens de wetten van Boltzmann en Wien). De uitgaande straling heeft het symbool L_{uit}. L_{uit} is afhankelijk van de temperatuur van het aardoppervlak. Overdag is deze temperatuur vaak hoger dan 's nachts vanwege de opwarming door de straling van de zon. Overdag zal het aardoppervlak dan ook meer straling uitzenden. Ook zal L_{uit} in warme gebieden groter zijn dan in koude gebieden, want hoe hoger de temperatuur hoe meer energie er wordt uitgestraald.

Van de langgolvige straling die de aarde uitzendt, wordt gemiddeld een klein deel doorgelaten naar de ruimte: 20 – 30%. De rest wordt geabsorbeerd door de atmosfeer. Dit komt voornamelijk door de aanwezigheid van waterdamp en broeikasgassen zoals CO_2, N_2O en CH_4. Als het bewolkt is, wordt zelfs alle langgolvige straling in de atmosfeer geabsorbeerd. In wolken is water namelijk niet alleen in de vorm van waterdamp, maar ook in vloeibare vorm (waterdruppeltjes) en/of vaste vorm (ijskristallen) aanwezig. Water in vloeibare en vaste vorm gedraagt zich in het langgolvige gebied praktisch als een zwart lichaam: er wordt geen straling gereflecteerd, alle straling wordt geabsorbeerd.

De energie die geabsorbeerd wordt door de atmosfeer, wordt ook weer uitgezonden (in de vorm van langgolvige straling). Dat uitzenden gebeurt in alle richtingen: zowel naar het aardoppervlak als naar boven, naar de ruimte. Het aardoppervlak ontvangt dus niet alleen kortgolvige straling van de zon, maar ook langgolvige straling van de atmosfeer, L_{in}. Van deze langgolvige straling afkomstig uit de atmosfeer wordt een deel gereflecteerd door de aarde, L_r. Dit gedeelte is echter verwaarloosbaar klein ten opzichte van de straling die de aarde zelf uitzendt. Om die reden zal L_r worden weggelaten in de berekening van de netto straling. De netto langgolvige straling op het aardoppervlak wordt gegeven door:

$$L^* = L_{in} - L_{uit} \qquad \textbf{(5)}$$

De netto langgolvige straling is weergegeven in Figuur 2.11.



Figuur 2.11 De netto langgolvige straling op het aardoppervlak

L^* is sterk afhankelijk van temperatuur, bewolking en de aanwezigheid van waterdamp in de atmosfeer. L^* is meestal kleiner of gelijk aan 0. Dit betekent dat de aarde meer langgolvige straling uitzendt dan hij ontvangt vanuit de atmosfeer. Als het helder is en er weinig langgolvige straling binnenkomt vanuit de atmosfeer is L^* sterk negatief: $L_{in} < L_{uit}$. Als het bewolkt is, zoals het in Rotterdam vaak is, en de luchttemperatuur is ongeveer gelijk aan de temperatuur van het aardoppervlak dan is L^* ongeveer 0. Dan is $L_{in} = L_{uit}$.

Opdracht 12.

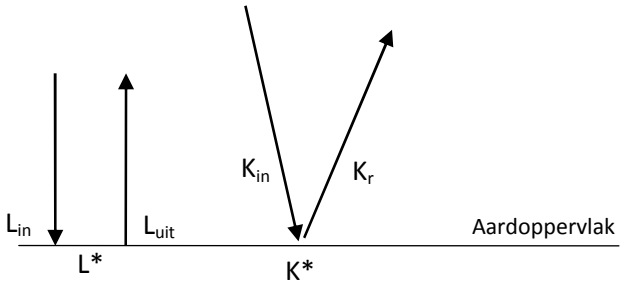
Hoe komt het dat de langgolvige stralingsbalans ongeveer constant is in de loop van een dag, en de kortgolvige stralingsbalans niet?

2.3.7 Stralingsbalans aan het oppervlak

Wat er totaal bij het aardoppervlak aan straling binnenkomt en uitgaat wordt de stralingsbalans genoemd. De totale netto straling (Q^*) op het aardoppervlak is de som van de netto kortgolvige en de netto langgolvige straling.

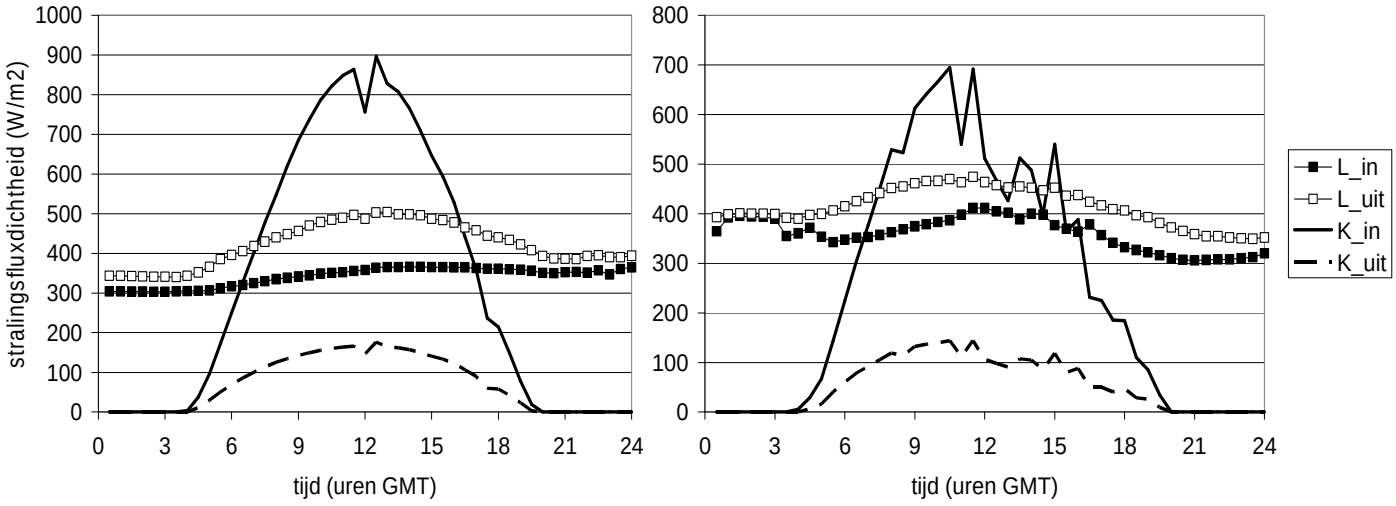
$$Q^* = K^* + L^* = K_{in} - K_r + L_{in} - L_{uit} \quad \textbf{(6)}$$

Overdag is Q^* meestal positief. Het aardoppervlak ontvangt straling van de zon en vanuit de atmosfeer. 's Nachts ontvangt het aardoppervlak alleen straling uit de atmosfeer, maar blijft zelf wel straling uitzenden. Omdat de L_{uit} vaak groter is dan de L_{in} is Q^* 's nachts negatief. Wanneer de instraling groter is dan de uitstraling, zal de temperatuur van het aardoppervlak stijgen. Is het omgekeerde het geval, dan zal de temperatuur dalen. Een overzicht van de stralingsbalans is weergegeven in Figuur 2.12.



Figuur 2.12 De stralingsbalans van het aardoppervlak

Figuur 2.13 geeft weer hoe de stralingsbalans gedurende een dag verandert. De linker figuur is van een vrijwel onbewolkte dag, de rechter van een dag met wat bewolking in de middag. Je kunt hierop goed zien dat de kortgolvige straling op een onbewolkte dag exact de baan van de zon volgt, terwijl de langgolvige straling een stuk constanter blijft gedurende 24 uur. Let bij de bewolkte dag er op dat de inkomende langgolvige straling hoger is op het moment dat het bewolkt wordt



Figuur 2.13 Stralingsbalans op het aardoppervlak van twee dagen in juli 2003 (links: 10 juli en rechts: 11 juli). De metingen zijn verricht op het meteostation de Haarweg in Wageningen. Met dank aan Bert Heusinkveld, Wageningen Universiteit. Let op: de schaal van beide grafieken is niet hetzelfde!

De stralingsbalans is echter niet op de hele aarde hetzelfde. Zo is het jaargemiddelde van de netto straling in de buurt van de evenaar, bijvoorbeeld in Singapore, positief. Dit wordt veroorzaakt door een hoge K_{in}. In Rotterdam en Stockholm komt juist minder kortgolvige zonnestraling op het aardoppervlak en is het jaargemiddelde van de netto stralingsbalans negatief. Op de Noordpool geldt dit nog sterker; dat is de reden dat het daar een stuk kouder is dan in de tropen. De gemiddelde

stralingsbalans van de hele aarde is precies nul, maar voor onze vier steden afzonderlijk hoeft dit niet zo te zijn. En er zijn niet alleen verschillen tussen de jaargemiddeldes van de vier steden, uiteraard zijn er van dag tot dag verschillen tussen de grootte van de termen van de stralingsbalans, en tussen de stralingsbalansen van onze steden onderling. In deel 2 zullen we merken wat voor effect deze verschillen in de stralingsbalans op het stadsklimaat hebben.

Opdracht 13.

Welke termen heb je nodig om K^* en L^* te berekenen? Beschrijf het verloop van ieder van deze termen vanaf zonsopkomst tot de volgende zonsopkomst. Beschrijf ook het effect van bewolking op deze termen tijdens zo'n dag.

2.4 Warmtetransport en de energiebalans

Steden worden niet voor niets 'Urban Heat Islands' genoemd: warmte speelt er een belangrijke rol. Hoe verloopt het transport van warmte? Is dit binnen de stad anders dan erbuiten?
Zoals je weet is warmte een vorm van energie en energie kan op drie manieren worden getransporteerd: via geleiding**,** via stroming of via straling. Aan het aardoppervlak komen alle drie de vormen van **transport** voor. Ook kunnen hier verschillende soorten energie in elkaar worden omgezet. Het landgebruik heeft grote invloed op de energieomzettingen die aan het aardoppervlak plaatsvinden en zodoende zullen deze processen in de stad en op het platteland niet hetzelfde verlopen. We kijken in dit hoofdstuk naar deze processen met behulp van de energiebalans.

2.4.1 Energiebalans van het aardoppervlak

We hebben in hoofdstuk 2.3 gezien dat de netto straling op het aardoppervlak afhankelijk is van de inkomende kortgolvige straling van de zon (K_{in}), de langgolvige straling van de atmosfeer (L_{in}), de uitgaande kortgolvige straling door weerkaatsing (K_r) en het zelf uitzenden van langgolvige straling door de aarde (L_{uit}). De netto straling op het aardoppervlak wordt aangegeven met de term Q^*. Wat gebeurt er nu met de energie als Q^* positief is, dat wil zeggen dat het aardoppervlak meer straling absorbeert dan dat het weerkaatst en uitstraalt?

Als Q^* positief is, wordt de energie van het aardoppervlak voornamelijk gebruikt voor drie processen:

1. De energie wordt omgezet in een **voelbare warmtestroom**, met als gevolg opwarming van de lucht vlak boven het aardoppervlak. Dit wordt aangeduid met de term **H**.
2. De energie wordt gebruikt om water te verdampen. Verdamping van water kost energie maar leidt niet tot een temperatuurverhoging. Dit heet **latente warmtestroom**; deze wordt aangeduid met de term $\mathbf{L_vE}$. L_vE is het product van de verdampingswarmte L_v [J kg^{-1}] en de verdamping E [kg m^{-2} s^{-1}].
3. De energie wordt gebruikt om de bodem te verwarmen. Dit wordt aangeduid met de term **G** en wordt ook wel de **bodem warmtestroom** genoemd**.**

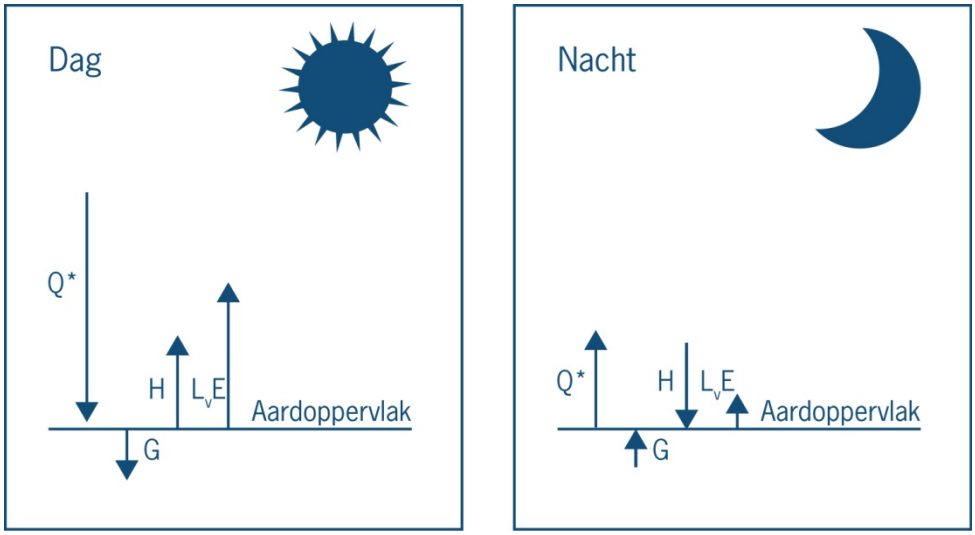
Dit samen geeft de totale energiebalans van het aardoppervlak:

$$\mathbf{Q^* - H - L_vE - G = 0} \qquad \mathbf{(7)}$$

De grootte van de processen Q^*, H, L_vE en G worden uitgedrukt in **fluxdichtheid**, ofwel energiestromen per tijdseenheid en oppervlak [J s^{-1} m^{-2}] of [W m^{-2}].

Met	Q^*:	Netto straling aardoppervlak [W m^{-2}]
	H:	Energie die wordt gebruikt om de atmosfeer vlak boven het aardoppervlak op te warmen [W m^{-2}]
	L_vE:	Energie die wordt gebruikt om water te verdampen [W m^{-2}]
	G:	Energie die wordt gebruikt om de bodem te verwarmen [W m^{-2}]

In Figuur 2.14 staat de energiebalans van het aardoppervlak overdag en 's nachts weergegeven. Let hierbij vooral op de richting van de pijlen!



Figuur 2.14 De energiebalans van het aardoppervlak overdag en 's nachts. De richting van de pijl geeft aan in welke richting de fluxdichtheid is

Opdracht 14.

Beschrijf (min.100 woorden) voor alle vier de termen op de energiebalans (Q^*, G, H, L_vE) wat de verschillen tussen overdag en 's nachts zijn. Vermeld de richting van de fluxdichtheden en geef logische verklaringen voor de verschillen die je ziet.

We gaan nu verder in op eigenschappen van stoffen die bepalen welke energieverdeling er plaats vindt (4.2). Vervolgens zal er afzonderlijk ingegaan worden op de drie bovengenoemde processen H, L_vE en G (4.3 t/m 4.5). Ten slotte wordt aangegeven wat de invloed van landgebruik is op de energieverdeling, wat natuurlijk erg belangrijk is om te weten wanneer we het verschil tussen de stad en het platteland willen bepalen (4.6 en 4.7).

2.4.2 Stofeigenschappen

De energie aan het aardoppervlak wordt gebruikt voor de drie processen H, L_vE en G. De grootte van deze drie processen wordt weliswaar voor een belangrijk deel bepaald door Q^*, maar de verdeling van de energie over deze drie processen wordt bepaald door stofeigenschappen, de windsnelheid en de relatieve vochtigheid.
Het aardoppervlak bestaat uit verschillende stoffen, en deze stoffen hebben allemaal hun eigen karakteristieke stofeigenschappen. Vanwege deze karakteristieke stofeigenschappen is de verhouding tussen H, L_vE en G mede afhankelijk van de samenstelling van het aardoppervlak. Voornamelijk de aanwezigheid van water speelt hierin een belangrijke rol, omdat water heel andere stofeigenschappen heeft dan de grond zelf.
We zullen nu de stofeigenschappen soortelijke warmte, warmtegeleidingscoëfficiënt en verdampingwarmte nader bekijken. In Binas kun je de waarde van deze eigenschappen voor een groot aantal stoffen vinden.

2.4.3 Soortelijke warmte

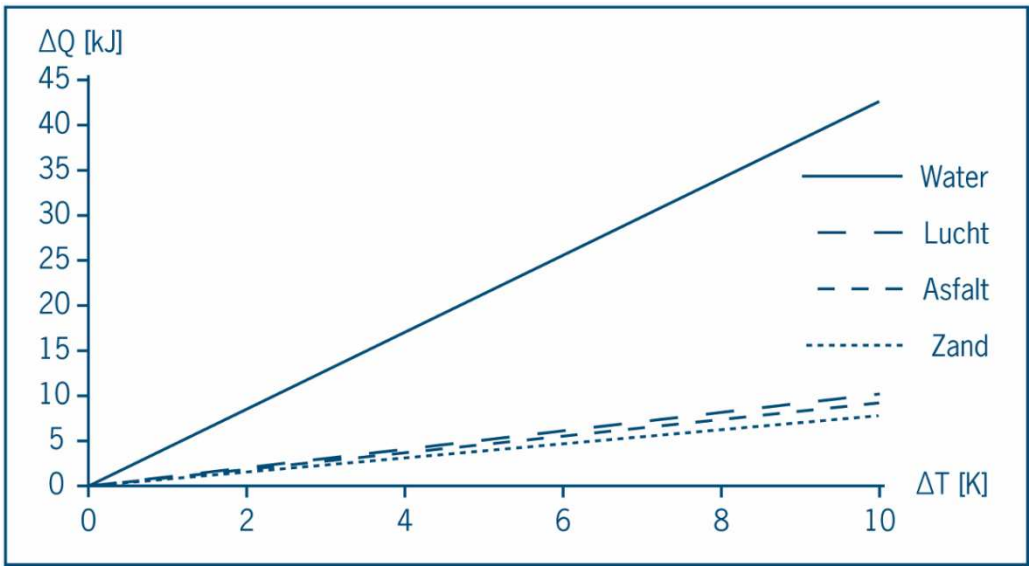
Eén van de eigenschappen waarin stoffen verschillen, is de hoeveelheid energie die nodig is om de betreffende stof op te warmen. Zo kost het bijvoorbeeld veel meer energie om een pannetje water te verwarmen dan een pannetje olie. Met de **soortelijke warmte** wordt aangegeven hoeveel energie

(in de vorm van warmte) het kost om 1 kilogram van een bepaalde stof 1 graad in temperatuur te laten stijgen. Als de soortelijke warmte groot is, zoals bij water, kan een stof veel warmte opnemen zonder dat daarbij de temperatuur veel stijgt. Water kan goed warmte opslaan of vasthouden, m.a.w. water heeft een grote **warmtecapaciteit**.
Als we de soortelijke warmte weten, kunnen we de warmtecapaciteit van verschillende materialen met elkaar vergelijken.

$$Q = c * m * \Delta T \qquad \textbf{(8)}$$

Met Q: toegevoegde warmte [J]
c: soortelijke warmte [J / (kg * K)]
m: massa [kg]
Δ T: temperatuurverandering [K]

In Figuur 2.15 zie je de relatie tussen de temperatuurstijging en de toegevoegde hoeveelheid energie. Hierin kun je goed zien dat het weinig moeite kost om zand op te warmen en dat het heel veel energie kost om water op te warmen. Dit heb je vast wel eens gemerkt op een zonnige zomerdag op het strand: het zand is dan bijna te heet onder je voeten, terwijl het zeewater heerlijk verkoelend werkt.



Figuur 2.15 De soortelijke warmte van water, lucht, asfalt en zand. De grafiek geeft de relatie tussen de temperatuurstijging van 1 kg materiaal met de daarvoor benodigde hoeveelheid energie. De helling van de verschillende grafieken is de soortelijke warmte

2.4.4 Warmtegeleiding

De **warmtegeleidingscoëfficiënt** van een stof geeft aan hoe goed deze stof in staat is warmte te geleiden. De eenheid voor deze coëfficiënt is W m^{-1} K^{-1}. Naarmate de warmtegeleidingscoëfficiënt groter is, kan de betreffende stof meer energie transporteren bij een gegeven temperatuurgradiënt. Stoffen die zeer slecht warmte geleiden, stoffen met een lage warmtegeleidingscoëfficiënt dus, worden (warmte)isolatoren genoemd. Slechte warmtegeleiders houden de warmte goed vast, de warmte dringt maar langzaam door naar andere plaatsen in het materiaal. Als de soortelijke warmte van een object hoog is en de warmtegeleidingscoëfficiënt laag, kost het veel tijd om dit object op te warmen. Als de warmtebron zich maar op één plaats bevindt, zal het object vooral aan die kant opwarmen. De warmte zal nauwelijks worden verspreid door het object. Bij gebouwen is het erg

belangrijk om goed isolerend materiaal te kiezen, zodat het niet te warm wordt in de zomer en niet te koud in de winter.

2.4.5 Verdampingswarmte

Watermoleculen worden bij elkaar gehouden door de **Vanderwaalskracht**, een onderlinge aantrekkingskracht tussen moleculen. Maar de moleculen in een vloeistof zijn constant in beweging en als er energie wordt toegevoerd, gaan ze sneller bewegen. De moleculen aan het wateroppervlak die genoeg energie bevatten, kunnen aan het water ontsnappen: het water verdampt. De inkomende energie wordt dan gebruikt om een molecuul van de Vanderwaalskracht te bevrijden, in plaats van de temperatuur te verhogen.

Water verdampt niet alleen bij 100^0 Celsius. Als je natte was buiten hangt, wordt die ook droog, terwijl de temperatuur niet in de buurt komt van het kookpunt van water.
De energie die nodig is om één liter vloeistof om te zetten in damp wordt de **verdampingswarmte** genoemd. De verdampingswarmte van water bij 0°C is $2{,}50 * 10^6$ J kg^{-1}. Verdampen van water kost dus veel energie, veel meer dan verwarmen. De hoeveelheid verdamping hangt sterk af van de beschikbare energie. Dit zullen we zien in practicum 1.
Een praktisch voorbeeld van verdamping is zweten. Tijdens lichamelijke inspanning verbruiken je spieren energie en komt er warmte vrij. Daardoor ga je zweten. Nu begrijp je waarom: het verdampen van zweet onttrekt energie aan het lichaam, zodat je lichaam niet verder opwarmt.

2.4.6 Voelbare warmtestroom (H)

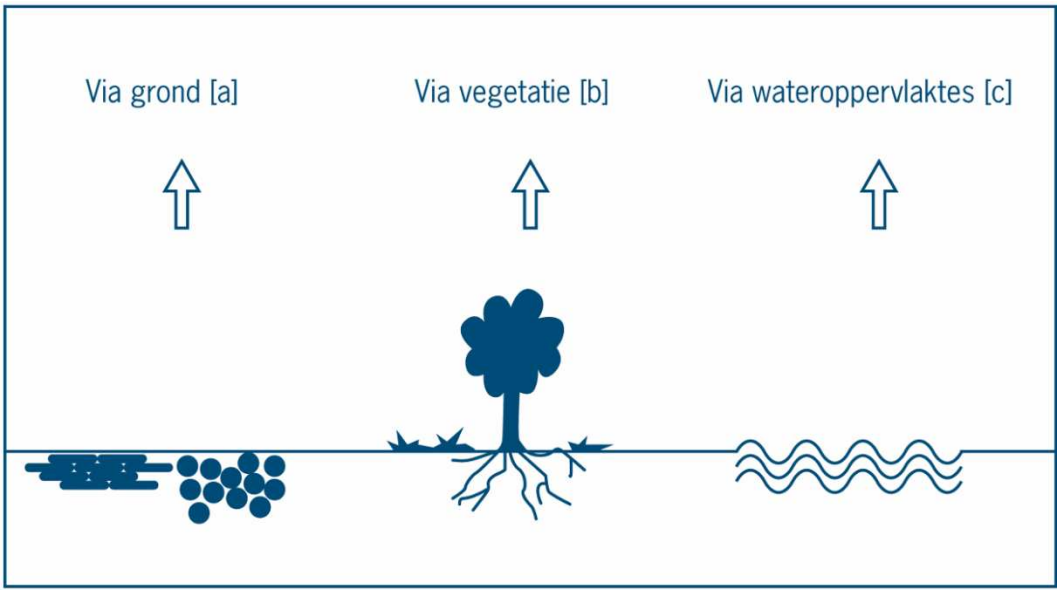
Een deel van de netto inkomende energie op het aardoppervlak wordt gebruikt om de luchtlaag vlak boven het aardoppervlak op te warmen. De energie die hiervoor verantwoordelijk is noemen we de **voelbare warmtestroom H**. Hoe groter H is, hoe meer de lucht zal opwarmen. Warme lucht is lichter dan koude lucht. De lucht die aan het aardoppervlak is opgewarmd stijgt op, waardoor er convectie (verticale luchtstroming) ontstaat. Deze convectie zorgt ervoor dat de warme lucht die van onderop komt, goed gemengd wordt met de koudere lucht die zich op grotere hoogte bevindt. Deze goed gemengde laag wordt de **grenslaag** genoemd. In de zomer is de grenslaag overdag ongeveer 1 km hoog. De hoogte van de grenslaag is direct afhankelijk van H, omdat naarmate H groter is, de lucht tot op grotere hoogte kan mengen. Meer over de grenslaag in paragraaf 2.4.10.

2.4.7 Latente warmtestroom (L_vE)

Een ander deel van de energie die beschikbaar is aan het aardoppervlak wordt gebruikt om water te verdampen. Dit noemen we de **latente warmtestroom L_vE**. Deze leidt niet tot temperatuurstijging, maar tot de omzetting van vloeibaar water in waterdamp: water neemt energie op en gebruikt die om te verdampen. Hoe groter de latente warmtestroom, hoe minder energie er over is om de temperatuur te doen stijgen.

Vegetatie speelt een belangrijke rol in het proces van verdamping. Een groot deel van het water dat wordt verdampt gaat via de vegetatie (als die aanwezig is). Water komt de plant binnen via de wortels. Plantenwortels kunnen tot diep in de grond reiken en zo veel meer water aanspreken dan alleen het oppervlaktewater. Via de huidmondjes van de plant wordt dit water verdampt. Deze manier van verdamping wordt **transpiratie** genoemd. Hoe meer vegetatie, hoe meer water er uit de bodem wordt gehaald en verdampt, dus stijgt de latente warmte in de energiebalans en is er minder energie over om het oppervlak te verwarmen. Dit is de reden dat het in een park koeler is dan in een volgebouwde winkelstraat. Hoe meer parken en groen in een stad, hoe koeler het over het algemeen zal zijn.

Latente warmtestroom kan optreden boven open wateroppervlaktes, maar dus ook uit vochtige bodems of via de vegetatie. Dit is aangegeven in Figuur 2.16.



Figuur 2.16 Verdamping van water. Water verdampt (a) vanuit de grond (vochtige aarde), (b) via vegetatie en (c) van wateroppervlaktes zoals meren of oceanen

Opdracht 15.

Kun je met behulp van de theorie uit paragraaf 2.4.7 voorspellen welke zee een hogere zoutconcentratie heeft: de Noordzee of de Middellandse Zee?

2.4.8 Bodem warmtestroom (G)

De mate van opwarming van de bodem (G) is afhankelijk van de soortelijke warmte en de warmtegeleidingcoëfficiënt van de bodem. Zand heeft bijvoorbeeld een soortelijke warmte van 0,80 $*$ 10^3 J kg^{-1} K^-, en graniet een soortelijke warmte van 0,82 $*$ 10^3 J kg^{-1} K^{-1}. De soortelijke warmte verschilt dus niet zoveel. Dit komt omdat graniet en zand uit ongeveer hetzelfde materiaal bestaan. Maar de korrels in zand zijn veel kleiner dan in graniet. Hierdoor zit er meer lucht in zand dan in een zelfde hoeveelheid graniet. Deze lucht draagt nauwelijks bij aan de soortelijke warmte, maar wel aan de isolerende werking. De warmtegeleidingscoëfficiënt van droog zand kan wel tien maal zo klein zijn als die van graniet. Dit wordt dus veroorzaakt door de lucht in het zand. De warmte in graniet wordt gemakkelijk naar diepere lagen verplaatst, waardoor de warmte meer verdeeld wordt. Als eenzelfde hoeveelheid energie op een even groot oppervlak van zand en van graniet valt, zal het zand aan het oppervlak dus veel warmer zijn.

De warmtegeleiding van zand is sterk afhankelijk van de vochtigheid ervan. Dit komt omdat de warmtegeleiding van water vele malen hoger is dan die van lucht. Als de poriën in het zand van de bodem gevuld zijn met water, wordt warmte makkelijker naar diepere lagen getransporteerd. Hierdoor wordt de warmte over een groter volume verdeeld. Als de poriën gevuld zijn met lucht, wordt de warmte slecht getransporteerd en warmt vooral de bovenste laag van de bodem op. De warmtegeleidingcoëfficiënt van zand varieert dus sterk naargelang de vochtigheid: 0.3 W m^{-1} K^{-1} voor droog zand en 2.2 W m^{-1} K^{-1} of hoger voor nat zand. Dat is dus bijna acht keer zoveel! Water verhoogt ook de warmtecapaciteit van de bodem. Door de hoge warmtecapaciteit van water kost het meer energie om vochtig zand op te warmen dan eenzelfde hoeveelheid droog zand.

Nemen we weer het strand als voorbeeld: als je op het strand loopt op je blote voeten voel je goed dat het droge zand veel warmer is dan het natte zand. Dit heeft dus twee redenen: in het natte zand wordt de warmte beter verdeeld (ook naar diepere lagen) door een betere warmtegeleiding, én de temperatuur van het vochtige zand stijgt minder snel dan die van het droge zand omdat het vochtige zand een hogere soortelijke warmte heeft.

Er is een groot verschil tussen stad en platteland wat betreft de grootte van de term G. Dit komt omdat de bodemsoorten heel anders zijn. Voor een bodem bedekt met vegetatie is G ongeveer 10 % van Q^*. Voor een zandbodem zonder vegetatie of een verhard oppervlak ligt dit percentage veel hoger.
In de energiebalans is G echter niet de belangrijkste term. In Figuur 2.14 is te zien dat de factor G overdag naar beneden is gericht, de bodem in, terwijl 's nachts de warmte weer verdwijnt uit de bodem. Dit is ook te zien in Figuur 2.17.

2.4.9 Bowen-verhouding

De energieverdeling tussen de voelbare (H) en de latente (L_vE) warmtestroom is afhankelijk van de hoeveelheid water die aan het oppervlak aanwezig is. Als het oppervlak goed van water is voorzien, zoals in bossen, meren en graslanden, zal de energie vooral gebruikt worden voor verdamping (L_vE). Als er geen water in de omgeving is, zal de energie vooral gebruikt worden om de lucht boven het aardoppervlak op te warmen (H). Dit is het geval in steden en woestijnen.
De verhouding tussen H en L_vE wordt de **Bowen-verhouding** (β) genoemd:

$$\beta = H / L_vE \qquad \textbf{(9)}$$

Als de plaatselijke omstandigheden van het aardoppervlak bekend zijn, kan een goede inschatting worden gemaakt van de grootte van de Bowen-verhouding, zo is gebleken uit onderzoek in verschillende gebieden op aarde, uitgevoerd door o.a. Wageningen Universiteit.

Tabel2.4 Vuistregels Bowen-verhouding

Oppervlak	**Bowen-verhouding β (H / L_vE)**
Wateroppervlak	1/5
Goed van water voorzien oppervlak	1/3
Redelijk van water voorzien oppervlak	1/1
Slecht van water voorzien oppervlak	3/1

Vochtige gebieden zijn dus koeler dan droge gebieden omdat er minder energie wordt gebruikt om de lucht op te warmen. Dit betekent dat gebieden waar veel begroeiing is (bos, landbouwgrond, weide etc.) relatief koeler zijn dan onbegroeide stukken aardoppervlak. In gebieden met veel bebouwing, zoals in het centrum van een stad, is weinig water aanwezig dat verdampt kan worden. Daarom zal daar de meeste energie worden gebruikt om de lucht op te warmen. Dus is het dus warmer in de stad dan in de wei. In woestijnachtige gebieden is de Bowen-verhouding groter dan 3. In Nederland gaat de waarde van de Bowen-verhouding na een zeer lange droge zomerperiode naar de 1 toe.

De Bowen-verhouding van de vier steden waar wij ons in deze module mee bezighouden, zal dus ook onderling verschillend zijn. Bijvoorbeeld: in Rotterdam valt jaarlijks veel meer neerslag dan in Santiago (zie opdracht 1!) en dus zal de bodem hier een stuk beter van water voorzien zijn, terwijl de hogere temperatuur in Santiago ook nog betekent dat de verdampingssnelheid hoger is, waardoor de (toch al kleinere) hoeveelheid water in de bodem nog verder terugloopt. De Bowen-verhouding in Rotterdam kan dus zomaar 9 keer zo klein zijn als die van Santiago.

Opdracht 16.

In Rotterdam vinden we land en water naast elkaar. Om het temperatuurverschil tussen land en water te berekenen, stellen we ons een meer voor van 1 meter diep naast een droog stuk zand. De temperatuur van het water en het zand zijn gelijk op het moment dat de zon opkomt. Stel dat Q* even groot is voor beide gebieden en wel 425 W m^{-2}. Ook G is gelijk, en wel 25 W m^{-2} (voor het meer is G de afvoer van warmte naar de bodem onder het meer).

a. Hoeveel graden stijgt de temperatuur van 1 m^3 water (met een oppervlak van 1 m^2) van dit meer, als dat een uur wordt blootgesteld aan Q*? (Neem aan dat de warmte regelmatig over het water wordt verdeeld.)

b. Wat is de Bowen-verhouding voor beide gebieden? Hoe groot is H voor beide gebieden?

c. Stel dat zich boven de droge grond en het meer ernaast een goed mengende grenslaag van 1000 meter hoog bevindt. Hoeveel stijgt de luchttemperatuur boven 1 m^2 land? Hoeveel stijgt de temperatuur van de lucht boven 1 m^2 meer? Neem hierbij aan dat de gemiddelde dichtheid van de lucht in de hele grenslaag 1.19 kg/m^3 is.

Opdracht 17.

a. Vergelijk twee naast elkaar liggende gebieden. Het ene gebied is droog, zonder vegetatie. Het andere gebied is geïrrigeerd (natte grond), ook zonder vegetatie. Hoe wordt in deze twee gebieden Q* verdeeld over H, L_vE en G?

b. Vergelijk L_{uit} in de twee gebieden in de loop van de dag.

c. Wat verandert er aan de onderlinge verdeling tussen H, L_vE en G in het geïrrigeerde gebied als de gewassen opkomen?

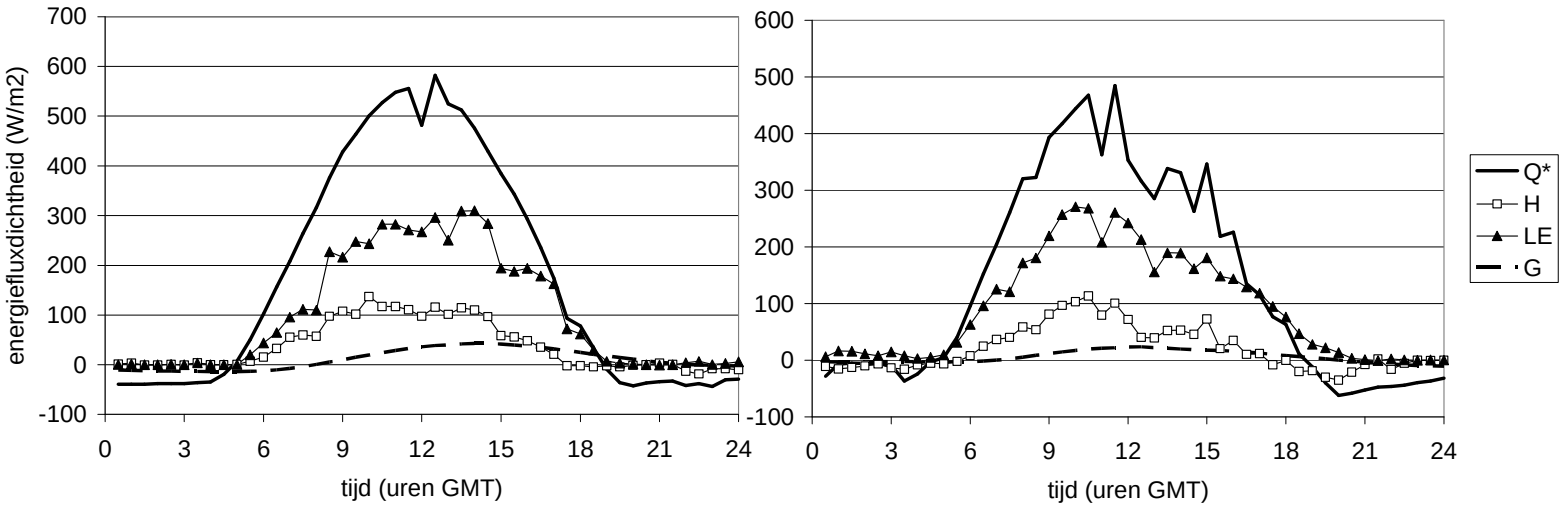
Opdracht 18.

De laagste temperatuur die ooit in Nederland gemeten is, werd bereikt in de nacht van 27 januari 1942: -27.4 °C in Winterswijk. In de drie dagen ervoor was er 20 cm sneeuw gevallen en die avond stroomde er heldere vrieslucht over Nederland. Beschrijf aan de hand van alle termen in de energiebalans waarom het goed te begrijpen is dat het die nacht zo koud werd. Bedenk daarbij dat de warmtegeleidingscoëfficiënt van verse sneeuw erg laag is..

2.4.10 Uiteindelijke energiebalans

Uiteindelijk kan geconcludeerd worden dat de energiebalans van het aardoppervlak sterk beïnvloed wordt door het bodemgebruik. De energiebalans is afhankelijk van de grondsoort, de begroeiing, de aanwezigheid van water etc. Als er weinig water aanwezig is, zoals bij bebouwing, zal de meeste energie worden gebruikt om de lucht op te warmen (H), een gedeelte om de bodem op te warmen (G) en weinig tot niets om water te verdampen (L_vE). In gebieden waar het aardoppervlak vooral bestaat uit water, bos of begroeide landbouwgrond zal het omgekeerde plaatsvinden: veel energie wordt gebruikt om water te verdampen (inclusief transpiratie) en weinig energie wordt besteed aan het opwarmen van de lucht. De aanwezigheid van vegetatie speelt dus een grote rol.

Figuur 2.17 geeft de verdeling van de energie over de verschillende processen voor twee dagen in juli 2003. Overdag komt er energie binnen en zijn H, L_vE en G positief. ’s Nachts wordt er energie onttrokken aan het oppervlak en zijn G en H negatief, terwijl L_vE tot vrijwel nul daalt.



Figuur 2.17 Energiebalans van het aardoppervlak van twee dagen in juli 2003 (links: 10 juli en rechts: 11 juli). De beschikbare energie (netto straling) wordt gebruikt voor H, LvE en G. De eerste dag is zo goed als onbewolkt, de tweede heeft wat bewolking in de middag. De metingen zijn verricht op het meteo-station de Haarweg in Wageningen. Hier is het gras goed van water voorzien. Met dank aan Bert Heusinkveld, Wageningen Universiteit. Let op: de schaal van de twee grafieken is niet hetzelfde!

De energiebalans aan het aardoppervlak is erg belangrijk voor de luchtlaag erboven, de **grenslaag**. Bij een grote H zal de temperatuur nabij het oppervlak oplopen en daardoor wordt de lucht tot op grote hoogte goed gemengd. Dit betekent dat de hoogte van de grenslaag op een warme dag in de loop van de dag zal stijgen. Om de temperatuur van de grenslaag 1 graad te laten stijgen, zal er bij een hoger worden grenslaag steeds meer energie nodig zijn, waardoor de groei in de loop van de dag langzamer gaat. Als de zon uiteindelijk onder is, zal er geen energie meer worden toegevoegd aan de grenslaag. Sterker nog, de netto inkomende straling Q* is dan negatief. Dit kunnen we goed zien in Figuur 2.14. Overdag is H omhoog gericht en warmt de grenslaag op, 's nachts is H omlaag gericht en onttrekt het aardoppervlak energie aan deze laag. Dit betekent dus dat deze laag dan van onderaf zal afkoelen. Dit heeft belangrijke gevolgen voor de luchtkwaliteit, zoals we in deel 3 zullen zien.

Opdracht 19.

Stel dat een grote stad wordt omgeven door vochtige kleigrond. Hoe is de verdeling van de energie over de verschillende termen van de energiebalans in de stad en hoe op de vochtige kleigrond? Wat volgt hieruit voor het temperatuurverschil tussen de stad en de kleigrond? Stel dat dezelfde stad midden in de woestijn ligt. Hoe ziet de energiebalans op beide locaties er dan uit? En wat kun je zeggen over de temperaturen?

Opdracht 20.

In Nederland komen verschillende soorten bodems en bodemgebruik voor, die op een eigen manier de energie verdelen over H, L_vE en G. Vergelijk de energieverdeling voor grasland, een stad en een groot meer op een zonnige dag in Nederland om 12 uur 's middags. Verschillende waardes zijn al gegeven in de tabel.

a. Bereken K_r met behulp van de gegevens in Tabel 2.2 (albedo).

b. Bereken de netto straling Q* op de drie gegeven aardoppervlakken.

c. Waarom is de L_{uit} verschillend voor de verschillende oppervlaktes?

d. Maak een schatting van β, ga er hierbij vanuit dat het grasland goed voorzien is van water. Vul deze getallen in de tabel in.

e. Bereken L_vE en H door middel van de gegevens die je weet over Q* en β. Vul deze waardes in de tabel in.

f. Verklaar in je eigen woorden waarom het in de stad warmer is dan in het omringende bebouwde gebied.

g. Geef minstens twee redenen waarom water koeler is dan het land eromheen.

Tabel 2.5 Waarden voor stralingsbalans

	K_{in}	K_r	L_{in}	L_{uit}	Q*	β	G	L_vE	H
Grasland	1000		300	350			100		
Stad	1000		300	450			200		
Meer	1000		300	300			150		

Practicum 1

Verschillende eigenschappen van het aardoppervlak hebben invloed op de temperatuur van de bodem en op de temperatuur van de lucht boven de bodem. In de volgende twee proeven zullen we twee van die eigenschappen onderzoeken. Kun je met behulp van de theorie uit het voorgaande hoofdstuk de verschijnselen die je waarneemt in dit practicum verklaren? Later zullen we bekijken in hoeverre de conclusies die je kunt trekken uit deze experimenten een rol spelen op macroniveau.

Proef 1: Wit en zwart zand

Benodigdheden:

- 2 temperatuursensoren
- Stopwatch/horloge
- 2 witte (Chinees)bakjes
- Water op kamertemperatuur
- aluminiumfolie
- Bouwlamp of andere sterke lichtbundel
- Droog wit zand en droog zwart zand

Uitvoering:

Eerst gaan we de thermometers ijken: leg de 2 temperatuursensoren in een bakje met water. Kijk of ze dezelfde temperatuur aangeven. Als dit niet het geval is: kies een thermometer waarvan je de waarde gaat gebruiken en trek van de andere thermometer gedurende de rest van het practicum het nu waargenomen verschil af. (Als je andere temperatuursensoren gebruikt die op een andere manier geijkt zijn is dat natuurlijk ook goed.) In de proeven is de *hoogte* van de temperatuur niet zo heel belangrijk, maar wel het temperatuur*verschil*!



Figuur 2.18 IJken van de thermometers



Figuur 2.19 Proefopstelling met wit en zwart zand

Vul het ene bakje met ongeveer 3 cm wit zand en de ander met 3 cm zwart zand en zet ze naast elkaar. Steek door de zijkant van ieder bakje een temperatuursensor, zodanig dat ze ongeveer 1 cm onder het zand zitten. Het is belangrijk dat beide sensoren even diep zitten! Schrijf de temperatuur van beide soorten zand op in Tabel 2.6. Hang de bouwlamp aan een standaard precies boven het midden van de bakjes, zodat beide dezelfde hoeveelheid straling zullen ontvangen, als de lamp aan gaat. Zorg dat de straling niet rechtstreeks op het metalen meetgedeelte van de thermometer kan vallen: dek dit af met aluminiumfolie. Zet de bouwlamp aan en laat de stopwatch lopen.

Noteer de temperaturen in Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Temperaturen zwart en wit zand

	Tijd (minuten)			
	0	**2**	**4**	**6**
Temp. wit zand				
Temp. zwart zand				

Opdrachten:

1. In welk bakje stijgt de temperatuur het snelst? Door welke eigenschap van het zand wordt dit bepaald?
2. Waarom is het zo belangrijk dat de sensoren even diep zitten?
3. Als je op een hete dag op het strand een kuil graaft, merk je dat het dieper gelegen zand een stuk koeler is. Met welke eigenschappen van het zand heeft dit te maken?

Proef 2: Nat en droog zand

Vul nu twee bakjes met hetzelfde zand. Als je het zand van het vorige experiment gebruikt, zorg dan dat je het goed mengt, zodat beide bakjes dezelfde temperatuur hebben. Steek na het mengen de temperatuursensoren weer op dezelfde plek als in de vorige proef (ongeveer 1 cm onder de rand). Controleer of de temperaturen ongeveer gelijk zijn en maak dan het zand in één bakje vochtig met wat water (op kamertemperatuur, dit heeft je docent klaarstaan). Het zand moet goed vochtig zijn, maar er mogen geen plassen water zichtbaar zijn. Kijk of de temperaturen na het toevoegen nog ongeveer gelijk zijn; zo niet, wacht dan even tot ze weer gelijk zijn. Zet de lamp aan en noteer het verloop van de temperaturen in Tabel 2.7.



Figuur 2.20 Proefopstelling meten van de temperatuur boven het zand.

Zet de lamp uit en laat het zand even afkoelen. Haal de thermometers uit de bakjes en steek ze nu door de zijkant *boven* het zand. Zorg dat je beide thermometers weer op dezelfde hoogte hangt en op dezelfde manier afdekt met aluminiumfolie (of eventueel wit papier), zodat er geen directe straling op de sensors valt (zie Figuur 2.20). Zet nogmaals de bouwlamp aan en noteer nu de temperaturen van de lucht boven het zand.

Tabel 2.7 Temperatuurverloop droog/nat zand, resp. droge/natte lucht

	Tijd (minuten)			
	0	**2**	**4**	**6**
Temp. droogzand				
Temp. natzand				
Temp. drogelucht				
Temp. nattelucht				

4. Hoe verandert de warmtegeleidingscoëfficiënt van het zand door het toegevoegde water?
5. Beschrijf hoe de termen uit de energiebalans (H, L_vE en G) zich gedragen in dit experiment.
6. Hoe komt het dat de lucht boven het droge zand warmer is dan de lucht boven het natte zand?

Weerman met passie en ambitie

Iedereen kent hem als weerman van televisie. Weinig mensen kennen de persoon erachter. Gerrit Hiemstra vertelt: over zijn studie, passie voor het weer, ambitie in het ondernemen en zijn mening over de klimaatdiscussie.

“Wat ik het leukste vind aan mijn werk? Dat ik mensen mag vertellen over iets waar ik interesse in heb! Minder leuk is dat je tegelijkertijd zo beperkt bent in je mogelijkheden, want ik heb veel meer te vertellen. Maar dat kan niet tijdens het weerbericht van het NOS Journaal!” Breed grijnzend zit Gerrit Hiemstra in zijn bureaustoel in het kantoor van de NOS op het Mediapark te Hilversum. Op de achtergrond klinken vanuit de grote ruimte telefoon- en stemgeluiden van de tientallen mensen die druk aan het werk zijn achter talloze computerbeeldschermen. “Ik vertel er graag over. Veel van het weer kan je niet zien; temperatuur, luchtdruk, wind en vochtigheid. Maar ik wéét dat het er is en hoé het werkt. Een leek ziet alleen die wolk en vraagt zich misschien af: Hoe kan het nou dat hier een wolk is, en daar niet? Ik zie ook de processen van waaruit die wolk ontstaat. Het is fantastisch daarover te vertellen!”

Op de vraag of hij nu dezelfde studiekeuze zou maken, volgt een verrassend antwoord. Gerrit: “Dat denk ik niet. Ik denk dat ik dan iets zou gaan doen in de richting van Bouwkunde of Architectuur. Niet dat ik spijt heb van mijn keuze, helemaal niet.” Gerrit studeerde aan Wageningen University waar hij koos voor de specialisatie Meteorologie (de huidige opleiding Bodem Water Atmosfeer). “ Ik ben niet iemand die van jongs af aan voor ogen had wat ik wilde gaan doen, dus heb ik iets gekozen wat me wel leuk leek. Ook bij een andere keuze zou ik uiteindelijk een vergelijkbare functie gehad hebben. Je komt , als het goed is, toch daar uit waar je het beste tot je recht komt.“ Gerrit blikt terug op wat zijn studie hem heeft gebracht: “Een écht vak, dat leer je niet op een universiteit. Wat je wel leert is een bepaalde manier van denken om problemen te benaderen. En wat Wageningen extra met zich meebrengt is het praktische aspect. Dat valt mij vaak op: Een Wageninger komt met oplossingen.’’

Na zijn studie vond Gerrit al snel een baan. “Toen ik afstudeerde, startte MeteoConsult net op. Ik had gesolliciteerd en kon zo beginnen. Als mijn interesse in meteorologie meer van inhoudelijke aard was geweest, had ik waarschijnlijk carrière gemaakt in het onderzoek.” Maar het onderzoek trok hem minder dan het bedrijfsleven. Gerrits ambities zaten in het ondernemen. Later richtte hij een eigen bedrijf op: Weeronline. “De meeste mensen kennen mij als weerpresentator van de NOS, maar weten niet dat ik ook een eigen bedrijf heb gehad”. Inmiddels heeft hij Weeronline verkocht en is bezig investeringsfondsen op te zetten om te participeren in andere bedrijven. “Je leest de kranten, je spreekt met mensen. Dan komt er vanzelf iets langs dat interessant is. Dan ga je daarmee verder. In de toekomst zou ik graag nog ‘iets leuks’ doen: iets op poten zetten. Dat is trouwens een belangrijk keuzecriterium”, vervolgt Gerrit: “Als je niet weet wat je moet doen, doe iets wat je leuk lijkt, dan komt het eigenlijk altijd goed!”

Niet elke goede meteoroloog kan een goede weerpresentatie geven. Gerrit vertelt over zijn beroep als weerman bij de NOS. “Als weerpresentator moet je wel meteorologische kennis hebben, maar dat is niet het enige waar het om gaat. Je moet begrijpen hoe je deze kennis aan andere mensen kan overbrengen. Mensen kunnen maar een beperkte hoeveelheid informatie opnemen in twee minuten tijd. Je hebt de neiging zoveel mogelijk gegevens in een weerpraatje te stoppen, maar je moet juist doseren. Je kunt het niet zomaar leren, je moet het aanvoelen. Zo heb ik bijvoorbeeld geen interne opleiding of cursus hoeven volgen. Ik heb vier dagen meegelopen met Erwin Krol en werd toen al de studio in geduwd.”

De meteoroloog van 25 jaar geleden is totaal anders dan die van nu. “Vroeger kreeg je een weerkaartje voor je neus en vulde je een formulier in met daarop de weersverwachting. Voor iedere plek voerde je zelf een berekening uit. Neem bijvoorbeeld de weersverwachting voor een schip op zee, dan rekende je vanaf een weerkaart de windkracht en de golfhoogte uit. Nu geef je alleen nog

toelichting op een door de computer gegenereerde verwachting. Deze kun je zelf vrijwel niet meer verbeteren. Ervaring speelt nu veel minder een rol dan vroeger."

Bij het opstellen van het weerbericht is er normaal gesproken geen speciale aandacht voor het stadsklimaat, vertelt Gerrit. "Een enkele keer wel, bijvoorbeeld bij een hittegolf. Dan vertel je dat het in de stad erg heet zou kunnen worden. Je zou dit in een weerbericht nog eens extra benadrukken; als je in de stad uit de wind, in de zon op een terrasje gaat zitten, kan die 25 graden wel aanvoelen als 35 graden. Mensen schrikken zich rot, terwijl dat eigenlijk heel normaal is. Je moet hier dus heel voorzichtig mee zijn. Bovendien, mensen weten vaak op gevoel wel dat 25 graden in de stad anders voelt dan op het platteland."

Naast zijn werk als ondernemer en weerpresentator geeft Gerrit ook lezingen, bijvoorbeeld over klimaatverandering. Op dit vlak is hij erg duidelijk en scherp van tong. "Sommige critici beweren dat de temperatuur helemaal niet stijgt, maar juist daalt. Hou toch op! Dan hou je gewoon mensen voor de gek!" Wat vaak een rol speelt in de klimaatdiscussie is dat veel mensen het probleem niet willen zien. "Wat is er nou op tegen om ons energiezuiniger te organiseren? Heel veel klimaatdiscussies gaan eigenlijk niet over klimaatverandering, maar over *verandering*", vat Gerrit samen. "Het komt er op neer dat mensen niet *willen* veranderen. Veel mensen denken gewoon niet verder vooruit dan hun volgende vakantie," sluit Gerrit zijn pleidooi af, "en dat is iets wat je leert op je studie. Verder kijken dan je neus lang is, verder in de toekomst kijken dan de volgende vakantie."

Wil je meer interviews lezen? Kijk dan op www.wereldvanwageningen.nl

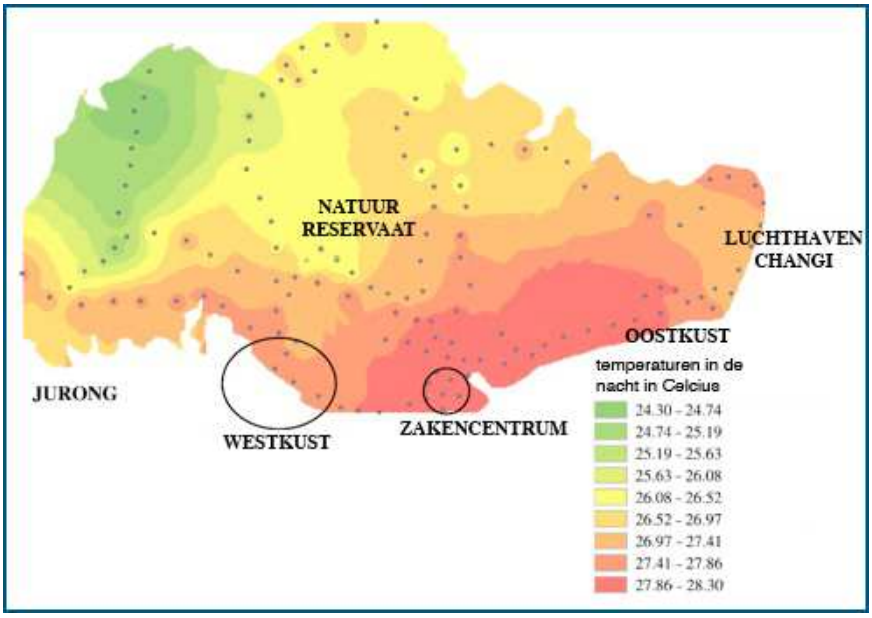
3 Deel II Klimaat in de stad

In deel I heb je gezien dat het verschil in landgebruik tussen stad en platteland leidt tot het Urban heat island-effect. Om dit verschijnsel te verklaren hebben we de stralingsbalans en de energiebalans bestudeerd. In deel II zullen we verder nagaan waardoor het weer in de stad bepaald wordt en hoe het door de inwoners wordt ervaren. We vliegen naar Singapore, een dichtbevolkte stadstaat in Zuid-Oost-Azië, met veel hoge gebouwen en een nog steeds toenemend aantal inwoners.

Siao Lee heeft ons uitgenodigd om een tijdje bij hem in Singapore te logeren, zodat wij kunnen voelen hoe het is om door een miljoenenstad te lopen. We kunnen dan ook zelf ervaren dat de zogeheten gevoelstemperatuur niet altijd gelijk is aan de temperatuur die door de thermometer wordt aangegeven. Dat komt omdat ook de luchtvochtigheid en de windsnelheid hierbij een rol spelen. Daarom zullen we ook die onderwerpen betrekken bij ons onderzoek naar het stadsklimaat van Singapore.

3.1 Temperatuur in de stad

Verstedelijking betekent dat veel van de natuurlijke ondergrond vervangen wordt door asfalt, beton en stenen. De groei van een metropool, met zijn hoge gebouwen en vervanging van natuur in de stad door pleinen, huizen en wegen, veroorzaakt uiteindelijk het Urban Heat Island effect. Ook in Singapore doet men hier onderzoek aan.

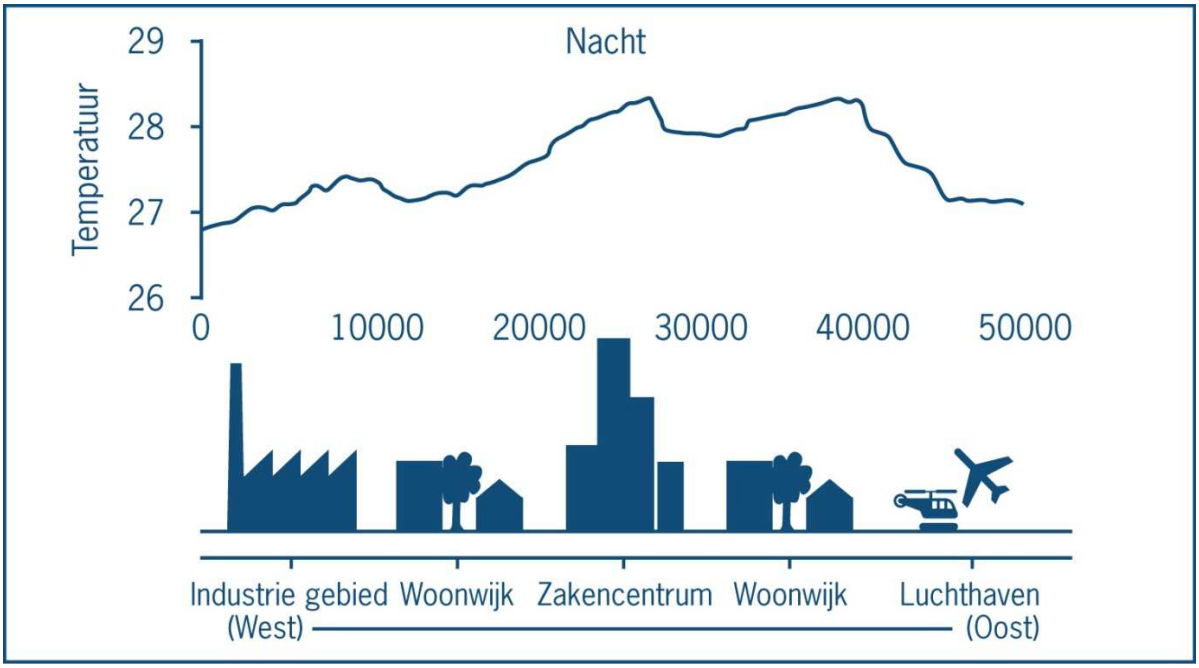


Figuur 3.1 Luchttemperatuur in de nacht in Singapore (Kardinal Jusuf et al., 2007)

Hoe stel je vast dat een stad een Urban Heat Island is? De simpelste manier is uiteraard door het meten van de temperatuur. In Figuur 3.1 zie je een kaartje van Singapore, met daarin de temperaturen in de nacht aangegeven door middel van verschillende kleuren. De temperaturen zijn gemeten door met een mobiele thermometer door de stad te rijden; het traject van de mobiele thermometer is met de grijze punten aangegeven.

In het kaartje zijn ook de belangrijkste gebieden in Singapore weergegeven. We kijken eerst naar het westen, naar Jurong. Dit is een groot industriegebied met een haven. Hier staan veel vervuilende bedrijven met heel weinig groen in de buurt. De temperatuur loopt hier overdag flink op, maar ’s nachts kan het er ook snel afkoelen. In het natuurreservaat blijkt het ’s nachts een stuk koeler te zijn dan in de industriegebieden; dit is ook overdag zo. Het zakencentrum is het warmst.

Deze gegevens kunnen we ook in een lengtedoorsnede zetten. In Figuur 3.2 zie je hoe het temperatuurverloop is wanneer je ‘s nachts van het westen (Industriegebied Jurong) naar het oosten (vliegveld Changi) gaat. We zien twee pieken in de grafiek: bij het zakencentrum en bij het dichtbebouwde woongebied aan de oostkust: het Urban Heat Island. Overdag zijn de temperaturen anders, maar het gemiddelde over de hele dag vertoont vaak hetzelfde beeld als in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Omgevingstemperatuurverloop door Singapore in de nacht (Kardinal Jusuf et al., 2007)

We zien in dit korte onderzoek al heel veel opvallende zaken voorbij komen. Waarom is het in het natuurgebied koeler dan in het centrum? Waarom is het ’s nachts het warmst in het zakencentrum? En waarom koelt het ’s nachts sneller af in de industriegebieden dan in de woonwijken en het zakencentrum van Singapore?

Deze vragen zijn niet allemaal heel eenvoudig te beantwoorden. De inkomende en uitgaande straling (hoofdstuk 3.2) speelt een rol, maar ook windsnelheid en wrijving (hoofdstuk 3.3) en de relatieve vochtigheid (hoofdstuk 3.4). En dan kan het ook nog zo zijn dat de gemeten temperatuur afwijkt van de temperatuur die wij zelf voelen, de gevoelstemperatuur (hoofdstuk 3.5).

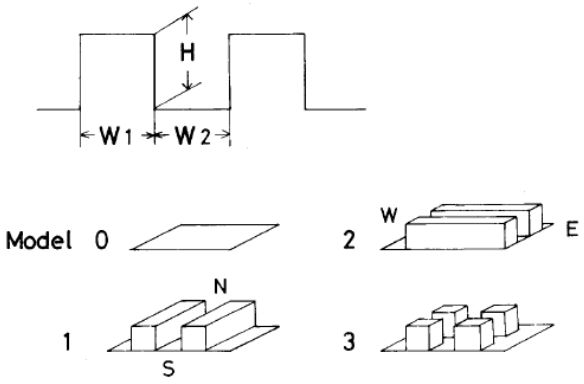
Opdracht 21.

Hoe verklaar je dat het overdag bij het industriegebied het warmst is?

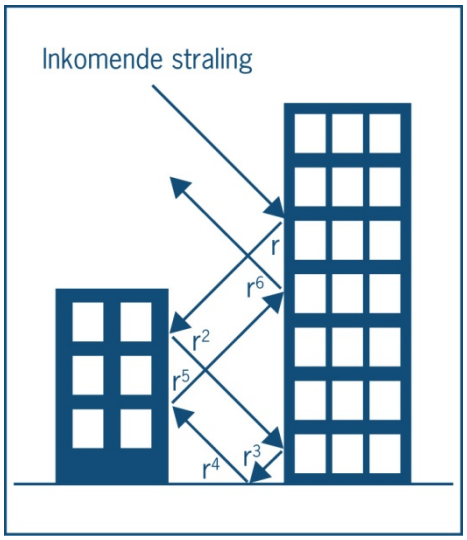
3.2 Straling en energie in de stad

In deel I heb je de componenten van de stralingsbalans leren kennen. Je weet wat er gebeurt met de zonnestraling die op het aardoppervlak valt, en met de langgolvige straling die de aarde zelf uitzendt. Bij de berekening van deze stralingscomponenten hebben we echter nog geen rekening gehouden met gebouwen die in de weg kunnen staan, met hoe de straling door asfalt en beton wordt opgenomen of juist gereflecteerd, en met de straling die deze gebouwen zelf uitzenden.
In dit hoofdstuk gaan we dieper in op het effect van bebouwing en van de ruimtelijke verdeling van de stad (dus hoe de gebouwen in een stad liggen) op de stralings- en energiebalans.

3.2.1 Kortgolvige straling



Figuur 3.3 De modelopstelling uit onderzoek Aida (1982)



Figuur 3.4 Schematische weergave straling tegen hoge gebouwen

Het belangrijkste doel van dit hoofdstuk is na te gaan hoe je kunt berekenen hoeveel van de kortgolvige straling die de stad invalt er daadwerkelijk geabsorbeerd wordt en hoeveel er gereflecteerd wordt. Hiervoor moet het albedo worden bepaald. Als het albedo hoog is, wordt veel straling gereflecteerd en dus weinig straling geabsorbeerd door het oppervlak; het zal dan dus minder snel opwarmen. Als het albedo juist lager ligt dan normaal, wordt er meer straling geabsorbeerd, en dan zal het oppervlak en de lucht vlak daarboven veel sneller warm worden.

Omdat het erg moeilijk is om voor een echte stad het albedo te bepalen, doet men onderzoek met schaalmodellen van steden. Bij zo'n onderzoek meet men de inkomende en uitgaande zonnestraling van een plat vlak en van maquettes met blokken die gebouwen moeten voorstellen. Door deze blokken te variëren in bijvoorbeeld de grootte, de hoogte en hoe dicht ze bij elkaar liggen, kun je heel eenvoudig de ruimtelijke verdeling van een stad nabootsen.

In Figuur 3.3 zien we een voorbeeld van de opstelling van deze blokken in een onderzoek. Model 0 is het platte vlak, dit stelt de kale bodem voor. In model 1 zijn de gebouwen in de noord-zuid richting neergezet, terwijl ze in model 2 in de oost-west richting staan. In model 3 worden vierkante gebouwen gebruikt die los van elkaar staan. In zo'n onderzoek kan men de hoogte (H) veranderen, maar ook de breedte van de gebouwen (W_1) en de ruimte tussen twee gebouwen (W_2). Deze tussenruimte wordt ook wel een **vallei** genoemd.

In deze vallei valt zonnestraling binnen. In plaats van dat deze straling rechtstreeks op de grond valt, zal deze straling grotendeels eerst tegen de zijkant van de gebouwen aan komen. Hier wordt een deel van de straling geabsorbeerd en een deel gereflecteerd naar de overkant van de vallei. Door de overkant wordt de straling ook weer geabsorbeerd en gereflecteerd en dit gaat zo door tot aan de straat. Ook hier wordt de straling voor een deel opgenomen en de rest wordt teruggekaatst richting

de atmosfeer. Op de terugweg zal de overgebleven straling opnieuw tegen de omstaande gebouwen aan ketsen. Terwijl de straling tegen de muren van de gebouwen valt, zal ook iedere keer veel warmte opgenomen worden. Hoe dieper de vallei, hoe meer straling er dus wordt opgenomen en blijft hangen en hoe minder straling er op het eind overblijft en terug de atmosfeer in verdwijnt. Zie Figuur 3.4.

Tabel 3.1 Albedo resultaten voor diverse opstellingen uit onderzoek K. Jusuf et al. (2007)

Model	Dimensies gebouwen		Gemiddeld albedo
	H/W_1	W_1/W_2	
0	0	0	0.40
1	1.0	1.0	0.29
2	1.0	1.0	0.29
3a	0.5	0.5	0.32
3b	1.0	1.0	0.27
3c	2.0	1.0	0.23

Tabel 3.1 laat duidelijk zien dat alleen al de aanwezigheid van gebouwen een groot effect heeft op het albedo van het oppervlak. Vergelijk het albedo van model 0 met dat van de andere modellen: het albedo van bebouwd terrein is al gauw meer dan een kwart lager dan dat van een kale vlakte. Dit betekent dat er dus een stuk meer zonnestraling wordt opgenomen door de gebouwen. Overigens geldt deze tabel alleen voor dit specifieke onderzoek: in werkelijkheid zullen de albedo's flink verschillen van de waarden die gevonden zijn in deze meetopstelling, maar het effect in een echte stad is hetzelfde.

Er is ook getest of de hoogte van gebouwen en de ruimte tussen de gebouwen invloed heeft. Dit kunnen we zien door de modellen 3a, 3b en 3c met elkaar te vergelijken. In model 3a is de breedte van de gebouwen twee keer zo groot als de hoogte ervan en is de ruimte tussen de gebouwen twee keer zo groot als de breedte van de gebouwen zelf. Je kunt hierbij denken aan een ruim opgezette woonwijk met bungalows of lage huizen. Model 3b zijn vierkante huizen die even hoog als breed zijn en die dichter bij elkaar liggen, telkens op een afstand van precies één huis. Dit lijkt op een gewone woonwijk met redelijk grote huizen met niet al te ruime tuinen. Je ziet dat het albedo van model 3b een stuk lager is dan het albedo van model 3a. Het zal in de bungalowwijk dus minder warm zijn dan in de gewone woonwijk. Model 3c bootst de aanwezigheid van kleine flatgebouwen na, met blokken die twee keer zo hoog zijn als hun breedte. Hierdoor wordt nog meer de zonnestraling opgevangen en geabsorbeerd, waardoor het albedo nog veel lager ligt.

Laten we dit eens toepassen op Singapore. Het zakencentrum van deze stad wordt gekenmerkt door hele hoge gebouwen met weinig tussenruimte en weinig groen. Volgens Tabel 2.2 (in Deel I) zal dit zakencentrum gemiddeld een albedo van 0.15 hebben. Het natuurreservaat in het noorden van de stad heeft een bijna twee keer zo hoog albedo (0.25). De woonwijken, met hier en daar wat gras en bomen, zullen wat albedo betreft hier tussenin zitten. Afgaande op het albedo voor de inkomende zonnestraling, zal de meeste warmte dus opgevangen worden in het zakencentrum. Overdag kan het om een andere reden in het industriegebied en op het vliegveld nóg warmer zijn dan in het zakendistrict. Dit wordt behandeld in de volgende paragraaf.

Opdracht 22.

In Figuur 3.4. is aangegeven wat er gebeurt als er een zonnestraal binnenvalt in een vallei. Neem aan dat het gebouw elke keer 60% van de straling reflecteert. Hoeveel van de straling is er in het hele traject (van r^1 tot r^6) van de aangegeven route geabsorbeerd?

3.2.2 Langgolvige straling

Net als de gereflecteerde kortgolvige straling wordt ook de uitgaande langgolvige straling beïnvloed door de aanwezigheid van de gebouwen in de stad. Overdag wordt de energiehuishouding voornamelijk beïnvloed door de inkomende kortgolvige straling van de zon, maar 's nachts is alleen de langgolvige stralingsbalans van belang. En natuurlijk stoten wij mensen zelf ook warmte uit bij de opwekking van energie, het gebruik van airco's, het gebruik van auto's, bussen etc.

In Deel I (2.3.5) hebben we gezien dat de langgolvige stralingsbalans afhangt van de inkomende straling uit de atmosfeer en de uitgaande langgolvige straling van de bodem:
$L^* = L_{in} - L_{uit}$

Op straatniveau in de stad komt er nog een extra factor bij, omdat een deel van de langgolvige straling die de gebouwen uitzenden naar beneden gericht is. Naarmate de gebouwen een groter deel van de hemel afschermen, neemt de grootte van deze factor toe. Dit effect wordt gemeten door te bekijken hoeveel van de hemel zichtbaar is op een foto (van een stad bv.) die gemaakt is met een fisheye lens (Figuur 3.5).
Ook andere objecten die de hemel afschermen zoals bomen en struiken zenden langgolvige straling deels naar beneden toe uit en dus zal de temperatuur aan de bodem 's nachts onder bomen en struiken hoger zijn dan zonder deze objecten.

Op een groot industriegebied zal het 's nachts juist veel meer afkoelen dan in een woonwijk of zakencentrum, omdat daar een groter deel van de hemel 'vrij' is en er dus minder langgolvige straling op het aardoppervlak terechtkomt.



Figuur 3.5 Een foto gemaakt met een fisheye-lens, die de hemel boven een stad weergeeft.

3.2.3 De energiebalans

In deel I heb je kennisgemaakt met de latente warmtestroom, de voelbare warmtestroom en de bodem warmtestroom. De verhouding tussen de latente warmtestroom en de voelbare warmtestroom (Bowenverhouding) wordt bepaald door de aanwezigheid van vocht. Als er veel water beschikbaar is om te verdampen, is de latente warmte groot en is de Bowen-verhouding klein.

Hoe zit het met de beschikbaarheid van water in de bodem van de stad? Doordat de bodem van een stad veelal bedekt is met asfalt, beton en ander hard materiaal, wordt het regenwater niet opgeslagen in het bodemvocht, maar verdwijnt het in de riolering of naar lager gelegen delen. Daarnaast wordt de beschikbaarheid van water beïnvloed door de aanwezigheid van planten, in het bijzonder bomen (deze halen veel water uit de bodem en verdampen het), maar in de stad is relatief weinig vegetatie. Gevolg: de beschikbaarheid van water aan het oppervlak is klein.

Op het platteland, waar veel minder van de bodem bedekt is, blijft het regenwater grotendeels op de plaats waar het is neergekomen en zakt het daar de bodem in. Doordat dit heel langzaam gaat, kan er ondertussen veel water verdampen. Het gevolg is dat de latente warmtestroom in de stad veel kleiner is dan op het platteland. Dit betekent automatisch dat de voelbare warmtestroom groter is (als we aannemen dat G en Q* constant zijn). Dus is het in de stad warmer. (Als de warmte in de stad een probleem wordt, kan een deel van de oplossing dus zijn: meer open stukken in de stad, met daarin gras, bloemperkjes en/of bomen, zodat de verdamping van water groter is.)

Samengevat: door het verschil tussen de stralings- en energiebalans van de stad en die van het platteland eromheen ontstaat het Urban Heat Island-effect.

We zullen in de volgende hoofdstukken nagaan hoe het zit met de wind en de relatieve luchtvochtigheid in onze vier wereldsteden.

Opdracht 23.

Schets aan de hand van Tabel 3.1 en Figuur 3.3 de opstellingen van model 3a, 3b en 3c, zoals die gebruikt zijn in het onderzoek. Leg uit waarom je ze zo getekend hebt.

Opdracht 24.

Hoeveel procent van de zonnestraling wordt er minder teruggekaatst in het zakencentrum in vergelijking met een ruim opgezette woonwijk?

Opdracht 25. De wijk Norrmalm is het commerciële en culturele hart van Stockholm, met tal van hotels en winkels. Het stadsleven is hier op zijn drukst. De buitenwijk Liljeholmen, een wijk met ruim opgezette bungalows, is juist erg rustig. In Norrmalm vind je veel hoge gebouwen en smalle straatjes.

a. Op een mooie winterdag bereikt ongeveer 80 $W*m^{-2}$ kortgolvige zonnestraling het aardoppervlak in Stockholm. Schat hoeveel van deze inkomende straling weer terug wordt gekaatst richting de atmosfeer.

b. ‘s Nachts valt er een dik pak sneeuw dat heel Stockholm gelijkmatig bedekt. De dag daarop klaart het weer gelukkig op en warmt de zon de aarde op. Vergelijk de wijken Norrmalm en Liljeholmen: Waar zal de sneeuw het snelste smelten? En waar blijft de meeste sneeuw liggen? Welk effect heeft deze sneeuw op het albedo van het oppervlak? Wat zal dit doen met de temperatuur?

3.3 Windsnelheid en wrijving

Singapore ligt aan zee. Een factor die aan zee een belangrijke rol speelt is de wind. Zoals je waarschijnlijk weet, wordt wind veroorzaakt door luchtdrukverschillen. De windsnelheid aan het aardoppervlak wordt grotendeels bepaald door het evenwicht tussen enerzijds de kracht die ontstaat door het verschil in luchtdruk en anderzijds de wrijvingskracht door het aardoppervlak. Om te begrijpen waardoor de windsnelheid in een stad wordt bepaald en hoe dit een rol speelt in het stadsklimaat moeten we ons verdiepen in de invloed van het aardoppervlak op de wind.

Op grote hoogte waait het harder dan aan de grond. Dit komt omdat de wind wrijving ondervindt van het aardoppervlak. De wind wordt dus meer afgeremd naarmate hij dichter bij de grond komt. Het verloop van lagere windsnelheden aan de grond naar hogere windsnelheden hogerop wordt het **windprofiel** genoemd. Het blijkt dat op bewolkte en winderige dagen het windprofiel eruitziet als een logaritme, zoals je kunt zien in Figuur 3.6. In heldere nachten en op zonnige dagen geldt dit niet meer exact, maar voor onze toepassing is het nauwkeurig genoeg. Ook tussen gebouwen en vegetatie wordt de wind verstoord en geldt het logaritmisch windprofiel niet. Hoe sterk de wind wordt afgeremd aan de grond, hangt af van het oppervlak: over een kale vlakte waait het harder dan midden in de stad.

Een formule die vaak wordt gebruikt voor het modelleren van het windprofiel is:

$$U = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \qquad \textbf{(9)}$$

met
U : Windsnelheid [m/s]
u_* : Wrijvingssnelheid [m/s]
k : Von Karman constante: 0.4 [-]
z : hoogte vanaf het aardoppervlak [m]
z_0 : ruwheidslengte [m]
$\ln$: natuurlijke logaritme.

Tabel 3.2 Overzicht van verschillende landschapstypen en de ruwheidslengte ervan.

Landschapsstijl	Ruwheidslengte z_0 (m)
Wateroppervlak	0.00002
Compleet open terrein met rustig oppervlak	
Vlakke wegen op vliegvelden, bewegend gras	0.0024
Open landbouwzone zonder omheiningen of hagen en zeer verspreide gebouwen	0.03
Landbouwzone met sommige huizen en tot 8 meter hoge hagen met een minimumafstand van 500 meter	0.1
Grote steden met hoge gebouwen	0.8
Grote steden met hoge gebouwen en wolkenkrabbers	1.6

De ruwheidslengte is een maat voor de ruwheid van het oppervlak. Deze heeft te maken met de hoogte en de verspreiding van obstakels op het oppervlak (grassprieten, bomen, huizen etc.). In Tabel 3.2 is een overzicht gegeven van verschillende ruwheidslengten. Daarnaast is er de wrijvingssnelheid, die evenredig is met de wrijvingskracht. De wrijvingskracht per vierkante meter

grondoppervlak is $\rho \cdot u_*^2$. Met gebruik van het logaritmisch windprofiel kun je de wrijvingskracht van de wind op het oppervlak dan schrijven als:

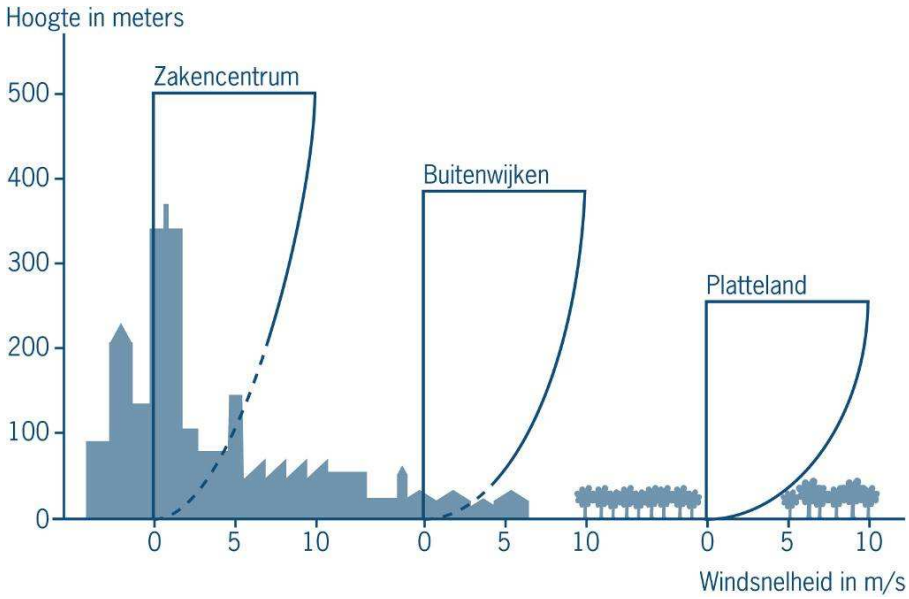
$$F_w = \rho u_*^2 = \rho U^2 C_w A \text{ met } C_w = \frac{k^2}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$

met
- F_w: Wrijvingskracht [N]
- A : Eén vierkante meter grondoppervlak [m^2]
- ρ : Dichtheid van de lucht (kg/m^3)
- C_w: Wrijvingscoëfficient

Deze C_w waarde is vergelijkbaar met de C_w waarde van een auto: naarmate de auto een hogere C_w waarde heeft zal de lucht er minder gemakkelijk langs gaan. In dit geval is het niet de vorm van de auto, maar de structuur van het landschap die bepaalt hoe gemakkelijk de lucht eroverheen stroomt. Een ruw landschap met veel bomen en obstakels (met een grote ruwheidslengte z_0) zorgt voor veel wrijving en een hoge C_w waarde. Bij een ruw landschap gecombineerd met een hoge windsnelheid is de wrijvingskracht (en daarmee de wrijvingssnelheid) dus het hoogst.

In de winter is het best aangenaam als het niet zo hard waait. Maar wanneer het in de zomer nauwelijks waait, is er minder wind die de warme lucht kan verplaatsen. In de stad versterkt een lage windsnelheid dus het Urban Heat Island-effect. Verder heeft een lage windsnelheid ook belangrijke gevolgen voor de luchtkwaliteit in een stad, omdat schadelijke stoffen in de lucht minder snel de stad uit worden getransporteerd door de wind.

Wanneer we deze kennis toepassen op Singapore, kunnen we begrijpen waarom het ook qua wind niet erg aangenaam zal zijn om in het stadscentrum te wonen. Door de hoge gebouwen staat er nauwelijks wind en blijft de warmte dus gemakkelijk hangen. Dit zal zeker een rol spelen bij de hogere temperaturen die worden waargenomen in het zakencentrum. Daarnaast blijven alle uitlaatgassen hangen op straatniveau, waardoor de luchtkwaliteit vaak slecht zal zijn.
In Stockholm is veel water. Water heeft een lage ruwheidslengte, waardoor de wind de lucht in deze stad veel beter kan mengen.



Figuur 3.6 Het windprofiel op verschillende plaatsen in de stad en op het platteland (Baumbach, G. 1991) N.B. Waar de lijn gestippeld is, is het windprofiel niet logaritmisch.

Opdracht 26.

In de stad waait het aan de grond op een hoogte van 2 meter met een snelheid van 3 m/s. Bereken de windsnelheid op 80 meter hoogte (neem aan dat het logaritmisch windprofiel toepasbaar is op het hele interval van 2 tot 80 meter hoogte).

Opdracht 27.

Siao Lee woont in 'The Sail', een wolkenkrabber van 245 m hoog in de wijk Marina Bay, midden in het zakendistrict van Singapore. Op de hoogte van zijn appartement (200 m) waait de wind met 10 m/s. We verwaarlozen de verstoring van de wind rondom het gebouw. Ten noorden van Singapore, op het platteland, blijkt de windsnelheid op 200 meter hoogte ook 10 m/s te zijn.

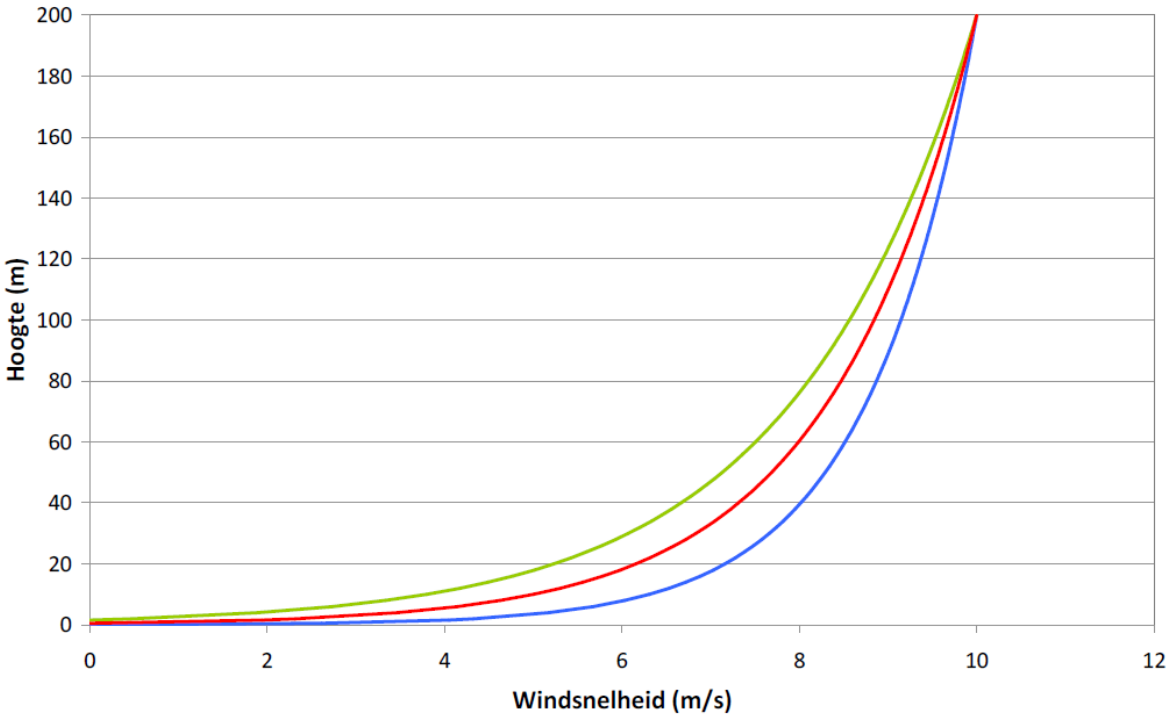
Bereken de wind op leefhoogte (2 meter) in het stadscentrum en op het platteland. Gebruik daarbij voor de ruwheidslengte de waarden 0.03 en 1.6 uit Tabel 3.2. Neem aan dat het logaritmisch windprofiel toepasbaar is op het hele interval van 2 tot 200 meter hoogte.



Figuur 3.7 Wolkenkrabber 'The Sail' in Singapore

Opdracht 28.

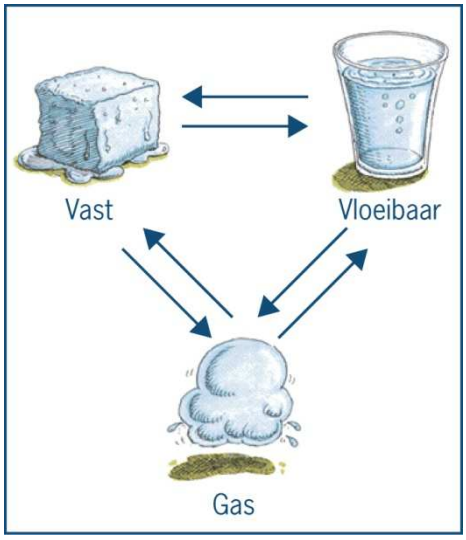
Hieronder zie je 3 verschillende grafieken voor het logaritmisch windprofiel, waarbij we aannemen dat de windsnelheid op 200 meter 10 m/s is. Bij welk van de volgende drie gebieden in Singapore hoort welk windprofiel: Changi (luchthaven), CBD (zakencentrum) en West Coast (woonwijk, zie figuur 3.1)?



Figuur 3.8 Drie windprofielen voor drie verschillende wijken in Singapore

3.4 Relatieve luchtvochtigheid

Water kan in de atmosfeer in drie fasen voorkomen: als ijs (vaste fase), als waterdruppeltjes (vloeibare fase) en als waterdamp (gasfase). Zie Figuur 3.9.



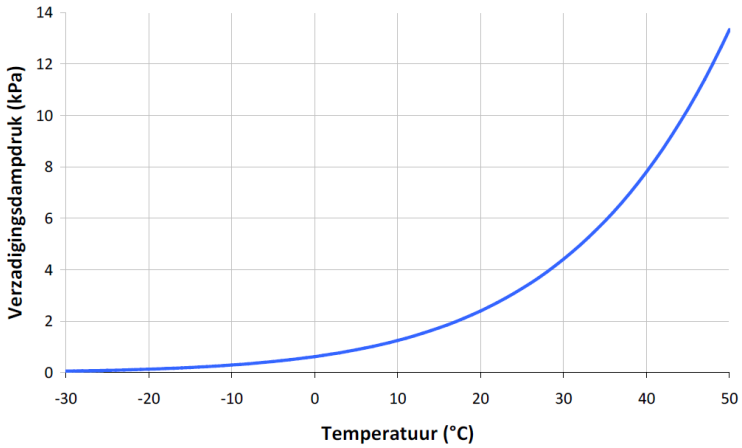
Figuur 3.9 Faseovergangen water

We richten ons nu voornamelijk op de waterdamp die zich in de lucht om ons heen bevindt, water in gasfase dus. De hoeveelheid waterdamp in de lucht is niet constant. Een van de grootheden waarmee kan worden aangegeven hoeveel waterdamp zich in de lucht bevindt, is de **relatieve vochtigheid (RV)**. Deze grootheid wordt, zoals alle relatieve grootheden, in percentages uitgedrukt. De relatieve vochtigheid is het percentage waterdamp dat zich in de lucht bevindt, waarbij geldt dat als de relatieve vochtigheid 100% is, de lucht de maximale hoeveelheid waterdamp bevat. We noemen de lucht dan verzadigd. In Nederland varieert de relatieve luchtvochtigheid tussen 20% en 100%. Met de volgende formule kan de relatieve vochtigheid berekend worden:

$$RV = e / e_{s*} \; 100\% \qquad (10)$$

Waarin:

RV:	relatieve vochtigheid	[-]
e:	dampdruk	[Pa]
e_s:	verzadigingsdampdruk	[Pa]



Figuur 3.10 Verzadigingsdampdruk als functie van de temperatuur

De **dampdruk** is de kracht die de waterdampmoleculen op een oppervlak uitoefenen. Ook de andere moleculen in de lucht, zoals zuurstof en stikstof, oefenen een deel van de totale luchtdruk uit. Hier hebben we het dus over dat deel van de luchtdruk dat veroorzaakt wordt door waterdamp.
Als de lucht verzadigd is, is de dampdruk maximaal: de **verzadigingsdampdruk**. Wanneer er zoveel waterdamp in de lucht zit dat de dampdruk de verzadigingsdampdruk overschrijdt, zal een deel van de waterdamp gaan condenseren. De waterdamp (gasfase) verandert dan in waterdruppeltjes (vloeibare fase): we zien wolken of mist verschijnen. De waarde van de verzadigingsdampdruk e_s is afhankelijk van de temperatuur. De relatie tussen de verzadigingsdampdruk en de temperatuur wordt gegeven door:

$$e_s = e_0 \cdot \exp\left[\frac{L}{\Re_v} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \qquad (11)$$

Waarin: $T_0 = 273$ [K]

$e_0 = 0.611$ [kPa]

$\frac{L}{\Re_v} = 5423$ [K]

In Figuur 3.10 kun je zien hoe de e_s afhangt van de temperatuur: e_s neemt toe wanneer het warmer wordt. Dit betekent dat de lucht meer waterdamp kan bevatten naarmate de temperatuur hoger is.

In figuur 3.9 kunnen we het verschil tussen verzadigde en onverzadigde lucht weergeven door de lengte van de pijlen rechts te variëren. Rechtsboven staat een glas water getekend met daarboven lucht. De twee pijlen die in figuur 3.9 tussen het glas water en de waterdamp beneden staan, geven weer met welke processen we hier te maken hebben. Aan de ene kant gaan er watermoleculen vanuit het glas de lucht in en aan de andere kant slaan er vanuit de lucht watermoleculen neer op het wateroppervlak. Als de lucht onverzadigd is, zal het transport van watermoleculen uit het glas naar de lucht groter zijn dan van de lucht naar het water, terwijl bij verzadigde lucht beide transporten even groot zullen zijn.

De faseovergang van vloeibaar water naar waterdamp kost energie (zoals we in deel I bij de latente warmtestroom hebben gezien). Die energie moet ergens aan onttrokken worden. Dit is duidelijk te zien als je een natte doek om een thermometer wikkelt: door de verdamping wordt energie aan de thermometer onttrokken en zal de temperatuur dalen. We noemen dit de **natteboltemperatuur**. In practicum 2 zullen we deze methode gebruiken om de luchtvochtigheid te bepalen.

Opdracht 29.

Geef de namen van de processen in figuur 3.9 die ervoor zorgen dat water van de ene fase wordt omgezet in de andere fase.

Opdracht 30.

De lucht in een bepaald gebied heeft bij een temperatuur van 30°C een relatieve vochtigheid van 45%. Hoe hoog is de dampdruk van water in deze lucht? Hoeveel moet de temperatuur dalen voordat er wolken kunnen ontstaan?

Opdracht 31.

a. Waarom is het gegeven RV=65% onvoldoende om te bepalen hoeveel waterdamp er in de lucht zit?

b. Noem twee oorzaken waardoor de relatieve vochtigheid kan veranderen.

c. Verklaar waarom er in een heldere nacht vaak dicht bij de grond mistbanken ontstaan.

3.5 Gevoelstemperatuur

Op het weerbericht wordt wel eens de gevoelstemperatuur vermeld. Soms is deze lager dan de 'echte' temperatuur, maar soms ook hoger.
Wat is gevoelstemperatuur en hoe kun je deze bepalen?

Het verschil tussen de werkelijke temperatuur en de gevoelstemperatuur heeft te maken met de energiehuishouding van ons eigen lichaam. Net als ieder zoogdier is de mens warmbloedig. Bij het metabolisme in ons lichaam komt energie vrij in de vorm van warmte. In rust produceert een mens hierdoor ongeveer 100 W, terwijl bij inspanning zoals sporten dit op kan lopen tot 900 W. Bovendien ontvangt het lichaam –als we ons in de zon begeven– ook kortgolvige straling. Het lichaam kan die energie op drie manieren afvoeren:

- door warmtetransport naar de lucht rond het lichaam (zolang de lucht kouder is dan het lichaam);
- door het verdampen van zweet (de latente warmte die daarvoor nodig is wordt onttrokken aan het lichaam);
- door het uitstralen van extra langgolvige straling (door een verhoging van de lichaamstemperatuur);

De temperatuur die het menselijk lichaam ervaart, wordt dus bepaald door de energie-uitwisseling met de omgeving. En die hangt af van een aantal meteorologische factoren:

- de luchttemperatuur (temperatuurverschil tussen lichaam en omgeving)
- de luchtvochtigheid
- de windsnelheid (bepalend voor uitwisseling van zowel warmte als waterdamp tussen lichaam en omgeving);
- de hoeveelheid directe straling van de zon.

Verder spelen ook kleding, postuur en gewenning aan warmte/kou een rol.

Wanneer de luchttemperatuur veel lager is dan de lichaamstemperatuur kan het gebeuren dat er meer energie wordt afgevoerd dan het lichaam zelf produceert: het lichaam koelt dan af en krijgt het koud (koudestress, paragraaf 5.1). Wanneer de luchttemperatuur hoog is en verdamping van zweet niet voldoende energie aan het lichaam onttrekt, kan het lichaam zijn energie maar moeilijk kwijt en dan kan oververhitting het gevolg zijn (hittestress, paragraaf 5.2). Zoals we zullen zien, spelen andere factoren een rol bij warmteverlies wanneer het koud is dan wanneer het warm is.
Er zijn wereldwijd veel verschillende benaderingen voor de gevoelstemperatuur. Wij gaan hier uit van de methode die door het KNMI in Nederland wordt gebruikt.

3.5.1 Koudestress

Een meer gebruikelijke term voor het begrip koudestress is 'wind chill'.De methode die het KNMI gebruikt voor het bepalen van de gevoelstemperatuur in de kou ($T_{windchill}$) is ontwikkeld voor het warmteverlies van een lopend mens (snelheid 4,8 km/uur), gekleed op de kou, onder omstandigheden van weinig of geen zon. Omdat het koud is en de huid volledig bedekt, wordt zweten een relatief onbelangrijke factor om warmte te verliezen. Dus deze factor kunnen we, evenals de directe straling van de zon, in de kou verwaarlozen: voor het warmteverlies zijn hoofdzakelijk de windsnelheid en de luchttemperatuur verantwoordelijk. Als het harder waait wordt de warmte van het lichaam sneller afgegeven aan de omgeving omdat de warme isolerende luchtlaag om het lichaam heen door de wind verdwijnt.

De factoren die van belang zijn voor de gevoelstemperatuur, worden in een empirische formule als volgt weergegeven:

$$T_{windchill} = 13.12 + 0.6215 * T_{lucht} - 11.37 * (W*3.6)^{0.16} + 0.3965 * T_{lucht} * (W*3.6)^{0.16} \quad (12)$$

Waarin:	$T_{windchill}$:	gevoelstemperatuur	[°C]
	T_{lucht}:	luchttemperatuur op 1,5m hoogte	[°C]
	W:	windsnelheid	[m/s]

Met bovenstaande formule kunnen we de gevoelstemperatuur als gevolg van wind chill berekenen. In tabel 3.3 vind je de uitwerking van deze formule (voor temperaturen van $+5^0$ C tot - 30^0 C). Let op het grote verschil tussen de werkelijke temperatuur en de gevoelstemperatuur als de wind hard waait.

Tabel 3.3 Gevoelstemperatuur als gevolg van wind chill (bron: KNMI, JAG/TI methode)

Windsnelheid		**Luchttemperatuur (°C)**							
(km/u)	**(m/s)**	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
0	0.0	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
10	2.8	3	-3	-9	-15	-21	-27	-33	-39
20	5.6	1	-5	-12	-18	-24	-30	-37	-43
30	8.3	0	-6	-13	-20	-26	-33	-39	-46
40	11.1	-1	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48
50	13.9	-1	-8	-15	-22	-29	-35	-42	-49
60	16.7	-2	-9	-16	-22	-30	-36	-43	-50
70	19.5	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51
80	22.2	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52

Toename van de snelheid van de wind zorgt ervoor dat het kouder lijkt: de gevoelstemperatuur daalt. In het vorige hoofdstuk hebben we gezien dat in de stad de wind wordt geremd: in vergelijking met het platteland is de windsnelheid in de stad gemiddeld een stuk lager. De gevoelstemperatuur als gevolg van wind chill zal daarom in de stad - in vergelijking met een open vlakte - een stuk hoger liggen, veel dichter bij de werkelijke luchttemperatuur.

3.5.2 Hittestress

In warme omstandigheden kan het zo zijn dat het lichaam juist moeite heeft om zijn warmte kwijt te raken. We spreken dan van hittestress. Van de vier meteorologische variabelen die eerder in dit hoofdstuk genoemd zijn, speelt luchtvochtigheid hierbij de grootste rol. Dit heeft te maken met het feit dat je lichaam in warme omstandigheden sterk afhankelijk is van zweten bij het kwijtraken van warmte.

Hiervoor is besproken dat de hoeveelheid waterdamp in de lucht wordt uitgedrukt in de relatieve luchtvochtigheid. Hoe hoger de relatieve luchtvochtigheid is, des te minder kan er verdampen vanuit het lichaam. Maar je lichaam gaat bij warmte juist zweten om water te verdampen zodat het af kan koelen. Wanneer de luchtvochtigheid toeneemt bij gelijkblijvende (vrij hoge) temperatuur, kun je minder verdampen, dus zal het logischerwijs warmer aanvoelen: de gevoelstemperatuur stijgt.

Om de gevoelstemperatuur bij warmte te bepalen, is de **heat index** ontwikkeld, een formule op basis van de werkelijk gemeten temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid. (Deze formule is een stuk complexer dan die voor de wind chill, daarom hoeven jullie deze niet te kennen.) De uitkomst van de formule - hoeveel de gevoelstemperatuur als gevolg van de heat index toeneemt met toenemende relatieve luchtvochtigheid - staat in Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Gevoelstemperatuur als gevolg van de heat index (bron: KNMI, methode Steadman)

RV	Luchttemperatuur (°C)						
(%)	20	25	30	35	40	45	50
0	18	23	27	32	36	40	44
10	18	23	28	33	38	43	49
20	18	24	28	34	40	46	56
30	19	24	29	35	43	52	61
40	19	25	30	37	46	59	
50	19	25	31	39	51	61	
60	20	25	31	42	56		
70	20	25	32	45			
80	20	26	34	50			
90	20	26	36				
100	20	26	38				

Zoals je kunt zien in de tabel, neemt het verschil tussen de gevoelstemperatuur en de werkelijk gemeten temperatuur snel toe. Vooral wanneer de luchttemperatuur al erg hoog is, hoeft de luchtvochtigheid niet heel ver meer te stijgen om voor een zeer onprettige gevoelstemperatuur te zorgen.

Ook windsnelheid en straling spelen een rol bij de gevoelstemperatuur in warme omstandigheden. Als zich een laagje zweet heeft gevormd op de huid, kan het lichaam geen warmte meer afvoeren. Bij toename van de windsnelheid, wordt de waterdamp van de huid weggeblazen, waardoor weer meer zweet kan verdampen, waardoor de temperatuur van het lichaam wél verder kan afnemen. Daarnaast is de gevoelstemperatuur uiteraard hoger in de zon dan in de schaduw, omdat de straling van de zon rechtstreeks je lichaam verwarmt.

De gevoelstemperaturen hebben dus een duidelijke fysische basis, maar het is niet eenvoudig om alle factoren mee te nemen. De wind chill en de hitte index worden gebruikt om in het weerbericht de mensen een idee geven van de gevoelstemperatuur. Bij de eerste is de windsnelheid het belangrijkst en bij de tweede de relatieve vochtigheid.

Opdracht 32.

Van onze vier wereldsteden heeft Stockholm het koudste klimaat. Het zal je dan ook niet verbazen dat Anna het in de winter regelmatig zwaar heeft als ze haar rondje loopt, vooral op het stuk langs de kade, waar een harde wind vanaf de Oostzee waait.

In het centrum van Stockholm is het -6 graden Celcius bij een windsnelheid van 5 m/s. Aan het water is het -6 bij een windsnelheid van 9 m/s. Anna loopt met een snelheid van 6 km/h.

Bereken de wind chill voor Anna op beide locaties.

Opdracht 33.

Zoek informatie over het huidige weer in Stockholm, Singapore, Santiago en Rotterdam (►URL 1: www.wunderground.com) en bereken of bepaal aan de hand daarvan de gevoelstemperatuur. Als de temperatuur onder de 20 graden is gebruik je de wind chill en boven de 20 graden de heat index.

Opdracht 34.

Deze opdracht is een samenvatting van de invloed van de factoren inkomende kortgolvige straling (van de zon), windsnelheid en luchtvochtigheid op de gevoelstemperatuur in Singapore.

Geef in de tabel hieronder aan of de betreffende factor in het genoemde stadsdeel relatief hoog, laag of gemiddeld is (a) en wat het gevolg daarvan is op de gevoelstemperatuur in dat stadsdeel (b: *hogere* of *lagere* gevoelstemperatuur).

Tabel 3.5 Effect op gevoelstemperatuur

	Industriegebied	**Woonwijk**	**Zakendistrict**	**Luchthaven**
Inkomende kortgolvige straling	a	a	a	a
	b	b	b	b
Windsnelheid	a	a	a	a
	b	b	b	b
Luchtvochtigheid	a	a	a	a
	b	b	b	b

Practicum 2

In dit practicum gaan we op twee verschillende manieren de luchtvochtigheid bepalen. Beide manieren worden ook toegepast in echte luchtvochtigheidsmeters (hygrometers). De ene is gebaseerd op de zogenaamde **natteboltemperatuur** en de andere op de **dauwpunttemperatuur**.

Proef 1: Natteboltemperatuur

Benodigdheden:

- Twee temperatuursensoren
- WC-papier / keukenpapier
- Water op kamertemperatuur
- Ventilator

In deze proef meten we het effect van verdamping op de temperatuur. De resultaten zullen we gebruiken voor de berekening van de vochtigheid in lucht, dus meet nauwkeurig!

Neem de twee temperatuursensoren. Maak een stuk wc- of keukenrolpapier flink nat en wikkel het om één van de sensoren. Gebruik voor het natmaken water op kamertemperatuur (dat je docent heeft klaarstaan), zodat beide thermometers bij het begin van de proef dezelfde temperatuur aangeven. Laat de andere thermometer onbedekt. Klem beide thermometers vast op een standaard en zet de ventilator zó neer dat hij lucht over beide thermometers blaast, als je hem aanzet (zie figuur 3.11).



Figuur 3.11 Meten van de natteboltemperatuur

Noteer de begintemperatuur in Tabel 3.6 (tijdstip 0). Zet de ventilator aan en noteer om de twee minuten de temperatuur. Zorg ervoor dat het wc-papier nat blijft! Als je ziet dat de temperatuur van de natte sensor na verloop van tijd weer oploopt, betekent dit dat het papier niet nat genoeg is!

Tabel 3.6 Natteboltemperatuur

	Tijd (minuten)					
	0	**2**	**4**	**6**	**8**	**10**
Temp. Sensor 1						
Temp. Sensor 2						

De natgemaakte sensor meet de **natteboltemperatuur (T_w)**. We trekken de waarde van de natteboltemperatuur af van de waarde van de luchttemperatuur. Met de gevonden waarde kunnen we via de dampdruk de luchtvochtigheid uitrekenen.

Opdrachten

1. Hoe hoog zou de natteboltemperatuur zijn als de lucht in het lokaal verzadigd is?
2. Bij het verdampen is energie nodig. Hoe noemen we zo'n proces?

Met het gegeven van de natteboltemperatuur kunnen we de dampdruk uitrekenen via de volgende empirische formule:

$$e = e_s(T_w) - \gamma \cdot (T - T_w) \qquad (13)$$

Met:

$e_s(T_w)$: de verzadigingsdampdruk bij de gemeten natteboltemperatuur T_w

γ : 0.063 [kPa/K],

T en T_w [°C] hebben we zojuist gemeten. Neem hiervoor de waarde die je na 10 minuten gemeten hebt. Als het goed is zal die niet veel verschillen van de voorgaande meting.

3. Bereken de dampdruk in het lokaal met formule 13. (Bereken eerst e_s met formule 11 uit hoofdstuk 3.4, waarbij je de waarde van T_w invult voor T)

4. Bereken de relatieve luchtvochtigheid in het lokaal met formule 10.

5. Bij Siao Lee in Singapore is het 30 graden en is de luchtvochtigheid 80%. Bereken de dampdruk van de lucht in Singapore.

Proef 2: Dauwpunttemperatuur

Benodigdheden:

- temperatuursensor
- 2 erlenmeyers
- Bak met water met een flinke hoeveelheid ijsklontjes erin

In deze proef gaan we een andere maat voor de luchtvochtigheid bepalen: de dauwpunttemperatuur.
Vul 1 erlenmeyer voor ongeveer een kwart met water op kamertemperatuur. Zorg ervoor dat de buitenkant van de erlenmeyer goed droog is en zet de temperatuursensor erin. Vul nu de andere erlenmeyer met water uit de bak met ijswater.

Giet een beetje van het ijskoude water bij de erlenmeyer met water op kamertemperatuur en meng dit goed met het water dat er al in zit. Lees de thermometer af. Herhaal deze handeling. Let op wanneer zich condens vormt op de buitenkant van erlenmeyer. Zodra je een klein blosje ziet moet je stoppen met het toevoegen van water. Noteer de waarde die de thermometer dan aangeeft. Deze waarde is de **dauwpunttemperatuur**.



Figuur 3.12 Meten van de dauwpunttemperatuur

6. Waar komt de condens op de erlenmeyer vandaan?

7. Je hebt in deze proef de dauwpunttemperatuur *gemeten*. Je kunt de dauwpunttemperatuur ook *berekenen* met de gegevens uit proef 1. In vraag 3 van proef 1 heb je de dampdruk in het lokaal (e) berekend. Vul deze waarde van e in vergelijking 11 (hoofdstuk 3.4) en bereken T: dit is de dauwpunttemperatuur. Dit is namelijk de temperatuur waarbij de dampdruk die in het lokaal heerst (e) de verzadigingsdampdruk (e_s) wordt. Vergelijk de uitkomst van deze berekening met de waarde die je in proef 2 gevonden hebt. Komen ze overeen?

Proef 3: Verdampingssnelheid

Benodigdheden:

- Temperatuursensor
- Petrischaaltje met water
- Bouwlamp
- Weegschaal
- Ventilator
- Stopwatch/horloge/mobiel
- Meetlint/meetlat

In deze proef onderzoeken we de invloed van de temperatuur en de windsnelheid op de verdampingssnelheid.



Figuur 3.13 Meten van de verdampingssnelheid

Maak de bouwlamp vast aan een statief, op een hoogte van ruim 30 cm boven het werkvlak. Doe wat water in een petrischaaltje, zet het onder de lamp, maar doe de lamp nog niet aan! Wacht 1 minuut en meet dan de temperatuur van het water in het schaaltje. Wacht nog 1 minuut, weeg het petrischaaltje en schrijf beide getallen op in de eerste kolom van Tabel3.7. Doe daarna de lamp aan. Meet na 1 minuut weer de temperatuur en na nog een minuut weer het gewicht van het petrischaaltje. Schuif de bouwlamp aan de standaard na telkens 2 minuten steeds 10 cm dichter naar het bakje toe. Meet elke keer na 2 minuten het gewicht van het bakje en meet de temperatuur halverwege de 2 minuten, zodat je ongeveer de gemiddelde temperatuur van elk interval hebt. Schrijf dit op in de tabel.
Herhaal de proef, maar zet nu op enige afstand de ventilator aan zodat het lichtjes waait over de bakjes.

Tabel3.7 Verdampingssnelheid

Ventilator uit					
Afstand tot bouwlamp (cm)	Uit	30	20	10	5
Tijd (s)	120	120	120	120	120
Temperatuur water (° C)	..	..	..	..	..
Gewicht (g)	..	..	..	..	..
Verdampt gewicht (g)					
Verdampingsenergie (J)					
Ventilator aan					
Afstand tot bouwlamp (cm)	Uit	30	20	10	5
Tijd (s)	120	120	120	120	120
Temperatuur water (° C)	..	..	..	..	..

Gewicht (g)	..	..	..	..	..
Verdampt gewicht (g)					
Verdampingsenergie (J)					

8. Reken uit hoeveel water er telkens in twee minuten verdampt is (in g) en noteer dit getal in de betreffende vakjes verdampt gewicht (g). Bereken hoeveel energie ervoor nodig is om die hoeveelheid water te verdampen en noteer dit in het vakje eronder (verdampingsenergie in J).

9. Verdampt er meer water met de ventilator uit of met de ventilator aan? Verklaar dit.

10. Als er ijs op een sloot ligt, groeit dit ijs - bij gelijke luchttemperatuur (onder nul)- meer aan bij harde wind dan bij windstil weer. Verklaar dit. Kijk hierbij naar Figuur 3.9.

Climate change skeptics 'wrong'

By Richard Black, BBC Environment correspondent

A major argument used by sceptics of global warming is flawed, a UK Met Office study in Nature magazine says.

This argument maintains that much recorded climate data is inherently unreliable because of where weather instruments are situated.

Most are in or near cities, which produce their own heat; so the rapid warming measured over the last century could be just a record of urbanisation. The Met Office believes its study shows this "urban heat island" idea is wrong.

The analysis has been done by Dr David Parker. He used data for the last 50 years to create two separate graphs. One plots temperatures observed on calm nights, the other on windy nights.

If the urban heat island hypothesis is correct, he says, instruments should have recorded a bigger temperature rise for calm nights than for windy ones - because wind blows excess heat away from cities and away from the measuring instruments.

Bron: http://news.bbc.co.uk

Uit de media komen steeds meer berichten over de opwarming van de aarde. Regelmatig laait daarbij de discussie tussen klimaatwetenschappers en de 'klimaatsceptici' hoog op. Een veel gehoord argument van de sceptici is dat de gemeten temperatuurstijging niet door klimaatverandering maar door verstedelijking komt. De redenering is als volgt: vroeger lagen de meetstations in landelijk gebied en nu, door de groei van de bebouwing, zijn ze in stedelijk gebied komen te liggen. De gemeten temperatuurstijging zou daarom lokaal veroorzaakt kunnen zijn (urban heat island-effect) en niks te maken hebben met het broeikaseffect.

In deze opdracht gaan we onderzoeken of er in Nederland aanwijzingen zijn dat de klimaatsceptici gelijk hebben met hun bewering dat de gemeten temperatuurstijging door verstedelijking komt.

De informatie die wij hebben over de veranderingen in de atmosfeer op de tijdschaal van 100 jaar is grotendeels afkomstig van weerstations. Daar worden metingen dicht bij het aardoppervlak verricht (temperatuur op 2 meter hoogte). Vanwege die geringe hoogte kunnen de metingen beïnvloed worden door (veranderingen in) het lokale en regionale landgebruik. Een beschrijving van de stations is gegeven in Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Beschrijving KNMI weerstations (bron: knmi)

Stationscode	Naam	Beschrijving
235	De Kooy	Kuststation, in polder gelegen aan Waddenzeezijde (ca. 1 km), juist ten zuiden van Den Helder.
240	Schiphol	Gelegen in polder. Half open landschap: voornamelijk gras- en bouwland afgewisseld door infrastructuur/gebouwen. Vliegveld. Klei/veen
260	De Bilt	Gelegen in overgangsgebied van Utrechtse Heuvelrug naar Kromme Rijngebied. Half open landschap: gras- en bouwland afgewisseld door bebouwing en bebossing. Zandgrond.
270	Leeuwarden	Vlak, open landschap, voornamelijk grasland, ten noordwesten van stad Leeuwarden. Vliegveld. Kleigrond
280	Eelde	Gelegen in vlak, open landschap (voornamelijk grasland). Vliegveld. Zandgrond.
290	Twenthe	Coulissenlandschap, licht glooiend terrein. Bebossing afgewisseld door bouw- en grasland. Vliegveld. Zandgrond.
310	Vlissingen	Kuststation, gelegen op havenpier aan de Westerschelde. Grondsoort n.v.t.
344	Rotterdam	Gelegen in polder, voornamelijk grasland, zuidoostelijk aangrenzend stad Rotterdam. Vliegveld. Kleigrond.
370	Eindhoven	Gelegen in half open landschap, bos (heide) afgewisseld door bouw- en grasland. Vliegveld. Zandgrond.
380	Maastricht	Gelegen in glooiend coulissenlandschap, gras- en bouwland. Hellingbos in omgeving. Vliegveld. Löss (krijt).

Tabel 3.9 Gemiddelde temperatuurtrend voor Nederlandse weerstations.

Stationscode	50-jarige trend (°C/jaar)	100-jarige trend (°C/jaar)
235		
240		---
260	0.0376	0.0132
270		---
280		
290		---
310		
344		---
370		---
380		

Opdracht1.
Eerst gaan we kijken in hoeverre de klimaatverandering op de Nederlandse weerstations zichtbaar is. Hiervoor kijken we naar de 50 jarige en 100 jarige trend. De 100-jarige trend is maar op een vijftal stations beschikbaar, omdat er op de andere stations pas later begonnen is met de metingen.

Open de Excelsheet *prac1_climatedata.xls* en kijk op het tabblad 'KNMI_jaarlijks'. Je ziet hier de jaarlijkse gemiddelde temperatuur voor alle stationsnummers en jaren.

1. Selecteer met behulp van het filter[1] bovenaan de kolom de jaren 1959-2009. Noteer de resultaten uit tabblad 'trend_grafiek' voor elk station in de kolom 50-jarige trend in Tabel 3.9. (De gegevens van het station 'De Bilt' zijn al ingevuld; je kunt deze gebruiken om te zien of je de juiste gegevens geselecteerd hebt.)

[1] = gebruik '(aangepast…)' en vul 'groter dan 1958' en 'kleiner dan 2010' in

2. Doe hetzelfde met het filter[2] voor de 100 jarige trend voor de stations die beschikbaar zijn (niet allemaal).

[2] = gebruik '(aangepast…)' en vul 'groter dan 1908' en 'kleiner dan 2010' in

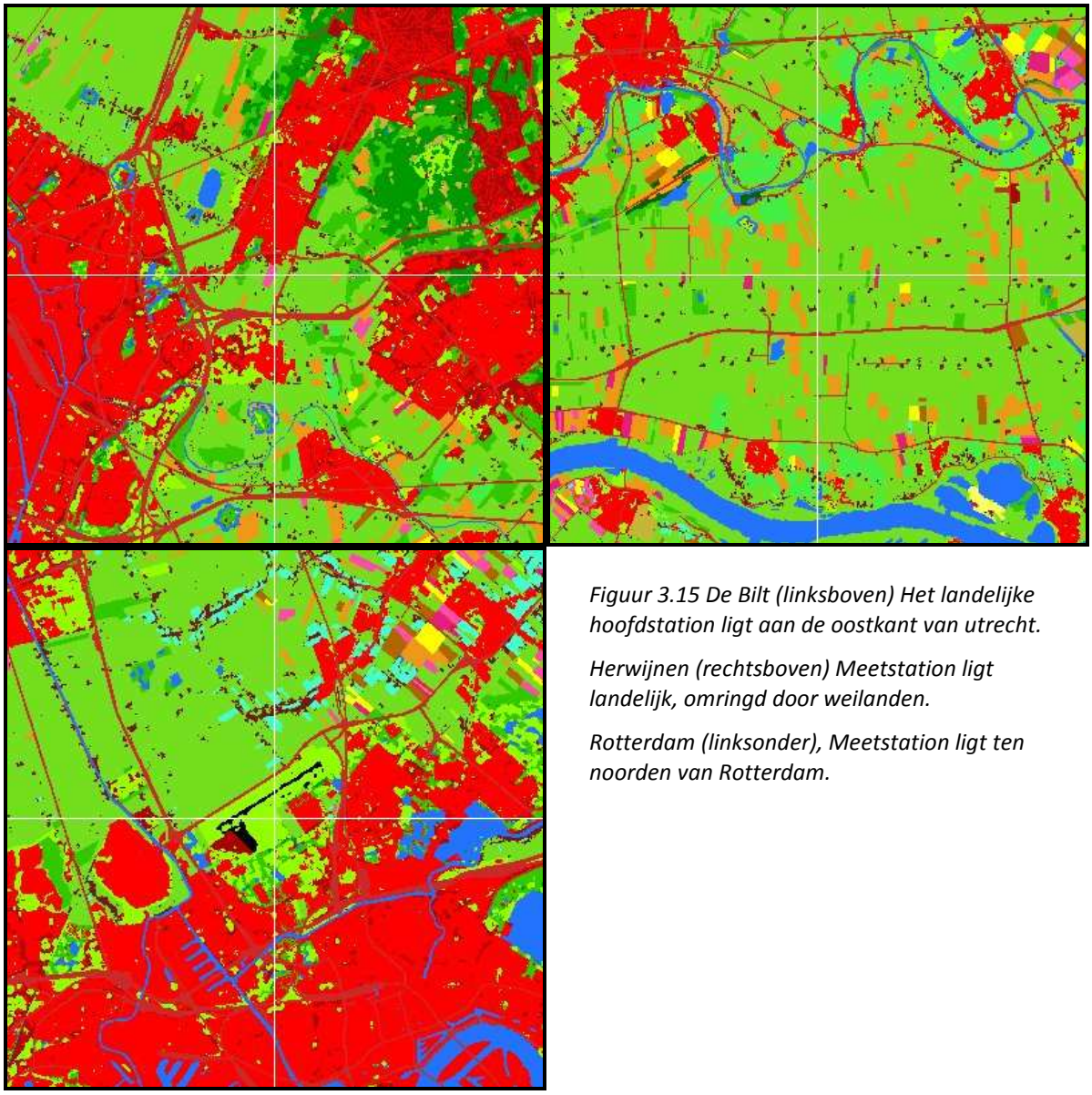
3. Hoe verhouden de 50-jarige en 100-jarige trend zich tot elkaar? Wat betekent dit? Wat zou hiervan de oorzaak kunnen zijn?
4. Zet de trends bij de stations in figuur 3.14.
5. Van welke vier stations is de 50-jarige trend het grootst? En van welke drie het kleinst? Welke conclusie zou je hieraan kunnen verbinden?

Figuur 3.14 Landgebruikkaart van Nederland. Links in 1900, rechts in 2000.

Opdracht 2.

Volgens het krantenartikel aan het begin van deze opdracht is de gemeten temperatuurstijging (de trend) het gevolg van de toegenomen verstedelijking. We zullen analyseren of dit klopt aan de hand van gegevens, die ieder uur van een aantal verschillende stations verkregen zijn. Op deze tijdschaal is het microklimaat beter te zien dan in de jaarlijkse gegevens uit de vorige opdracht. Hiervoor gaan we 2 stedelijke stations vergelijken met 1 nauwelijks verstedelijkt station voor de periode 1990 tot heden.

De 3 stations die gebruikt gaan worden en een kaart van de omgeving van het station zijn gegeven in figuur 3.15. Het betreffende station ligt op de kruising van de twee witte lijnen, precies in het midden.



Figuur 3.15 De Bilt (linksboven) Het landelijke hoofdstation ligt aan de oostkant van utrecht.

Herwijnen (rechtsboven) Meetstation ligt landelijk, omringd door weilanden.

Rotterdam (linksonder), Meetstation ligt ten noorden van Rotterdam.

1. Geef in de kaartjes van de omgeving van de verstedelijkte weerstations aan in welke richtingen er veel bebouwing aanwezig is: trek lijnen van het (in het midden gelegen) meetstation naar de rand van de meest bebouwde gebieden. Meet de hoeken waarin de meest bebouwde gebieden zich bevinden met je geodriehoek en noteer ze in de tabel hieronder (0 graden is noord, 180 graden is zuid):

Stad	**Sterkst verstedelijkt gebied**
De Bilt	… tot … graden … tot … graden … tot … graden
Rotterdam	… tot … graden

2. Geef van de volgende vier factoren aan hoe ze het Urban Heat Island-effect beïnvloeden. Met andere woorden: wat is de invloed van onderstaande variabelen op het temperatuurverschil tussen stad en platteland? Leg je antwoorden uit.

- Windsnelheid
- Temperatuur
- Windrichting
- Tijdstip op de dag

In het blad 'KNMI_hourly' van de excelsheet urbansheet.xls, zijn temperatuurreeksen (elk uur gemeten) gegeven van de genoemde stations die gegroepeerd zijn naar de bovenstaande variabelen. Hierbij zijn de gemiddelden genomen van 1990 tot 2009. Hierdoor kunnen we bijvoorbeeld bekijken hoeveel warmer een windrichting is van 210 graden ten opzichte van een windrichting van 250 graden gemiddeld genomen over bijna 20 jaar. Hoewel de verschillen in de volgende opdracht soms misschien klein lijken, moet je bedenken dat het een gemiddelde is van een enorm aantal uurlijkse waarnemingen: het gaat voor 1 station om minimaal 19*365*24=166440 waarnemingen! Dit betekent dat er weinig 'toevallige' variaties in de data zitten, omdat het om klimatologische gemiddelden gaat.

3. Voeg 2 nieuwe kolommen toe waarin je noteert:
- het verschil tussen de Bilt en Herwijnen en
- het verschil tussen Rotterdam en Herwijnen.

Zet de gevonden temperatuurverschillen voor de vier genoemde variabelen uit in grafieken: telkens een grafiek voor De Bilt en een voor Rotterdam. (Maak voor de windrichting twee aparte grafieken, maar zet voor de andere factoren de twee lijnen van Rotterdam, resp. De Bilt voor dezelfde factor in dezelfde grafiek)

4. Geef in de grafiek van de windrichting door middel van arcering de verstedelijkte gebieden weer die je hebt gevonden in a). Zijn de temperatuurverschillen groter in de gearceerde gebieden?

5. Bekijk de grafiek van de windsnelheid: bij welke windsnelheden is het temperatuurverschil het hoogst? Geef een verklaring.

6. Bekijk de grafiek per uur: wanneer is het verschil minimaal? Geef een verklaring.

7. Bekijk de grafiek van de temperatuur: hoe hangt het temperatuurverschil af van temperatuur? Geef een verklaring.

8. Rotterdam ligt veel dichter bij zee dan Herwijnen. Geef aan wat de gevolgen hiervan zijn voor de gemiddelde temperatuur.
9. Geef aan of de onderstaande beweringen juist of onjuist zijn en verklaar je antwoord.

☐ De nachten zijn in Rotterdam waarschijnlijk warmer doordat er meer een zeeklimaat heerst dan in Herwijnen.

☐ In 1900 was er nog geen sprake van een urban heat island-effect, omdat er toen nog geen verstedelijking was.

☐ In steden komt een groot gedeelte van de warmte van auto's, apparaten en verwarming.

☐Als je 's avonds van het centrum van de stad naar het platteland fietst, wordt de omgeving gedurende je rit warmer.

☐ De temperatuurstijging is de afgelopen eeuw versneld.

Tot slot:

We nemen aan dat het temperatuurverschil tussen De Bilt en Herwijnen en tussen Rotterdam en Herwijnen model staat voor het gemiddelde temperatuurverschil tussen stad en platteland en dat dit verschil wordt veroorzaakt door het urban heat island-effect. (Eigenlijk gaat dit voor Rotterdam niet helemaal op, want de temperatuur wordt in deze stad voor een deel ook bepaald door zijn ligging aan zee.)

Daarnaast zijn er een aantal stations verplaatst, waardoor de reeksen mogelijk niet homogeen zijn waardoor er geen harde conclusies te trekken zijn. Voor het idee van deze opdracht is het gelukkig genoeg om inzicht te krijgen van de invloed van steden op de gemeten temperaturen buiten de stad.

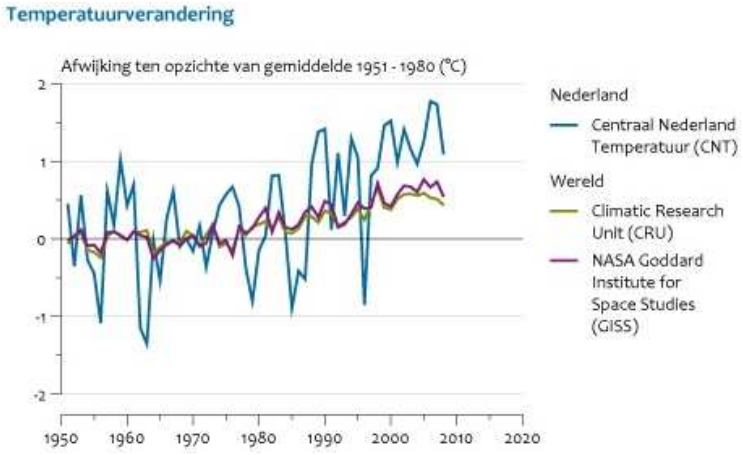
Vul onderstaande tabel in.

	Gemiddeld temperatuurverschil
De Bilt – Herwijnen	
Rotterdam - Herwijnen	

Opdracht 3

De temperatuurtrend in Nederland, die we zagen in het eerste deel van dit practicum, is groter dan de stijging van de wereldwijde temperatuur. De gemiddelde opwarming in Nederland over de afgelopen 108 jaar bedraagt ongeveer 1.8 graad, terwijl wereldwijd de temperatuur sinds 1850 is gestegen met $0,8^0$ C. De temperatuurstijgingen zijn statistisch sterk significant, zowel in Nederland als mondiaal.

Het KNMI heeft scenario's opgesteld voor de mogelijke ontwikkeling van



Figuur 3.16 Afwijking temperatuur van gemiddeld, wereldwijd en in Nederland.

de temperaturen in Nederland in de toekomst. Deze scenario's zijn ontwikkeld aan de hand van klimaatmodellen. **Lees de folder over de 4 verschillende klimaatscenario's: ► knmi_scenarios.pdf**

1. De gemiddelde temperatuur in Nederland is in de afgelopen 108 jaar 1.8 graden gestegen. Kan deze opwarming geheel of gedeeltelijk toegeschreven worden aan het stedelijk warmte eiland-effect? Leg je antwoord uit. Gebruik de tabel aan het einde van opdracht 2.
2. Geef aan de hand van de folder aan met welke 4 scenario's het KNMI rekening houdt.
3. Welke verklaringen worden gegeven voor het feit dat de temperaturen in Nederland in sommige scenario's meer stijgen dan de gemiddelde temperaturen wereldwijd?
4. Beredeneer aan de hand van de energiebalans (hoofdstuk 2.4.10) waarom de scenario's G+ en W+ leiden tot meer extreem hoge temperaturen. (Hint: wat betekent de hogere temperatuur in combinatie met minder neerslag voor de beschikbaarheid van vocht gedurende de zomer?)
5. Men verwacht een veel sterkere temperatuurstijging bij de polen dan aan de evenaar. Welke invloed zal dit hebben op het stromingspatroon? (Hint: wat is de belangrijkste oorzaak van de westelijke circulatie op onze breedtegraad?)

‘Ik durf wel een huis achter de dijk te kopen’

Bart van den Hurk, klimaatonderzoeker bij het KNMI en deeltijd professor klimaatdynamica aan de Universiteit Utrecht is ergens wel blij met het verhitte debat wat er plaatsvindt tussen de klimaatsceptici en de klimaatalarmisten. “Ik vind het wel gezond dat er enige scepsis is en dat er niet alleen maar geroepen wordt dat het helemaal mis gaat.” Volgens hem houdt het de onderzoekers scherp. Van den Hurk is regelmatig betrokken bij dit maatschappelijk debat over klimaatverandering als degene die de feiten moet geven.

Een goed voorbeeld is zijn rol als klimaatdeskundige in de Tweede Kamer. Hij moest onder andere de PVV-er Richard de Mos te woord staan, die vindt dat klimaatverandering een non-issue is. Er werden door de PVV vraagtekens gezet bij de geloofwaardigheid van het internationaal klimaatorgaan, het IPCC, nadat er een aantal fouten in het rapport aan het licht kwamen. Daarbij moest Bart van den Hurk in de tweede kamer aanwezig zijn om vragen hierover te beantwoorden. Het antwoord op deze vragen is echter vaak hetzelfde: het klimaat verandert en er is geen reden om aan die conclusie te twijfelen. “Ze stellen die vragen vaak om te laten zien dat het klimaat op hun agenda staat.”

Van den Hurk ziet de rol van het KNMI voornamelijk in het verschaffen van de juiste informatie. “Het uitgangspunt is dat we alles serieus nemen. Ook de klimaatsceptici zijn een groep mensen die bepaalde ideeën hebben. Binnen de media spelen ook andere dingen een rol dan alleen de waarheid.” Dat er flink gediscussieerd wordt over klimaatverandering vindt hij dus prima. Van den Hurk zegt dat de Nederlandse politiek toch wel goed in de gaten heeft wat er onderzocht wordt en hoe men daar rekening mee moet houden. “Ik kan als wetenschapper wel berekenen hoeveel water er door de Rijn stroomt, maar of dat te veel of te weinig is hangt toch af van de beleidsmaatregelen, zoals het plaatsen van de dijken. Ik heb het vertrouwen dat de overheid daar goed zicht op heeft. Ik durf in Nederland wel een huis achter de dijk te kopen. Bovendien zitten er grenzen aan de hoeveelheid belastinggeld die ik over heb voor klimaatbeleid. Ik vind het logisch dat je ook kijkt naar de maatschappelijke context.”

De reden dat Van den Hurk veel betrokken is bij de discussie over klimaatverandering heeft te maken met zijn loopbaan als wetenschapper. Deze is vooral tot stand gekomen door min of meer toevallige keuzes en mogelijkheden. Op de middelbare school vond hij de vakken natuur- en scheikunde leuk, maar had hij zeker geen speciale interesse in het weer. Op 16-jarige leeftijd hoorde hij van een moeder van een vriend op school voor het eerst van de opleiding natuur- en weerkunde (red.: nu bodem, water en atmosfeer) in Wageningen: “Ik dacht toen nog dat Wageningen in Groningen lag”.

In de loop van zijn opleiding raakte hij steeds meer geïnteresseerd in micrometeorologie, een onderwerp dat gericht is op de lokale interactie tussen de vegetatie en de atmosfeer. Dit was destijds nog ‘een soort gat in de markt’ en door zijn kennis op dit gebied kon hij bij het KNMI werken aan klimaatmodellen. Het modelleren van de invloed van vegetatie was ook zijn onderwerp van zijn promotietraject aan Wageningen University. Ook daar rolde hij min of meer bij toeval in. “Het is uiteindelijk wel zo gegaan als ik wilde, maar ik had ook net goed in een andere richting kunnen eindigen.”

In zijn huidige baan is elke dag anders. “Af en toe is dat wel een frustratie maar het maakt het ook wel afwisselend. Ik ben betrokken bij het opstellen van klimaatscenario’s voor de toekomst, ik begeleid studenten en ik zit in een aantal besturen”. Hij heeft hierdoor weinig tijd om zelf onderzoek te doen, maar dat maakt hem niet uit. Door het begeleiden van anderen past hij indirect zijn kennis toch toe. Van wat hij op de universiteit op heeft geleerd, vond hij voornamelijk de statistiek nuttig, maar ook micrometeorologie en ecologie waren belangrijk voor zijn baan. ”Bij de huidige studenten heb ik nog wel eens het idee dat ze het vermogen

missen om een duidelijke vraagstelling te maken. De kunst van het onderzoek is toch om de juiste vragen te stellen.” Voor studenten die nog twijfelen over hun opleidingskeuze is hij duidelijk: “Doe in vredesnaam wat je leuk vindt. Dat is automatisch waar je goed in bent en ook gemotiveerd voor kan blijven.”

Wil je meer interviews lezen? Kijk dan op www.wereldvanwageningen.nl

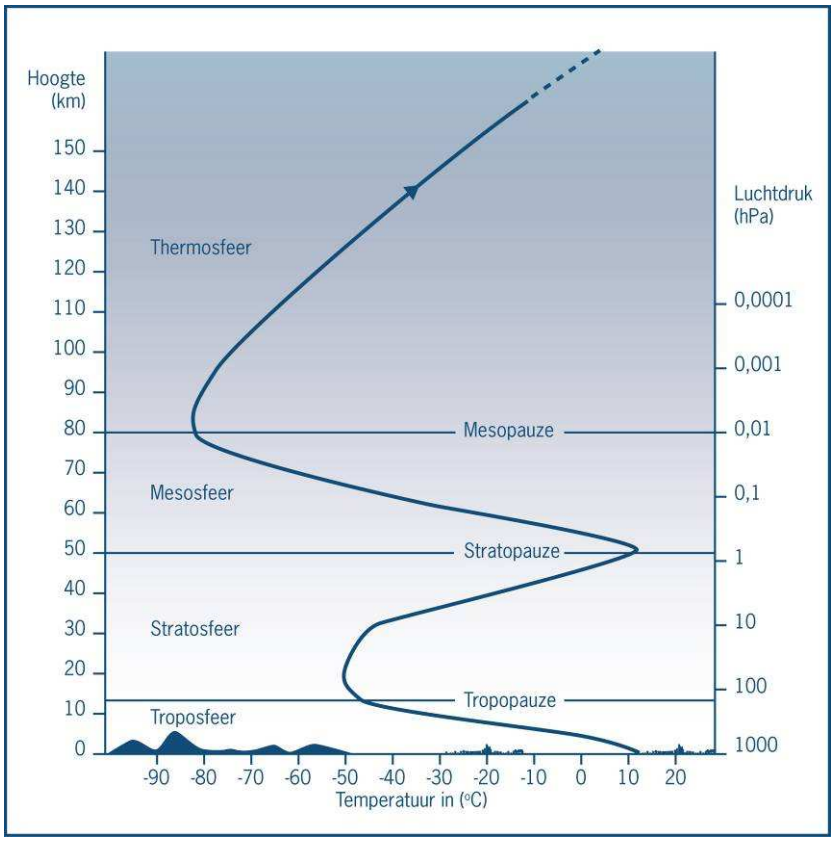
4 Deel III Luchtkwaliteit in de stad

We pakken opnieuw het vliegtuig voor een lange reis. We gaan met de zon mee richting Zuid-Amerika. We komen aan op het vliegveld van Santiago, in Chili. Hier staat Maria ons al op te wachten. Ze is blij ons te zien, maar ze heeft slecht nieuws. Haar opa is opgenomen in het plaatselijke ziekenhuis. Hij heeft al heel lang last van zijn luchtwegen. Maria vertelt ons dat dit komt door de slechte lucht die er in Santiago hangt. Vooral op warme zomerdagen worden er regelmatig **smogwaarschuwingen** uitgegeven. Maria neemt ons mee naar huis en vertelt ons meer over deze **smog**.

Om het probleem van smog en smogvorming te begrijpen, ga je in dit deel in hoofdstuk 4.1 eerst kijken hoe de atmosfeer is opgebouwd en welke stoffen erin zitten. Sommige van die stoffen komen van nature voor in de lucht; daar gaat hoofdstuk 4.2 verder op in. Andere stoffen zijn er door de mens ingebracht: de gevolgen daarvan - o.a. smogvorming - komen in hoofdstuk 4.3 aan de orde. Hoe de smogvorming beïnvloed wordt door wind en turbulentie en wat verblijftijd inhoudt, leer je in hoofdstuk4.4.

4.1 Toestand van de atmosfeer

In de atmosfeer kunnen we verschillende lagen onderscheiden. De onderste laag heet de **troposfeer**; dit is de laag waarin wij leven. In deze laag ontstaan ook alle weersverschijnselen zoals wolken, regen en orkanen. In de lagen hierboven bevinden zich geen wolken. De temperatuur in de troposfeer neemt af met de hoogte, aangezien er vanwege stralingsabsorptie steeds minder straling vanaf het aardoppervlak doordringt tot grotere hoogten. Bovendien wordt de druk met de hoogte steeds lager, waardoor (volgens de ideale gaswet) de temperatuur ook verder afneemt. Boven de troposfeer bevindt zich de **stratosfeer**. De tropopauze is de scheiding tussen troposfeer en stratosfeer. In de stratosfeer neemt de temperatuur weer toe met de hoogte, doordat bij de vorming van ozon energie vrijkomt (zie Stratosferisch ozon4.2.2). In figuur 4.1 zie je het verticale profiel van de temperatuur over de hele atmosfeer.



Figuur 4.1 Verticaal temperatuurprofiel van de atmosfeer

De atmosfeer bestaat voor het grootste deel uit twee gassen: stikstof (N_2) en zuurstof (O_2) beslaan respectievelijk 78% en 21% van het totale volume van de atmosfeer. In Tabel 4.1 staan van de belangrijkste gassen in de atmosfeer de concentraties weergegeven in de vorm van

volumepercentages. Een **volumepercentage** zuurstof van 20.95% betekent dat 20.95% van de atmosfeer bestaat uit zuurstof.

Tabel 4.1 Volumepercentages gassen in de atmosfeer

gas	symbool	volumepercentage	gas	symbool	volumepercentage
Stikstof	N_2	78.08	Waterdamp	H_2O	0 – 4
Zuurstof	O_2	20.95	Koolstofdioxide	CO_2	0.035
Argon	Ar	0.93	Methaan	CH_4	0.00011
Neon	Ne	0.0018	Lachgas	N_2O	0.00003
Helium	He	0.0005	Ozon	O_3	0.000004
Waterstof	H_2	0.00005	Aërosolen		0.000001
Xenon	Xe	0.000009	CFK's		0.000000001

Van de gassen die links in de tabel staan blijven de concentraties ongeveer gelijk in de tijd. De concentraties van de gassen die rechts worden genoemd zijn echter variabel; zij kunnen in de tijd en per plaats zeer sterk verschillen. Zo kan de concentratie van waterdamp in de warme tropische lucht een paar procent zijn, terwijl dit een stuk minder is in de ijskoude lucht boven de polen.
Omdat veel van de concentraties erg laag liggen en er dus veel nullen nodig zijn om het volumepercentage aan te geven, heeft men een aantal eenheden geïntroduceerd, die allemaal een **mengverhouding** uitdrukken. Dit betekent dat ze aangeven hoeveel deeltjes van een gas zich in een bepaalde volume-eenheid (bijvoorbeeld een liter) bevinden. In Tabel 4.2 zie je een aantal van deze volume mengverhoudingen.

Tabel 4.2 Volume mengverhoudingen

10^{-2}	percent (%)
10^{-3}	per mille (‰)
10^{-6}	parts per million (ppm)
10^{-9}	parts per billion (ppb)
10^{-12}	parts per trillion (ppt)

De stoffen die worden genoemd in Tabel 4.1 komen vaak van nature in de atmosfeer voor. In hoofdstuk 4.2 gaan we ons verdiepen in de processen die in de atmosfeer plaatsvinden met deze natuurlijke stoffen.

Opdracht 35.

Wat is de hoogste berg op aarde? Hoe hoog (in meters) reikt de top boven het aardoppervlak? In welke laag van de atmosfeer bevindt zich de top? Hoe verandert de temperatuur van de voet van de berg naar boven toe?

Opdracht 36.

Vul de volgende tabel met volume mengverhoudingen voor enkele bestanddelen van de atmosfeer verder aan. Gebruik Tabel 4.1 en Tabel 4.2.

Tabel 4.3 Stoffen in de atmosfeer

Gas		Volume percentage	Parts per million	Parts per billion
naam	symbool	%	ppm	ppb
Stikstof				
	Xe			
	CH_4			
Helium				
	O_3			
	H_2O			

4.2 Effecten van natuurlijke stoffen in de atmosfeer

De stoffen die in onze atmosfeer rondzweven ondergaan daar allerlei chemische reacties, waardoor ze worden afgebroken of omgezet in andere stoffen, of waardoor juist steeds meer van de betreffende stof wordt gevormd.
Er vinden ook reacties plaats die geen invloed hebben op de concentratie/hoeveelheid van de betreffende chemische stof, maar die bijvoorbeeld wel de temperatuur aan het aardoppervlak beïnvloeden. Een heel bekend fenomeen is het broeikaseffect, veroorzaakt door de aanwezigheid van broeikasgassen zoals CO_2 en ozon in de troposfeer: zie 2.1. Hoger in de atmosfeer, in de stratosfeer, heeft ozon nog een ander effect: zie 2.2.

4.2.1 Het broeikaseffect

Je hebt in deel I gezien dat de aarde langgolvige straling de ruimte inzendt. Van deze uitgezonden straling wordt een deel onderschept doordat gassen in de atmosfeer ze absorberen. De belangrijkste absorberende gassen (broeikasgassen) zijn koolstofdioxide (CO_2), waterdamp (H_2O), methaan (CH_4), lachgas (N_2O) en ozon (O_3). Dit effect wordt het **natuurlijk broeikaseffect** genoemd. Dit effect is al sinds het ontstaan van de atmosfeer aanwezig. Het is erg belangrijk voor het leven op aarde. Zonder dit natuurlijk broeikaseffect zou de temperatuur op aarde veel lager liggen. (Als men het in het kader van de huidige global warming problematiek heeft over 'het broeikaseffect', bedoelt men daarmee het **versterkte broeikaseffect**: het gevolg van de uitstoot van extra hoeveelheden broeikasgassen door menselijke activiteiten.)

4.2.2 Stratosferisch ozon

Ozon komt dus van nature voor in de troposfeer, waar het een bijdrage levert aan het natuurlijk broeikaseffect (2.1). En in 3.5 zul je zien dat het ozon dat door menselijk toedoen in de onderste luchtlagen terechtkomt, smogvorming in de hand werkt. Maar ook in de hogere luchtlagen, veel hoger dan de hoogste bergen, komt ozon voor. Daar, in de stratosfeer, heeft ozon een verrassend positieve werking, zelfs zodanig dat er vrijwel geen leven op aarde mogelijk zou zijn zonder de ozonlaag.
In deel I is besproken welke straling de zon uitzendt. Onder deze straling bevindt zich ook ultraviolette straling (UV). De golflengte van deze straling is kleiner dan die van het zichtbare licht (100 tot 400 nanometer). **UV-straling** kan huidkanker veroorzaken.

In de ozonlaag in de stratosfeer bevinden zich ozonmoleculen, bestaande uit drie zuurstofatomen. Deze moleculen absorberen de schadelijke UV-straling, en daar komt warmte bij vrij. Die vrijgekomen warmte zo hoog in de atmosfeer verklaart ook meteen waarom de temperatuur in de stratosfeer stijgt bij toenemende hoogte. Ozon wordt echter ook weer afgebroken in de atmosfeer. De natuurlijke vorming en afbraak van ozon vindt plaats via het zogeheten **Chapman mechanisme**. Dit mechanisme werkt als volgt:

- Stratosferisch ozon wordt allereerst gevormd doordat kortgolvig zonlicht leidt tot splitsing van een zuurstofmolecuul, waarbij twee zuurstofradicalen ontstaan:

	O_2	+	hυ	→	2 O**.**
	O**.**	+	O_2	→	O_3
netto:	3 O_2	+	hυ	→	2 O_3

- Stratosferisch ozon wordt ook weer afgebroken via:

	O_3	+	hυ	→	O**.** + O_2
	O**.**	+	O_3	→	2 O_2
netto:	2 O_3	+	hυ	→	3 O_2

Hierbij is O**.** een zuurstofradicaal en hυ staat voor de energie van de UV-straling die nodig is voor de reactie.

Opdracht 37.

Wat is de verklaring voor de extreem hoge concentraties CO_2 en CH_4 in de lucht tegenwoordig, in vergelijking met een paar eeuwen geleden? Geef voor beide stoffen apart aan door welke bronnen ze in de lucht zijn gekomen.

Opdracht 38.

Koolstofdioxide (CO_2) is het bekendste broeikasgas. Maar het effect van CO_2 als broeikasgas is 21 keer zo laag als die van methaan (CH_4) en zelfs 310 keer zo laag als die van lachgas (N_2O). Dit betekent dat N_2O in een even hoge concentratie als CO_2, 310x zoveel bijdraagt aan het broeikaseffect. Gelukkig zit er veel minder CH_4 en N_2O in de atmosfeer dan CO_2. Dit effect wordt uitgedrukt in de zogenoemde Global Warming Potential (GWP),

Zoek de huidige concentraties van alle drie de stoffen in de atmosfeer op en bereken de relatieve bijdrage van CH_4 en N_2O (in vergelijking met CO_2) aan het broeikaseffect (stel de GWP van CO_2 op 1 en de relatieve bijdrage van CO_2 op 100%).

Tabel 4.4 Bijdrages van broeikasgassen

Naam	Symbool	Concentratie	GWP	Relatieve bijdrage
Koolstofdioxide	CO_2			
Methaan	CH_4			
Lachgas	N_2O			

Opdracht 39.

a. In figuur 2.8 in deel I is te zien dat op sommige golflengtes vrijwel geen straling het aardoppervlak bereikt. Dit komt doordat bepaalde moleculen in de atmosfeer alle straling van die golflengte absorberen. Geef aan welk molecuul verantwoordelijk is voor de absorptie van de straling op de positie A in figuur 2.8.

b. CO_2 laat zichtbaar licht goed door, maar absorbeert veel langgolvige straling. Verklaar aan de hand van de totale stralingsbalans waarom CO_2 een broeikasgas is.

Opdracht 40.

Schrijf de stappen van het Chapman mechanisme op en leg uit wat er gebeurt. Laat zien dat de reacties van het Chapman mechanisme in balans zijn.

Opdracht 41.

UV-straling heeft een erg kleine golflengte. Waarom is deze straling zo schadelijk voor het menselijk lichaam?

4.3 Effecten veroorzaakt door de mens

4.3.1 Emissies door de mens



Figuur 4.2 Emissie van gassen door industrie

Alles begint met de uitstoot van schadelijke en ook minder schadelijke stoffen naar de atmosfeer. Belangrijke veroorzakers van de uitstoot zijn de industrie, het wegverkeer en de energievoorziening. Bij verbranding van stoffen en bij een groot aantal industriële processen ontstaan stoffen of komen stoffen vrij die de lucht kunnen vervuilen of die in de lucht reageren tot vervuilende stoffen. Omdat er in de industrie sprake is van een grote verscheidenheid aan processen, komt er een groot aantal verschillende afvalstoffen vrij. Zie hiervoor Tabel 4.5. Hier staat ook welke stoffen vrijkomen als gevolg van de energiewinning en door het verkeer.

Tabel 4.5 Uitstoot van chemische stoffen per sector (lenntech.nl)

Chem. stof	Afkorting	Industrie	Energiewinning	Verkeer
Koolmonoxide	CO	X		X
Koolstofdioxide	CO_2	X	X	X
Zwaveldioxide	SO_2	X	X	
Stikstofoxiden	NO_x	X	X	X
Lachgas	N_2O	X		
Methaan	CH_4	X	X	
Ammoniak	NH_3	X		
Fijnstof	PM10	X		X
Chloorfluorkoolwaterstoffen	CFK's	X		

Zoals je ziet worden er veel verschillende stoffen naar de atmosfeer uitgestoten. En dan zijn we er niet vanaf! Integendeel, dit is juist de oorzaak van veel problemen met de luchtkwaliteit in de stad. We gaan nu kijken wat er met deze gassen in de atmosfeer gebeurt en waarom ze zo slecht zijn voor onze gezondheid.

4.3.2 Afbraak van stratosferisch ozon door CFK's

In hoofdstuk 4.2.2 heb je de natuurlijke afbraak van stratosferisch ozon gezien via het Chapman mechanisme. Naast dit natuurlijke proces heeft de mens zoveel bijgedragen aan de afbraak van het stratosferisch ozon, dat er een 'gat in de ozonlaag' is ontstaan boven Antarctica. Dit is geen echt gat, maar een lokale vermindering van de concentratie stratosferisch ozon, waardoor meer schadelijke UV-straling het aardoppervlak bereikt. De verdunning van de ozonlaag is voornamelijk het gevolg van de uitstoot van CFK's: chloor-fluor-koolwaterstoffen. Onder invloed van zonlicht splitsen deze CFK's zich, waardoor chloor vrijkomt. Het chloor uit deze verbindingen breekt het stratosferisch ozon af via de volgende reactie:

$$Cl\cdot + O_3 \rightarrow ClO\cdot + O_2$$
$$Cl\cdot + O_3 \rightarrow ClO\cdot + O_2$$
$$ClO\cdot + ClO\cdot \rightarrow Cl_2O_2$$

$$Cl_2O_2 \quad + \quad \text{UV licht} \quad \rightarrow \quad 2\,Cl\bullet + O_2$$

$$\text{netto:} \qquad\qquad 2\,O_3 \quad \rightarrow \quad 3\,O_2$$

Het netto resultaat is drie zuurstofmoleculen in plaats van twee ozonmoleculen.
CFK-verbindingen zaten bijvoorbeeld in spuitbussen, koelkasten, airconditioning en schoonmaakmiddelen. Ze werden veel gebruikt tot men doorkreeg dat ze het hierboven beschreven effect hadden op de ozonlaag. Indirect had het gebruik van CFK's dus gevolgen voor de menselijke gezondheid. In 1989 werd het Montreal protocol van kracht, waarin is vastgelegd dat de productie en het gebruik van CFK's geleidelijk wordt gestopt. Sindsdien is de ozonlaag zich weer langzaam aan het herstellen.

4.3.3 Vorming van troposferisch ozon

In de onderste laag van de atmosfeer, de troposfeer, kan op warme, onbewolkte dagen ozon gevormd worden uit NO_x en vluchtige organische stoffen, onder invloed van (met name de UV-straling uit) het zonlicht. Een voorbeeld hiervan is de reactie tussen NO_2 en O_2:

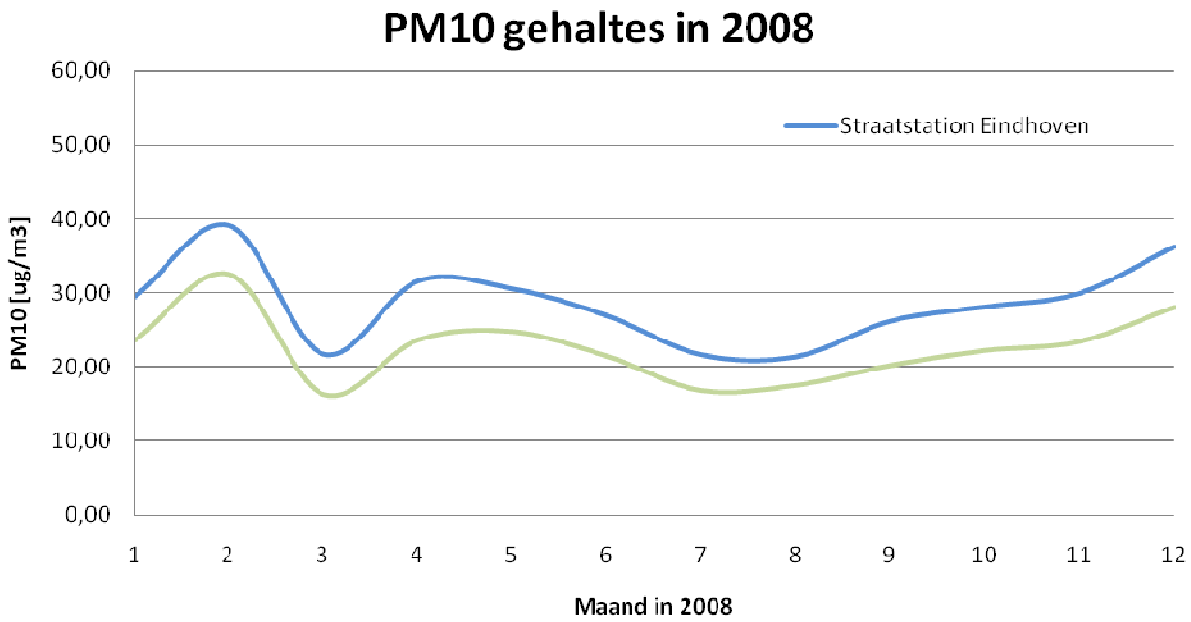
$$NO_2 + O_2 \rightarrow NO + O_3$$

Vluchtige organische stoffen reageren met het NO, waardoor het evenwicht naar rechts verschuift en er nog meer troposferisch ozon ontstaat. Vooral uitlaatgassen van auto's bevatten veel ozonvormende stoffen. Directe blootstelling aan ozon heeft nadelige gevolgen voor de gezondheid van mensen, dieren en planten. Specifieke gezondheidsklachten als gevolg van ozon zijn: oogirritaties en ademhalingsmoeilijkheden, in het bijzonder bij kinderen met astma en bij ouderen in het algemeen. Dit is dan ook het grootste verschil tussen het ozon in de troposfeer en het ozon in de stratosfeer: hetzelfde molecuul heeft in de stratosfeer een beschermende werking en in de troposfeer juist een bedreigende voor de menselijke gezondheid. Waar we bang zijn voor een te snelle afbraak van stratosferisch ozon door menselijk handelen, zijn we bij troposferisch ozon juist bang dat er teveel van gevormd wordt.

4.3.4 Fijnstof problematiek

Fijnstof bestaat uit kleine deeltjes, met een diameter van minder dan 10 µm (10^{-6} meter), die in de lucht zweven; ze worden ook wel aërosolen genoemd. Vanwege de grootte van de deeltjes wordt fijnstof ook wel aangeduid als 'particulate matter 10 µm', ofwel PM10. Deeltjes met een diameter kleiner dan 0,1 µm (PM0,1) behoren tot het ultra-fijnstof.
Fijnstof ontstaat o.a. bij de verbranding van fossiele brandstoffen (kolen, stookolie, benzine) door verkeer, huishoudens en industrie. Het draagt bij aan het ontstaan van smog en is zelf ook schadelijk voor de volksgezondheid. Het inademen van fijnstof is schadelijk voor de longen. Bij zeer jonge kinderen kan inademen van fijnstof ertoe leiden dat de longen zich minder goed ontwikkelen. Bij mensen met luchtwegaandoeningen kan de ziekte verergeren door het inademen van fijnstof. Daarom zijn er binnen de Europese Unie normen gesteld aan de maximale concentratie fijnstof die in de lucht mag zitten. Sinds 2005 geldt: de daggemiddelde concentratie mag niet meer dan 35 dagen per jaar hoger zijn dan 50 µg/m^3. Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) meet op diverse plaatsen in Nederland dagelijks de fijnstof concentratie. Op de meeste meetpunten werd voldaan aan de norm maar op drukke straten werd deze norm overschreden. Zie figuur 4.3, waar de maandgemiddelde PM10 gehaltes voor twee meetstations staan. De blauwe lijn is van een meetstation in Eindhoven dat vlak langs een drukke weg staat. De groene lijn is van een meetstation in Huijbergen dat in een regionaal gebied staat, buiten de stad. In Huijbergen werd in 2008 op 15 dagen de norm van 50 µg/m^3 overschreden, in Eindhoven maar liefst op 23 dagen!

De EU-norm is per 1 januari 2010: niet meer dan 7 dagen per jaar > 50 µg/m^3 en het jaargemiddelde mag niet boven 20 µg/m^3 uitkomen.



Figuur 4.3 PM10 gehaltes gemiddeld per maand in 2008, gemeten door het RIVM

In de stad is de fijnstof problematiek het grootst. Dit heeft twee redenen: in de stad worden meer fijnstof-deeltjes gevormd door emissie van het verkeer en de industrie, en de gevormde fijnstof-deeltjes worden minder makkelijk verspreid door de wind, zodat ze boven en in de stad blijven hangen. De hoge gebouwen houden de aërosolen als het ware 'gevangen'.

4.3.5 Smogvorming



Figuur 4.4 Smog in Londen (eoearth.org)

Het woord **smog** is een samentrekking van de Engelse woorden smoke (rook) en fog (mist). In de jaren vijftig van de twintigste eeuw had men voor het eerst op grote schaal last van smog in grote steden. Londen werd een aantal keren flink getroffen door langdurige periodes van ernstige luchtverontreiniging. Door de verstedelijking werd er veel zwaveldioxide (SO_2) en fijnstof uitgestoten naar de atmosfeer. Zwaveldioxide ontstaat vooral bij het verstoken van zwavelhoudende brandstoffen, wat vooral gebeurt in industriegebieden. Waar fijnstof vandaan komt hebben we in de vorige paragraaf gezien. Samen zorgen SO_2 en fijnstof ervoor dat er smog kan ontstaan.

Wanneer het in de winter koud en vrijwel windstil is kan er als het ware een deken van luchtverontreiniging over de stad komen te liggen en wordt het grauw en donker in de straten, zoals goed is te zien in Figuur 4.4: een foto uit december 1952 toen Londen bedekt werd door een dikke laag smog. Deze smog noemen we **wintersmog.**

Later is er nog een ander soort smog bekend geworden. Deze heeft te maken heeft met de ontwikkeling van ozon in de troposfeer. Het type smog dat ontstaat onder invloed van troposferische ozon noemen we **zomersmog**. Troposferisch ozon wordt gevormd onder invloed van zonlicht. Dit

betekent dan ook dat deze soort smog eerder optreedt op een mooie zonnige en windstille zomerdag. In Santiago hebben de inwoners regelmatig last van winter- en zomersmog (Figuur 4.6).

Opdracht 42.

De afbraak van ozon door het chloor in CFK's vindt vooral plaats wanneer de temperatuur heel laag is. Echter, voor de reactie is wel voldoende zonlicht nodig. In welke maanden zal het gat in de ozonlaag boven Antarctica het grootst zijn?

Opdracht 43.

Kun je een reden bedenken waarom de PM10 concentratie in de lucht eind december een stuk hoger is dan in de maanden daarvoor?

Opdracht 44.

Ga naar de website van het RIVM via de volgende link:

► URL 2: http://www.lml.rivm.nl/data/overschrijding/overschrijdingpm10.html

Op deze site kun je per meetpunt zien hoe vaak de fijnstofconcentratie boven de wettelijke norm van 50 µg/m^3 uit komt. Zet voor de volgende zes stations in een grafiek hoe vaak de norm overschreden is in de loop van de tijd. Wat kun je op basis van deze grafiek zeggen over de fijnstofconcentraties? Vergelijk de jaren onderling (van 2005 tot en met 2009) en de stations onderling.

- Vredepeel - Vredeweg (regionaal station)
- Hellendoorn - Luttenbergerweg (regionaal station)
- Rotterdam - Schiedamsevest (stadstation)
- Amsterdam - Florapark (stadstation)
- Eindhoven - Noordbrabantlaan (straatstation)
- Nijmegen - Graafseweg (straatstation)

Opdracht 45.

Sinds een paar jaar is de Wereldgezondheidsorganisatie niet alleen alert op PM10 in het algemeen, maar wordt er specifiek gelet op een fijnere variant met de naam PM2,5. Wat betekent deze naam? Zoek op internet op waarom we juist geïnteresseerd zijn in deze variant fijnstof.

Opdracht 46.

Wat is het verschil tussen zomersmog en wintersmog, d.w.z. welke stoffen spelen een rol bij het ontstaan ervan en welke weersomstandigheden bevorderen het ontstaan van wintersmog, resp. zomersmog?

4.4 Transport en verblijftijd

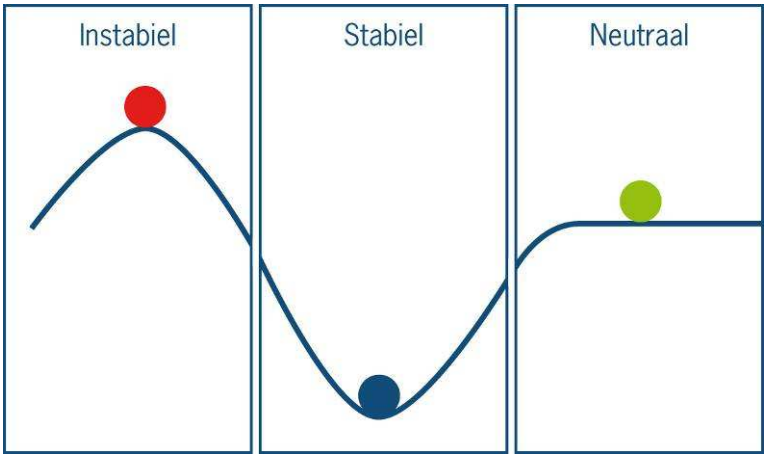
We hebben gezien hoe smog kan ontstaan in een stad als Santiago.
Er zijn ook weersomstandigheden die het ontstaan van smog *belemmeren*. Als er namelijk veel **transport** van deeltjes door de atmosfeer heen is, dan zullen de vervuilende deeltjes zich verspreiden in de lucht en zijn ze niet in staat om een deken over de stad te vormen.
Hoe lang deeltjes in de atmosfeer aanwezig blijven, noemen we de **verblijftijd**.

4.4.1 Transport in de atmosfeer

Stoffen in de atmosfeer kunnen door de wind meegevoerd worden en verspreid worden over de atmosfeer. De wind zorgt voornamelijk voor horizontaal transport, ook wel **advectie** genoemd. De wind kan er dus voor zorgen dat de vervuiling van de stad ergens anders heen wordt geblazen, wat natuurlijk positief is voor de luchtkwaliteit in de stad.

Er is echter ook een belangrijk ander element: het verticale transport. Door **turbulentie** in de atmosfeer wordt de lucht van verschillende hoogten met elkaar gemengd. De luchtlaag waarin de turbulentie optreedt, de grenslaag, is ook aan de orde geweest in paragraaf 4.3 en 4.7 van deel I. Toen ging het over het warmtetransport in de lucht. Dit verticale transport omhoog de atmosfeer in, of omlaag richting het aardoppervlak, wordt voornamelijk bepaald door de **stabiliteit** van de atmosfeer. De mate van (in)stabiliteit van de atmosfeer wordt uitgedrukt in de neiging van een luchtdeeltje om omhoog te gaan of op zijn plek te blijven.
Dit moet je je zo voorstellen: geef een luchtdeeltje een verstoring en kijk wat ermee gebeurt ten opzichte van de omgevende lucht. Als het luchtdeeltje na de verstoring warmer is dan zijn omgeving en dus nog verder stijgt (zelfs als de kracht die de verstoring veroorzaakte er niet meer is!) is de atmosfeer **onstabiel**. Als de omgeving warmer is dan het luchtdeeltje, zal dit na een verstoring terugkeren naar zijn oorspronkelijke hoogte, omdat koude lucht zwaarder is dan warme lucht. Dit is een **stabiele** atmosfeer. Tot slot is er nog de **neutrale** atmosfeer: het verstoorde luchtdeeltje blijft op de plek waar het na de verstoring terechtkwam, omdat het even warm is als de omgeving.

De reden van de verstoring van een luchtdeeltje is bijvoorbeeld een verticale duw die het krijgt doordat het tegen een obstakel botst. Ook kan het in contact komen met de grond en daardoor opwarmen, waardoor het lichter wordt dan zijn omgeving en zich dus omhoog beweegt.



Figuur 4.5 Analogie van het effect van stabiliteit in de atmosfeer: in dit geval zal een horizontale verstoring (in de atmosfeer is verstoring verticaal!) ertoe leiden dat het balletje wegrolt (rood, onstabiel), terugrolt (blauw, stabiel) of op zijn plek blijft liggen (groen, neutraal).

Doordat de zon overdag het aardoppervlak opwarmt, wordt de lucht aan het oppervlak warmer dan de lucht erboven. Deze warme lucht stijgt op. Hierdoor zal de atmosfeer onstabiel van opbouw worden, waardoor een goed gemengde grenslaag ontstaat, die meer dan een kilometer hoog kan zijn. Bij zonsondergang krimpt de grenslaag, omdat er niet meer van onderaf verwarmd wordt. Sterker nog, de Q* (netto toegevoegde straling) is dan vaak negatief, wat betekent dat het aardoppervlak afkoelt en de opbouw van de atmosfeer stabiel wordt.

Nu we dit onderscheid gemaakt hebben, kunnen we dit toepassen op de luchtvervuiling. In onstabiele omstandigheden zal vervuilde lucht uit een fabriekspijp warmer blijven dan zijn omgeving en daardoor over de hele grenslaag mengen. Als de omgeving stabiel is, blijft de rook hangen. Hetzelfde geldt voor uitlaatgassen. Je ziet dus hoe belangrijk stabiliteit is voor de luchtkwaliteit.

4.4.2 Verblijftijd van stoffen in de atmosfeer

Zoals vermeld blijven stoffen niet eeuwig in de atmosfeer. Ze kunnen bijvoorbeeld neerslaan op het aardoppervlak: dit heet **depositie**. Ook kunnen ze via chemische reacties in andere moleculen worden omgezet en daarmee 'verdwijnen'. Hoe lang stoffen in de atmosfeer blijven, wordt uitgedrukt in de **verblijftijd**. Dit is de tijd waarin de concentratie van een gas door de verschillende verwijderingsprocessen afneemt tot nog maar iets meer dan één derde van de oorspronkelijke concentratie. Om precies te zijn 1/e = 0,368 van de concentratie die in eerste instantie aanwezig was. Het getal e is een constante die veel in de wiskunde gebruikt wordt. Er wordt bij de berekening van de verblijftijd aangenomen dat de vorming van deze stof niet verder gaat; de concentratie kan dus nooit toenemen.
De volgende exponentiële functie wordt gebruikt voor het bepalen van de op een bepaald tijdstip aanwezige concentratie - C(t) - van een stof:

$$C(t) = C(0) \cdot e^{-k \cdot t} \qquad (14)$$

C(0) is de concentratie van de stof die op tijdstip t = 0 aanwezig is in de atmosfeer. De factor k is de verwijderingsconstante met de eenheid [s^{-1}]. Deze constante k vat alle verwijderingsprocessen samen. Als je voor een bepaalde situatie de verwijderingsconstante weet, kun je met de volgende formule heel gemakkelijk de verblijftijd van een gas in de atmosfeer berekenen:

$$\tau = \frac{1}{k} \qquad (15)$$

τ is de verblijftijd in secondes, maar soms is het handiger om dit om te zetten naar bijvoorbeeld dagen, maanden of zelfs jaren. Kijk maar eens in Tabel 4.6, waar de verblijftijd van enkele gassen in de atmosfeer staat. Het is moeilijk om een goede schatting van de verblijftijd te maken, omdat deze afhankelijk is van de plaats, de tijd en de specifieke stofeigenschappen. Daarom wordt de verblijftijd meestal met een marge aangegeven, zoals ook in Tabel 4.6 gedaan is.

Tabel 4.6 Verblijftijd van enkele gassen in de atmosfeer

Gas	Verblijftijd	Gas	Verblijftijd
N_2, O_2, Ar	$2 * 10^7$jaar	CO	2 – 2.5 maand
He	$3 * 10^6$jaar	NO_2	2 – 8 dagen
CO_2	50 – 200 jaar	SO_2	1 – 5 dagen
N_2O	120 jaar	H_2S	2 dagen
CH_4	12 – 17 jaar	NH_3	1 dag

Hoe actiever een stof wordt opgenomen via een bepaald verwijderingproces, des te korter is de verblijftijd van die stof in de atmosfeer.

Opdracht 47.

Zoek op in welke maanden van het jaar de smog het ergst is in Santiago (Chili). Welk verband is er tussen de ligging van Santiago, de stabiliteit van de lucht in de stad in deze maanden en het feit dat het probleem van de luchtvervuiling juist dan het grootst is?

Opdracht 48.

Een fabriek op de Maasvlakte bij Rotterdam stoot al jarenlang met een constante snelheid zwaveldioxide (SO_2) uit. SO_2 wordt uit de atmosfeer verwijderd door een chemische reactie met een verwijderingsconstante (k) van $3*10^{-6}$ s^{-1}. Nu wordt de fabriek gesloten en stopt de uitstoot van SO_2. Hoe lang duurt het dan voordat de concentratie SO_2 terug is tot 5% van het huidige niveau?



Figuur 4.6 Smog in Santiago

Opdracht 49.

Het kan decennia duren voordat een hoeveelheid methaan uit de atmosfeer is verdwenen. Voor koolstofdioxide kan dit soms wel eeuwen duren. De verblijftijd van CH_4 is ongeveer 15 jaar, die van CO_2 150 jaar. Schets voor beide gassen het verloop van de concentratie over de tijd. (Neem aan dat er in deze periode geen aanvoer van nieuw CH_4 en CO_2 is, wat in werkelijkheid natuurlijk wel zo is.)

4.5 Slot

We hebben in dit deel gezien dat er naast hitte nog een ander groot probleem kan optreden in grote steden. De luchtkwaliteit wordt ernstig aangetast door de uitstoot van schadelijke gassen door de industrie, energieopwekking en verkeer. Smog vormt een ernstige bedreiging van de gezondheid van de inwoners van de stad. In Santiago heeft men erg veel last van smog. Er zijn veel factoren die invloed hebben op de ontwikkeling van smog, zoals de hoeveelheid zonnestraling, de windkracht en natuurlijk hoe dichtbevolkt de stad is.

Opdracht 50.

Stel je voor dat we in Santiago zijn op 11 december. Het is een warme, windstille dag. Beschrijf het verloop van de luchtkwaliteit vanaf ’s ochtends vroeg tot de volgende ochtend.

Computerpracticum 2

Het Gaussisch pluim model wordt vaak gebruikt voor simpele berekeningen van de verspreiding van luchtvervuiling veroorzaakt door een puntbron. Je kunt bijvoorbeeld de (theoretische) grondconcentratie berekenen benedenwinds van een emitterende schoorsteen. In hoofdstuk4.4heb je gelezen dat de wind (**advectie**) zorgt voor de horizontale verspreiding en **turbulentie** voor de verticale menging. Het doel van dit practicum is om het Gaussisch pluim model te bestuderen en om de rol van de turbulentie op de verspreiding van luchtvervuiling te laten zien.

Gauss Theorie
De basis van de formule is de Gauss-kromme. Deze functie, afkomstig uit de statistiek, wordt ook wel kansverdeling of normaalcurve genoemd. De formule zelf zullen we hier niet behandelen. De kanscurve bevat twee parameters die je wel kent. μ is het gemiddelde van een (groot) aantal waarnemingen, en σ is de verdeling rond het gemiddelde.

Praktijk Gauss
Open nu **tabblad 1 (Gauss)** van het excelbestand *prac2_emissiondata.xls*. Hier zie je een voorbeeld van een Gauss-kromme P(x) met μ = 0 en σ = 100. De x-waarden zijn zo gekozen dat de functiewaarde wordt berekend van -440 tot 440 met stapjes van dx (staat nu op 20). De integraal van P(x) geeft de totale kans en wordt benaderd door de som van P(x).dx te nemen (de som staat in het gele vlakje).

1. Wat is het maximum van de Gauss-curve en wat is de waarde van de integraal?

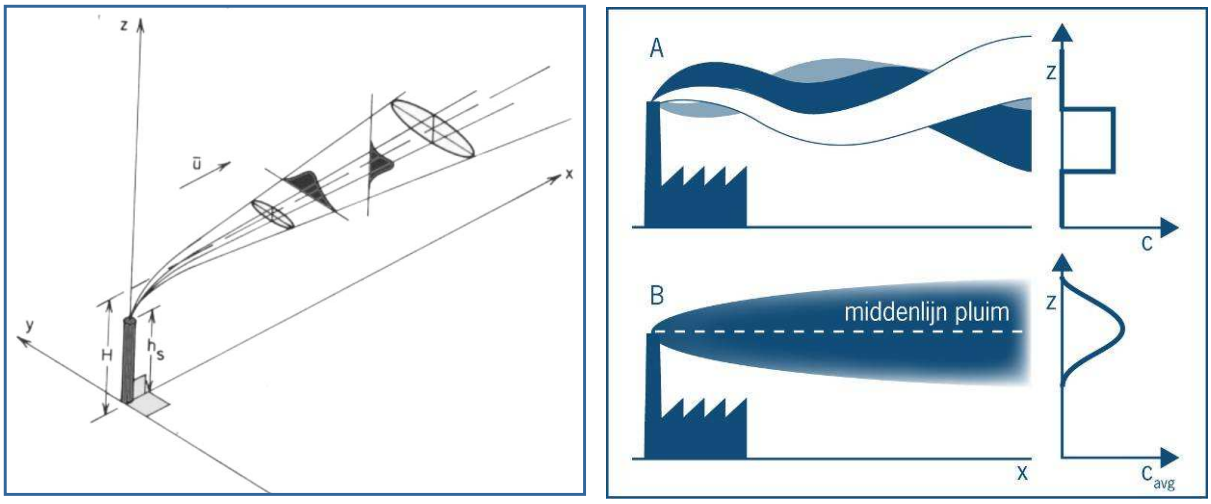
Verander nu σ in 200.
2. Hoe verandert de curve en de integraal? Verklaar!

De integraal van P(x) van x1 tot x2 kan worden geïnterpreteerd als de kans om een waarde x te vinden tussen x1 en x2 (ofwel binnen het domein [x1,x2]).

3. Wat is de kans om een waarde x te vinden binnen [-σ, +σ]? (tip: verander dx zo dat de grenzen ongeveer de juiste waarde hebben. Het gele vakje is dan de kans, 0.15 betekent dus 15%). Je mag σ zelf kiezen.

4. Wat zijn de kansen om een waarde x te vinden binnen [-2σ, +2σ] en binnen [-3σ, +3σ]?

Theorie Gaussisch pluim model
Figuur 4.7 laat de gemiddelde vorm van een pluim uit een schoorsteen zien. We laten de wind (u) langs de x-as waaien. De y-as staat loodrecht op de pluim, en de z-as is de verticaal. De 'effectieve' pluimhoogte wordt aangegeven met H. Die wordt beïnvloed door de hitte van de schoorsteen met hoogte h_s. Wanneer de lucht uit de schoorsteen zeer warm is, zal de lucht veel warmer zijn dan de omgeving en daarom hoger kunnen stijgen.



Figuur 4.7 Verspreiding van een pluim uit een schoorsteen met de gebruikte symbolen (links) en een pluim in onstabiele omstandigheden (rechts)

De figuur links laat zien hoe de pluim zich in onstabiele grenslagen gedraagt. Snapshots (a) geven geen Gauss curve, maar middeling in de tijd leidt wel tot een Gaussische verdeling (b).
De Gauss-kromme komt terug in de formule die de concentratie in de pluim beschrijft. Deze concentratie hangt af van de bronsterkte (**Q** [kg/s]), de windsnelheid (**u** [m/s]), de effectieve pluimhoogte (**H** [m]), en $\boldsymbol{\sigma_z}$ en $\boldsymbol{\sigma_y}$ [m]. De laatste twee termen zeggen iets over de verdeling van de pluim in de y en de z richting. Deze termen hangen af van:

- De afstand x vanaf de bron,
- De stabiliteit van de grenslaag (zie figuren).

We kunnen nu het gaussisch pluim model beschrijven in 3 dimensies. We hebben een gaussische verdeling in het horizontale en verticale vlak, die wordt veroorzaakt door turbulentie. Als we dan de wind meerekenen, zullen de verdelingen stroomafwaarts uitspreiden.

Bekijk nu de andere tabbladen**: Stabiel, Neutraal en Onstabiel**.
Hier kijken we naar de pluim van een schoorsteen met een effectieve emissiehoogte **H** van 50 meter. De wind (**u**) is 5 m/s en de bronsterkte (**Q**) bedraagt 20 kg/s. Door een rooster met punten (y,z) met roosterafstanden (dy,dz) wordt de concentratie berekend en geplot op **x** = 3000 m. Voor het tabblad 'Onstabiel' geldt voor deze afstand van de bron voor de verspreidingsparameters σ_z = 598 m en σ_y = 583 m. Deze parameters worden berekend met:

$\sigma_y = F \cdot x^f$ and $\sigma_z = G \cdot x^g$

Kijk of je alle bovengenoemde parameters kunt vinden. De parameters F, f, G, en g hangen af van de stabiliteit van de grenslaag. Straks gaan we het effect van de stabiliteit op de pluim bekijken.

Tabel 4.7 Waarden in verschillende omstandigheden

	F	**f**	**G**	**g**
Onstabiel	0.40	0.91	0.41	0.90
Neutraal	0.32	0.78	0.22	0.78
Stabiel	0.31	0.71	0.06	0.71

5. Gebruik het tabblad 'Onstabiel'. Wat is de berekende grondconcentratie (z=0) langs de pluim-as (y=0) op 3000 m van de bron? Wat wordt die concentratie als we de schoorsteen 4x zo hoog maken (H=200 m)?

De donkergele vakjes geven de “SUM” van alle concentraties. Als de pluim volledig en met duidelijke contouren in de figuur te zien is moet dit getal gelijk zijn aan Q/u. Als de pluim niet goed wordt weergegeven kun je de waarde van dy en dz aanpassen.

6. Gebruik het tabblad ‘Onstabiel’. Bekijk de pluim nu voor x=5000 m (H=50 m). Hoe veranderen de waarden voor σ_y, σ_z , en C(y=0,z=0)? En is de integraal “SUM” nog gelijk aan Q/u? Pas eventueel dy en dz aan. Verklaar hoe de pluim is veranderd tussen x=3000m en x=5000m.

De concentraties in de pluim zijn natuurlijk afhankelijk van de bronsterkte Q en de windsnelheid u.

7. Hoe verandert de concentratie C(5000,0,0) als je de bronsterkte verdubbelt? En als je de windsnelheid verdubbelt?

Open nu het tabblad: **Stabiel**. Hier vind je de pluim terug, maar voor een stabiele grenslaag. Hierbij zijn alleen F,f, G,g in de berekeningen van σ_y en σ_z veranderd. Merk op dat dy en dz veranderd zijn in 10 m, omdat de pluim anders niet goed op het scherm past.

8. Wat is het belangrijkste verschil met de pluim in de onstabiele grenslaag?

Stel, de fabriek krijgt alleen een vergunning als de concentratie op de universiteit benedenwinds van de schoorsteen (x = 2000 m, y = 100 m, z = 0 m) in deze situatie lager is dan 100 µg/m3.

9. Hoe groot mag de bronsterkte maximaal zijn?

10. En als de grenslaag neutraal is? (gebruik tabblad Neutraal). Wat is je conclusie over de invloed van de stabiliteit van de grenslaag?

11. Waar zijn de meeste bronnen van vervuiling in een stad? Welke van de stabiliteitscondities (stabiel, instabiel of neutraal) is dan het slechtst voor de luchtkwaliteit?

5 Slotopdracht: de ideale stad

Het is wel duidelijk geworden dat zaken als natuurkunde (bijvoorbeeld de stralingswetten), scheikunde (reacties van ozon) en aardrijkskunde (geografische liggen van een stad) erg belangrijk zijn voor een stad. Het is dus zeker niet altijd makkelijk om een stad leefbaar te maken voor iedereen. Maar zelfs als je alle wetenschappelijk factoren kan inschatten, hoeft dit nog niet te betekenen dat het in de praktijk simpel is maatregelen te nemen. In deze slotopdracht zullen we namelijk zien dat er vaak tegenstrijdige belangen zijn.

We begonnen de wereldreis in Rotterdam, waar we begrepen dat de straling, vochthuishouding en landgebruik belangrijke elementen zijn die het stadsklimaat bepalen. Vervolgens hebben we gekeken hoe deze elementen het weer in Singapore beïnvloeden en waardoor je warmte en koude anders ervaart. Ook hebben we kennisgemaakt met de luchtkwaliteit, die in bijvoorbeeld Santiago slecht is onder invloed van uitlaatgassen en warme omstandigheden. Maar dat er niet altijd problemen zijn met hitte of luchtkwaliteit, bewijst de stad van Anna, Stockholm.

Opdracht 51.

Geef 3 redenen waarom Stockholm weinig last heeft van stedelijke meteorologische problemen.

Om er voor te zorgen dat de steden in Nederland net zo leefbaar worden als Stockholm, heeft de regering van Nederland besloten een deel van de begroting te reserveren voor het verbeteren van het stadsklimaat in de Randstad.

In deze eindopdracht gaan jullie deze begroting tussen verschillende partijen verdelen. In een project dat ‘Kennis voor Klimaat’ heet, doet de overheid onderzoek naar het stadsklimaat in de toekomst. In het eerste deel gaan we maatregelen beoordelen die genomen kunnen worden om een stad in de zomer beter leefbaar te maken. Daarna gaan we een debat houden tussen verschillende groepen die een belangrijke rol spelen bij de besluitvorming. Deze groepen zijn de overheid, industrie en burgers. Het uiteindelijke doel van dat debat is het vinden van maatregelen waar iedereen het mee eens is.

Structuur van het debat:

Lesuur	Wie	Activiteit	Tijdsduur
1	Wetenschappers Groepjes van ca. 2 leerlingen	De 12 maatregelen beoordelen	50 minuten
2	Burgers / Industrie / Overheid Groepjes van ca. 8 leerlingen	Maatregelen lezen, op volgorde zetten, argumenten opschrijven	50 minuten
3	Burgers / Industrie / Overheid Groepjes van ca. 8 leerlingen	Debatteren / maatregelenkiezen	50 minuten

Opbouw

Lesuur 1 **De wetenschap**

In dit eerst lesuur wordt de klas opgesplitst in maximaal 12 groepen. Elke groepje van twee leerlingen gaat kijken naar een mogelijkheid om het stadsklimaat aan te pakken. Dit ga je doen vanuit het perspectief van de wetenschap. Je gaat dus objectief kijken of de maatregel gemakkelijk te realiseren is en hoeveel het oplevert.

Op de volgende bladzijde staat per maatregel een korte introductie wat de maatregel inhoudt. Deze maatregelen staan ook weergegeven in tabel 1. Je krijgt nu per groepje een van de maatregelen aangewezen en je zult dan op het internet informatie hierover opzoeken.

Opdracht

Zoek op het internet informatie over jouw maatregel en maak een samenvatting in maximaal 200 woorden. Je mag hierin zeker je creativiteit gebruiken. Geef op basis van je bevindingen een beoordeling in de vorm van de gegeven schaalverdeling (++,--, etc.) en vul dit in in tabel 1. Geef in je verslag het volgende aan:

- *Wat houdt de maatregel precies in?*
- *Wat is de technische haalbaarheid?*
    - Hoe ingewikkeld is het om de maatregel in te voeren? Is het moeilijk (--) of is het makkelijk te realiseren (++)?
- *Wat is het effect op stadsklimaat?*
    - Hoe groot is het effect op het stadsklimaat als de maatregel wordt toegepast? Heeft het een zeer positief effect op de temperatuur en leefbaarheid (++) of zal het weinig uitmaken (--)

Maak de samenvatting van max. 200 woorden in een Word-document en lever dit na de les in bij de docent!

Lesuur 2: **Voorbereiding op het debat**

We gaan ons nu voorbereiden op het debat. Daartoe zal de klas nu in drie groepen verdeeld worden: de industrie, burgers en overheid. Deze groepen krijgen apart een blad van de leraar waarop verdere informatie voor die groep staat. Daarnaast krijg je de ingevulde tabel en de bevindingen van alle maatregelen die jullie als klas beoordeeld hebben. Lees deze beide documenten goed door!

Lesuur 3: **Debat**

Voor het uiteindelijke debat zal er gediscussieerd gaan worden tussen de 3 genoemde groepen. De aanwijzingen hiervoor vind je verder op de handleiding voor jouw groep.



Figuur 5.1 Overzicht van een klimaatvriendelijke wijk.

Maatregelen op stadsniveau

Vegetatie

Zoals we in hoofdstuk 1 gezien hebben is de vochthuishouding van een stad erg belangrijk. Een effectieve manier om het aandeel van de latente warmtestroom groter te maken, is het aanplanten van extra vegetatie. Door verdamping door de stomata en van het oppervlak is er veel meer vocht aanwezig. Dit kan eenvoudig worden gerealiseerd door bomen en struiken aan te planten, mits daar ruimte voor is.

Bestrating

De wegen in een stad kunnen reflecterend worden gemaakt: door het albedo van de straten te verhogen zal er meer kortgolvige straling worden weerkaatst en zal het dus koeler blijven. Een probleem is wel hoe de automobilist niet verblind wordt door de weerspiegeling. Ook de doorlaatbaarheid is belangrijk voor de beschikbaarheid van vocht in de stad. Wanneer eenmaal gekozen is voor ander asfalt en het geleidelijk wordt ingevoerd, hoeft dit niet veel te kosten.

Water

Grote waterpartijen zoals in Stockholm zijn goed voor de temperatuur van een stad, maar zijn niet makkelijk te realiseren als ze er niet zijn. Op kleinere schaal kan je wel vijvers en grachten maken, maar dat zal minder effectief zijn. Wel zullen de burgers blij zijn met de verbetering van het aangezicht van de stad.

Stadstructuur

Door op een slimme manier gebouwen neer te zetten, kan de natuurlijke ventilatie in een stad worden verbeterd. Dit betekent dat er meer wind komt en de luchtvervuiling dus beter opgeruimd kan worden. Bovendien zal het bijdragen aan een lagere gevoelstemperatuur.

Maatregelen op gebouwenniveau.

Hittepompen

Het fenomeen van een hittepomp is nog relatief onbekend. Het is simpelweg het verplaatsen van warmte. Wanneer het zomers heel warm is kan bijvoorbeeld deze warmte gebruikt worden om grondwater op te warmen. Wanneer veel grote gebouwen zijn uitgerust met zo'n systeem, zal er minder airconditioning nodig zijn en zal er dus minder warmte vrijkomen in de stad. Het is voornamelijk ook goed voor het energiegebruik.

Groene daken

Groene daken zijn zeer effectief doordat ze zorgen voor meer verdamping, een betere isolatie van huizen en water dat minder snel in de riolering belandt en beschikbaar blijft voor verdamping. Het onderhoud is natuurlijk wel duurder dan een gewoon dak en de constructie van gebouwen zal moeten worden aangepast voor de zware daken.

Koele daken
Een andere optie is het gebruik van reflecterende daken. De optie is veel goedkoper dan groene daken, maar ook minder effectief. Het zorgt voor minder inkomende kortgolvige straling en daardoor een lagere temperatuur. Bovendien is het niet bekend welke gevolgen de wittere daken voor het aangezicht van de stad hebben.

Isolering en schaduw
Door gebruik te maken van schaduw kunnen gebouwen efficiënter met energie omgaan. Gebouwen kunnen zo worden gebouwd dat ze in elkaars schaduw staan. Dit vereist natuurlijk wel een planning ver vooruit welke gebouwen er gebouwd gaan worden. Bovendien zal niet iedereen kunnen waarderen dat ze minder de zon zien. Daarnaast kan er worden geïnvesteerd in een betere isolatie van huizen, dit zal de huizen in de zomer koeler en in de winter warmer maken.

Politieke maatregelen
Heffing op autorijden in de stad
In Duitsland is het al een bekend fenomeen: het invoeren van een heffing als je met de auto regelmatig in het centrum komt. Naarmate je auto meer slechte stoffen uitstoot moet je meer geld betalen om het centrum van de stad in te mogen. Hierdoor kan de luchtkwaliteit verbeteren.

Heffing op energieverslindende elektronica
Apparaten zoals koelkasten, televisies en computers verbruiken veel energie. Door deze apparaten extra te belasten kan de overheid geld binnenkrijgen, dat weer geïnvesteerd kan worden in andere projecten om het stadsklimaat te verbeteren. Deze maatregel is dus vooral bedoelt om het energieverbruik te verminderen (goed voor het klimaat door verminderde CO_2 uitstoot) en aan de andere kant geld vrij te maken.

Invoering flexibele werktijden
Veel problemen ontstaan doordat mensen op het warmste moment van de dag het drukst zijn. Door de werktijden flexibel te maken, kunnen mensen ervoor kiezen eerder of later op de dag te gaan werken. Bovendien heeft een spreiding van werktijden grote invloed op de verkeersstromen (files) in een stad. Een regeling waarbij niet-flexibele bedrijven moeten betalen aan de overheid kan geld opleveren.

Milieuheffing voor industrie
De materialen die gebruikt worden in de industrie zijn vaak bron van problemen in de stad. Door de uitstoot van bijvoorbeeld fijnstof of andere vervuilende gassen te belasten, kan de overheid geld terugverdienen. Dit kan dan weer geïnvesteerd worden in maatregelen om het stadsklimaat aan te pakken.

Tabel 1

++ = erg hoog + = hoog o = gemiddeld - = laag -- zeer laag

Nr.	1. Stadsstructuur	Investeringskosten	Technische haalbaarheid	Effect op stadsklimaat
	Vegetatie	10 mln		
	Bestrating	10 mln		
	Water	30 mln		
	Stadsstructuur	50 mln		
	2. Gebouwen			
	Hittepompen	10 mln		
	Groene daken	30 mln		
	Koele daken	10 mln		
	Isolering en schaduw	20 mln		
	3. Beleid			
	Heffing op autorijden in stad	-20 mln		
	Heffing op energieverslindende electronica	-20 mln		
	Invoering flexibele werktijden	-10 mln		
	Energiezuinigheidsheffing voor industrie	-30 mln		

Landschapsarchitect met gevoel voor stadsklimaat

Iedereen weet het: Nederland is een windland. En toch houden stedenbouwkundige en landschapsarchitecten hier nauwelijks tot geen rekening mee in hun ontwerpen. Sanda Lenzholzer, assistent professor aan Wageningen University, deed onderzoek naar het stadsklimaat in Nederlandse steden. Haar conclusie: "een goed ontwerp kan eigenlijk niet zonder kennis over het stadsklimaat". Sanda vertelt over haar studiekeuze, haar ervaring als stedenbouwkundig ontwerper en onderzoeker, en over maatregelen die het stadsklimaat aangenaam maken.

Vanuit het grote raam heeft ze uitzicht op de vijver buiten. De wind speelt met de bomen die even verderop staan, maar Sanda tuurt geconcentreerd naar het beeldscherm van haar laptop. Ze heeft een drukke baan. Als assistent professor aan Wageningen University is ze verantwoordelijk voor lessen aan studenten van de opleiding 'Landschapsarchitectuur en Ruimtelijke Planning'. Daarnaast heeft ze in haar promotieonderzoek onderzocht hoe je bij het ontwerpen van steden rekening kan houden met het stadsklimaat. Sindsdien is ze continu op pad. Sanda: ''Ik ben op dit moment een beetje een flying circus. Overal word ik uitgenodigd voor lezingen over het stadsklimaat." Aandacht voor het stadsklimaat is echt iets nieuws in Nederland.

Sanda groeide op in Duitsland. Ze deed een studie Landschapsarchitectuur in Hannover, die ze vervolgde met een studie Stedenbouwkunde in Londen. ''Ik heb gekozen voor landschapsarchitectuur omdat ik het belangrijk vond om de omgeving van de mens te verbeteren. Eerst wilde ik meer de natuurbeheer kant op, maar dan ben je eigenlijk te veel met regeltjes bezig en niet met het echte ontwerpen." Sanda koos duidelijk voor de ontwerpkant: "ik heb een vervolg studie in stedenbouwkunde gedaan omdat dat heel sterk samenhangt met landschapsarchitectuur. In Nederland zie je dat heel veel landschapsarchitecten zich profileren met de combinatie landschapsarchitectuur en stedenbouwkunde.''

Na haar studie deed Sanda praktijkervaring op in Nederland. "Ik heb zeven jaar gewerkt bij ontwerpbureaus. Ik heb pleinen ontworpen en meegeholpen aan de herinrichting van hele binnensteden.'' Uit eigen ervaring heeft Sanda geleerd dat het stadsklimaat een niet te vergeten element is binnen landschapsarchitectuur en stedenbouw. ''Met stadsklimaat wordt in Nederland nog weinig gedaan. In mijn werk ben ik daar al een aantal keer tegenaan gelopen.'' Zo ontwierp Sanda een plein met openluchtpodium waarop de eerste reacties zeer lovend waren. In de praktijk bleek echter al snel dat er een heel vervelend windklimaat op het plein ontstond, en moest het podium met windschermen afgebakend worden om het bruikbaar te houden. Sanda:"Toch een inbreuk op je ontwerp!". Onder meer deze praktijkervaring deed Sanda besluiten het onderzoek in te gaan.

Mensen hebben vaak onbewust een heel goed besef van het microklimaat op de pleinen. In haar onderzoek heeft Sanda willekeurige passanten op drie pleinen in Nederland geïnterviewd. ''Ze weten welke plekken in de zomer te heet zijn en in de winter te koud, en waar op de pleinen veel wind kan staan." De passanten weten, als je ze ernaar vraagt, zelfs maatregelen te bedenken die een duidelijk effect hebben op het microklimaat. En dat terwijl architecten vaak geen rekening houden met het stadsklimaat. Er zijn voorbeelden van architecten met wereldfaam die weigeren hun ontwerp aan te passen, ondanks waarschuwingen van windexperts dat er een vervelende wind kon ontstaan rond het gebouw. Een luifel had bijvoorbeeld het windklimaat kunnen verbeteren, maar dat paste niet in het ontwerp van de architect en werd dus niet geplaatst. Sanda reageert duidelijk ontstemd: ''Hoe kan je als architect zo arrogant zijn! Je ontwerpt toch voor de mensen? Dan ben je in mijn ogen een slechte architect.''

Het vergt inzicht om maatregelen te bedenken, die een ontwerp echt “stadsklimaatvriendelijk” maken. Zo heeft een groene stad over het algemeen minder problemen met hitte. Je moet echter wel goed oppassen wáár je het groen plaatst. Bomen langs een drukke weg verhinderen ventilatie, dus de aanvoer van frisse lucht. Dit leidt al snel tot een soort van fijnstoftunnel, wat weer gevolgen kan hebben voor de volksgezondheid. Enerzijds werkt meer water in een stad verkoelend. Anderzijds kan dit in heel warme periodes leiden tot een hogere luchtvochtigheid, wat het benauwder maakt. En benauwdheid ervaren mensen als onaangenaam. “Het is complex om de stad te bestuderen in verschillende klimaatsituaties. In de zomer op een warme dag heb je andere luchtstromen dan op een kille, gure winterdag met veel wind. Het is de uitdaging van de landschapsarchitect om een ontwerp te maken dat met meerdere situaties rekening houdt.”

Sanda heeft dankzij haar onderzoek een aantal ontwerprichtlijnen op kunnen stellen. Landschapsarchitecten en stedenbouwkundigen kunnen deze gebruiken om rekening te houden met het stadsklimaat. Sanda: “Het stadsklimaat is altijd aanwezig. Een goed ontwerp moet daarom inspelen op verschillende klimaatsituaties. En als je niet weet hoe het stadsklimaat werkt, kan je ook niet voorspellen hoe een ontwerp gaat werken.” Onderzoek naar het stadsklimaat is dan ook onmisbaar.

Wil je meer interviews lezen? Kijk dan op www.wereldvanwageningen.nl

6 Begrippenlijst

Aardoppervlak albedo	Gemiddelde albedo van het aardoppervlak.
Absorptie	Opname van straling of gassen door een voorwerp.
Advectie	Horizontaal transport van deeltjes in de atmosfeer veroorzaakt door de wind.
Albedo	Reflectiefactor van een oppervlak. Kan gelden voor het aardoppervlak, afhankelijk van het landgebruiktype, maar ook voor de atmosfeer, afhankelijk van de wolkenvorming.
Bodem warmtestroom	Deel van de inkomende energiestroom dat wordt gebruikt om de bodem op te warmen.
Bowen-verhouding	Verhouding van voelbare warmtestroom en latente warmtestroom. Deze verhouding is een maat voor de droogte van het oppervlak.
Broeikaseffect	Het effect bij een broeikas dat inkomende kortgolvige straling van de zon door het glas wordt doorgelaten maar langgolvige straling, uitgestraald door de bodem, tegengehouden wordt. Hierdoor stijgt de temperatuur in de broeikas. De atmosfeer heeft dezelfde werking als het glas van een broeikas.
CFK's	Chloor-Fluor-Koolwaterstoffen, breken ozon af waardoor een gat in de ozonlaag ontstaat; zaten veel in spuitbussen.
Chapman mechanisme	Natuurlijk proces waarbij ozon in de atmosfeer gevormd wordt en weer afgebroken wordt.
Dampdruk	De druk die waterdamp op een oppervlak uitoefent tengevolge van de botsingen van de moleculen.
Depositie	Neerslaan van deeltjes op het aardoppervlak; hierdoor verdwijnen de deeltjes uit de atmosfeer.
Diffuse straling	Zonnestraling die via weerkaatsing en verstrooiing in de atmosfeer uiteindelijk het aardoppervlak bereikt.
Directe straling	Zonnestraling die rechtstreeks het aardoppervlak bereikt.
Emissie	Uitzending van straling of gassen door een voorwerp.
Fijnstof	Erg kleine stofdeeltjes die in de lucht zweven, ook wel aërosolen genoemd.
Fluxdichtheid	Stromen van een grootheid (bijv. energie) per tijdseenheid en oppervlak
Gevoelstemperatuur	De temperatuur zoals wij mensen deze ervaren. Deze kan afwijken van de werkelijke temperatuur.
Golflengte	De lengte van een golf, ofwel de afstand tussen twee opeenvolgende

	punten met dezelfde fase.
Grenslaag	Onderste laag van de atmosfeer waar de wind, vochtigheid en temperatuur worden beïnvloed door het oppervlak.
Heat index	temperatuur die een maat is voor de gevoelstemperatuur als gevolg van de relatieve vochtigheid.
Infrarood	Straling met golflengten van 750 nm tot 10000 nm heet infraroodstraling, ook wel warmtestraling.
instralinghoek	De hoek die invallende zonnestraling maakt met het aardoppervlak. Deze is afhankelijk van de breedtegraad op aarde en de tijd en dag van het jaar.
Invalshoek	De hoek die invallende zonnestraling maakt met de normaal, de lijn loodrecht op het aardoppervlak.
Kortgolvige straling	Straling met een golflengte van 100 tot 3000 nanometer, afkomstig van de zon.
Landgebruik	Verwijzing naar de functie waarvoor een stuk land gebruikt wordt.
Langgolvige straling	Straling van 3000-10000 nm die door het aardoppervlak en atmosfeer wordt uitgezonden.
Latente warmtestroom	Gedeelte van de inkomende energiestroom dat gebruikt wordt voor de verdamping van water.
Lokaal albedo	Het albedo dat bepaald wordt door het landgebruik en bodemsoort op een bepaalde plek aan het aardoppervlak.
Luchtkwaliteit	Een maat voor de hoeveelheid verontreinigende en schadelijke stoffen in de atmosfeer.
Mengverhouding	Aantal deeltjes van een bepaald gas per gegeven totaal aantal deeltjes, voorbeeld 3 ppm betekent 3 deeltjes per miljoen deeltjes.
Planckkrommen	Deze kromme geeft aan op welke manier een zwarte straler de uitgezonden energie verdeelt over verschillende golflengtes en hoe dit afhangt van de temperatuur (in Kelvin).
Planetair albedo	Albedo van de aarde inclusief de atmosfeer.
PM	Particulate Matter; maat voor de grootte van de diameter van stofdeeltjes. PM10 staat voor deeltjes met een diameter van 10 micrometer.
Reflectie	Terugkaatsing van straling door een voorwerp.
Relatieve vochtigheid	Het percentage waterdamp dat zich in de lucht bevindt, ten opzichte van de maximale hoeveelheid waterdamp die zich in de lucht zou kunnen bevinden.
Ruwheidslengte	Maat voor de ruwheid van het aardoppervlak uitgedrukt in meter (m).

	Deze maat geeft aan op welke hoogte boven het aardoppervlak de windsnelheid door de wrijving teruggebracht is naar nul.
Smog	Periodieke luchtvervuiling boven een stad of industriegebied. Vormt een verstikkende deken.
Soortelijke warmte	Geeft aan hoeveel warmte er nodig is om 1 kg van de stof 1 graad te laten stijgen in temperatuur.
Spectrum	Overzicht van alle mogelijk voorkomende golflengtes
Stabiliteit	De toestand van de atmosfeer die aangeeft of er veel of weinig menging plaatsvindt. De toestand is afhankelijk van de temperatuuropbouw van de atmosfeer.
Stralingbalans	Optelsom van alle inkomende en uitgaande stralingcomponenten van de aarde en haar atmosfeer.
Stralingsvermogen	Hoeveelheid straling die per seconde door een voorwerp uitgezonden wordt .
Stratosfeer	Laag in de atmosfeer boven de tropopauze.
Transmissie	Gedeelte van de opvallende straling die rechtstreeks door een voorwerp heen gaat.
Transpiratie	Verdamping van water via de huidmondjes van een plant of van de menselijke huid; bij mensen ook wel zweten.
Transport	Verplaatsing van een energie of deeltjes naar een andere locatie. Dit kan via geleiding, stroming of straling.
Tropopauze	Een ‘lijn’ die de troposfeer begrenst. Ligt gemiddeld op zo’n 11 kilometer hoogte.
Troposfeer	De onderste laag van de atmosfeer waarin zich vrijwel al het leven afspeelt.
Turbulentie	Chaotische bewegingen in de lucht; veroorzaakt menging van deeltjes in de atmosfeer.
Ultraviolet	Straling met golflengten tussen 1 nm en 350 nm. Dit is een schadelijke en energierijke stralingsoort.
Urban Heat Island-effect	Een stedelijk hitte-eiland. Het verschijnsel waarbij de temperaturen in de stad hoger oplopen dan in het omringende platteland.
Vallei	In de Urban Heat Island context is dit de ruimte tussen twee gebouwen.
Vanderwaalskracht	Onderlinge kracht tussen moleculen die de moleculen bij elkaar houdt.
Verblijftijd	De tijd die stoffen en gassen in de lucht verblijven tot nog maar 1/e = 0.368 deel van de oorspronkelijke hoeveelheid aanwezig is.

Verdampingswarmte	Warmte nodig om 1 liter water te verdampen.
Verwijderingsconstante	Een factor die een maat is voor de snelheid waarmee een stof uit de lucht verdwijnt ten gevolge van alle verwijderingsprocessen gezamenlijk.
Verzadigingsdampdruk	De dampdruk waarbij de maximale hoeveelheid waterdampmoleculen in de lucht bereikt is. Dit is het condensatiepunt: de waterdamp zal gaan condenseren wanneer de dampdruk verder toeneemt.
Voelbare warmtestroom	Gedeelte van de inkomende energiestroom dat wordt gebruikt om de temperatuur van de lucht op te warmen.
Volumepercentage	Gedeelte van een bepaald gas in een volume-eenheid..
Warmtecapaciteit	Warmte nodig om een object 1^0C in temperatuur te laten stijgen.
warmtegeleiding	Warmtetransport door een voorwerp middels botsingen tussen moleculen.
Warmtegeleidingscoëfficiënt	Maat die aangeeft hoe goed een stof warmte geleidt.
Wind chill	Het effect dat de gevoelstemperatuur lager ligt dan de werkelijke temperatuur als gevolg van de wind.
Windprofiel	Het verloop van de windsnelheid als functie van de hoogte vanaf het oppervlak.
Wintersmog	Smog die wordt gevormd onder invloed van zwaveldioxide en fijnstof; vooral gevormd onder koude en windstille omstandigheden.
Wrijving	De weerstand die de wind ondervindt aan het oppervlak. Wrijving zorgt er voor dat de windsnelheid naar nul gaat dichtbij het oppervlak.
Zichtbaar licht	Licht in de kleuren van de regenboog, zichtbaar voor het menselijk oog.
Zomersmog	Smog die gevormd wordt onder invloed van stikstofoxides en vluchtige organische stoffen; vooral gevormd onder warme en windstille omstandigheden.
Zonneconstante	Gemiddelde instraling in W/m^2 van de zon aan de bovenkant van de atmosfeer (1,4 kJ/m^2) .
Zwart lichaam	Voorwerp dat alle straling absorbeert die er op valt.
Zwarte straler	Zie zwart lichaam.