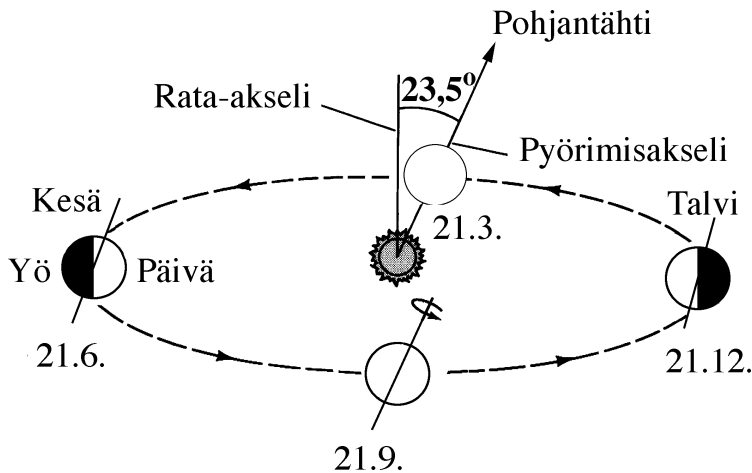


AURINKOENERGIA

Auringon kierto ja korkeus taivaalla

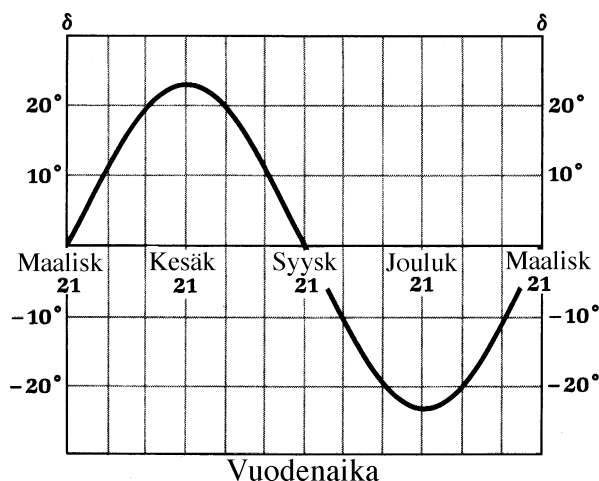
Maapallo kiertää aurinkoa hieman ellipsin muotoista rataa pitkin, jonka toisessa polttopisteessä maapallo sijaitsee. Maapallo on lähinnä aurinkoa tammikuussa ja kauimpana auringosta kesäkuussa. Maapallon pyörimisakseli on kallistunut $23,5^\circ$, mikä aiheuttaa vuodenaikojen vaihtelut. Kallistuman vuoksi pohjoinen pallonpuolisko saa vähemmän auringonpaistetta vuoden vaihteessa, jolloin eteläisellä pallonpuoliskolla on kesä.

Ilmakehän yläosiin saapuu auringonsäteilyä keskimäärin 1368 W/m^2 . Tätä sanotaan aurinkovakioksi. Maan radan soikeudesta johtuen säteilyn määrä vaihtelee jonkin verran eri vuodenaikoina. Suurimmillaan säteily on tammikuussa noin 1410 W/m^2 ja pienimmillään kesäkuussa noin 1320 W/m^2 eli vaihtelu keskiarvosta on noin 3,3 %. Auringon säteilyn määrään vaikuttaa myös auringon aktiivisuus. Aurinko on aktiivisimmillaan, kun auringonpilkkujen määrä on suuri. Niiden määrä vaihtelee noin 11 vuoden jaksoissa. Ilmakehän heijastavasta ja absorboivasta vaikutuksesta johtuen suurin säteily määrä maan pinnalla on kirkkaalla säällä korkeintaan $800 - 1000 \text{ W/m}^2$ eli noin 60 % aurinkovakiosta.



Kuva 1. Maapallon kierto auringon ympäri.

Kun maapallo kiertää aurinkoa ja samalla pyörii kallistuneen akselinsa ympäri, vaihtelee auringon korkeus taivaalla eri vuodenaikoina. Aurinko ei kulje pitkin päiväntasaajaa, vaan on välillä sen ylä- ja välillä sen alapuolella. Auringon korkeuskulmaa maapallon päiväntasaajan tasoon nähden sanotaan auringon deklinaatioksi. Kevätpäivän tasauksena 21.3. aurinko on päiväntasaajalla ja deklinaatio on 0° . Kesäpäivän seisahduksen aikana 21.6. deklinaatio on $+23,5^\circ$ ja aurinko on Kravun käänntöpiirillä. Syyspäivän tasauksena 21.9. deklinaatio on jälleen 0° ja talvipäivän seisahduksen aikaan aurinko on Kauriin käänntöpiirillä ja deklinaatio on $-23,5^\circ$.



Kuva 2. Auringon deklinaation vaihtelu vuodenaikojen mukaan.

Auringon deklinaatio voidaan laskea yhtälöstä

$$\delta = \sin \omega t,$$

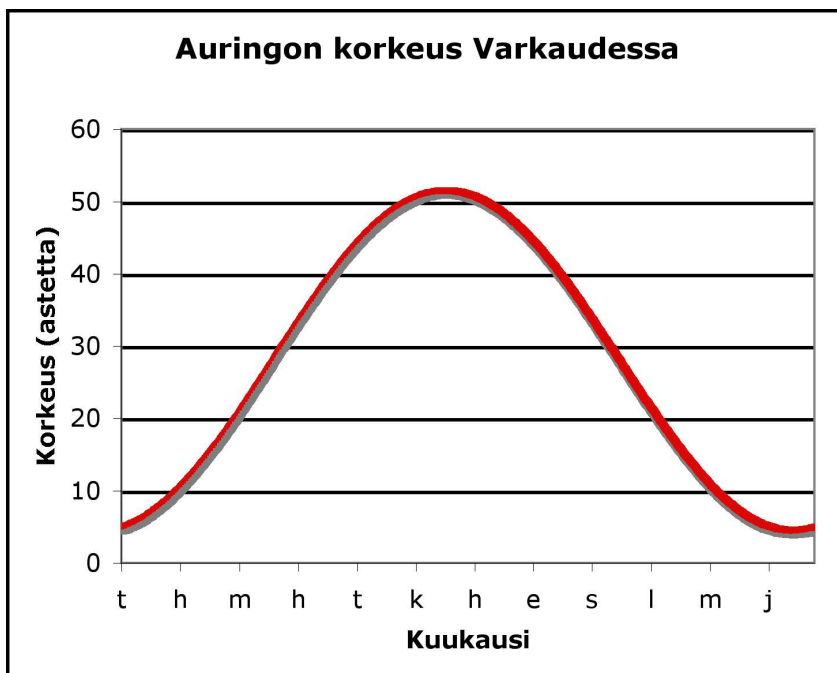
missä w auringon kulmanopeus radalla ja t aika laskettuna kevätpäivän tasauksesta 21.3. Maapallo kiertää radallaan auringon ympäri 360° vuodessa eli yhdessä päivässä kiertymä on $365^\circ/365 \text{ pv} = 0,986^\circ \approx 1^\circ$. Kulmanopeus on nyt helpointa ilmoittaa muodossa

$$\omega = 0,986^\circ/\text{pv}.$$

Auringon korkeus horisontista keskipäivän aikaan saadaan nyt laskettua tietylle leveyspiirille ϕ yhtälöstä

$$\alpha_{\max} = 90^\circ + \delta - \phi.$$

Kuvassa 3 on esitetty auringon maksimikorkeus Varkaudessa (leveyspiirillä 62°) eri vuodenaikoina. Korkeimmillaan aurinko on kesäkuussa, jolloin se käy keskipäivällä hieman yli 50° korkeudessa. Matalimmillaan aurinko on joulukuussa, jolloin sen korkeuskulma keskipäivällä on alle 5° .



Kuva 3. Auringon maksimikorkeus Varkaudessa ($\phi = 62^\circ$) eri kuukausina.

Auringon säteilyenergia

Auringon säteilyn voimakkuus S tietyllä paikkakunnalla voidaan laskea yhtälöstä

$$S = S_o \sin \alpha$$

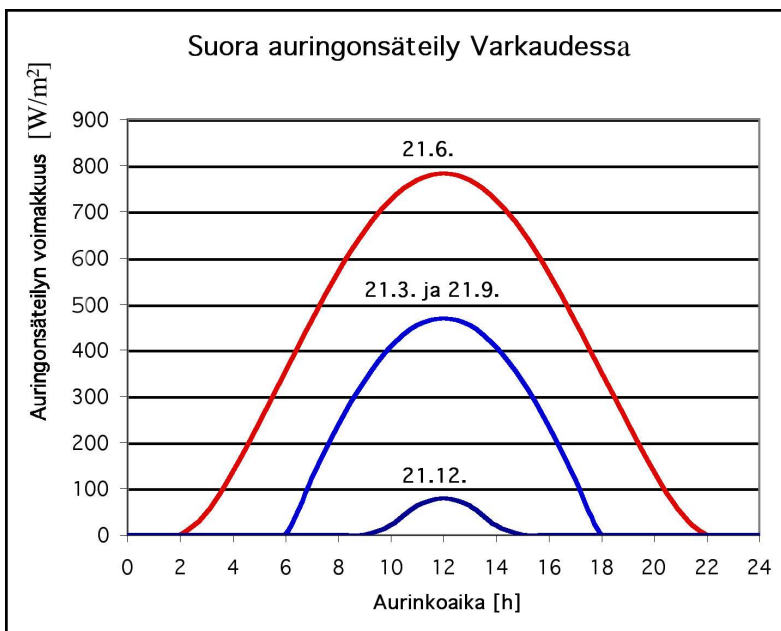
missä $S_o \approx 1000 \text{ W/m}^2$ on auringon säteilyn voimakkuus maan pinnalla silloin, kun aurinko on suoraan yläpuolella. Auringon korkeuskulma α riippuu paikkakunnan leveyspiiristä ϕ , auringon deklinaatiosta δ ja kellonajasta (tuntikulmasta h). Korkeuskulma α voidaan laskea yhtälöstä

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h.$$

Koska maapallo pyörii kerran vuorokaudessa akselinsa ympäri, maapallo kiertyy tunnissa $360^\circ/24 = 15^\circ$. Tuntikulma saadaan siten laskettua yhtälöstä

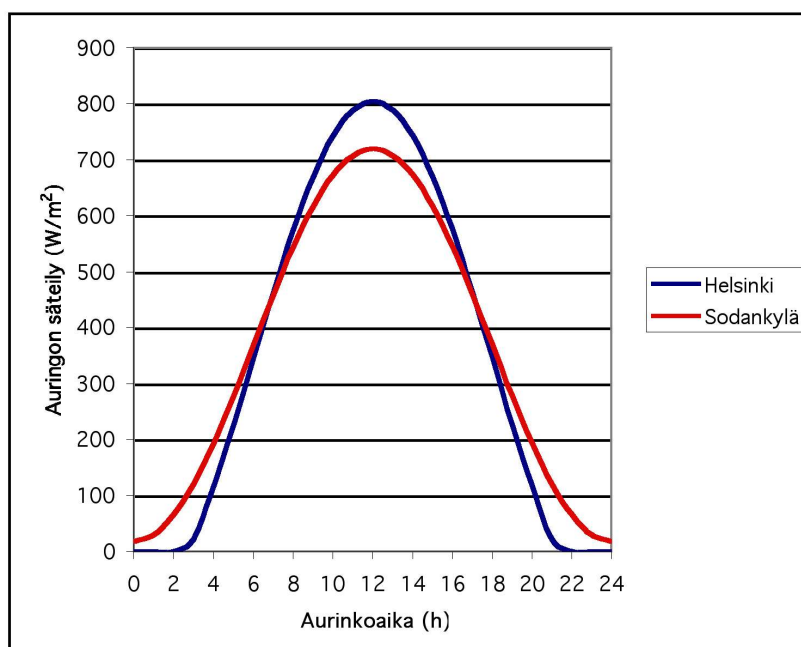
$$h = 15^\circ (\text{Aurinkoaika} - 12).$$

Kesäajan vuoksi aurinko on kesällä etelässä noin klo 13. Sen vuoksi aurinkoaika on tuntia vähemmän kuin kellonaika.



Kuva 4. Auringon säteilyn laskettu voimakkuus Varkaudessa tasauspäivien aikana.

Kuvassa 4 on esitetty auringonsäteilyn laskettu voimakkuus Varkaudessa. Suurimmillaan säteily on kesäpäivän tasauksen aikana, jolloin säteilyä voi kirkkaana päivänä olla klo 8 ja klo 16 välisenä aikana $550\text{--}780\text{ W/m}^2$. Kevät- ja syyspäiväntasauksen aikaan säteilyä on keskipäivälläkin alle 500 W/m^2 ja talvipäivän seisahduksen aikaan korkeintaan 80 W/m^2 . Edellä olevien vuorokausien yhteenlasketut säteilyenergiat ovat $8,7\text{ kWh/m}^2$ (21.6.), $3,6\text{ kWh/m}^2$ (21.3. ja 21.9.) ja $0,2\text{ kWh/m}^2$ (21.12.). (Myöhemmin esitetyistä Ilmatieteen laitoksen tilastoista nähdään, että koko vuoden aikana kertynyt säteilyenergia Suomessa on hieman alle $1000\text{ kWh/m}^2/\text{vuosi}$.) Näissä laskelmissa ei ole huomioitu pilvisyyttä ja muita säteilyn heikkenemiseen vaikuttavia tekijöitä, joten nämä laskelmat on tulkittava suurimmiksi mahdollisiksi säteilymääriksi.



Kuva 5. Lasketut auringon säteilyn voimakkuudet Helsingissä (60°) ja Sodankylässä ($67,5^\circ$) 21.6.

Kuvassa 5 on auringon säteilyn laskettu voimakkuus kesäpäivän tasauksena (21.6.) Helsingissä ja Sodankylässä. Koska Sodankylässä aurinko ei laske ollenkaan, on auringon säteilyn määrä suurempi ennen klo 7:ä (aurinkoaika klo 6) ja klo 19:a jälkeen, mutta keskipäivällä Helsingissä voi säteilyn määrä kirkkaalla ilmalla olla noin 800 W/m^2 , kun se Sodankylässä voi enimmillään olla hieman yli 700 W/m^2 . Kokonaissäteilyenergia kesäpäivän tasauksena on kuitenkin likimain yhtäsuuri eli $8,8\text{ kWh}$ molemmilla paikkakunnilla.

Ilmakehän vaikutus auringon säteilyyn

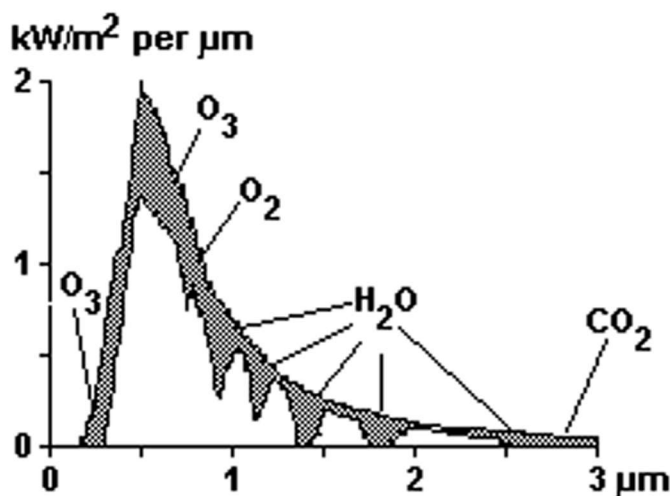
Ilmakehässä olevat kaasut absorboivat auringonsäteilyä ja pienentävät maanpinnalle tulevan säteilyn määrää. Tulevan säteilyn voimakkuus ilmakehän yläosassa on 1368 W/m^2 ja maanpinnalle tästä pääsee vain noin 1000 W/m^2 eli säteily heikkenee lähes 40 % kulkiessaan ilmakehän läpi.

Kuvasta 3 nähdään, että ilmassa oleva vesihöyry H_2O heikentää auringonsäteilyä pääasiassa infrapuna-alueella ($> 0,8 \text{ mm}$). Myös ilmakehän hiilidioksi CO_2 absorboi pitkäaaltoista infrapunasäteilyä, jolla on tärkeä vaikutus kasvihuoneilmioon ja ilmaston lämpenemiseen. Myös ilmakehän happi O_2 absorboi infrapunasäteilyä. Ilmakehän yläosissa oleva otsonikerros O_3 puolestaan vähentää auringon ultraviolettisäteilyä, mikä tekee elämän maapallolla mahdolliseksi. Sen sijaan pilvet eivät absorboi kovin voimakkaasti säteilyä, mikä näkyy siinä, että ne eivät haihdu kovin helposti auringonpaisteessa. Pilvet tosin heijastavat auringonsäteilyä ja sirottavat sitä eli muuttavat säteilyn suuntaa. Tämän vuoksi pilvisellä ilmalla saadaankin melko hyvin aurinkoenergiaa, jos pilvikerros ei ole kovin paksu.

Auringon säteily jakautuu kolmeen osaan:

- 1) Suora auringonsäteily
- 2) Hajasäteily
- 3) Heijastunut säteily

Kirkaalla ilmalla hajasäteilyn osuus on noin 30 %, puolipilvisellä 70 % ja pilvisellä ilmalla hajasäteilyn osuus on 100 %.



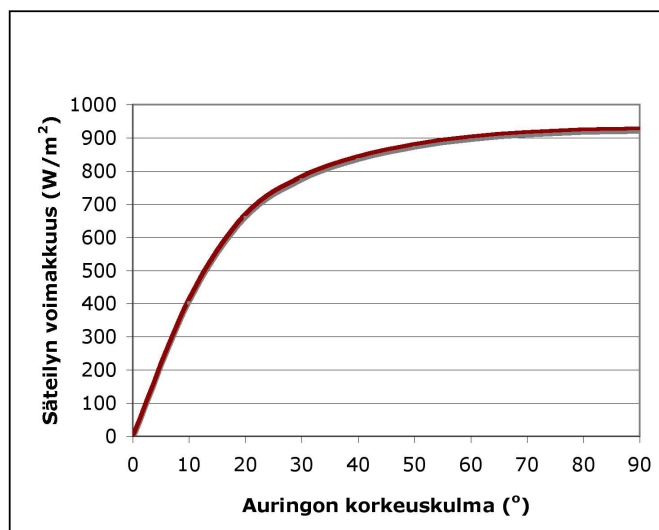
Kuva 6. Auringon säteilyn vaimentuminen ilmakehän kaasujen vaikutuksesta.

Auringon säteilyn voimakkuus on pieni, kun aurinko on lähellä horisonttia (nousemassa tai laskemassa), koska valo joutuu kulkemaan pitkän matkan ilmakehässä. Säteilyn voimakkuus auringon eri korkeuskulmilla voidaan laskea kokeellisesti määritetystä yhtälöstä

$$I = 1100 \text{ W/m}^2 e^{-0,17/\sin \alpha},$$

missä α on auringon korkeuskulma horisontin yläpuolella. Ilman massa maan pintaa vastaan kohtisuorassa suunnassa on 1 kg/cm^2 , mutta vinosti katsottuna massaa tulee huomattavasti enemmän. Esimerkiksi auringon ollessa 10° horisontin yläpuolella, se joutuu tulemaan ilmamassan läpi, jonka paksuus on $5,8 \text{ kg/cm}^2$. Tämä vaimentaa jo huomattavasti auringon valoa ja ilmakehän kaasujen absorptio muuttaa myös säteilyspektrin muotoa.

Kuvasta 7 nähdään, että auringon säteilyn voimakkuus on suurimmillaan, kun aurinko on suoraan yläpuolella. Säteilyn määrä laskee hyvin jyrkästi, kun korkeuskulma on alle 30°. Jos auringon korkeus on 15°, on säteilyn voimakkuus pienentynyt jo noin 50 %. Auringon säteilyn voimakkuus riippuu myös paikallisista olosuhteista kuten ilmassa olevista hiukkasista ja ilman kosteudesta. Usein aamuisin esiintyvä utu ja vesihöyry pienentää säteilyn määrää entisestään.

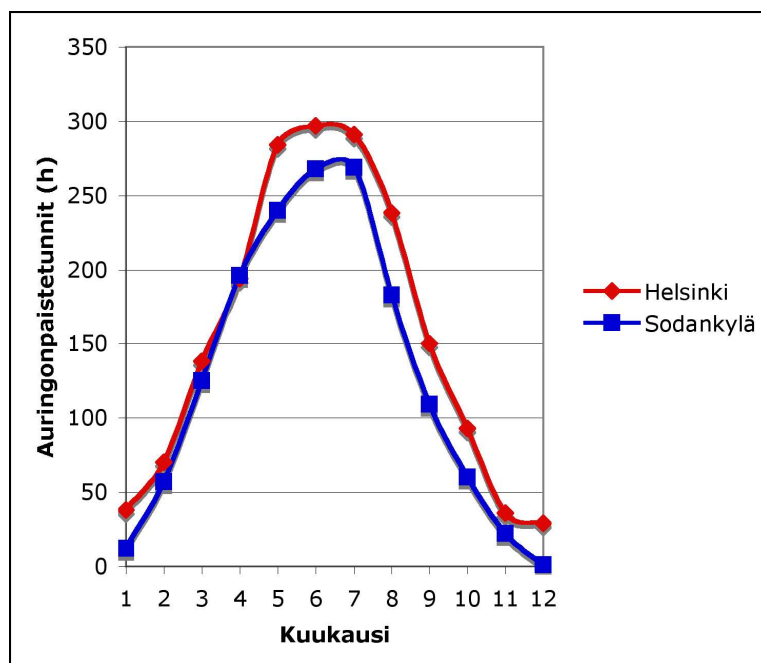


Kuva 7. Auringon säteilyn vaimentuminen ilmakehän paksuuden vaikutuksesta.

Auringonpaiste Suomessa

Ilmatieteen laitos on tilastoinut auringonpaistetta eri puolella Suomea olevissa mittauspisteissä jo hyvin pitkään. Auringonpaistetuntien määrä mitataan tunteina kuukauden aikana. Niille on laskettu 30 vuoden ajalta (1971-2000) kuukausi- ja vuosikeskiarvot. (http://www.fmi.fi/saa/tilstot_9.html)

Auringonpaistetunnit vaihtelevat suuresti eri vuodenaikoina. Esimerkiksi joulukuussa, kun päivä on lyhimmillään, aurinko voi Helsingissä enimmillään paistaa vain reilut viisi tuntia vuorokaudessa, mutta kesäkuussa melkein 20 tuntia. Sodankylässä suoraa auringonpaistetta ei kerry kaamosaikaan lainkaan, mutta kesäaikana paistetta voi kertyä vuorokaudessa 24 tuntia. Auringonpaistetuntien määrä vaihtelee voimakkaasti myös eri vuosina, jopa 30 %.



Kuva 8. Keskimääräiset kuukausittaiset auringonpaistetunnit Helsingissä ja Sodankylässä 1971-2000.

Auringonpaistetta saadaan Helsingissä toukokuun ja heinäkuun välisenä aikana keskimäärin hieman alle 300 tuntia kuukaudessa ja Sodankylässä samana aikana 240 – 360 tuntia kuukaudessa. Huhtikuussa Sodankylässä on keskimäärin auringonpaistetta jopa hieman enemmän kuin Helsingissä. Yleisesti Sodankylässä on auringonpaistetta 30 – 50 h vähemmän kuukaudessa kuin Helsingissä. Syksyllä pilvisuus lisääntyy ja auringonpaistetta on vähemmän kuin keväällä. Koko vuoden aikaa auringonpaistetta on ollut vuosien 1971-2000 aikana Helsingissä keskimäärin 1858 tuntia ja Sodankylässä 1542 tuntia.

Taulukko 1. Keskimääräisten auringonpaistetuntien määrä erällä paikkakunnilla toukokuun ja elokuun välisenä aikana jaksolla 1971-2000.

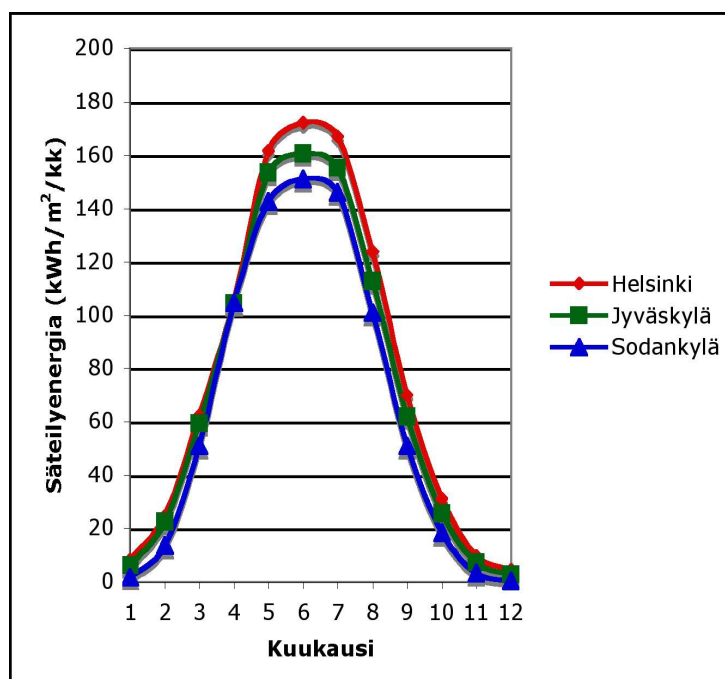
Paikkakunta (Mittauspaikka)	Auringonpaiste (h)
Korpoo (Utö)	1170
Kotka (Rankki)	1131
Maarianhamina (la)	1116
Valassaaret	1107
Kemi-Tornio (la)	1093
Kruunypyy (la)	1079
Turku (la)	1061
Helsinki-Vantaa (la)	1040
Vaasa (la) 61-90	1038
Oulu (la)	1038
Ylistaro	1036
Utti (lk)	1024
Lappeenranta (la)	1014
Kuopio (la)	1005
Jokioinen (la)	993
Joensuu (la)	983
Jyväskylä (la)	978
Rovaniemi (la)	978
Sodankylä (la)	960
Utsjoki (Kevo)	801

Taulukossa 1 on esitetty keskimääräinen auringonpaisteen määrä kesäaikana (touko-elokuu) vuosina 1971-2000 eri paikkakunnilla. Eniten auringonpaistetta Suomessa saadaan tänä aikana etelä- ja länsirannikolla noin 1100 tuntia. Sisämaassa pilvisuus yleensä lisääntyy päivän aikana ja auringonpaistetta saadaan vuorokauden aikana vähemmän kuin rannikolla. Kuopiossa ja Lappeenrannassa on auringonpaistetta kuitenkin keskimäärin yli 1000 h, mikä johtuu suurten järvien vaikutuksesta.

Auringon säteilyenergia Suomessa

Auringon säteily on voimakkaammillaan toukoheinäkuun välisenä aikana, jolloin Helsingissä saadaan auringon säteilyenergiaa kohtisuoralle pinnalle kuukaudessa keskimäärin 160-170 kWh/m², Jyväskylässä 150-160 kWh/m² ja Sodankylässä 140-150 kWh/m². Tammi- ja helmikuussa sekä loka-joulukuun välisenä aikana säteilyenergian määrä on alle 30 kWh/m². Koko vuoden aikana saadaan Helsingistä auringon säteilyenergiaa keskimäärin 940 kWh/m², Jyväskylässä 870 kWh/m² ja Sodankylässä 780 kWh/m².

Suomessa auringon säteilyteho on keskipäivällä noin 1000 W/m² eli tunnissa jokaiselle neliometrille tulee energiaa noin 1 kWh. Kun auringonpaistetta saadaan keskimäärin noin 1000 tuntia vuodessa, saadaan vuoden aikana jokaiselle neliometrille noin 1000 kWh aurinkoenergiaa. Parhaimpien markkinoilla olevien paneelien hyötysuhde on noin 17 %. Tällöin Suomessa yhdestä neliömetrin suuruisesta aurinkokennosta saadaan parhaimmillaan vuodessa noin 170 kWh energiaa. Kuitenkin melko suuri osa tästä energiasta menetetään mm. energian siirrossa ja paneelien suuntauksessa.



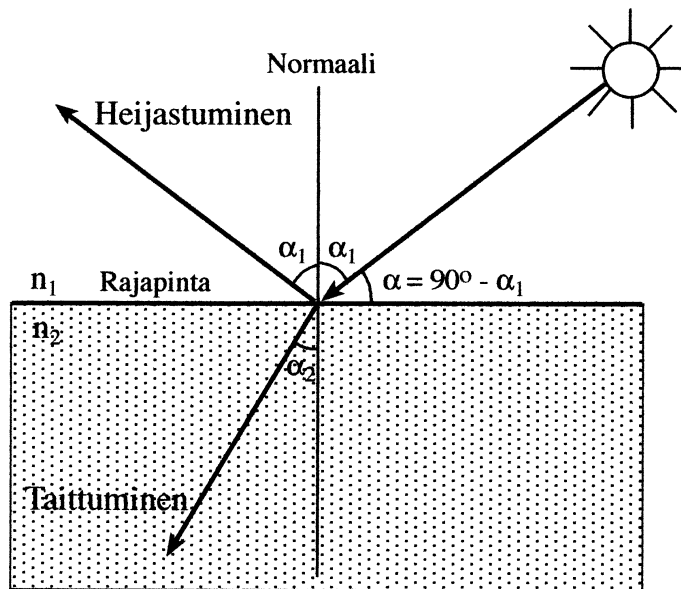
Kuva 9. Kuukausittainen auringonsäteilyn määrä vuosina 1971-2000.

Auringonvalon heijastuminen ja taittuminen

Kun valo tulee kahden aineen rajapintaan, osa valosta heijastuu ja osa valosta jatkaa matkaansa toiseen väliaineeseen, mutta muuttaa kulkusuuntaansa eli taittuu rajapinnalla. Tuleva säde ja heijastunut säde muodostavat pinnan normaalin kanssa yhtä suuret kulmat, eli tulokulma ja heijastuskulma ovat yhtä suuret. Vinosti rajapintaan tulevan säteen kulkusuunta muuttuu, jos aineilla on erilaiset taitekertoimet. Tulevan ja taittuneen säteen välillä pätee yhtälö (Snellin laki)

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2,$$

missä n_1 ja n_2 ovat aineiden taitekertoimet ja α_1 on valonsäteen tulokulma ja α_2 taitteikulma. Laki selittää esimerkiksi sen, miksi vedessä seisovan henkilön jalat näyttävät lyhyiltä.



Kuva 10. Valon heijastuminen ja taittuminen kahden aineen rajapinnalla.

Ilman taitekerroin on 1,00 ja veden 1,33. Tavallisen ikkunalasin taitekerroin on noin 1,5, akryylin 1,49 ja muiden muovien 1,5 – 1,7. Jalokivien taitekerroin on hyvin suuri, minkä vuoksi ne välkehtivät voimakkaasti. Esimerkiksi timantin taitekerroin on 2,42. Taitekerroin riippuu aallonpituudesta. Sen vuoksi valkoinen valo hajoaa taitumisessa spektriiksi. Siksi auringonvalon heijastuminen ja taittuminen vesipisaroissa synnyttää sateenkaaria.

Jos valo tulee kohtisuorasti kahden aineen rajapintaan, saadaan heijastuneen valon määrä laskettua yhtälöstä

$$\frac{I}{I_0} = \frac{(1-p)^2}{(1+p)^2}$$

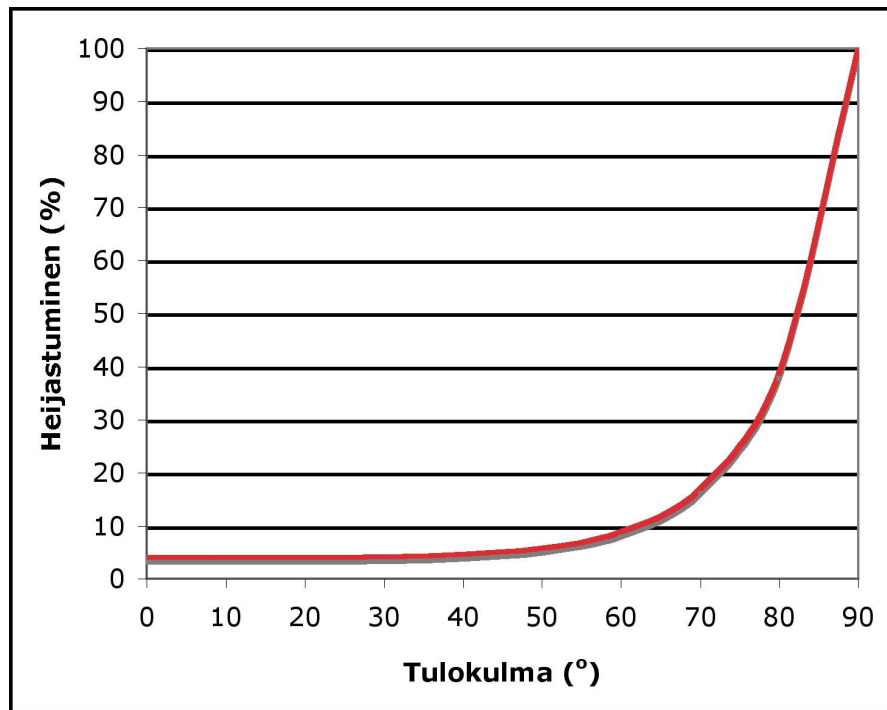
missä I on pinnasta heijastuneen säteilyn intensiteetti, I_0 tulevan säteilyn intensiteetti ja $p = n_1/n_2$ on taitekertoimien suhde.

Heijastuneen säteilyn määrä on sitä suurempi, mitä suurempi on taitekertoimien ero. Esimerkiksi ilman ($n_1 = 1$) ja lasin ($n_2 = 1,5$) rajapintaan kohtisuoraan tulevasta valosta heijastuu 4 %. Sen sijaan ilman ($n_1 = 1$) ja veden ($n_2 = 1,33$) rajapinnasta heijastuu vain 2 % siihen tulevasta valosta. Jokainen rajapinta aiheuttaa heijastumista. Jos lasin pinnalla on vesikerros, heijastuu ilman ja veden rajapinnasta 2,0 % valosta ja veden ja lasin rajapinnasta 0,35 % eli yhteensä 2,35 %.

Heijastumista tapahtuu sekä kerrosten etu- että takapinnoilta. Jos kynttilää katsotaan pimeää ikkunaa vasten, näkyy siitä yhtä monta heijastusta kuin ikkunassa on lasilevyjä. Tarkemmin katsottuna jokainen heijastus näkyy kahtena valon heijastuessa jokaisen lasilevyn etu- ja takapinnoista. Lisäksi takimmaisista laseista tulevat heijastukset ovat heikompia, koska valon määrä koko ajan vähenee.

Kolminkertaisessa ikkunalasissa tapahtuu heijastuminen kuudelta pinnalta, joissa jokainen pinta heijastaa 4 % siihen tulevasta säteilystä. Tällöin 22 % tulevasta valosta heijastuu ja vain 78 % lasiin kohtisuorasti tulevasta valosta pääsee läpi.

Lyhytaaltoisia infrapunasäteitä tavallinen lasi läpäisee melko hyvin, mutta huonosti pidempiä aallonpituuksia. Tämän vuoksi lasiset kasvihuoneet keräävät hyvin auringon lämpösäteilyä, mutta estävät lämpöä karkaamasta (kasvihuoneilmiö). Ultraviolettisäteitä tavallinen lasi läpäisee myös huonosti. Aallonpituudella 340 nm läpäisy on 41 % ja aallonpituudella 315 nm alle 1 %.



Kuva 11. Auringonvalon heijastuminen lasin pinnasta.

Kuvassa 11 on esitetty auringonsäteilyn heijastuminen lasista eri tulokulmilla. Noin 4 % valosta heijastuu, kun valo tulee kohtisuorasti lasilevyn pintaan (tulokulma on silloin 0°). Heijastuminen alkaa voimakkaasti kasvaa, kun tulokulma ylittää 60° eli kun lasin pinnan ja tulevan valon välinen kulma on alle 30°. Kun valo tulee pintaan nähden 10° kulmassa, jo noin 40 % valosta heijastuu lasin pinnasta.

Taulukko 2. Auringon valon absorptio ja heijastuminen maan pinta-aineista.

Aine	Absorptio (%)	Heijastuminen (%)
Lumi	10-20	80-90
Vesi	90	10
Maa	80	20
Hiekka	80	20
Ruoho	70	30
Asfaltti	90	10
Betoni	60	40

Taulukossa 2 on esitetty auringon valon absorptio ja heijastuminen tavallisimmista maan pinnalla olevista aineista. Lumi heijastaa hyvin auringonsäteilyä, mutta vesi ja maa imee sitä. Siksi lumi näyttää valkoiselta, mutta vesi ja maa tummalta. Tämän vuoksi lumi ei myös kovin nopeasti sulaa auringonpaisteissa, mutta hiekka tulee auringossa polttavan kuumaksi. Vastasanut lumi on hohtavan valkoista ja se heijastaa yli 90 % auringon valosta. Myös muut vaaleilta näyttävät pinnat heijastavat hyvin auringonsäteilyä. Tätä voidaan hyödyntää esimerkiksi aurinkopaneelien sijoittelussa.