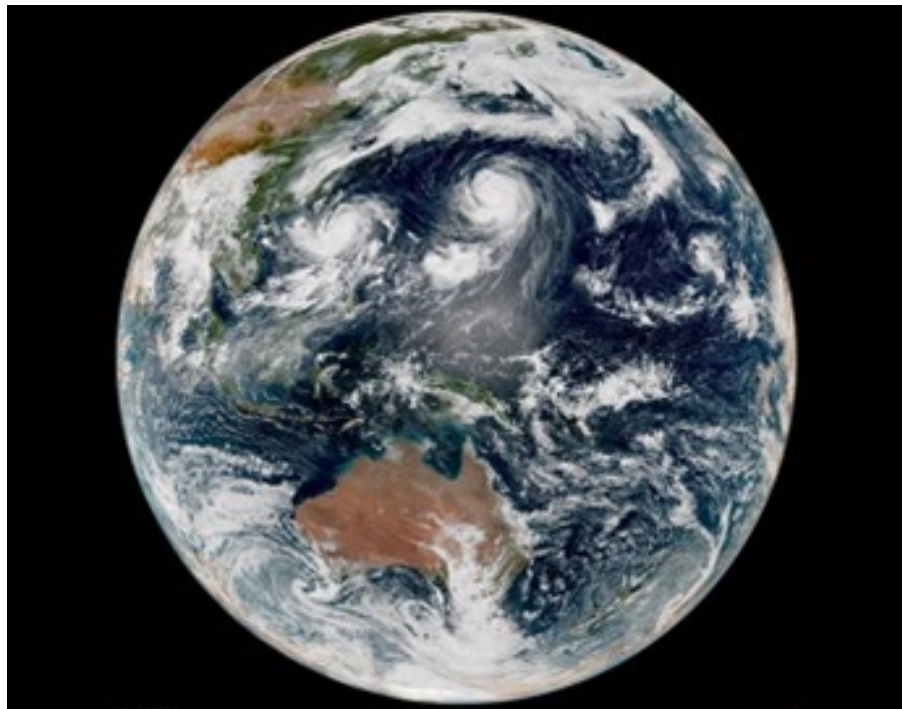


# Molnens påverkan på jordens strålningsbalans och klimatsystem

***Hans Jägfeldt***

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,  
kandidatarbete, nr 641  
(15 hp/ECTS credits)

---



Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2022



# **Molnens påverkan på jordens strålningsbalans och klimatsystem**

Kandidatarbete  
Hans Jägfeldt

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2022

# Innehåll

1	Introduktion .....	7
2	Bakgrund .....	7
2.1	Instrålning kortvågig- och utstrålning långvågig strålning .....	7
2.2	Instrålning - utstrålning – Albedo .....	8
2.2.1	Moln och feedback processer .....	8
2.3	Molnbildning i troposfären - överblick .....	9
2.3.1	”Nukleation” – kärnbildning av vattendroppar .....	11
2.3.2	”Nukleation” – kärnbildning av iskristaller .....	13
2.3.3	Aerosoler i atmosfären .....	13
2.3.4	Kosmisk strålning - en annan teori för molnbildning .....	14
3	Diskussion .....	14
3.1	Molnens roll i klimatsystemet .....	14
3.2	Den kosmiska strålningens roll .....	15
3.3	Forbush decreases som undersökningsmetod .....	16
4	Slutsatser .....	17
5	Tackord .....	17
6	Referenser .....	18
7	Appendix 1 .....	20
8	Appendix 2 .....	21

**Omslagsbild:** Jorden med moln fångad av den japanska vädersatelliten Himawari 8.

Wikipedia 2022: Himawari 8 Hämtad 2022-04-06 från: [https://en.wikipedia.org/wiki/Himawari\\_8](https://en.wikipedia.org/wiki/Himawari_8).

# Molnens påverkan på jordens strålningsbalans och klimatsystem

Hans Jägfeldt

Jägfeldt H., 2022: Molnens påverkan på jordens strålningsbalans och klimatsystem. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 641, 25 sid. 15 hp.

**Sammanfattning:** Molnens roll i klimatsystemet har studerats och deras påverkan på solens inverkan på jordens energibalans. Jordens albedo påverkar energibalansen genom att den påverkar hur mycket av solens instrålning som reflekteras eller absorberas. Moln påverkar jordens albedo och spelar därför en viktig roll i denna balans. Molnbildning sker till nära 100% i troposfären och där finns allt det vi kallar väder. Moln bildas när varm fuktig luft stiger upp i atmosfären och kondenserar. Det finns en mängd olika typer av moln, låga s.k. ”varma moln” som cumulus-moln upp till 2-4 km, som består enbart av vattendroppar och det finns höga ”kalla moln” över ca 8-12 km, som cirrocumulus som består enbart av iskristaller. Det finns även moln som altocumulus däremellan som innehåller en blandning av vattendroppar och iskristaller. Alla har de gemensamt att de reflekterar solinstrålning och samtidigt som de tar upp värme från jordens egenutstrålning.

Molnbildning och de processer som ligger bakom är därför av stort intresse. För att moln ska bildas krävs att den relativa fuktigheten, RH, är över 100%. Under verkligt förhållande kan inte vare sig vattendroppar eller iskristaller bildas om det inte finns partiklar i form av aerosoler närvarande. Aerosoler verkar som kärnor som vatten eller is kan växa på. Sammansättningen av aerosoler är mycket komplex och inte till fullo förstådd. De bildas av naturliga skäl som t.ex. från haven som skapar aerosoler av olika salter som blåser upp, likaväl som t.ex. av pollen från skogar och skogsbränder. Även antropogena aerosoler från industrier och transporter som släpper ut mängder av sotpartiklar som fungerar som kondensationskärnor påverkar molnbildning.

Under de senaste ca 25 åren har även kosmisk strålning studerats som orsak till molnbildning och mycket uppmärksamhet uppstod då en forskargrupp hävdade att all global uppvärmning under 1900-talet skulle kunna hänföras till denna effekt. Man har genom olika studier försökt undersöka hur stor effekten av den kosmiska strålningen är men utan konklusivt resultat. Dock tycks effekten vara alldeles för liten för att kunna förklara den globala uppvärmningen som skett sen mitten av 1800-talet.

IPCCs senaste och bästa framtidsprojektioner för temperaturökningen fram till år 2100 är mellan ca 1,5 °C till 4,5 °C. Detta är delvis beroende på vilken konfidensnivå som väljs (i den klimatmodell som används) eller vilket s.k. RCP - ”Representative Concentration Pathway”, dvs. vilket utsläppsscenario (av CO<sub>2</sub>) som betraktas. Men, denna stora skillnad beror också på att molnbildning och aerosoler och deras feedback-effekter på energibalansen är dåligt förstådda. En bättre förståelse för dessa processer skulle kunna minska den stora skillnaden i IPCCs framtida projektioner om temperaturökningen till år 2100.

**Nyckelord:** Moln, kondensation, aerosol, strålningsbalans, klimat, klimatsystem, kosmisk strålning, troposfären.

**Handledare:** Raimund Muscheler

**Ämnesinriktning:** Kvärtärgeologi

*Hans Jägfeldt, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige.*

*E-post: [hjagfeldt@gmail.com](mailto:hjagfeldt@gmail.com)*

# The impact of clouds on the Earth's radiation balance and climate system

Hans Jägfeldt

Jägfeldt H., 2022: The impact of clouds on the earth's radiation balance and climate system. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 641, 25 pp. 15 hp (15 ECTS credits).

**Abstract:** The role of clouds in the climate system has been studied and their impact on the Sun's impact on the Earth's energy balance. The Earth's albedo affects the energy balance by influencing how much of the Sun's radiation is reflected or absorbed. Clouds affect the Earth's albedo and therefore play an important role in this balance. Cloud formation occurs almost 100% in the troposphere and everything we call weather takes place there. Clouds form when warm moist air rises in the atmosphere and condenses. There are a variety of types of clouds, low so-called "Warm clouds" e.g. cumulus clouds up to 2-4 km, which consists only of water droplets and there are high "cold clouds" above about 8-12 km such as cirrocumulus, which consists only of ice crystals. There are also clouds like altocumulus in between that contain a mixture of water droplets and ice crystals. What they all have in common is that they reflect solar radiation and at the same time they absorb heat from the Earth's own radiation.

Cloud formation and the processes behind it are therefore of great interest. In order for clouds to form, the relative humidity, RH, is required to be above 100%: Under real conditions, neither water droplets nor ice crystals can form if no aerosol particles are present. Aerosols act as nuclei on which water or ice can grow. The composition of aerosols is very complex and not fully understood. They are formed for natural reasons as e.g. from the oceans that create aerosols of various salts from the winds, as well as e.g. of pollen from forests and forest fires. Anthropogenic aerosols from industries and transports that emit large amounts of soot particles that act as condensation nuclei also affect cloud formation.

During the last 25 years or so, cosmic radiation has also been studied as a cause of cloud formation and much attention arose when a research group claimed that all global warming during the 20th century could be attributed to this effect. Through various studies, attempts have been made to investigate the magnitude of the effect of cosmic radiation, but without conclusive results. However, the effect seems to be far too small to explain the global warming that has taken place since the middle of the 19th century.

The IPCC's latest and best future projections for the temperature increase up to the year 2100 are between about 1.5 °C to 4.5 °C. This is partly depending on which "confidence level" is chosen (in the climate model used) or which so-called RCP - "Representative Concentration Pathway", i.e. which emission scenario (of CO<sub>2</sub>) is considered. However, this large difference is also due to the fact that cloud formation and aerosols and their feedback effects on the energy balance are poorly understood. A better understanding of these processes could reduce the large difference in the IPCC's future projections of the temperature increase to 2100.

**Keywords:** Clouds, condensation, aerosol, radiation balance, climate, climate system, cosmic radiation, troposphere.

**Supervisor:** Raimund Muscheler

**Subject:** Quaternary Geology

*Hans Jägfeldt, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden.  
E-mail: hjagfeldt@gmail.com*

# 1 Introduktion

Solen och dess strålning är kärnan i jordens klimat och är den viktigaste faktorn i strålnings- och värmebalansen på jorden (Ruddiman 2014). Moln spelar också en viktig roll i jordens strålningsbalans genom att de både reflekterar kortvågig strålning från solen och absorberar långvågig strålning som jorden själv strålar ut, (Bernes 2016). Moln bildas när fuktig luft stiger upp och kyls av och vattenånga kondenserar. Ett samspel mellan luftfuktigheten och vindar, dvs jordens cirkulationssystem, solens instrålning och utstrålning av den absorberade värmemängden, styr tillsammans jordens klimat och temperatur (Bernes 2016).

I dagens klimatdebatt talas det dagligen om koldioxidens och i allt större utsträckning om metanets inverkan på klimatet, eftersom de är starka växthusgaser. Detta gör man trots att de utgör en mycket ringa andel av atmosfären och endast finns i vad man kallar spårämngder, 0,0419% respektive 0,00018 %, (Goosse et al. 2010). Man har då betraktat betydelsen av vattnets närvaro genom moln och luftfuktighet, som båda också har en stark växthuseffekt och som utgör 0,25% av atmosfärens massa. Den absoluta luftfuktigheten<sup>1</sup> styrs bl.a. av temperaturen och kan variera mellan nära 0 % ( $g/m^3$ ) i arktiska till uppåt 5 % ( $g/m^3$ ) i tropiska trakter. Den relativa fuktigheten, RH, kan dock fortfarande vara hög även i arktiska områden som en följd av de extremt låga temperaturerna, - 60 °C till -90°C, (SMHI 2021).

Atmosfären består sålunda till ~99,7% av icke-växthusgaser, kvävgas 78,1%, syrgas 20,9% och argon 0,9%. Utöver dessa finns ett stort antal andra gaser i spårämngder med halter på några ppm eller mindre, (Hartmann 2016). Om vatten i form av moln och luftfuktighet finns i ~6 gånger högre andelar än koldioxid och ~1400 gånger högre än metan, så är frågan hur molnens påverkan på den temperaturökning man sett sedan mitten av 1800-talet. Trots allt så hävdas det i litteraturen att just vattenånga är en kraftfull och den mest rikligt förekommande växthusgasen (Bernes 2016). Varför är vi då speciellt intresserade av moln och dess inverkan på klimatet. Det finns minst två viktiga anledningar:

1. Den ena är molnens roll i jordens vattenbalans och nederbörd.
2. Den andra är att moln är starkt kopplade till jordens energibalans genom att de växelverkar både med den kortvågiga inkommande strålningen från solen och den långvågiga utstrålningen från jorden självt.

Området runt punkt 2 är av särskilt intresse, eftersom just moln har visat sig vara en mycket besvärlig faktor i de projektioner som IPCC, (Förenta Nationernas kli-

<sup>1</sup>Med absoluta fuktigheten (ånghalt) menas massan vattenånga per volymenhet, dvs  $g/m^3$ . Med specifik fuktighet menas massan vattenånga per kg fuktig luft, dvs  $g/kg$  (Bogren J., 2018).

matpanel -"Intergovernmental Panel on Climate Change") gör om jordens framtida klimat som en följd av den temperaturökning man sett sedan mitten av 1800-talet. Bidrar molnbildning eller motverkar molnbildning uppvärmningen?

"Clouds and aerosols continue to contribute the largest uncertainty to estimates and interpretations of the Earth's changing energy budget", (Boucher O. 2014).

## 2 Bakgrund

### 2.1 Instrålning kortvågig- och utstrålning långvågig strålning

Från solen tar jorden i toppen av atmosfären i medeltal emot  $S_0 \sim 1361 \text{ W/m}^2$  vid solfläcksminimum, där  $S_0$  är den s.k. solarkonstanten. Den anger solens genomsnittliga instrålning per ytenhet vid toppen av atmosfären och mäts vinkelrätt mot strålarna, (Stull 2017). Som en följd av jordens elliptiska bana runt solen varierar emellertid "solarkonstanten" ~3,3% mellan 1322 – 1412  $W/m^2$  under året, (Widen et al. 2019). Dock är den genomsnittliga mottagna strålningen per kvadratmeter blott en fjärdedel av detta, dvs.  $\sim 1361/4 = 340 \text{ W/m}^2$ , eftersom jorden är en sfär och dessutom endast vänder halva ytan mot solen i taget (Ruddiman 2014). Samtidigt avger jorden långvågig strålning enligt Stefan-Boltzmanns lag om svartkroppsstrålning, (Freedman 2011). Jordens klimatsystem styrs av balansen mellan instrålning kortvågig energi från solen och utstrålning långvågig energi från jorden.

### 2.2 Instrålning - utstrålning – Albedo

#### 2.2.1 Moln och feedback-processer

Energiflödet i jordens atmosfär är mycket komplicerat. Jordens klimat styrs av dess växelverkan med solens kortvågiga instrålning och jordens egenutstrålning och de olika allmänna cirkulationssystem som temperaturgradienter driver, och som skapar t.ex. passadvindarna och Hadley-cirkulationen. Jorden tar av naturliga skäl emot mest strålning vid ekvatorn vid den s.k. "Inter Tropical Convergence Zone", "ITCZ", men för att strålningsbalansen skall gå ihop måste det finnas en transport av energi till högre latituder.

Väldigt många faktorer behöver mätas och beräknas för att förstå klimatsystemen och vad som ger upphov till den växthuseffekt som värmer jordens atmosfär. Mycket kan också mätas med sofistikerad utrustning, framför allt från olika satelliter, tex Terra and Aqua Satelliterna, (Aqua 2022) ovanför atmosfären. Även andra metoder används för att mäta olika egenskaper i atmosfären, tex väderballonger (UCAR 2014) och flygplan (WMO 2022) högt upp i troposfären.

Inkommande solstrålning kan mätas och "solarkonstanten" är väl uppmätt, (Stull 2017). Data varierar något under året eftersom jordens bana runt solen är elliptisk så att en variation på ~3,3% av solar-konstanten kan mätas upp. Därför ser man lite olika

uppgifter i litteraturen på medelvärdet av solarkonstanten under året, men värdet brukar ligga mellan  $\sim 1361 - 1367 \text{ W/m}^2$ . En nyligen gjord omvärdering anger  $S_0 = 1361.1 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$ , (Gueymard 2018). Även solens egenutstrålning varierar med solfläckscykeln om 11 år, men den effekten är mycket liten och är maximalt  $\sim 1 \text{ W/m}^2$  i det korta perspektivet, (Lockwood 2012).

När solstrålningen når jorden absorberas eller reflekteras den av atmosfären olika delar av jordytan beroende på dess albedo. Albedot  $A$  är förhållandet mellan det reflekterade, ( $E_{\text{refl}}$ ) och infallande, ( $E_{\text{infall}}$ ) ljuset över alla våglängder och beräknas genom  $A = E_{\text{refl}}/E_{\text{infall}}$ .

Den absorberade strålningen tas upp av en mängd olika ytor och fördelas på ett komplicerat sätt mellan olika delar av jordytan och atmosfären och den reflekterade delen försvinner ut i rymden utan att påverka. Den absorberade strålningen värmer då upp jorden och dess gashölje, och enligt Stefan-Boltzmanns lag så avges långvågig strålning i förhållande till temperaturen av den strålände kroppen. För jorden innebär det att värmeutstrålningen hamnar i våglängdsintervallet  $\sim 6 - 50 \mu\text{m}$ , (Bernes 2016). I intervallet  $\sim 8-13 \mu\text{m}$  är atmosfären relativt genomskinlig, men i övrigt är dock absorptionen från de olika växthusgaserna som vattenånga, koldioxid och metan mycket kraftig, fig. 1. Detta får till följd att värmen blir kvar i atmosfären och värmer upp den. Det är just detta fenomen som kallas "växthuseffekten".

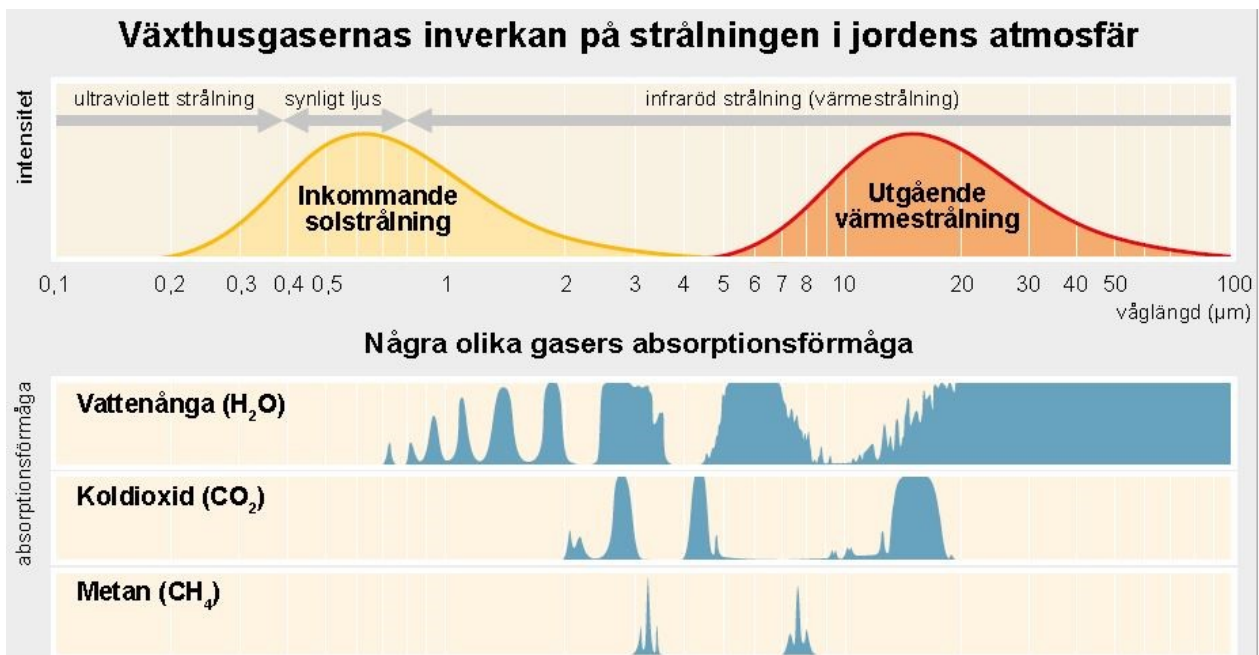
Eftersom atmosfären inte bara består av gaser utan även innehåller moln, som utgörs av partiklar av en av växthusgaserna, som ändrar aggregationstillstånd och samtidigt avger latent värme vid kondensation, kom-

pliceras klimatsystemet avsevärt. Moln finns i en mängd olika varianter i vätskeform eller som iskristaller, i s.k. "warm clouds" eller "cold clouds". I "warm clouds" växer molndroppar i huvudsak genom kondensation på aerosolkärnor och genom kollisioner. I "cold clouds" sublimerar underkyllt vatten och bildar iskristaller. Det finns höga och låga moln, tunna moln och det finns täta moln och de bidrar i olika grad till både den kortvågiga och den långvågiga utstrålningen från jorden. Låga stratocumulusmoln över haven antar i princip samma temperatur som vattnen under och strålar därför ut mer än de värmer. De höga molnen som cirrus, cirrocumulus och cirrostratus är alla höga moln, som består av iskristaller av relativt låg täthet på cirrus  $0,02 \text{ g/m}^3$  ( $0,0001-0,3 \text{ g/m}^3$ ), (Quante 2007), reflekterar en del men hindrar också utstrålningen och det är tveksamt om de kylvlar eller värmer atmosfären och totalt sett så är deras effekt i försumbar, (Boucher 2014). Alla olika moln påverkar på olika sätt till energibalansen i atmosfären.

Om man utgår från att absorberad instrålning är lika stor som utgående värmestrålning från jorden för att balans ska råda, så kan man genom Stefan-Boltzmanns lag uttrycka balansen med ekvation 1, (Rummukainen 2005),

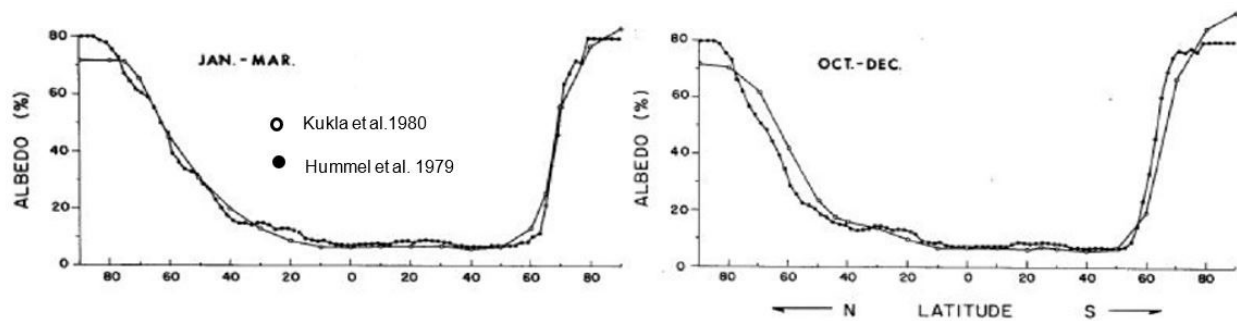
$$(\pi R^2)S_0(1-A) = (4\pi R^2)\sigma T_e^4 \quad \text{ekvation 1}$$

Där vänsterledet representerar instrålningen från solen och högerledet den utstrålning som jorden själv avger är jordens tvärsnittyta, ( $\pi R^2$ ), sedd från solen och där  $R$  är jordens radie.  $S_0$  är solarkonstanten och arean för jordens utstrålning ges av ytan av en sfär  $4\pi R^2$  och  $\sigma T_e^4$



Figur 1. Absorptionen för några av de viktigaste växthusgaserna i förhållande till inkommande strålning från solen och jordens egenutstrålning i IR-området  $\sim 6-50 \mu\text{m}$ . "IR-fönstret" för vattenånga är delvis tilltäppt av koldioxidens absorption i området  $\sim 14-20 \mu\text{m}$ . Där skalan "Intensitet" har godtyckliga enheter och "absorptionsförmåga" 0 – 100%.





Figur 2. Medelalbedo på jorden under året och latitud. Albedot ökar under vintern på norra halvklotet pga. av snö på land, medan ökningen runt Antarktis beror på ökningen av havsis. De två kurvorna kommer från två olika studier och visar generellt samma resultat, modifierad från (Kukla et al. 1980).

är värmestrålningen som strålar ut med temperaturen  $T_e$ , där  $\sigma$  är Stefan-Boltzmanns konstant för en svartkropp med temperaturen  $T$  i kelvin. A representerar medelvärdet på albedot för jorden. Albedo är ett mått på en ytas reflexionsförmåga och uttrycks oftast i procent. Ju högre albedo jorden har, desto större andel av den inkommande strålningen kommer reflekteras ut i rymden utan att värma upp jorden. Molnens roll i klimatsystemet är därför betydelsefull eftersom de har ett högt albedo och eftersom de täcker stora delar av jorden, bild se framsida.

Energibalansen på jorden styrs av hur stor andel av solinstrålningen som reflekteras eller absorberas och albedot för jorden som helhet har därför en mycket stor betydelse för jordens medeltemperatur. Då albedot beror på ytans beskaffenhet och dessutom varierar med vinkeln på den infallande strålningen, varierar albedon för olika ytor på jorden, Tabell 1.

Instrålningen från solen för olika latituder varierar dessutom med årstiden pga. av jordaxelns lutning, (Kukla et al. 1980). Speciellt markant är detta på höga latituder där snö och is påverkar albedot mycket kraftigt då det finns mer landytor runt Arktis ökar albedot på högre latituder, (dvs  $> 60^\circ\text{N}$  respektive på norra halvklotet tidigare på säsongen än på södra halvklotet, ( $>60^\circ\text{S}$ ). Detta torde bero på att snö lägger sig tidigare i inlandet på norra halvklotet än vad isen i haven runt Antarktis fryser till, fig. 2. I Arktis är albedot över 80% under september t.o.m. juni månad (10 månader) för latituder över  $84^\circ\text{N}$  och över 60% mellan januari t.o.m. juni (6 månader) för latituder över  $74^\circ\text{N}$ . För Antarktis gäller att albedot är över 80% för latituder över  $80^\circ\text{S}$  under hela året (12 månader) och över 60% oktober t.o.m. mars (6 månader) över  $74^\circ\text{S}$ .

Genom satellitmätningar sedan 1970-talet har jordens medelalbedo uppmätts till  $\sim 29\% \pm 0,4\%$  utan att ngn specifik trend kunnat märkas, (NASA Earth Observatory 2014). Dessa data stämmer väl överens med nyare mätningar där medelalbedot för jorden från 2015 till september 2021 och som anges till  $29,5\% \pm 0,8\%$ , (Penttilä 2022).

### 2.3 Molnbildning i troposfären - överblick

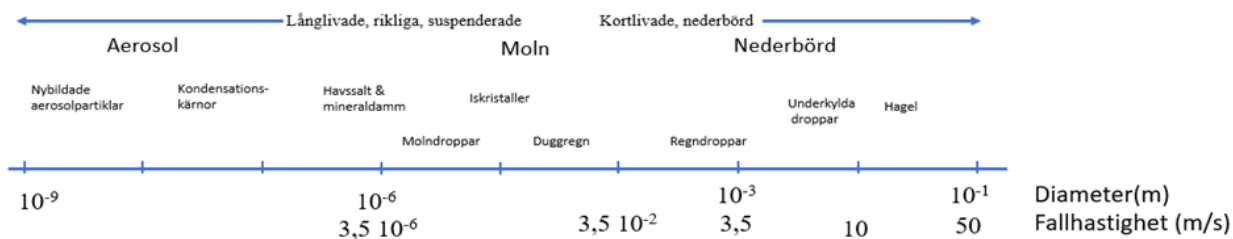
Moln är vattendroppar eller iskristaller som är suspenderade i troposfären. I princip utgör de en aerosol, som definieras som "luftburna partiklar fasta eller flytande finfördelade i en gas, vanligen luft". Ändå brukar man inte betrakta vatten i moln som aerosoler, utan benämningen "aerosol" är begränsad till andra ämnen än vatten, fig. 3, (Stevens 2011).

Moln förekommer i en mängd olika former och format. De kan klassificeras genom bildningssätt men vanligast sker klassificeringen efter molnens utseende, fig.4. De finns på olika höjder i atmosfären, från markytan upp till dryga  $\sim 8-13$  kilometers höjd. Man brukar kategorisera molnen i tempererade områden i,

1. låga moln  $\sim 0 - 2$  km
2. medelhöga moln  $\sim 2 - 7$  km
3. höga moln  $\sim 5 - 13$  km

Tabell 1. Medelalbedo för några olika ytor på jorden, (Ruddiman 2014), (Bernes 2016). Brewster-vinkeln ges av  $\theta_B = \arctan(n_2/n_1) \approx 37^\circ$ , där  $n_{\text{air}}$  och  $n_{\text{water}}$  är brytningsindex för luft och vatten (Stull 2017) and  $n_{\text{air}} = 1.0002295$ ,  $n_{\text{water}} = 1.3315$ , (Wikipedia 2022a).

Yta	Albedo procent
Nysnö och is	60-90
Gammal smältande snö och is	40-70
Moln	40-90
Täta moln	70-90
Tunna moln	35-50
Ökensand	30-50
Jord	5-30
Tundra	15-35
Grässlätt	18-25
Skog	5-20
Vatten (över Brewster-vinkeln) <sup>2</sup>	10-100
Vatten (belyst rakt uppifrån)	3



Figur 3. Indelning i storleksordning av aerosol (0,001–1  $\mu\text{m}$ ), moln 0,01- 0,1 mm och nederbörd 0,1 – 5 mm, (SMHI 2022a). Egenritad figur efter, (Stevens 2011).

För arktiska områden ligger intervallen lägre medan de för tropiska områden ligger högre, (SMHI 2022b). De låga molnen består av vattendroppar och de riktigt höga molnen enbart av iskristaller. I de medelhöga molnen finns en blandning av vattendroppar och iskristaller, fig.4.

Mängden vatten i moln varierar naturligtvis kraftigt med både typ och storleken på molnen. De skiljer även åt om de finns över hav eller landområden. Typiska värden för några olika typer av moln, stratocumulus över havet är  $\sim 0,4 \text{ g/m}^3$  ( $0,1\text{--}0,6 \text{ g/m}^3$ ) och stratocumulus över landområden  $\sim 0,3 \text{ g/m}^3$  ( $0,03\text{--}0,45 \text{ g/m}^3$ ). Generellt innehåller cumulus  $\sim 1 \text{ g/m}^3$  ( $0,5\text{--}2,5 \text{ g/m}^3$ ), upptornade stackmoln och cumulonimbus upp till  $4 \text{ g/m}^3$ , cirrus  $\sim 0,02 \text{ g/m}^3$  ( $0,0001\text{--}0,3 \text{ g/m}^3$ ), (Quante 2007). Vilket innebär att ett normalstort cumulonimbusmoln med en radie på  $\sim 4 \text{ km}$ , höjd på  $\sim 10 \text{ km}$  och vatteninnehåll på  $\sim 4 \text{ g/m}^3$  har en vattenmassa på två miljoner ton, vilket motsvarar en  $\sim 20$  meter djup sjö med en yta på drygt en hektar. Moln innehåller följaktligen väldigt mycket vatten.

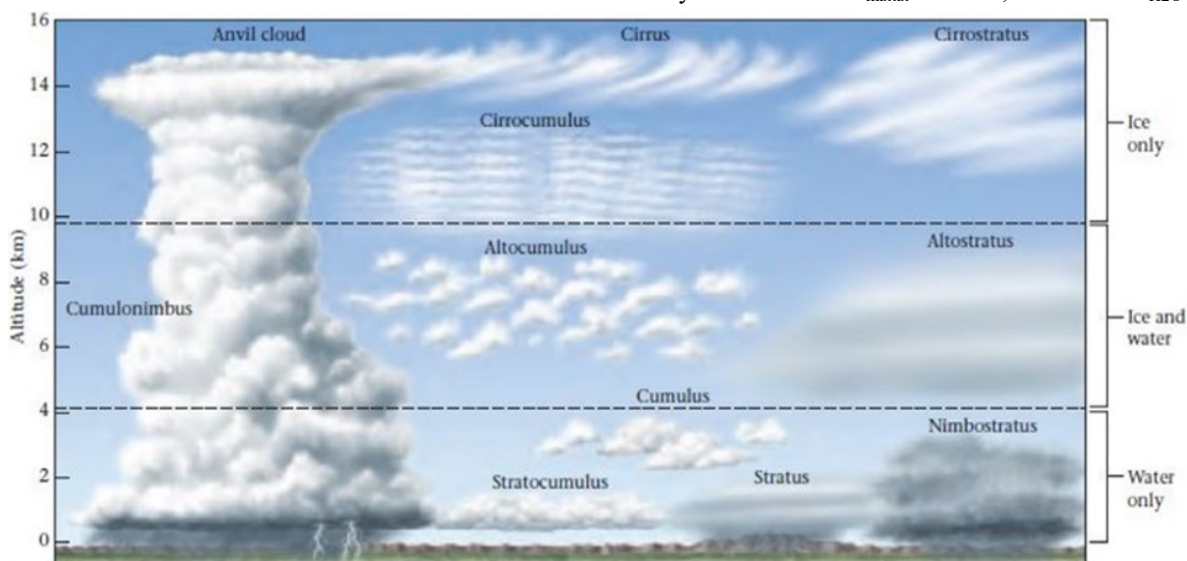
Molndroppar faller mycket långsamt,  $\sim 1\text{--}25 \text{ cm/s}$ , eftersom de är så små,  $\sim 0,01\text{--}0,1 \text{ mm}$ , att de följer med luftens rörelser, (Stull 2017). Moln bildas (nästan) enbart i troposfären eftersom de vattendroppar eller iskristaller som bildas när ett uppvärmt luftpaket stiger och temperaturen sjunker samtidigt som trycket minskar

med ökande höjd pga. luftens expansion, (Bogren 2018). Detta medför i princip att vattenånga redan har kondenserat när den fuktiga luften når tropopausen. Det finns dock ppm-mängder av vattenånga i stratosfären, men det vattnet är i huvudsak bildat från metan som stigit upp från ytan och som oxideras till koldioxid och vatten av ozonet, (Solomon 2010).

Ungefär 67% av jorden täcks normalt av moln, men variationen är stor. Andelen moln över hav och land skiljer sig dessutom åt. Över hav täcks i medeltal  $\sim 72\%$  av ytan medan molntäckningen över land är mindre och är  $\sim 55\%$ , med större årstidsvariationer än över havet, (King 2013). Molnigast är det runt norra ishavet och i havsområden utanför Antarktis, med uppåt 350 mulna dagar om året. Det finns inga områden som inte någon gång har moln, men de är mindre vanliga i ökenområden och i vissa områden i Antarktis, (SMHI 2022b). En bild, fig. 5, visas av medeltäckningen av moln över hela jorden under juli månad 2006 tagen från Aqua-satelliten, (King 2013).

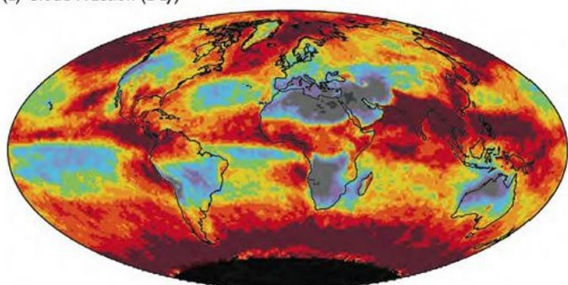
Orsaken till att moln bildas i troposfären beror på att temperaturen från markytan generellt sett avtar med  $\sim 10 \text{ }^\circ\text{C/km}$ . När luften stiger och temperaturen sjunker med ökande höjd stiger den relativa fuktigheten, RH, eftersom den absoluta fuktigheten i luften inte ändras.

Luftens relativa fuktighet RH är kvoten mellan vattenångans partialtryck  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  och vattenångans partialtryck vid mättat  $P_{\text{mättat}}$  tillstånd,  $\text{RH} = 100 * P_{\text{H}_2\text{O}} / P_{\text{mättat}}$

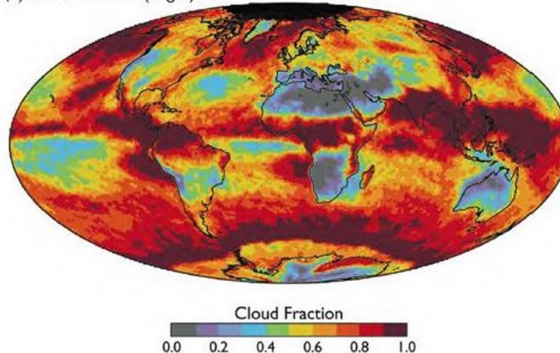


Figur 4. Elva olika typer av moln illustreras. De låga molnen som cumulus (stackmoln) består av enbart vattendroppar, medan på högre höjder börjar iskristaller göra sig mer gällande. Cirrusmoln består enbart av iskristaller, vilket också medför att de ser sig mer suddiga i kanterna. Höjderna som anges i figuren är ungefärliga, (Marshak 2012).

(a) Cloud Fraction (Day)



(b) Cloud Fraction (Night)



Cloud Fraction  
0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0

Figur 5 Bilden visar andelen moln över jorden från Aqua satelliten under juli månad år 2006. Ju märkare röd färg desto mer molnighet och ju blåare desto mindre molnighet, (King 2013).

$P_{\text{mättat}}$  uttryckt i procent. Där 100% innebär mättad luftmassa med avseende på vattenånga.

RH när småningom mättnadsstrycket, varvid vattendroppar sakta börjar bildas samtidigt som latent värme frigörs. Mättnadsångtryck innebär att lika många vattenmolekyler lämnar droppen som tas upp av den.

Den latent värmen som tillförs luften gör att temperaturen i stället sjunker långsammare med  $\sim 6,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ , fig.6. Minskningen av temperaturen med ökande höjd brukar kallas för "Lapse rate", och betecknas  $\Gamma$ , och ges av ekvation 2;

$$\Gamma = -dT/dz, \quad \text{ekvation 2}$$

där minustecknet står för att temperaturen  $T$  minskar med höjden  $z$ . När luften stiger i en viss given volym "luftpaket", så sker inget värmeutbyte mellan två olika "paket", man säger att stigningen är adiabatisk. Torradiabaten, dvs. innan moln börjat bildas, är relativt konstant, medan fuktadiabaten varierar starkt med luftfuktigheten. Denna temperaturförändring per höjd är viktig i samband med molnbildning.

Den relativa fuktigheten, RH är ett mått på hur mkt vattenånga som luften kan innehålla innan den blir mättad är beroende av luftens temperatur. Clausius-Clapeyrons ekvation 3 anger ett approximativt samband mellan vattnets mättnadsångtryck,  $e_s$ , och temperaturen på luften (Stull 2017),

$$e_s \approx e_0 \cdot \exp[L_v/R_v \cdot (1/T_0 - 1/T)] \quad \text{ekvation 3}$$

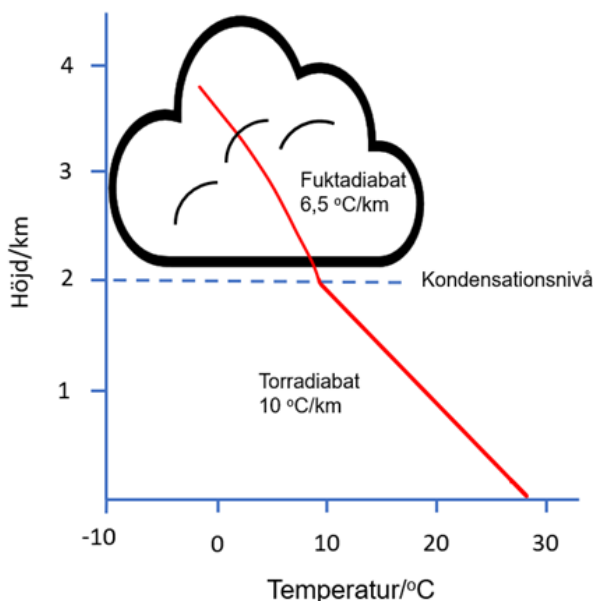
Där  $L_v$  är ångbildningsvärmerna för vatten  $2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  och  $R_v = R/M_v = 8314,3/18,016 = 461 \text{ Jdeg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ , där  $R$  är allmänna gaskonstanten och  $M_v$  är molekylvikten för vatten.  $T$  är den aktuella absoluta temperaturen i kelvin, K, där  $T_0 = 273,15 \text{ K}$  och  $e_0 = 0,6113 \text{ kPa}$ .

Troposfären är den lägst liggande delen av atmosfären och sträcker sig från markytan till 10-15 kilometers höjd beroende årstid och latitud. Latituden påverkar eftersom temperaturen gör att luftmassorna vid markytan expanderar när luften är varm, fig.7. Därför når troposfären även högre upp under somarmånader, (Nugent et al. 2019).

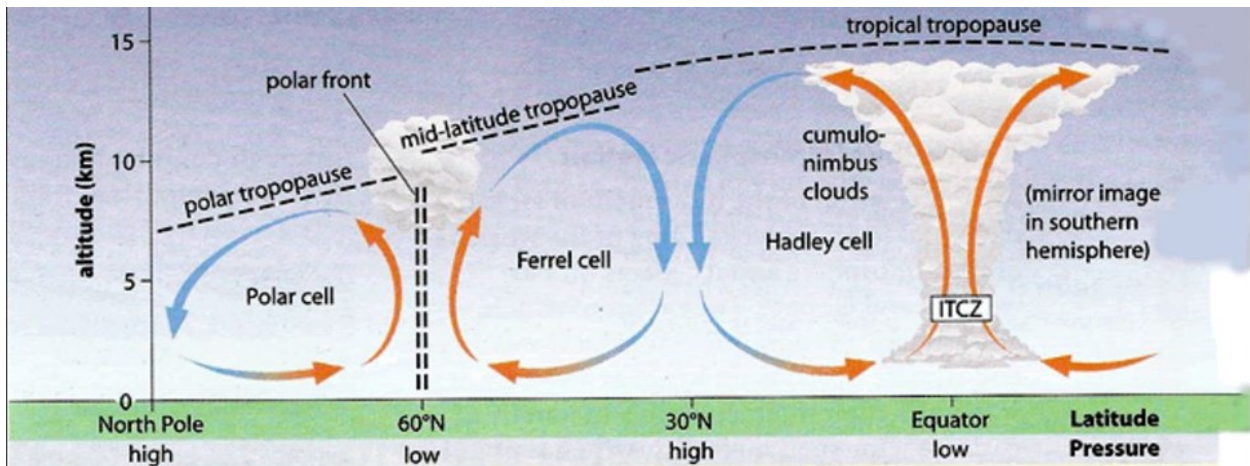
I troposfären finns allt det vi kallar väder och den innehåller också drygt 99% av den totala mängden vattenånga och vatten som finns i atmosfären, vilket i absoluta tal innebär  $\sim 1,27 \times 10^{16} \text{ kg}$ . Den innehåller dessutom  $\sim 75\%$  av atmosfärens totala massa, som är  $\sim 5.15 \times 10^{18} \text{ kg}$ , (Trenberth et al. 2005).

### 2.3.1 "Nukleation" – kärnbildning av vattendroppar

I princip skulle man tro att vattendroppar av rent vatten skulle kunna bildas spontant och växa till moln om luften är övermättad med vattenånga, s.k. *homogen droppbildning*. Övermättad är luften när den innehåller mer vattenånga än möjligt vid given temperatur och tryck. I själva verket sker inte homogen droppbildning i naturen, då det skulle krävas en helt ren luft fri från partiklar och en kraftig övermättad för att droppbildning skulle ske spontant, på grund av den s.k. Kelvin-effekten, (Martinsson 2018). Ångtrycket och mättnads-



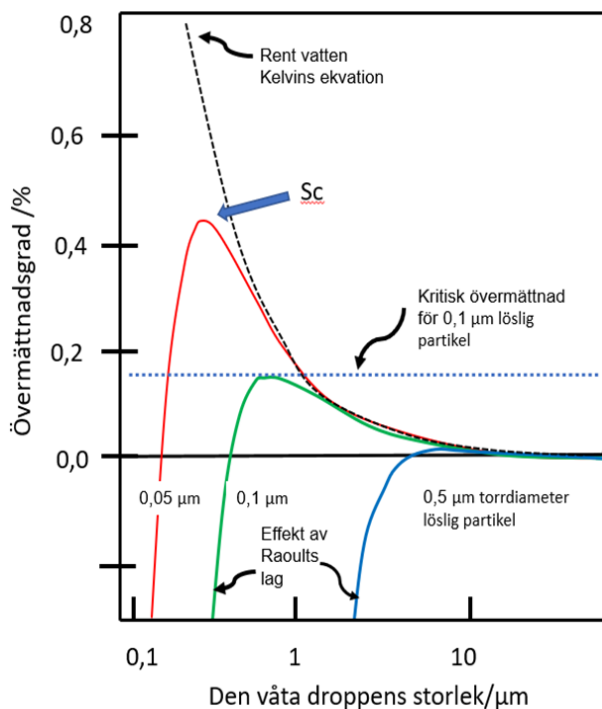
Figur 6. De genomsnittliga temperaturgradienten upp och förbi kondensationsnivån för vattenånga, egenritad.



Figur 7. Schematisk skiss på atmosfärens cirkulation och latitud med tropopausens höjdberoende. Bilden allmänt förekommande på internet.

graden över en liten droppe ökar ju mindre den är, ekvation 4, vilket försvårar droppbildning genom att krökningen av droppytan ökar i ett exponentiellt förhållande till storleken desto mindre radien är, (Martinson 2018).

$$S = p/p_0 = \exp(4M_w\sigma_w/RT_d\rho_w D_p) \quad \text{ekvation 4}$$



Figur 8. En schematisk skiss över Kelvin-effekten (svart prickad linje) och hur Raoults-effekten får olika stora **torra vattenlösliga** partiklar får Kelvin-kurvan att böja av, 0,5 μm - blåkurva, 0,1 μm - grön kurva och 0,5 μm röd kurva).  $S_c$  visar på den kritiska storleken för spontan tillväxt för en 0,05 μm och blå prickad linje motsvarande för en 0,1 μm torrpartikel. På x-axeln är inritat hur övermättnadsgraden får partikeln att växa, egenritad figur.

Där  $S$  är övermättnadsgraden,  $p$  det aktuella ångtrycket,  $p_0$  mättnadsångtrycket,  $\sigma_w$  är droppens ytspänning,  $\rho_w$  är densiteten hos rent vatten,  $M_w$  är molekylvikten,  $T_d$  den absoluta temperaturen för droppen och  $D_p$  droppdiametern. Därför förekommer inte den *homogena kärnbildning* (om inga aerosoler är närvarande) i mätbar utsträckning i atmosfären. Inte heller s.k. *heterogen droppbildning* sker i någon större utsträckning när aerosoler, i form av hydrofila olösliga partiklar finns närvarande, förrän dessa blir tillräckligt stora och större än  $\sim 0,1 \mu\text{m}$  av samma skäl, (Stull 2017). Däremot kan droppbildning ske när aerosoler i form av vattenlösliga partiklar finns närvarande. Detta beror på effekten av Raoults lag, som innebär att ångtrycket sjunker när ett ämne är löst i vattendroppen, (Stevens 2011). Följaktligen finns två effekter vid droppbildning som sammanslaget verkar i motsatt riktning och kallas för Köhler-effekten, ekvation 5, Kelvin-effekten som förhindrar tillväxt och Raoults lag som främjar vattendropparnas tillväxt, (Mayer 2020), ekvation 5,

$$\ln(S) = (4M_w\sigma_w/RT_d\rho_w D_p) - (6n_s M_w/\pi\rho_w D_p^3) \quad \text{ekv. 5}$$

där  $n_s$  är antalet mol av det lösta ämnet och de övriga parametrarna enligt ovan.

Ekvation 5 består av två termer, där den första är Kelvin-effekten som beskriver hur övermättnadsstrycket ( $S = \text{''Supersaturation''}$ ) som stiger kraftigt när diametern på vattendroppen minskar. Den andra termen beskriver Raoults-effekten, som visar hur ångtrycket minskar med diametern på droppen när ett ämne är löst i vätskan. I fig. 8 visas ett exempel på sambandet mellan övermättnadsgrad och storlek för en saltpartikel, (Zieger 1978). Figuren visar hur en partikel av olika storlek kräver olika övermättnadsgrader för att börja växa till. Man kan se kurvorna som lite av en energi-barriär där droppen börjar växa till när den når en kritisk storlek  $D_{crit}$  samtidigt som den når det kritiska



övertättnadsgraden  $S_{crit}$ , man säger att droppen blivit *aktiverad*, (Stevens 2011). När droppen blivit aktiverad så kommer den att växa till snabbt. Tillväxten av molndroppen kommer i princip endast begränsas av diffusionen av vattenånga och av RH på omgivningen i molnet när övertättnaden sjunker ner mot 100% pga. utarmning av vattenånga.

Förutom ovanstående nukleationsprocesser kan vattendroppar i ett moln även växa till genom kollisioner, som gör att dropparna blir tillräckligt stora för att bli för tunga för att hålla sig svävande och faller då som regn och lämnar därigenom molnen.

**2.3.2 "Nukleation" - kärnbildning av iskristaller**  
Kärnbildning av iskristaller sker på ett annat sätt än för vattendroppar, men liksom för vattendroppar finns en termodynamisk barriär för dess bildning. Därför börjar inte iskristaller inte börja bildas förrän temperaturen sjunkit till  $\sim -40^\circ\text{C}$ . Då är vattendropparna kraftigt underkylda och det behövs inte mycket för att iskristaller ska börja bildas. Till skillnad mot vattendroppar så sker s.k. *homogen kärnbildning* spontant, när temperaturen sjunkit till ca  $-40^\circ\text{C}$ . Detta beror på att antalet mikroskopiska iskristaller endast behöver bestå av  $\sim 250$  molekyler för att kristallisationen ska initieras, (Stull 2017).

S.k. *heterogen kärnbildning* kan äga rum på tre olika sätt:

1. *Depositions-nukleation* när vattenånga faller ut direkt på befintliga iskristaller.
2. *Immersion-nukleation*<sup>2</sup> som liknar homogen kärnbildning, men där de interna iskristallerna är betydligt större, i storleksordningen  $\sim \mu\text{m}$  i stället för  $\sim \text{nm}$ .
3. *Kontakt-nukleation* sker när den kraftigt underkylda droppen träffar någon yta. Ett exempel är vad vi kallar "underkyllt regn", då is bildas direkt på alla föremål som träffas.

### 2.3.3 Aerosoler i atmosfären

Uppenbarligen spelar olika aerosolpartiklar en huvudroll i molnbildning i atmosfären och de hade haft svårt att bildas utan dem. Aerosolpartiklar kan bestå av en mängd olika substanser med vitt skilda egenskaper. Gemensamt för dem alla är att de är små i atmosfären suspenderade partiklar (ofta kallade CCN – *Cloud Condensation Nuclei*), som vattenånga kan kondensera och växa på via någon av processerna ovan, om de är stora nog,  $> \sim 0,1 \mu\text{m}$ .

<sup>2</sup>Det är svårt finna någon bra svensk terminologi för "Immersion-nukleation" möjligen "dopp-nukleation", men innebörden är att droppen fryser när tillräckligt stora aggregat av interna kristaller bildats.

Tabell 2. Några olika värden på  $\kappa$

Substans	$\kappa_{medelvärde}$
NaCl	1,28
NaHSO <sub>4</sub>	0,91
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,90
NaNO <sub>3</sub>	0,88
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,80
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,67
(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> H(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0,65
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,61
Malonsyra	0,227
Canary Island dust*	0,26
Saharan dust*	0,054
Arizona test dust*	0,025
Black carbon**	0,002-0,007

De kan vara organiska, inorganiska och/eller vattenlösliga. Emellertid är inte alla former av aerosoler lika goda molnbildare. Framför allt är aerosoler som är hydrofila och hygrokopiska goda potentiella kondensationskärnor som exempelvis salter som klorider från haven, sulfater och nitrater från växter. Andra aerosoler som inte är lika goda potentiella kondensationskärnor är finfördelad mineraldamm från olika torra ökenområden, sot och "black carbon" från bränder och fossilförbränning, pollen från träd, och t.o.m. plankton från haven (Stevens 2011).

Dessa s.k. primära aerosoler finns i huvudsak i de första några kilometrarna av troposfären då de härrör från vindar som blåser upp dem från olika ytor på jorden. Denna del av troposfären brukar kallas för det "atmosfäriska gränsskiktet" eller "Planetary boundary layer", eller "PBL". PBL är den lägsta delen av atmosfären, där jordens ytförhållanden påverkar luftens cirkulation och vindar genom att olika hinder, som skog, byggnader och berg. Dessa olika hinder skapar turbulens som bl.a. kan blåsa upp olika ytmaterial som kan bilda olika aerosoler enligt ovan, (Stevens 2011).

För de aerosoler som utgörs av olösliga substanser kan man inte använda Köhlers ekvation utan vidare. I klimatmodeller har man därför varit tvungen till att parametrisera ekvationen, vilket är en av orsakerna till svårigheten att modellera molnens roll i klimatsystemet. Parametrisering av Köhlers ekvation gör det möjligt att göra beräkningar för även för olösliga substanser, (Petters et al. 2007). Ekvation 6:

$$S = [(D^3 - D_d^3)/(D^3 - D_d^3(1-\kappa))] * \exp(4M_w \sigma_w / RT \rho_w D_p)$$

Där  $\kappa$  är den s.k. "hygrokopicitetsparametern", som

experimentellt måste mätas för varje typ av aerosol och där  $D$  är droppens diameter samt  $D_d$  är den torra droppens diameter. Det man mäter experimentellt är en viss aerosolpartikels förmåga att binda vatten till sig. Exempel på olika  $\kappa$ -värden visas i Tabell 2, där de med en asterisk märkta mineraldammen är hämtade från (Koehler et al. 2009). Värdet för den med två asterixer är hämtat från (Helin et al. 2018).

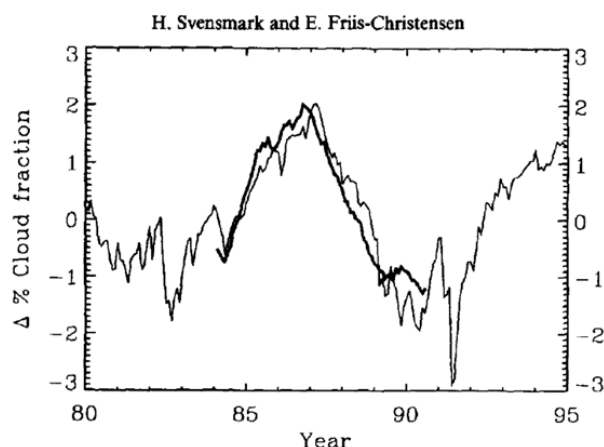
Faktorn  $\kappa$  varierar mellan 0,6 till 1,28 för starkt CCN aktiverande salter och mellan 0,002 och 0,227 för svagt hygroskopiska organiska substanser, (Petters et al. 2007). När  $\kappa$  närmar sig noll övergår ekvation 6 i ekvation 4, dvs. Kelvins ekvation.

Organiska aerosolföreningar är av stort intresse och mycket forskning sker i området, (Mohr 2005), för att få bättre modeller för molns bildande, eftersom organiska aerosolföreningar är rikligt förekommande i atmosfären, se databas för  $\kappa$ -data, (Petters 2022).

### 2.3.4 Kosmisk strålning—en annan teori för molnbildning

Henrik Svensmark et al. visade 1997 resultat på ett samband mellan kosmisk strålning i form av högenergetiska protoner och  $\alpha$ -partiklar och molnighet på jorden, (Svensmark et al. 1997). En ide' först framförd av Ney (Ney 1959) och sedan av Dickinson (Dickinson 1975) som föreslog en mekanism som innebar att den kosmiska strålningen skapade joner som via aerosoler gynnade kärnbildning för lågt liggande moln. På så sätt skulle således kosmisk joniserande strålning gynna molnbildning i troposfären.

Resultaten från Svensmarks studie visade att mellan åren 1984 och 1991 så följde molnfraktionen ( $\Delta\%$ ) nära nog exakt den uppmätta normaliserade kosmiska medelintensiteten, vänster respektive höger axel i fig. 9. De fann att molnigheten ökade ju kraftigare intensiteten av den kosmiska strålningen var. De fysikaliska processerna bakom diskuterades inte i detalj, men en hypotes framfördes om att aerosoler i luftlagren påverkas av laddningar som bildas genom jonisation och



Figur 9. Den tjocka heldragna linjen visar molnfraktionen  $\Delta\%$  (vänster axel) och den tunnare (höger axel - enheter saknas i originalartikeln) visar den normaliserade månatliga genomsnittliga medelneutronintensiteten för den kosmiska strålning vid Climax-stationen i Colorado, (Svensmark et al. 1997).

ökar möjligheten för droppbildning. I ett senare arbete visades dock att joniserande  $\gamma$ -strålning skapade betydligt fler joner i den fuktiga luften i en experimentkammare. Luften med tillsatt ozon och svaveldioxid, bildade aerosoler och CCN, som sedan skulle kunna växa till aktiverade molndroppar, (Svensmark et al. 2007).

## 3 Diskussion

### 3.1 Molnens roll i klimatsystemet

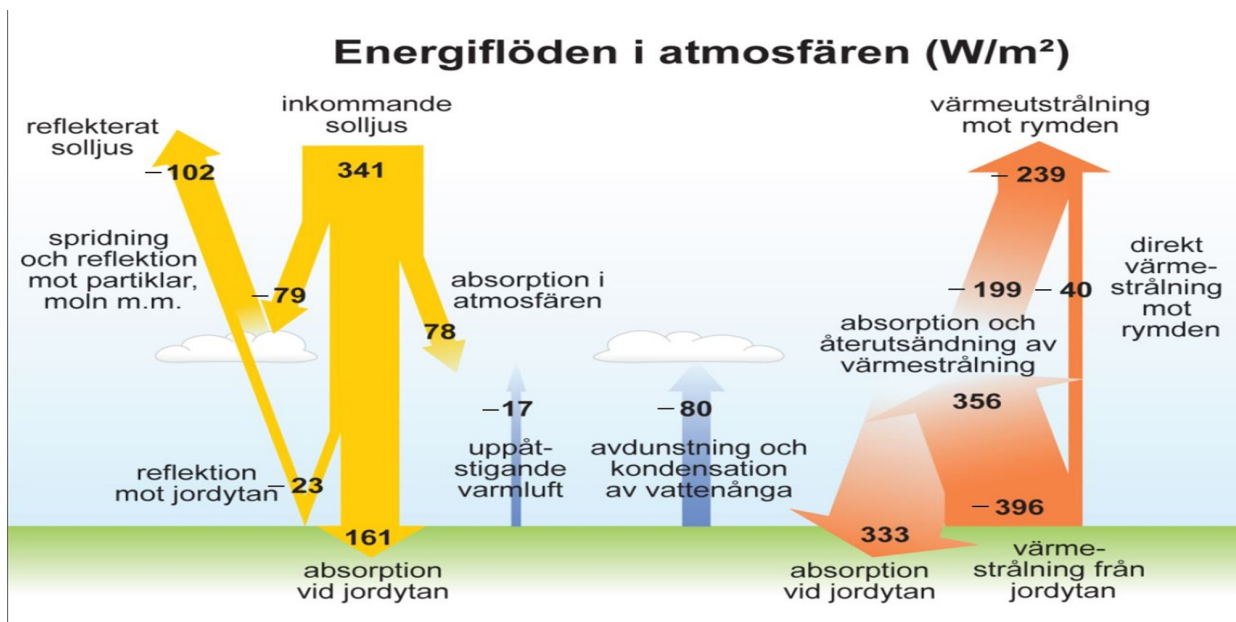
Den inkommande kortvågiga medelstrålningen är enligt tidigare  $\sim 341 \text{ W/m}^2$  och den direkt reflekterande delen från moln, aerosoler, hav och olika marktyper utgör  $\sim 29,5\%$ , dvs  $\sim 102 \text{ W/m}^2$ . Sammanlagt tar jorden således upp  $\sim 240 \text{ W/m}^2$ .

I fig. 10 visas data från det s.k. ERBE-experimentet, (ERBE 2008), där data samlats från flera olika satelliter, (Bernes 2016). Figuren visar en förenklad men ändå invecklad bild av hur inkommande energi fördelas i reflekterade delar mot aerosoler, moln ( $\sim 79 \text{ W/m}^2$ ) och jordytan ( $\sim 23 \text{ W/m}^2$ ). Den åskådliggör hur mycket av den kortvågiga instrålningen som absorberas av atmosfären ( $\sim 78 \text{ W/m}^2$ ), jordytan ( $\sim 161 \text{ W/m}^2$ ). Den uppvisar också hur mycket energi som frigörs vid kondensation av vattenånga till moln vid molnbildning ( $\sim 80 \text{ W/m}^2$ ) och expansionen när uppvärmd luft stiger ( $\sim 17 \text{ W/m}^2$ ).

Av den långvågiga strålningen, som måste vara sammanlagt lika stor, strålar  $\sim 239 \text{ W/m}^2$  ut från jorden. Bilden kompliceras av att värmestrålningen från jordytan är större ( $\sim 396 \text{ W/m}^2$ ) än den inkommande strålningen på  $\sim 341 \text{ W/m}^2$  och att endast  $40 \text{ W/m}^2$  strålar ut direkt. Detta beror på växthusgaserna absorberar värmestrålningen och återsänder den i alla riktningar, som i sin tur innebär att den fuktiga och koldioxidhaltiga luften värms upp och behåller värmen, se appendix för matematisk förklaring. På detta sätt hålls atmosfären uppvärmd över den temperatur den skulle haft om inga växthusgaser funnits närvarande. Alla värden ges med en osäkerhet om ca  $\pm 2 \text{ W/m}^2$ .

Enligt IPCCs senaste rapport där de behandlar effekterna av jordens albedo och jordens strålningsbudget, har molnen en avkylande effekt och att jorden utan moln hade varit betydligt varmare, förutsatt att växthuseffekten vore densamma, (Boucher 2014). De hävdar att moln minskar den absorberade genomsnittliga solstrålningen med ca  $-48 \text{ W/m}^2$ , samtidigt som växthuseffekten förstärks med  $+30 \text{ W/m}^2$  och därför kyler moln det globala yt-atmosfärsystemet med ca  $-18 \text{ W/m}^2$ , (Boucher 2014). Detta värde är flera gånger större än de  $\sim 4 \text{ W/m}^2$  som IPCC räknar med vid en dubbling av koldioxidhalten i atmosfären, (IPCC AR6 2021).

Totalt sett anses därför enligt de senaste forskningsrönen att mer moln har en avkylande effekt på klimatsystemet, (Wild et al. 2019) och följaktligen borde studiet av molnbildning och dess klimatpåverkan vara ett synnerligen viktigt område i den klimatforskning som sker just nu. Tyvärr torde molnbildning



Figur 10. Bilden visar de olika energiflödena mellan instrålad kortvågig strålning från solen och fördelningen av reflekterad och omfördelad värme samt utstrålad långvågig strålning. (Bernes 2016).

inte vara någonting som människan skulle kunna använda sig av för att antropogent påverka den globala uppvärmning som pågår, eftersom kunskaperna i området ännu är alltför bristfälliga.

Ändå finns det faktiskt förslag på hur människan via s.k. "Solar Geoengineering" skulle kunna minska instrålningen genom att spraya ut stora mängder sulfatpartiklar högt upp i atmosfären, (Wikipedia 2022e). Man skulle på så sätt försöka efterlikna effekter av stora vulkanutbrott, som t.ex. det vid Pinatubo 1991, som sänkte temperaturen på jorden med  $\sim 0,5$  °C under två år, (Parker 1996). De enorma mängder 17 megaton svaveldioxid som släpptes ut då vore dock ett stort vågspel att försöka efterlikna utan vidare, då så mycket återstår i den totala förståelsen av olika faktorer i klimatforskningen.

### 3.2 Den kosmiska strålningens roll

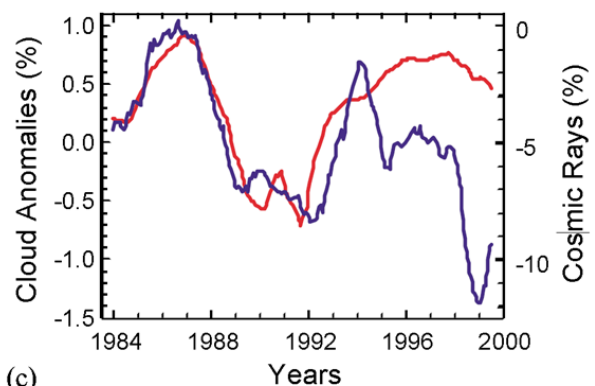
En artikel av Svensmark et al. (1997) väckte stor uppmärksamhet när den tycktes påvisa ett tydligt samband mellan intensiteten av den kosmiska strålningen och molnigheten på jorden och därmed energibalansen och klimatet. Den stora uppmärksamheten berodde på att Svensmark et al. hävdade att deras fynd kunde förklara hela den globala uppvärmningen under 1900-talet, vilket skulle vara ett mycket omvälvande forskningsresultat. Svensmark et al. hävdade i en vidare artikel att de funnit att påverkan på molnighet var kraftigast på låga moln,  $\leq 3200$  m.ö.h., (Marsh et al. 2000).

Emellertid framförde andra forskare att när data på molnighet och kosmisk strålning följdes upp över en längre period visade sig överensstämmelsen på ett samband mellan kosmisk strålning och molnighet inte vara perfekt längre utan uppvisade på en stor diskre-

pans efter 1995 till år 2000, fig.11, (Laut et al. 2003).

Laut P. et al. gick även in i mycket hög detalj på hur databeräkningar som utförts varit direkta felaktiga. En annan tveksamhet som framfördes var att låga moln under höga moln inte kan detekteras från satelliter som använder infraröd detektion, (Marsh et al. 2003).

Wagner et al. (2001) undersökte sambandet mellan moln och kosmisk strålning, genom att studera data på  $^{10}\text{Be}$  och  $^{36}\text{Cl}$  som proxys för kosmisk strålningsintensitet och  $\delta^{18}\text{O}$  och  $\text{CH}_4$  som proxys för klimatförändringar i isborrprover från GRIP-projektet (GRIP 2022) på Grönland. Detta gjorde det möjligt att studera den kosmiska strålningens inverkan på klimatet under en mycket lång period för 20 000 – 60 000 år sedan. De valde denna period eftersom under del av denna period för ca 40 000 till 42 000 år sedan inträffade en mycket betydande förändring och minskning av jordens magnetfält i en s.k. "Laschamp event". Denna jordmagne-



(c) Figur 11. Bilden visa procent låga moln (blå kurva) och intensiteten av den kosmiska strålningen (röd kurva) visar sämre samband under åren 1992- 2000, (Laut et al. 2003).

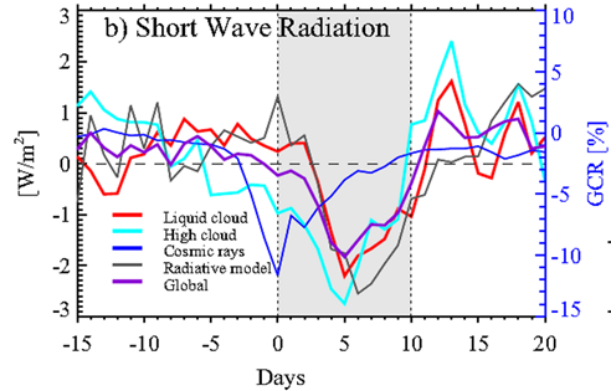


tiska förändring påverkade den kosmiska strålningens intensitet kraftigt på jorden och om Svensmarks et al. hade rätt i sina teorier, borde denna period varit kyligare än tiden före och efter. Resultaten från studien visade dock inte på någon effekt på klimatet som borde inträffat och slutsats om någon koppling mellan kosmisk strålning och klimatförändringar kunde inte heller här göras.

### 3.3 Forbush decreases som undersökningsmetod

Laken et al. (2012) omanalyserade även de data från Svensmark et al. (1997) och konstaterade att data övertolkats och att molndata från ISCCP inte lämpar sig för långsiktiga analyser. Därför föreslog Svensmark et al. att studier av s.k. "Forbush decreases", FD, skulle kunna vara rimligare att få resultat ifrån. En "Forbush decrease" är en händelse som inträffar när kraftiga s.k. "Coronal mass ejections", CME, från solen kastar ut laddade partiklar i plasmavinden tillfälligt magnetiskt skärmar av den högenergetiska kosmiska strålningen mot jorden, (Wikipedia 2022b). Följden av en FD vore då att en mindre bildning av CCN och således färre moln. Grunden för denna typ av studier skulle var lämpliga skulle vara just vara att dessa är snabba och relativt kortvariga förlopp i princip torde vara lättare att åtminstone få tillförlitligare mätdata ifrån genom att kalibrerings problem med långsiktiga analyser undanröjs.

Inte desto mindre fann även Laken et al. (2012) brister i den statistiska analysen utförd av Svensmark et al. (2012). Enligt deras mening har de flesta FD baserade studier generellt sett ett alltför litet antal CME i sina analyser, dvs färre än ~100, som försvårar en rigorös statistik analys. En uppenbar anledning till svårigheten att kunna studera tillräckligt många FD-händelser i en analys är att de är relativt sällsynta företeelser. Laken et al. (2012) drog därför slutsatserna att från de FD studier som genomförts på nuvarande satellitdata och markbaserade observationer inte ger stöd till någon märkbar effekt utöver den antropogena på-



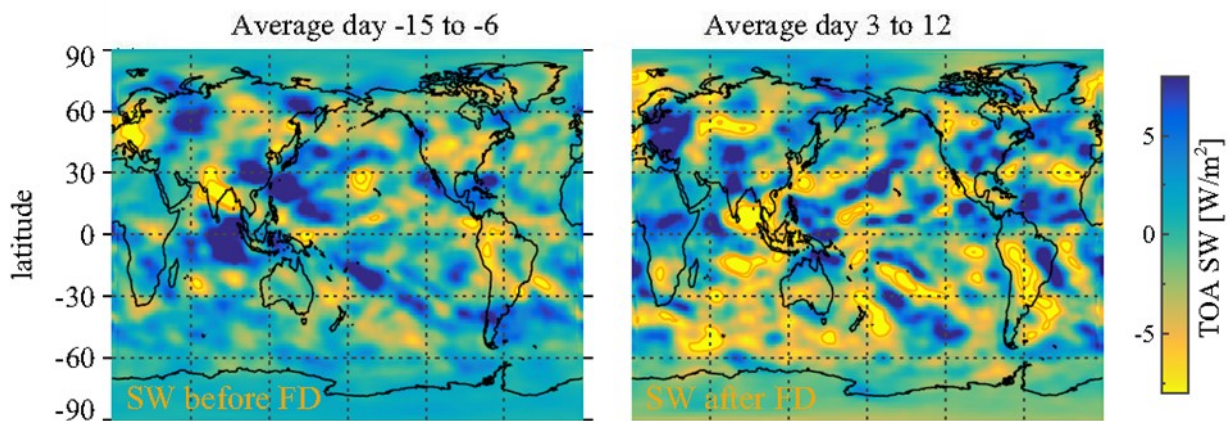
Figur 12. Där röd kurva är "liquid clouds", cyankurva områden med höga moln och lila kurva globala medelvärden. Det grå området anger perioden för beräkningen av responsen. Den blå kurvan är variationen i kosmisk strålning, GCR % - Galactic Cosmic Rays, (Svensmark et al. 2021).

verkan på klimatsystemet.

Inte heller Calogovic et al. (2010), som studerade data från 6 olika utvalda FD-händelser (mellan 9,2% till 21,3%, medelvärde ~15%) kunde finna något statistiskt signifikant samband mellan molnighet och kosmisk strålning. Procentminskningen av den kosmiska strålningen beräknades genom jämförelser med data dagarna före CME.

Inte desto mindre hävdar dock åter Svensmark et al. (2021) i en nylig publikation att de funnit ett statistiskt signifikant samband mellan kosmisk strålning och global molnighet efter nya bearbetningar av data från CERES-satelliten (Svensmark et al. 2021). I denna studie som presenterats inriktar de sig på de 13 kraftigaste "Forbush decreases" de funnit (37% till 119%, medelvärde ~59%) mellan åren 2000 - 2005 över en 15-dagars period före och 20 dagar efter en CME, ser man en tydlig nedgång i den reflekterade kortvågiga instrålningen, fig. 12.

Det något förvirrande värdet "119%" är enligt författarna orsakat av att de beräknat procentminskningen av jonproduktionen *relativt* minskningen av den (genomsnittliga) kosmiska strålningen från solfläcksminimum till solfläcksmaximum över en hel sol-



Figur 13. Den vänstra bilden visar den kortvågiga strålningen före FD och den högra visar kortvågiga medelvärdet under de följande nio dagarna. TOA står här för "Top of the Atmosphere" och syftar på flödet av uppåtgående kortvågiga strålningen (SW), (Svensmark et al. 2021)



fläckscykel, dvs. Den starkaste FD minskade GCR mer än genomsnittet under solcykel nr 23, mellan 1996-2008, (SpaceWeather 2022).

Svensmark et al. (2021) drar där slutsatsen att man funnit ett statistiskt signifikant samband i den reflekterade kortvågiga instrålningen och den utstrålade långvågiga utstrålningen som tyder på en värmande effekt på  $1 - 2 \text{ W/m}^2$  globalt. Den globala medeleffekten av påverkan på reflektionen dvs. den kortvågiga instrålningen (SW) före och efter Forbush händelserna framgår i fig. 13.

Det är svårt att dra några konklusiva slutsatser från de olika studierna huruvida den kosmiska strålningen har något reellt inflytande på molnigheten och därmed på jordens klimat. Det är idag med tillgängliga data emellertid tveksamt om så är fallet, men om det visar sig att Svensmark et al. har rätt, att det finns en påverkan, så skulle kosmisk strålning kunna ha en långsiktig effekt även om enstaka FD händelser inte har det. IPCC hävdar dessutom i sin senaste rapport att med hög konfidens bidrar inte kosmisk strålning märkbart till "effective radiative forcing", (IPCC AR6 2021).

## 4 Slutsatser

Sedan 1750 har jordens medeltemperatur stigit med  $\sim 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , som IPCC hävdar beror av antropogen påverkan, (IPCC AR6 2021). Enligt de bästa projektioner som IPCC gjort kommer temperaturen att stiga till mellan  $1,5 \text{ }^\circ\text{C} - 4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , vilket är ett väldigt stort span. Man kan fråga sig varför osäkerheten är så stor och varför forskare inte har lyckats snäva in denna stora skillnad?

Orsaken är att kunskaperna om hur moln och aerosoler bildas och fungerar i jordens energibalans är otillräcklig. För att kunna göra bättre projektioner måste forskare bättre kunna bestämma något som kallas "Radiative Forcing", F eller klimatkänsligheten,  $\lambda$ , som kan beskrivas med ekvationen (Wikipedia 2022c),

$$\lambda = \Delta T / \Delta F$$

där  $\Delta T$  är temperaturändringen grader och  $\Delta F$  är förändringen i strålningsbalansen i  $\text{W/m}^2$ .

Svårigheten är att bestämma klimatkänsligheten  $\lambda$ , som beror av förändringar i sammansättningen av växthusgaser och olika andra återkopplingsmekanismer, som molnbildning och att olika molntyper kan bidra på olika sätt. Låga moln ökar utstrålningen medan kalla höga moln minskar den, (Trenberth et al. 2009). Dessutom finns olika moln på olika breddgrader

Vi vet att människan har ökat både koldioxid och metan med storleksordningen 30% sedan år 1750, som båda bidrar till jordens uppvärmning. Men vi vet också att människan ökat mängden aerosoler i atmosfären som bidrar till molnbildning, som funnits totalt sett kyler jorden, (IPCC AR6 2021). Det finns en mängd olika aerosoler, men de finns i så låga halter och deras egenskaper är dåligt kända som skapar den stora osä-

kerheten i de projektioner som görs.

Därför är också kosmisk strålning, då jonisation bidrar till nukleation, en så undersökt storhet, eftersom den varierar med solaktiviteten. IPCC hävdar, enligt tidigare, i sin senaste rapport att kosmisk strålning med hög konfidens inte märkbart bidrar till någon "effective radiative forcing", (IPCC AR6 2021), i alla fall inte i det korta perspektivet. Däremot är det svårare att belägga om kosmisk strålning spelar roll i det långa perspektivet. Dock tyder studierna av Wagner et al. (2001) att kosmisk strålning inte heller har någon betydelse i det längre perspektivet upp till 60 000 år.

Om jorden blir varmare ökar i sig avdunstningen från haven och mängden vattenånga i atmosfären, som också är en stark växthusgas, men även molnigheten. Enligt Clausius-Clapeyrons ekvation ökar luftfuktigheten med  $\sim 7\%$  per grad, vilket borde innebära att molnigheten ökat sedan 1750. Tyvärr finns det inga bra data på global molnighet de senaste 270 åren. Den stora frågan är därför hur olika stora de olika återkopplingseffekterna, "feedbacks" egentligen är.

Man har beräknat bidragen till växthuseffekten av vattenånga är  $\sim 50\%$  av moln  $\sim 25\%$  och koldioxid är  $\sim 20\%$  av den totala växthuseffekten, (Wikipedia 2022d), (dvs. vattenånga och moln står för  $\sim 75\%$  av växthuseffekten). Därför är vidare forskning om moln och deras bildning och samverkan med växthusgaser och effekt på klimatet av allra största vikt.

## 5 Tackord

Jag vill först och främst tacka min handledare Raimund Muscheler för att ha bromsat och hjälp mig att fokusera mina vilda ambitioner att försöka "täcka allt" inom detta område.

Jag vill likaså tacka min examinator Andreas Nilsson för värdefulla kommentarer på mitt finala draft.

Jag vill även passa på att tacka alla oerhört kunniga och jätteroliga lärare och elever som förgyllt min tillvaro på föreläsningar, lektioner och på alla exkursioner och resor jag har haft nöjet att få delta i under mina år som student i geologi vid Lunds Universitet.

Speciellt vill jag även ge ett stort erkännande till min gamle kollega och gode vän, Lars Ögren (sedan 1976) och studiekamrat, för alla givande diskussioner vi har haft genom våra gemensamma studieår.

Sist men absolut inte minst, vill jag rikta ett alldeles speciellt tack min kära hustru Gittan Jägfeldt för hennes otroliga tålamod med mina studier under de år som jag ägnat många långa tider, helger och kvällar på mitt arbetsrum framför datorn i stället för att umgås och vara lite sällskaplig.

## 5 Referenser

- Aqua, 2022: *Aqua Earth-observing satellite mission*. Hämtad 2022-05-17 från <https://aqua.nasa.gov/>
- Bernes, C., 2016: *En varmare värld Växthuseffekten och klimatets förändringar* Claes Bernes Naturvårdsverket R.
- Boucher, O., 2014: *IPCC Climate Change 2013 – The Physical Science*, Published online by Cambridge University Press: Hämtad 2022-03-18 från: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/climate-change-2013-the-physical-science-basis/clouds-and-aero-sols/11F2D995DB0981610675738B72E7AEC>
- Calogovic, J., 2010: Sudden cosmic ray decreases No change of global cloud cover. *Geophysical Research Letters*, VOL. 37, L03802, doi:10.1029/2009GL041327, 2010
- ERBE, 2008: *The Earth Radiation Budget Experiment (ERBE)*, NASA. Hämtad 2022-05-17 från <https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/ERBE.html>
- Freedman, R.A., et al. 2011: *Universe, Ninth Edition*. W.H. Freeman & Co New York, NY. 761 pp.
- Goosse, H.P.Y. et al. 2010: *Introduction to climate dynamics and climate modelling. Chapter 1. Description of the climate system and its components*. Hämtad 2022-04-02, från [www.climate.be/textbook/pdf/Chapter\\_1.pdf](http://www.climate.be/textbook/pdf/Chapter_1.pdf)
- Gueymard, C. A., 2018: A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations, *Solar Energy, Volume 168*, 2-9, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.001> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18303463>
- GRIP, 2022: *Greenland ice core project* Hämtad 2022-06-10 från [https://en.wikipedia.org/wiki/Greenland\\_ice\\_core\\_project](https://en.wikipedia.org/wiki/Greenland_ice_core_project)
- Helin, A., et al. 2018: Characteristics and source apportionment of black carbon in the Helsinki metropolitan area, Finland. *Atmospheric Environment*, 190, 87-98, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.022>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231018304692>
- IPCC, AR6, 2021: *Chapter 7. The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity*. Hämtad 2022-03-29 från [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter\\_07.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_07.pdf)
- King, M.D., 2013: *Spatial and Temporal Distribution of Clouds Observed by MODIS Onboard the Terra and Aqua Satellites*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51, 7, 3826-3852.
- Laken, B. A., et al. 2012: A cosmic ray-climate link and cloud observations. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2, A18 <https://doi.org/10.1051/swsc/2012018>
- Laut, P. 2003: Solar activity and terrestrial climate: an analysis of some purported correlations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(7), 801-812.
- Lockwood, M., 2012: Solar Influence on Global and Regional Climates. *Surveys in Geophysics* 33 (3), 503-534.
- Martinsson B. 2018: *Aerosol, Water and Clouds. Div. Nuclear Physics, Lund University. Extract from a textbook on airborne particles by the Consortium of Aerosol Science and Technology (CAST) at Lund University*. Hämtad 2022-05-04 från [http://www.nuclear.lu.se/fileadmin/nuclear/Undervisning/Atmosfaerskurs/Aerosol\\_water\\_and\\_clouds.pdf](http://www.nuclear.lu.se/fileadmin/nuclear/Undervisning/Atmosfaerskurs/Aerosol_water_and_clouds.pdf)
- Mayer, K., 2020: *Lecture 9.3 - Cloud Condensation Nuclei*. Hämtad 2022-05-03 från: <https://www.youtube.com/watch?v=zHwSoIKJuQY>
- Marsh, N. D., and H. Svensmark 2000: Low cloud properties influenced by cosmic rays, *Phys. Rev. Lett.*, 85, 5004–5007, <https://doi.org/10.48550/arXiv.physics/0005072>
- Marsh, N., and Svensmark, H., 2003: Galactic cosmic ray and El Niño–Southern Oscillation trends in International Satellite Cloud Climatology Project D2 low-cloud properties, *J. of Geophysical Res.*, 108(D6), 4195, <https://doi.org/10.1029/2001JD001264>
- Marshak S. 2012: *Earth Portrait of a Planet, 4th Edition*. Norton & Co Inc. New York. 820 pp.
- Mohr, K., 2005: *Aerosols & Clouds*. Hämtad 2022-05-12 från <https://earth.gsfc.nasa.gov/meso/research/aerosols-clouds>
- Ney, E. P., 1959: Cosmic radiation and the weather, *Nature*, 183, 451–452.
- Parker, D.E., et al. 1996: The impact of mount Pinatubo on world-wide temperatures. *International Journal of Climatology*. V16, 5, 487-497. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199605\)16:5<487::AID-JOC39>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199605)16:5<487::AID-JOC39>3.0.CO;2-J)
- Petters, M. D., et al. 2007: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1961–1971, <https://doi.org/10.5194/acp-7-1961-2007> .
- Petters, M.D., 2022: *Kappa Code related to the hygroscopicity parameter kappa*. Hämtad 2022-05-04 från [https://mdpetters.github.io/software/4\\_software/](https://mdpetters.github.io/software/4_software/)
- Quante, M., 2007: *Distribution and transport of water in the atmosphere*. Hämtad 2022-05-15 från [https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/pdf/en/water/global\\_change-water-chapter-1\\_6.pdf](https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/pdf/en/water/global_change-water-chapter-1_6.pdf)
- SMHI, 2021: *Väderrekord*. Hämtad 2022-06-04 från <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/vaderrekord/vaderrekord-1.5782>

- SMHI, 2022a: *Droppstorlek och fallhastighet*. Hämtad 2022-05-08 från <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/droppstorlek-och-fallhastighet-1.31756>
- SMHI, 2022b: *Moln*. Hämtad 2022-05-08 från <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/moln-introduktion-1.3852>
- SpaceWeather 2022: Hämtad 2022-06-11 från, <https://www.spaceweatherlive.com/sv/solaktivitet/solcykel/solcykel-historik.html>
- Stevens, B., 2011: *Twelve Lectures on Cloud Physics Lecture-notes-Cloud-Physics*. Hämtad 2022-05-01 från, <https://mpimet.mpg.de/fileadmin/staff/stevensbjorn/lectures/Lecture-notes-Cloud-Physics.pdf>
- Svensmark, H., et al. 1997: Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage--a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59, 11, 1225-1232.
- Svensmark, H., et al.: 2007: Experimental Evidence for the Role of Ions in Particle Nucleation under Atmospheric Conditions. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463.2078: 385-396. <https://doi.org/10.1098/rspa.2006.1773>
- Svensmark, H., et al. 2021: Atmospheric ionization and cloud radiative forcing. *Scientific Reports* 11:19668 <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99033-1>
- Stull, R., 2017: *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science. Version 1.02b*. Copyright © 2017 by Roland Stull, Dept. of Earth, Ocean & Atmospheric Sciences, University of British Columbia, 2020-2207 Main Mall, Vancouver, BC, Canada V6T 1Z4. Hämtad 2022-0415 från [https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical\\_Meteorology/](https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/)
- Trenberth, K. E., et al. 2005: The Mass of the Atmosphere. A Constraint on Global Analyses. *Journal of Climate. American Meteorological Society*, 18, 864-875.
- Trenberth, K. E., et al. 2009: Earth's Global Energy Budget. *American Meteorological Society*, 311-323.
- UCAR, 2014: *Exploring the Atmosphere with Weather Balloons*. Center for Science Education. Hämtad 2022-05-17 från <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/weather-balloons>
- Wagner, G., et al. 2001: Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the Earth's climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D4), 3381-3387. <https://doi.org/ludwig.lub.lu.se/10.1029/2000JD900589>
- Widen, J., and Munkhammar, J., 2019: *Solar radiation theory*. Uppsala University. DOI 10.33063/diva-381852 URN <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-381852>
- Wikipedia, 2022a: *Brewster-vinkel*. Hämtad 2022-05-05 från <https://sv.wikipedia.org/wiki/Brewstervinkel>
- Wikipedia, 2022b: *Forbush decrease*. Hämtad 2022-05-11 från [https://en.forbush.org/wiki/Forbush\\_decrease](https://en.forbush.org/wiki/Forbush_decrease)
- Wikipedia, 2022c: *Radiative forcing*. Hämtad 2022-05-25 från [https://en.wikipedia.org/wiki/Radiative\\_forcing](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiative_forcing)
- Wikipedia, 2022d: *Greenhouse gas*. Hämtad 2022-05-25 från [https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse\\_gas](https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_gas)
- Wikipedia, 2022e: *Solar geoengineering*. Hämtad 2022-06-07 från [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_geoengineering](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_geoengineering)
- WMO, 2022: *Aircraft-based Meteorological Observations Benefits to Aviation. World Meteorological Organization*. Hämtad 2022-05-17 från <https://public.wmo.int/en/resources/meteoworld/aircraft-based-meteorological-observations-benefits-aviation>
- Zieger P.C. 1978: *Effects of relative humidity on aerosol light scattering*. Freie Universität Berlin. Hämtad 20220503 från [https://www.researchgate.net/figure/Koehler-curve-Saturation-ratio-vs-particle-diameter-of-sodium-chloride-NaCl\\_fig3\\_279931079](https://www.researchgate.net/figure/Koehler-curve-Saturation-ratio-vs-particle-diameter-of-sodium-chloride-NaCl_fig3_279931079)

## 6 Appendix 1

En enkel modell för växthuseffekten kan beskrivas genom ett exempel som illustreras i en bild i fig. 14, (Goosse et al. 2010). Atmosfären är där endast ett enkelt gasskikt med temperaturen  $T_a$  och är helt genomskinligt för solens strålning. Den är däremot helt ogenomskinlig för jordens egenstrålning  $T_e$ . Eftersom ekvation (1) gäller,

$$(\pi R^2)S_0(1-A) = (4\pi R^2)\sigma T_e^4 \quad (1)$$

Och eftersom absorberad solstrålning  $\sigma T_a^4$  är lika stor som utstrålad värme  $\sigma T_e^4$  från jorden själv, så gäller även,

$$\sigma T_a^4 = 1/4(1-A)S_0 = \sigma T_e^4 \quad (2)$$

I dessa förenklade beräkningar gäller då också att jordytans temperatur är lika med summan av solinstrålningen och strålningen från atmosfären och följaktligen gäller,

$$\sigma T_s^4 = (1-A)S_0 + \sigma T_a^4 \quad (3)$$

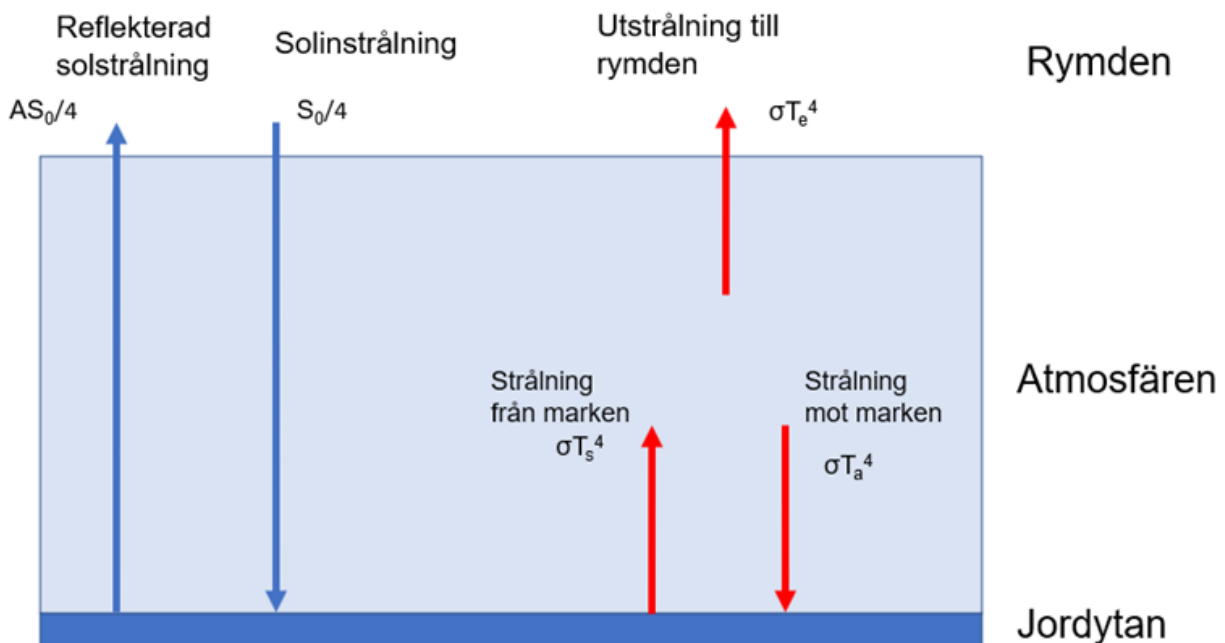
där  $T_s$  är jordytans temperatur och genom att kombinera ekvationerna (2) and (3) till (4) erhålles att,

$$\sigma T_s^4 = \sigma T_e^4 + \sigma T_e^4 \quad (4)$$

så att,

$$T_s = 2^{0,25} T_e \approx 1,2 T_e \quad (5)$$

Innebörden av ovanstående ekvation är därför att ytemperaturen på jorden är högre än den som strålas ut på toppen av atmosfären, dvs växthuseffekten.



Figur 14. Jordens värmebalans där atmosfären ges av ett enkelt gasskikt utan moln eller något annat. Atmosfären är helt genomskinlig för solens inkommande strålar och helt tät för jordens egenutstrålning, egenritad figur efter (Goosse et al. 2010).

## 7 Appendix 2

Populärvetenskaplig framställning

### Molnens påverkan på jordens strålningsbalans och klimatsystemet

I dagens klimatdebatt talas det dagligen om koldioxidens och i allt större utsträckning om metanets inverkan på klimatet eftersom de är starka växthusgaser. Detta gör man trots att de utgör en mycket ringa andel av atmosfären, och endast finns i vad man kallar spårämnen, 0,0419% respektive 0,00018%. Man har då totalt utelämnat betydelsen av vattnets närvaro genom moln och luftfuktighet, som också ger en stark växthuseffekt och som utgör 0,25% i medeltal. Det vill säga, atmosfären består till ~99,7% av icke-växthusgaser.

#### Bildning av moln

Moln bildas när fuktig luft stiger upp och kyls av och kondenserar. Då frigörs s.k. latent värme som värmer luften och därför sjunker temperaturen med 6,5 °C/km i stället för 10 °C/km om luften varit torr. Moln har även en annan effekt som man märker av så fort solen går i moln. De blockerar den inkommande värmestrålningen och ökar samtidigt lokalt albedot, som är ett mått på reflexionsförmåga, och delar av instrålningen reflekteras ut från jorden.

Samtidigt vet alla att när natten kommer så sjunker temperaturen, speciellt på vintern när luftfuktigheten är låg. Frosten kommer smygande och man måste skrapa bilrutorna på morgonen.

Men så, om det mulnar till, så slutar temperaturen att sjunka. Det beror på att molnen återstrålar den värme som strålar ut från marken. Det blir en feedback från molnen som är komplicerad att beräkna och som dessutom är beroende av molntyp. De skillnader som finns mellan dessa strålningsprocesser är inte idag till fullo förstådda och t.o.m. IPCC erkänner att moln är en svårbehandlad frågeställning i klimatfrågan. Mycket mer forskning måste göras för att få mer förtroende för molnfeedbacks-processer.

#### Solen och dess instrålning är kärnan i jordens klimat

Solen är en mäktig granne som är 330 000 ggr tyngre än jorden och strålar ut 400 miljarder miljarder watt! Solen förser på det sättet jorden med 200 miljarder miljarder watt dygnet runt året om, jämfört med Forsmarks totaleffekt om 3,1 miljarder watt.

Räknar man om detta till jordens hela yta blir det i genomsnitt på 340 watt/m<sup>2</sup> som träffar jordens övre atmosfär. Genom att jordens reflekterar 30% av inkommande strålning, så återkastas 100 watt/m<sup>2</sup> direkt tillbaka ut i rymden utan att avge någon värme, resten 240 watt/m<sup>2</sup> absorberas.

#### Jordens långvågiga egenutstrålning i IR

För att inte jorden ska börja koka så gör jorden sig av med värme genom att stråla ut den i alla riktningar i det infraröda området. Det är framför allt här som växthusgaserna gör sig gällande. De hindrar utstrålningen på ett liknande sätt som moln. Hade vi t.ex.

kunnat se det infraröda ljuset (värmestrålningen) hade vi uppfattat omvärlden som ständigt insvept i en tät röd dimma.

#### Moln och luftfuktighet

Om vatten i form av moln och luftfuktighet finns i ~6 gånger högre andelar än koldioxid och ~1400 gånger högre än metan, så kan man fråga sig om varför molnens påverkan på den globala temperaturökning man sett sedan mitten av 1800-talet inte diskuteras i media.



Jorden med moln fångad av den japanska vädersatelliten Himawari 8.



**Tidigare skrifter i serien ”Examensarbeten i Geologi vid Lunds universitet”:**

586. van Wees, Roos, 2020: Combining luminescence dating and sedimentary analysis to derive the landscape dynamics of the Velická Valley in the High Tatra Mountains, Slovakia. (45 hp)
587. Rettig, Lukas, 2020: Implications of a rapidly thinning ice-margin for annual moraine formation at Gornergletscher, Switzerland. (45 hp)
588. Bejarano Arias, Ingrid, 2020: Determination of depositional environment and luminescence dating of Pleistocene deposits in the Biely Váh valley, southern foothills of the Tatra Mountains, Slovakia. (45 hp)
589. Olla, Daniel, 2020: Petrografisk beskrivning av Prekambriska ortognejs i den undre delen av Särviskollan, mellersta delen av Skollan, Kaledonska orogenerna. (15 hp)
590. Friberg, Nils, 2020: Är den sydatlantiska magnetiska anomalin ett återkommande fenomen? (15 hp)
591. Brakebusch, Linus, 2020: Klimat och väder i Nordatlanten-regionen under det senaste årtusendet. (15 hp)
592. Boestam, Max, 2020: Stränder med erosion och ackumulation längs kuststräckan Trelleborg - Abbekås under perioden 2007-2018. (15 hp)
593. Agudelo Motta, Laura Catalina, 2020: Methods for rockfall risk assessment and estimation of runoff zones: A case study in Gothenburg, SW Sweden. (45 hp)
594. Johansson, Jonna, 2020: Potentiella nedslagskratrar i Sverige med fokus på Östersjön och östkusten. (15 hp)
595. Haag, Vendela, 2020: Studying magmatic systems through chemical analyses on clinopyroxene - a look into the history of the Teno ankaramites, Tenerife. (45 hp)
596. Kryffin, Isidora, 2020: Kan benceller bevaras över miljontals år? (15 hp)
597. Halvarsson, Ellinor, 2020: Sökande efter nedslagskratrar i Sverige, med fokus på avtryck i berggrunden. (15 hp)
598. Jirdén, Elin, 2020: Kustprocesser i Arktis – med en fallstudie på Prins Karls Forland, Svalbard. (15 hp)
599. Chonewicz, Julia, 2020: The Eemian Baltic Sea hydrography and paleoenvironment based on foraminiferal geochemistry. (45 hp)
600. Paradeisis-Stathis, Savvas, 2020: Holocene lake-level changes in the Siljan Lake District – Towards validation of von Post's drainage scenario. (45 hp)
601. Johansson, Adam, 2020: Groundwater flow modelling to address hydrogeological response of a contaminated site to remediation measures at Hjortsberga, southern Sweden. (15 hp)
602. Barrett, Aodhan, 2020: Major and trace element geochemical analysis of norites in the Hakefjorden Complex to constrain magma source and magma plumbing systems. (45 hp)
603. Lundqvist, Jennie, 2020: ”Man fyller det med information helt enkelt”: en fenomenografisk studie om studenters upplevelse av geologisk tid. (45 hp)
604. Zachén, Gabriel, 2020: Classification of four mesosiderites and implications for their formation. (45 hp)
605. Viðarsdóttir, Halla Margrét, 2020: Assessing the biodiversity crisis within the Triassic-Jurassic boundary interval using redox sensitive trace metals and stable carbon isotope geochemistry. (45 hp)
606. Tan, Brian, 2020: Nordvästra Skånes prekambriiska geologiska utveckling. (15 hp)
607. Taxopoulou, Maria Eleni, 2020: Metamorphic micro-textures and mineral assemblages in orthogneisses in NW Skåne – how do they correlate with technical properties? (45 hp)
608. Damber, Maja, 2020: A palaeoecological study of the establishment of beech forest in Söderåsen National Park, southern Sweden. (45 hp)
609. Karastergios, Stylianos, 2020: Characterization of mineral parageneses and metamorphic textures in eclogite- to high-pressure granulite-facies marble at Allmenningen, Roan, western Norway. (45 hp)
610. Lindberg Skutsjö, Love, 2021: Geologiska och hydrogeologiska tolkningar av SkyTEM-data från Vombsänkan, Sjöbo kommun, Skåne. (15 hp)
611. Hertzman, Hanna, 2021: Odensjön - A new varved lake sediment record from southern Sweden. (45 hp)
612. Molin, Emmy, 2021: Rare terrestrial vertebrate remains from the Pliensbachian (Lower Jurassic) Hasle Formation on the Island of Bornholm, Denmark. (45 hp)
613. Højbert, Karl, 2021: Dendrokronologi - en nyckelmetod för att förstå klimat- och miljöförändringar i Jämtland under holocen. (15 hp)
614. Lundgren Sassner, Lykke, 2021: A Method for Evaluating and Mapping Terrestrial Deposition and Preservation Potential for Palaeostorm Surge Traces. Remote Mapping of the Coast of Scania, Blekinge and Halland, in Southern Sweden, with a Field Study at Dalköpinge Ängar, Trelleborg. (45 hp)

615. Granbom, Johanna, 2021: En detaljerad undersökning av den mellanordoviciska "furdalkalkstenen" i Dalarna. (15 hp)
616. Greiff, Johannes, 2021: Oolites from the Arabian platform: Archives for the aftermath of the end-Triassic mass extinction. (45 hp)
617. Ekström, Christian, 2021: Rödfärgade utfällningar i dammanläggningar orsakade av *G. ferruginea* och *L. ochracea* - Problemstatistik och mikrobiella levnadsförutsättningar. (15 hp)
618. Östsjö, Martina, 2021: Geologins betydelse i samhället och ett första steg mot en geopark på Gotland. (15 hp)
619. Westberg, Märta, 2021: The preservation of cells in biomineralized vertebrate tissues of Mesozoic age – examples from a Cretaceous mosasaur (Reptilia, Mosasauridae). (45 hp)
620. Gleisner, Lovisa, 2021: En detaljerad undersökning av kalkstenslager i den mellanordoviciska gullhögenformationen på Billingen i Västergötland. (15 hp)
621. Bonnevier Wallstedt, Ida, 2021: Origin and early evolution of isopods - exploring morphology, ecology and systematics. (15 hp)
622. Selezeneva, Natalia, 2021: Indications for solar storms during the Last Glacial Maximum in the NGRIP ice core. (45 hp)
623. Bakker, Aron, 2021: Geological characterisation of geophysical lineaments as part of the expanded site descriptive model around the planned repository site for high-level nuclear waste, Forsmark, Sweden. (45 hp)
624. Sundberg, Oskar, 2021: Jordlagerföljden i Höjeådalen utifrån nya borrhningar. (15 hp)
625. Sartell, Anna, 2021: The igneous complex of Ekmanfjorden, Svalbard: an integrated field, petrological and geochemical study. (45 hp)
626. Juliusson, Oscar, 2021: Implications of ice-bedrock dynamics at Ullstorp, Scania, southern Sweden. (45 hp)
627. Eng, Simon, 2021: Rödslam i svenska kraftdammar - Problematik och potentiella lösningar. (15 hp)
628. Kervall, Hanna, 2021: Feasibility of Enhanced Geothermal Systems in the Precambrian crystalline basement in SW Scania, Sweden. (45 hp)
629. Smith, Thomas, 2022: Assessing the relationship between hypoxia and life on Earth, and implications for the search for habitable exoplanets. (45 hp)
630. Neumann, Daniel, 2022: En mosasaurie (Reptilia, Mosasauridae) av paleocensk ålder? (15 hp)
631. Svensson, David, 2022: Geofysisk och geologisk tolkning av kritskollors utbredning i Ystadsområdet. (15 hp)
632. Allison, Edward, 2022: Avsättning av Black Carbon i sediment från Odensjön, södra Sverige. (15 hp)
633. Jirdén, Elin, 2022: OSL dating of the Mesolithic site Nilsvikdalen 7, Bjørøy, Norway. (45 hp)
634. Wong, Danny, 2022: GIS-analys av effekten vid stormflod/havsnivåhöjning, Morupstrakten, Halland. (15 hp)
635. Lycke, Björn, 2022: Mikroplast i vattenavsatta sediment. (15 hp)
636. Schönherr, Lara, 2022: Grön fältspat i Varbergskomplexet. (15 hp)
637. Funck, Pontus, 2022: Granens ankomst och etablering i Skandinavien under postglacial tid. (15 hp)
638. Brotzen, Olga M., 2022: Geologiska besöksmål och geoparker som plattform för popularisering av geovetenskap. (15 hp)
639. Lodi, Giulia, 2022: A study of carbon, nitrogen, and biogenic silica concentrations in *Cyperus papyrus*, the sedge dominating the permanent swamp of the Okavango Delta, Botswana, Africa. (45 hp)
640. Nilsson, Sebastian, 2022: PFAS- En sammanfattning av ny forskning, med ett fokus på föroreningskällor, provtagning, analysmetoder och saneringsmetoder. (15 hp)
641. Jägfeldt, Hans, 2022: Molnens påverkan på jordens strålningsbalans och klimatsystem. (15 hp)



**LUNDS UNIVERSITET**

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
Sölvegatan 12, 223 62 Lund



