



FOTO: ANDREW FEL/SHUTTERSTOCK

Global uppvärmning blev

Enligt Copernicus var 2024 det första året då den globala uppvärmningen översteg 1,5 grader, och den 30-åriga uppvärmningstrenden förväntas passera 1,5 grader år 2029. I en värld som är 1,5 grader varmare riskerar 1 av 50 arter på jorden att utrotas (Urban, 2024).

Den hastighet med vilken vi närmar oss 1,5 grader och utrotning av 2 % av jordens arter väcker en grundläggande fråga: *accelererar den globala uppvärmningen?*

Svaret på denna fråga framgår tydligt av bidraget från arbetsgrupp I (arbetsgruppen som behandlar den fysikaliska grunden för klimatförändringar) till IPCC:s sjätte utvärderingsrapport (IPCC, 2021). Det är ett otvetydigt ja.

Men i en studie som vi publicerade i *Geophysical Research Letters* 2020 (Skelton m.fl., 2020) fann vi att uppvärmningen inte bara accelererar,

utan också att accelerationen – åtminstone i Europa – hänt plötsligt mellan 1985 och 1991. En abrupt förändring väcker frågan: *har vi passerat en av klimatsystemets tippningspunkter, och i så fall vilken?*

En tippningspunkt i klimatsystemet är – enligt IPCC (2021) – en kritisk tröskel bortom vilken en del av klimatsystemet kan förändras på ett plötsligt eller oåterkalleligt sätt.

I vår studie använde vi instrumentella temperaturmätningar från sjutton väderstationer i Europa (Italien, Tyskland, Ungern, England och Sverige), många med data som sträcker sig tillbaka till 1700-talet, och en av dem ännu längre (till 1659). Denna långa mätserie finns på Hadley Centre i England och är egentligen en sammanställning av instrumentella data från tre stationer spridda över England.

Stockholms observatorium är en av de sexton andra stationerna. Här har temperaturer mätts kontinuerligt sedan 1756, vilket gör det till en av världens längsta sammanhängande temperaturserier från en och samma plats. Faktum är att årets högsta och lägsta temperatur tidigare målades på den cirkulära väggen inne i själva observatoriet, fram till 2014 då man fick slut på plats! Serien från Uppsala – en annan av de sexton stationerna – är ännu längre tidsmässigt (de första mätningarna är från 1722) – men det finns luckor i mätserien från Uppsala som fyllts i med data från Stockholm.

Det framgår tydligt av alla sjutton instrumentella serier att uppvärmningen går allt snabbare. Vi mätte en genomsnittlig uppvärmningstakt på 0,37 °C per decennium i Europa från 1990 till 2018 – intressant nog snabbare än det globala genomsnittet på 0,17 °C per decennium under samma period. Båda dessa takter är betydligt



högare än det globala genomsnittet på 0,07 °C per decennium sedan 1880 enligt National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) i USA.

Men sker denna acceleration gradvis eller abrupt? Och om den blev snabbare abrupt – vad säger det om hur vi påverkar klimatsystemet?

En visuell granskning av exempelvis temperaturserien från Uppsala tyder på en tydlig "ändring" kring 1999. Det samma ses i de flesta andra serier (Skelton m.fl., 2020). Men är dessa abrupta förändringar verkliga – eller bara optiska illusioner (figur 2)?

Vi försökte besvara denna fråga med en statistisk metod som tidigare använts för att upptäcka abrupta eko-

logiska förändringar (Guttal och Jayaprakash, 2008): skevhet (*skewness*).

Skevhet är ett statistiskt mått på hur asymmetriskt data är fördelade kring sitt medelvärde. En perfekt symmetrisk fördelning – en klockkurva – har skevhet noll och medelvärde, median och typvärde är lika. Om dessa skiljer sig åt är fördelningen skev: ena "svansen" är längre än den andra.

Positiv skevhet: svansen dras åt höger.

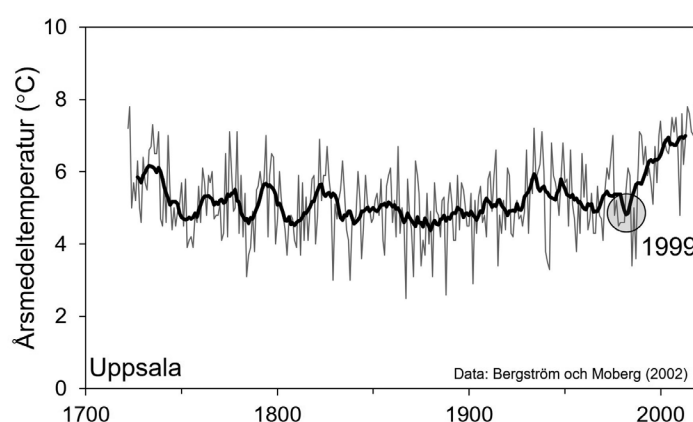
Negativ skevhet: svansen dras åt vänster.

I vår studie skulle positiv skevhet indikera en "svans" av varmare år, medan negativ skevhet skulle indikera en "svans" av kallare år.

Eftersom vi ville undersöka hur skevheten förändrats över tid beräknade vi den inte för hela serien på en gång. I stället beräknade vi skevhet för olika segment av temperaturserierna,



Figur 2. Årsmedeltemperatur i Uppsala med start 1722.



där vi försköt start- och slutår framåt i tiden ett år i taget. Genom "försök och fel" fann vi att ett segment behövde vara minst 175 år långt för att ge statistiskt robusta resultat.

Exempel: för Uppsala, där vi hade temperaturdata från 1722 till 2018, beräknade vi skevhet för följande 175-årssegment:

1722–1896
1723–1897
1724–1898
...
1844–2018

Vi beräknade Pearsons skevhetkoefficienter (γ) för den genomsnittliga års-temperaturen (T_i) från år y till Y med följande ekvation (Sokal och Rohlf, 1995):

$$\gamma = \frac{\sum_{i=y}^Y (T_i - \bar{T})^3 / (Y - y)}{s^3}$$

I denna ekvation är $\bar{T}$ medelvärde för stickprovet och s är tandardavvikelsen.

Vi fann att skevheten låg under noll och förändrades endast svagt fram till 1999, därefter ökade den snabbt. Det tyder på ett plötsligt framträdande av en "svans" av varmare år från 1999 och framåt, alltså en snabbare uppvärmning (figur 3).

Vi fann liknande bevis för en abrupt acceleration av uppvärmningen i samtliga sjutton temperaturserier. Året då detta inträffade varierade mellan väderstationerna – från 1975 i Torino till 1999 i Uppsala. Medelåret för denna förändring låg mellan 1985 och 1991 (95 % konfidens) och medianen var 1990.

Möjliga orsaker

Våra beräkningar av skevhet avslöjade alltså en abrupt förändring i klimatsystemet mellan 1985 och 1991, men vad orsakade den?

Möjliga kandidater som är kända för att ha förändrats under 1900-talet inkluderar:

- Avmattning av havscirkulationen (Rahmstorf m.fl., 2015)
- Minskade utsläpp av sulfatpartiklar i Europa tack vare "renare" fossila bränslen (Acosta Navarro m.fl., 2016)
- Förlust av havsis i Arktiska oceanen (Schweiger m.fl., 2019)

För var och en av dessa möjliga orsaker beräknade vi Spearmans rangkorrelationskoefficient – ett statistiskt mått som visar om två dataserier samvarierar – och jämförde med våra sjutton temperaturserier.

Med denna metod kunde vi utesluta avmatad havscirkulation som orsak. Däremot kunde

Avmattning av havscirkulationen

Ett system av havsströmmar, som tillsammans kallas den Atlantiska meridionala omvälvningscirkulationen (AMOC), omfördelar värme på ett sätt som orsakar uppvärmning i delar av Nordatlanten. Observerad avkylning i Nordatlanten samt direkta mätningar visar att AMOC började sakta ner på 1950-talet, återhämtade sig delvis mellan 2000 och 2010, men sedan dess har saktat ner igen (Rahmstorf m.fl., 2015, Caesar m.fl., 2018).

Minskade utsläpp av sulfatpartiklar i Europa

Utsläppen av sulfatpartiklar har minskat sedan 1980-talet i Europa på grund av "renare" fossila bränslen. Eftersom sulfatpartiklar reflekterar solljus tros minskade utsläpp av sulfatpartiklar minska mängden solljus som reflekteras tillbaka ut i rymden, vilket leder till uppvärmning (Myhre m.fl., 2013).

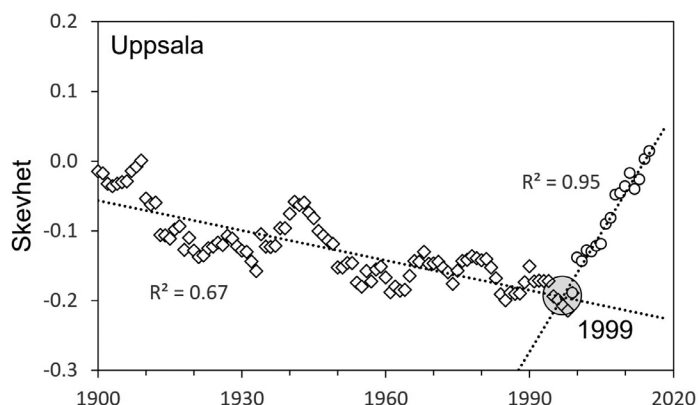
Förlust av havsis i Arktiska oceanen

Historiska observationer (Walsh m.fl., 2019) och modellrekonstruktioner (Schweiger et al., 2019) visar på en snabb förlust av havsis i Arktiska oceanen sedan 1990. Eftersom havsis reflekterar solljus kan förlust av havsis förstärka uppvärmningen, framför allt i Arktis (Dai m.fl., 2019).

Tippningspunkter

Så väl avmattning av AMOC som förlust av havsis i Arktiska oceanen har identifierats som tippningselement i klimatsystemet (Lenton m.fl., 2019).

»...minskade utsläpp av sulfatpartiklar i Europa, och förlust av havsis i Arktiska oceanen kan ligga bakom den plötsliga ökningen av uppvärmningstakten mellan 1985 och 1991, som vi upptäckte genom att analysera skevheten i långa temperaturserier.»



Figur 3. Skevhet i temperaturdata från Uppsala. 1999 framträder en "svans" av varmare år.

vi varken utesluta förlust av havsis i Arktis eller minskade utsläpp av sulfatpartiklar i Europa.

Det förre är logiskt: en avmattning av AMOC skulle snarare kunna ge nedkylning i Europa än uppvärmning. Å andra sidan kan förlust av havsis minska jordens förmåga att reflektera solljus tillbaka ut i rymden ("albedoeffekten"). Detta kan påskynda uppvärmningen, särskilt i Arktis. Och eftersom sulfatpartiklar reflekterar solljus och därmed "gömmar" den globala uppvärmning som orsakas av våra utsläpp av växthusgaser, kan "renare" fossila bränslen, d.v.s. utan partiklar, göra att uppvärmningen inte längre "göms", vilket innebär att vi kan uppleva en snabbare uppvärmning.

Slutsats

I vår studie – *Skewness of Temperature Data Implies an Abrupt Change in the Climate System Between 1985 and 1991* (Skelton m.fl., 2020) – drog vi slutsatsen att en kombination av minskade utsläpp av sulfatpartiklar i Europa (p.g.a. "renare" fossila bränslen), och förlust av havsis i Arktiska oceanen kan ligga bakom den plötsliga ökningen av uppvärmningstakten mellan 1985 och 1991, som vi upptäckte genom att analysera skevheten i långa temperaturserier.



ALASDAIR SKELTON

Professor i geokemi och petrologi vid Stockholms

Referenser

- Acosta Navarro, J. C., Varma, V., Riipinen, I., Seland, Ø., Kirkevåg, A., Struthers, H., Iversen, T., Hansson, H.-C. & Ekman, A. M. L. (2016). Amplification of Arctic warming by past air pollution reductions in Europe. *Nature Geoscience*, 9, 277-282
- Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G. & Saba, V. (2018). Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature*, 556, 191-196
- Dai, A., Luo, D., Song, M. & Liu, J. (2019). Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂. *Nature Communications*, 10, 121
- Guttal, V. & Jayaprakash, C. (2008). Changing skewness: an early warning signal of regime shifts in ecosystems. *Ecology Letters*, 11, 450-460
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al., Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- Lenton, T.M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W. & Schellnhuber, H. J. (2019). Climate tipping points — too risky to bet against. *Nature*, 575, 592-595
- Moberg, A., Bergström, H., Ruiz Krigsman J. & Svanered, O. (2002). Daily air temperature and pressure series for Stockholm (1756-1998). *Climatic Change*, 53, 171-212
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura T. & Zhang, H. (2013) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In T.F. Stocker, D. Qin,
- G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley, (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp 658-740), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- NOAA National Centers for Environmental Information (2020). State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2019. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913>
- Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S. & Schaffernicht, E. J. (2015). Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change*, 475-480
- Schweiger, A.J., Wood, K.R. & Zhang, J. (2019). Arctic Sea Ice Volume Variability over 1901-2010: A Model-Based Reconstruction. *Journal of Climate*, 32, 4731-4752
- Skelton, A., Kirchner, N. & Kockum I. (2020). Skewness of Temperature Data Implies an Abrupt Change in the Climate System Between 1985 and 1991. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089794.
- Sokal, R. R. & Rohlf, F. J. (1995). Biometry. The Principles and Practice of Statistics in Biological Research. Third edition. Freeman, New York, 880 pp.
- Urban, M. C. (2024). Climate Change Extinctions. *Science*, 386, 1123-1128
- Walsh, J. E., Chapman, W. L., Fetterer, F. & Stewart, J. S. (2019). Gridded Monthly Sea Ice Extent and Concentration, 1850 Onward, Version 2. [Sea Ice Area]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center [Accessed: Jan 9, 2020]