

Klimat, is, hav och land

**Hur påverkas havsnivån vid kusterna av
klimatändringar – och hur vet vi det?**



Martin Ekman

Sommarinstitutet för Historisk Geofysik, Åland

Klimat, is, hav och land

Hur påverkas havsnivån vid kusterna av klimatändringar – och hur vet vi det?

Martin Ekman

Innehåll

1. Inledning: Klimatändringar och havsnivån
2. Upptäckten av istiden: Två blockletare, en vaktmästare och jordbanan
3. Effekter av istidens slut: Global havsnivåhöjning och regional landhöjning
4. Upptäckten av människans påverkan på klimatet: Kolet och atmosfären
5. Effekter av människans klimatpåverkan: Global havsnivåhöjning igen
6. Vad vi vet idag: Satelliter, havsnivåhöjning och landhöjning
7. Avslutning: Istid och nutid

© Martin Ekman 2025

Omslagsbild Svalbardsisen 1858

Tryckt av Gävle Offset

Utgiven av Sommarinstitutet för Historisk Geofysik, Åland,
www.historicalgeophysics.ax

1. Inledning: Klimatändringar och havsnivån

Idag är det mycket tal om klimatförändringar, om att klimatet på jorden håller på att bli varmare. Det här sägs få betydande effekter, varav en redan anses ha kommit igång och vara tillräckligt säker: Världshavens nivå har börjat stiga och inkräkta på landområdenas kuster. Huvudorsaken till detta bedöms vara människans verksamhet på jorden.

Man kan även undra över gångna tiders klimatförändringar och havsnivåändringar. För länge sedan hade vi en istid, inte minst här i Norden, som följdes av ett varmare klimat. Detta måste också ha lett till betydande effekter på havets och landets nivå, och inverkat på både våra och andras kuster. Här anses huvudorsaken ha varit påverkan från andra himlakroppar.

Vad vet vi egentligen om orsakerna till dessa klimatförändringar och vad vet vi om deras effekter på havsnivån? Och hur vet vi det – hur har man lyckats lista ut vad som har hänt och vad som händer? Det här är ett försök att förklara vad vi vet genom att berätta hur man har kommit fram till det.

I extrem kortform skulle man kunna sammanfatta vår nuvarande uppfattning om händelsekedjorna så här, se översikt A på nästa sida.

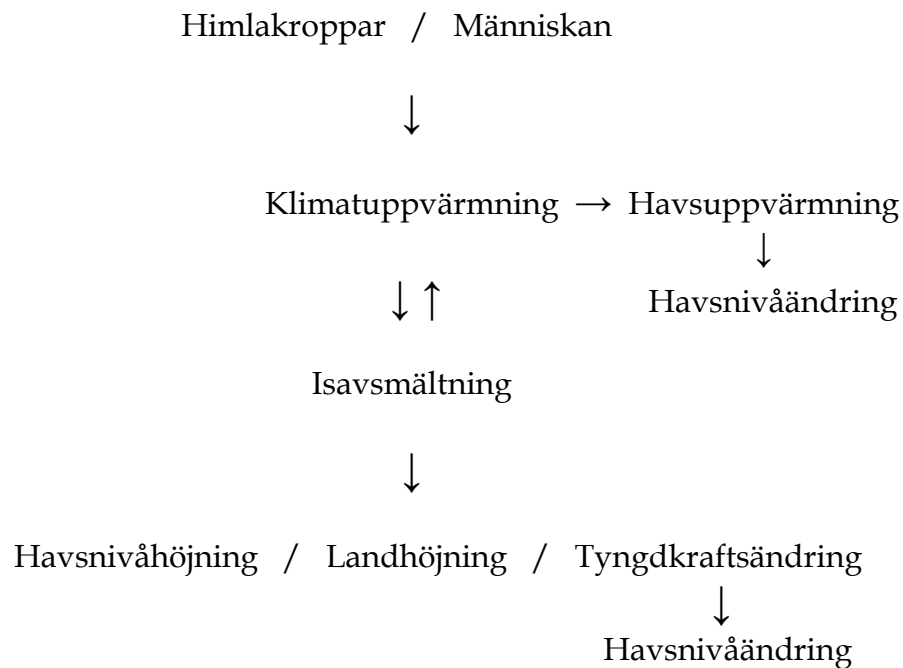
Steg 1: I tidsperspektivet tusentals år och mer påverkar andra himlakroppar i vårt solsystem hur jorden lutar i förhållande till sin bana runt solen. Det orsakar förändringar i klimatet, vid den senaste istidens slut ett varmare klimat. I tidsperspektivet hundratals år och mindre påverkar människans användning av kol och andra fossila bränslen sammansättningen av atmosfären runt jorden. Det orsakar förändringar i klimatet som pågår nu, med ett gradvis varmare klimat.

Steg 2: Ett varmare klimat får fjällglaciärer och inlandsisar på jorden att börja smälta. En sådan isavsmältning blottlägger mark som är mörkare och därför suger åt sig mera solljus, vilket bidrar till en ytterligare uppvärmning och isavsmältning. (Även andra förstärkningsmekanismer kan bidra.)

Steg 3: En isavsmältning leder för det första till en ökad mängd vatten i världshaven. Denna effekt leder till en höjning av havsnivån. Även uppvärmning och utvidgning av havsvattnet bidrar något. En isavsmältning leder för det andra till en avlastning av en tyngd på jordskorpan. Denna effekt leder till en höjning av landet inom isområdet och därför en skenbar sänkning av havsnivån där. En isavsmältning leder för det tredje till en förflyttning av massor och därmed till en ändring av jordens tyngdkraftsfält. Denna effekt påverkar i sin tur havsnivån som hela tiden ställer in sig vinkelrätt mot tyngdkraftens riktning.

Hur kan vi då mäta havsnivån och dess förändringar? Det enklaste är att sätta upp en vattenståndsskala, pegel, vid kusten och avläsa den med jämna mellanrum. En

Översikt A: Händelsekedjor vid klimatförändring, från orsaker till inverkan på havsnivån.



Kommentar: Den havsnivåhöjning som isavsmältningen åstadkommer är omedelbar, medan den landhöjning som isavsmältningen åstadkommer pågår under lång tid efteråt. Den tyngdkraftsändring som isavsmältningen åstadkommer är både direkt och indirekt. Den direkta innebär att en minskad mängd is minskar tyngdkraften i omgivningen och då sänker havsnivån något där. Den indirekta innebär att inströmmande massa under jordskorpan i samband med landhöjning ökar tyngdkraften och då höjer havsnivån något där. (Havsnivåändring kan även omvänt påverka isavsmältning i kustområden där is möter hav.)

smidigare variant är en mareograf som kontinuerligt registrerar vattenståndet. Efter tillräckligt många år kan vi utläsa om havsnivån gradvis förändras och med vilken hastighet. Men då vet vi egentligen inte hur mycket det är havets nivå som ändrats och hur mycket det är landets – vattenståndsstationen sitter ju fästad i landet. Inte heller vet vi riktigt om eventuella förändringar i tyngdkraftsfältet har inverkat. För att förstå det här har man på senare tid tagit hjälp av både satelliter, ismätningar och diverse fysikaliska beräkningar.

Havets nivå och dess kopplingar till klimatet är alltså inte alldeles enkla att förstå sig på. Den här lilla skriften är tänkt att förklara både vad vi vet och varför vi anser oss veta det. Den försöker göra detta genom att kort och koncist berätta hur man har kommit fram till det. Det blir samtidigt ett exempel på hur vetenskaplig forskning kan få oss att förstå mer av hur vår planet fungerar och vår egen roll i sammanhanget.

Vi börjar med istiden med dess effekter på havsnivån både då och nu, och går sedan över till det som är så aktuellt: människans inverkan på klimatet med dess effekter på havsnivån idag. Kunskaper om istidens effekter är användbara för att utforska även människans inverkan på havsnivån.

2. Upptäckten av istiden: Två blockletare, en vaktmästare och jordbanan

När tanken om en forntida istid först dök upp hade den ingenting med förändringar i havsnivån att göra. Den utgick från den is som finns som glaciärer i fjällen. Glaciärerna hade tydligen förmågan att transportera stora flyttblock och bygga upp långa moränvallar när de rörde sig. En tidig glaciärforskare i Norge, Jens Esmark, noterade 1824 att såväl flyttblock som moränvallar gick att finna inte bara uppe i fjällkedjan utan över nästan hela landet. Hans slutsats blev att Norge en gång i tiden måste ha varit täckt av is. En kollega i Sverige, Göran Wahlenberg, kom samtidigt till en liknande slutsats för Sveriges del utgående från flyttblock där. En så drastisk förändring av klimatet och landskapet i Norden måste till att börja med ha tett sig väl fantasifull, åtminstone skulle det dröja innan iden slog igenom.

Ett än mer långtgående perspektiv presenterades något senare vid ett uppmärksammat föredrag i Schweiz. Det hölls 1837 av glaciärforskaren Louis Agassiz. Han hävdade att en stor del av Europa och norra halvklotet hade varit täckt av is under någon period i jordens historia, en istid. Detta var att gå alltför långt för flera av åhörarna – enligt samtida skildringar himlade somliga med ögonen under föredraget.

Två årtionden senare gjorde en tidig polarforskare i Sverige resor till både Svalbard, Island och Grönland för att studera de stora isarna där och deras effekter (figur 1). Det var Otto Torell, som intresserade sig särskilt för de många räfflor i berggrunden som man nyligen funnit i Norden. Genom att jämföra vad han observerade i polartrakterna med observationerna i Norden kunde han visa att hela



Figur 1. Inlandsis tecknad under Svalbardexpeditionen 1858; med hjälp av den kunde man visa att hela Norden varit nedisat och att klimatet ändrats sedan dess.

Norden måste ha varit täckt av en tjock is. Räfflorna i berggrunden hade skapats av ett omfattande och sakta rörligt istäcke. Av isräfflornas riktning kunde han också sluta sig till att isen hade vuxit och rört sig utåt från fjällkedjan åt alla håll.

Man kunde nu tänka sig att saken vore klar, men fullt så enkelt var det inte. Torell publicerade resultaten 1859 i en avhandling på svenska. Det var meningen att den skulle publiceras även i en utbyggd version på franska, men han blev aldrig riktigt nöjd med den, så den kom aldrig att tryckas. Detta kan ha bidragit till att fördröja istidens internationella acceptans.

Om jorden verkligen hade genomgått en istid behövdes också en förklaring till hur en sådan kunde uppkomma. En sådan förklaring kom från ett oväntat håll.

Vid ett tekniskt institut i Skottland hade man anställt en vaktmästare. Som sådan hade han tillgång till institutets bibliotek. Vaktmästaren, James Croll, började studera böcker där som han fann intressanta. Dit hörde särskilt böcker i matematik, fysik och astronomi. Efter flera år av självstudier i biblioteket kombinerade han sina nu gedigna kunskaper i dessa ämnen till en teori för klimatvariationer och istider i jordens historia. När den publicerades 1864 väckte den förvåning eftersom den avancerade författaren var helt okänd för omvärlden. Vaktmästaren blev plötsligt en vetenskaplig kändis!

Crolls teori för uppkomsten av istider byggde på tre egenheter i hur jorden rör sig, alla beroende på störningar i jordens rörelse orsakade av gravitationen från

månen, solen och planeterna. Den första är en variation i jordaxelns riktning, den andra är en variation i jordbanans lutning, och den tredje är en variation i jordbanans form. Dessa variationer har perioder på mellan 20 000 och 100 000 år, beräknade astronomiskt redan tidigare. Tillsammans skulle de enligt Croll påverka klimatet på jorden och ge upphov till återkommande istider. För att istiderna skulle uppkomma krävdes enligt honom även en förstärkningsfaktor, utlöst av klimatets förändring. En sådan kunde vara ökat återkastande av solljus till följd av utökat snö- och istäcke, och även ändrade luft- och havsströmmar.

Croll utvidgade senare detta till en bok med titeln "Climate and Time". Hans grundläggande förklaring till istider har i stort sett visat sig vara riktig, men det kunde man ju inte veta då. Ändå gjorde existensen av en tänkbar förklaring att en istid framstod som mer trovärdig.

Långt senare, 1930, kunde en professionell astronom, Milutin Milankovic i Serbien, vidareutveckla denna teori. Han lyckades beräkna mera konkret när istider hade kommit och gått. Detta har i modern tid fått stöd i observationer med hjälp av borrhälor från havsbotten, där olika tiders avlagringar avslöjar olika klimat.

3. Effekter av istidens slut: Global havsnivåhöjning och regional landhöjning

Även om istiden under andra halvan av 1800-talet blev gradvis accepterad var det inte lätt att koppla ihop den med förändringar i havets nivå. Om stora isar för länge sedan hade smält borde det ha lett till att havsnivån hade stigit. För att visa detta behövde man kunna fastställa att somliga havsbottenar tidigare hade varit torra land, och det var inte så enkelt. Men samtidigt fanns en helt motsatt förändring i havsnivån som man sedan länge hade observerat, dock utan att begripa vad den berodde på. Det var en synbar sänkning av havsnivån längs Sveriges och Finlands kuster. Gamla hamnar blev med tiden obrukbara och kuststäder måste flyttas.

På 1700-talet började man vetenskapligt undersöka det här fenomenet. Det var Anders Celsius vid Uppsala Universitet, astronom och geofysiker (numera mest känd för sin temperaturskala), som intresserade sig för det. Han lyckades med en originell metod bestämma hastigheten hos nivåförändringen. Till sin hjälp hade han ett stort stenblock vid kusten norr om Gävle, vid Iggön. Här fann Celsius från en gammal köpehandling att man hade skjutit sälar på toppen omkring 1563. Då måste medelvattenytan ha legat ungefär på den nivån. Men på Celsius tid var medelvattenytan mycket lägre. Han konstaterar: "Men år 1731 om sommaren, då vatnet var någorlunda vid sin medelmåttiga högd, fanns hafzhorizontal-linean vara 8 fot under, som vatnet således siunkit undan på 168 år." Det motsvarar drygt 1 cm/år i moderna enheter, ett värde av helt rätt storleksordning.

Men hur skulle man veta om det var vattnet som sjönk eller landet som steg? Här gjorde Celsius en framsynt insats som långt senare skulle bidra till en lösning. Han lät hugga in ett särskilt märke för att visa medelvattenytans nivå, i en sälsten ute i Gävlebukten, vid ön Lövgrund. Detta medelvattenmärke består av en horisontell linje med året "1731" ovanför. Han lät göra märket för att kommande generationer skulle kunna bestämma hastigheten med större noggrannhet. Snart följdes hans exempel av andra, och ett par årtionden senare fanns medelvattenmärken på sju olika platser längs kusterna, både på den svenska och finska sidan.

I England väckte det här under nästa århundrade intresse hos geologen Charles Lyell, som 1834 beslöt att resa till Sverige för att studera fenomenet. Han började längst i söder, där han inte lyckades finna något spår av en nivåförändring, och fortsatte norrut mot resans slutmål: Celsius medelvattenmärke. Här fann han att märket nu befann sig nästan 1 meter ovanför medelvattenytan. Dessutom fick han liknande resultat från svenska forskare, som hade gjort uppmätningar av medelvattenmärkena längst i norr. Att hastigheten var så olika för olika ställen längs kusten visade att det inte kunde vara en sänkning av havsnivån utan måste vara en höjning av landet.

Men vad kunde vara orsaken till denna märkliga landhöjning? Det var svårt att förstå, men så småningom dök en ide om en koppling till istiden upp.

Kopplingen mellan istid och landhöjning gjordes av geologen Thomas Jamieson i Skottland 1865. Han tänkte sig att jordskorpan vilade på ett inre av jorden i ett smält tillstånd, och att en kilometertjock inlandsis i såväl Norden som Canada därför fått jordskorpan att sjunka ner i underlaget. Sedan skulle avsmältningen av isen förklara att landet därefter tycktes ha höjts. Landhöjningen skulle alltså vara en effekt av en klimatförändring någon gång för länge sedan!

För att få veta om detta kunde stämma skulle man behöva en bättre kännedom om landhöjningen, och helst få en bild av ett eventuellt mönster i landhöjningens geografiska utbredning. För detta ändamål hade man redan tidigare börjat med dagliga avläsningar av vattenståndet på flera platser längs kusten, men många av dessa fick isproblem under vintrarna. Efter en tid anlade man istället, med början 1887, små specialbyggda hus, mareografer, som innehöll instrument som kontinuerligt registrerade vattenståndet i havet. De fungerade bra, men man måste vänta länge innan de kunde ge tillförlitliga värden på landhöjningens hastighet. (Det skulle senare visa sig att de även kunde berätta om den havsnivåhöjning som vi kommer till längre fram.)

Den svenske geologen Gerard De Geer kom då på en "genväg" för att skapa en bild av landhöjningens utbredning. Man kunde söka efter gångna tiders strandlinjer i naturen och se hur högt dessa nådde på olika platser, den högsta kustlinjen, och därigenom få en bild av hur landet höjt sig sedan istidens slut. Och nu trädde ett mönster fram. Landets höjning var störst i närheten av svenska Bottenhavskusten, mindre åt alla håll utåt därifrån och nästan obefintlig längs Atlantkusten och södra

Östersjökusten. Det högsta värdet noterades i Ångermanland, på Skuleberget, där landet höjt sig bortåt 300 meter sedan isavsmältningen.

Det som var påfallande med detta mönster var att området med landhöjning sammanföll med det centrala området med nedisning under istiden, och att landhöjningen var som störst där isen bedömdes ha varit som tjockast. Dessutom visade sig en antydning till ett liknande mönster i en del av Nordamerika. De Geers slutsats blev 1890 att landhöjningen måste vara en följd av istiden, eller snarare av att klimatet ändrats så att istiden tagit slut. Han lyckades senare även tidsbestämma istiden, åtminstone dess slut, med hjälp av årliga lager av lera som avsatts på havsbotten och sedan lyfts upp ur havet. Isavsmältningen visade sig då ha ägt rum för omkring 10 000 år sedan.

Vad hände då inne i jorden under jordskorpan när den höjdes? En som funderade över detta var den norske polarforskaren Fridtjof Nansen. Han framställde 1921 en bild av hur landhöjningsprocessen sannolikt gick till. När isen belastade jordskorpan sjönk jordskorpan gradvis ner i det trögflytande underlaget (manteln), som då måste ha flutit ut åt sidorna. När isen sedan smälte och avlastade jordskorpan, flöt massan under jordskorpan gradvis tillbaka samtidigt som jordskorpan höjdes.

Stämde verkligen detta – strömmade det in massa under våra fötter i samband med landhöjningen? I så fall borde det påverka tyngdkraften. För att få reda på detta började man i ett nordiskt samarbete 1966 mäta tyngdkraften upprepade gånger, och efter flera årtionden fick man svaret: Jo, det stämde faktiskt – det blir mer och mer massa här.

Vid den här tiden hade även de systematiska vattenståndsobervationerna, som inletts i slutet på 1800-talet och pågått under 1900-talet, givit pålitliga resultat. De visade ett liknande mönster som högsta kustlinjen: Landhöjningen är snabbast vid svenska Bottenhavskusten med nära 1 cm/år eller 1 meter per århundrade och minskar åt alla håll utåt därifrån. De här resultaten har visat sig användbara även vid studiet av den pågående havsnivåhöjningen; mer om det i senare avsnitt.

Hittills hade nästan allt intresse för isavsmältningen vid istidens slut koncentrerats till framväxten av nytt land. Människor i Norden fick kontinuerligt stora nya landområden att ta i bruk, särskilt kring Bottenviken, Bottenhavet och norra Östersjön. Men så gjordes fynd som satte ljuset även på den motsatta effekten av isavsmältningen, det vill säga havsnivåns höjning, ett fenomen som omnämnts redan 1914 av den irländske geologen William Wright.

År 1931 fick nämligen ett brittiskt fiskefartyg i Nordsjön upp en människo-tillverkad spjutspets från havet. Den kunde visas vara tillverkad för omkring 12 000 år sedan, alltså lite före istidens slut. Så småningom gjorde dykare och marinarkeloger flera fynd som pekade på att människor måste ha levt här på det som nu är havsbotten. Människorna kan ha rört sig inom ett rätt stort område, idag kallat Doggerland.

Då människor verkade på det som nu är Nordsjöns botten måste så pass mycket vatten ha varit bundet i inlandsisen att bottnen var torrlagd. Södra delen av Nordsjön har mestadels ett vattendjup på omkring 50 meter. När isen smälte måste detta då ha givit upphov till en allmän höjning av havsnivån på åtminstone 50 meter, under loppet av ungefär 5 000 år. Det motsvarar en havsnivåhöjning på (i medeltal) 1 cm/år eller 1 meter per århundrade.

Fynden på Nordsjöns botten illustrerade alltså en mänsklig verksamhet i Doggerland, som vid istidens slut gradvis översvämmades och dränktes. Över huvud taget måste många människor utanför Norden av havsnivåhöjningen ha tvingats flytta för att överleva. Ur fynd av bland annat fossila skaldjur har man senare visat att den totala höjningen av den globala havsnivån i samband med isavsmältningen måste ha uppgått till drygt 100 meter, under loppet av drygt 10 000 år.

Människor inom Norden däremot räddades av landhöjningen och fick istället se havet gradvis försvinna längre bort. Här har man beräknat att landhöjningen under isavsmältningen uppgått till omkring 400 meter i centrum, följt av de ytterligare 300 meter som ägt rum efter istiden enligt gamla strandlinjer, först med en hastighet på bortåt 10 cm/år eller 10 meter per århundrade och sedan allt långsammare.

Det finns en olikartad tidsaspekt här. Havsnivåhöjningen pågick så länge isen smälte men upphörde sedan. Landhöjningen pågick däremot långt efteråt och pågår alltså än.

Idag ställs vi på nytt inför frågan om en klimatförändring, men denna gång en som människan själv sägs vara ansvarig för. Liksom vid istidens slut kommer en havsnivåhöjning vara den mest omfattande effekten av detta och beröra många människor. Nu är det dags att ge sig in i detta aktuella ämne.

4. Upptäckten av människans påverkan på klimatet: Kolet och atmosfären

I slutet av 1800-talet började en forskare i Uppsala, senare Stockholm, intressera sig för gränsområdet mellan fysik och kemi. Det var Svante Arrhenius, med tiden engagerad i Kungl. Vetenskapsakademien.

År 1896 publicerade Arrhenius en märkligt förutseende uppsats om mängden koldioxid i atmosfären och dess inverkan på klimatet. Han visade att koldioxid i luften bidrar till att hålla kvar värme på jorden så att den inte strålar ut i rymden, det vi idag kallar växthuseffekten.

Vad Arrhenius gjorde var att beräkna hur mycket en viss halt av koldioxid i atmosfären påverkade utstrålningen från områden på olika latituder på jorden. Sedan satte han ihop det hela till en global effekt på jordens temperatur. Han gjorde även

samma beräkningar för andra halter av koldioxid, ett omfattande räknearbete som tog bortåt ett år. Dessa vetenskapliga resultat presenterade han under rubriken (i översättning från tyska) "Beräkning av den temperaturändring som skulle förorsakas av en given ändring av koldioxidhalten". Han påpekade att koldioxidhalten endast uppgick till 0.03 volymprocent av luftens innehåll, men att en ändring av denna till synes obetydliga siffra ändå kunde utöva ett stort inflytande på jordytans temperatur.

När Arrhenius senare gav ut en populärvetenskaplig bok sammanfattar han där kort och begripligt temperatureffekten: "En sänkning af luftens koldioxidmängd till hälften af dess nuvarande värde skulle nedsätta temperaturen med omkring 4 grader, en sänkning till en fjärdedel med bortåt 8 grader. Å andra sidan skulle en fördubbling af luftens koldioxid höja jordytans temperatur med 4, en fyrdubbling skulle höja den med 8 grader." (Han själv använde det då brukliga ordet kolsyra men vi har här ersatt det med dagens koldioxid.)

Sedan gick han ett steg längre och börjar reflektera över människan och hennes verksamhet på jorden: "Luftens koldioxidhalt bör befinna sig i en stark och stadig tillväxt, så länge konsumtionen af fossilt kol, petroleum o.s.v. befinner sig på sin nuvarande höjd, och ännu mer om denna förbrukning såsom nu är fallet hastigt ökas." Redan 1896 förutsade alltså Arrhenius att den ökade användningen av kol via en höjd koldioxidhalt i atmosfären skulle leda till ett varmare klimat på jorden! Hans beräkningar har visat sig vara i stort sett korrekta, men däremot visste han ju inte hur snabbt koldioxidhalten skulle öka med tiden.

Ett halvsekel senare lyckades den svensk-amerikanske meteorologen och oceanografen Carl-Gustaf Rossby intressera kolleger i USA för att börja mäta koldioxidhalten i atmosfären, 1957. Först var detta tänkt att vara ett årslångt projekt, men då engagerade sig den amerikanske geokemisten Charles Keeling i att göra det till en permanent verksamhet. På det sättet skulle man kunna följa koldioxidhaltens utveckling långsiktigt. På berget Mauna Loa på Hawaii lät han inrätta en station där man kontinuerligt kunde mäta koldioxidhalten i luften. Stationen låg alltså mitt ute i Stilla havet och dessutom på en höjd av över 3000 meter. Mätresultaten borde därför vara representativa och inte beroende av lokala störningar.

Redan efter en handfull år visade sig en märkbar ökning av halten av koldioxid i atmosfären. Arrhenius hade tidigare funnit att halten var 0.03% eller omkring 300 milliondelar. När mätserien började var halten en bit över 300 milliondelar, men den ökade sedan oupphörligt med 1 milliondel per år. Efter tre årtionden hade den nått 350 milliondelar.

Att se om det här resulterade i en ökad global temperatur var till en början inte alldeles lätt eftersom temperaturen påverkas av så mycket på olika platser på jorden. Vad man kanske skulle kunna se bättre var om en eventuell temperaturökning resulterade i en avsmältning av isarna på jorden och en därav följande höjning av havsnivån.

5. Effekter av människans klimatpåverkan: Global havsnivåhöjning igen

Den stora glaciären Vatnajökull på Island visade in på 1900-talet tydliga tecken på att minska i storlek. Glaciärforskaren Sigurður Thorarinsson där började studera detta närmare och fann att den hade minskat sedan omkring 1890. Detta stämde överens med liknande studier av andra glaciärer i världen (figur 2). Han samlade nu in data om krympningen av glaciärer från olika håll i världen. Ur det kunde han 1940 uppskatta den totala förlusten av mängden is på jorden, och sedan omvandla detta till en motsvarande höjning av vattennivån i världshaven. Hans resultat blev $\frac{1}{2}$ mm/år för den ungefärliga perioden 1890 – 1940.



Figur 2. Liten glaciär i en dalgång vid Tarfalasjön i Kebnekaisefjällen i början av 2000-talet. Samma glaciär fyllde i början av 1900-talet upp hela dalgången; sedan dess har nästan hela glaciären smält.

Samtidigt arbetade också den amerikanske geofysikern Beno Gutenberg på frågan om havsnivåns eventuella höjning, men från en annan utgångspunkt. Havsnivåns förändring kunde uppskattas ur vattenstånd från 1900-talets första decennier vid mareografer över hela världen. Medelvärdet av alla blev en höjning av

havsnivån på 1 mm/år, men med stor osäkerhet på grund av spridning i värdena från de olika stationerna. (De i Östersjön uteslöts på grund av landhöjningen där.)

Längre fram, på 1980-talet, gjordes förnyade undersökningar som stödde resultaten ovan. Dessutom hävdade den amerikanska klimatforskaren Vivien Gornitz med kolleger 1982 att en varmare atmosfär borde värma upp det översta lagret av havsvattnet, som därför borde expandera och därmed bidra till en höjning av havsnivån. Hennes beräkningar visade att detta bidrag kunde vara $\frac{1}{2}$ mm/år, vilket tillsammans med bidraget från isavsmältningen skulle stämma hyfsat överens med det fortfarande något osäkra medelvärde från mareograferna. En pågående havsnivåhöjning verkade alltmer trolig.

Nu yppade sig också en möjlighet att undersöka havsnivåns beteende på ytterligare ett sätt. Det fanns nämligen några få mycket långa serier av observationer av vattenståndet i havet. Den längsta tillförlitliga havsvattenstånds-serien i världen är från Stockholm, med början redan 1774. Ursprungligen noterades vattenstånden här på ömse sidor om Stockholms sluss för att man behövde hålla reda på skillnaden i vattenstånd mellan Mälaren och Östersjön. Sedan 1889 finns en mareograf i närheten, på Skeppsholmen, som kontinuerligt registrerar vattenståndet på Östersjösidan.

Den här långa serien av havsvattenstånd gjorde det möjligt att både studera landhöjningen och havsnivåhöjningen; se figur 3 i nästa avsnitt. För 1700- och 1800-talen visade sig en nedåtgående trend i vattenstånden på 5 mm/år, som borde återspegla landhöjningen där. För 1900-talet visade sig en svagare nedåtgående trend på 4 mm/år. Eftersom landhöjningen inte kunde ha ändrats så mycket på så kort tid borde detta bero på en förändring av själva havsnivån: Den måste ha höjt sig med 1 mm/år under 1900-talet, eller åtminstone 1 mm/år mer än under tidigare århundraden. Nu fanns alltså ännu ett belägg för en pågående havsnivåhöjning. Och denna havsnivåhöjning verkade vara samtida med såväl avsmältningen av glaciärerna som den ökade koldioxidhalten i atmosfären; vi återkommer till detta.

I slutet av 1900-talet kom så en helt ny metod som, tillsammans med allt som gjorts hittills, fick stor betydelse för forskningen om havsnivån. Det var satelliterna. De visade sig kunna användas för att mäta förändringar både i havets nivå och i landets, och dessutom i mängden inlandsis.

6. Vad vi vet idag: Satelliter, havsnivåhöjning och landhöjning

Från början av 1990-talet fick man möjligheter att utnyttja satelliter för att bestämma förändringar av såväl havsytans nivå som landytans nivå. När det gäller havsytans nivå kan man mäta den med en sorts radar från satelliterna, satellitaltimetri. När det gäller landytans nivå kan man mäta den med GPS (GNSS) som ger en positionsbestämning i tre dimensioner. Dessutom kan satelliterna användas för att uppskatta förändringar av inlandsisarnas volym.

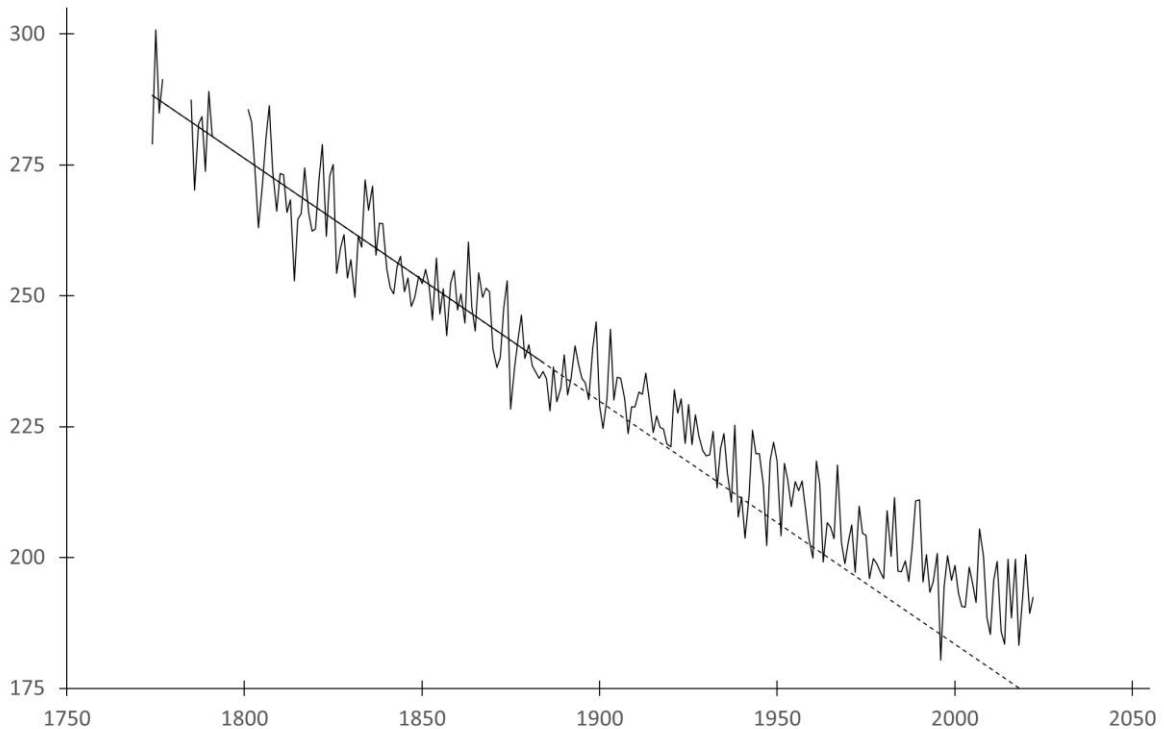
Vi börjar med vad GPS-satelliterna har lärt oss. Sedan 1993 finns ett antal fasta referensstationer för satellitpositionering med GPS. På dessa permanenta stationer har man bestämt positionen, inklusive en höjd, kontinuerligt sedan dess. Det gör alltså att vi nu kan beräkna landhöjningen med hjälp av dem. Samtidigt har vi som tidigare nämnts kunnat beräkna landhöjningen med hjälp av mareograferna längs våra kuster, och de har varit igång sedan slutet av 1800-talet. Det är jämförelsen mellan de här två metoderna som visar sig användbar. Satelliterna ger nämligen landets verkliga höjning (absoluta landhöjningen), medan mareograferna ger landets skenbara höjning, det vill säga höjningen i förhållande till havsytan (apparenta landhöjningen).

För att få noggranna värden på landhöjningen från mareograferna behövs bortåt hundra år av registreringar, så dessa ger oss landhöjningen i förhållande till havsytan under 1900-talet. För att få säkra värden på landhöjningen från GPS-satelliterna behövs inte så lång tid så de år vi har räcker bra. Om man nu jämför de två metoderna visar det sig att mareograferna ger landhöjningsvärden som genomgående är drygt 1 mm/år mindre än de från satelliterna. Varför? Jo, havsytan måste ha höjts med drygt 1 mm/år under 1900-talet och därigenom dolt en del av den synliga landhöjningen vid kusten.

Vi bör här inskjuta att landhöjningen som tidigare nämnts innebär att massa strömmar in under jordskorpan vilket påverkar tyngdkraften, och att detta i sin tur påverkar havsytan. Det leder till att havsytan höjs med upp till $\frac{1}{2}$ mm/år, ett belopp som kan man beräkna på teoretisk väg. Denna effekt har vi tagit hänsyn till här och vi fördjupar oss inte mer i den.

Det finns en annan möjlighet att beräkna den verkliga landhöjningen och därigenom kontrollera resultaten från satelliterna. Ur de samlade iakttagelserna av gamla strandlinjer och annat ända sedan istiden kan man bedöma hur trögflytande eller segt materialet under jordskorpan är. Utifrån detta kan man beräkna vilken hastighet den verkliga landhöjningen bör ha idag. Resultaten från denna geofysiska modellberäkning stämmer bra överens med dem som man får från satelliterna och bekräftar därmed det vi sagt om havsnivåns höjning ovan.

Ytterligare lärdomar från satelliterna får vi om vi återvänder till den världslånga serien av havsvattenstånd från Stockholm. Det visar sig att satelliterna (liksom den geofysiska modellen) ger en verklig landhöjning i Stockholm på 5 mm/år. Vattenstånden visade enligt förra avsnittet en skenbar landhöjning på just 5 mm/år för 1700- och 1800-talen, men bara 4 mm/år för 1900-talet; se figur 3. Det betyder alltså en höjning av havsytan under 1900-talet på 1 mm/år, men vi kan dra en slutsats till: Under 1700- och 1800-talen fanns det tydligen ingen höjning av havsytan – då tycks den ha varit stabil. Havsnivåhöjningen tycks alltså ha börjat i slutet av 1800-talet. Detta styrks också av en äldre serie från Amsterdam med början 1700 men som inte är igång längre.



Figur 3. Havsvattenståndet i Stockholm (cm) under 250 år, 1774 – 2023. Den lutande räta linjen motsvarar landhöjningen utan havsnivåhöjning under 1700- och 1800-talen. Vattenståndet under 1900-talet ligger systematiskt allt högre än linjen, visande på en begynnande havsnivåhöjning, som sedan syns accelerera under 2000-talet. Diagrammet illustrerar alltså både effekten av istidens upphörande och av den nutida klimatförändringen. (De årliga oregelbundenheterna återspeglar inflytande av långvariga vindar.)

Det finns även iakttagelser av storleken på flera fjällglaciärer från tidigare århundraden som är av betydelse här. De visar att glaciärerna var tämligen konstanta under 1700- och 1800-talen. Avsmältningen tycks ha börjat i slutet av 1800-talet. Detta är i god överensstämmelse med slutsatserna från havsvattenstånden ovan.

Tittar vi nu på vattenståndsserien i figur 3 igen ser vi att den skenbara landhöjningen under de senaste årtiondena tycks gå allt långsammare. Detta återspeglar en viktig sak till: Havsnivåhöjningen tycks gå allt snabbare. Den avtagande trenden i de sjunkande vattenstånden under de senaste årtiondena tyder på en havsnivåhöjning på 2 – 3 mm/år, ett något osäkert värde men hur som helst märkbart snabbare än tidigare.

Men vi behöver få ett bättre grepp om havsnivåhöjningen de senaste decennierna. Här har vi nu nytta av de satelliter som sedan 1993 använder satellitaltimetri, alltså mäter havsytans nivå med en sorts radar. Även den metoden innehåller osäkerheter men har fördelen att den kan användas över jordens havsytan som helhet. I medeltal över haven visar sig då en havsnivåhöjning de senaste årtiondena på 3 mm/år. Stockholmsserien stämmer ganska bra överens med detta; vi återkommer till en tänkbar skillnad lite längre fram.

Sedan 2002 finns även satelliter specialiserade på att registrera förändringar i tyngdkraftsfältet och därigenom förändringar hos de stora inlandsisarna på Grönland och Antarktis. De visar att numera smälter inte bara fjällglaciärerna utan även särskilt Grönlandsisen. När det stora och tjocka istäcket börjar smälta och omvandlas till vatten försvinner massa från Grönland och fördelas ut på världshaven. Denna omfördelning av massa påverkar tyngdkraften och därmed satelliternas rörelse. Därför går det att mäta isens avsmältning med hjälp av tyngdkraftssatelliterna. De senaste årtiondenas avsmältning av Grönlandsisen motsvarar en global höjning av havsnivån med 1 mm/år. Glaciärerna bidrar också med bortåt 1 mm/år. Värmeutvidgningen av havsvattnet bidrar med ytterligare omkring 1 mm/år. Antarktis avsmältning är än så länge ganska liten och bidrar med mindre än $\frac{1}{2}$ mm/år. Tillsammans blir detta omkring 3 mm/år. Det stämmer rimligt överens med resultatet ovan, helt inom osäkerheten i värdena.

Hur har då den av människan ökade koldioxidhalten i atmosfären utvecklats under denna tid? Vi konstaterade tidigare att den vid mätningarnas början i mitten av 1900-talet var drygt 300 milliondelar men hade ökat till 350 milliondelar i slutet av seklet. Sedan dess har koldioxidhalten passerat 400 milliondelar ett årtionde in på 2000-talet. Den ökar nu med 2 milliondelar per år. Av allt att döma är detta huvudorsaken till den klimatuppvärmning som åstadkommer den isavsmältning och havsnivåhöjning vi kunnat iaktta. Förändringar i solstrålningen kan spela en liten roll, liksom vulkanisk aktivitet, men dessa är otillräckliga som förklaringar.

Man har också kunnat fastställa koldioxidhalten längre tillbaka i tiden genom att analysera gamla luftbubblor inneslutna i islager på Grönland och Antarktis. Det visar sig då att koldioxidhalten legat konstant på knappt 300 milliondelar under mycket lång tid och börjat stiga först mot slutet av 1800-talet. Även detta passar ihop med vad vi funnit om isavsmältningen och havsnivåhöjningen ovan.

Vi kan nu sammanfatta våra nuvarande kunskaper på följande sätt, se översikt B på nästa sida:

Under både 1700-talen och 1800-talen var koldioxidhalten i atmosfären stabil, isarna på jorden var stabila och den globala havsnivån var stabil. Under 1900-talet blev koldioxidhalten 10 – 30 % högre, fjällglaciärerna började smälta och havsnivån höjdes med 1 mm/år. Under det innevarande 2000-talet är koldioxidhalten över 40 % högre, inte bara fjällglaciärerna utan även Grönlandsisen smälter och havsnivån höjs med 3 mm/år eller mer.

Översikt B: Koldioxidhalt, isavsmältning och havsnivåhöjning från 1700-talet till 2000-talet.

Århundrade	Koldioxid-halt över normal (%)	Isav-smältning	Havsnivå-höjning (mm/år)
1700-talet	0	0	0
1800-talet	0	0	0
1900-talet	10 - 30	F	1
2000-talet	≥ 40	F+G	≥ 3

Kommentar: Normal koldioxidhalt i luften har under gångna tider varit knappt 300 milliondelar och siffrorna anger hur halten ökat procentuellt över denna nivå. Under isavsmältning anger F fjällglaciärer och G Grönlandsisen. Havsnivåhöjningen avser ett globalt medelvärde; regionala skillnader åstadkoms av tyngdkraftsfältets ändring och havets uppvärmning.

7. Avslutning: Istid och nutid

För att få lite perspektiv på vad som händer i nutiden kan vi jämföra det med vad som hände i slutet av istiden, se översikt C på nästa sida:

Vid istidens slut höjdes den globala havsnivån (enligt avsnitt 3) med 10 mm/år samtidigt som den maximala landhöjningen i Norden var omkring 90 mm/år. Under den långa tiden mellan istiden och nutiden var havsnivån däremot i stort sett stabil samtidigt som landhöjningen fortgick med avtagande hastighet. I nutiden höjs åter havsnivån, nu på grund av människan med 3 mm/år eller mer, samtidigt som landhöjningen efter istiden fortgår med som mest 10 mm/år.

Vad händer då med havsnivån under den närmaste framtiden? Sedan 1990 ger FN:s klimatpanel, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ut omfattande rapporter där man sammanställer och bedömer det internationella vetenskapliga läget när det gäller klimatförändringar. Enligt deras senaste specialrapport om is och hav kommer havsnivån under det närmaste halvsekle att stiga med omkring 4 mm/år, längre fram ännu mer om inte klimatåtgärder vidtas. Ett ökat bidrag till detta väntas komma från inlandsisarna på Grönland och Västantarktis. På sikt kommer dessa isars avsmältning också leda till en viss landhöjning där.

Den höjning av havsnivån som smältvattnet från Grönlandsisen orsakar motverkas här i Östersjön av en sänkning av havsnivån till följd av minskande tyngdkraft från den krympande Grönlandsisen. Totalt väntas därför havsnivån i Östersjön stiga med omkring 3 mm/år snarare än de nyssnämnda 4. En avsmältning av en del av Antarktis is höjer däremot Östersjön utan dämpande tyngdkraftseffekt eftersom Antarktis är för långt bort för att tyngdkraften därifrån skall spela någon roll.

Befolkningen vid en del av världens kuster kommer så småningom ohjälpligt att beröras av havsnivåns höjning. Havsnivåhöjningen vid slutet av istiden tvingade människorna att överge bland annat Doggerland. Havsnivåhöjningen i nuvarande tid kommer på motsvarande sätt att skapa växande problem för människorna i vissa av de lägst liggande kustområdena.

Till sist två avslutande perspektiv på vad som händer:

1. Som läget ser ut nu tycks människan åstadkomma en global höjning av havsnivån med en hastighet som är nära hälften av den som himlakropparna åstadkom vid slutet på istiden.

2. Samtidigt lyfter landhöjningen efter istiden här i Norden fortfarande upp oss ur havet, i de centrala delarna snabbare än havsytan höjs på grund av människan.

Vi lever i en speciell tid på en märklig plats på jorden.

Översikt C: Havsnivåhöjning och maximal landhöjning vid istidsslutet, mellantid och nutiden.

Tids-period	Havsnivå-höjning (mm/år)	Max. land-höjning (mm/år)
Istidsslutet	10	90
Mitttemellan	0	30
Nutiden	≥ 3	10

Kommentar: Havsnivåhöjningen har under större delen av tiden mellan istidsslutet och nutiden varit omkring 0. Landhöjningen har efter istiden avtagit exponentiellt.

Om innehållet

Innehållet i denna skrift bygger huvudsakligen på originalarbetena nämnda i texten samt på rapporter från IPCC; se även böcker av författaren (tillgängliga på www.historicalgeophysics.ax). Diagrammet över havsvattenståndsserien är från en artikel av författaren i Polarfront (nummer 188).