

ÅRSTIDSVARIATIONER I SJÖAR VID KLIMATFÖRÄNDRINGAR

SEASONAL VARIATIONS IN LAKES IN NORTHERN SWEDEN IN A CHANGING CLIMATE

Nils G.A. Ekelund¹, Jennie Sandström²



¹*Institutionen för Naturvetenskap, Matematik och Samhälle, Malmö universitet, 205 06 Malmö.*

e-post: nils.ekelund@mau.se

²*Avdelningen för Naturvetenskap, Mittuniversitetet, 851 70 Sundsvall. e-post: jennie.sandstrom@miun.se*

Abstract

Lakes are suitable sentinels of climate change because they constitute a well defined ecosystem and they respond quickly to changes in climate. Many lakes in the northern hemisphere are covered by ice during winter and they are dimictic, which means that the water circulate two times each year. The ice not only prevents gas exchanges or wind mixing, the ice, together with snow, are also a large obstacles that shortens the growing period for all the producers in the lake by reducing light penetration. Spring bloom of phytoplankton along with onset of stratification might occur earlier in the season if the ice breaks up earlier. Climate warming will lead to higher temperatures and it will alter the mixing conditions as well as affect thermal stratification in lakes. All the lakes included in this study are situated in the southern parts of the region Norrland in Sweden. The average ice break-up between 2001–2010 occurs about 12 days earlier compared to the average ice break-up for the period 1916–1925 and 11 days earlier compared to 1976–1985. The mean annual air temperature in Junsele shows a trend in which the air temperature is getting warmer with time. Higher air temperature shows a correlation with changes in ice phenology, where the lakes experience a shortened ice cover duration.

Key Words – climate change, lakes, phenology, temperature, thermal stratification, warming

Sammanfattning

Ekosystem bestående av sjöar och vattenområden är viktiga och känsliga indikatorer på klimatförändringar eftersom de svarar relativt snabbt på förändringar i klimatet. Många sjöar på norra halvklotet täcks av is under vintern och de är dimiktiska, vilket innebär att vattnet cirkulerar två gånger varje år. Isen förhindrar inte bara gasutbyte eller vindblandning utan isen tillsammans med snö, är också ett stort hinder som förkortar odlingsperioden för alla producenter i sjön genom att minska ljusinsläppet. Vårblomningen av växtplankton tillsammans med den termiska skiktningen som sker under den lugnare sommarperioden kan förekomma tidigare på säsongen om isen bryts upp tidigare. Klimatuppvärmning kommer att leda till högre temperaturer och det kommer att förändra blandningsförhållandena såväl som den termiska skiktningen i sjöar. Samtliga sjöar som ingår i denna studie ligger i de södra delarna av Norrland i Sverige. Den

genomsnittliga islossningen mellan 2001–2010 sker ungefär 12 dagar tidigare jämfört med den genomsnittliga islossningen mellan 1916–1925 och 11 dagar tidigare än för perioden 1976–1985. Den genomsnittliga årliga lufttemperaturen i Junsele uppvisar en trend där lufttemperaturen blir varmare med tiden. Högre lufttemperatur visar en god korrelation med förändringar i islossning, där sjöarna upplever en kortare tid med lager av is och snö.

Inledning

Under hösten 2018 publicerade IPPC en rapport gällande de klimatförändringar som pågår och där slår man fast att det till stor del beror på mänsklig påverkan (IPCC, 2018). Data från rapporten visar att den globala medeltemperaturen ökat med 0,85 °C mellan åren 1880 och 2012. Temperaturökningen har redan påverkat ett flertal regioner i världen, vilket har resulterat i form av olika extrema väderhändelser såsom torka, höjning av havsnivå och översvämningar. I förlängningen kan eventuellt extrema väderhändelser även orsaka förlust av biodiversitet. Dessa väderhändelser har i sin tur orsakat stora risker för sårbara mänskliga populationer i världen. När det sker så stora klimatförändringar som nu beskrivits så påverkar det även naturens, djurens och växternas återkommande tidsmönster (fenologi). Exempel på detta är bland annat trädens lövsprickning, fågelflyttningar och växtplanktonblomningar i sjöar och hav. Vid nordliga breddgrader (mellan 30°N och 72°N) så har denna tidsförskjutning under de senaste årtionden förflyttats ca 3 dagar per årtionde. Förändringarna sker framförallt snabbare i Arktiska områden i samband med större lokala värmeförändringar (Overland m.fl. 2013). Detta har inneburit att många växt- och djurarter förflyttat sig i förhållande till ett varmare klimat, vilket inneburit att de vandrat norrut ungefär 17 km per årtionde och att de förflyttat sig uppåt 11 m över havet per årtionde. Även marina organismer förflyttar sig till andra havsområden, men här är orsaken att de lämnar varmare områden för att istället nå mer kalla områden. När det gäller temperatureffekter på olika vattenområden i världen så visar data att havstemperaturen ökat med 0,05–0,11 °C per årtionde mellan åren

1950–2016. Samtidigt så har arealen av isarna i Arktis under månaden september minskat med ca 130 000 km² per år mellan åren 1997–2014. Även tjockleken av isen har minskat med mer än 50 % i de centrala områdena av Arktis (IPCC, 2018).

Sjöar

Trots att sjöar endast täcker en mindre del (3 %) av jordens yta, så har det visat sig att de är av stor betydelse, inte minst för, att de reagerar snabbt på klimatförändringar (Williamson m.fl., 2009). För sjöar på de norra delarna av jorden så innefattar deras årscykel en längre period med ett lager av is och snö. Emellertid så har ett flertal studier under de senaste årtionden visat att perioden för is minskat drastiskt, vilket med stor sannolikhet hänger ihop med en ökad temperatur. Många faktorer spelar däremot in för tidpunkten för islossningen i sjöar och av dessa är förutom lufttemperaturen även nederbörd, vindförhållanden, geografisk plats (höjd över havet, breddgrad och omgivande landskapsförhållanden) och morfologiska förhållanden, såsom storlek och djup, av stor betydelse. Formationen av is initieras vid det ögonblick när värmeförlusten från sjöytan överskrider den värme som solstrålningen och konvektionen ger (Smejkalova m.fl., 2016). Sjöarnas volym avgör dessutom vilken kapacitet sjöarna har att lagra värme och blir därför det som bestämmer när processen att bilda is startar. Större och djupare sjöar har oftast en längre period utan istäcke än mindre och grundare sjöar vid samma breddgrad och höjd över havet. Issmältningen beror till mindre del av sjöarnas morfologi utan är till större delen beroende av lokala väderförhållanden och temperatur, men även av volymen av vatteninflödet in till sjöarna. Omfattningen av dessa ingående variabler blir i sin tur avgörande för sjöarnas fenologi.

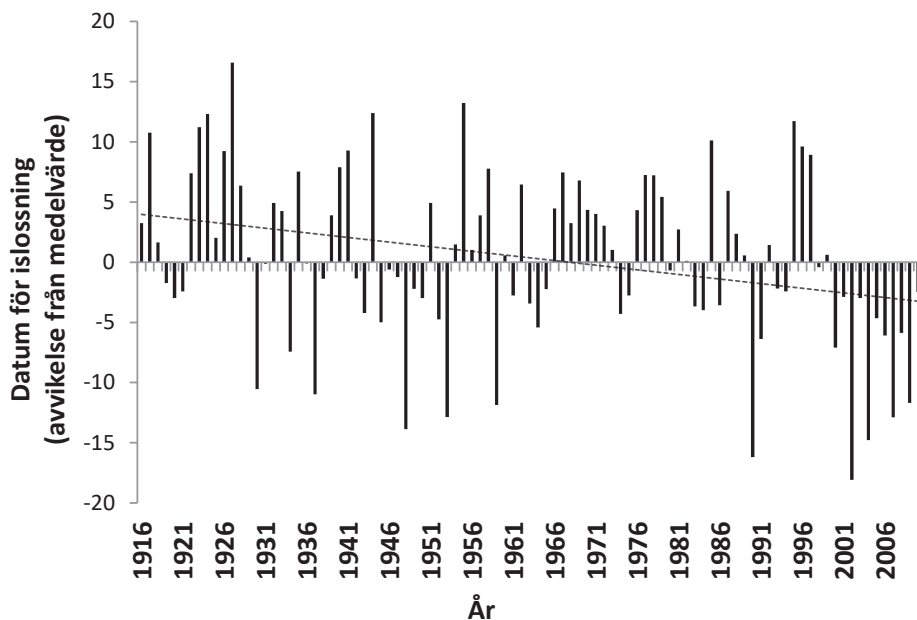
De flesta sjöar på norra halvklotet som täcks av is under vintern är dimiktiska, vilket innebär att vattnet cirkulerar två gånger varje år. Isen förhindrar inte bara gasutbyte eller vindblandning utan isen tillsammans med snö är också ett stort hinder som förkortar tillväxten för alla producenter i sjön genom att minska ljusinsläppet. Tillväxten för växtplankton i sjöar startar så snart isen har försvunnit,

ibland redan innan om snön har försvunnit, och då startar även vårcirkulationen av vattnet. Under vårcirkulationen blir näring från sjöns botten tillgänglig i den övre vattenmassan och till följd av detta sker ofta en så kallad växtplanktonblomning. Efter vårcirkulationen så övergår vattenmassan till en lugnare fas under sommaren då en stagnation av vattnet äger rum. Detta innebär att det blir en skiktning (stratifiering) av vattenmassan i en övre del (epilimnion) och en undre del (hypolimnion). Efter sommaren bryts skiktningen beroende på att vattentemperaturen utjämnas och på tilltagande höstvindar och då sker ytterligare en cirkulation av vattnet, då kallad höstcirkulation. Den första "blomningen" av växtplankton tillsammans med starten på skiktningen sker tidigare på säsongen om isen bryts upp tidigare (Weyhenmeyer m.fl., 1999, Winder and Schindler, 2004). Weyhenmeyer m.fl. (1999) fann i sina studier att vårblomningen inträffade ungefär 30 dagar tidigare i slutet av 1990-talet jämfört med mitten av 1950-talet. Andra studier indikerar också att tidigare vårblomningar kan förutses i ett framtida förändrat klimat. Tillväxten

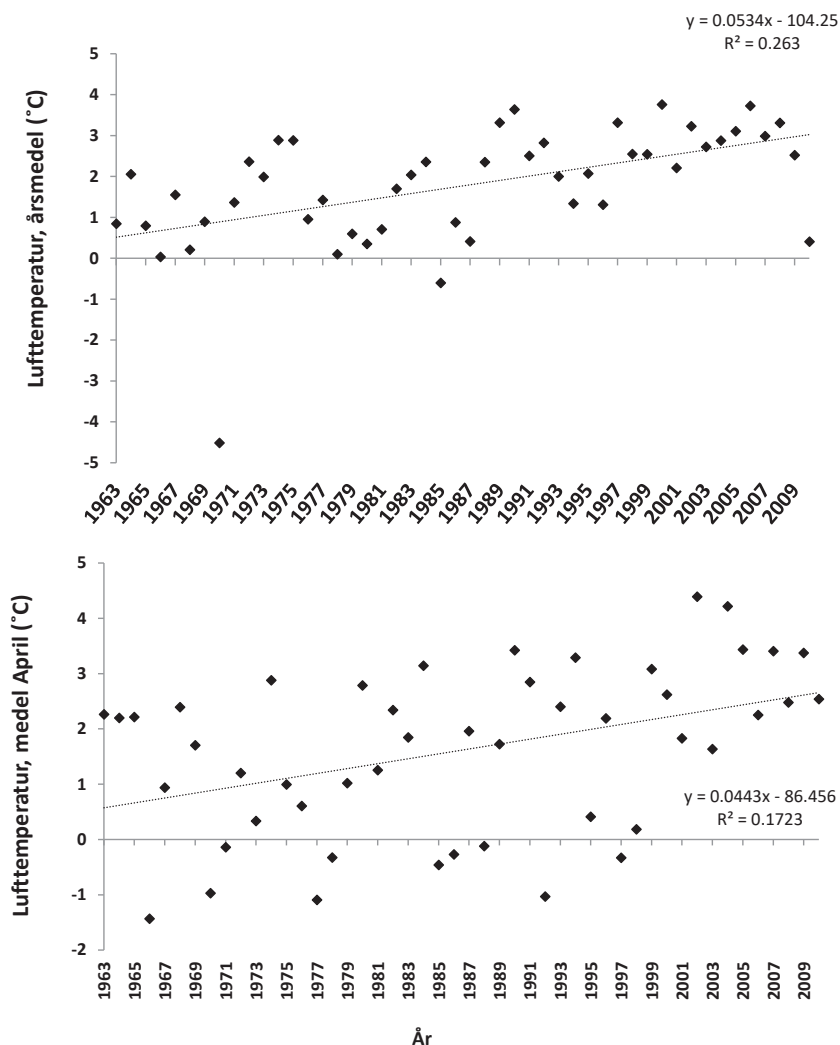
av växtplankton påverkas inte uteslutande av ljus utan regleras också av många andra faktorer, t.ex. näringsämnena, främst fosfor och kväve och vattentemperatur (Reynolds, 2006). Varma perioder har visat sig generera högre fosfat- och klorofyll nivåer eftersom en varmare lufttemperatur kan öka djupet av epilimnionen och som i sin tur kan göra transporter av näringsämnen från hypolimnionen till epilimnionen lättare, åtminstone i sjöar vilka inte är så djupa (Pettersson m.fl., 2003).

Islossning och lufttemperatur

I denna studie redovisas uppgifter om islossningsdatum mottagna från Meteorologiska och hydrologiska institutet (SMHI) för sjöar som ingår i övervakningsprogram som ligger i södra delarna av Norrland i Sverige. Tidsseriernas längd varierar men sjöarna med de längsta tidsserierna startade 1916 och det fanns 10 sjöar med data från 1916 och fram till 2013 då studierna utfördes. Dessa 10 sjöar användes för att studera den långsiktiga trenden i islossning genom att beräkna det genomsnittliga islossningsdatumet. Samma sjöar och ett



Figur 1. Islossningsdata från 10 sjöar i Norrland i Sverige under 1916–2010. Positiva värden representerar sena islossningsdatum och negativa värden motsvarar tidiga islossningsdatum.



Figur 2. Årlig medel lufttemperatur (övre figur) och medel lufttemperatur i april i Junsele (nedre figur) mellan åren 1963–2010.

tilllägg av 11 ytterligare sjöar (totalt 21) användes i en tidsserie som löper mellan 1976–2010 och det genomsnittliga islossningsdatumet beräknades. Lufttemperaturdata erhöles från SMHIs väderstationen i Junsele (GPS-koordinater i RT90, 706568- 155356), som valdes eftersom denna station ligger i närheten av flera av sjöarna. Alla tillgängliga lufttemperaturdata (mellan 1963–2010) från Junsele användes för att se om det fanns någon korrelation mellan vårluftens temperatur och islossningsdatum. Den årliga genomsnittstemperaturen beräknades tillsammans med den genomsnittliga lufttemperaturen i april. Islossningen i sjö-

arna mellan 1916–2010 visar på en nedåtgående trend, vilket indikerar på en allt tidigare islossning (Figur 1). Perioden mellan 2001–2010 visar en ovanligt tidig islossning och den genomsnittliga islossningen mellan 2001–2010 sker ungefär 12 dagar tidigare jämfört med den genomsnittliga islossningen mellan 1916–1925. Även den genomsnittliga årliga lufttemperaturen i Junsele visar en trend där lufttemperaturen blir varmare med tiden (Figur 2). Tioårsperioden (2001–2010) visar på en genomsnittlig årstemperatur på 2,7 °C och dessa år visar en varmare genomsnittstemperatur trots att år 2010 hade en ovanligt kall vinter och

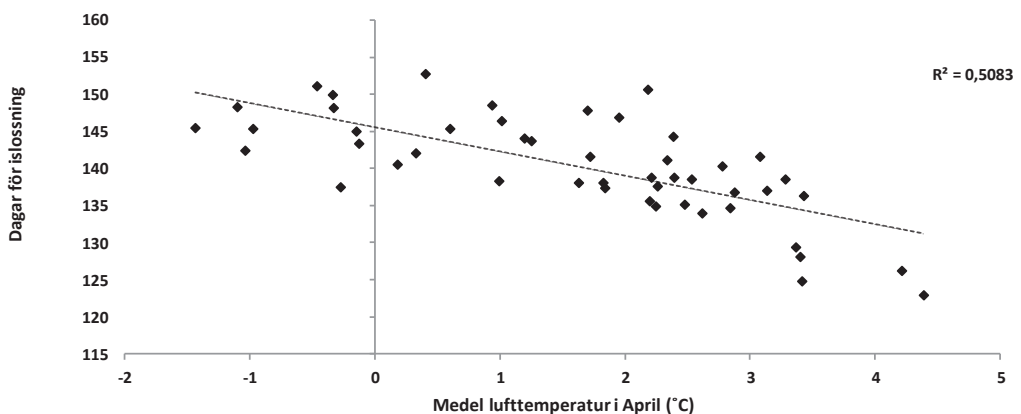
låg årstemperatur (0,4 °C). Korrelationen mellan islossningsdatum och den genomsnittliga lufttemperaturen i april är god ($R^2 = 0,5083$) och den högsta genomsnittliga lufttemperaturen på 4,4 °C i april 2002 motsvarar det tidigaste isbrytningsdatumet, som inträffade dag 124 (4 maj) samma år (Figur 3). Den kallaste lufttemperaturen i april motsvarar inte direkt det senaste islossningsdatumet, men flera kalla temperaturer i april har sena islossningsdatum (t ex år 1977, 1978, 1985 och 1997). Det finns flera andra studier som visat att islossningsdatum påverkas av lufttemperaturen på våren (Benson m.fl., 2012, Livingstone, 1997, Ghanbari, 2009).

Varmare klimat

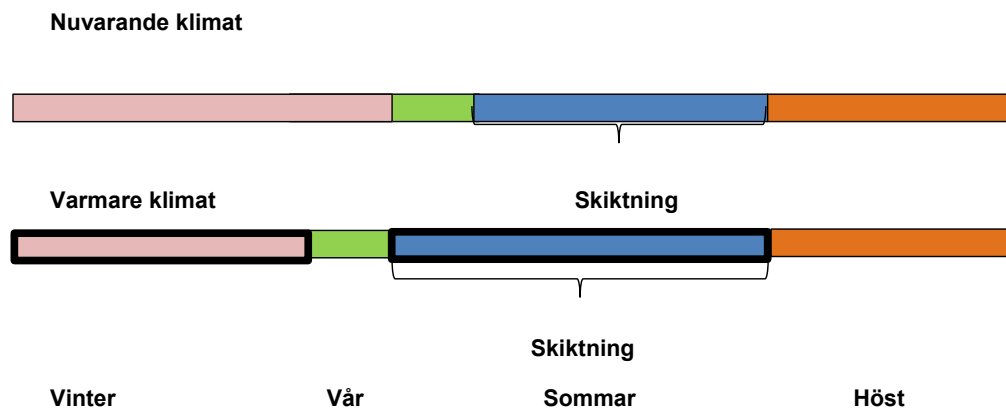
Klimatuppvärmningen som just nu pågår kommer att leda till högre temperaturer och målet för jordens befolkning är enligt IPCC att begränsa jordens medeltemperaturökning till 1,5 °C till år 2040 (IPCC, 2018). Denna temperaturökning kommer med stor sannolikhet att förändra cirkulationen av vattenmassorna i både sjöar och hav samt även påverka den termiska skiktningen i sjöar (Livingstone, 2003). Tidpunkten för dessa händelser kommer att förskjutas och till följd av varmare temperaturer så kommer detta att leda till en förstärkt termisk skiktning som också kommer att vara

längre under sommarperioden (Figur 4, Blenckner m.fl. 2002). Det är framförallt yttemperaturerna i sjöarna där effekterna är som mest synliga av klimatiförändringarna, men i nuläget så vet vi inte lika mycket av vad som händer på djupare vatten där de flesta organismerna lever. I en studie från nordöstra Nordamerika undersöktes hur termiska förhållandena från 231 sjöar förändrats under åren 1975–2012 (Richardson m.fl., 2017). Generellt så visar studien att sjöarnas yttemperatur ökat och att den termiska skiktningen förstärkts. Emellertid så förändrades inte djupvattentemperaturen i samma grad som yttemperaturen, utan djupvattnet kunde uppvisa variation mellan kallt och varmt. Däremot visade klara sjöar en större tendens till att värmas upp snabbare. Om det i framtiden kommer att bli mildare vintrar, kortare period av is på sjöar och mindre snö på isar vid nordliga breddgrader så kommer effekterna också leda till ett minskat albedo (reflektion) från sjöarna, en tidigare skiktning och en längre period av energi (sol) instrålning, vilket kommer att intensifiera sommaruppvärmningen av sjövattnet (Richardson m.fl., 2017).

Dessa förändringar av de fysikaliska egenskaper i sjöar kommer sannolikt att påverka och förändra sammansättningen och biomassan av växtplankton i sjöar (Bloch and Weyhenmeyer 2012). Tidpunkten för islossning är ett av svaren på kli-



Figur 3. Medeltemperatur från april i Junsele och islossningsdata från 10 sjöar, 1963–2010.



Figur 4. Schematisk bild som visar hur ett förändrat klimat kan påverka den termiska skiktningen i sjöar när årstidsvariationen förändras, med en kortare vinter och en längre sommarperiod.

matförändringar som lätt kan mätas och har visat sig vara en bra indikator på lokala väderförhållanden. På norra halvklotet har islossningsdatum avancerat med 6,5 dagar per sekel och flera studier av tidpunkten för islossning visar att islossning sker allt tidigare (Magnusson m.fl., 2000, Brown and Duguay, 2010). Smejkalova m.fl. (2016) utförde en studie med hjälp av infraröd reflektion från över 13 000 Arktiska sjöars yta i olika regioner. Resultaten från 2000–2013 visar på en signifikant trend mot en tidigare islossning i alla regioner. I norra Europa var förändringen ca 0,1 dag/år medan i centrala Sibirien så var förändringen ca 1,05 dag/år. Att förändringen är större för sjöar i centrala Sibirien kan bero på att den årliga medeltemperaturen mellan 2000–2014 visade på en ökning på 0,5 till 2,0 °C, vilket var större jämfört med Europa. Denna tydliga trend som Smejkalova m.fl. (2016) redovisar skiljer sig något jämfört med tidigare studier, vilket kan bero på att de studerat förändringar under en kortare tidsperiod, 2000–2013. Dessutom ingår väldigt många små sjöar (< 2,5 km²) i studien som är mer känsliga för temperaturförändringar än stora sjöar som har en större lagringskapacitet av värme. Benson m.fl. (2012) fann i en tidsserie mellan 1855–2006 att islossningen har avancerat 1,9 dagar per årtionde generellt men att förändringarna var ännu snabbare under den senaste 30-årsperioden.

Många faktorer är orsaken till tidpunkten för islossning i sjöar och en viktig faktor är solinstrålning till sjöarna men även vårluftens temperatur verkar vara en viktig faktor som starkt påverkar islossning, tillsammans med höjd över havet, breddgrad, djup och yta på sjön (Kirillin m.fl., 2012, Williams m.fl., 2004). Tidpunkten för islossningen påverkas också av snö- och istjockleken och klimatet under vintern kommer därför att ha stor betydelse för tidpunkten för islossning (Kirillin m.fl., 2012). Den typiska och vanligaste typen av sjö, både i hela världen och även i Sverige, är en liten (många mindre än 1 km²) och inte så djup sjö (Downing m.fl., 2006). Över 90 % av jordens ca 304 miljoner sjöar är små grunda sjöar med rikliga mängder av näring och goda ljusförhållanden, vilket gör dem till lämpliga miljöer för hög biologisk produktion (Williamson m.fl., 2009). Antalet små sjöar har tidigare underskattats och de processer som är aktiva i små sjöar har förmodligen en större betydelse i global skala än vad som hittills antagits (Downing m.fl., 2006). Sjöarna fungerar snarare som en indikator på förändringar genom att ge signaler som speglar inverkan av klimatförändringar. Signalerna är starkt relaterade till sjöarnas sediment som under årtionden lagrat kol från omgivande marker, vilket i sin tur fungerar som värdefulla data för hur kolets kretslopp hänger ihop med klimatförändringar. Men förutom att kol lagras i sjöarnas

sediment så sker även en mineralisering av kolet, vilket innebär att koldioxid och metan frigörs från sjöar (Williamson m.fl., 2009).

Sammanfattning och ekologiska konsekvenser

Som tidigare nämnts så kommer särskilt områden vid högre breddgrader att påverkas mer än många andra områden i framtiden av de pågående klimatförändringarna med effekter som exempelvis högre temperaturer och varmare vintrar (IPCC, 2018). Hur ekosystem som sjöar och dess ekosystemtjänster påverkas av dessa klimatförändringar är mindre klart men tidsserierna i denna studie från Norrland visar på en tydlig trend mot en tidigare islossning. Data från islossningen visade även på en god korrelation med den lokala lufttemperaturen som uppvisade en tendens till varmare årstemperatur samt varmare lufttemperatur i april, vilket ligger i linje med IPCC:s (2018) rapport, både globalt och regionalt. Till följd av fler värmeböljor och större skyfall så menar Naturvårdsverket (2017) att för att minska de negativa effekterna av klimatförändringarna av vattenmiljöer i landskapet så behöver flertalet av ekosystemtjänsterna säkerställas. Sjöarna och dess ekosystemtjänster som bland annat innefattar biologisk mångfald, vattenrening, vattenförsörjning och översvämningsskydd är av stor betydelse för samhället. För oss människor är sjöar och dessa omgivande landskap även väldigt attraktivt för rekreation. Uppvärmningen av sjöar hänger oftast ihop med sjöarnas fenologi som i tempererade och i de norra delarna av världen innebär att perioden för isläggning blir kortare. Detta resulterar i sin tur i att den termiska skiktningen förlängs, vilket kan få till följd att det djupare vattnet i hypolimnion kan utsättas för syrefriamiljöer (Richardson m.fl., 2017). Andra effekter som kan uppstå är att den vertikala omrörningen minskar i vattnet och att detta kommer att påverka näringsförhållanden och primärproduktionen. Varmare ytvatten främjar dessutom tillväxten av blågrönalger, vilket kan ge upphov till mer återkommande händelser av giftiga algbloomningar. Just en förhöjd temperatur och en längre period av skiktning ger optimala tillväxtförhållanden för blågrönalger, vilket på sikt kan försämra vattenkvaliteten i sjöarna

(Richardson m.fl., 2018). Hur dessa förändringar kommer att påverka relationen mellan växt- och djurplankton är för tidigt att förutsäga, men ett varmare vatten kan innebära att en förändring av artsammansättningen sker och att mer värmeälskande arter gynnas.

Sammanfattningsvis så visar ett flertal studier att ekosystem bestående av sjöar- och vattenområden är viktiga och känsliga indikatorer på klimatförändringar. Emellertid så är responsen från sjöar på klimatförändringar och en ökad temperatur intimt förknippad med vilken typ av morfologi sjöarna har, geografiskt läge och näringsstatus. Studier med längre tidserier visar på en tydlig trend att sjöar i nordliga klimat uppvisar en kortare period med is. Islossning sker tidigare och den termiska skiktningen varar längre, vilket får konsekvenser för sjöarnas fenologi. Därför är det viktigt att fortsätta med kontinuerliga studier av bland annat nederbörd, temperatur och isförhållanden för att kunna anpassa samhället till ett förändrat klimat.

Referenser

- Benson, B.J., Magnuson, J.J., Jensen, O.P., Card, V.M., Hodgkins, G., Korhonen, J., Livingstone, D.M., Stewart, K.M., Weyhenmeyer, G.A., Granin, N.G. (2012) Extreme events, trends and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855-2005). *Climatic Change*, 112: 299-323.
- Blenckner, T., Omstedt, A., Rummukainen, M. (2002) A Swedish case study of contemporary and possible future consequences of climate change on lake function. *Aquatic Science*, 64:171-184.
- Bloch, I., Weyhenmeyer, G.A. (2012) Long-term changes in physical and chemical conditions of nutrient-poor lakes along a latitudinal gradient: is there a coherent phytoplankton community response? *Aquatic Sciences*, 74:77-85.
- Brown, L.C., Duguay, C.R. (2010) The response and role of ice cover in lake-climatic interactions. *Progress in Physical Geography*, 34:671-704.
- Downing, J.A., Prairie, Y.T., Cole, J.J., Duarte, C.M., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., McDowell, W.H., Kortelainen, P., Caraco, N.F., Melack, J.M., Middelburg, J.J. (2006) The global abundance and size distribution of lakes, ponds and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 51:2388-2397.
- Ghanbari, R. N., Bravo, H.R., Magnuson, J.J., Hyzer, W.G., Benson, B.J. (2009) Coherence between lake ice-cover, local climate and teleconnections (Lake Mendota, Wisconsin). *Journal of Hydrology*, 374:282-293.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C. www.ipcc.ch

- Kirillin, G., Leppäranta, M., Terzhevik, A., Granin, N., Bernhardt, J., Engelhart, C., Efremova, T., Golosov, S., Palshin, N., Sherstyankin, P., Zdorovenova, G., Zdorovenov, R. (2012) Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquatic Science*, 74:659-682.
- Livingstone, D.M. (1997) Break-up dates of alpine lakes as a proxy data for local and regional mean surface air temperatures. *Climatic Change* 37:407-439.
- Magnusson, J.J., Wynne, R.H., Benson, B.J., Robertson, D.M. (2000) Lake and river ice as a powerful indicator of past and present climates. *Verh.-Int. Ver. Limnol.*, 27:2749-2756.
- Naturvårdsverket (2017) Argument för ekosystemtjänster. Rapport 6736. ISBN 978-91-620-6736-6.
- Overland, J.E., Wang, M., Walsh, J.E., Stroeve, J.C. (2013) Future Arctic Climate changes: Adaptation and mitigation time scales. *Earth's Future*, 2:68-74.
- Pettersson, K., Grust, K., Weyhenmeyer, G., Blenckner, T. (2003) Seasonality of chlorophyll and nutrients in Lake Erken – effects of weather conditions. *Hydrobiologia*, 506-509:75-81.
- Reynolds, C.S. (2006) The ecology of phytoplankton. Cambridge University Press, Cambridge.
- Richardson, D.C., Melles, S.J., Pilla, R.M., Hetherington, A.L., Knoll, L.B., Williamson, C.E., Kraemer, B.M., Jackson, J.R., Long, E.C., Moore, K., Rudstam, L.G., Rusak, J.A., Saros, J.E., Sharma, S., Strock, K.E., Waethers, K.C., Wigdahl-Perry, C.R. (2017) Transparency, Geomorphology and Mixing Regime Explain Variability in Trends in Lake Temperature and Stratification across Northeastern North America (1975-2014). *Water* 9:442.
- Richardson, J., Miller, C., Maberly S.C., Taylor, P., Globevnik, L., Hunter, P., Jeppesen, E., Mischke, U. Moe, S.J., Pasztale-niec, A., Sondergaard, M., Carvalho, L. (2018) Effects of multiple stressors on cyanobacteria abundance vary with lake type. *Global Change Biology*, 24:5044-5055.
- Smejkalova, T. Edwards, M.E., Dash, J. (2016) Arctic lakes show strong decadal trend in earlier spring ice-out. *Scientific Reports*, 6:38449.
- Weyhenmeyer, G., Blenckner, T., Pettersson, K. (1999) Changes of the Plankton Spring Outburst Related to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and oceanography*, 44:1788-1792.
- Williams, G., Layman, K.L., Stefan, H.G. (2004) Dependence of lake ice covers on climatic, geographic and bathymetric variables. *Cold Regions Science and Technology*, 40:145-164.
- Williamson, C.E., Saros, J.E., Schindler, D.W. (2009) Sentinels of Change. *Science*, 323:887-888.
- Winder, M., Schindler, D. (2004) Climatic effects on the phenology of lake processes. *Global Change Biology*, 10:1844-1856.