



# Eutrofiering och klimatförändringar - Ett ömsesidigt förhållande

**KASPER NORSTEDT 2024**  
**MVEK12 EXAMENSARBETE FÖR KANDIDATEXAMEN 15 HP**  
**MILJÖVETENSKAP | LUNDS UNIVERSITET**





# Eutrofiering och klimatförändringar - Ett ömsesidigt förhållande

Kasper Norstedt

2024



**LUNDS**  
UNIVERSITET

Kasper Norstedt

MVEK12 Examensarbete för kandidatexamen 15 hp, Lunds universitet

Huvudhandledare: Maria Hansson, CEC - Centrum för miljö- och klimatvetenskap,  
Lunds universitet

CEC - Centrum för miljö- och klimatvetenskap  
Lunds universitet  
Lund 2024

# Abstract

The aim of this literature study was to review the effects that climate change has on the intensification of eutrophication in lakes, specifically in a temperate climate. Furthermore, the latest research on the connection between greenhouse gas emissions and eutrophication in lakes was reviewed to explore the synergistic relationship between the two processes. In summary, the results were that the increase in temperature and precipitation associated with climate change can intensify eutrophication by increasing internal loading, algal blooms in lakes and transport of nutrients to the lake from its catchment area. Several studies conclude that this effect will be more prominent in temperate or boreal lakes. The latest research on greenhouse gas emissions connection to eutrophication was divided depending on which gas was studied. CO<sub>2</sub> showed variation from sink to source between seasons and lakes, but some were shown to be net sources. CH<sub>4</sub> emissions however had a strong connection to eutrophication, specifically algae blooms. N<sub>2</sub>O emissions had the weakest link to eutrophication, with several studies showing no correlation parameters linked with eutrophication and N<sub>2</sub>O emissions. However, some studies did find that more eutrophic lakes did release more N<sub>2</sub>O.

It was concluded that there was a clear link between eutrophication and climate change and that the two processes reinforce one another.



# Populärvetenskaplig sammanfattning

När det pratas om övergödning är det ofta våra kuster och Östersjön som kommer på tal och när det pratas om växthusgasutsläpp är det vanligt att trafik och industri diskuteras. I denna studie undersöks dessa två miljöproblem i stället ur ett sjöperspektiv för att belysa ett av de hot dessa sötvattensekosystem står inför nu och i framtiden.

Övergödning, som inom akvatisk ekologi ofta kallas eutrofiering, är ofta en konsekvens av vårt intensiva jordbruk eller utsläpp av avloppsvatten. Gödsel och avloppsvatten innehåller de grundläggande byggstenarna som krävs för att växter och alger ska frodas, de viktigaste av dessa är fosfor och kväve. Ett överskott av dessa näringsämnen kan rubba balansen i sjöars ekosystem och skapa stora algblomningar vilket kan göra vattnet obrukbart och försämra fisket.

I denna litteraturstudie gjordes en sammanställning av forskningen som undersöker huruvida ett varmare och blötare klimat kan bidra till att övergödning ökar i sjöar, specifikt i ett tempererat klimat som vi har här i Sverige. Utöver detta gjordes även en sammanställning av den senaste forskningen som undersöker om sjöar som är övergödda släpper ut större mängder växthusgaser. De växthusgaser som undersöktes var koldioxid ( $\text{CO}_2$ ), metangas ( $\text{CH}_4$ ) och lustgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

Resultatet blev att en högre temperatur främjar algblomningar och stärker interna processer i sjön som frigör näring som annars är bunden i sjöbotten. De fiskar och djurplankton som trivs i dessa förhållanden kommer också att förvärra övergödningssymptom. Mer regn kommer att öka mängden näringsämnen som transporteras till sjön från den kringliggande marken. Det kommer också leda till större variationer i vattenstånd vilket också ökar övergödning.

När det kom till utsläpp av växthusgaser till följd av övergödning var forskningen mer oense. Sjöar bildar generellt sett mer  $\text{CO}_2$  när de blir övergödda, men följande ökning i algblomning kan ofta kompensera för detta med fotosyntes. Detta ledde till varierande resultat där vissa sjöar var källor till  $\text{CO}_2$  men andra var sänkor. En ökning av  $\text{CH}_4$  var i stället övervägande kopplat till övergödning och där fanns ett tydligt samband. Utsläpp av  $\text{N}_2\text{O}$  var svårt att koppla till övergödning i flera studier, men några såg en ökning vilket skapar en osäkerhet.

Sammantaget pekar forskningen mot att klimatförändringar kan förvärra övergödning i sjöar och att övergödda sjöar kan avge mer växthusgaser vilket betyder att fenomenen är ömsesidigt förstärkande.





# Innehållsförteckning

## **Abstract 3**

## **Populärvetenskaplig sammanfattning 5**

## **Innehållsförteckning 7**

## **Inledning 9**

*Eutrofiering 9*

*Klimatförändringar 10*

*Syfte och frågeställning 10*

*Avgränsningar 10*

*Miljövetenskaplig relevans 11*

*Etisk reflektion 11*

## **Metod 13**

*Sökstrategi och utförande 13*

*Urval 14*

*Analys 15*

## **Resultat 17**

## **Diskussion 21**

*Förhöjd temperatur 21*

*Förändrad nederbörd 22*

*Eutrofiering och utsläpp av växthusgaser från sjöar 23*

*Arbetets sambällsrelevans 25*

## **Slutsats 27**

**Tack 29**

**Referenser 31**

# Inledning

Vatten är en livsviktig resurs, inte bara för människor men också för ekosystemen vi förlitar oss på. I dagsläget står våra ytvatten inför flera hot, ofta orsakade direkt av oss människor genom föroreningar och markanvändning eller indirekt genom klimatförändringar (Naturvårdsverket, 2020). Året 2020 i Sverige skedde 80% av vattenuttaget från sjöar, antingen direkt eller genom konstgjord infiltration (SCB, 2020). Då det svenska folket till stor del förlitar sig på sjöar som vattenresurs är det viktigt att förstå vilka hot dessa ekosystem står inför.

## Eutrofiering

Eutrofiering, även kallat övergödning, definierades av Nixon (1995) som

”an increase in the rate of supply of organic matter to an ecosystem.” (s.199).

En ökning av detta organiska material beror ofta på mänskliga aktiviteter såsom jordbruk eller utsläpp av avloppsvatten (Carpenter et al., 1998). Näringsämnen som tillförs är då ofta kväve (N) och fosfor (P). När det kommer till sjöar har P den största inverkan på eutrofieringen då den ofta är det begränsande näringsämnet (Schindler, 1974).

Vid eutrofiering följer ett flertal negativa konsekvenser och några av dessa är, ökad biomassa av fytoplankton, ökad algblomning av arter som är giftiga eller oätliga, ökad biomassa av bentiska och epifytiska alger, förändrad artsammansättning och biomassa av makrofyter, lägre siktdjup, vattnet får sämre smak och odör, reducerade syrenivåer, ökad fiskdöd och minskat estetiskt värde av vattenmassan (Carpenter et al., 1998). Fokus hamnar ofta främst på algblomningarna då dessa alger kan vara farliga för människor, boskap och andra organismer vilket gör att vattenmassan inte kan nyttjas.

## Klimatförändringar

På senare år har det gjorts flera studier som pekar mot att klimatförändringar kan bidra till en ökning av eutrofiering i sjöar samt att eutrofiering kan bidra till klimatförändringar. Detta innebär att processerna kan ha en ömsesidigt förstärkande effekt vilket Meerhoff et al. (2022) gjorde en grundläggande sammanställning av. Denna översiktsartikel syftade till att vara en uppdatering på den senaste forskningen och var en uppföljare till en tidigare sammanställning av Moss et al. (2011) vilka var tidiga med att föreslå sambandet mellan eutrofiering och klimatförändringar.

Klimatförändringar har utöver en högre medeltemperatur flera potentiella effekter. Bland annat förväntas förändringar i nederbörd i båda riktningar, alltså längre torka och mer regn (IPCC, 2023). Det är oftast dessa två förändringar som lyfts fram när det kommer till hur klimatet kan påverka eutrofiering (Meerhoff et al., 2022). När det kommer till att eutrofiering kan bidra till klimatförändringar är detta i form av utsläpp av växthusgaser från sjön. De växthusgaser som lyfts fram i forskningen är då koldioxid (CO<sub>2</sub>), metangas (CH<sub>4</sub>) och lustgas (N<sub>2</sub>O) (Meerhoff et al., 2022). Dessa gaser varierar i sin potential att bidra till global uppvärmning då CH<sub>4</sub> och N<sub>2</sub>O har 34 respektive 298 gånger starkare potential än CO<sub>2</sub> (IPCC, 2013).

## Syfte och frågeställning

Denna litteraturstudie syftar till att göra en sammanställning av det nuvarande kunskapsläget genom att analysera artiklar och dra övergripande slutsatser. Området som undersöks är hur eutrofiering i tempererade och kallvattensjöar kan intensifieras av klimatförändringarna samt hur eutrofiering i sin tur kan accelerera klimatförändringar.

1. Hur kommer ett varmare klimat påverka eutrofiering av sjöar?
2. Kan eutrofiering av sjöar i sig bidra till ökade utsläpp av växthusgaser?

## Avgränsningar

För att få ett svenskt perspektiv på klimatförändringars effekter på eutrofiering i sjöar kommer studien avgränsas till tempererade och kallvattensjöar för frågeställning 1.

För frågeställning 2 valdes avgränsningen att endast titta på studier från 2022-2024. Denna avgränsning gjordes delvis för att forskningsområdet är relativt nytt och majoriteten av forskningen har gjorts det senaste årtiondet. En annan motivering var att den tidigare nämnda översiktsartikeln som behandlar konceptet med ett ömsesidigt förhållande mellan klimatförändringar och eutrofiering publicerades just 2022 (Meerhoff et al., 2022). Därav var det av intresse att se vad den senaste forskning som publicerats efter den översiktsartikeln säger då det fanns osäkerheter kring växthusgasutsläpp.

## Miljövetenskaplig relevans

Eutrofiering har en negativ påverkan på ekosystemtjänsterna som sjöar bidrar med då vattnet kan bli olämpligt för konsumtion och användning samt att fisket påverkas negativt. Området som studien utforskar är även starkt kopplat till flera av Sveriges miljömål (Sveriges miljömål, 2024). Eutrofiering har en mycket stark koppling till miljömålen ”Ingen övergödning” och ”Levande sjöar och vattendrag”. Då även utsläpp av växthusgaser undersöks är studien också kopplad till målet ”Begränsad klimatpåverkan”. Den miljövetenskapliga relevansen stärks även av det ömsesidiga sambandet mellan klimatförändringarna och eutrofiering som forskningen pekar mot.

## Etisk reflektion

Då detta är en litteraturstudie ligger de etiska aspekterna främst i att tolka fakta från referenserna korrekt och att referera noggrant till samtliga referenser. Detta är viktigt då forskarna som utfört studierna ska representeras så korrekt som möjligt. Det bör även om möjligt kontrolleras att deras insamling av data har gjorts på ett etiskt sätt.



# Metod

## Sökstrategi och utförande

Litteratursökningen utfördes med Web of Science och sökningen gjordes inom alla databaser. Frågeställningarna bröts ned till nyckelord som sedan användes som sökord, se tabell 1. För att precisera sökbredden till sjöar användes den booleska operatören NOT för att exkludera andra akvatiska miljöer. Samtliga sökord söktes inom topic vilket innebär att abstract, titel och nyckelord inkluderas.

**Tabell 1**

Redovisning av den systematiska litteratursökningen i tabellform med vilka sökord och avgränsningar som användes. Sökning 1 är litteratursökningen för frågeställning 1 och sökning 2 är för frågeställning 2.

Databas:	Sökord	Filter	Antal träffar	Urval 1	Urval 2
Web of Science Datum: 2024-04-26					
1	Eutrophication AND (?climate change" OR "global warming" OR "climate warming") AND (temperate OR "cold water") AND (lake*) NOT (coast* OR wetland* OR ocean* OR river* OR stream	Article & review article	157	37	21
Databas:	Sökord	Avgränsningar	Antal träffar	Urval 1	Urval 2
Web of Science Datum: 2024-05-08					
2	Eutrophication AND (?greenhouse gas*" OR GHG OR methane OR CH4 OR CO2 OR N2O) AND (lake* OR pond*) AND (emission* OR efflux* OR ebullition) NOT (ocean* OR wetland* OR coast* OR marine OR stream* OR canal*) NOT (tropic* OR subtropic*)	Article & review article, publiceringar 2022-2024	62	27	19

## Urval

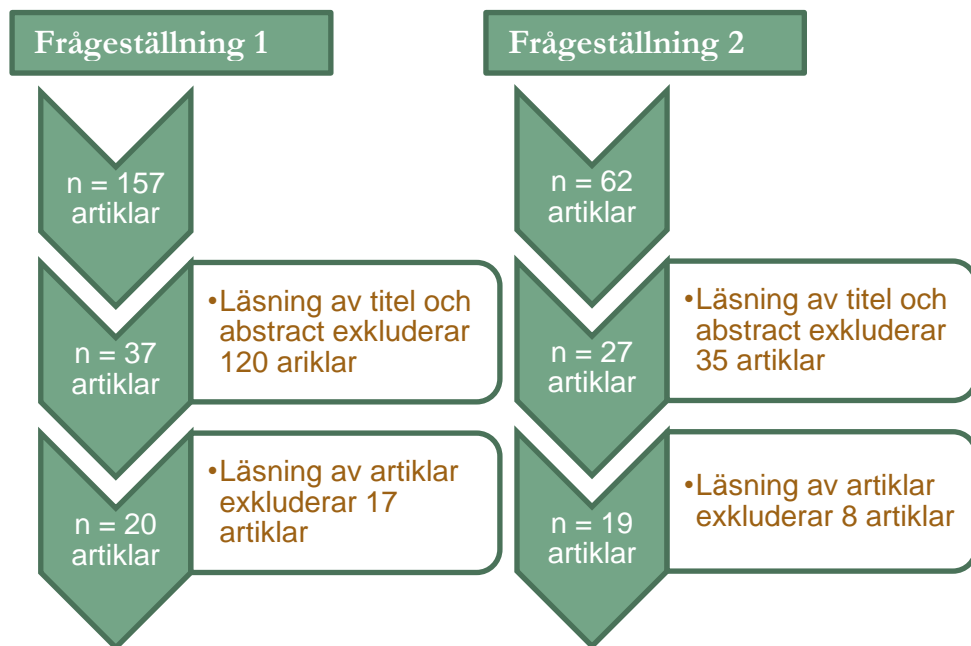
Under det första urvalet för frågeställning 1 lästes titel och abstract för de 157 träffarna för att avgöra relevans för frågeställningen, de kriterier som användes var att artikeln undersöker hur eller om en aspekt av klimatförändringar kan påverka en aspekt av eutrofiering i sjöar i ett tempererat klimat. Det inkluderades även översiktsartiklar för att potentiellt användas till snöbollssökning. Aspekter av klimatförändringar ansågs vara, ökad temperatur eller förändringar i nederbörd eller vind. Inom aspekter av eutrofiering räknades processer, indirekta eller direkta, som ökar näringen i sjöar. Vilken typ av metod som användes i artiklarna togs det inte hänsyn till.

Efter läsning av titel och abstract gjordes ett urval på 37 artiklar som kvalificerade till urval 2 där artiklarna lästes i sin helhet med extra noggrannhet vid läsning av diskussion och slutsats. Här användes samma kriterier som urval 1 för att välja ut lämpliga artiklar. Det slutliga urvalet för frågeställning 1 blev 21 artiklar

Vid första urvalet för frågeställning 2 lästes abstract och titel i samtliga 62 träffar. Kriterierna som användes i detta urval var att artikeln undersöker hur utsläpp av någon av växthusgaserna CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> och N<sub>2</sub>O påverkas av eutrofiering eller ett symptom av eutrofiering. Även vid denna sökning inkluderades översiktsartiklar för att potentiellt användas för snöbollssökningar. Metod var inte vid detta urval heller något som togs hänsyn till. Det första urvalet slutade med 27 artiklar.

Därefter lästes artiklarna i sin helhet där återigen extra noggrannhet lades på diskussion och slutsats för att avgöra om det drogs slutsatser som var relevanta för frågeställning 2. För att avgöra relevansen användes samma kriterier som för urval 1 vilket resulterade i ett slutligt urval på 19 artiklar för frågeställning 2.





**Figur 1**  
Översikt av urvalsprocessen av litteratur för frågeställning 1 och frågeställning 2.

## Analys

Vid analys kommer artiklarna för frågeställning 1 att sorteras efter vilken effekt av klimatförändringarna som undersöks för att sedan göra en sammanställning av hur varje undersökt effekt kan påverka eutrofiering.

För frågeställning 2 kommer artiklarna sorteras efter vilken växthusgas som undersöks för att göra en sammanställning av hur utsläppet av denna påverkas av eutrofiering.



# Resultat

Resultatet av studien redovisas i form av en översiktlig kategorisering av artiklar från det slutliga urvalet. Den första kategoriseringen för frågeställning 1 utgår ifrån vilken konsekvens av klimatförändringar som undersöks i relation till eutrofiering, se tabell 2.

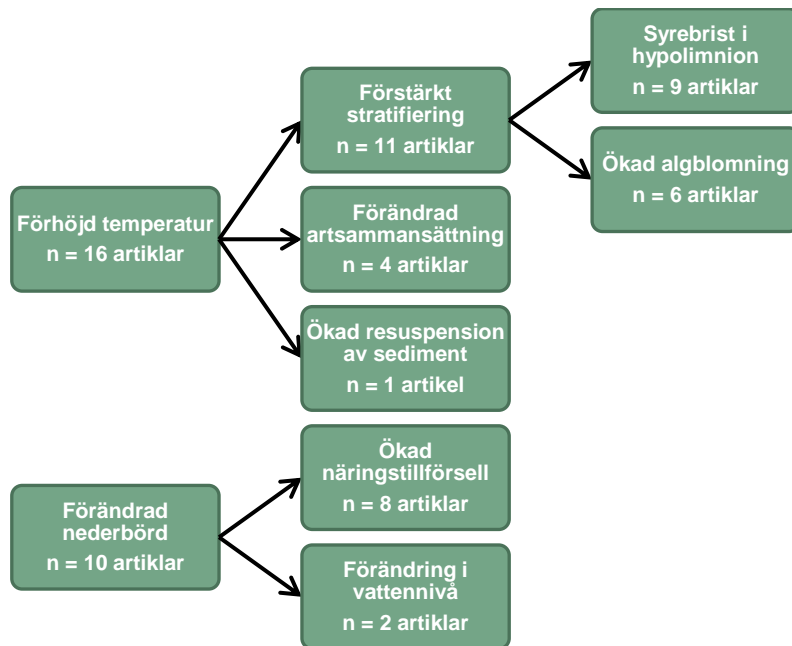
**Tabell 2**

Sammanställning av samtliga studier från det slutliga urvalet för frågeställning 1 med översiktlig kategorisering.

<b>1. Hur kommer ett varmare klimat påverka eutrofiering av sjöar?</b>
<b>Nederbörd och eutrofiering, n = 10 artiklar</b>
(Erratt et al., 2022; Jeppesen et al., 2012; LaBrie & Maranger, 2024; Lu et al., 2019; Ma et al., 2023; Robertson & Rose, 2011; Smucker et al., 2021; Tang et al., 2019; Trolle et al., 2015; Zohary & Ostrovsky, 2011)
<b>Ökad temperatur och eutrofiering, n = 16 artiklar</b>
(Beutel & Horne, 2018; Donis et al., 2021; Dupuis & Hann, 2009; Erratt et al., 2022; Foley et al., 2012; Jeppesen et al., 2010; Jeppesen et al., 2012; Kröger et al., 2023; Lewis et al., 2024; Lu et al., 2019; Ma et al., 2023; Niemistö & Horppila, 2007; North et al., 2013; Rogora et al., 2018; Smucker et al., 2021; Trolle et al., 2015)

För att tydliggöra hur klimatfaktorerna leder till eutrofiering och vilka områden som det forskats mer på redovisas processerna samt antalet artiklar som undersöker området, se figur 2. Av de totalt 20 artiklarna var det 16 som undersökte en högre temperaturs påverkan på eutrofiering och 10 som undersökte hur en förändrad nederbörd kan påverka eutrofiering. Samtliga av dessa artiklar kom fram till att klimatfaktorn i någon grad ledde till eutrofiering.

Det fanns flera artiklar som undersökte både temperatur och nederbörd samtidigt, därmed ser figuren ut att inkludera fler artiklar än vad som ingick i urval 2.



**Figur 2**

Kategorisering av studier efter analys, först efter vilken effekt av klimatförändringar som studerades och sedan efter vilken konsekvens effekten leder till som kan förstärka eller bidra till eutrofiering.

Vid den översiktliga kategoriseringen av studier för frågeställning 2 gjordes kategorisering efter vilka av de tre växthusgaserna som undersöktes i studien, se tabell 3.

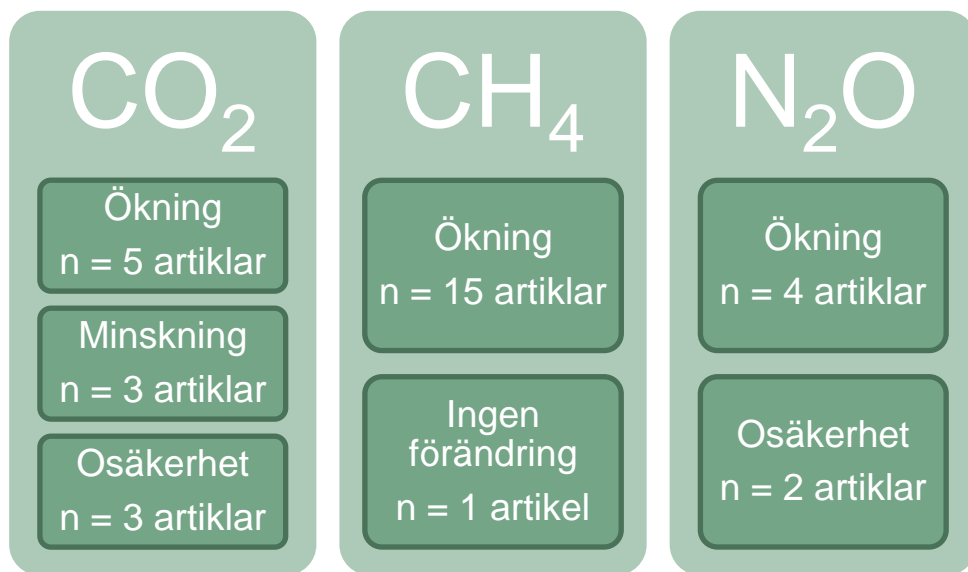
**Tabell 3**

Sammanställning av samtliga studier från det slutliga urvalet för frågeställning 2 med översiktlig kategorisering.

2. Kan eutrofiering av sjöar i sig bidra till ökade klimatförändringar?
<b>CO<sub>2</sub> och eutrofiering, n = 11 artiklar</b>
(Chan et al., 2024; Kumar et al., 2023; Leon-Palmero, 2023; B. Ma et al., 2024; J. Ma et al., 2024; Spank et al., 2023; Zhang et al., 2024; Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2023; C. Zhou et al., 2023; M. Zhou et al., 2023)

<b>CH<sub>4</sub> och eutrofiering, n = 16 artiklar</b>
(Chan et al., 2024; Duan et al., 2023; Kang et al., 2024; Kumar et al., 2023; Leon-Palmero, 2023; B. Ma et al., 2024; J. Ma et al., 2024; Ouyang et al., 2024; Spank et al., 2023; Wang et al., 2022; T. Wang et al., 2023; Zhang et al., 2024; Zhang et al., 2022; Zhong et al., 2023; C. Zhou et al., 2023; M. Zhou et al., 2023)
<b>N<sub>2</sub>O och eutrofiering, n = 6 artiklar</b>
(Chan et al., 2024; Leon-Palmero, 2023; J. Ma et al., 2024; Plouviez et al., 2024; Y. Wang et al., 2023; Zhang et al., 2024)

För frågeställning 2 kategoriserades artiklarna utifrån vilken växthusgas vars utsläpp undersöktes följt av hur utsläppen konstateras påverkas av eutrofiering, se figur 3. Utöver CH<sub>4</sub> förekom en ganska stor variation i om eutrofiering ledde till ett ökat utsläpp eller ej.



**Figur 3**

Kategorisering av studier för frågeställning 1 efter analys, kategoriserade efter hur utsläpp av växthusgaser påverkas av ökad eutrofiering eller symptom på eutrofiering.



# Diskussion

## Förhöjd temperatur

De 16 artiklar som undersökte ett varmare klimats påverkan på eutrofiering kom alla fram till att det på något sätt bidrar till en ökning av eutrofiering. Den effekt som förekom främst i litteraturen var att stratifiering intensifieras eller sker tidigare och över en längre tid på året till följd av att vattnet i sjön blir varmare. Denna stratifiering får sedan konsekvensen att hypolimnion mer frekvent blir hypoxisk eller anoxisk (Beutel & Horne, 2018; Foley et al., 2012; Kröger et al., 2023; Lewis et al., 2024; Lu et al., 2019; Ma et al., 2023; North et al., 2013; Rogora et al., 2018; Smucker et al., 2021; T. Wang et al., 2023). En ytterligare konsekvens av en högre temperatur som även gynnas av den förstärkta stratifieringen är en ökning i algbloomning, ofta dominerad av cyanobakterier (Donis et al., 2021; Erratt et al., 2022; Kröger et al., 2023; Ma et al., 2023; Smucker et al., 2021).

Då en ökning av algbloomning resulterar i en större sedimentering av organiskt material ökar respirationen i hypolimnion vilket leder till ytterligare syrebrist. Syrebristen leder i sin tur till att bunden P frigörs från sedimenten, så kallad intern belastning, vilket bidrar med mer näring i vattenmassan och leder till eutrofiering (Lewis et al., 2024). Tillsammans kan de båda processerna alltså förstärka varandra. Vid en studie av en tempererad sjö i Tyskland ansågs detta ligga bakom sjöns eutrofiering då extern näringstillförsel upphört (Kröger et al., 2023).

En unik studie som från urvalet utfördes av Lu et al. (2019) som undersökte en kallvatten sjö i ett naturreservat som var relativt fri från mänsklig påverkan. Denna sjö hade trots detta utvecklat symptom på eutrofiering vilket konstaterades delvis bero på en högre temperatur till följd av klimatförändringarna. Detta var ett unikt exempel från studierna i urvalet då klimatförändringar verkar vara den stora drivande faktorn till eutrofiering.

Donis et al. (2021) utförde en studie av 230 sjöar i flera olika klimat och hittade en stark korrelation mellan temperatur och stratifieringsstyrka vilket var mer frekvent i boreala sjöar, vilka också hade högst koncentrationer av alger. Detta pekar mot att sjöar i Sverige kan vara extra känsliga för ett varmare klimat.

Utöver stratifiering påverkas även artsammansättningen i sjöar av att vattnet ökar i temperatur, ofta i en riktning som kan förstärka symptomen av eutrofiering (Dupuis & Hann, 2009; Jeppesen et al., 2010; Jeppesen et al., 2012; Trolle et al., 2015).

Artsammansättningen av fiskar tenderar att gå mot mindre individer vars diet kan leda till ökad predation av djurplankton vilket leder till minskad betning av alger och därmed minskat motstånd mot algbloomningar i ekosystemet (Jeppesen et al., 2010; Jeppesen et al., 2012; Trolle et al., 2015). Dupuis och Hann (2009) konstaterade även att en tidigare vår skulle kunna påverka djurplanktonet daphnier negativt och därmed också minska betning. De påpekade också att norra tempererade sjöar potentiellt är extra känsliga för detta.

En aspekt som bara undersöktes i en studie var att kortare vintrar ökar resuspension av sediment och därmed ökar tillgängligheten av partikulärt P för alger (Niemistö & Horppila, 2007). Denna konsekvens var alltså väldigt underrepresenterad i artiklarna från det slutliga urvalet.

## Förändrad nederbörd

De 10 artiklar som undersökte nederbörd hittade alla samband mellan nederbörd och någon aspekt av eutrofiering men det förekom variation på vilket sätt den ökade nederbörden bidrog till eutrofiering. Totalt var slutsatserna från 8 av studierna att en ökad nederbörd kommer öka tillförsel av näring från avrinningsområdet (Erratt et al., 2022; Jeppesen et al., 2012; Lu et al., 2019; Ma et al., 2023; Robertson & Rose, 2011; Smucker et al., 2021; Tang et al., 2019; Trolle et al., 2015). Mellan dessa 8 studier förekom det variation i metod, antalet sjöar som studerades och vilka slutsatser som drogs från resultatet.

Två av studierna var storskaliga modelleringar av data från ett stort antal sjöar och reservoarer. Tang et al. (2019) konstaterade att speciellt för tempererade sjöar ledde en ökad nederbörd till en ökad halt av total fosfor. Den andra gjorde en modellering för ett scenario med ett 6 C° varmare klimat i Danmark och drog slutsatsen att den ökande nederbörden skulle leda till en ökning av N och P transport med 13% respektive 64% (Trolle et al., 2015).

Flera studier undersökte ett samband mellan nederbörd och cyanobakterieblomningar vilket är ett symptom på eutrofiering. Med hjälp av satellitbilder studerades 161 sjöar och det hittades en positiv korrelation mellan ökad nederbörd och ökad frekvens, area och längd av algbloomningar framför allt i tempererade sjöar (Ma et al., 2023). Erratt et al. (2021) hittade också korrelationer mellan cyanobakterieblomningar och ökad nederbörd genom att studera cyanobakterier i sedimentet i en sjö och jämföra med klimatfaktorer.

Två artiklar undersökte enstaka sjöar varav en, som tidigare nämnt i diskussionen, analyserade en sjö som hade en väldigt låg påverkan från mänskliga verksamheter. Utöver en högre temperatur så konstaterades även en ökad transport av näring från avrinningsområdet bidra till eutrofiering av denna kallvatten sjö (Lu et al., 2019). Den andra studien jämförde två sjöar där den ena fick majoriteten av sitt vatten från



avrinningsområdet och den andra från grundvatten och regn. Sjön med det större avrinningsområdet tog emot stora mängder näring i samband med mycket nederbörd och skiftade från oligotrof till eutrof. Författarna drog slutsatsen att vid en ökning av nederbörd kommer sjöar med stora avrinningsområden få en ökad eutrofiering till följd av ett högre inflöde av näring (Robertson & Rose, 2011).

Två av studierna hade diskussioner som var mer nyanserade och poängterade att en ökning i nederbörd inte leder till eutrofiering i samtliga fall. Smucker et al. (2021) menar att för lite nederbörd kan minska transport av näring till sjön och förflyttning av näring internt i sjön. De poängterar även att för mycket regn kan öka turbulensen och öka omsättningen av vatten vilken skulle kunna missgynna cyanobakterieblomningar. Den andra studien undersökte bland annat en koppling mellan nederbörd och algblomningar och konstaterade att en sjös morfologi och avrinningsområdes markanvändning och jordmån alla hade en inverkan på nederbördens effekt på förekomsten av algblomning (Ma et al., 2023).

Även artsammansättningen i sjöar kan påverkas av en ökad nederbörd. En översiktsartikel som undersökte klimatförändringarnas påverkan på artsammansättningen av fiskar i flertalet sjöar i Europas diskuterade att eutrofiering som induceras av klimatförändringarna främjar en artsammansättning som i sin tur kan bidra till ökad eutrofiering (Jeppesen et al., 2012).

Det vara bara 2 studier som undersökte hur en ökad nederbörd leder till större variationer i vattennivåer och hur det kan påverka eutrofiering (LaBrie & Maranger, 2024; Zohary & Ostrovsky, 2011). Det som skiljde de åt var att Zohary och Ostrovsky (2011) lade stor fokus på extrema sänkningar av vattenytan vilket konstaterades kunna öka den interna belastningen av P. LaBrie och Maranger (2023) konstaterade i stället att en ökning av vattennivån skulle främja förekommandet av syrebrist på botten vilket i sin tur kan öka den interna näringsladdningen.

Sammantaget kommer en ökad nederbörd leda till en större transport av näring från avrinningsområdet till sjöar. Hur stort detta inflöde är och dess effekt kommer variera mellan sjöar beroende på flera faktorer. Dessutom kan både stora ökning och sänkningar av vattenytan till följd av förändringar i nederbörd leda till eutrofiering.

## Eutrofiering och utsläpp av växthusgaser från sjöar

Förhållandet mellan utsläpp av växthusgaser och eutrofiering är komplext och olika studier drar olika slutsatser. När det kommer till samtliga växthusgaser som ingick i sökningen fanns det variation i hur utsläppet påverkas enligt litteraturen.

När det kommer till CO<sub>2</sub> förekommer det skillnader mellan studierna i urvalet. Sjöar tenderar att gå från en källa till en CO<sub>2</sub> sänka vid eutrofiering, detta då det sker en ökning i fotosyntes till följd av algblomningarna (Chan et al., 2024; Kumar et al., 2023; J. Ma et al., 2024; Spank et al., 2023; Zhang et al., 2024; Zhang et al., 2022). Med

detta samband som grund har flera studier av sjöar konstaterat att sjöarna är nettosänkor för CO<sub>2</sub> (Chan et al., 2024; Spank et al., 2023; Zhang et al., 2022). Under nätter samt perioden efter algbloomning återgår sjön till att avge CO<sub>2</sub>, J. Ma et al. (2024) menar att detta gör det svårt att bedöma om sjön är en nettokälla eller sänka. Det finns dock ett flertal studier som konstaterar att sjöarna som studerats är nettokällor till CO<sub>2</sub> till följd av eutrofiering (Leon-Palmero, 2023; B. Ma et al., 2024; Zhang et al., 2023; C. Zhou et al., 2023; M. Zhou et al., 2023). CO<sub>2</sub> är alltså en gas vars förhållande till eutrofiering är komplext och varierande mellan sjöar.

Alla artiklar utom en som tittade på CH<sub>4</sub> konstaterade att eutrofiering eller algbloomningar leder till en ökning av CH<sub>4</sub> utsläpp från sjöar (Duan et al., 2023; Kang et al., 2024; B. Ma et al., 2024; J. Ma et al., 2024; Ouyang et al., 2024; Spank et al., 2023; T. Wang et al., 2023; Zhang et al., 2024; Zhong et al., 2023; C. Zhou et al., 2023). Algbloomning är kopplat till en ökning av CH<sub>4</sub>-utsläpp då den stora ökningen av organiskt material som tillkommer under och efter algbloomningen bryts ned och bildar CH<sub>4</sub> (Duan et al., 2023; Kumar et al., 2023; Ouyang et al., 2024; Zhang et al., 2022; Zhong et al., 2023). Vid en jämförelse mellan nedbrytning av organiskt material från makrofyter och alger visade resultatet att nedbrytning av alger leder till störst produktion av CH<sub>4</sub> (T. Wang et al., 2023). Dock har Zhang et al. (2024) föreslagit att den ökade syrehalten vid ytan från algbloomningen leder till oxidation av CH<sub>4</sub> till CO<sub>2</sub> och kan i hypereutrofa förhållanden därmed lindra CH<sub>4</sub>-utsläppet. Flera studier visar även att syrebrist ökar produktionen av CH<sub>4</sub> (Kang et al., 2024; J. Ma et al., 2024; M. Zhou et al., 2023). En ensam studie kom fram till att CH<sub>4</sub> inte hade en signifikant ökning vid eutrofiering av dammar i jordbruksmiljö (Chan et al., 2024). Men då studien utfördes på mindre jordbruksdammar över sommaren borde resultatet från denna studie extrapoleras till ett långsiktigt sjöperspektiv med försiktighet.

N<sub>2</sub>O var den växthusgas som undersöktes i minst antal av artiklarna från urvalet. Det förekom även en relativt stor variation i slutsatser. Enligt Zhang et al. (2024) var förhållandet mellan N<sub>2</sub>O eutrofiering oförutsägbart och de hittade ingen korrelation mellan N<sub>2</sub>O och någon parameter relaterad till eutrofiering. En annan jämförande studie konstaterade att en hypereutrof sjö hade ett högre utsläpp av N<sub>2</sub>O jämfört med en oligotrof reservoar, dock hittades ingen korrelation mellan parametrar för vattenkvalitet och de kunde därför inte bekräfta varför utsläppet var högre. När de försökte kvantifiera utsläppet från samtliga sjöar i Nya Zeeland konstaterades det att det totala utsläppet från sjöar var relativt lågt jämfört med utsläppen från jordbruk (Plouviez et al., 2024). Den tidigare nämnda studien som undersökte jordbruksdammar noterade en måttlig ökning av N<sub>2</sub>O-utsläpp, men att det totala utsläppet av CO<sub>2</sub> ekvivalenter inte ökade då dammarna blev CO<sub>2</sub> sänkor (Chan et al., 2024). Andra studier hittade dock koppling mellan N<sub>2</sub>O-utsläpp och algbloomning samt syrebrist (J. Ma et al., 2024; Y. Wang et al., 2023). Där Wang et al. (2023) noterade upp till 7,5x större utsläpp vid nedbrytning av algbloomningen. Vid studie av 12 reservoarer konstaterades även N<sub>2</sub>O-utsläpp öka vid eutrofiering (Leon-Palmero, 2023). Alltså visar större delen av den senaste forskningen att eutrofiering ökar utsläpp av N<sub>2</sub>O,

men det verkar förekomma stor variation i utsläpp och mekanismerna bakom är inte fullt förstådda och kan vara oförutsägbara.

## Arbetets samhällsrelevans

Meerhoff et al. (2022) konstaterar att utsläppet av växthusgaser från sjöar sällan inkluderas i länders växthusgasinventering. I Sverige är detta också fallet då det inte framkommer som en kategori i naturvårdsverkets sammanställning av källor till växthusgasutsläpp (Naturvårdsverket, 2024).

Baserat på resultatet av denna studie är det därmed rimligt att föreslå att relevanta myndigheter borde utföra en kvantifiering sjöars växthusgasutsläpp och eventuellt inkludera dessa i inventeringen av landets utsläpp. Även en ökning av åtgärder för att restaurera eutrofierade sjöar eller minska eutrofiering kan behövas då klimatförändringarna kan innebära en ökad eutrofiering trots att extern tillförsel av näring minimerats, vilket både Kröger et al., (2023) och Lu et al., (2019) konstaterade i sina studier. Då det svenska samhället enligt SCB (2020) förlitar sig på sjöar som en vattenresurs för 80% av sitt uttag är det viktigt att eutrofiering motarbetas för att vattnet ska bibehålla en god kvalitet som dricksvatten.



## Slutsats

Baserat på denna litteraturstudie kan följande slutsatser dras kring hur klimatförändringar kan påverka eutrofiering.

- En temperaturökning kommer att bidra till eutrofiering, främst genom att gynna algbloomningar och främja syrebrist på sjöbottnar.
- En ökning i nederbörd kommer i många fall leda till en ökad transport av näringsämnen till sjöar och därmed accelerera eutrofiering.
- Större variationer i vattennivåer är även kopplat till eutrofiering, både om de sänks och höjs.
- Både förändring i nederbörd och en ökning i temperatur kan förändra artsammansättningen av fiskar och djurplankton så att eutrofiering förvärras.
- Ett flertal studier pekade även mot att norra tempererade sjöar kan vara extra känsliga för klimatinducerad eutrofiering.

Det positiva sambandet mellan eutrofiering och växthusgasutsläpp hade varierade styrka i litteraturen.

- CO<sub>2</sub> produktion ökade vid eutrofiering men i flera fall kompengades detta för med en ökning i fotosyntes till följd av algbloomningar vilket gjorde sjön till en CO<sub>2</sub> sänka. Dock ansågs även sjöar i flera fall vara nettokällor till CO<sub>2</sub>.
- CH<sub>4</sub>-utsläpp hade ett mycket tydligare samband med eutrofiering med stark koppling till algbloomningar och ledde nästan genomgående till ett ökat utsläpp.
- N<sub>2</sub>O-utsläpp verkar i dagens läge vara sämre förstått då flera studier inte hittade samband, medan några hittade samband.

Det är därmed rimligt att föreslå att ytterligare studier behövs för att kvantifiera och förstå sambanden mellan utsläpp av växthusgaser och eutrofiering, främst när det kommer till CO<sub>2</sub> och N<sub>2</sub>O.

Sammantaget finns det mycket stöd från litteraturen att eutrofiering och klimatförändringar har ett ömsesidigt förhållande där den ena förstärker den andra.



# Tack

Jag vill tacka min handledare Maria Hansson för hennes goda råd och vägledning, dels kring skrivning av arbetet men också prokrastinering. Jag vill även tacka personalen i Biologibiblioteket för deras hjälp på plats och deras digitala resurser. Sist men inte minst vill jag tacka mina kurskamrater som alltid varit villiga att hjälpa, ge feedback samt lyssna på ens frustrationer.





## Referenser

- Beutel, M. W., & Horne, A. J. (2018). Nutrient fluxes from profundal sediment of ultra-oligotrophic Lake Tahoe, California/Nevada: Implications for water quality and management in a changing climate. *Water Resources Research*, 54(3), 1549-1559. <https://doi.org/10.1002/2017wr020907>
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559-568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)
- Chan, C. N., Gushulak, C. A. C., Leavitt, P. R., Logozzo, L. A., Finlay, K., & Bogard, M. J. (2024). Experimental ecosystem eutrophication causes offsetting effects on emissions of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O from agricultural reservoirs. *Environmental Science & Technology*, 58(16), 7045-7055. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07520>
- Donis, D., Mantzouki, E., McGinnis, D. F., Vachon, D., Gallego, I., Grossart, H. P., Domis, L. N. D., Teurlincx, S., Seelen, L., Lürling, M., Verstijnen, Y., Maliaka, V., Fonvielle, J., Visser, P. M., Verspagen, J., van Herk, M., Antoniou, M. G., Tsiarta, N., McCarthy, V., . . . Ibelings, B. W. (2021). Stratification strength and light climate explain variation in chlorophyll *a* at the continental scale in a European multilake survey in a heatwave summer. *Limnology and Oceanography*, 66(12), 4314-4333. <https://doi.org/10.1002/lno.11963>
- Duan, H., Xiao, Q., Qi, T., Hu, C., Zhang, M., Shen, M., Hu, Z., Wang, W., Xiao, W., Qiu, Y., Luo, J., & Lee, X. (2023). Quantification of diffusive methane emissions from a large eutrophic lake with satellite imagery. *Environmental Science & Technology*, 57(36), 13520-13529. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05631>
- Dupuis, A. P., & Hann, B. J. (2009). Climate change, diapause termination and zooplankton population dynamics: an experimental and modelling approach. *Freshwater Biology*, 54(2), 221-235. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02103.x>
- Erratt, K., Creed, I. F., Favot, E. J., Todoran, I., Tai, V., Smol, J. P., & Trick, C. G. (2022). Paleolimnological evidence reveals climate-related preeminence of cyanobacteria in a temperate meromictic lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 79(4), 558-565. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2021-0095>
- Foley, B., Jones, I. D., Maberly, S. C., & Rippey, B. (2012). Long-term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: effects of climate change and eutrophication. *Freshwater Biology*, 57(2), 278-289. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2011.02662.x>
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report

- of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, H. Lee and J. Romero Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34.  
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... & P. M. Midgley, Eds.). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Jeppesen, E., Meerhoff, M., Holmgren, K., González-Bergonzoni, I., Teixeira-de Mello, F., Declerck, S. A. J., De Meester, L., Sondergaard, M., Lauridsen, T. L., Bjerring, R., Conde-Porcuna, J. M., Mazzeo, N., Iglesias, C., Reizenstein, M., Malmquist, H. J., Liu, Z. W., Balayla, D., & Lazzaro, X. (2010). Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia*, 646(1), 73-90. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0171-5>
- Jeppesen, E., Mehner, T., Winfield, I. J., Kangur, K., Sarvala, J., Gerdeaux, D., Rask, M., Malmquist, H. J., Holmgren, K., Volta, P., Romo, S., Eckmann, R., Sandström, A., Blanco, S., Kangur, A., Stabo, H. R., Tarvainen, M., Ventelä, A. M., Sondergaard, M., . . . Meerhoff, M. (2012). Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. *Hydrobiologia*, 694(1), 1-39.  
<https://doi.org/10.1007/s10750-012-1182-1>
- Kang, M., Liu, L., & Grossart, H.-P. (2024). Spatio-temporal variations of methane fluxes in sediments of a deep stratified temperate lake. *iScience*, 27(4), Artikel 109520.  
<https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109520>
- Kröger, B., Selmeczy, G. B., Casper, P., Soininen, J., & Padisák, J. (2023). Long-term phytoplankton community dynamics in Lake Stechlin (north-east Germany) under sudden and heavily accelerating eutrophication. *Freshwater Biology*, 68(5), 737-751.  
<https://doi.org/10.1111/fwb.14060>
- Kumar, A., Mishra, S., Bakshi, S., Upadhyay, P., & Thakur, T. K. (2023). Response of eutrophication and water quality drivers on greenhouse gas emissions in lakes of China: A critical analysis. *Ecohydrology*, 16(1), Artikel e2483.  
<https://doi.org/10.1002/eco.2483>
- LaBrie, R., & Maranger, R. (2023). Predicting the presence of hypoxic hypolimnia in lakes at large spatial scales. *Limnology and Oceanography*, 69(2), 355-366.  
<https://doi.org/10.1002/lno.12488>
- Leon-Palmero, E. (2023). Understanding the fluxes of greenhouse gases in reservoirs under the inspiration of Margalef. *Limnetica*, 42(2), 303-328.  
<https://doi.org/10.23818/limn.42.22>
- Lewis, A. S. L., Lau, M. P., Jane, S. F., Rose, K. C., Be'eri-Shlevin, Y., Burnet, S. H., Clayer, F., Feuchtmayr, H., Grossart, H. P., Howard, D. W., Mariash, H., Martin, J. D., North, R. L., Oleksy, I., Pilla, R. M., Smagula, A. P., Sommaruga, R., Steiner, S. E., Verburg, P., . . . Carey, C. C. (2023). Anoxia begets anoxia: A positive feedback to the deoxygenation of temperate lakes. *Global Change Biology*, 30(1), Artikel e17046.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.17046>
- Lu, X. T., Lu, Y. L., Chen, D. L., Su, C., Song, S., Wang, T. Y., Tian, H. Q., Liang, R. Y., Zhang, M., & Khan, K. (2019). Climate change induced eutrophication of cold-water

- lake in an ecologically fragile nature reserve. *Journal of Environmental Sciences*, 75, 359-369. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.05.018>
- Ma, B., Wang, Y., Jiang, P., & Li, S. (2023). The influence of seasonal variability of eutrophication indicators on carbon dioxide and methane diffusive emissions in the largest shallow urban lake in China. *Water*, 16(1), Artikel 136. <https://doi.org/10.3390/w16010136>
- Ma, J., Yang, G., Zhao, X., Qin, B., Shan, K., Zhou, B., Zeng, Y., Wang, J., & Chen, J. (2024). Mutual feedback between algal blooming and global warming. *Journal of Oceanology and Limnology*. <https://doi.org/10.1007/s00343-023-3093-6>
- Ma, J. E., Loisel, S., Cao, Z. G., Qi, T. C., Shen, M., Luo, J. H., Song, K. S., & Duan, H. T. (2023). Unbalanced impacts of nature and nurture factors on the phenology, area and intensity of algal blooms in global large lakes: MODIS observations. *Science of the Total Environment*, 880, Artikel 163376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163376>
- Meerhoff, M., Audet, J., Davidson T. A., De Meester, L., Hilt, S., Kosten, S., Liu, Z., Mazzeo, N., Paerl, H., Scheffer M., & Jeppesen, E. (2022). Feedback between climate change and eutrophication: revisiting the allied attack concept and how to strike back. *Inland Waters*, 12(2), 187-204. <https://doi.org/10.1080/20442041.2022.2029317>
- Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R. W., Jeppesen, E., Mazzeo, N., ... Scheffer, M. (2011). Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*, 1(2), 101–105. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.5268/IW-1.2.359>
- Naturvårdsverket. (u.å). *Sveriges utsläpp och upptag av växthusgaser*. Hämtat den 3 juni 2024 från <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/sveriges-utslapp-och-upptag-av-vaxthusgaser/>
- Naturvårdsverket. (2020, januari). *Global utvärdering av biologisk mångfald och ekosystemtjänster: Sammanfattning för beslutsfattare* (Rapport 6917). <https://www.naturvardsverket.se/4ac548/globalassets/media/publikationer-pdf/6900/978-91-620-6917-9.pdf>
- Niemistö, J. R., & Horppila, J. (2007). The contribution of ice cover to sediment resuspension in a shallow temperate lake: Possible effects of climate change on internal nutrient loading. *Journal of Environmental Quality*, 36(5), 1318-1323. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0487>
- Nixon, S. W. (1995). Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41(1), 199–219. <https://doi.org/10.1080/00785236.1995.10422044>
- North, R. P., North, R. L., Livingstone, D. M., Köster, O., & Kipfer, R. (2013). Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology*, 20(3), 811-823. <https://doi.org/10.1111/gcb.12371>
- Ouyang, C., Qin, Y., Fang, P., & Liang, Y. (2024). Methane flux at the water-gas interface is influenced by complex interactions among phytoplankton, phosphorus inputs and methane-functional bacteria: A microcosm systems study. *Science of the Total Environment*, 912, Artikel 169373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169373>
- Plouviez, M., Fabisik, F., Procter, J., & Guieysse, B. (2024). Comparative assessment of N<sub>2</sub>O emissions from a New Zealand hypereutrophic lake against an oligotrophic reservoir.

- New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1-10.  
<https://doi.org/10.1080/00288330.2024.2331155>
- Robertson, D. M., & Rose, W. J. (2011). Response in the trophic state of stratified lakes to changes in hydrology and water level: potential effects of climate change. *Journal of Water and Climate Change*, 2(1), 1-18. <https://doi.org/10.2166/wcc.2011.026>
- Rogora, M., Buzzi, F., Dresti, C., Leoni, B., Lepori, F., Mosello, R., Patelli, M., & Salmaso, N. (2018). Climatic effects on vertical mixing and deep-water oxygen content in the subalpine lakes in Italy. *Hydrobiologia*, 824(1), 33-50.  
<https://doi.org/10.1007/s10750-018-3623-y>
- SCB. (2020). *Vattenanvändningen i Sverige 2020 M127 – Vattenuttag och vattenanvändning 2022:1*.  
[https://www.scb.se/contentassets/54f765e90041445397b0fdc85aa04424/mi0902\\_2020a01\\_br\\_mi27br2201.pdf](https://www.scb.se/contentassets/54f765e90041445397b0fdc85aa04424/mi0902_2020a01_br_mi27br2201.pdf)
- Schindler, D. W. (1974). Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implications for lake management. *Science*, 184(4139), 897-899.  
<https://doi.org/10.1126/science.184.4139.897>
- Smucker, N. J., Beaulieu, J. J., Nietch, C. T., & Young, J. L. (2021). Increasingly severe cyanobacterial blooms and deep water hypoxia coincide with warming water temperatures in reservoirs. *Global Change Biology*, 27(11), 2507-2519.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.15618>
- Spank, U., Bernhofer, C., Mauder, M., Keller, P. S., & Koschorreck, M. (2023). Contrasting temporal dynamics of methane and carbon dioxide emissions from a eutrophic reservoir detected by eddy covariance measurements. *Meteorologische Zeitschrift*, 32(4), 317-342. <https://doi.org/10.1127/metz/2023/1162>
- Sveriges miljömål. (u.å). *Miljömålen*. Naturvårdsverket. Hämtad den 23 maj 2024 från <https://www.sverigemiljomal.se/miljomalen/>
- Tang, Q. H., Peng, L., Yang, Y., Lin, Q. Q., Qian, S. S., & Han, B. P. (2019). Total phosphorus-precipitation and Chlorophyll *a*-phosphorus relationships of lakes and reservoirs mediated by soil iron at regional scale. *Water Research*, 154, 136-143.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.038>
- Trolle, D., Nielsen, A., Rolighed, J., Thodsen, H., Andersen, H. E., Karlsson, I. B., Refsgaard, J. C., Olesen, J. E., Bolding, K., Kronvang, B., Sondergaard, M., & Jeppesen, E. (2015). Projecting the future ecological state of lakes in Denmark in a 6 degree warming scenario. *Climate Research*, 64(1), 55-72. <https://doi.org/10.3354/cr01278>
- Wang, J., Wei, Z.-P., Chu, Y.-X., Tian, G., & He, R. (2022). Eutrophic levels and algae growth increase emissions of methane and volatile sulfur compounds from lakes. *Environmental Pollution*, 306, Artikel 119435.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119435>
- Wang, T., Zhumabieke, M., Zhang, N., Liu, C., Zhong, J., Liao, Q., & Zhang, L. (2023). Variable promotion of algae and macrophyte organic matter on methanogenesis in anaerobic lake sediment. *Environmental Research*, 237, Artikel 116922.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116922>
- Wang, Y., Peng, Y., Lv, C., Xu, X., Meng, H., Zhou, Y., Wang, G., & Lu, Y. (2023). Quantitative discrimination of algae multi-impacts on N<sub>2</sub>O emissions in eutrophic

- lakes: Implications for N<sub>2</sub>O budgets and mitigation. *Water Research*, 235, Artikel 119857. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119857>
- Zhang, J., Cao, L., Liu, Z., Wan, L., Cao, X., Zhou, Y., & Song, C. (2024). Relationship between eutrophication and greenhouse gases emission in shallow freshwater lakes. *The Science of the total environment*, 925, Artikel 171610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171610>
- Zhang, L., He, K., Wang, T., Liu, C., An, Y., & Zhong, J. (2022). Frequent algal blooms dramatically increase methane while decrease carbon dioxide in a shallow lake bay. *Environmental Pollution*, 312, Artikel 120061. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120061>
- Zhang, L., Xu, Y. J., & Li, S. (2023). Changes in CO<sub>2</sub> concentration and degassing of eutrophic urban lakes associated with algal growth and decline. *Environmental Research*, 237, Artikel 117031. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117031>
- Zhong, J., Yang, F., Zhang, M., Sun, C., Wang, S., Chen, Q., Wang, H., & Zhang, L. (2023). Water depth and productivity regulate methane (CH<sub>4</sub>) emissions from temperate cascade reservoirs in northern China. *Journal of Hydrology*, 626, Artikel 130170. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130170>
- Zhou, C., Zhou, M., Jia, R., Peng, Y., Zhao, F., Xu, R., Liang, S., Terada, A., Wang, G., Kinouchi, T., & Xu, X. (2023). Particulate organic carbon potentially increases methane emissions from oxic water of eutrophic lakes. *Science of the Total Environment*, 889, Artikel 164339. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164339>
- Zhou, M., Zhou, C., Peng, Y., Jia, R., Zhao, W., Liang, S., Xu, X., Terada, A., & Wang, G. (2023). Space-for-time substitution leads to carbon emission overestimation in eutrophic lakes. *Environmental Research*, 219, Artikel 115175. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115175>
- Zohary, T., & Ostrovsky, I. (2011). Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes. *Inland Waters*, 1(1), 47-59. <https://doi.org/10.5268/iw-1.1.406>



**LUNDS**  
UNIVERSITET

[WWW.CEC.LU.SE](http://WWW.CEC.LU.SE)  
[WWW.LU.SE](http://WWW.LU.SE)

Lunds universitet

Miljövetenskaplig utbildning  
Centrum för miljö- och  
klimatforskning  
Ekologihuset  
223 62 Lund