



Nr C 357

November 2018

Effekten av sjöfartens utsläpp av svavel och kväve på överskridande av kritisk belastning för försurning och för övergödning i Sverige

Filip Moldan, Sara Jutterström, Jana Moldanová, Johanna Stadmark och Maximilian Posch



I samarbete med International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Österrike.

Författare: Filip Moldan, Sara Jutterström, Jana Moldanová, Johanna Stadmark och Maximilian Posch

Medel från: Naturvårdsverket

Rapportnummer C 357

ISBN 978-91-88787-93-4

Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2018

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm

Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Förord

Denna rapport redovisar resultaten som har tagits fram inom projektet " Effekten av sjöfartens utsläpp av svavel och kväve på överskridande av kritisk belastning för försurning och för övergödning i Sverige", Naturvårdsverkets ärendenummer NV-07751-17. Projektet bygger på utsläppscenarier som har tagits fram inom BONUS SHEBA (Sustainable shipping and Environment of the Baltic Sea region) projektet av Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Hamburg, Tyskland.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	5
Summary	6
1 Bakgrund.....	7
2 Framtagning av depositionsdata för år 2012 och för år 2040 under olika sjöfartsscenarier	8
3 Deposition av svavel och kväve 2012 och 2040	10
4 Överskridande av kritisk belastning-Sverige	13
5 Slutsatser	17
6 Referenser.....	19

Sammanfattning

Sjöfarten är sektor som har fått ökande betydelse – relativt sett – som källa till nedfall av svavel (S) och kväve (N) över Sveriges landyta. Den framtida utvecklingen för sjöfarten inom Östersjöområdet förväntas innebära ökad trafik vilket kan innebära ett ökat tryck på miljön i området. Motverkande faktorer är införandet av SECA (Sulphur Emission Control Area) 2015, det kommande införandet av NECA (Nitrogen Emission Control Area) 2021 samt energieffektivisering av fartyg enligt energieffektivitetsdesign index (EEDI) som förpliktar nybyggda fartyg att blir allt energieffektivare.

Sjöfartens påverkan på överskridandet av kritisk belastning (CL) för försurning och eutrofiering för Sverige har undersökts för år 2012 och för ett antal scenarier för år 2040. Depositionen av S och N på grund av de olika scenarierna har tagits fram i samarbete med BONUS SHEBA-projektet (Sustainable shipping and Environment of the Baltic Sea region) vars syfte har varit att ta ett helhetsgrepp om emissioner från sjöfart och dess påverkan på miljön i ett antal viktiga områden, bland annat utsläppen av S och N till luft. Genom att sammanföra den resulterande depositionen från scenarierna med CL-data som används inom Luftvårdskonventionen (UNECE CLRTAP) har överskridandet av CL för aciditet och eutrofiering beräknats för Sverige och redovisats på länsnivå.

Överskridandet av CL för försurning med års 2012 deposition ligger på ca 5 % för Sverige, med ett genomsnittligt överskridande (AAE) på ca 3 eq/ha/a. Överskridandet varierar stort mellan respektive län med relativt stora överskridna areor för Sveriges sydvästra län jämfört med relativt lite försurningsproblem i norr. I de hårdast drabbade länen skulle arealen med CL överskridande minska med upp till 30% utan bidraget från sjöfarten. Den andel areal som är överskriden i Sverige med avseende på eutrofiering år 2012 är större (ca 14 %) än för försurning och även här är det stor skillnad mellan länen. Det finns 12 län med >90% överskridande av CL för övergödning och att det är också i dessa län bidraget från sjöfarten är störst i absoluta tal.

Införandet av SECA och NECA för Östersjön och Nordsjön, tillsammans med ökad energieffektivisering etc., gav mycket lägre sjöfartsemissioner och betydelsen för överskridande av CL för försurning minskade i framtiden trots förväntad ökad trafik. År 2040 förväntas CL för försurning vara överskridet på mellan 0% och 12% area på länsnivå samt på 2% area för hela landet, med eller utan bidrag från sjöfart. Sett till hela Sverige så sjunker arealen av överskridandet för CL för eutrofiering från 14% i 2012 till ca hälften i BAU-scenariot (Business As Usual - Pågå som vanligt) för 2040. Trots den positiva utvecklingen kommer den överskridna arean med avseende på eutrofiering ändå ligga på >50% för 8 län (BAU). Utan att NECA implementeras (BAU utan NECA) ökar antalet län med överskridande av CL för eutrofiering >50% till elva.

För försurning finns det relativt liten area med överskridande av CL kvar (ca 2 % av hela Sverige år 2040) och att minska denna genom åtgärder i en enskild sektor på ett betydande sätt är svårt. Det kommer krävas åtgärder i flera sektorer både inom och utanför Sverige, inklusive inom sjöfarten. För eutrofieringen är situationen annorlunda. År 2040 kommer det fortfarande finnas betydande areal med CL överskridande till vilken sjöfarten kommer att bidra på ett kännbart sätt. Möjligheten att väsentligt minska CL överskridandet genom ytterligare åtgärder inom sjöfartssektorn finns och borde utnyttjas.

Summary

Shipping is a sector that has grown in importance - relatively speaking - as a source of sulfur (S) and nitrogen (N) deposition over Sweden. Shipping in the Baltic Sea area is expected to increase in the future, which could mean increased pressure on the environment in the area. Counteracting factors are the introduction of the SECA (Sulfur Emission Control Area) 2015 and the coming introduction of the NECA (Nitrogen Emission Control Area) in 2021 and energy effectiveness of vessels according to the Energy Efficiency Design Index (EEDI) which oblige the newly build vessels to be more energy efficient.

The impact from shipping emissions on the exceedance of critical load (CL) for acidification and eutrophication in Sweden has been investigated for the year 2012 and for a number of scenarios for the year 2040. The deposition of S and N due to the various scenarios has been developed in cooperation with the Sustainable Shipping and Environment of the Baltic Sea region (BONUS SHEBA) project, whose purpose has been to take a holistic approach to emissions from shipping and its impact on the environment in a number of important areas, including S and N emissions. By combining the resulting deposition from the scenarios with the CL-data used in the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE CLRTAP), the exceedance of CL for acidity and eutrophication has been calculated for Sweden and reported at the county level.

The exceeded area for CLs for acidification with the 2012 deposition is about 5% for Sweden, with an average exceedance (AAE) of approximately 3 eq /ha/a, with large differences between the counties with relatively large exceeded areas for Sweden's southwestern counties. If the contribution from shipping is removed, the exceeded area would decrease by up to 30% in the most affected counties. The proportion of area exceeded in Sweden with respect to eutrophication in 2012 is greater (about 14%) than for acidification and in this case there are big differences between the counties too. There are 12 counties with > 90% area exceeded for eutrophication and these counties also have the greatest contribution from shipping in absolute numbers.

The introduction of SECA and NECA for the Baltic Sea and the North Sea, together with increased energy efficiency etc., resulted in much lower shipping emissions and their contribution to the exceedance of CL for acidification decreased. This is despite the expected increase in shipping traffic. In 2040, CLs for acidification are expected to be exceeded on an area between 0% and 12% at county level and on 2% of the area for the whole country, with or without contribution from shipping. For Sweden, the exceeded area of the CLs for eutrophication decreases from 14% in 2012 to about half in the BAU scenario for 2040. Nevertheless, the exceeded area of CL for eutrophication will still be > 50% for 8 counties (BAU). Without implementing NECA (BAU without NECA), the number of counties that exceeds CL for eutrophication > 50% goes up to eleven.

For acidification, there is a relatively small area with exceedances of CLs (about 2% of the whole of Sweden in 2040) and reducing it by measures in a single sector would be difficult. There will be measures needed in several sectors, both inside and outside Sweden, including the shipping sector. For eutrophication, the situation is different. By 2040, there will still be significant area with CL exceedances which shipping will contribute to. The possibility of significantly reducing the CL exceedances through further measures in the shipping sector is and should be utilized.

1 Bakgrund

Utsläppen av svavel har minskat kraftigt sedan 80-talet och så även utsläppen av kväve, dock i mindre omfattning än för svavel. Utsläppsminskningarna varierar också kraftigt mellan olika sektorer. Utsläppen av ammoniak från jordbruket är ett exempel på en stor utsläppskälla som är svår att åtgärda och det är också huvudförklaringen till att utsläppen av NH₃ endast har minskat med knappt 20 % sedan 1990 (sett till hela Europa). Sjöfarten är en annan sektor som har fått ökande betydelse – relativt sett – som källa till nedfall av svavel och kväve över Sveriges landyta. Införande av SECA (Sulphur Emission Control Area) har lett till en minskning av svavelhalt i marinbränsle från max 1,5 viktprocent före 2010, till <1% fram till 2015. Från januari 2015 skärptes kravet ytterligare till max 0,1 %. Hur stor betydelse för minskningen av svavelnedfall som införandet av SECA har haft för Sverige är inte helt klarlagt, men eftersom sjöfartens bidrag till svaveldeposition i kustnära delar av landet är betydande förväntas SECA ha en kännbar positiv effekt. Dessa områden, framförallt i södra delen av landet, är dessutom hårt försurningsdrabbade, så det är där minskningar av nedfall behövs som mest. IMO (International Maritime Organization) har beslutat att Östersjön och Nordsjön även blir utsläppskontrollområden för kväveoxider (NECA). Regleringar för utsläpp av NO_x från sjöfart, satta genom IMO, är indelade i tre emissionsstandarder (Tiers), där Tier III är den strängaste och ska gälla inom NECA-områden. Införandet av regelverket kommer att ske 2021 men kommer enbart gälla nya fartyg vilket kommer att innebära en långsam minskning av utsläppen.

BONUS SHEBA projektet (Sustainable shipping and Environment of the Baltic Sea region) tar ett helhetsgrepp om emissioner från sjöfart och dess påverkan på miljön i ett antal viktiga områden, bland annat utsläppen av svavel och kväve till luft. Projektet som koordineras av IVL innefattar ett avsnitt som handlar om hur sjöfarten i Östersjön påverkar landarean i Östersjöns avrinningsområde. BONUS SHEBA har tagit fram beräkningar på hur stor roll de maritima utsläppen av svavel och kväve spelar för överskridandet av kritisk belastning för aciditet och eutrofiering i området runt Östersjön.

Baserat på emissions- och depositionsscenarioer framarbetade inom BONUS SHEBA-projektet har sjöfartens nutida (2012) samt framtida (2040) påverkan för överskridande av kritisk belastning för försurning och för eutrofiering i Sverige beräknats. Scenarioarbetet har innefattat att inkludera utsläppen från sjöfart i Nordsjön i emissionsscenarioerna och att utöka modelleringsområdet till att omfatta hela Sveriges yta.

Genom att sammanföra den resulterande depositionen från scenarierna med kritisk belastningsdata från det senaste "Call for data" 2017 inom Luftvårdskonventionen har överskridandet av kritisk belastning för aciditet och eutrofiering beräknats för Sverige ner på länsnivå. Kritiskbelastningsberäkningarna har utförts i samarbete med CCE (Coordination Centre for Effects).

Delar av resultaten har presenterats inom ramen för den senaste FU (Fördjupad utvärdering) för miljömålet "Bara naturlig försurning" (Kapitel 4, Naturvårdsverket, in prep.). Där visas överskridande av kritisk belastning för försurning och för övergödning för 2012 med och utan sjöfart samt resultaten för BAU (Business As Usual) år 2040 som inkluderar införandet av NECA. Resultat från projektet har också presenterats på två UNECE CLRTAP-möten: "33rd Task Force of the ICP Modelling & Mapping meeting and Joint Expert Group on Dynamic Modelling" (18 - 20 april 2018, Bern, Schweiz) samt på "Fourth Joint Session of the EMEP Steering Body and the Working Group on Effects" (10 - 14 september 2018, Geneve, Schweiz).

Resultaten som har tagits fram inom detta projekt bygger på en kedja av modellberäkningar som går att dela upp i två huvudkategorier: framtagning av deposition i samarbete med BONUS SHEBA projektet och beräkning av kritiskbelastningsöverskridande för Sverige och för alla länder runt Östersjön i samarbete med CCE.

2 Framtagning av depositionsdata för år 2012 och för år 2040 under olika sjöfartsscenarier

Deposition av kväve och svavel har simulerats med hjälp av en atmosfärkemisk transportmodell CMAQ (Community Multiscale Air Quality) (Byun and Schere et al.2006), som har använts för luftkvalitetsmodellering i BONUS SHEBA. Som input använde modellen meteorologin beräknad av COSMO-CLM version 5.0 som drevs av REA-Interim re-analys (Rockel et al., 2008) för år 2012. År 2012 bedömdes som "normalår" för Östersjöområdet i en dataanalys som genomfördes i BONUS SHEBA. Samma meteorologi användes både för 2012 och för 2040 för att möjliggöra en direkt jämförelse av emissionsscenarier. Modellen kördes i 3 nästade domäner med olika upplösningar, 64 km × 64 km för hela kontinenten, 16 km × 16 km för Central och Norra Europa och 4 km × 4 km för Östersjöregionen. Resultat från domänen med 16 km × 16 km upplösning användes för detta projekt. Som randvillkor för kemiska fält i modellsimuleringar användes resultat från hemisfärisk modellering med SILAM modell med 0.5° × 0.5° som levererats till BONUS SHEBA av FMI.

Landbaserade emissioner beräknades med emissionsmodellen SMOKE for Europe (SMOKE-EU, Bieser 2011) version 2.4. Dessa emissioner baseras på nationella summor tillhandahållna av EMEP (www.ceip.at) och emissioner från punktkällor hämtades från EPER (the European Pollution Emission Register). Scenarioemissioner för år 2040 baserades på förändringar av emissioner av luftföroreningar i fråga mellan år 2010 och 2040 från östersjöländer, differentierade för olika emissionssektorer, enligt ECLIPSE v.5 'Current Legislation' (CLE) Bas scenario (Amann et al., 2014)

Emissioner från sjöfarten i Östersjön och Nordsjön beräknades med STEAM-modellen (Ship Traffic Emission Assessment Model, Jalkanen et al 2009; 2012; Johansson et al 2013). Dessa baseras på positionsdata från enskilda fartyg inhämtade från AIS (Automatic Identification System)-data och inkluderar alla handelsfartyg större än 300 GT. Modellen beräknar emissioner av svaveloxider, kväveoxider, CO₂, CO, kolväten samt partiklar och deras komponenter sulfat, aska, organisk och oorganisk kol i hög temporär och rumslig upplösning.

CMAQ modellen levererar data i betydligt högre tidsupplösning (timvis) än vad som används för kritiskbelastningsberäkningarna (årsvis). Depositionsdata har därför aggregerats till årliga summor (2012 och 2040 för respektive scenario) och har en rumslig upplösning på 16x16 km. Modellen arbetar med CB05 kemisk mekanism som innehåller alla de vanligaste svavel- och kvävespecier som förekommer och både våt och torr deposition ingår i beräkningarna, och modellen är i den meningen helt jämförbar med EMEP modellen (Tabell 1).

Tabell 1. S- och N-ämnen som ingår i depositionen från CMAQ respektive EMEP.

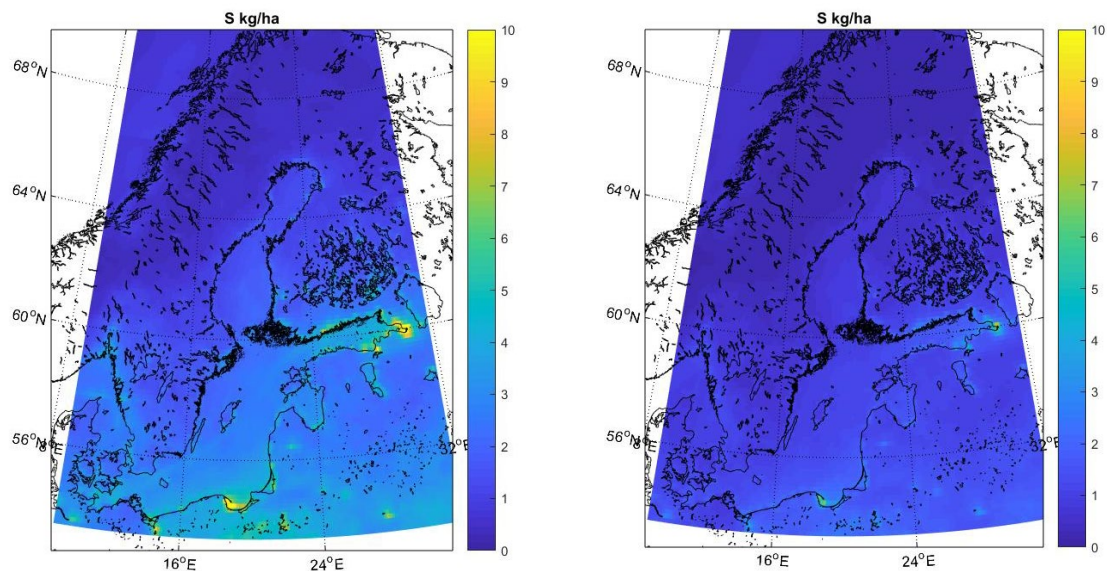
CMAQ	EMEP
HNO ₃ , HNO ₄ , HONO, N ₂ O ₅ , NH ₃ , NO ₂ , NO ₃ ⁻ , NO, OPAN, PAN, partikulär NO ₃ ⁻ och NH ₄ ⁺	HNO ₃ , HO ₂ NO ₂ , HONO, NO ₃ ⁻ (fine and course mode), NH ₃ , NH ₄ ⁺ (course mode), NO ₂ , PAN, MPAN
H ₂ SO ₄ , partikulär SO ₄ ²⁻ , SO ₂	SO ₂ , SO ₄ ²⁻

Flera av de modellerade föroreningarna har stor betydelse för atmosfärskemiska reaktioner, men är inte kvantitativt viktiga för depositionen. De största andelarna av den totala depositionen av N utgörs av HNO₃, NH₃, samt partikulärt NH₄⁺ och NO₃⁻ (tillsammans ca 95 % av den totala årliga depositionen) med något större betydelse av NH₃ och NH₄⁺ år 2040 jämfört med 2012. För S-depositionen utgör H₂SO₄ en minimal del och det är istället SO₂ och partikulärt SO₄²⁻ som utgör nästan all S-deposition i ungefärligt lika stora andelar.

Följande scenarier framtagna inom BONUS SHEBA konsortiet har utvärderats inom detta projekt:

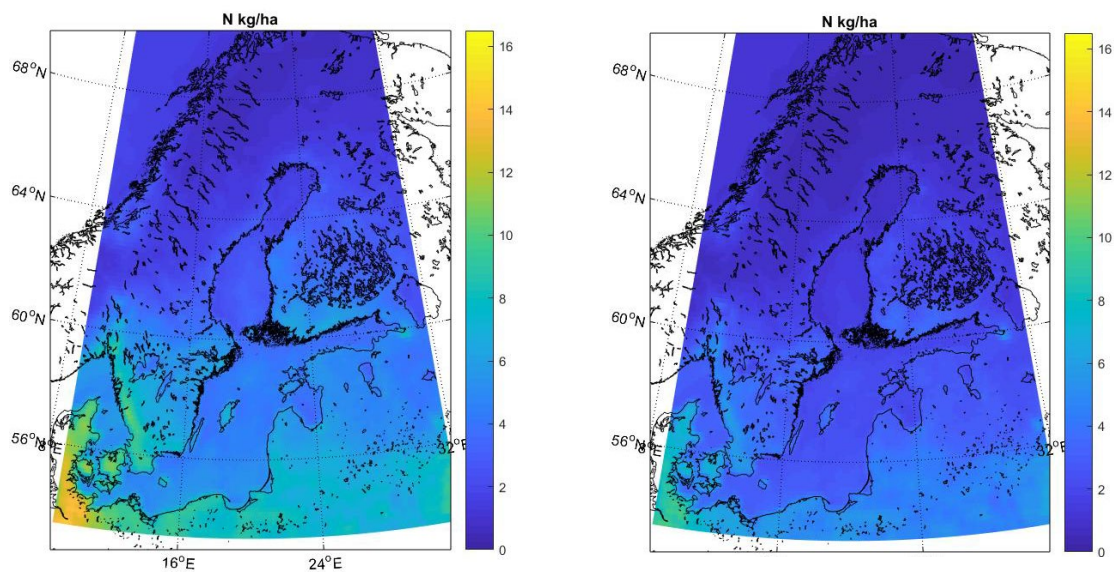
- 2012 med och utan sjöfart
- 2040 BAU: Business as usual med utveckling i sjöfart när det gäller trafikvolym och tonnage av olika fartygstyper i samma takt som nuvarande trend, energieffektivisering i sjöfarten enligt Kalli et al. (2013) som innebär väsentlig minskning av sjöfartens bränsleförbrukning och implementering av NECA 2021
- 2040 BAU-NoNECA: Samma som BAU men utan implementering av NECA: nybyggda fartyg ska hålla gränsvärden satta enligt Tier II
- 2040 EEDI: Lägre energieffektivisering jämfört med BAU, den är istället satt efter IMOs föreskrifter. NECA implementeras 2021.
- 2040 NoSHIP: utan sjöfart

3 Deposition av svavel och kväve 2012 och 2040



Figur 1. Total S-deposition för 2012 (vänster) och 2040 BAU-scenario (höger).

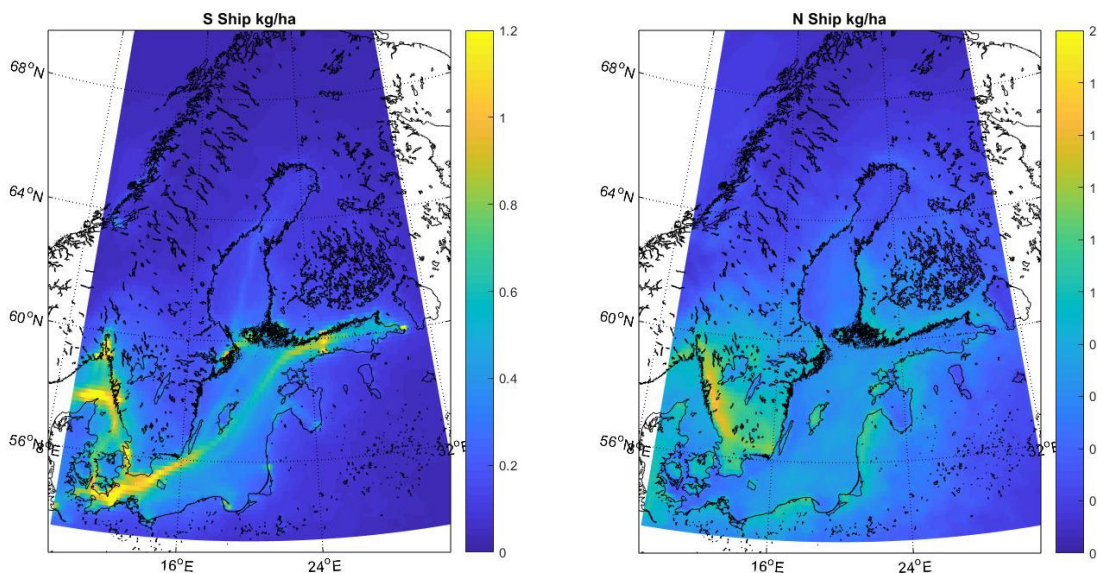
I Sverige har svaveldepositionen minskat kraftigt sedan de högsta depositionsåren för ca 30 till 40 år sedan och ligger nu med några undantag under 3 kg S per hektar och år, i norra delen av landet under 1 kg S per hektar och år (Figur 1). Enligt de framtidsscenarioer som tagits fram inom detta projekt kommer den totala svaveldepositionen att minska ytterligare till 2040 (exempel BAU, Figur 1 till höger).



Figur 2. Den totala kvävedepositionen för 2012 (vänster) och 2040 BAU-scenariet (höger).

För kvävedepositionen 2012 finns det en tydlig gradient med den högsta depositionen i sydväst (ca 8-10 kg N/ha och år) och avtagande norrut. I alla scenarierna för 2040 ser man en klar minskning av den totala kvävedepositionen (exempel BAU scenariot, Figur 2 till höger).

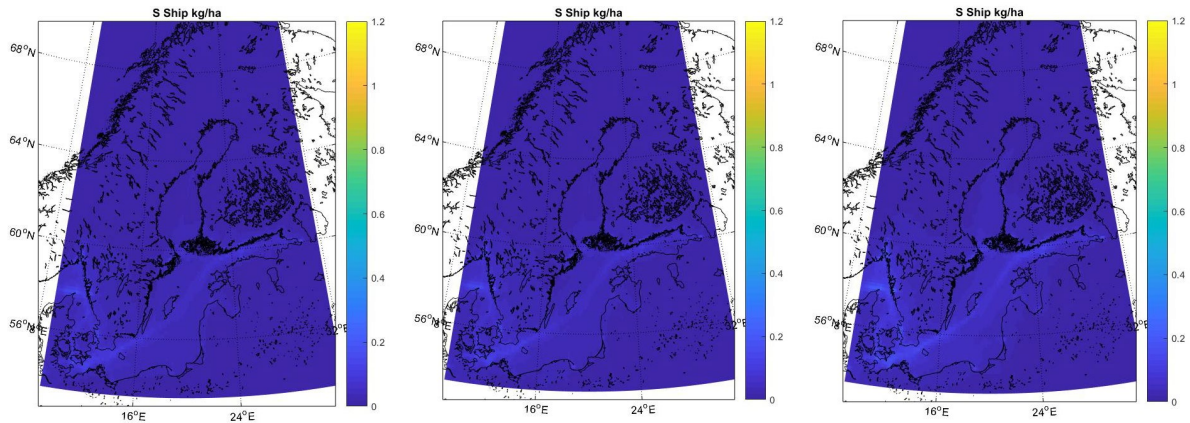
I följande figurer 3 – 5 presenteras sjöfartens bidrag till den svavel- och kvävedepositionen för de olika scenarierna. Observera skillnaden i skalan jämfört med figurerna 1 och 2.



Figur 3. Svavel- (tv) och kvävedeposition (th) med ursprung från sjöfart år 2012. Sjöfartens bidrag är beräknat som skillnaden mellan scenariot utifrån de faktiska utsläppen och ett hypotetiskt scenario där sjöfarten har tagits bort.

Depositionen av svavel från sjöfart är högst i fartygslederna och kustområdena (Figur 3). Huvudanledningen till depositionen i fartlederna är att SO_2 är vattenlöslig, särskild i alkaliskt havsvatten, och deponeras relativt snabbt nära utsläppet genom deposition på vattenytan och vid nederbörd genom urtvättning till regndropparna. Det faktum att sjöfartsplymer emitteras på låg höjd och att gränsskiktet över havet mestadels är neutralt och därför möjliggör effektivt utbyte mellan plymer och vattenytan bidrar till detta. Det största bidraget från sjöfarten till den totala svaveldepositionen på land är längs kusterna i syd och sydväst. Längre från sjöfartslederna har en del SO_2 oxiderats och depositionen över kustnära områden består av både SO_2 och sulfat.

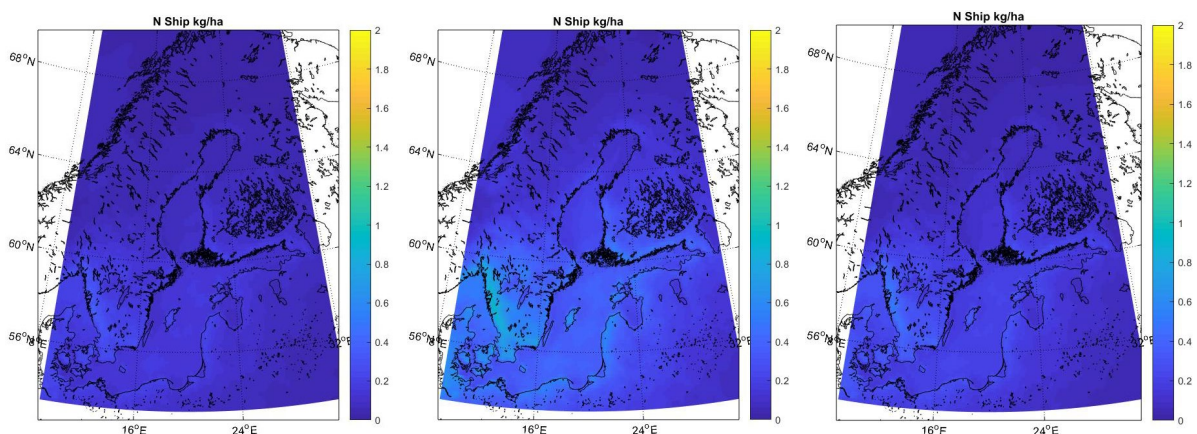
För kväve kan man se ett annat mönster med mycket högre deposition över land. Anledningen är att depositionshastigheten av NO_2 är mycket låg och kvävedepositionen domineras helt av oxiderade former. Detta innebär att NO_2 först måste genomgå oxidation i atmosfären innan den deponeras, till största delen som partikulär nitrat, en del även som HNO_3 eller organiska nitrater. Eftersom nitrat har mindre förmåga att lösas i nederbördspartiklar än sulfat kan vi tyda de olika depositionsmönstren av svavel och kväve med den höga depositionen av kväve längs kusten som deposition av framför allt partikulär nitrat. Detta kan bero delvis på mer effektiv deposition av partiklar över land än över havsytan, dels kan HNO_3 som bildats under transport av sjöfartsemissioner över havet reagera i kustområden med NH_3 från jordbruket och bilda ytterligare partikulär nitrat.



Figur 4. Beräknat svavelnedfall med ursprung från sjöfart för 3 scenarier år 2040 (BAU till vänster, BAU-NoNECA mitten och EEDI till höger).

Vid jämförelse mellan Figur 3 och 4 ser man en tydlig minskning i svaveldeposition med ursprung från sjöfartsemissioner från 2012 och 2040 huvudsakligen tack vare införande av krav på låg svavelhalt i marinbränsle innanför SECA i 2015 (sänkt från max 1% till 0.1%) och 0.5% utanför SECA från och med 2020 (sänkt från 3.5%). År 2040 kommer den totala nedfallet av svavel och i mindre utsträckning av kväve ligga långt under 2012-års nivåer (Figur 1 och 2). Även skillnaderna mellan 2040 scenarierna är i absoluta tal små och depositionen från sjöfart är i likhet med deposition från andra källor liten, förutsatt hög efterlevnad av de införda utsläppskraven. Införandet av NECA påverkar inte emissioner av svavel i scenariot och har därför en mycket liten ytterligare inverkan på svaveldepositionen, dock kan man se en något större skillnad för EEDI-scenariot som innebär en lägre minskning av energieffektiviseringen och med det förbrukningen av det lågsvavliga bränslet, men fortfarande är skillnaderna mycket små.

Om man jämför sjöfartens tillskott på svaveldepositionen för Hallands län, som är länet med högst överskridande, så är den 5 till knappt 10 gram S/ha för de tre scenarierna 2040, vilket är en klar minskning från 2012 då bidraget låg på drygt 300 gram S/ha för samma område.



Figur 5. Beräknat kvävenedfall med ursprung från sjöfart för 3 scenarier år 2040 (BAU till vänster, BAU-NoNECA mitten och EEDI till höger).

Även för depositionen av kväve kan man se en tydlig minskning i depositionen till 2040 (Figur 3 och Figur 5). Skillnaden mellan scenarierna för 2040 är inte stor jämfört med skillnaden mellan 2012 och 2040, men den största skillnaden utgör som förväntat införandet av NECA. Även för överskridande av kritisk belastning för eutrofiering är Halland det län med högst överskridande och här innebär införandet av NECA en minskning av kvävedepositionen för 2040 med knappt ett halvt kilo N/ha. Skillnaden i kvävedeposition mellan 2012 och 2040 BAU för Hallands del är drygt ett kilo N/ha.

4 Överskridande av kritisk belastning-Sverige

Kritisk belastning (CL) är ett mått på hur mycket ett visst ekosystem kan belastas utan att det leder till långsiktiga skadliga effekter. CLRTAP (FN:s luftkonvention) använder konceptet som ett effektbaserat kriterium för att sätta gränser för utsläpp av svavel- och kväveföreningar. Varje land inom konventionen får själv bestämma vilka ekosystem som är skyddsvärda och de kriterier som gäller. För Sveriges del så beräknas kritisk belastning för försurning utifrån tillståndet i ytvatten. Kriteriet för risk för skador baseras på den högsta acceptabla skillnaden i syraneutraliseringskapaciteten (ANC, acid neutralising capacity) som räknas om till pH-minskningen sedan 1860. För kritisk belastning för eutrofiering så är den satt för att skydda kvävekänsliga arter i Natura2000-områden.

Genom att koppla kritiskbelastningskartor med deposition fås överskridandekartor som visar var och hur mycket den aktuella depositionen överskrider den kritiska belastningen. Överskridande av kritisk belastning ingår också i det svenska miljömålsarbetet. Miljömålet "Bara naturlig försurning" har en precisering där målet är att nedfallet av luftburna svavel- och kväveföreningar inte ska överskrida den kritiska belastningen för försurning av mark och vatten. Deposition av kväve har också påverkan på möjligheten att nå miljömålet "Ingen övergödning".

För beräkningarna av överskridande av CL för de olika sjöfartsscenarierna har kritiskbelastningsberäkningar från det senaste "Call for data" 2017 inom Luftvårdskonventionen använts. Överskridandeberäkningar gjordes i samarbete med CCE (Coordination Centre for Effects). I tabellerna 2 – 4 presenteras dels hur stor area som överskrids, dels det genomsnittliga ackumulerande överskridandet (AAE). Dessa två mått på överskridande ger tillsammans en bild hur stor area som riskerar att drabbas av skador och hur mycket nedfallet överskrider vad de drabbade områdena tål. Inom detta projekt gjordes beräkningar för år 2012 och sedan för flera sjöfartsscenarier år 2040. Skillnader mellan scenarierna år 2040 ligger endast i sjöfarten då andra faktorer så som meteorologi och utsläppen från andra källor än från båtar inte skiljer sig åt mellan scenarierna.

Värt att notera är att CL-överskridandet beräknas på den area som har angivits som skyddsvärd till Luftkonventionen. För eutrofiering exempelvis så representerar arean i tabellen 3 Natura2000-områden med kvävekänsliga arter. För försurning borträknas bland annat jordbruksmark och urbana områden. Tanken bakom är att ifall kritisk belastning inte överskrids på de känsligaste områdena då löper inte heller resten av landet risk för att drabbas av försurning eller övergödning på grund av luftföroreningar.

Tabell 2. Överskridande av kritisk belastning för försurning i svenska län för 2012

Län	km2	Utan sjöfart		Med sjöfart	
		%	eq/ha/a	%	eq/ha/a
	EcoAraci	Ex%aci	AAEaci	Ex%aci	AAEaci
Västra Götalands län	16804	17.5	11.8	21.4	20.7
Värmlands län	18395	21.4	9.2	26.8	12.6
Hallands län	4399	23.1	19.8	30.4	40.2
Jämtlands län	50016	0.0	0.0	0.1	0.0
Dalarnas län	29176	2.0	0.5	2.2	0.7
Skåne län	6043	3.0	2.8	3.6	3.5
Jönköpings län	8809	7.5	4.0	8.9	5.5
Kronobergs län	9238	19.2	11.5	23.9	16.3
Örebro län	8842	13.3	7.1	16.3	9.0
Västerbottens län	59297	0.7	0.2	0.8	0.2
Gävleborgs län	17437	1.0	0.1	1.3	0.2
Blekinge län	2564	0.0	0.0	0.0	0.0
Östergötlands län	9306	6.0	3.8	6.6	4.5
Västernorrlands län	24039	0.9	0.2	1.0	0.3
Norrbottnens län	101787	0.4	0.1	0.5	0.1
Kalmar län	7941	9.6	5.1	11.5	6.7
Västmanlands län	3729	7.6	2.1	10.0	3.0
Södermanlands län	5507	10.4	6.3	11.0	7.6
Uppsala län	6241	0.0	0.0	0.0	0.0
Stockholms län	4055	1.5	1.4	1.5	1.8
Gotlands län	1603	0.0	0.0	1.3	0.4
Sverige	395226	4.0	2.1	4.9	3.2

Överskridandet av kritisk belastning för försurning med 2012 deposition ligger på ca 5 % för Sverige, med ett genomsnittligt AAE på ca 3 eq/ha/a, motsvarande ca 0.5 kg svavel/ha/år ifall försurningen orsakas av svavelnedfallet (och ca 0.4 kg kväve/ha/år ifall försurningen skulle ha orsakats av kvävednedfallet). Dessa värden är väl i linje med beräkningarna gjorda av CCE inom rapporteringen till Luftkonventionen med EMEPs nedfallsberäkningar som bas. Den rapporteringen omfattar inte år 2012, men för år 2020 blev motsvarande överskridande (försurning) 3 % av Sveriges yta (den skyddsvärda delen) och AAE på 1 eq/ha/år. Man ser dock en stor skillnad i överskridandet för respektive län, med relativt stora överskridna areor för Sveriges sydvästra län. Skillnaderna i överskridande består dels av depositionsmonstret över Sverige där de sydvästra delarna mottar en högre deposition än norra Sverige och kan också bero på skillnader i känslighet. Områden med tunt jordlager och svårvittrade mineraler är känsligare för försurning och klarar mindre deposition innan den kritiska belastningen är uppnådd, d.v.s. har lägre kritisk belastning.

Vid jämförelse av resultaten för 2012 med och utan sjöfart (Tabell 2) kan man se att med sjöfarten ökar CL-överskridande (aciditet) för hela Sverige från 4 till 4.9% areal. Det kan tolkas som att utan bidrag från sjöfart skulle det kvarvarande problemet med överskridande av CL för försurning minska med ca en femtedel. I de hårdast drabbade länen bidrar sjöfarten med nästan 30 % av den överskridande arealen.

Tabell 3. Överskridande av kritisk belastning för eutrofiering i svenska län för 2012

Län	km2	Utan sjöfart		Med sjöfart	
		%	eq/ha/a	%	eq/ha/a
	EcoAreat	Ex%eut	AAEeut	Ex%eut	AAEeut
Västra Götalands län	1465	98.1	152.3	98.3	225.2
Värmlands län	882	83.2	56.8	90.0	109.4
Hallands län	290	99.9	300.9	99.9	399.6
Jämtlands län	6216	0.0	0.0	0.0	0.0
Dalarnas län	2552	1.6	0.3	5.5	2.2
Skåne län	881	94.8	218.0	95.4	276.4
Jönköpings län	842	98.9	129.1	100.0	193.3
Kronobergs län	204	98.7	188.3	100.0	271.7
Örebro län	235	84.5	65.4	97.0	120.1
Västerbottens län	11152	0.0	0.0	0.2	0.0
Gävleborgs län	303	7.2	0.9	25.8	7.6
Blekinge län	252	97.1	147.3	97.1	210.5
Östergötlands län	1273	95.8	76.4	99.4	123.7
Västernorrlands län	372	0.0	0.0	0.0	0.0
Norrbottnens län	29486	0.0	0.0	0.0	0.0
Kalmar län	829	91.1	96.4	96.2	147.0
Västmanlands län	116	55.3	53.2	59.5	78.1
Södermanlands län	447	96.0	120.9	99.8	171.4
Uppsala län	526	60.8	26.9	75.0	58.7
Stockholms län	179	86.3	104.3	93.4	155.9
Gotlands län	186	94.2	90.0	99.1	149.6
Sverige	58688	13.6	17.7	14.4	26.3

Andelen areal som är överskriden i Sverige med avseende på eutrofiering är större (ca 14 %) än för försurning. Även här är det stor skillnad mellan länen och den relativt låga procentsatsen för hela landet beror på de stora arealer i norra Sverige som inte drabbas av övergödning. I det sammanhanget är det viktigt att poängtera att det trots det finns 12 län med >90% överskridande av CL för övergödning och att det är också i dessa län bidraget från sjöfarten är störst i absoluta tal. För några av länen innebär sjöfarten en stor ökning i överskriden areal (Tabell 3), men för de flesta innebär sjöfarten inte någon större ökning i själva arean. Detta betyder dock inte att sjöfarten inte är signifikant, sett till AAE så innebär sjöfarten ett betydande bidrag till överskridandet av kritisk belastning av eutrofiering.

Tabell 4. Överskridande av kritisk belastning för aciditet i svenska län för 2040

Län	km2	Utan sjöfart		BAU med NECA		BAU utan NECA		EEDI	
		%	eq/ha/a	%	eq/ha/a	%	eq/ha/a	%	eq/ha/a
	EcoAraci	Ex%aci	AAEaci	Ex%aci	AAEaci	Ex%aci	AAEaci	Ex%aci	AAEaci
Västra Götalands län	16804	10.2	3.7	10.5	4.0	10.5	4.0	10.5	4.1
Värmlands län	18395	11.1	2.8	11.3	2.9	11.3	2.9	11.3	3.0
Hallands län	4399	11.9	5.1	11.9	5.4	11.9	5.4	11.9	5.5
Jämtlands län	50016	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dalarnas län	29176	0.7	0.1	0.7	0.1	0.7	0.1	0.7	0.1
Skåne län	6043	2.5	1.0	2.5	1.1	2.5	1.1	2.5	1.1
Jönköpings län	8809	3.4	1.2	3.4	1.2	3.7	1.2	3.7	1.2
Kronobergs län	9238	8.8	3.2	8.8	3.3	8.8	3.3	8.8	3.4
Örebro län	8842	8.6	2.4	8.6	2.5	8.6	2.5	8.6	2.6
Västerbottens län	59297	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1
Gävleborgs län	17437	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Blekinge län	2564	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Östergötlands län	9306	4.1	1.4	4.1	1.4	4.1	1.4	4.1	1.5
Västernorrlands län	24039	0.6	0.1	0.6	0.1	0.6	0.1	0.6	0.1
Norrbottnens län	101787	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
Kalmar län	7941	4.7	1.3	5.1	1.3	5.1	1.3	5.1	1.3
Västmanlands län	3729	1.9	0.4	1.9	0.4	1.9	0.4	1.9	0.4
Södermanlands län	5507	5.8	2.2	5.8	2.3	5.8	2.3	5.8	2.3
Uppsala län	6241	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stockholms län	4055	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Gotlands län	1603	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sverige	395226	2.1	0.6	2.1	0.7	2.2	0.7	2.2	0.7

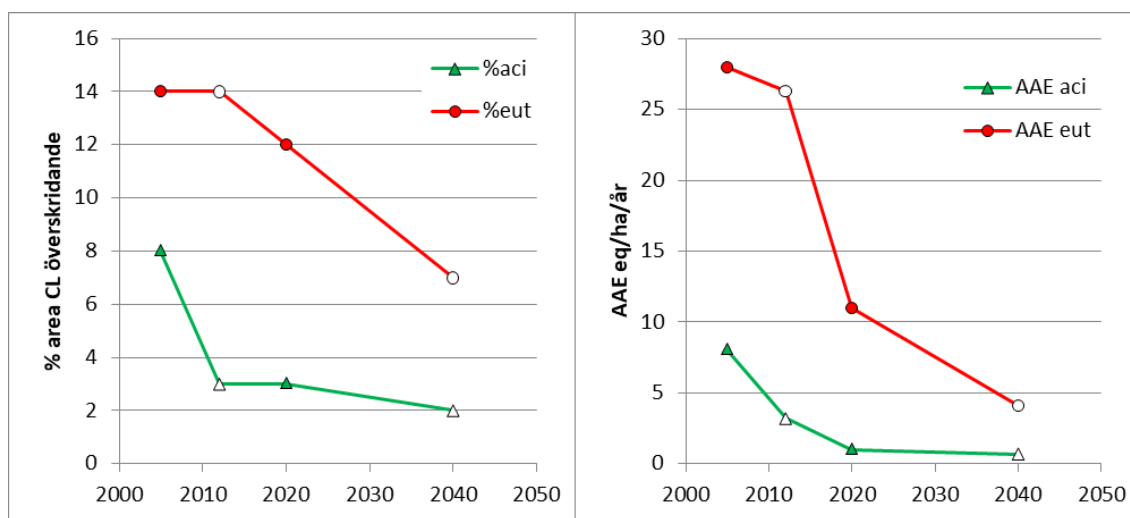
Överskridandet av kritisk belastning av försurning för 2040 har minskat med drygt hälften jämfört med 2012 (Tabell 4, Figur 6). För 2040-scenarierna kan man se endast en mycket liten påverkan av sjöfarten i ett fåtal län och ingen större skillnad mellan scenarierna.

Tabell 5. Överskridande av kritisk belastning för eutrofiering i svenska län för 2040

Län	km2	Utan sjöfart		BAU med NECA		BAU utan NECA		EEDI	
		%	eq/ha/a	%	eq/ha/a	%	eq/ha/a	%	eq/ha/a
	EcoAreut	Ex%eut	AAEeut	Ex%eut	AAEeut	Ex%eut	AAEeut	Ex%eut	AAEeut
Västra Götalands län	1465	53.6	33.2	59.6	43.7	73.3	61.9	61.9	48.1
Värmlands län	882	0.3	0.0	5.0	0.2	29.5	3.3	9.7	0.5
Hallands län	290	91.7	105.8	94.3	126.0	97.1	157.7	94.3	134.2
Jämtlands län	6216	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dalarnas län	2552	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Skåne län	881	87.6	76.6	87.9	89.3	89.3	108.9	87.9	94.2
Jönköpings län	842	51.5	11.1	77.1	19.0	96.1	36.7	84.8	23.1
Kronobergs län	204	87.2	42.9	87.6	57.0	87.7	79.7	87.6	62.7
Örebro län	235	3.6	0.6	7.1	1.1	54.8	5.9	8.2	1.4
Västerbottens län	11152	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gävleborgs län	303	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Blekinge län	252	56.9	20.4	63.8	29.9	86.8	45.7	66.1	33.9
Östergötlands län	1273	7.0	1.1	10.0	2.0	46.4	7.1	21.7	2.7
Västernorrlands län	372	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Norrbottnens län	29486	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Kalmar län	829	38.0	7.3	40.9	11.8	61.8	21.6	48.1	13.9
Västmanlands län	116	38.7	3.3	39.2	6.5	39.5	11.4	39.5	7.7
Södermanlands län	447	69.0	10.5	78.8	17.7	89.8	31.4	89.3	21.0
Uppsala län	526	6.0	0.9	6.6	1.4	7.7	2.4	7.0	1.6
Stockholms län	179	37.9	14.1	52.9	19.7	66.8	30.7	61.4	22.3
Gotlands län	186	17.1	3.7	34.5	7.3	65.7	17.1	39.4	9.3
Sverige	58688	5.9	3.2	6.9	4.1	9.5	5.9	7.6	4.5

Sett till hela Sverige så sjunker arealen av överskridandet för kritisk belastning för eutrofiering från 14% i 2012 till ca hälften i BAU-scenariot för 2040 (Figur 6).

Beräkningar av kritiskbelastningsöverskridande framtagna för åren 2012 och 2040 inom detta projekt baseras på nedfallsmodellering som har tagits fram oberoende av de EMEP beräkningar som ligger till grund för beräkningar inom Luftkonventionen. Kritisk belastning som användes inom detta projekt är den som Sverige och andra länder rapporterar till Luftkonventionen. Därför beror eventuella skillnader i CL överskridande enbart på skillnader i deposition och inte på skillnader i själva CL. En annan uppsättning av modeller behövdes för att kunna modellera på detaljnivå just bidraget från sjöfarten. Våra överskridandeberäkningar för åren 2012 och 2040 är jämförbara med de officiella beräkningarna för åren 2005 och 2020 (Figur 6) vilket tyder på att depositionen modellerat med CMAQ stämmer överens med EMEP beräkningar.



Figur 6. Tidsutveckling av överskridande av kritisk belastning (försurning och eutrofiering). Åren 2005 och 2020 (fyllda symboler) är från CCE rapporten (Hettelingh et al., 2017), 2012 och 2040 (öppna symboler) från detta projekt.

5 Slutsatser

Införandet av SECA och NECA för Östersjön och Nordsjön, tillsammans med ökad energieffektivisering och andra förändringar i transportvolymerna etc., innebär en minskning av svavel och kväve-depositionen från sjöfart på upp till 0.5 kgS/ha/år och mellan 0.2 till 1.5 kgN/ha/år beräknat per län för år 2040 jämfört med 2012. Bidraget från sjöfarten till den totala depositionen var mellan 8% och 21% på länsnivå för svavel och mellan 14% och 19% för kväve år 2012. Fram till 2040 förväntas det sjunka till mellan 5% till 7% för kväve och mellan 2% till 4% för svavel.

Implementering av SECA har inneburit en betydande minskning av S-emissioner från sjöfarten och dess påverkan på överskridande av kritisk belastning. Innan införandet av SECA var överskridande av CL för försurning mellan 0% och 23% på länsnivå och 4% för hela Sverige utan emissioner från sjöfarten och mellan 0% och 30%, och 5% area för hela Sverige inklusive sjöfarten

(beräknat för år 2012). Därmed har bidraget från sjöfarten orsakat ungefär en femtedel av överskridandet av CL för försurning som fanns 2012. Efter införandet av SECA och NECA och andra åtgärder blev trots förväntad ökad trafik sjöfartsemissionerna mycket lägre och betydelsen för överskridande av CL för försurning minskade. År 2040 förväntas CL för försurning vara överskridet på mellan 0% och 12% area på länsnivå samt på 2% area för hela landet, med eller utan bidrag från sjöfart.

Överskridandet av CL för eutrofiering drabbar mycket större del av Sverige jämfört med överskridandet för försurning både 2012 och 2040. Beräknat för 2012 fanns det 12 län med överskridande på >90% av arean varav fyra län med överskridande på 100%. Med så pass stor överskriden area bidrar emissioner från sjöfarten snarare till att CL överskrids med större marginal (upp till 1,4 kg N/ha/år på länsnivå) än till ökning av arealen i den mest drabbade delen av landet. Fram till 2040 förväntas CL överskridande för eutrofiering sjunka med i genomsnitt ca hälften, men ändå ligga på >50% area för 8 län (BAU med NECA). Utan att NECA implementeras (BAU utan NECA) ökar antalet län med överskridande av CL för eutrofiering >50% till elva.

Åtgärder för att minska utsläppen av svavel och kväve från sjöfarten som har vidtagits och som förväntas att träda i kraft de kommande åren har en positiv inverkan på minskningen av överskridande av kritisk belastning. För försurning finns det relativt liten area med överskridande av CL kvar (ca 2% av hela Sverige år 2040) och att minska denna genom åtgärder i en enskild sektor på ett betydande sätt är svårt. Det kommer krävas åtgärder i flera sektorer både inom och utanför Sverige, inklusive inom sjöfarten. För eutrofieringen är situationen annorlunda. År 2040 kommer det fortfarande finnas betydande areal med CL överskridande till vilken sjöfarten kommer att bidra på ett kännbart sätt. Emissioner från sjöfarten kommer bidra med upp till 0,3 kg N/ha/år för BAU med NECA och med upp till 0,8 kg N/ha/år för BAU utan NECA år 2040, beräknat på länsnivå. Även här kommer det krävas åtgärder i flera sektorer för att uppnå inget överskridande.

NECA reglerna som införs 2021 endast kommer att gälla nybyggda fartyg vilket innebär, med en medellivslängd på ca 25 år för fartyg, att betydande effekter kommer att ses först ca 15 år efter införandet. En nationell lagstiftning som skulle snabba upp installationen av reningsteknik för NOx på fartyg, lik NOx-fonden i Norge, har en stor potential att minska utsläppen långt tidigare, sannolikt redan under nästa årtionde. En annan aspekt som bör beaktas är det nyligen uppsatta IMO-målet att halvera CO₂-utsläppen fram till år 2050 jämfört med utsläppen 2008. Beslutet kom i april 2018 och finns inte med i varken BONUS-SHEBA eller i detta projekts beräkningar. Den energieffektivisering som kommer att krävas för att uppnå detta mål är mera långtgående än det som har antagits inom BAU-scenariot. Möjligheten att väsentligt minska CL överskridandet genom ytterligare åtgärder inom sjöfartssektorn finns och borde utnyttjas.

6 Referenser

Amann, M.; Borken-Kleefeld, J.; Cofala, J.; Hettelingh, J.-P. et al. (2014), 'The Final Policy Scenarios of the EU Clean Air Policy Package, TSAP Report #11, version 1.1a, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Bieser, J.; Aulinger, A.; Matthias, V., Quante, M. & Builtjes, P. (2011), 'SMOKE for Europe - adaptation, modification and evaluation of a comprehensive emission model for Europe', *Geoscientific Model Development* 4(1), 47-68.

Byun, D. & Schere, K. (2006), 'Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System', *Applied Mechanics Reviews* 59, 51-77.

Hettelingh J-P, Posch M, Slootweg J (eds.) (2017) European critical loads: database, biodiversity and ecosystems at risk, CCE Final Report 2017, Coordination Centre for Effects, RIVM Report 2017-0155, Bilthoven, Netherlands

Jalkanen, J. P.; Brink, A.; Kalli, J.; Pettersson, H.; Kukkonen, J. & Stipa, T. (2009), 'A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area', *Atmospheric Chemistry and Physics* 9(23), 9209-9223.

Jalkanen, J. P.; Johansson, L.; Kukkonen, J.; Brink, A.; Kalli, J. & Stipa, T. (2012), 'Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide', *Atmospheric Chemistry and Physics* 12(5), 2641--2659.

Johansson, L.; Jalkanen, J. - P.; Kalli, J. & Kukkonen, J. (2013), 'The evolution of shipping emissions and the costs of regulation changes in the northern EU area', *Atmospheric Chemistry and Physics* 13(22), 11375-11389.

Kalli, J.; Jalkanen, J.-P.; Johansson, L. & Repka, S. (2013), Atmospheric emissions of European SECA shipping: long-term projections, *WMU Journal of Maritime Affairs* 12, 129-145, doi:10.1007/s13437-013-0050-9.

Rockel, B.; Will, A. & Hense, A. (2008), 'The Regional Climate Model COSMO-CLM(CCLM)', *Meteorologische Zeitschrift* 17(4), 347--348.

