

Effekten af svovlreduktion i skibsbrændstof på koncentrationerne af svovldioxid

Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 2. oktober 2015

Thomas Ellermann

Institut for Miljøvidenskab

Rekvirent:
Miljøstyrelsen
Antal sider: 14

Faglig kommentering:
Ole Hertel
Kvalitetssikring, centret:
Vibeke Vestergaard



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Indhold

1	Effekten af svovlreduktion i skibsbrændstof på koncentrationerne af svovldioxid	4
1.1	Regulering af svovlindhold i skibsbrændstof	4
1.2	Målemetoder og modelberegninger	5
1.3	Udviklingstendens i koncentration af svovldioxid	7
1.4	Indflydelse fraudbrud i lavaområdet Holuhraun på Island i 2014	11
1.5	Sammenfatning og konklusion	13
1.6	Litteratur	14

1 Effekten af svovlreduktion i skibsbrændstof på koncentrationerne af svovldioxid

Nordsøen og Østersøen er begge udpegede til Sulphur Emission Control Areas (SECA's) under den Internationale Søfartsorganisations (IMO) MARPOL konvention (International Convention for the Prevention of Pollution From Ships). Målet med SECA er at sikre en reduktion af udledningerne af svovl fra skibstrafikken i disse områder og derigennem mindske skibsemissionernes indvirkning på luftkvaliteten i de omkring liggende lande. Den 1. januar 2015 trådte et nyt trin i reguleringen i kraft inden for SECA, hvor det tilladte indhold af svovl i skibsbrændstof blev reduceret med en faktor 10. Da denne regulering antages at have ført til en stor reduktion i udledningerne fra skibstrafikken, har Miljøstyrelsen anmodet DCE om at undersøge om reduktionen kan registreres i måledata fra overvågningen af koncentrationerne af svovldioxid på de danske målestationer under NOVANA (Det nationale program for overvågning af vandmiljøet og naturen). DCE har belyst dette gennem at:

- analysere udviklingstendenser for svovldioxid frem til og med maj 2015 målt på målestationerne Anholt, Tange og Risø,
- sammenholde disse udviklingstendenser med viden om ændringerne i emissionerne,
- og ved at sammenholde udviklingstendenserne med resultater fra modelberegninger af skibsemissionernes andel af svovldioxidkoncentrationerne i Danmark.

Resultaterne, som præsenteres i nærværende notat, viser et tydeligt fald i koncentrationerne af svovldioxid (et fald i størrelsesordenen 50-60 %) i forbindelse med indførelse af de skrappe krav til indholdet af svovl i skibsbrændstof.

1.1 Regulering af svovlindhold i skibsbrændstof

Indtil 2006 har der i praksis ikke været nogen regulering af indholdet af svovl i tung fuelolie til skibstrafik. I forbindelse med MARPOL Annex VI og EU's direktiv 2005/33 kom der en regulering af det tilladte svovlindhold inden for SECA-områderne, hvilket omfatter Østersøen (fra 2006) og Nordsøen (fra 2007), og dermed dækker alle danske farvandsområder. Reguleringen af det tilladte indhold af svovl i skibsbrændstof inden for SECA er foretaget i flere trin. Disse trin er angivet i Tabel 1.1.

Table 1.1. Oversigt over reguleringen af svovlindhold i skibsbrændstof (tung fuelolie)

Lovgivning	Tung fuelolie		
	S-%	Ikrafttrædelsesdato	
EU-direktiv 93/12	Ingen		
EU-direktiv 1999/32	Ingen		
EU-direktiv 2005/33	SECA - Østersøen	1,5	11.08.2006
	SECA - Nordsøen	1,5	11.08.2007
	Udenfor SECA	Ingen	
EU-direktiv 2012/33	SECA's	1,0	18.06.2014
	SECA's	0,1	01.01.2015
	Udenfor SECA	3,5	18.06.2014
	Uden for SECA	0,5	01.01.2020
MARPOL Annex VI	SECA - Østersøen	1,5	19.05.2006
	SECA - Nordsøen	1,5	21.11.2007
	Udenfor SECA	4,5	19.05.2006
MARPOL Annex VI amendments	SECA's	1,0	01.07.2010
	SECA's	0,1	01.01.2015
	Udenfor SECA	3,5	01.01.2012
	Udenfor SECA	0,5	01.01.2020*

- Afhængigt af resultatet af en revision, der skal gennemføres i 2018 om tilgængeligheden af den nødvendige brændselolie, kan datoen udskydes til den 1. januar 2025.

Inden disse reguleringer trådte i kraft og udenfor SECA har det typiske skibsbrændstof indeholdt omkring 2,7 % svovl (Cofala et al. 2007).

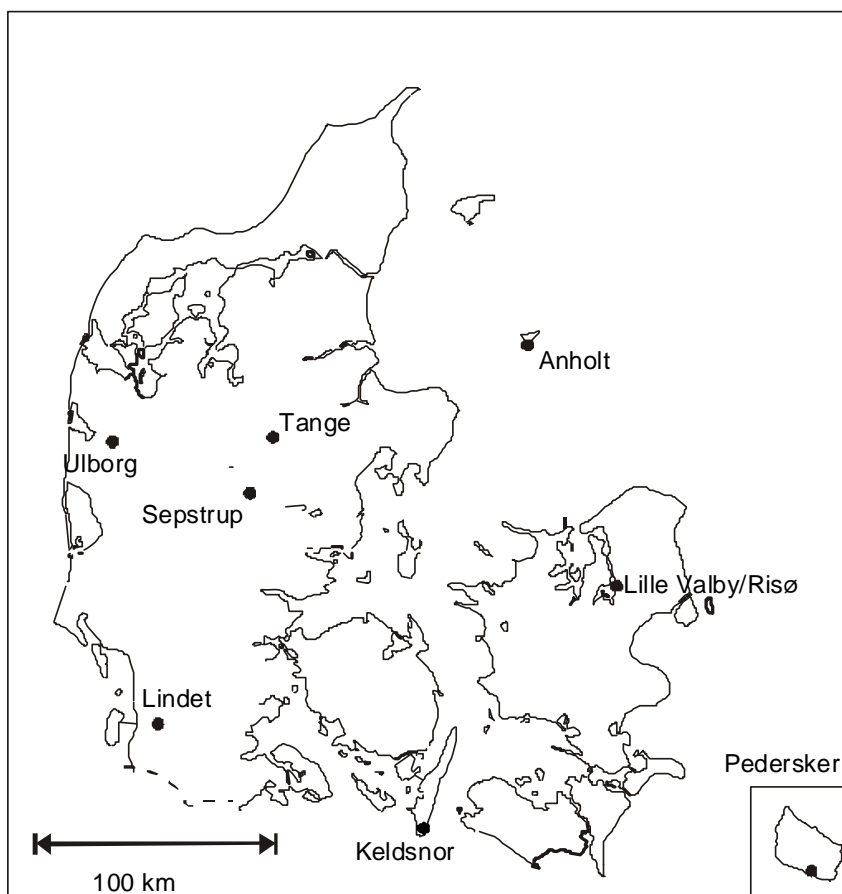
Udledningen af svovl frigivet fra forbrænding af skibsbrændstof sker næsten udelukkende i form af svovldioxid, mens kun en mindre andel udledes i form af partikulært sulfat. Endvidere er udledningen proportional med svovlprocenten i skibsbrændstof, hvilket betyder, at der ved årsskiftet 2014/2015 kan forventes en udledning af svovldioxid fra skibstrafik i Nordsøen og Østersøen, som er omkring 10 gange mindre efter årsskiftet end før årsskiftet, hvis alle skibe overholder de gældende regler.

1.2 Målemetoder og modelberegninger

Målingerne af svovldioxid foretages med filterpack-metoden, hvor svovldioxid opsamles på et filter imprægneret med kaliumhydroxid, som anvendes til kemisk at binde svovldioxiden til filtret. Prøverne opsamles på døgnbasis til bestemmelse af døgnmiddelkoncentrationer på de tre målestationer ved Risø og Tange og på Anholt (figur 1.1). Ved Ulborg måles normalt også svovldioxid med filterpack-metoden. Imidlertid blev denne målestation væltet i december 2013 af stormen Bodil og har herefter skullet genetableres. Derfor er der ingen målinger i 2014, hvilket er begrundelsen for, at der ikke er anvendt resultater fra Ulborg i denne undersøgelse.

Det skal bemærkes, at resultaterne fra 2015 endnu ikke er fuldt kvalitetskontrollerede, da det på nuværende tidspunkt ikke har været

muligt at gennemføre dette fuldt ud for data for 2015. Det forventes dog ikke, at denne kvalitetskontrol vil rykke på konklusionerne præsenteret i dette notat, men der vil kunne komme mindre ændringer i de præsenterede middelkoncentrationer.



Figur 1.1. De faste større målestationer i 2011-2015. Måling af svovldioxid med filterpack-metoden anvendes kun på Risø, Tange, Ulborg og Anholt. Ulborg er ikke inddraget i denne undersøgelse, da stationen var ude af drift i 2014.

I Delprogram for luft under NOVANA (Ellermann et al., 2015) foretages endvidere målinger af svovldioxid med monitorer på gademålestationerne i Aalborg og på H.C. Andersens Boulevard i København. Koncentrationsniveauet for svovldioxid er i dag så lavt, at disse målinger ikke kan anvendes til at bestemme middelkoncentrationerne af svovldioxid. Dette skyldes, at koncentrationen af svovldioxid i dag ligger langt under detektionsgrænsen for denne type måleinstrumenter. Derfor indgår disse målinger ikke i denne undersøgelse.

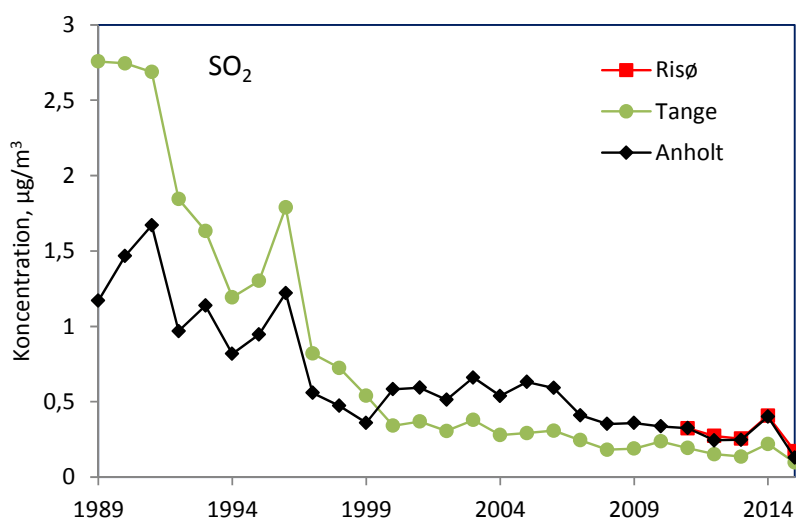
I undersøgelsen af effekten af de reducerede udledninger af svovldioxid fra skibstrafik indgår tillige modelberegninger af den andel af den luftbårne svovldioxid, som stammer fra skibstrafik. Disse beregninger er foretaget med luftforureningsmodellen kaldet DEHM (Dansk Eulersk Hemisfærisk Model). DEHM er en Eulersk model, hvor emission, luftbårne transport, kemisk omsætning og afsætning af luftforurening beregnes i et tredimensionelt net af gitterceller. Emissionen af luftforureningskomponenterne er baseret på de nationale emissionsopgørelser, og den luftbårne transport er beregnet på basis af informationer om de meteorologiske forhold i det aktuelle år, som der laves modelberegninger for. Beregningen af andelen af svovldi-

oxid fra skibstrafik foretages ved at "slukke" for udledningen af svovldioxid fra skibstrafik i modellen. Ved at sammenligne resultaterne fra denne beregning med en beregning, hvor alle kilder indgår, kan andelen af svovldioxid, som stammer fra skibstrafik, bestemmes.

1.3 Udviklingstendens i koncentration af svovldioxid

1.3.1 Årsmiddelværdier

Ændringen i årsmiddelmålingerne for svovldioxid siden 1989 kan ses i figur 1.2. De største fald i koncentrationerne fandt sted i 1990'erne. Faldet i koncentrationerne skete betydeligt hurtigere ved Tange end på Anholt. Dette skyldes effekt af reduktioner i de landbaserede kilder, som påvirker Tange mere end Anholt. De landbaserede kilder blev reguleret via nationale og internationale tiltag i 1980'erne og 1990'erne, mens udledningerne fra skibstrafikken først blev reguleret i Østersøen fra maj 2006 og fra Nordsøen i august 2007. Som det fremgår af målinger var Tange i 1990'erne i høj grad påvirket af de landbaserede udledninger. Anholt, med sin placering midt i Kattegat, ligger længere væk fra de større landbaserede kilder, men omvendt ligger øen tæt ved de stærkt trafikerede skibsruiter i Kattegat. Dette er baggrunden for at udledningerne af svovldioxid fra skibstrafik har spillet en større rolle for koncentrationsniveauerne på Anholt end det har været tilfældet for Tange. Forskellen i tidspunktet for regulering af landbaserede kilder og skibstrafik ses derfor i, hvornår faldet i svovldioxidkoncentrationerne slår igennem på de to målestationer. Koncentrationerne af svovldioxid var således størst på Tange i 1990'erne, mens koncentrationerne efter 2000 har været størst på Anholt.



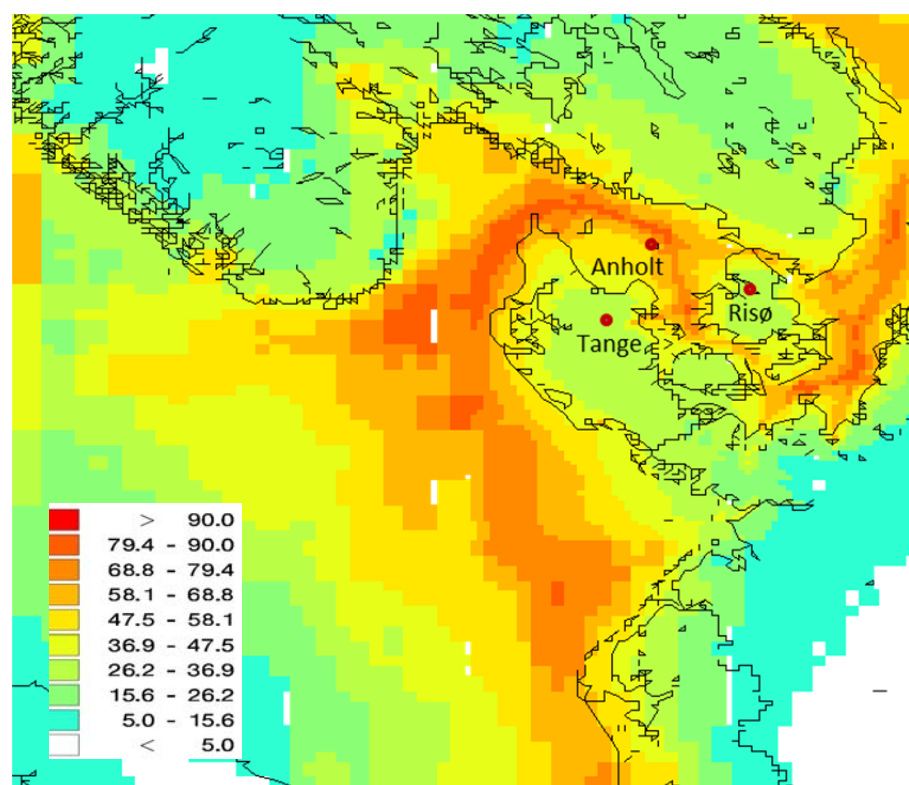
Figur 1.2. Årsmiddelmålinger af svovldioxid angivet som $\mu\text{g S/m}^3$. Data for 2015 dækker kun perioden fra januar til maj.

I perioden fra 2000 til 2006 var der et relativt stabilt koncentrationsniveau på både Anholt og Tange, hvorefter der ses et relativt stort fald fra 2006 til 2007, hvor faldet er størst på Anholt og lidt mindre på Tange. Dette fald i koncentrationerne er sammenfaldende med den første regulering af udledningerne fra skibstrafik, hvor indholdet af svovl i skibsbrændstof er reduceret fra omkring 2,7 % i gennemsnit til et maksimalt tilladt indhold på 1,5 % efter den 1. januar 2007.

Faldet i koncentrationsniveauerne mellem 2006 og 2007 er større på Anholt end ved Tange. Dette hænger igen sammen med andelen af svovldioxid fra skibstrafik. Figur 1.3 viser resultater fra modelberegninger af andelen af svovldioxid relateret til skibstrafik i 2007. På Anholt stammer omkring to tredjedele af svovldioxiden fra skibstrafik, mens det kun er omkring en tredjedel ved Tange. Derfor må det forventes, at faldet i svovldioxid er størst på Anholt og noget mindre ved Tange.

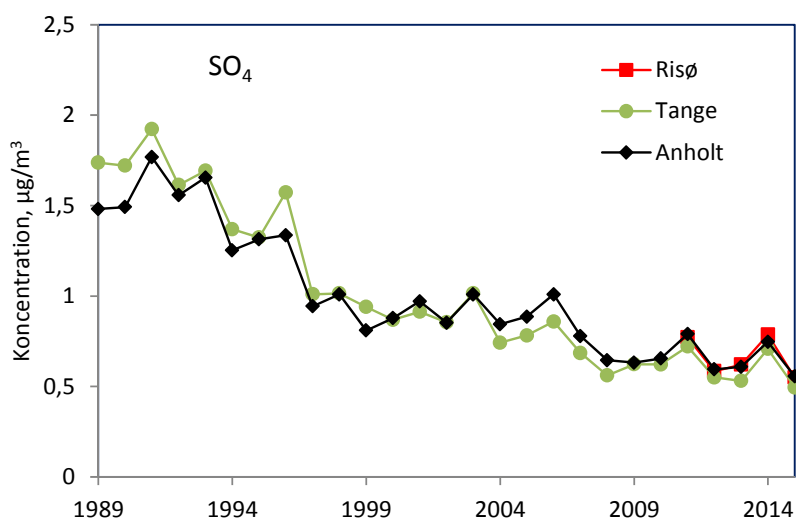
I 2010 indførtes andet trin i reguleringen af svovl i skibsbrændstof. Denne gang var der tale om en reduktion i det tilladte svovlindhold i fuelolie til skibstrafik fra 1,5 % til 1 %, som trådte i kraft 1. marts 2010. På Anholt ses et svagt fald i årsmiddelkoncentrationerne mellem 2009 og 2010, mens der registreres en mindre stigning i niveauerne ved Tange. Omkring 2010 ses derfor ikke noget sammenfald mellem de målte ændringer i koncentrationerne og den forventede nedgang i udledningerne. Det er den mindste nedsættelse af det tilladte indhold af svovl i skibsbrændstof, hvilket sammen med de naturlige variationer i de meteorologiske forhold må antages at være årsagen til at det forventede fald i udledningerne ikke slår igennem i målingerne.

Den 1. januar 2015 kom det tredje trin i nedsættelsen af svovludledningerne. Denne gang var der tale om et fald på en faktor 10 i det tilladte svovlindhold i fuelolie til skibstrafik fra 1,0 % til 0,1 %. Som det ses af figur 1.2 er koncentrationerne på alle målestationer mindre end i 2014 og de foregående fire år, hvilket viser, at nedsættelsen af svovl i skibsbrændstof har haft effekt. Faldet er størst på Anholt, hvilket underbygger, at der er tale om et fald som følge af reduktion i udledningen af svovldioxid fra skibstrafik.



Figur 1.3. Resultat fra modelberegning af andelen (%) af svovldioxidkoncentrationen, som i 2007 stammede fra skibstrafik (Olesen et al., 2009).

En lille del (omkring 5 %) af svovlindholdet i skibsbrændstof udledes direkte som partikulært sulfat. Den udledte svovldioxid vil også via kemiske reaktioner i atmosfæren omdannes til sulfat. Figur 1.4 viser udviklingstendenserne for sulfat, hvor der til forskel fra svovldioxid ses et meget ens fald i koncentrationerne på alle målestationer. Dette skyldes, at levetiden for sulfat i atmosfæren er lang, og dermed kommer størstedelen af sulfat på de danske målestationer langtransport fra kilder langt fra Danmark. Derfor træder effekten af reduktionerne i udledningerne af svovl i skibsbrændstof i Nordsøen og Østersøen ikke tydeligt frem i målingerne på de danske målestationer.

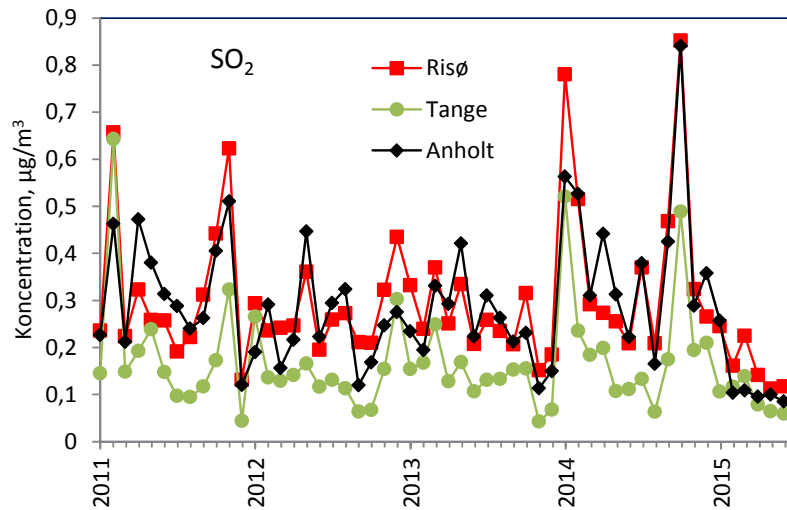


Figur 1.4. Årsmiddelkoncentrationer af partikulært sulfat angivet som $\mu\text{g S/m}^3$. Data for 2015 dækker kun perioden fra januar til maj.

1.3.2 Månedsmiddelværdier

Data for 2015 i figur 1.2 omfatter kun målinger foretaget i de første fem måneder af 2015. Da der er en vis årstidsvariation i udledningerne af svovldioxid, så vil en sammenligning af middelværdierne for januar-maj 2015 med årsmiddelværdierne for de tidligere år give fejl i forhold til vurdering af effekten af reduktionen af svovlindhold i skibsbrændstof. En sammenligning baseret på middelværdier for perioden fra januar til maj giver derfor en bedre vurdering af effekten.

På figur 1.5 ses udviklingstendensen for månedsmiddelværdierne for 2011 og frem. For alle tre målestationer ses et markant fald i månedsmiddelværdierne efter årsskiftet 2014/2015. Faldet er mest markant for Anholt, hvor der i 2015 måles de laveste værdier siden 2011. Det mindste fald ses for Tange, hvor der i de foregående år har været tilsvarende lave månedsmiddelværdier som i 2015. Den større ændring i niveauerne for Anholt sammenlignet med de øvrige målestationer skyldes den større andel, som skibsudledningerne udgør af koncentrationerne af svovldioxid på Anholt.



Figur 1.5. Udviklingstendens for månedsmiddelværdierne for svovldioxid. Koncentrationerne er angivet som $\mu\text{g S/m}^3$.

På figur 1.5 ses endvidere, at der ofte kan være relativt stor forskel mellem månedsmiddelværdierne. Oftest skyldes variationerne mellem månederne de naturlige variationer i de meteorologiske forhold. Dette er for eksempel tilfældet for de høje værdier i januar 2014. Beregninger af luftmassernes bevægelser (NILU, 2015; se endvidere kapitel 1.4 for yderligere forklaring omkring disse beregninger) viser, at der formentligt er tale om en episode, hvor transport af luft fra Polen i gennem nogle dage har givet anledning til de høje værdier. Polen har fortsat en væsentligt højere udledning af svovldioxid end de øvrige omgivende lande (EMEP, 2015).

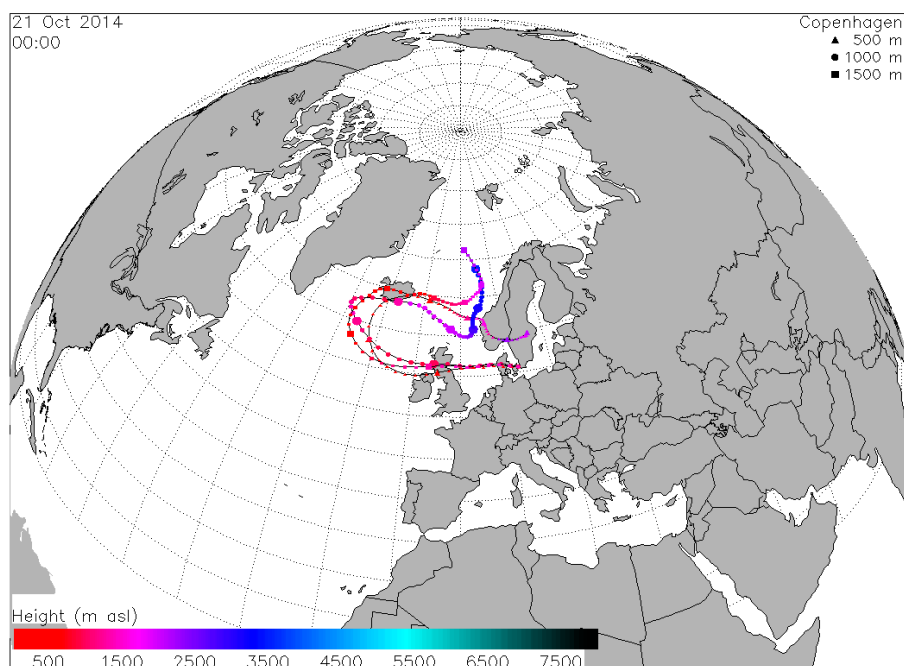
Når ændringerne i 2015 vurderes til at skyldes andre årsager end de meteorologiske forhold er det på grund af følgende:

- Koncentrationerne har aldrig været så lave på Anholt tidligere.
- Mønsteret er forandret og det ser ud til, at de naturlige variationer i 2015 svinger omkring et betydeligt lavere niveau.
- Forholdet mellem målestationerne er ændret. Hvor Anholt tidligere har svinget med koncentrationer, som generelt lå væsentligt højere end Tange, så ligger Anholt i 2015 mere på niveau med Tange.

I tabel 1.2 ses middelværdierne for januar-maj for perioden fra 2011 til 2015. Det fremgår tydeligt, at middelværdierne for alle tre målestationer er væsentligt lavere i 2015 end de tidligere fire år. Faldet har været størst for Anholt, hvor middelkoncentrationen er faldet med $0,2 \mu\text{g/m}^3$ set i forhold til middelværdien for perioden 2011-2014, svarende til et fald på 60 %. Faldet er omkring 50 % på de to øvrige målestationer, hvor andelen af svovldioxid fra skibstrafik er noget mindre end på Anholt.

Et godt bud på kilden til disse usædvanligt høje koncentrationer kunne være de store udledninger af svovldioxid fra udbrud i lavaområdet Holuhraun på Island (Sara Barsotti, 2015). Udbruddet varede fra august 2014 til februar 2015 (Vedur, 2015). I Norge og Tyskland er der observeret episoder med usædvanligt høje svovldioxidkoncentrationer i september 2014, og det er i den forbindelse blevet vurderet, at udledningerne på Island er kilden til disse høje episoder. Dette er med til at underbygge, at transport af svovldioxid fra Holuhraun, Island til Europa kan finde sted, og at dette kan være årsagen til de høje koncentrationer observeret i oktober og november 2014 i Danmark.

Figur 1.6 viser såkaldte trajektorieberegninger, hvor det beregnes, hvor luftmasserne i København på en given dag er kommet fra. Disse beregninger viser, at luftmasserne, som ankommer til København den 21. oktober kl. 00.00, tidligere har passeret hen over Island. De målte middelværdier dækker fra kl 8.00 til kl 8.00 den efterfølgende dag, så trajektorien svarer til døgnmiddelværdien for den 20. oktober, hvor der blev målt meget høje koncentrationer på alle målestationerne (figur 1.5). Tilsvarende trajektorieberegninger for de andre toppe i oktober og november 2014 viser ligeledes transport af luft fra Island til Danmark. Udledningerne af svovldioxid fra Holuhraun på Island er derfor formentligt årsagen til de høje koncentrationer observeret i efteråret 2014 på de tre målestationer i Danmark. Modelberegninger med DCE's luftkvalitesmodeller vil kunne underbygge dette yderligere, men det har af tidsmæssige årsager ikke været muligt at gennemføre sådanne beregninger i forbindelse med denne undersøgelse.



Figur 1.7. Resultat af trajektorieberegninger af transport af luftmasserne frem mod et angivet punkt. Beregningerne foretages ved, at der fra et valgt ankomststed og -tidspunkt regnes baglæns, således at man opnår en viden om, hvordan luftmaserne er transporteret frem mod det valgte ankomststed. De viste trajektorier er beregnet af NILU (2015).

1.5 Sammenfatning og konklusion

Nordsøen og Østersøen er begge udnævnt til Sulphur Emission Control Areas (SECA's) under den Internationale Søfartsorganisations (IMO) MARPOL konvention (International Convention for the Prevention of Pollution From Ships). Den 1. januar 2015 trådte et nyt trin i reguleringen i kraft, hvor det tilladte indhold af svovl i skibsbrændstof blev reduceret med en faktor 10. Målet med denne undersøgelse er at vurdere, om den forventede store ændring i udledningerne kan ses i målingerne af svovldioxid i Danmark.

Udviklingstendensen for koncentrationerne af svovldioxid på de tre baggrundsmålestationer Anholt, Tange og Ulborg viser et stort fald i koncentrationerne af svovldioxid på de tre målestationer i forbindelse med nytårsskiftet 2014/2015. Faldet er størst på Anholt, hvor middelkoncentrationen er faldet med 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ set i forhold til middel af 2011-2014, svarende til et fald på 60 %. Faldet er omkring 50 % på de to øvrige målestationer, hvor andelen af svovldioxid fra skibstrafik er noget mindre end på Anholt. Det er derfor DCE's konklusion, at de lavere tilladte grænser for indhold af svovl i skibsbrændstof har givet anledning til en reduktion af udledningerne, og at dette er årsag til det store fald i koncentrationerne.

Det skal bemærkes, at data fra 2015 endnu ikke er fuldt kvalitetskontrollerede, men da faldet er så markant, forventes det ikke at påvirke denne konklusion.

En del af det observerede fald i koncentrationerne af svovldioxid kan skyldes naturlige variationer i de meteorologiske forhold. Om variationer i de meteorologiske forhold spiller ind kan først fuldt ud vurderes til næste år, da det er nødvendigt med en længere tidsserie for at kunne vurdere denne effekt. Det vil imidlertid være meget uventet, hvis de nu observerede meget lave koncentrationer af svovldioxid udelukkende skulle skyldes naturlige variationer i de meteorologiske forhold.

I forbindelse med undersøgelsen har det vist sig, at der i efteråret 2014 har været en række episoder med særdeles høje koncentrationer af svovldioxid i Danmark. Kilden til disse undersøgelser har formentligt været de store udledninger af svovl fra lavaområdet Holuhraun på Island, som i perioden fra august 2014 til februar 2015 har udledt store mængder svovldioxid.

1.6 Litteratur

Cofala, J., Amann, M., Heyes, C., Wagner, F., Klimont, Z., Posch, M., Schöpp, W., Tarrasón, L., Jonson, J., Whall, C. and Stavradi, A. (2007): Analysis of Policy Measures to Reduce Ship Emissions in the Context of the Revision of the National Emissions Ceiling Directive, Final Report, IIASA Contract No 06-107, April 2007.

Ellermann, T., Nøjgaard, J.K., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M., Massling, A. & Jensen, S.S. 2015. The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2014. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, xx pp. Scientific Report from DCE - Danish Centre for Environment and Energy No. xxxx. <http://dce2.au.dk/-pub/SRxxx.pdf>

EMEP (2015): EMEP emissions database. http://www.ceip.at/ms/-ceip_home1/ceip_home/webdab_emepdatabase/

NILU (2015): Flextra - Air mass trajectories. <http://www.nilu.no/-projects/ccc/trajectories/>

Olesen, H. R., Winther, M., Ellermann, T., Christensen, J. og Plejdrup, M. (2009): Ship emissions and air pollution in Denmark, Present situation and future scenarios. Report from Danish Environmental Protection Agency, Environmental Project No. 1307 2009, Miljøprojekt. 134 p. <http://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2009/978-87-92548-77-1/pdf/978-87-92548-78-8.pdf>

Sara Barsotti (2014): 100 days of gas release at Holuhraun <http://en.vedur.is/pollution-and-radiation/volcanic-gas/measurements/nr/3036>

Vedur (2015): Islands Meteorologiske Institut. <http://en.vedur.is/-earthquakes-and-volcanism/volcanic-eruptions/holuhraun/>