

Modelberegning af ozonflux i relation til ozonskader på vegetation

Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 02-09-2019

Thomas Ellermann, Jesper H. Christensen og Jesper Nygaard

Institut for Miljøvidenskab, Science and Technology

Rekvirent:

Mette Overgaard, Miljøstyrelsen

Antal sider: 14

Faglig kommentering:

Claus Nordstrøm

Kvalitetssikring, centret:

Vibeke Vestergaard Nielsen



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Tel.: +45 8715 0000
E-mail: dce@au.dk
<http://dce.au.dk>

Indhold

Indhold	2
1. Indledning	3
2. Hvad er ozonflux?	4
3. Hvordan beregnes ozonfluxen?	6
4. Resultater for 2017	7
5. Usikkerhed	11
6. Referencer	13
7. Forkortelser	14

1. Indledning

Nærværende notat er udarbejdet i forbindelse med et projekt for Miljø- og Fødevarerministeriet, som DCE har gennemført i maj-juni 2019. Formålet med projektet er at udvide DCE's modelberegninger med regionalskalamodellen DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model) med beregninger af ozonflux, der skal ses som en indikator for ozons skadelige effekter på vegetation.

Behovet for beregning af ozonflux stammer fra EU's reviderede direktiv om nationale emissionslofter, hvor der er stillet krav om, at skader på vegetation som følge af ozon skal vurderes ud fra beregning af ozonfluxen til vegetation og ikke som hidtil via beregning af AOT40 (akkumuleret ozonkoncentration over 40 ppb svarende til $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$). I Delprogram for luft under NOVANA er AOT40 blevet beregnet rutinemæssigt ved hjælp af regionalskalamodellen DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model).

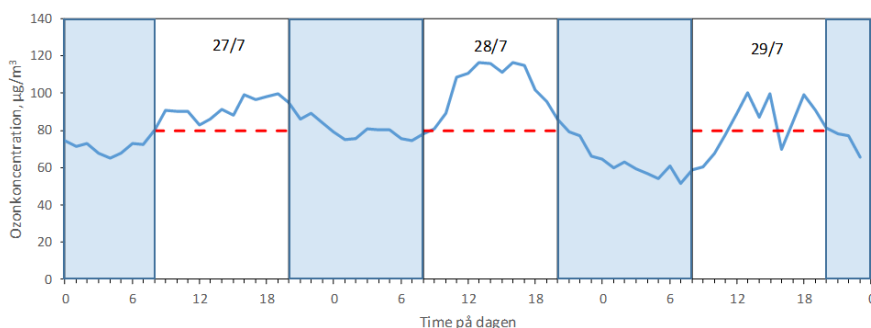
For at kunne gennemføre beregningerne af ozonfluxen er det nødvendigt at udvide DEHM med et ekstra modul til beregning af ozonflux. Modulet opbygges så beregningerne baseres på POD_γ (Phytotoxic Ozone Dose above a threshold of γ), som blev introduceret i EMEP-modellen i 2009, se Mills and Simpson (2010). POD_γ beregnes som den samlede påvirkning af meteorologiske komponenter (temperatur, fugtighed og sollys), ozonkoncentration, fugtighed i jorden, vækst af planter og graden af åbning af stomata (planteblades spalteåbninger). POD_γ er ligesom AOT40 beregnet som en samlet akkumulering over en given tærskelværdi over hele vækstsæsonen. De forskellige plantetyper har forskellige tærskelværdier.

I forbindelse med projektet gennemføres det første sæt beregninger af ozonflux for 2017. Ozonfluxen beregnes for hele landet og specifikt for målestationerne Anholt, Keldsnor, Risø og Ulborg, som alle er placeret i baggrundsområder og repræsenterer den regionale baggrund. Det skal bemærkes, at ozonkoncentrationer måles på de nævnte stationer med undtagelse af Anholt. Resultaterne fra de fire målestationer indrapporteres til EU i forbindelse med Miljø- og Fødevarerministeriets indrapportering for 2017. I de kommende år vil ozonfluxen blive beregnet årligt, som en del af modelberegningerne under Delprogram for luft under NOVANA, og resultaterne præsenteres i årsrapporten om den atmosfæriske deposition.

Dette notat giver en kortfattet beskrivelse af, hvad ozonfluxen er og hvordan ozonflux adskiller sig fra den nuværende indikator AOT40. Derefter forklares kort, hvordan ozonfluxen beregnes og resultaterne fra beregning af ozonflux for 2017 præsenteres. Til sammenligning præsenteres endvidere de hidtidige beregninger af AOT40.

2. Hvad er ozonflux?

I EU's luftkvalitetsdirektiv fra 2008 (EC, 2008) anvendes den koncentrationsbaserede indikator AOT40, som indikator for den skadelige påvirkning af ozon på planter. Baggrunden for indikatoren var, at ozons skadelige påvirkning bedst kan beskrives som den akkumulerede eksponering for ozon igennem en vækstsæson. Endvidere at planter til en vis grænse kan neutralisere den skadelige effekt af ozon. Det vil sige, at ozon kun var skadelig for planterne, når koncentrationen overskred en vis tærskelværdi. På basis af dette blev AOT40 defineret som den akkumulerede andel af timemiddelkoncentrationerne, som ligger over tærskelværdien fastsat til 40 ppb (Figur 2.1). Enheden for AOT40 er ppb·timer (men kan også opgives som $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{timer}$). Akkumuleringen foretages kun for timer med dagslys og igennem planternes vækstsæson, som for vegetation er fastlagt til perioden maj-juli (EC, 2008). Af praktiske grunde er dagslysperioden fastlagt til mellem kl 8:00 og 20:00.



Figur 2.1. Illustration af metoden til beregning af AOT40. AOT40 beregnes ved at akkumulere den del af timemiddelkoncentrationerne, som overstiger 40 ppb = $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i dagtimerne (8:00 – 20:00) i vækstsæsonen. Det er den del af timemiddelkoncentrationerne i de hvide felter, som ligger over den røde stiplede streg, der akkumuleres.

Forskning har imidlertid vist, at denne indikator ikke giver en tilstrækkelig god beskrivelse af de faktiske forhold omkring ozons skadelige effekt. Alle planter har et ydre overfladelag, som beskytter planterne mod ozon. Det er først, når ozon optages igennem planternes spalteåbninger, at ozon bliver skadelig. Ozon opløses i det væskelag, som omgiver cellerne, hvorved der kan dannes frie radikaler og reaktive syrederivater. De frie radikaler og syrederivaterne er kemisk set meget reaktive, og det er disse kemiske reaktioner, som ødeægger cellernes strukturer. Optaget af ozon styres af hvor meget spalteåbningerne er åbne. En indikator baseret alene på ozonkoncentrationen (AOT40) kan derfor ikke i tilstrækkeligt grad beskrive, i hvilket omfang ozon giver skader på planterne.

For at forbedre beskrivelsen af ozons skadelige effekt på planter har EU i forbindelse med det reviderede direktiv om nationale emissionslofter fastlagt, at den skadelige effekt af ozon skal baseres på POD_Y , som er en indikator baseret på beregning af den akkumulerede ozonflux gennem spalteåbningerne i løbet af en vækstsæson. Ibrugtagning af denne nye indikator er i høj grad sket på basis af det arbejde, som har været udført under UNECE's Konvention om langtransporteret grænseoverskridende luftforurening (CLRTAP), hvor Working Group on Effects har lavet omfattende studier for at fastlægge denne indikator bedst muligt (Mills, 2017).

POD_Y er lige som AOT40 baseret på en tærskelværdi. Ozonfluxen skal op over en vis tærskelværdi, før ozon gør skade. Enheden for ozonfluxen er nmol m⁻² s⁻¹, hvor m⁻² henfører til et mål for vegetationens bladareal. Tærskelværdien γ afhænger af plantetypen. For skov og semi-naturlig vegetation er den 1 nmol m⁻² s⁻¹ og for korn (hvede) 3 nmol m⁻² s⁻¹ (Mills, 2017). Den akkumulerede ozonflux POD_Y (enhed mmol m⁻²) beregnes for vækstsæsonen, hvor planterne har aktive spalteåbninger. Til eksempel er vækstsæson fastlagt til perioden fra den 1. april til 30. september for skov og 90 dage for korn (Mills, 2017).

En af ulemperne med denne indikator er, at det i praksis er meget omkostningstungt at måle ozonfluxen i forbindelse med et langsigtet overvågningsprogram. Åbning og lukning af planternes spalteåbninger afhænger af en lang række faktorer, herunder de meteorologiske forhold (sollys, temperatur, luftfugtighed og vind) og jordbundsforholdene (jordvandsindhold). Der findes omfattende viden om, hvordan disse faktorer påvirker spalteåbningernes funktion, fordi spalteåbningerne spiller en central rolle for planternes udveksling af gasser med omgivelserne og dermed planternes vækst. Det er derfor muligt at modelberegne POD_Y, og derved anvende denne indikator i sammenhæng med langsigtet overvågning og regulering af ozons skadelige effekter.

Den store fordel ved POD_Y fremfor AOT40 er netop, at POD_Y tager hensyn til spalteåbningernes funktion, og at funktionen er styret af de meteorologiske forhold. I perioder med vandmangel, holder planterne spalteåbningerne lukket. Under varme tørre forhold med meget sollys vil der oftest være høje ozonkoncentrationer. Planterne vil grundet vandmangel holde spalteåbningerne lukkede og på den måde vil vandmanglen beskytte planterne mod den skadelige effekt af ozon. I en tør sommer som i Danmark i 2018 vil ozonkoncentrationerne være væsentligt højere end under en normal sommer, hvilket vil give en urealistisk stor øgning af ozonskaderne ifølge AOT40. POD_Y vil ikke i samme grad blive påvirket af den tørre sommer, da spalteåbningerne vil være lukket en relativt større del af tiden grundet tørke.

For AOT40 ses endvidere en meget stor geografisk forskel på europæisk plan, fordi ozonkoncentrationerne generelt er væsentligt højere i Middelhavslandene end i de nordiske lande. Modelberegninger giver omkring en faktor 10 højere AOT40 i Middelhavslandene end i Sverige, Norge og Finland (Simpson et al., 2007). I Middelhavslandene er planterne oftest begrænset af vandmangel, hvilket gør at spalteåbningerne er lukket en relativt stor del af tiden sammenlignet med de nordiske lande, hvor vandmangel er mindre hyppig. POD_Y er derfor typisk omkring en faktor 2 større i Middelhavslandene sammenlignet med Sverige, Norge og Finland (Simpson et al., 2007). Den mere realistiske beskrivelse af ozonskaderne og de geografiske variationer vil føre til et bedre grundlag for reguleringstiltag rettet mod reduktion af ozons skader på vegetationen.

3. Hvordan beregnes ozonfluxen?

Modelberegningen af ozonfluxen foretages med DCE's regionalsskalamodel DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model; se Ellermann et al., 2018 for yderligere beskrivelse). DEHM har et state-of-the-art tørdepositionsmodul, hvor en af submodulerne er modellen DO₃SE (Deposition of O₃ for Stomatal Exchange) (EMEP, 2003; Simpson et al., 2007; Mills, 2017), som anvendes til beregning af flux af ozon ind i spalteåbningerne samt beregning af eventuelle overskridelser af kritiske niveauer. DEHM-versionen af DO₃SE er sat op til at beregne ozonflux for 10 forskellige vegetationstyper, deriblandt tempereret løvskov og tempereret markafgrøde, som er de to vegetationstyper, der er beregnet POD_γ for i dette projekt. I forhold til den oprindelige version er der blevet foretaget en mindre justering af DEHM's DO₃SE-modul omkring vækstsæsonens breddegradsafhængighed fra 3 dage pr. breddegrad til 1,5 dag for løvskov samt 2,57 dag for markafgrøde.

Ozonflux til spalteåbningerne, F_{st} (nmol m⁻² s⁻¹, hvor m⁻² betegner et mål for bladareal eksponeret til ozon), beregnes med følgende udtryk:

$$F_{st} = O_3(z) * g_{sto} * \frac{r_c}{r_c + r_b}$$

hvor $O_3(z)$ er ozonkoncentrationen i nmol/m³ i toppen af vegetationen, g_{sto} (m/s) er ledningsevnen for depositionen af O₃ til spalteåbningerne og beregnes i DEHM's DO₃SE-modul som funktion af plantefænologi, ozonkoncentration, lys, lufttemperatur, luftfugtighed og jordvandsindhold. r_c (s/m) er overflademodstanden for den samlede deposition til bladoverfladen og beregnes som:

$$r_c = \frac{1}{g_{sto} + g_{ext}}$$

hvor g_{ext} (m/s) er ledningsevnen til overfladen af vegetationen (optag udenfor spalteåbningerne):

$$g_{ext} = \frac{1}{2500}$$

r_b (s/m) er den kvasilaminære modstand, som beregnes som

$$r_b = 1,3 * 150 * \sqrt{\frac{L}{u(z)}}$$

hvor faktoren 1,3 (dimensionsløs) skyldes forskellen i diffusivitet mellem varme og ozon, værdien 150 er en empirisk konstant med enheden $\sqrt{s/m}$, L (m) er et mål for bladværsnittet og er sat til 0,07 m for skov og 0,02 m for markafgrøde. $u(z)$ er vindhastigheden (m/s) i toppen af vegetationen, som beregnes ved brug af similaritetsfunktioner for momentum og vindhastigheden i nederste modellag.

POD_γ er den akkumulerede ozonflux gennem vækstsæsonen, men det er kun ozonflux over tærskelværdien γ , som medregnes. Dette formuleres matematisk med følgende udtryk, hvor Δt er tidskridtet (typisk 2-3 minutter for det danske domæne), som anvendes ved modelberegningerne:

$$POD_{\gamma} = \sum_{Vækstsæson} \max(0, F_{st} - \gamma) \Delta t$$

4. Resultater for 2017

POD_{γ} beregnet for skov og korn ved baggrundsmålestationerne Anholt, Keldsnor, Risø og Ulborg er vist i tabel 4.1.

Table 4.1. POD_1 for skov og POD_3 for korn ved baggrundsmålestationerne Anholt, Keldsnor, Risø og Ulborg for vækstsæsonen i 2017.

	POD_1 skov $mmol\ m^{-2}$	POD_3 korn $mmol\ m^{-2}$
Anholt	13	1,5
Keldsnor	13	2,3
Risø	13	4,4
Ulborg	12	3,1

Figur 4.1 og 4.2 viser den geografiske fordeling af POD_{γ} for henholdsvis skov og korn. Generelt er POD_{γ} for korn betydeligt lavere end for skov, hvilket dels skyldes at tærskelværdien er højere for korn ($3\ nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) end for skov ($1\ nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) og dels at vækstsæsonen er længere for skov (183 dage) end korn (90 dage). Disse forskelle er også medvirkende til, at den geografiske fordeling er noget forskellig - om end der måske er antydningen af en tendens med højere POD_{γ} i øst end i vest for begge POD_{γ} 'er.

Figur 4.3 viser til sammenligning den geografiske variation for AOT40, som er den hidtil anvendte indikator. Der er relativt stor forskel på den geografiske fordeling mellem AOT40 og de to POD_{γ} 'er, hvilket skyldes forskel i tærskelværdier, og at ozonkoncentrationer og ozonflux ikke umiddelbart er sammenlignelige.

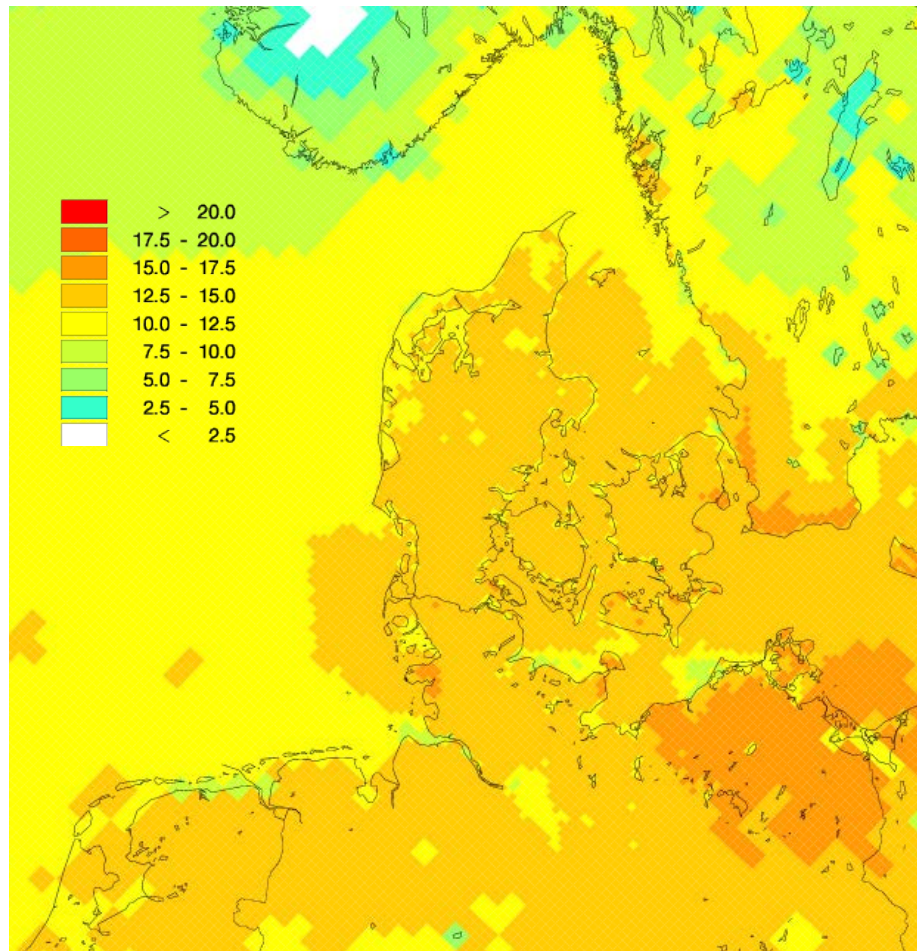


Figure 4.1. POD_1 ($mmol\ m^{-2}$) beregnet til skov for vækstsæsonen 2017. Beregningerne er foretaget med DEHM med geografisk opløsning på 5,6 km x 5,6 km. De kritiske niveauer er af Mills (2017) angivet til 5,7 $mmol\ m^{-2}$ for skov.

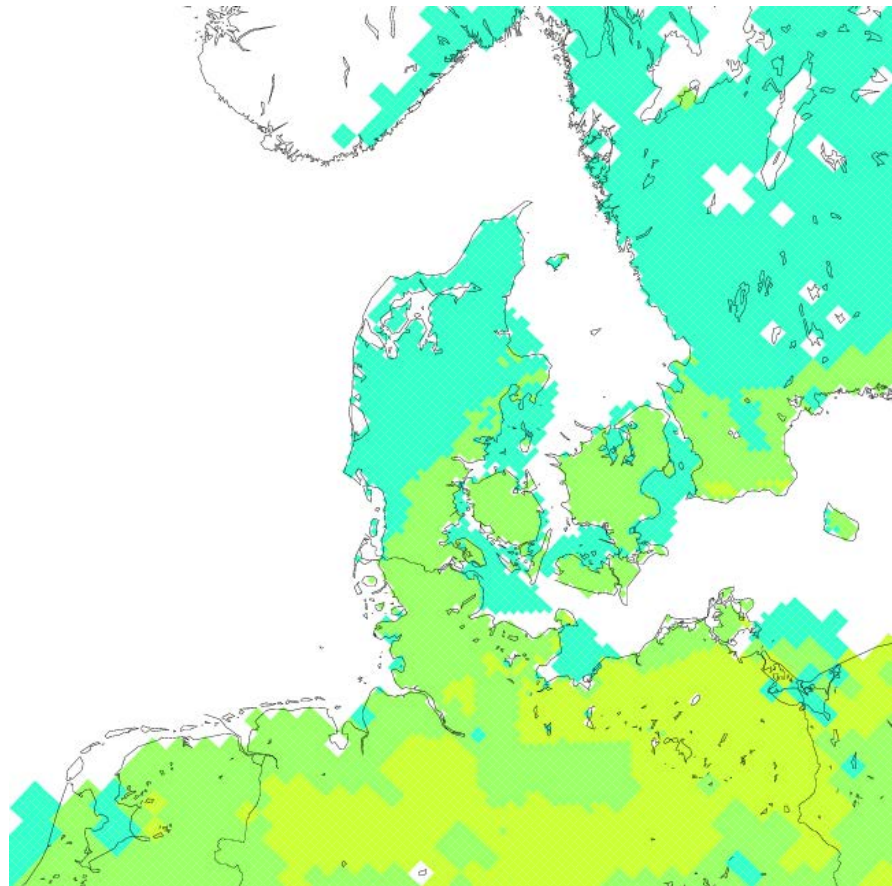


Figure 4.2. POD_3 (mmol m^{-2}) beregnet til korn for vækstsæsonen 2017. Beregningerne er foretaget med DEHM med geografisk opløsning på 5,6 km x 5,6 km. De kritiske niveauer er af Mills (2017) angivet til $7,9 \text{ mmol m}^{-2}$ for korn.

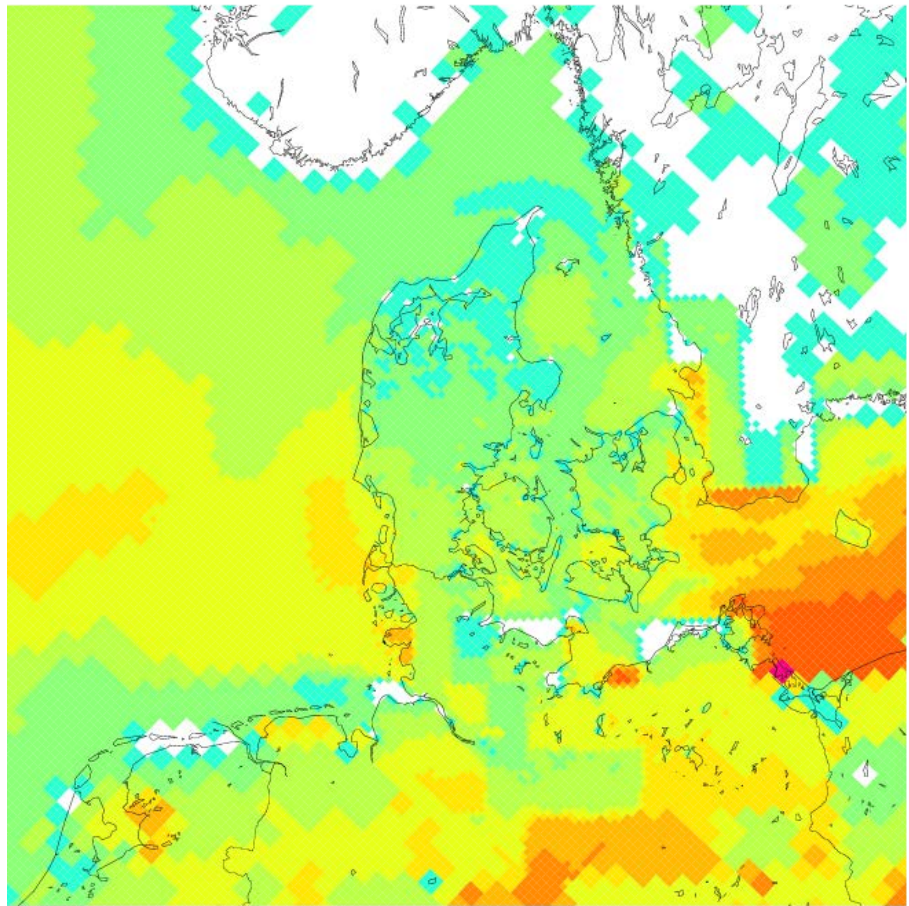


Figure 4.3. AOT40 for vegetation i vækstsæsonen 2017. Enhed i figur er $\mu\text{g}/\text{m}^3$ timer. Omregnes til ppb-timer ved at gange med 0,5. Beregningerne er foretaget med DEHM med geografisk opløsning på 5,6 km x 5,6 km.

I forbindelse med konventionen om langtransporteret grænseoverskridende luftforurening (CLRTAP) under UNECE er der vedtaget kritiske niveauer (Critical levels) for POD_v , hvorover ozonskader på vegetation er uacceptabelt store. Mills (2017) angiver de kritiske niveauer til $5,7 \text{ mmol m}^{-2}$ for skov og $7,9 \text{ mmol m}^{-2}$ for korn. Den kritiske niveau for skov er dermed overskredet for skov (løvfældende) i hele Danmark, mens det ikke er overskredet for korn (hvede).

5. Usikkerhed

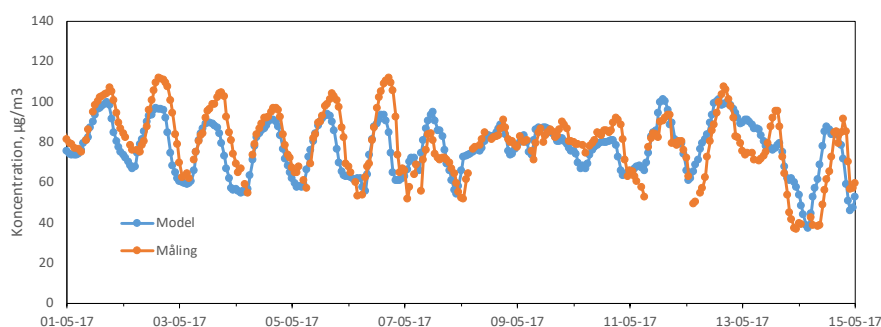
Der findes ikke målinger fra felten, som kan bruges til at validere niveauerne og den geografiske fordeling af POD_Y . Denne konklusion er også draget af Fagerli et al., (2018). Det er derfor heller ikke muligt at lave en egentlig usikkerhedsvurdering for resultaterne.

I det følgende er der lavet en sammenligning mellem målte og modelberegne ozonkoncentrationer, selv om dette naturligvis kun giver mulighed for at vurdere kvaliteten af det første trin i beregningerne. Ud over dette er der også lavet en sammenligning mellem DCE's resultater og tilsvarende beregninger for 2016 udført af Meteorological Synthesizing Centre - West (MSC-W) under EMEP.

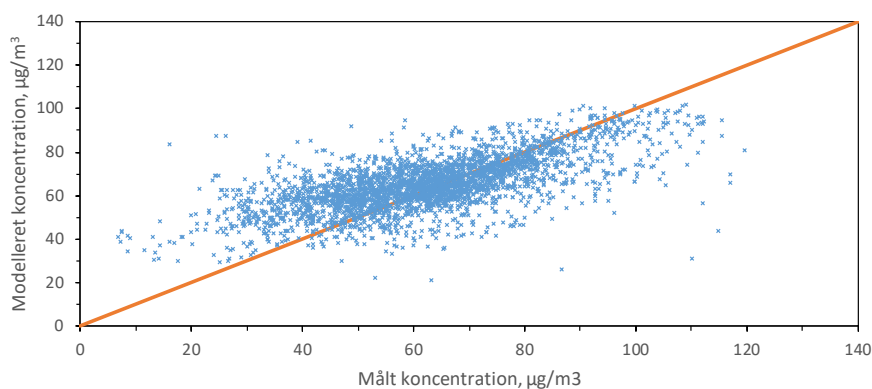
Tabel 5.1 viser resultaterne for årsmiddelværdier for ozonkoncentrationerne ved Risø, Ulborg og Keldsnor bestemt ved hjælp af målinger og modelberegninger (der måles ikke ozon på Anholt). På årsmiddelniveau er der meget god overensstemmelse mellem resultaterne. Figur 5.1 viser et typisk eksempel på en sammenligning mellem målte og modelberegne timemiddelværdier for Ulborg fra den tidlige del af vækstsæsonen. Figur 5.2 viser et punktdiagram over sammenhængen mellem målte og modelberegne timemiddelkoncentrationer for hele sæsonen. Generelt ses en god overensstemmelse mellem modelresultater og målinger, hvor modelberegningerne fanger de tidlige variationer, som måles for timemiddelkoncentrationerne. Modelresultaterne viser en tendens til mere dæmpede variationer og underestimerer omkring 10-20% i forhold til de daglige målte topkoncentrationer.

Tabel 5.1. Målte og modelberegne årsmiddelværdier for ozon ved Risø, Ulborg, Keldsnor og på Anholt i 2017. Der bliver ikke målt ozon på Anholt.

	Risø $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ulborg $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Keldsnor $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anholt $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Måling	61.0	62.3	58.0	
Model	61.0	61.8	59.8	64.5



Figur 5.1. Sammenligning mellem målte og modelberegne timemiddelkoncentrationer for ozon ved Ulborg i perioden fra 1-15. maj 2017.



Figur 5.2. Punktdiagram for målte og modelberegnete timemiddelkoncentrationer for ozon ved Ulborg i perioden fra 1. maj til 30. september 2017.

MSC-W har udført tilsvarende beregninger, som der kan sammenlignes med - dog er MSC-W-resultaterne er fra 2016, mens denne undersøgelse dækker 2017. Der er foretaget en simpel sammenligning mellem de POD_1 -værdier EMEP har beregnet (aflæsning fra EMEP-kortene) og værdier beregnet i dette projekt. MSC-W beregner POD_1 for skov til at være højest i den østlige del af Danmark med aftagende værdier mod vest. Tilsvarende fordeling ses i grove træk for beregningerne i denne undersøgelse. MSC-W (Fagerli et al., 2018) får POD_1 til 15-20 $mmol\ m^{-2}$ for Jylland og store del af Fyn. På Sjælland ligger værdierne på 15-20 $mmol\ m^{-2}$ for den nordøstlige del og 20-25 $mmol\ m^{-2}$ for resten af Sjælland. Resultaterne fremkommet i dette projekt (Figur 4.1) ligger på 12,5 - 15 $mmol\ m^{-2}$ for største parten af landet med mindre områder i Nordvestjylland med værdier mellem 10 - 12,5 $mmol\ m^{-2}$ og mindre områder i den østlige del af Danmark med værdier på 15-17,5 $mmol\ m^{-2}$.

Der er således en god overensstemmelse mellem resultaterne fra dette projekt og MSC-W's resultater, når det tages i betragtning, at denne type modelberegning generelt har stor usikkerhed. Ved sammenligningen skal det endvidere tages i betragtning, at der endnu ikke foreligger resultater fra MSC-W for 2017, så derfor har det været nødvendigt at foretage sammenligningen på basis af to forskellige meteorologiske år. AOT40 var i 2016 noget højere i Danmark end i 2017 (Ellermann et al., 2018) og selv om tidsudviklingen for AOT40 og POD_1 ikke direkte kan sammenlignes, så peger forskellen for AOT40 på, at forskellen mellem POD_1 for 2016 og 2017 for en del kan forklares på baggrund af, at de meteorologiske forhold har været forskellige i 2016 og 2017.

6. Referencer

EC (2008): Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 on ambient air quality and cleaner air for Europe: Official Journal of the European Union L152/1.

Ellermann, E., J. Nygaard, J.K. Nøjgaard, C. Nordstrøm, J. Brandt, J. Christensen, M. Ketzel, A. Massling, R. Bossi, S.S. Jensen (2018): The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2017. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 83 pp. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 281.

EMEP (2003): EMEP Status Report 1/2003 Part I "Transboundary acidification and eutrophication and ground level ozone in Europe: Unified EMEP model description" EMEP/MSC-W Report
[emep_report_1_part1_2003.pdf](#)

Fagerli et al.(2018): EMEP Status Report 2018; August 22, 2018 Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components. https://emep.int/publ/reports/2018/EMEP_Status_Report_1_2018.pdf

Mills, G. (2017): III. Mapping critical levels for vegetation. www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2017/AIR/EMEP/Final_new_Chapter_3_v2_August_2017_.pdf . Revised Chapter 3 of the Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Publisher: Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Berlin, 2004.

Mills, G. and Simpson, D. (2010): New flux-based critical levels for ozone-effects on vegetation, in: Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe. EMEP Status Report 1/2010, pp. 123–126, The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway.

Simpson, D., Ashmore, M.R., Emberson, L., & Tuovinen, J.-P. (2007): A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study. *Environmental Pollution* 146 (2007) 715-725.

7. Forkortelser

AOT40	Akkumuleret ozonkoncentration over 40 ppb
CLRTAP	Convention on Long Range Transboundary Air Pollution
DCE	Nationalt Center for Miljø og Energi
DEHM	Danish Eulerian Hemispheric Model
DO ₃ SE	Deposition of O ₃ for Stomatal Exchange
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
MSC-W	Meteorological Synthesizing Centre-West
NOVANA	Nationale Overvågningsprogram for Vandmiljø og Natur
POD _γ	Phytotoxic Ozone Dose above a threshold of γ
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe