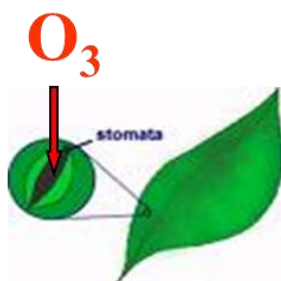


# Ett förenklat koncept för inverkan av ozon på växtligheten i Sverige baserat på ozonflux

Förslag till indikator inom Miljömålet "Frisk Luft"



*Per Erik Karlsson, Helena Danielsson, Håkan Pleijel, David Simpson, Johan Uddling, Gunilla Pihl Karlsson.*

**Författare:** Per Erik Karlsson, Helena Danielsson, Håkan Pleijel\*, David Simpson\*\*, Johan Uddling\*, Gunilla Pihl Karlsson.

\* Göteborgs Universitet. \*\* Meteorologisk Institut & Chalmers Tekniska Högskola

**Medel från:** Naturvårdsverket

**Bild:** Per Erik Karlsson

**Rapportnummer:** C 57

**Upplaga:** Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2014

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

Tel: 08-598 563 00 Fax: 08-598 563 90

[www.ivl.se](http://www.ivl.se)

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

## Innehållsförteckning

Förord.....	4
Sammanfattning.....	5
Utförlig sammanfattning.....	6
Summary .....	10
1 Inledning.....	11
2 Miljömålssystemets syften.....	11
3 Betydelse av marknära ozon för växtligheten i Sverige och globalt .....	12
4 Ozonets inverkan på växtligheten - mekanismer .....	12
5 Hur övervakas och begränsas ozonbildningen över Sverige?.....	13
5.1 Övervakning av ozonhalter i luft i landsbygdsmiljön .....	13
5.2 Begränsning av ozonbildningen.....	14
6 Nuvarande miljö kvalitetsmål för ozon .....	15
7 Syftet med en reviderad indikator för ozonets inverkan på växtligheten baserat på ozonflux.....	15
8 Möjligheter för en utveckling av preciseringen för ozon och växtlighet inom miljömålet <i>Frisk Luft</i> .....	16
9 Aspekter vad gäller val av koncept för preciseringen .....	16
9.1 AOT40 .....	16
9.2 Ozonflux i den form som används inom luftkonventionen - POD.....	18
9.3 Ett förenklad koncept för ozonets toxicitet för växter – S-POD .....	20
9.4 Tester av olika ozonindex.....	26
9.4.1 Allmänt .....	26
9.4.2 Urvalet av experimentella data för att testa olika ozonindex för inverkan unga träd.....	27
9.4.3 Metodik.....	30
9.4.4 Statistisk analys .....	30
9.4.5 Dos-respons relationer för inverkan av ozon på unga träd baserat på olika ozonindex .....	30
9.4.6 En jämförelse med tidigare dos-respons relationer framtagna inom LRTAP .....	34
9.5 Slutligt val av ozonindex .....	35

10	Förslag till målvärde för en indikator baserad på S-POD .....	36
10.1	Kriterier för ett målvärde: .....	36
10.2	Vilken inverkan på skogens tillväxt kan accepteras? .....	37
10.3	Förslag till målvärde.....	38
10.4	En jämförelse av effekterna av beräknad ozondos på unga träd vid tre olika platser i Sverige .....	39
11	Möjligheterna till övervakning av måluppfyllelse baserat på POD respektive S-POD .....	44
12	Sammanfattande slutsatser och förslag.....	46
13	Tack.....	47
14	Referenser .....	47

## Förord

På uppdrag av Naturvårdsverket (Avtal nr 5011122) har utretts vilka möjligheter som finns att föreslå en reviderad indikator för inverkan av marknära ozon på växtligheten i Sverige, att användas för att följa upp miljökvalitetsmålet *Frisk Luft*.

Deltagare i projektet har varit Per Erik Karlsson, Helena Danielsson samt Gunilla Pihl Karlsson från IVL Svenska Miljöinstitutet, Håkan Pleijel och Johan Uddling från Institutionen för Biologi och miljövetenskap vid Göteborgs Universitet, samt David Simpson från det Norske Meteorologisk Institutt (Met Norway)/ Chalmers Tekniska Högskola.

## Sammanfattning

På uppdrag av Naturvårdsverket har utretts olika alternativ till en ny indikator för inverkan av marknära ozon på växtligheten i Sverige inom miljökvalitetsmålet *Frisk Luft*. Syftet med den nya indikatorn är att på ett bättre sätt spegla ozonets toxicitet för växtligheten, jämfört med nuvarande indikator baserat på **AOT40**.

Ozonets toxicitet för växtligheten beror främst av hur mycket ozon som tas upp till bladens inre genom klyvöppningarna, s.k. ozonflux. Klyvöppningarnas genomsläpplighet för ozon beror av vädret, markfuktigheten samt av växternas inre årstidsrytmer. Ozonflux kan beräknas med metoder av olika grad av komplexitet. Den metodik som används inom konventionen för gränsöverskridande luftföroreningar, CLRTAP, **POD**, Phytotoxic Ozone Dose, är förhållandevis komplicerad och kräver antingen avancerad meteorologisk utrustning eller tillgång till avancerade kemiska transportmodeller, t ex MSC-W EMEP-modellen. I denna studie har ett delvis nytt koncept tagits fram som skulle kunna användas som indikator inom *Frisk Luft*, kallat förenklat ozonflux (**S-POD**, Simplified Phytotoxic Ozone Dose). S-POD utgör ett mellanting mellan POD och AOT40. Uppmätta timvisa ozonhalter modifieras utifrån dess toxicitet relaterat till ozonflux och ackumuleras sedan under dagtid över ett visst tröskelvärde, på samma sätt som AOT40. Konceptet S-POD är framtaget så att det skall vara möjligt att övervaka vid en viss plats baserat på ett begränsat antal mätningar till en relativt låg kostnad; ozonkoncentrationen i luften, lufttemperatur samt luftens relativa fuktighet. De tre koncepten AOT40, POD samt S-POD har utvärderats utifrån hur väl de beskriver dos-respons relationer för inverkan av ozon på unga träd av gran och björk, baserat på tillgängliga data från exponerings-experiment utförda i Sverige och Finland. POD är det koncept som bäst beskriver dos-respons relationer vad gäller inverkan av ozon på biomassaminskning hos träd. Det förenklade S-POD<sub>15</sub> (över ett tröskelvärde 15 ppb) fungerar dock nästan lika bra som POD och avsevärt bättre än det nu använda AOT40 vad gäller att beskriva dessa dos-respons relationer.

Det föreligger därför tre olika alternativ vad gäller en indikator för att beskriva inverkan av ozon på växtligheten i Sverige inom miljömålet *Frisk Luft*. Den **första alternativet** är att behålla nuvarande indikator baserad på **AOT40**. Det **andra alternativet** är en ny indikator baserad på **POD**, baserad på den metodik som finns framtagen inom LRTAP. Fördelen med detta koncept är att det är väl förankrat vetenskapligt, liksom politiskt inom LRTAP. Nackdelen är att det är komplicerat att övervaka, såväl nationellt som regionalt samt även komplicerat att kommunicera till allmänheten. Det **tredje alternativet** är införa en ny indikator baserad på **S-POD<sub>15</sub>**, så som det beskrivits i denna studie. Fördelarna är att det är lättare att övervaka nationellt och regionalt till en förhållandevis låg kostnad. Det är också något lättare att kommunicera. Nackdelarna är att det är ett nytt koncept som ännu inte är förankrat vetenskapligt eller politiskt inom LRTAP.

Ett möjligt årligt målvärde föreslås för S-POD, 5 ppm-timmar per växtsäsong. En ozonexponering på denna nivå resulterar under experimentella förhållanden i en årlig nedsättning av biomassan hos unga träd på ca 1 %. Översatt till en nedsättning av skogens tillväxthastighet uppskattas detta medföra en årlig ekonomisk förslut för

Sveriges samlade skogsägare på i storleksordning 340 MSEK, jämfört med en situation i avsaknad av ozonbelastning.

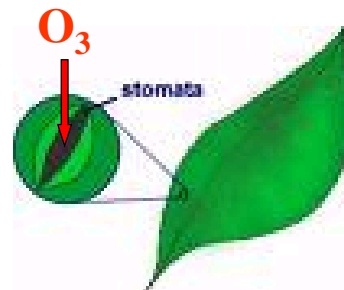
Möjligheterna till beräkning av överskridande av målvärden på regional och nationell skala diskuteras beroende på om POD eller S-POD används som grund för målvärdet.

## Utförlig sammanfattning

I en studie som gjorts av IVL Svenska Miljöinstitutet, Göteborgs Universitet samt det Norske Meteorologisk Institut, har utretts möjligheterna att föreslå en ny indikator för inverkan av marknära ozon på växtligheten i Sverige, att användas för att följa upp miljö kvalitetsmålet *Frisk Luft*. I bedömningen har utgått från senare tids metodutveckling inom Konventionen om Långväga Transporterade Luftföroreningar (LRTAP) men också till de praktiska möjligheterna för nationella och lokala myndigheter att följa upp indikatorn. I studien utreds tre alternativ, med olika för och nackdelar.

Det första alternativet är att behålla den nuvarande indikatorn som används inom miljömålet *Frisk Luft*. Denna indikator bygger på konceptet **AOT<sub>40</sub>** (Accumulated Ozone exposure above a Threshold **40** ppb). Det målvärde som inte bör överskridas baseras på AOT<sub>40</sub> ackumulerat dagtid mellan 1 april och 30 september årligen och har satts till 10 000 µg m<sup>-3</sup> timma. Fördelen med denna, nuvarande indikator är att den är väl etablerad inom såväl EU's ozondirektiv som Sveriges miljö kvalitetsnormer. De effekter som kan knytas till ett överskridande finns uttryckta i ekonomiska termer.

**Figur S1.** En illustration av konceptet ozonflux, dvs upptaget av ozon till bladens inre genom de s.k. klyvöppningarna (stomata).



Det är väl känt att ozonmolekylerna måste tas upp till bladens och barrrens inre för att utverka sin negativa inverkan (Figur S1). Ozonet har ingen verkan från utsidan eftersom bladen är täckta med ett vaxskikt som är motståndskraftigt mot ozon. Det är därför otillfredsställande att använda ett koncept, såsom AOT<sub>40</sub>, som grundar sig på koncentrationen av ozon i omgivande luft och inte på mängden ozon som tas upp till bladen. Detta har mer än ett akademiskt intresse, eftersom upptaget av ozon till bladen sker genom de s.k. klyvöppningarna (vetenskaplig benämning "stomata"). Dessa klyvöppningar kan växten öppna och stänga beroende bl a på väderförhållanden och tillgången på vatten i marken. Om det föreligger goda förhållanden för fotosyntesen hålls klyvöppningarna öppna, medan om det föreligger risk för att växten skall utsättas för vattenbrist stängs klyvöppningarna. Detta gör att inverkan av en viss koncentration av ozon i omgivande luft på växtligheten, dvs dess toxicitet, beror av såväl väderförhållanden som vattentillgången i marken. Ozon har en hög toxicitet i fullt

solljus med god vattentillgång men en låg toxicitet nattetid eller under mycket soliga men torra förhållanden, såsom i Medelhavsområdet sommartid. Sammanfattningsvis bestäms toxiciteten för växterna, vad gäller en viss ozonexponering beräknat som AOT40, till stor del av vilket klimat som rått under den period som AOT40 ackumulerats. Om inte klimatet varierar i betydande utsträckning inom en viss region, såsom t ex Svealand, behöver detta inte vara en stor nackdel, om effekterna av ozon utvärderas under samma klimat. Om AOT40 konceptet skall användas över ett mycket stort geografisk område, såsom t ex över hela Europa blir nackdelarna dock uppenbara. Dessutom medger AOT40 konceptet inte att ozonets inverkan på växtligheten utvärderas i relation till ett framtida, förändrat klimat.

Det andra alternativet är att byta indikator och anta det koncept som nyligen utvecklats inom LRTAP konventionen baserat på s.k. ozonflux, "Phytotoxic Ozone Dose", **POD**. Detta koncept bygger på att noggrant beräkna den mängd ozon som tas upp till bladen respektive barren. Man använder olika beräkningar för olika växtslag och olika klimatzoner i Europa. Metodiken finns redan inbyggd i den modell som finns framtagen för att beräkna luftförorenings-belastningen i Europa inom LRTAP konventionen, den s.k. MSC-W EMEP-modellen (European Monitoring and Evaluation Programme, [www.emep.int](http://www.emep.int)). Modellens beskrivning av ozonupptaget innehåller många olika processer såsom transporten av ozon från högre liggande luftlager till luften närmast bladen, transporten genom det laminära gränsskikt som finns närmast bladytan samt en modellmodul för att simulera hur växten styr klyvöppningarnas öppningsgrad (s.k. konduktans) beroende på väder mm. Den parameterisering och de målvärden som för närvarande används inom LRTAP är framtagna för att bäst beskriva inverkan av ozon på växtligheten i hela Europa och behöver nödvändigtvis inte vara den som bäst passar ozoninverkan i norra Europa.

Fördelen med POD-konceptet är att det är vetenskapligt väl förankrat och det är visat att på Europa-skalan förmår det på ett bättre sätt beskriva ozonets inverkan på både skog och jordbruksgrödor, jämfört med AOT40. Nackdelen är att konceptet är mycket data-intensivt och kräver tillgång till mycket avancerade modelleringsverktyg. Behovet av meteorologisk information är omfattande och kan i praktiken endast uppnås från meteorologiska databaser. Det är således svårt för en lokal myndighet att följa upp miljö kvalitetsmålet *Frisk Luft* med en indikator baserad på POD. EMEP modellen skulle kunna användas, men nackdelen är att det ofta föreligger en ganska lång eftersläpning i tiden innan POD kan beräknas för ett visst år. MATCH-Sverige modellen har inte lika lång eftersläpning i tiden, men den måste utvecklas ytterligare för att ge korrekta beräkningar av ozonupptaget till bladen, utifrån en effektsynpunkt.

Det tredje förslaget bygger på ett mellanting mellan AOT40 och POD, ett delvis nytt koncept som vi tills vidare kallar ett förenklat ozonflux, "Simplified Phytotoxic Ozone Dose", **S-POD**. Tanken är att på ett långtgående, men förenklat, sätt ta hänsyn till faktorer som modifierar ozonets toxicitet för växterna, baserat på ozonupptag till bladen, men som ändå är möjligt att övervaka för en lokal myndighet med en överkomlig insats. Konceptet bygger på att man modifierar uppmätta timvisa ozonhalter i luften baserat på uppmätta lufttemperaturer och luftfuktigheter samt de funktioner som tagits fram mellan klyvöppningarnas öppningsgrad och lufttemperatur respektive VPD. VPD (Air Water Vapour Pressure Deficit, sv. ångtrycksdeficit) är en parameter som beskriver luftens fuktighet utifrån hur mycket vattenånga som kan lösas



i luften vid en viss temperatur. Vid låga temperaturer i luften minskar bladens aktivitet, bl a fotosyntesen, och det finns därför ingen anledning att klyvöppningarna står öppna för att ta upp koldioxid till bladen. Även vid mycket höga temperaturer hämmas bladens fysiologiska aktivitet och klyvöppningarna stänger. Det som krävs för att beräkna S-POD är således ett ozoninstrument för att mäta timvisa koncentrationer av ozon i luften kring växtligheten samt enkla, relativt billiga meteorologiska givare som mäter temperatur och relativ fuktighet i omgivande luft. Genom att modifiera de timvisa ozonhalterna utifrån samtida luftfuktighet och VPD uppnår man timvisa modifierade ozonhalter som sedan ackumuleras under dagtid och under växtsäsongen på samma sätt som AOT40. Liksom för POD, används olika beräkningar för S-POD för att beräkna inverkan på olika växtslag.

De tre alternativen AOT40, POD samt S-POD har utvärderats utifrån hur väl de beskriver dos-respons relationer för inverkan av ozon på unga träd från experiment utförda i Sverige och Finland. POD är det koncept som bäst beskriver dos-respons relationer både vad gäller inverkan av ozon på biomassa-minskning hos unga träd av gran och björk. Det förenklade ozonfluxet, S-POD, fungerar emellertid nästa lika bra som POD vad gäller att beskriva dos-respons relationer från experimentella resultat. S-POD är dessutom avsevärt bättre än AOT40 vad gäller att beskriva dessa dos-respons relationer.

Utifrån ovan beskrivna analyser samt utifrån fördelar vad gäller övervakning på nationell och lokal nivå, framförs möjligheten att en indikator baserad på ett förenklat ozonflux över ett tröskelvärde 15 ppb (S-POD 15) används som indikator för att beskriva inverkan av ozon på växtligheten i Sverige inom miljömålet *Frisk Luft*. Vi föreslår att metoden att beräkna S-POD utgår från metodiken för ozonflux till gran, eftersom detta är det ekonomiskt viktigaste trädslaget i Sverige.

Årliga, ackumulerade värden för S-POD beräknades för ett antal platser runt om i Sverige där det finns tillgång till timvisa mätningar av ozonhalter, lufttemperatur och relativ fuktighet, med metodik inriktad på gran och björk. Resultaten visade att det för respektive plats beräknades en större negativ inverkan av ozon på biomassa hos björk, jämfört med gran.

Ett årligt målvärde föreslås för S-POD, beräknat utifrån metodik för gran, på 5 ppm-timmar per år. En ozonexponering på denna nivå resulterar under experimentella förhållanden i en årlig nedsättning av biomassan hos unga granar på ca 1 %. Översatt till en nedsättning av skogens tillväxthastighet uppskattas detta medföra en årlig ekonomisk förlust för Sveriges samlade skogsägare på i storleksordning 340 MSEK, jämfört med en situation i avsaknad av ozon.

Möjligheterna till beräkning av överskridande av målvärden för ozonets inverkan på växtligheten inom miljömålet Frisk Luft på regional och nationell skala blir avsevärt olika beroende på om målvärdet baseras på POD eller S-POD. För att beräkna POD är den huvudsakliga möjligheten att använda ozonflux som modelleras av EMEP. POD beräknas med EMEP-modellen på en relativt grov geografisk skala, ca 50 \* 50 km, och resultaten finns typiskt tillgängliga med en fördröjning på några år. MATCH-modellen är ännu inte kapabel till att modellera ozonflux utifrån perspektivet inverkan på växtligheten. Den andra möjligheten att beräkna POD är att utnyttja mätplatser som är

utrustade med instrument både för att mäta ozonhalter på en timbasis samt att mäta meteorologi på timbasis. De meteorologiska parametrar som krävs är vindhastighet, globalstrålning, lufttemperatur och –fuktighet. För att lagra alla dessa data krävs normalt ett avancerat loggersystem. Dessutom krävs antingen mätningar eller modellerade värden för markfuktighet. I dagsläget finns så vitt vi känner till endast fem platser i Sverige där dessa mätkrav uppfylls. Ingen av dessa platser ligger inom områden där ozon förekommer i de högsta halterna, såsom i Skåne och på västkusten. Inte ens vid dessa mätplatser beräknas dock markfuktighet. Det är svårt att se att en lokal myndighet såsom t ex en länsstyrelse kommer att ha möjlighet att genomföra dessa relativt avancerade mätningar.

För att beräkna S-POD krävs timvisa mätningar av ozonhalter samt timvisa mätningar av lufttemperatur och –fuktighet. I nuläget finns inom den nationella ozonövervakningen regelbundna mätningar av ozonhalter på timbasis vid 10 platser i landsbygdsmiljö. Dessutom mäts timvisa ozonhalter vid ytterligare fyra platser i förort. Under svenska förhållanden är skillnaden vad gäller ozonförekomst mellan landsbygd och förort minimal. Därutöver finns ytterligare en mätplats i landsbygdsmiljö med timvisa ozonhalter vid Norr Malma, norr om Stockholm, samt en mätplats i Norge vid Prestebakke, mycket nära gränsen till Dalsland. Sålunda finns i dagsläget totalt 16 mätplatser med timvisa ozonhalter representativa för landsbygdsmiljön. Dessa platser skulle kunna utrustas med enkel och billig utrustning för mätning och loggning av timvisa värden för lufttemperatur och –fuktighet. S-POD skulle därefter kunna beräknas för dessa platser efter en fulljord mätsäsong under sommarhalvåret.

Det pågår en långsiktig metodutveckling för att S-POD skall kunna beräknas utifrån mycket enkla mätningar av månadsvisa medelhalter för ozon, mätt med diffusiva, passiva provtagare i kombination med de enkla givare för mätning och loggning av lufttemperatur och –fuktighet som redan nämnts ovan. Om detta lyckas blir det möjligt för lokala myndigheter, t ex länsstyrelser, att övervaka S-POD lokalt till en låg kostnad, kanske samordnat på samma sätt som det nuvarande "Ozonmättnätet i södra Sverige".

## Summary

Alternatives for a new indicator for ozone impacts on vegetation in Sweden to be used within the Swedish Environmental Objectives have been investigated. The aim was that the new indicator should to a larger extent reflect the ozone flux, as compared to the currently used concept **AOT<sub>40</sub>**.

The ozone toxicity for vegetation relates to a large extent to the stomatal ozone uptake, i.e. the ozone flux. The stomatal ozone uptake depends on the weather conditions, the soil moisture as well as on phenology. The ozone flux can be estimated based on methods with different complexity. The methods used within the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, CLRTAP, to estimate **POD**, Phytotoxic Ozone Dose, are relatively complicated and relies either on advance meteorological measurements or on modelling, e.g. with the MSC-W EMEP-model.

In this study, a new concept was developed, called **S-POD**, Simplified Phytotoxic Ozone Dose. Measured hourly ozone concentrations are modified due to their relative toxicity related to the ozone flux. These modified ozone concentrations are accumulated during daytime above a threshold value, similar to the methodology used for AOT<sub>40</sub>.

The aim with the S-POD is that it should be possible to assess for a specific site with a limited number of measurements at a low cost. The measurements needed are hourly ozone concentrations and hourly values for air temperature and relative humidity.

The performance of the three different concepts AOT<sub>40</sub>, POD and S-POD were evaluated based on dose-response relationships for ozone impacts on young trees of Norway spruce (*Picea abies*) and European birch (*Betula pendula*) from experimental exposure studies in Sweden and Finland. POD was the concept that best explained biomass reductions caused by ozone. However, the S-POD<sub>15</sub> (with a threshold of 15 ppb) was almost as good explanatory variable as POD, and S-POD was far better than AOT<sub>40</sub>.

A preliminary annual target value for S-POD<sub>15</sub> was suggested to 5 ppm hours. This value could be linked to a yearly reduction of the biomass of young trees of approximately 1 %. This value could be translated into a yearly summed economic loss for all Swedish forest owners of 340 MSEK, as compared to a situation in the absence of negative ozone exposure.

## 1 Inledning

På uppdrag av Naturvårdsverket har utretts vilka möjligheter som finns att föreslå en reviderad indikator för inverkan av marknära ozon på växtligheten i Sverige, som på ett bättre sätt reflekterar ozonets toxicitet för växtligheten, baserat på s.k. ozonflux, jämfört med det koncept som används idag, AOT<sub>40</sub>. Inom projektet har olika möjligheter beaktats vad gäller vilken typ av ozonindex som skulle kunna användas, baserat främst på det utvecklingsarbete som bedrivits på Europeisk nivå inom konventionen om långväga transporterade luftföroreningar (CLRTAP) men även nya, innovativa index har utarbetats. Fördelar och nackdelar med det föreslagna nya ozonindexet för nationell och regional ozonövervakning diskuteras.

## 2 Miljömålssystemets syften

Enligt Miljömålspropositionen 2009/10:155 har miljömålssystemet bl. a. följande syften och principer:

- Det övergripande målet för miljöpolitiken är att till nästa generation lämna över ett samhälle där de stora miljöproblemen i Sverige är lösta. Miljökvalitetsmål anger det tillstånd i den svenska miljön som miljöarbetet ska leda till.
- Preciseringarna till miljökvalitetsmålen utgör grunden till att tolka miljökvalitetsmålen. Preciseringarna är de huvudsakliga kriterier som används för att bedöma möjligheterna att nå miljökvalitetsmålen.
- Indikatorer är stöd för miljömålsuppföljningen och kan ge en snabb och översiktlig bild över miljöutvecklingen och möjligheterna att nå målen
- Måluppnåelsen skall bedömas mot en definierad tidpunkt, år 2020.
- Regionala miljömål beslutas av regionalt miljömålsansvariga myndigheter efter samråd med länets samverkansorgan eller motsvarande. Länsstyrelserna har redan ansvar att följa upp och utvärdera de regionala miljömålen.

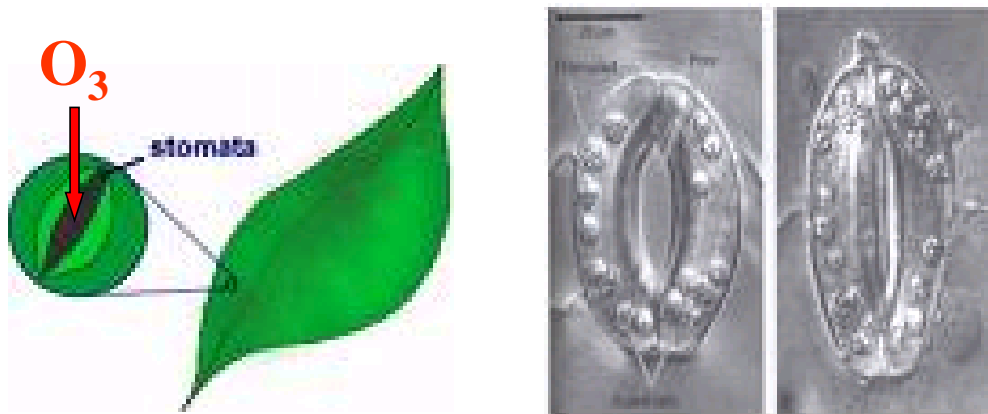
### 3 Betydelse av marknära ozon för växtligheten i Sverige och globalt

Ozon förekommer både i stratosfären och i troposfären (luftskiktet närmast marken) där det inandas av människor och diffunderar in i växternas blad och barr. I Sverige bedöms dagens ozonexponering ge skördeförkluster i jordbruket och minskad virkesproduktionen i skogen som motsvarar cirka 500 miljoner SEK årligen (Karlsson m.fl., 2006, 2009).

Marknära ozon anses vara den luftförorening som orsakar störst skador på växtligheten i Europa, och globalt sett är ozonets påverkan på jordbruksgrödors avkastning och skördeprodukternas kvalitet en viktig aspekt av den framtida livsmedelssäkerheten (Royal Society, 2008).

### 4 Ozonets inverkan på växtligheten - mekanismer

Alla växter har ett skyddande ytskikt på sina blad, det s.k. epikutikulära vaxskiktet. Detta vaxskikt är inert mot ozon. Detta medför att ozon inte i någon större utsträckning påverkar växterna från bladens utsida. Istället måste ozonet tas upp till bladens inre för att utöva sin negativa verkan. Detta ozonupptag sker genom diffusion genom bladen s.k. klyvöppningar, s.k. stomata. Dessa utgör mikroskopiska porer i bladens yttersta skikt. Växterna kan öppna och stänga dessa klyvöppningar allt utifrån behovet att ta upp koldioxid för fotosyntesen samtidigt som växterna undviker en alltför stor vattenförlust från bladens inre till omgivande luft, s.k. transpiration.



**Figur 1.** En illustration av ozonupptag till bladen genom klyvöppningarna (stomata) samt mikroskopiska fotografier av öppna respektive stängda klyvöppningar. Ljus och god tillgång till vatten är faktorer som gynnar öppna klyvöppningar, mörker och brist på vatten medför stängda klyvöppningar.

Väl inne i växterna löser sig ozonet i den vätska som omger cellerna och fria radikaler bildas. De fria radikaler och reaktiva syrederivat som bildas vid ozonexponering ger skador på cellernas strukturer. Klorofyll, lipider och proteiner förändras eller bryts ner,

strukturer som är nödvändiga för att upprätthålla viktiga processer såsom t.ex. fotosyntesen. Ozonupptag till bladen leder därför bl. a. till minskad fotosyntes och förtidigt åldrande med åtföljande bladavfall.

## 5 Hur övervakas och begränsas ozonbildningen över Sverige?

### 5.1 Övervakning av ozonhalter i luft i landsbygdsmiljön

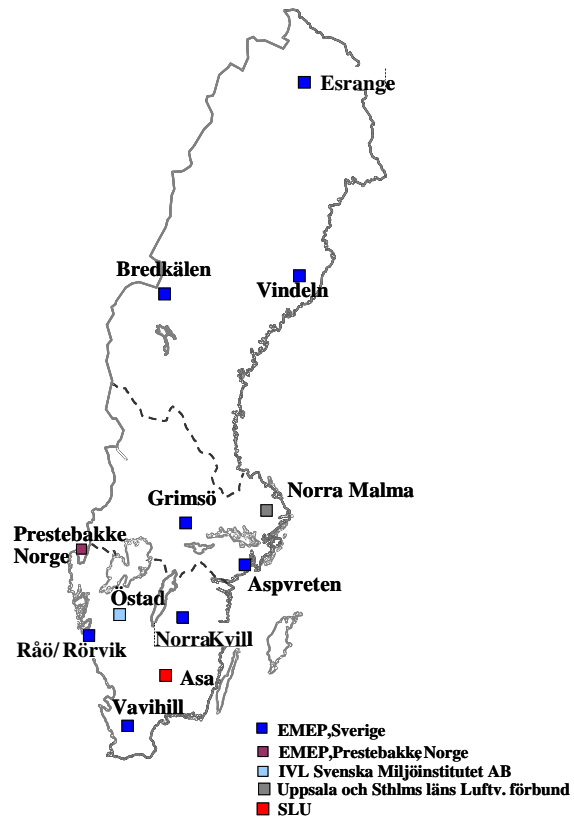
Inom ramen för den nationella miljöövervakningen (som finansieras av Miljöövervakningsenheten vid Naturvårdsverket) har övervakning av marknära ozon i landsbygdsmiljön fram till 2013 bedrivits med kontinuerligt registrerande UV-absorptionsinstrument i regional bakgrundsluft vid totalt 8 stationer inom det s.k. EMEP-programmet (Figur 2). IVL driver 7 av dessa, medan en station sköts av Institutionen för tillämpad miljövetenskap (ITM) vid Stockholms Universitet. Instrumenten kalibreras tre gånger per år. Dessa mätningar beskrivs ytterligare på IVL's hemsida, [www.ivl.se](http://www.ivl.se).

Ozonövervakning i regional bakgrundsluft har också bedrivits sommartid, april – september, vid Östads Säteri, 45 km nordost om Göteborg i regi av IVL och Göteborgs Universitet. Länsstyrelsen i Västra Götaland och Naturvårdsverket har gemensamt finansierat dessa mätningar. I olika perioder har ozon också mätts vid Asa försökspark, ca 20 km norr om Växjö i regi av Sveriges Lantbruksuniversitet, SLU. Sedan 2006 finansierades dessa mätningar av det s.k. Ozonmättnätet i södra Sverige. Detta mättnät finansieras i sin tur av ett antal länsstyrelser i södra och mellersta Sverige. Sedan 2013 har ozonmätningarna vid Östads Säteri och Asa övergått i den nationella ozonövervakningen, finansierad av Naturvårdsverket.

Inom verksamheten för Stockholms och Uppsala läns Luftvårdsförbund mäts ozon med UV-instrument över öppet fält vid Norr Malma, strax utanför Norrtälje.

Sedan 2013 har fyra nya mätplatser för ozon startats upp i förortsmiljö inom den nationella ozonövervakningen, Djursholm utanför Stockholm, Ytterby, utanför Göteborg, Staffanstorp utanför Malmö samt Rödeby utanför Karlskrona. Det måste utvärderas i vad mån dessa mätningar kan användas även för att bedöma ozonförekomst i närliggande bakgrundsluft.

**Figur 2.** Karta som visar platser där ozonhalterna i luften mättes med UV-absorptionsinstrument med timupplösning i regional bakgrundsluft fram till 2013. I figuren presenteras även en av de norska EMEP-stationerna, Prestebakke, belägen mycket nära gränsen till Sverige. Från och med 2013 har fyra nya mätplatser för ozon startats upp i förortsmiljö inom den nationella ozonövervakningen.



## 5.2 Begränsning av ozonbildningen

Sverige som nation kan påverka ozonförekomsten nära marken över Sverige genom att verka på tre olika arenor:

- *Den nationella arenan.* Påverka nationella utsläpp av ozonbildande ämnen, genom olika regler och tillståndsgivning
- *Den europeiska arenan.* Påverka utsläppen av ozonbildande ämnen från Europas länder, genom EU och LRTAP konventionen
- *Den globala arenan.* Påverka utsläpp av ozonbildande ämnen över hela norra halvklotet.

Det har gjorts uppskattningar av hur olika källor av ozonbildande ämnen från olika kontinenter samt genom nedblandning från stratosfären, bidrar till den ozonförekomst som vi har i Europa (Derwent m.fl., 2004). Beräkningar från globala kemi/transport modeller indikerar att ca 50% av ozonförekomsten i de Nordiska länderna beror av utsläpp av ozonbildande ämnen från Europa, ca 20% beror på utsläpp från



Nordamerika och ca 15% beror på utsläpp från Asien. Resterande del beror på nedtransport från stratosfären.

Nuvarande utsläpp av ozonbildande ämnen inom Sveriges gränser har en begränsad påverkan på ozonförekomsten i Sverige. SMHI har på uppdrag av Länsstyrelsen i Västra Götalands län modellerat effekterna av en 50 % minskning av utsläppen av kväveoxider och flyktiga organiska kolväten från Västra Götaland. Resultaten visar att dessa minskningar får ett mycket begränsat inflytande på den maximala ozonhalten i västra Sverige sommartid (Langner m. fl., 2004). Svenska utsläpp av ozonbildande ämnen är dock inte oväsentliga eftersom de adderar till den ozonbildning som sker på grund av långdistanstransport.

Ozonförekomsten i Sverige är starkt beroende av bakgrundshalterna över norra halvklotet. För att uppnå målen för ozon på lång sikt kommer troligen den viktigaste arenan att vara global, i synnerhet om beslutade och förväntade åtgärder inom Europa kommer att verkställas.

## 6 Nuvarande miljö kvalitetsmål för ozon

Nuvarande preciseringar för ozon och växtlighet inom miljö kvalitetsmålet Frisk Luft:

- marknära ozon överstiger inte 70 mikrogram per kubikmeter luft beräknat som ett åttatimmarsmedelvärde, 80 mikrogram per kubikmeter luft beräknat som ett timmedelvärde och 10 000 mikrogram per kubikmeter luft under en timme beräknat som ett AOT40-värde under perioden från och med april till och med september.

För en beskrivning av hur AOT40 beräknas, se kapitel 9.1.

## 7 Syftet med en reviderad indikator för ozonets inverkan på växtligheten baserat på ozonflux

Konceptet med AOT40 är, även om det ännu används i EU's direktiv, något föråldrat. Det har skett ett omfattande vetenskapligt arbete med att utveckla ett nytt koncept för ozonets inverkan på växtligheten baserat på ozonupptag till bladen, s.k. ozonflux (se kapitel 4). Det finns därför flera motiv till att utveckla och uppdatera nuvarande indikator för ozonets inverkan på växtligheten i Sverige.

- Att så korrekt som möjligt beskriva inverkan av ozon på växtligheten i Sverige i nuläget.
- Att möjliggöra en korrekt beskrivning av inverkan på växtligheten i Sverige i ett framtida förändrat klimat.
- Att vara användbart såväl i det lokala miljöarbetet som vid internationella förhandlingar om utsläppsbegränsningar av ozonbildande ämnen



## 8 Möjligheter för en utveckling av preciseringen för ozon och växtlighet inom miljömålet *Frisk Luft*

Tre möjligheter:

- Att behålla nuvarande indikator, baserad på AOT40.

Fördelar: Ett politiskt väl beprövat koncept. Dos-effekt relationer baserat på AOT40 finns i stor omfattning för olika växtslag. AOT40 används redan i EU´s lagstiftning.

Nackdelar: Principiellt otillfredsställande eftersom vi vet att ozon måste tas upp till bladen för att utöva sin verkan. Det har skett en omfattande vetenskaplig utveckling inom detta område. AOT40 konceptet kan inte reflektera inverkan av klimatskillnader på ozonets toxicitet för växter.

- Att direkt överta definitioner av och metodik för det nya konceptet med ozonflux (Phytotoxic Ozone Dose, POD) från LRTAP konventionen.

Fördelar: EMEP modellen kan användas för att modellera ozonfluxvärden över Sverige. Metodik accepterad på olika vetenskapliga och politiska nivåer.

Nackdelar: På grund av komplicerad metodik, svårt för lokal myndighet att bedriva lokal övervakning. Konceptet är svårt att förstå för icke-expert. Uppföljning av målpuppfyllelse riskerar eftersläpning i tiden.

- Att modifiera och förenkla definitioner av och metodik för ozonflux för att särskilt passa svenska förhållanden och lokal övervakning, S-POD.

Fördelar: Kan konstrueras att bättre passa lokal övervakning. Övervakning kan genomföras med relativt begränsade kostnader och kompetens. Konceptet kan "marknasföras" som en toxicitets-modifierad ozonhalt.

Nackdelar: Det är ett nytt koncept som ännu inte är förankrat vetenskapligt eller politiskt inom LRTAP. Det finns ännu ingen möjlighet att rapportera detta index internationellt. Effekter av markfuktighet inkluderas ej i konceptet.

## 9 Aspekter vad gäller val av koncept för preciseringen

### 9.1 AOT40

#### 9.1.1.1 Beskrivning

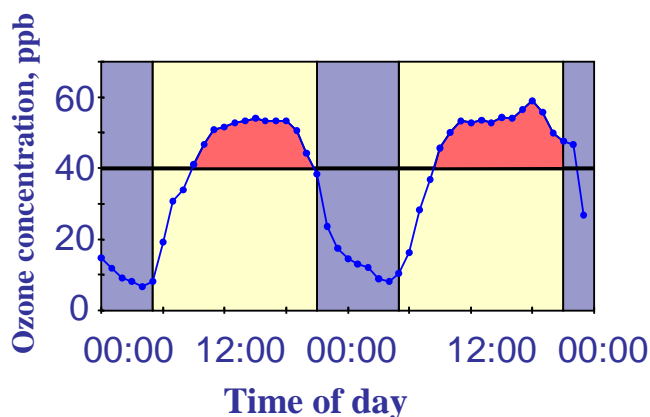
Begreppet AOT40 (Accumulated Ozone exposure above a Threshold 40 ppb) utvecklades under 1990-talet (Fuhrer et al., 1997). Principerna bakom begreppet var att ozoneffekter på växter beskrevs bäst som en ackumulerad dos och att denna dos skulle ackumuleras över ett tröskelvärde. Sistnämnda grundar sig på tanken att växter förmår till viss del att neutralisera oxidativ stress genom de omfattande anti-oxidationssystem som finns i bladens vävnad. AOT40 ackumulerades endast under dygnets ljusa timmar vilket i viss mån tar hänsyn till att ozonet måste tas upp till bladets inre genom

klyvöppningarna. Klyvöppningarna är vanligtvis öppna på dagen och stängda på natten.

Tröskelvärdet sattes till 40 ppb, vilket i stor utsträckning var en kompromiss och beror på den relativt höga ozonförekomsten över kontinentala och södra Europa. Om konceptet AOT40 skulle ha applicerats enbart för de Nordiska länderna skulle sannolikt ett lägre tröskelvärde valts, t ex 30 ppb.

Man kunde visa att ozonets negativa inverkan på skördeutbytet hos vissa jordbruksgrödor vid experiment i s.k. fältkammare korrelerade relativt väl med AOT40 (Fuhrer et al., 1997). Det samma gällde även för experiment med unga träd i fältkammare (Skärby et al., 2004).

**Figur 3.** En illustration av metoden för att beräkna AOT40 dagtid. figuren visar timvisa lufthalter av ozon under två dygn. AOT40 beräknas genom att integrera ozonhalterna som överstiger 40 ppb, subtraherat med 40 ppb, vilket illustreras av det röda området.



### 9.1.1.2 Fördelar

Fördelarna med att använda AOT40 som indikator inom miljömålssystemen, som är fallet i dagsläget, är att begreppet är väl etablerat såväl på Europeanivå som globalt, i synnerhet inom EU. Det finns redan en politisk acceptans för begreppet.

### 9.1.1.3 Nackdelar

Det är väl etablerat att om klyvöppningarna är stängda tas inget ozon upp till bladen (Laisk et al, 1989, Karlsson et al., 2009) och ozonet kan därför inte, som redan beskrivits ovan, utöva sin negativa verkan. Detta tas inte hänsyn till inom AOT40 begreppet, förutom i viss mån av att AOT40 ackumuleras endast under ljusa timmar. Problemet med detta blir särskilt tydligt när man jämfört inverkan av en viss ozonhalt i norra och södra Europa (Karlsson et al., 2009). I medelhavsområden råder sommartid ofta mycket höga ozonhalter. Emellertid är luftfuktigheten ofta låg (hög VPD) och markerna ofta torra. Både dessa egenskaper bidrar till att klyvöppningarna hålls relativt stängda och att mängden ozon som tas upp till bladen vid en viss koncentration i luften blir relativt låg.

Om ett ozonindex skall användas över ett geografiskt område med relativt stora skillnader i klimat är det således viktigt att använda ett index, såsom t.e x. ozonflux, som på ett bra sätt reflekterar mängden ozon som tas upp till bladens inre under olika väderförhållanden. AOT40 har en begränsad relevans i detta avseende.

## 9.2 Ozonflux i den form som används inom luftkonventionen - POD

### 9.2.1.1 Beskrivning

Inom konventionen om långväga transporterade luftföroreningar, LRTAP, har man under det senaste året arbetat fram ett koncept för riskbedömning vad gäller ozonets inverkan på växtligheten på Europa-skalan (Mapping Manual, 2004). Konceptet bygger på att kvantifiera den mängd ozon som tas upp till bladen genom klyvöppningarna. Konceptet benämns POD, *Phytotoxic Ozone Dose*.

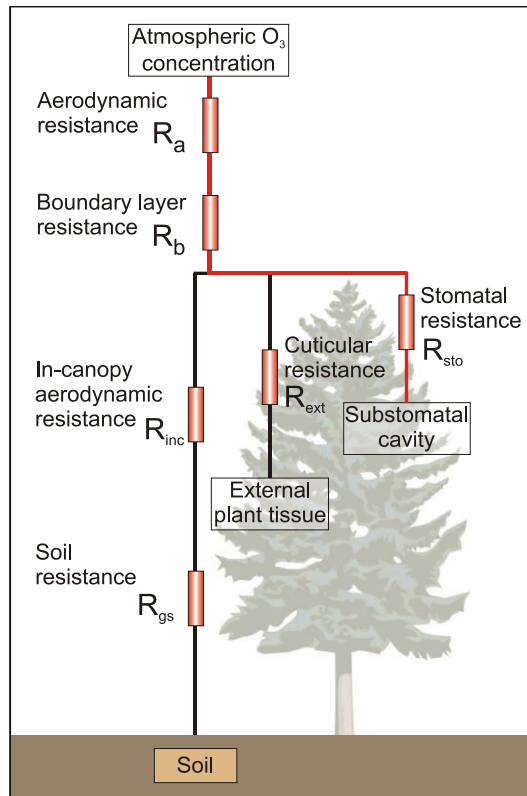
Upptaget av ozon från omgivande luft till bladens inre sker genom en diffusionsprocess genom klyvöppningarna (Figur 4). Det finns dessutom flera steg som styr transporten från omgivande luft till luftskiktet just utanför klyvöppningarna. Alla dessa transportprocesser följer väl kända, generella lagar som gäller allt gasutbyte mellan vegetation och atmosfär, såsom upptag av koldioxid till bladens fotosyntes och avgången av vatten från bladen genom transpiration. Dock gör man antagandet att koncentrationen av ozon inne i bladen är noll (Laisk et al, 1989).

Det är mycket komplicerat att direkt mäta ozonupptaget till bladen under fältmässiga förhållanden. Man kan använda mikrometeorologiska metoder men den mätutrustning som krävs är mycket komplicerad och dyrbar så detta görs endast vid ett fåtal platser. Dessutom är det mycket svårt med dessa metoder att avgöra vilken andel av ozonfluxet till skogen som går genom klyvöppningarna och vilken del som beror av att ozonet reagerar med olika externa ytor på träden respektive mot marken.

På grund av svårigheterna med mätning brukar istället ozonupptaget till växtligheten beräknas utifrån modellerad s.k. stomatakonduktans (ett mått på klyvöppningarna öppningsgrad, kan direkt kopplas till diffusionen av ozon genom klyvöppningarna) samt ozonkoncentrationer i omgivningsluften utifrån vad som beskrivits ovan samt i figur 4. Det finns en mycket omfattande kunskap om hur man skall modellera stomatakonduktans beroende på dess centrala betydelse för att modellera fotosyntes och vattenavgång från växtligheten. Dock krävs en omfattande kännedom om olika meteorologiska parametrar, såsom lufttemperatur och fuktighet, vindhastighet och solstrålning med minst tim-upplösning. Dessutom behöver man information om markfuktigheten, vilket oftast modelleras. Slutligen behövs kännedom om växternas s.k. fenologi, dvs när bladsprickning sker, när bladen vissnar om hösten etc.

En övervakning av ozonflux till växtligheten är således relativt krävande och kräver tillgång till meteorologisk information och modelleringsverktyg. Detta beskrivs ytterligare nedan.

**Figur 4.** En illustration av de olika steg som styr upptaget av ozon från atmosfären till bladens/barrens inre ("substomatal cavity"). Efter Emberson et al., (2000).



### 9.2.1.2 Fördelar

Som beskrivits ovan utgör ozonflux i dagsläget det ozonindex som mest störst relevans beskriver ozonets inverkan på växtligheten utifrån dagens kunskap. Det bör dock betonas att inte heller ozonflux representerar den perfekta beskrivningen av ozonets inverkan på växtligheten, eftersom en komponent saknas vilket är växternas förmåga att neutralisera oxidativ stress genom sina interna anti-oxidantsystem. Denna förmåga att neutralisera oxidativ stress har dock ett pris för växterna eftersom anti-oxidationssystemen måste regenereras efter det att de varit aktiva och denna regenerering kräver kemisk energi som annars växten kunde ha använt för bl. a. tillväxt. Vi har ännu inte kvantitativa metoder för att kunna inkorporera detta i ett ozonindex såsom t ex i ozonflux.

### 9.2.1.3 Nackdelar

Som beskrivits ovan krävs relativt stora insatser för att kunna beräkna ozonflux till växtligheten i ett övervakningsperspektiv. SMHI har ett ansvar att bedriva miljöövervakning, inklusive ozonförekomst. MATCH-Sverige modellen är i nuläget dock i huvudsak utformat för att beräkna ozonkoncentrationer i omgivningsluften. MATCH modellen innehåller även komponenter för att beräkna depositionen mot mark och växtlighet, men den är i nuläget utformad för att bidra till att optimera beräkningar av ozonhalter i luft och inte för att beräkna ozonupptag genom klyvöppningarna.

EMEP-modellen kan beräkna ozonupptag genom klyvöppningarna till olika former av växtlighet över Europa. Eftersläpningen i tid vad gäller EMEP's modelleringar av ett visst år är dock relativt lång vilket inte gör det särskilt användbart vad gäller nationell miljömålsuppföljning i Sverige.

EMEP MSC-W modellen (Simpson et al, 2007, 2012) kan beräkna ozonupptag genom klyvöppningarna till olika former av växtlighet över Europa i geografiska skalan från ca. 10 \* 10 km till 50 \* 50 km (e.g.Simpson et al., 2007, Karlsson et al., 2009, Mills et al., 2011). Eftersläpningen i tid vad gäller EMEPs standard modelleringar av ett visst år är dock relativt lång typiskt 2 år vilket försvårar användbarheten vad gäller nationell miljömålsuppföljning i Sverige.

Det finns en viss möjlighet att utveckla lokala modeller för stomatakonduktans vid en viss plats eller inom ett visst lokalt område. Detta kräver dock kännedom om ozonhalter och meteorologi för området samt en lokal modell för markfuktighet.

Sammanfattningsvis finns problem vad gäller miljömålsuppföljningen av en indikator baserad på ozonflux, både på nationell och lokal nivå.

## 9.3 Ett förenklat koncept för ozonets toxicitet för växter – S-POD

### 9.3.1.1 Beskrivning

Ett ozonindex som beskriver ozonets toxicitet för växtligheten, konstruerat som ett förenklat ozonflux, skulle kunna utgöra ett mellanting mellan alternativen som beskrivits ovan. Det finns redan i luftkonventionen framtaget ett ozonindex kallat VPD-modifierat AOT (Pihl Karlsson m. fl., 2004, Mapping Manual, 2004), avsett för synliga, akuta bladskador av ozon på känsliga (indikator)växter.

Principen är att olika meteorologiska parametrar (t ex lufttemperatur och luftfuktighet (VPD)) påverkar ozonets toxicitet för växterna genom att påverka ozonupptaget via klyvöppningarna. Man kan ta hänsyn till detta genom att modifiera den uppmätta ozonkoncentrationen på timbasis med en faktor som beror av meteorologin för samma timme. Metoden är tidigare endast framtagen för att beskriva inverkan av VPD på förekomsten av synliga bladskador på särskilt känsliga växtslag (Pihl Karlsson et al., 2004, Mapping Manual, 2004).

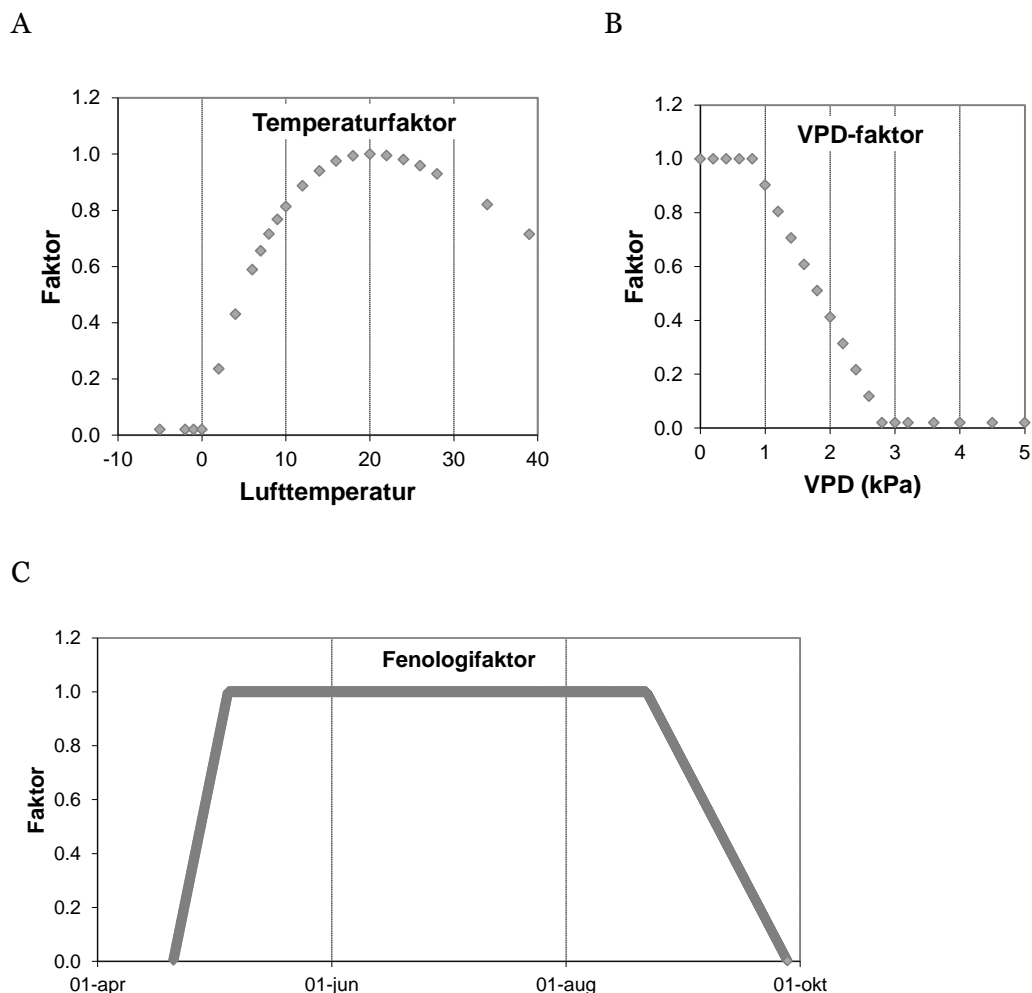
Vi föreslår här att metoden med ett modifierat AOT vidareutvecklas för att innefatta även andra meteorologiska faktorer som påverkar ozonupptaget genom klyvöppningarna såsom lufttemperatur, solstrålning, växtutveckling (fenologi) samt relativ konduktans. Vi föreslår att detta kallas för en förenklad, toxicitetsmodifierad ozondos, S-POD, *Simplified Phytotoxic Ozone Dose*. Detta gör att indexet knyter an till det POD som utvecklats inom LRTAP konventionen. De funktioner som används för att beräkna S-POD beskrivs i detalj i Bilaga 1.

Den grundläggande principen bakom S-POD är att uppmätta halter av ozon modifieras utifrån ett antal funktioner som skall beskriva hur olika vädersituationer samt olika

stadier i växternas utvecklingsfas påverkar ozonets toxicitet. Detta beskrivs med faktorer som kan anta värden mellan 0 och 1, där ett värde 1 innebär att toxiciteten är maximal medan ett värde 0 innebär att toxiciteten är mycket låg.

Tillvägagången för att etablera S-POD som ett nytt ozonindex att användas i miljömålsarbetet beskrivs i det följande. Utgångspunkten utgörs av experiment där olika växtslag utsätts för olika nivåer av ozon under experimentella förhållanden. De ozondoser som växterna utsätts för beräknas genom att timvisa uppmätta ozonhalter modifieras utifrån funktioner baserade på lufttemperatur och luftfuktighet, samt växternas utvecklingsstadium (fenologi, t ex växtsäsongens start) samt utifrån antagandet om det är dag eller natt (dag kl 08-20, natt kl 20-08). Vi beräknar således timvisa, toxicitetsmodifierade ozonhalter för experimenten. Dessa modifierade timvisa ozonhalter ackumuleras under experimentperioden över ett tröskelvärde. Detta tröskelvärde reflekterar att de flesta växter har en inneboende anti-oxidantkapacitet som gör att det ozon som tas upp till bladen behöver överskrida detta tröskelvärde för att ha en negativ inverkan på metabolism etc. Vi uppnår nu en ackumulerad dos av toxicitetsmodifierad ozon för varje experiment, S-POD<sub>xx</sub>, där xx representerar det tröskelvärde som använts. Detta kan nu jämföras med den negativa effekt som man i experimentet uppnått av ozonbehandlingen t ex en nedsatt tillväxt. Man får således ett dos-respons förhållande för ozonets inverkan baserat på S-POD<sub>xx</sub>. Baserat på motsvarande fältmätningar av ozonhalter och lufttemperatur/fuktighet kan man beräkna S-POD<sub>xx</sub> för en viss plats. Om detta sätts in i dos-respons relationen kan man beräkna hur stor negativ effekt som ozon man kan förväntas ha haft vid platsen ifråga för ett visst växtslag. Från dos-responsrelationen behöver man bestämma sig för vilken negativ effekt av ozon på växtslaget som kan accepteras för att utifrån detta sätta ett målvärde för S-POD<sub>xx</sub>.

I figur 5 beskrivs några funktioner som används för att beräkna ozonets toxicitet för gran utifrån luftens temperatur och ångtrycksdeficit (VPD). Dessutom visas hur ozonets toxicitet varierar med granens utvecklingsfas under året (fenologi).

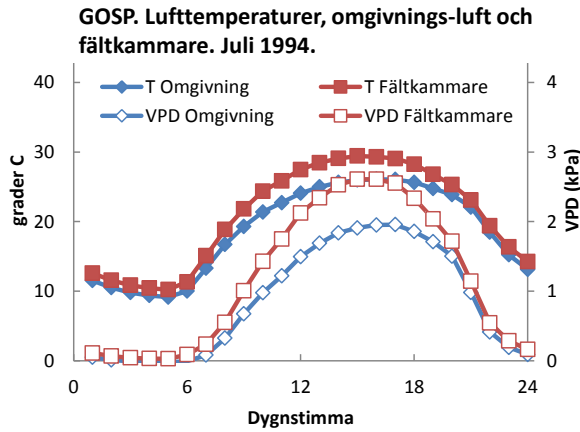


**Figur 5.** Olika modifierande faktorer för ozonets toxicitet för gran, baserat på lufttemperatur (A), luftfuktighet, VPD (B) samt växtens utveckling, fenologi (C). Faktorerna är framtagna för GOSP projektet vid Östads Säteri 1992-1996.

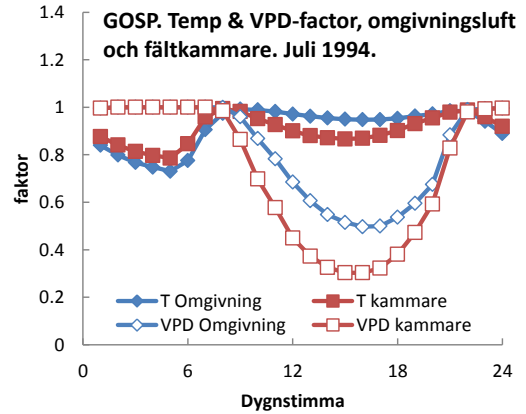
Exempel på hur lufttemperatur och VPD kan variera i omgivningsluften och inuti en fältkammare, samt hur detta resulterar i olika toxicitets-modifierande faktorer för lufttemperatur, VPD samt totalt visas i Figur 6, 7 och 8. Lägg märke till att beräkningarna vad gäller för gran och björk görs en korrigerig av ozonhalter baserat på den s.k. relativa konduktansen, vilket för gran sänker ozonhalter med en faktor 0.7 (björk=1.0).

IVL-rapport C 57 Ett förenklat koncept för inverkan av ozon på växtligheten i Sverige baserat på ozonflux

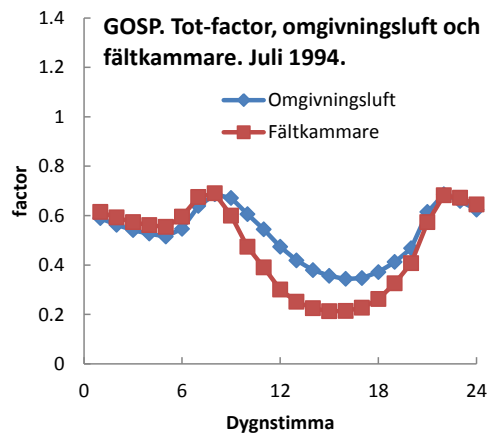
A



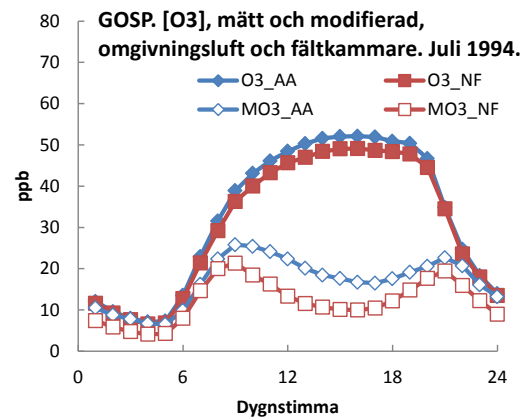
B



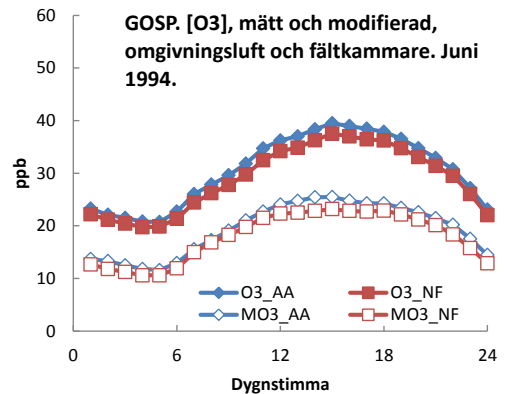
C



D



E

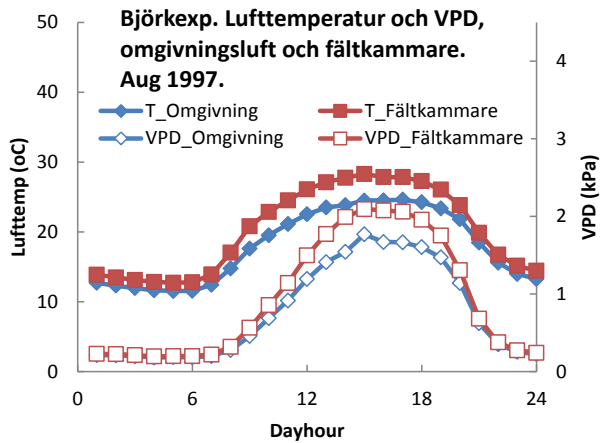


**Figur 6.** Experimentet Östad-gran (Gothenburg Ozone spruce Project, GOSP). Månadsvisa medelvärden uppdelat per dygnstimma för lufttemperatur och ångtrycksdeficit, VPD (A), temperatur- och VPD-baserad modifieringsfaktorer (B), total modifieringsfaktor (C), uppmätt (O<sub>3</sub>) och toxicitets-modifierad (MO<sub>3</sub>) ozonhalter (D). Ozonhaltererna är modifierade även utifrån relativ konduktans för gran (faktor 0.7). Värdena visas för omgivningsluft (1m över mark) samt för fältkammare för månaden juli 1994, vilket var en ovanligt varm månad. Data från GOSP experimentet med gran vid Östads Säteri. I figur E visas som jämförelse uppmätt (O<sub>3</sub>) och dos-modifierad (MO<sub>3</sub>) ozonhalter för en kall och regnig månad juni 1994.

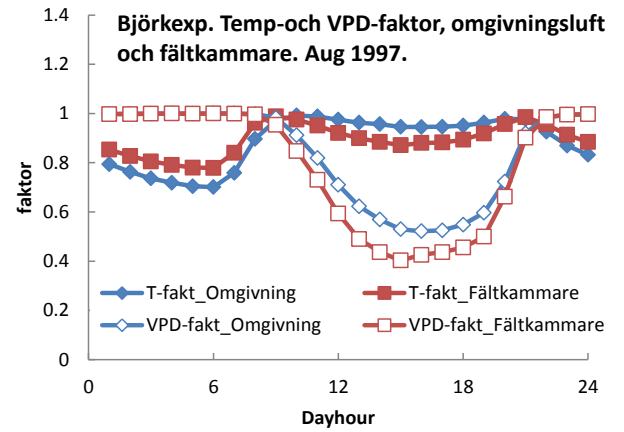


IVL-rapport C 57 Ett förenklat koncept för inverkan av ozon på växtligheten i Sverige baserat på ozonflux

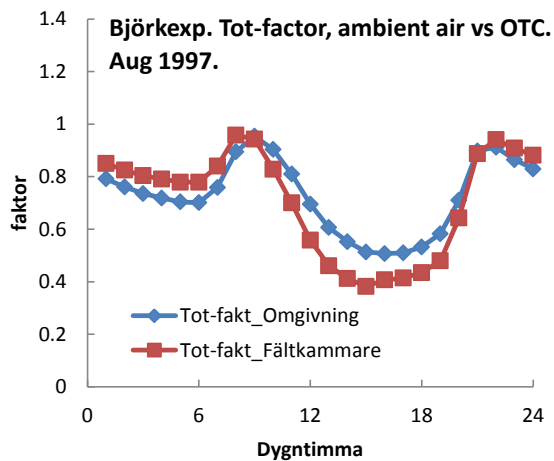
A



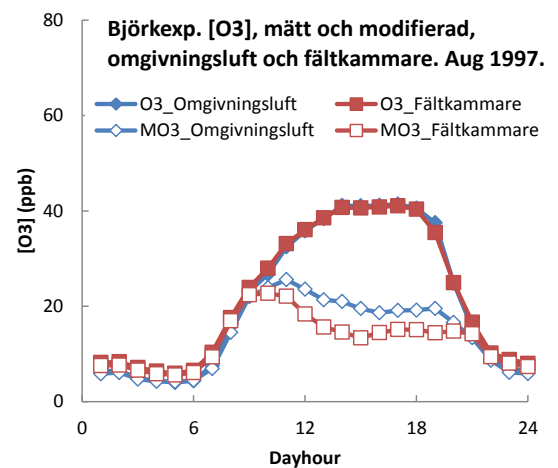
B



C

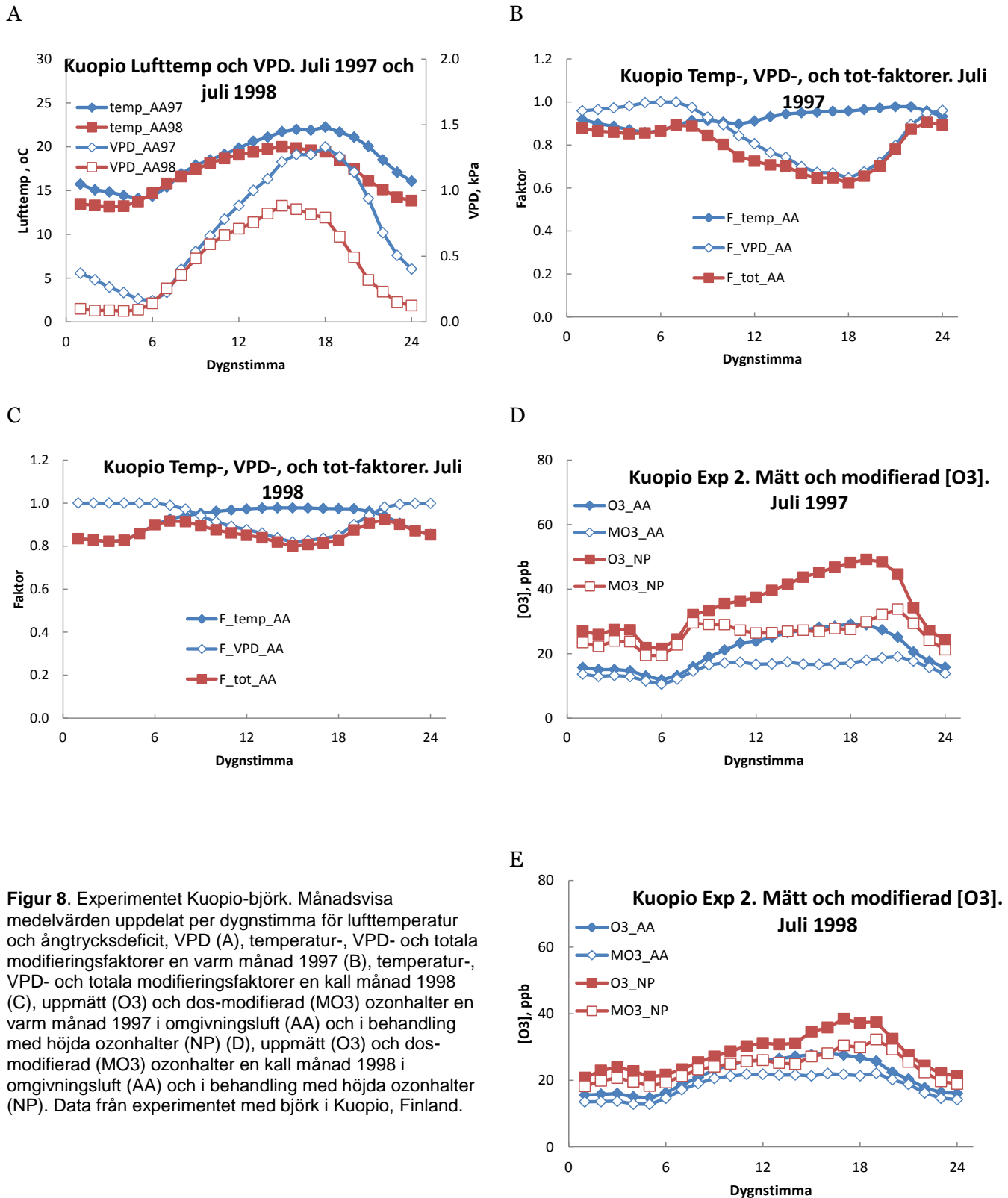


D



**Figur 7.** Experimentet Östad-björk. Månadsvisa medelvärden uppdelat per dygnstimmor för lufttemperatur och ångtrycksdeficit, VPD (A), temperatur- och VPD-baserad modifieringsfaktorer (B), total modifieringsfaktor (C), uppmätt (O<sub>3</sub>) och dos-modifierad (MO<sub>3</sub>) ozonhalter (D). Värdena visas för omgivningsluft (1 m över mark) samt för fältkammare för månaden augusti 1997. Data från björkexperimentet vid Östads Säteri.

IVL-rapport C 57 Ett förenklat koncept för inverkan av ozon på växtligheten i Sverige baserat på ozonflux



**Figur 8.** Experimentet Kuopio-björk. Månadsvisa medelvärden uppdelat per dygnstimma för lufttemperatur och ångtrycksdeficit, VPD (A), temperatur-, VPD- och totala modifieringsfaktorer en varm månad 1997 (B), temperatur-, VPD- och totala modifieringsfaktorer en kall månad 1998 (C), uppmätt (O3) och dos-modifierad (MO3) ozonhalter en varm månad 1997 i omgivningsluft (AA) och i behandling med höjda ozonhalter (NP) (D), uppmätt (O3) och dos-modifierad (MO3) ozonhalter en kall månad 1998 i omgivningsluft (AA) och i behandling med höjda ozonhalter (NP). Data från experimentet med björk i Kuopio, Finland.

### **9.3.1.2 Fördelar**

Fördelarna med ett förenklat ozonflux, S-POD, är att det är mycket lättare att mäta för en lokal myndighet, t ex en länsstyrelse, men även att det är lättare att förstå för en icke-expert, jämfört med det flux-baserade konceptet POD. S-POD tar till stor del hänsyn till väderförhållanden som påverkar ozonupptaget genom klyvöppningarna och därmed vilken effekt en viss koncentration av ozon i omgivningsluften har på växtligheten samtidigt som det är avsevärt enklare att följa upp, jämfört med ozonflux i sig.

På lokal nivå skulle man kunna följa upp detta ozonindex genom att mäta ozonhalter med instrument på en tim-basis samt genom att mäta lufttemperatur och fuktighet på timbasis med enkla meteorologiska givare. Alla dessa mätningar är relativt billiga att genomföra.

### **9.3.1.3 Nackdelar**

Konceptet med S-POD är i stort sett nyframtaget och därmed inte etablerat, varken vetenskapligt eller inom policyområdet. Markfuktighet är inte inkluderat i konceptet, vilket kan vara en nackdel under vissa torra år i sydöstra och södra Sverige.

## **9.4 Tester av olika ozonindex**

### **9.4.1 Allmänt**

För att utvärdera vilket ozonindex som har bästa möjligheter vad gäller att beskriva inverkan av ozon på växtligheten i Sverige, applicerade vi de olika ozonindexen på dos-respons relationer för data från experimentella studier med unga träd.

Vad gäller inverkan på jordbruksgrödor har vi lagt en avsevärd möda på att applicera konceptet S-POD på experimentella studier av ozoneffekter på jordbruksgrödor från Sverige och Finland samt att därefter applicera resultaten på ett antal platser runt om i Sverige, där det bedrivs mätningar av ozonhalter, lufttemperatur och relativ fuktighet på timbasis. Dessa studier resulterade dock i beräknade negativa effekter av ozon på skördeutbytet av vete för fältmässiga förhållanden vid olika platser som inte kunde anses realistiska (dvs effekterna var orimligt stora). Detta beror sannolikt på att jordbruksgrödor är ettåriga växtslag som har en känslighet för ozonexponering under en relativt kort tidsperiod. Denna period beräknas utifrån ackumulerade temperatursummor. Sannolikt ledde detta till komplikationer när detta beräknades för experimentella förhållanden i fältkammare jämfört med fältmässiga förhållanden. Vi beslutade därför att lägga beräkningarna vad gäller S-POD och jordbruksgrödor åt sidan tills vidare och istället koncentrera denna studie till ozonets inverkan på gran och björk.

#### 9.4.2 Urvalet av experimentella data för att testa olika ozonindex för inverkan unga träd

Urvalet av experimentella data som användes för att testa olika ozonindex gjordes baserat på ett antal olika kriterier. Generellt kan sägas att inverkan av ozon på träd sker med en förhållandevis låg "intensitet", dvs inverkan av ozon per tidsenhet är låg t ex jämfört med inverkan på jordbruksgrödor. Trädens långa livslängd gör emellertid att inverkan av ozon fram tills avverkning ändå blir betydelsefull. Detta ställer dock till svårigheter vad gäller experimentella studier av inverkan av ozon på trädens tillväxt. De experimentella exponeringarna av träd för olika ozonnivåer måste vara förhållandevis långa, helst ett antal år. Den låga inverkan av ozon per tidsenhet medför svårigheter att urskilja ozoneffekterna på ett statistiskt säkerställt sätt jämfört med de slumpvisa variationer som alltid finns inom experimentella system. Som en konsekvens av detta har vi endast använt data för ozonets inverkan på trädens tillväxt från en tidpunkt då ozonexponering varat som längst, dvs vid experimentens slut.

Ozonets inverkan på träden är beroende av rådande klimat, framför allt beroende på att vädret påverkar hur mycket ozon som tas upp till bladen. Det är därför viktigt att experimenten har bedrivits under klimatförhållanden som är relevanta för de områden för vilka ozonindexen skall användas. När det gäller inverkan av ozon på unga träd är tillgången på antalet experiment i Sverige begränsat. Vi använder därför experimentella data från både Sverige och Finland. Från Norge och Danmark finns tyvärr inte experimentella data från exponeringar av tillräcklig längd.

Ozonstress uppträder inte i isolering utan i kombination med andra stresser. Därför har vi i vår analys inkluderat ett experiment där granar exponerades för olika nivåer av ozon under fyra år i kombination med perioder av relativt kraftig torka under år 2, 3 och 4.

Vi har strävat efter att uppnå dos-respons relationer för ozonets inverkan på träd som är representativa för både barr och lövträd. Relevanta experimentella data för Nordiska förhållanden finns dock endast tillgängliga för gran och björk. För att uppnå ett balanserat resultat för både gran och björk har vi inkluderat experimentella resultat där det totala antalet observationer (=åtskilda ozonbehandlingar i olika experiment) är ungefär lika stort för gran och björk.

Utifrån de kriterier som beskrivits ovan har vi valt ut ett antal experiment och ozonbehandlingar som beskrivs i Tabell 1. Vi använder data från ett flerårigt experiment som bedrevs vid Östads Säteri, ca 45 km nordost om Göteborg, under perioden 1992-1996 (Wallin et al., 2002). För björk använder vi två experiment, ett tvåårigt svenskt experiment från Östads Säteri (Karlsson m. fl., 2003) samt ett femårigt experiment från Kuopio i mellersta Finland (Oksanen, 2003). Det totala antalet datavärden som kunde användas för regressionsanalyser av dos-respons samband var nio.

Urvalsprinciperna vad gäller data till den innevarande studien varit:

- Så lång exponeringstid som möjligt för att maximera effekt vs variation
- Ungefär lika många datapunkter för gran respektive björk för att få relationer representativt för både gran och björk
- Involvera något experiment med kombinationsbehandling t ex torkstress, för att närma sig en multi-stress situation i fält
- Data från behandlingsledet Östad gran<sup>2</sup> har uteslutits eftersom det kan antas att den kombinerade behandlingen med fosforbrist har påverkat granarna i så stor utsträckning att det är sannolikt att den använda metoden för att beräkna ozonflux, POD, inte går att applicera på dessa granar.
- Data från behandlingsleden Kuopio björk 1 och 3 har uteslutits därför att dessa björkar odlades i relativt små krukor på 7 liter. Det är sannolikt att odling i så små krukor begränsar tillväxten i en betydande omfattning

Det är viktigt att påpeka att de data som användes för att utvärdera dos-respons relationer för olika ozonindex i denna studie utgjorde en delmängd av de data som användes inom LRTAP för att utarbeta konceptet POD. I tabell 1 illustreras alla de data som användes inom LRTAP med ett kryss. Ett litet kryss indikerar att data användes endast inom LRTAP. Ett stort kryss indikerar att data användes både inom LRTAP och inom den studie som rapporteras här.

Totalt användes 9 stycken datapunkter för att testa dos-responsrelationer med olika ozonindex.

IVL-rapport C 57 Ett förenklat koncept för inverkan av ozon på växtligheten i Sverige baserat på ozonflux

**Tabell 1.** En beskrivning av de experimentella data som använts för analyserna av dos – responsrelationer för ozonets inverkan på unga träd. Data med x användes inom LRTAP. Data med stora X används både i arbetet inom LRTAP samt i denna studie, som kunde användas för regressionsanalyser av dos-respons samband

namn	Exp-System*	Ozon-behandling ***	Kombinations-behandling	Exponering år 1	Exp. år 2	Exp. år 3	Exp. år 4	Exp. år 5	Data-punkter
Östad gran1 **	OTC	CF, NF, NF+	Väl försedd		x	x	X		3
Östad gran2	OTC	CF, NF+	Fosforbrist		x	x	x		
Östad gran3	OTC	CF, NF+	Tork-stress #		x	x	X		2
Östad-björk	OTC	NF, NF+	Väl försedd	x	X				2
Kuopio björk 1 **	Open	AA, AA+	Väl försedd	x					
Kuopio björk 2	Open	AA, AA+	Väl försedd					X	2
Kuopio björk 3	Open	AA, AA+	Väl försedd		x				

\* OTC, "open-top chamber", på svenska "fältkammare; Open, "open release system", på svenska "öppet system för ozonbegasning

\*\* Östads Säteri är beläget ca 45 km nordost om Göteborg, vid sjön Mjörn. 57° 54' N, 12° 24' Ö, 62 m över havsnivån. Kuopio är beläget i mellersta Finland, 62°53'30"N, 27°40'46"Ö.

\*\*\* CF, "Charcoal filtered air", exponering i fältkammare för filtrerad luft med mycket låga ozonhalter; NF, "non-filtered air", exponering i fältkammare för ozonhalter nästa identiska med omgivningshalterna; NF+, exponering i fältkammare för icke-filtrerad luft med extra tillsatt ozon; AA, "ambient air", exponering utan fältkammare, träden står i omgivningsluft; AA+, exponering utan fältkammare, extra ozon tillsatt omgivningsluften.

# Torkbehandlingen inkluderade perioder om ca 8 veckor under sensommaren 1993, 1994 och 1995, då granarna vattnades endast vid ett fåtal tillfällen.

### 9.4.3 Metodik

Så långt möjlig har vi strävat efter att använda den metodik och de funktioner som beskrivs i konventionen om gränsoverskridande luftföroreningar (Mapping Manual, 2004).

En svårighet gäller bestämning av den s.k. gränsskickskonduktansen. Detta är det motstånd mot diffusion av gaser som utgörs av det mm-tjocka luftlager som ligger närmast ytan av barr och blad. Detta stillastående luftlager kan under vissa omständigheter ha en avsevärd inverkan på den hastighet varmed ozonet tas upp till bladen och därmed för ozonets toxicitet. Ju bredare blad och ju lägre vindhastighet desto tjockare blir detta gränsskikt och därmed dess motstånd mot ozonupptag. Gränsskiktets konduktans beräknas som en funktion av bladets bredd och vindhastigheten närmast bladet enligt Jones (1983):

### 9.4.4 Statistisk analys

Som kriterium för störst relevans analyserar vi dos-respons funktioner baserat på linjär regression. Störst signifikans för samband samt högst värde på korrelationskoefficienten används vid bedömningen. För att linjär regression skall vara lämplig att använda är det önskvärt att responsvariabeln  $y$  är någorlunda normalfördelad samt att variansen hos  $y$  inte beror av  $x$ . Sistnämnda innebär att residualerna runt regressionslinjen bör vara någorlunda jämt fördelade i  $x$ -led.

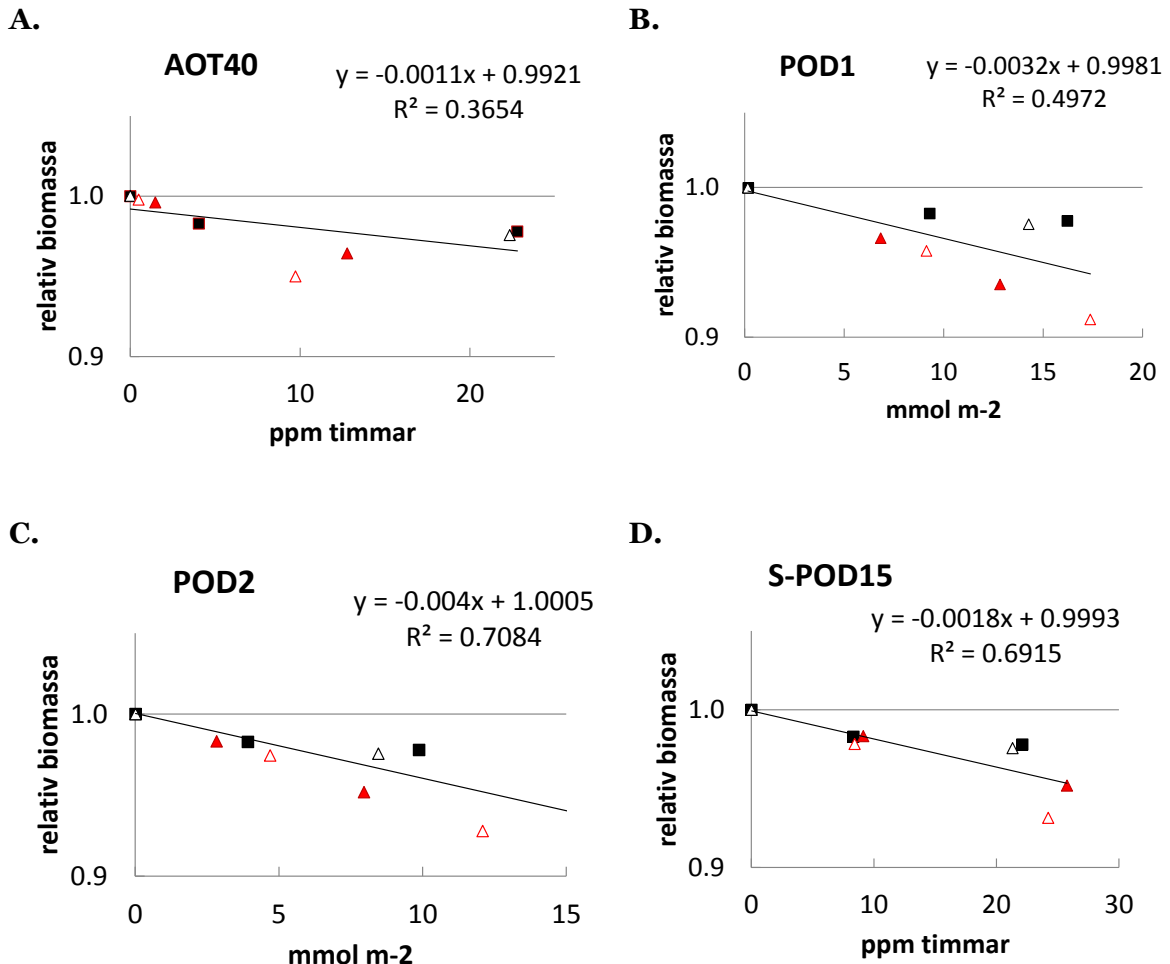
### 9.4.5 Dos-respons relationer för inverkan av ozon på unga träd baserat på olika ozonindex

Som väntat fungerade ozonflux (POD) avsevärt bättre, jämfört med AOT40, för att beskriva inverkan av ozon på biomassan hos unga träd under experimentella förhållanden från Sverige och Finland (Figur 9, Tabell 2). Korrelationskoefficienten blev 0.90 för det bästa indexet baserat på ozonflux, POD4, och 0.37 för AOT40. Dos-respons relationen för AOT40 var inte signifikant (Tabell 2). Det index som för närvarande används inom LRTAP-konventionen, POD1, gav en relativt dålig korrelation mellan exponering och effekt på biomassan, även om den var signifikant. När detta index användes var det uppenbart skilda dos-respons förhållanden mellan gran och björk. När tröskeln 2 istället användes för POD, blev värdet på  $R^2$  avsevärt bättre, 0.62, och relationen blev högeligen signifikant (Tabell 2). Den bästa korrelationskoefficienten vad gäller olika trösklar för POD uppnåddes med POD4, vilket är ett något överaskande resultat. Vid tidigare studier, när data med unga träd från hela Europa analyserades uppnåddes den bästa korrelationen med POD 1.6/1.0 (Karlsson m. fl., 2007, Mapping Manual, 2004). Eftersom POD4 endast börjar att ackumulera värden när ozonhalterna överskrider relativt höga ozonkoncentrationer, drygt 30 ppb, och under förhållanden särskilt gynnsamma för ozonupptag till bladen, blir osäkerheterna relativt stora när detta index beräknas..

De förenklade beräkningarna av ozonflux, S-POD, ger nästa lika bra korrelation som POD vad gäller att beskriva inverkan av ozon på tillväxten hos unga träd under experimentella förhållanden (Figur 9, Tabell 2) och avsevärt bättre jämfört med

AOT<sub>40</sub>. Alla relationer med S-POD med en tröskel högre än noll var signifikanta. Bäst korrelation uppnåddes med S-POD med en tröskel 25 ppb (Tabell 2), med en korrelationskoefficient på 0,80. Regressionen med S-POD 15 ger även den en bra korrelationskoefficient, 0,69, och relationen var högeligen signifikant. Av olika tekniska skäl, bl a att minimera osäkerheter och felkällor vad gäller mätningar är det önskvärt att välja en så låg tröskel som möjligt.





**Figur 9.** Dos-respons analys för inverkan av ozon på biomassan hos unga träd exponerade för olika ozonhalter i fältkammare samt med ett "open-release" system. Data från experiment i Sverige och Finland.

- Östad gran1
- △ Östad gran3
- Östad björk
- △ Kuopio björk2

Figur A visar dos-respons samband där ozondos är baserad på AOT40. Figur B visar dos-respons samband baserad på POD1. Figur C visar dos-respons samband baserad på POD2. Figur D visar dos-respons samband baserat på S-POD15.

Symbolerna för de olika dataseten visas, där vita och svarta symboler visar data från granexperimentet vid Östads Säteri (GOSP), Sverige, fyllda röda symboler visar data från björkexperimentet vid Östads Säteri samt slutligen öppna röda symboler visar data från björkexperimentet vid Kuopio, Finland. Genomgående har träden haft god tillgång till näring och vatten, men i ett experiment användes granar som har haft god tillgång till näring, men som utsatts för periodvis torka. Beteckningar på olika datapunkter hänvisar till Tabell 1.

Genom den metodik som används för att beräkna effekten av en viss ozonbehandling (den s.k. ”Fuhrer-metoden”, vilken involverar en extrapolation till noll ozonexponering, (se Mapping Manual, 2004) kan resultera i olika storlekar på ozoneffekten, är det viktigt att den beräknade ozoneffekten inte varierar kraftigt beroende på vilket ozonindex som väljs. I tabell 2 visas den beräknade ozoneffekten (uttryckt som årlig reducering av biomassan i ozonbehandlingen jämfört med noll ozonexponering) för den högsta experimentella ozonbehandlingen som ingår i datanalysen. Denna varierar för de relationer som är signifikanta mellan en årlig minskning på 5 och 9 %. Detta får anses som en acceptabel variation.

**Tabell 2.** Statistiska data från linjär regressionsanalys för dos-responsrelationer vad gäller ozonets inverkan på biomassan hos unga träd. Experimentella data härstammar från experiment med gran och björk i Sverige och Finland. Data för s-POD<sub>10</sub> är särskilt markerade. Ett värde för interceptet 1.00 representerar avsaknad av ozoninverkan på biomassan.

Index	R2	Intercept	Signifikans#	Responsvariabelns fördelning i y-led ##	Predikterad effekt vid högsta experimentella exponering (% minskning årligen)
POD 0	0.32	1.00	n.s	5/2/2	11
POD 1.0	0.50	0.99	*	5/2/2	9
POD 2.0	0.71	1.00	**	6/2/1	8
POD 4.0	0.90	1.00	***	5/3/1	5
AOT 40	0.37	0.99	n.s	5/3/1	5
AOT 30	0.37	0.99	n.s	5/2/2	6
S-POD 0	0.34	1.00	n.s	5/2/2	11
S-POD 10	0.55	1.00	*	6/2/1	8
<b>S-POD 15</b>	<b>0.69</b>	<b>1.00</b>	<b>**</b>	<b>6/1/2</b>	<b>7</b>
S-POD 20	0.79	1.00	**	5/3/1	6
S-POD 25	0.80	1.00	**	5/3/1	5
S-POD 30	0.77	1.00	**	5/3/1	5
S-POD 35	0.68	0.99	**	5/3/1	5

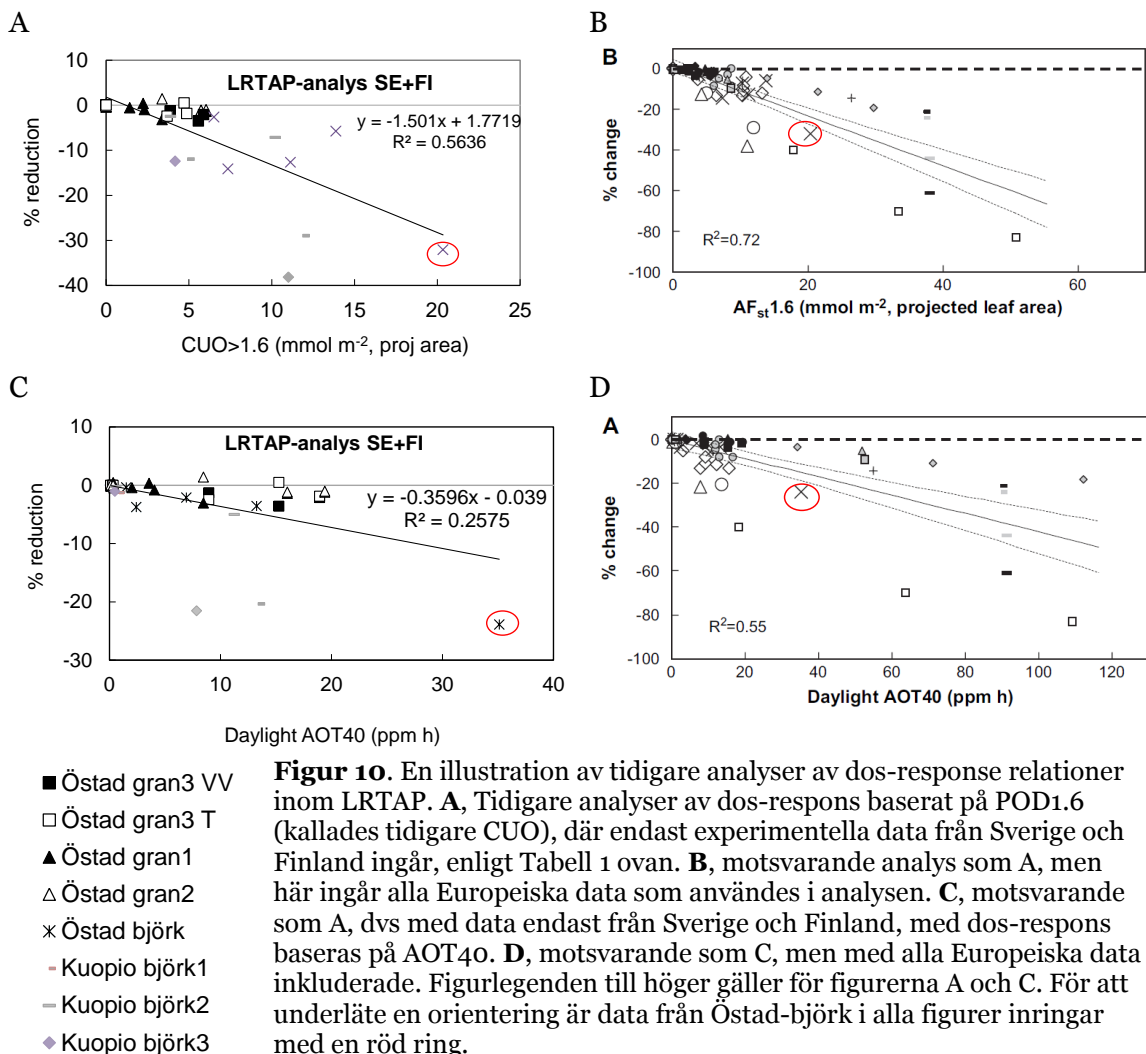
# \*, p<0.05; \*\*, p<0.01; \*\*\*, p<0.001, n.s, ej signifikant

## antal y-värden i tre likstora intervall, 0.98-1.00; 0,96-0,98; 0,94-0.96.

Utifrån vad som beskrivits ovan gör vi bedömningen att ozonindexet **S-POD 15** utgör det optimala indexet för ozonets inverkan på träd under svenska och finska förhållanden. Korrelationskoefficienten är hög, 0,69, interceptet avviker inte från 1.0, och fördelningen av värden i y-led är acceptabel.

### 9.4.6 En jämförelse med tidigare dos-respons relationer framtagna inom LRTAP

I Figur 10 visas ett utdrag av de analyser som ligger till grund för framtagningen av POD-konceptet inom LRTAP-konventionen, så som den publicerats i Karlsson m. fl. (2007). Här används alla data för Sverige och Finland från Tabell 1. I figurerna B och D visas korrelationer där samtliga Europeiska data använts. I figurerna A och C visas korrelationer där enbart svenska och finska data inkluderats. Det är uppenbart att när enbart svenska och finska data inkluderats blir korrelationerna för dos-responsrelationerna avsevärt sämre, både vad gäller CUO/AFst (de gamla beteckningarna för POD) och för AOT40. Detta är första gången denna jämförelse görs. Det är uppenbart att framtagningen av dos-relationer på Europa-skalan medför kompromisser och val av ozonindex som gör avkall på precisionen för dos-respons relationer för enskilda regioner i Europa, så som t ex för Sverige och Finland. Ett bättre urval av data och en användning av andra trösklar kan dock ge bättre korrelationer, så som visats ovan (Figur 9, Tabell 2).



## 9.5 Slutligt val av ozonindex

Resultaten från regressionsanalyser av dos-respons samband med olika ozonindex ger en entydig bild. Den avancerade metoden för att beräkna ozonflux, POD, ger de högsta värdena för korrelationskoefficienten när höga värden för trösklar används. Den förenklade metoden för ozonflux, S-POD ger nästan lika höga värden för  $R^2$  som POD, och avsevärt högre  $R^2$  värden jämfört med AOT40.

Vad gäller S-POD ger ett tröskelvärde 15 ppm h en bra korrelation och en hög statistisk signifikans samt en någorlunda bra fördelning i y-led. Det finns S-POD med högre trösklar som ger bättre korrelationer, men som redan nämnts ovan bör en så låg tröskel som möjligt väljas.

Vid en given situation, med givna värden för ozonhalt, lufttemperatur och fuktighet, kommer olika värden att beräknas för S-POD 15, beroende på om metodiken för gran eller björk används. Högst värden kommer att erhållas med metodiken för björk eftersom den beräkningen använder ett värde för  $f_{gmax}$  på 1.0 medan för gran används ett värde på 0.7.

Eftersom gran är det ekonomiskt viktigaste trädslaget i Sverige, föreslår vi att metodiken för gran används vid beräkning av S-POD 15.

**Vi föreslår att konceptet med S-POD<sub>15</sub> kan övervägas att används som grund för en ny indikator för inverkan av ozon på växtligheten i Sverige inom miljömålet *Frisk Luft*. Vi föreslår vidare att metodiken för gran används för att beräkna S-POD<sub>15</sub>.**

## 10 Förslag till målvärde för en indikator baserad på S-POD

### 10.1 Kriterier för ett målvärde:

**Målvärdet bör begränsa ozonets inverkan på växtligheten i Sverige till en nivå där det inte längre kan karakteriseras som "ett stort miljöproblem".**

Som framgår ovan är miljömålssystemets syfte att bidra till att de stora miljöproblemen i Sverige är lösta fram till år 2020, alternativt att alla politiska beslut är på plats för att målet skall uppnås i en nära framtid. En indikator för att beskriva ozonets inverkan på växtligheten bör utformas i detta perspektiv. Utifrån vilka aspekter utgör ozonets inverkan på växtligheten i Sverige "ett stort miljöproblem"?

Ett stort miljöproblem avseende inverkan på växtligheten i Sverige karakteriseras av:

- En stor ekonomisk betydelse nationellt
- En stor ekonomisk betydelse för enskilda personer
- En stor inverkan på rekreativt värde för en stor del av befolkningen
- En stor negativ påverkan på andra "ekosystemtjänster"

Tillväxten i de svenska skogarna bidrar till flera olika ekosystemtjänster, såsom produktionen av vedråvara till skogsindustrin, produktionen av biomassa som kan användas som biobränsle till kraftvärmeverk samt kolinbindning till den stående skogen som bidrar till att minska halter av koldioxid i atmosfären. Skogen har också ett betydande rekreativt värde.

I en tidigare studie (Karlsson et al., 2006) beräknades ekonomiska konsekvenser av ozonexponering för skogs- och jordbruk i Sverige, baserat på AOT40. På nationell nivå var de beräknade årliga kostnaderna fördelade 160 MSEK för jordbruksgrödor och 340 MSEK för skog. De största effekterna beräknades för skogen i Götaland och Svealand medan effekten i Norrland var liten. Dessa effekter beräknades baserat på AOT40 som i sin tur beräknats med EMEP modellen.

Ozonhalterna är låga i norra Sverige, vilket gör att även värden för AOT40 blir låga. Emellertid kan de klimatförhållanden som råder i norra Sverige sommartid, med långa dagar och förhållandevis gynnsamma temperaturer, bidra till att växterna håller sina klyvöppningar mer öppna jämfört med södra Sverige. Följden av detta kan bli att mängden ozon som tas upp till bladen vid en viss koncentration av ozon i luften kan bli högre i norra, jämfört med södra Sverige. Den relativa inverkan av ozon på t ex skogen i norra Sverige skulle då kunna bli större, om inverkan beräknas på ozonflux, jämfört med om den baseras på AOT40.

Ozonexponering medför ett accelererat åldrande hos lövträdens blad och bidrar till att bladens färger får ett sämre rekreativvärde (bladen blir bruna) om hösten, se foto i Figur 11.

**Figur 11.** Fotografi av blad från björk som exponerat för förhöjda ozonhalter (ca 3 x omgivningshalt) under två år i fältkammare vid Östads Säteri. Lägga märke till de brunfärgade områdena mellan bladens gula nerver. Dessa indikerar att bladens celler har dött i förtid innan de genomgått en normal åldrandeprocess.



Sammanfattningsvis kan man konstatera att en negativ inverkan av ozon på tillväxten hos skogen i Sverige kan karakteriseras som ett stort miljöproblem och således bör beskrivas av en indikator inom miljömålssystemet på bästa sätt.

## 10.2 Vilken inverkan på skogens tillväxt kan accepteras?

Det finns problem med att utvärdera ozonets inverkan på skogens tillväxt. Problemet ligger huvudsakligen i de långa tidsperioder som måste beaktas vad gäller tillväxten under en rotationsperiod, i södra Sverige 60-80 år, i norra Sverige ännu längre. Experimentella resultat med ozon och trädutveckling uttrycks oftast som procent nedsättning av biomassan per år av exponering. Om man applicerar detta över en längre tidsperiod blir resultaten snabbt orimliga på grund av en "ränta på ränta" effekt. Istället behöver man analysera ozonets inverkan på trädets **tillväxthastighet**. Information om detta finns dock oftast inte tillgängliga från experiment eftersom man i experimenten då måste ha mätt biomassan hos träden före experimentens början. Detta har oftast inte gjorts.

Från experimenten med gran vid Östads Säteri finns dock beräkningar av ozonets inverkan både på % årlig minskning av biomassan och på tillväxthastigheten uttryckt som stamvolymsökning (Karlsson m. fl., 2005). I samma experiment med gran där det uppmättes en årlig minskning av biomassan med 1 % per 10 ppm timmar AOT<sub>40</sub>, beräknades en nedsättning av tillväxthastigheten på ca 2.6 % per 10 ppm timmar AOT<sub>40</sub>. För Östads Säteri beräknades med hjälp av en skoglig modell att en nedsättning av tillväxthastigheten med 2.2 % medförde en minskning av skördeutbytet på 1.8 % och det samlade ekonomiska utbytet under en 100-års period med 2.3 % (Karlsson m. fl., 2005).

### 10.3 Förslag till målvärde

Enligt dos-respons relationer genererade från experimentella resultat som presenterats ovan skulle en årlig ozonexponering baserad på S-POD15 av 5 ppm h resultera i en årlig minskning av biomassan på strax över 1 %. Som diskuterats ovan är detta svårt att översätta till konsekvenser för skogstillväxt över en hel rotationsperiod. Utifrån exemplet från Östads Säteri som beskrivits ovan skulle denna ozonpåverkan kunna resultera i en minskad tillväxthastighet på drygt det dubbla, ca 2.6 %. Det minskade ekonomiska utfallet för skogsägaren över en hundraårsperiod skulle också minska drygt 2 %. Tidigare beräkningar har visat att en nedsättning av skogens tillväxthastighet med 2.6 % skulle medföra en ekonomisk förslut för Sveriges samlade skogsägare på ca 340 MSEK. Ett målvärde på S-POD 15 av 5 ppm h skulle således medge en samlad årlig skördeförslust för Sveriges skogsägare på i storleksordningen 340 MSEK, jämfört med ett scenario i avsaknad av ozonproblematiken.

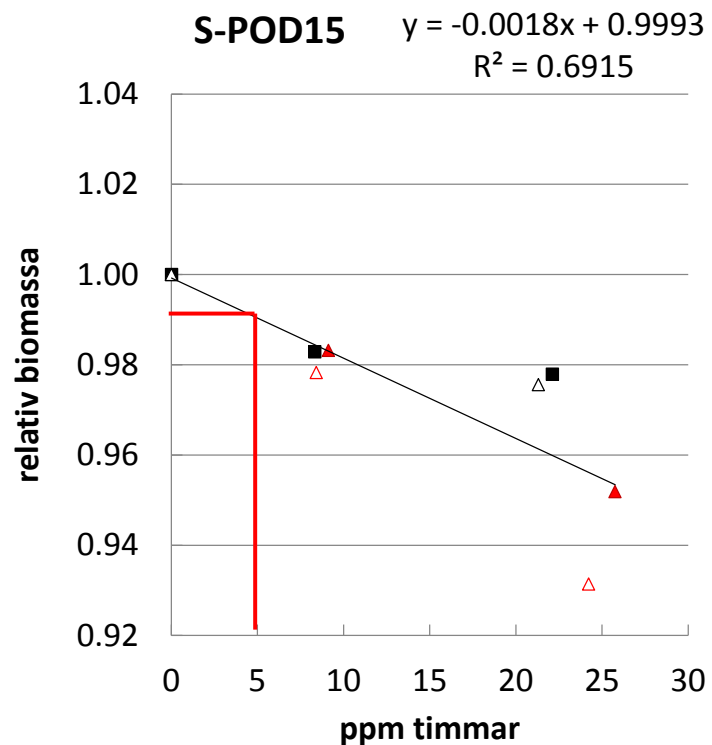
Inom LRTAP-konventionen har den kritiska nivå för ozon på Europa-skalan, baserat på POD 1.0, satts baserat på en årlig minskning av biomassan på 2 % (Mapping Manual, 2004, reviderad 2010). Förslaget i denna studie medger alltså en årlig nedsättning av biomassan som är hälften jämfört med vad som gäller inom LRTAP på Europeanivån. Detta motiveras av att skogstillväxten är av största vikt för Sveriges samlade ekonomi.

**Vi föreslår ett målvärde baserat på S-POD 15 på 5 ppm timmar. En ozonexponering på denna nivå resulterar under experimentella förhållanden i en årlig nedsättning av biomassa på 1 %. Översatt till en nedsättning av skogens tillväxthastighet uppskattas detta medföra en årlig ekonomisk förslut för Sveriges samlade skogsägare på i storleksordning 340 MSEK.**



**Figur 12.** Dos-respons för inverkan av ozon på biomassan hos unga träd exponerade för olika ozonhalter i fältkammare samt med ett "open-release" system, där ozondos är baserad på S-POD15. Data från experiment i Sverige och Finland.

En grov röd linje illustrerar förslaget till målvärde. För övrig information, se Figur 9.



#### 10.4 En jämförelse av effekterna av beräknad ozondos på unga träd vid tre olika platser i Sverige

Hur de olika ozonindexen fungerade under fältmässiga förhållanden och vilket inverkan på tillväxten som beräknades utifrån olika ozonindex, testades för tre olika platser från olika delar av Sverige för de tre åren 2004-2006; Östads Säteri i Västra Götalands län; Aspvreten, i Södermanlands län, samt Vindeln, Västerbottens län. För dessa platser finns tillgängligt timvisa data vad gäller ozonhalter 5m över marknivå, samt lufttemperatur och luftfuktighet 1m över marknivå. Inverkan på tillväxten beräknades dels baserat på POD1, utifrån den metodik som anges i LRTAP-konventionens "Mapping Manual", dels på metodiken med S-POD 15 som tagits fram i denna studie.

Existerande och föreslagna målvärden för de olika ozonindex som visas i Tabell 3 är:

Precisering Frisk Luft: AOT40, 5 ppm h;

LRTAP: POD1 gran, 8 mmol m-2; POD1, björk, 4 mmol m-2

Denna studie: S-POD15 gran, 5 ppm h.



Resultaten visade att det nu gällande målvärdet för AOT40 överskrids alla år vid Aspvreten och under ett år vid Östads Säteri, men inga år vid Vindeln (Tabell 3). Det här föreslagna målvärdet, S-POD15 för gran, 5 ppm timmar, överskrids vid alla platser och för alla analyserade år. Emellertid överskrids även det nu gällande målvärdet inom luftkonventionen LRTAP för POD1 och björk vid alla platser och alla år och det gällande målvärdet för POD1 och gran överskrids vid alla platser och alla år, utom för Vindeln 2005.

För Aspvreten 2006 beräknas avvikande höga värden, vilket främst beror på att luftfuktighet och temperatur var ovanligt hög vid Aspvreten detta år. Det är dock även höga lufthalter av ozon vid Aspvreten detta år.

Både POD1 och S-POD15 uppvisar högre värden för björk jämfört med gran vid alla platser och år. Detta beror främst på att den maximala s.k. stomatakonduktansen (dvs klyvöppningarnas maximala öppningsgrad) är högre för björk, jämfört med gran. Det finns en stark korrelation mellan S-POD 15 beräknat för gran respektive björk (Figur 13), vid de tre platser och tre år som analyserats. För ett visst beräknat värde för S-POD15 för gran går det således relativt enkelt att ta fram ett motsvarande värde för björk.

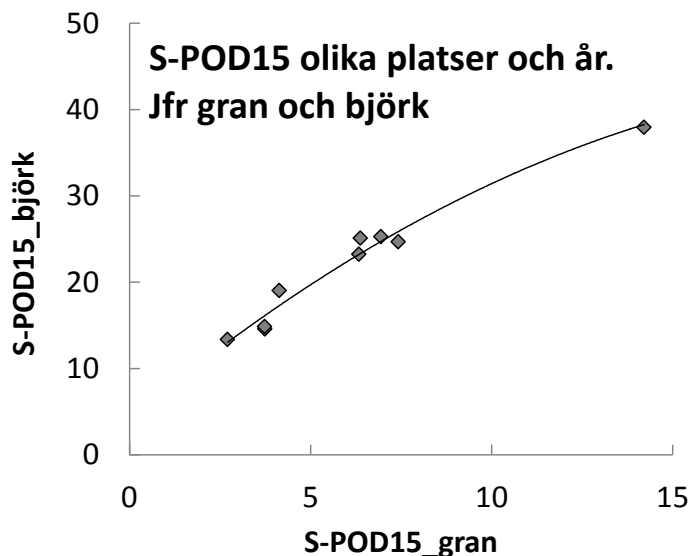
**Tabell 3.** En översikt över de årliga värden för POD1 respektive S-POD15 som beräknats för gran respektive björk vid tre olika platser i landet som medelvärde för de tre åren 2004-2006. POD1 respektive S-POD15 beräknades för respektive plats och år baserat på förekommande mätningar av ozonhalter och meteorologi vid respektive plats. Beräkningarna baserade sig dels på metodiken POD1, som beskrivs inom LRTAP-konventionens "Mapping Manual", dels på den metodik med S-POD15 som beskrivs i denna rapport. Ozonhalter mäts vid respektive plats 5 m över marknivå och meteorologi mäts 1 m över marknivå. Ozonhalterna har räknats upp till nivån 20 m över mark enligt metodik som beskrivs i LRTAP-konventionens "Mapping Manual". Meteorologin har inte räknats om från 1 m, eftersom detta är allt för komplicerat. Alla värden är beräknade för växtperioden under respektive år. För jämförelse visas även beräknade värden för ozonmedelhalt och AOT40. Överskridande av målvärden indikeras med bold röd font. för S-POD15 björk finns inga föreslagna målvärden.

	ozonhalt, medel	AOT40	S-POD15, gran	S-POD15, björk	POD1, gran	POD1, björk
Östad-2004	28	5	<b>14</b>	25	<b>9</b>	<b>14</b>
Östad-2005	27	3	<b>10</b>	19	<b>11</b>	<b>17</b>
Östad-2006	30	<b>9</b>	<b>14</b>	24	<b>14</b>	<b>22</b>
Aspvreten-2004	33	<b>6</b>	<b>14</b>	25	<b>14</b>	<b>22</b>
Aspvreten-2005	34	<b>6</b>	<b>14</b>	24	<b>13</b>	<b>21</b>
Aspvreten-2006	38	<b>20</b>	<b>24</b>	38	<b>20</b>	<b>30</b>
Vindeln-2004	31	3	<b>8</b>	15	<b>10</b>	<b>14</b>
Vindeln-2005	30	2	<b>7</b>	13	8	<b>13</b>
Vindeln-2006	32	4	<b>9</b>	15	<b>10</b>	<b>15</b>

**Figur 13.** En jämförelse mellan årliga värden för S-POD15 beräknat med metodik för gran respektive björk. Punkterna representerar årliga värden för Östads Säteri, Aspvreten samt Vindeln för perioden 2004-2006. Dessa värden redovisas även i Tabell 3. För beskrivning av metodik, se Tabell 3.

Kurvanpassning:

$$y = -6.97 + 12.00 * \text{SQRT}(y)$$



Den beräknade inverkan av ozon på biomassan hos gran respektive björk vid förekommande ozonbelastning vid de tre platserna under åren 2004-2005 redovisas i Tabell 4 och Figur 14, baserat på olika metoder för att beräkna ozonpåverkan, POD1 respektive S-POD15.

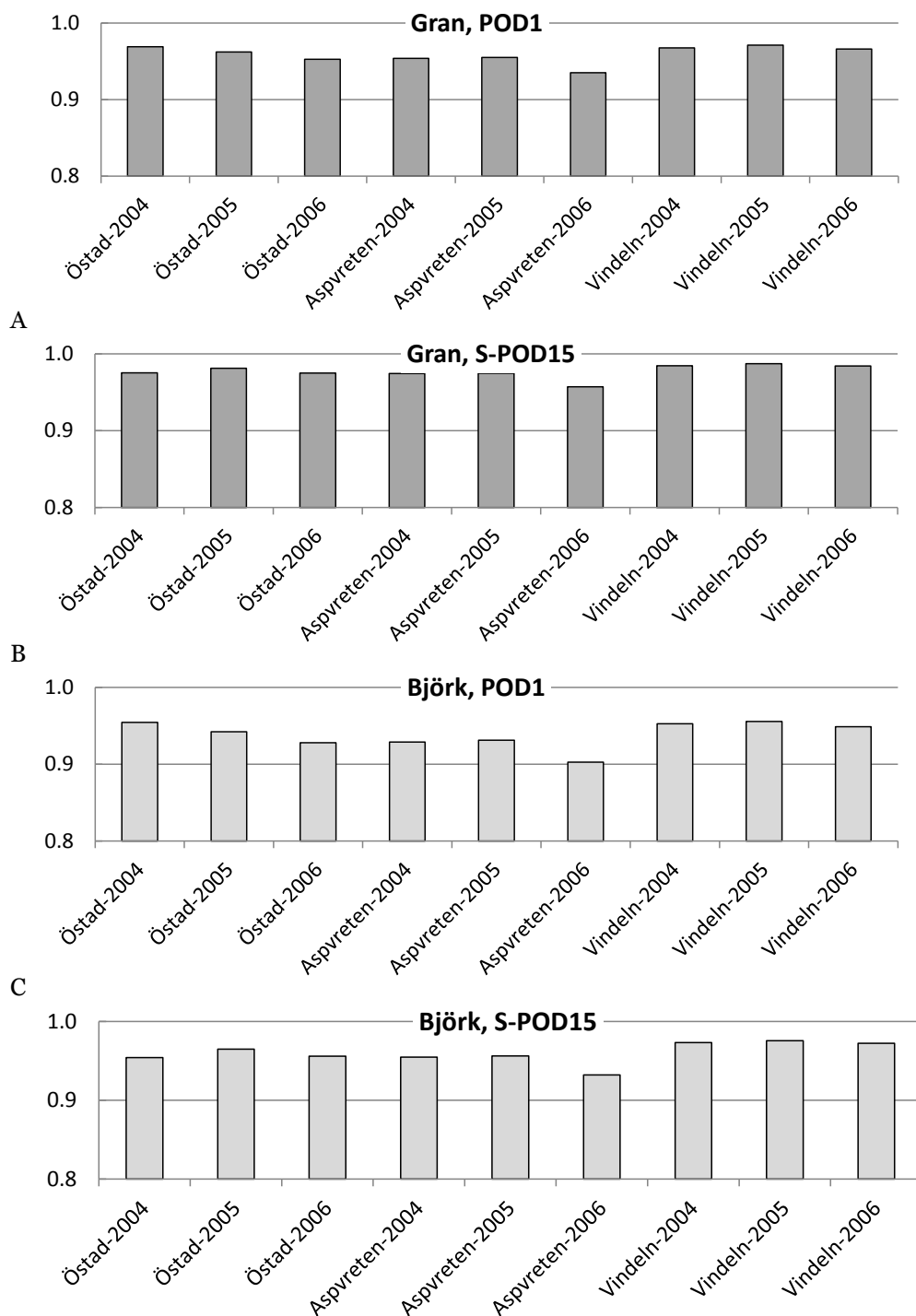
**Tabell 4.** En översikt över den beräknade årliga minskningen i biomassa för gran respektive björk vid tre olika platser i landet som medelvärde för de tre åren 2004-2006. Den årliga minskningen av biomassa beräknades för respektive plats och år baserat på förekommande mätningar av ozonhalter och meteorologi vid respektive plats. Beräkningarna baserade sig dels på metodiken POD1, som beskrivs inom LRTAP-konventionens "Mapping Manual", dels på den metodik med S-POD15 som beskrivs i denna rapport. Ozonhalter mäts vid respektive plats 5 m över marknivå och meteorologi mäts 1 m över marknivå. Ozonhalterna har räknats upp till nivån 20 m över mark enligt metodik som beskrivs i LRTAP-konventionens "Mapping Manual". Meteorologin har inte räknats om från 1 m, eftersom detta är allt för komplicerat.

	Östad 2004-2006	Aspvreten 2004-2006	Vindeln 2004-2006	Alla platser 2004-2006
POD1 gran	-3.9	-5.2	-3.2	-4.1
S-POD15 gran	-2.3	-3.1	-1.5	-2.3
POD1 björk	-5.9	-7.9	-4.8	-6.2
S-POD15 björk	-4.2	-5.2	-2.6	-4.0

Generellt beräknas en något större negativ inverkan av förekommande ozonnivåer när POD1 används, jämfört med S-POD15. Det är ingen uppenbar skillnad när det gäller de olika platserna. Skillnaderna förklaras dels av storleksordningarna på beräkningarna av POD1 respektive S-POD15 för platsen (Tabell 3) dels av hur dos-respons-relationerna ser ut (Figur 9).

Vi har eftersträvat att ta fram ett koncept, S-POD<sub>15</sub>, där både gran och björk följer samma dos-respons relation vad gäller negativ inverkan på biomassan. Eftersom det vid beräkning av S-POD<sub>15</sub> används olika metodik för att beräkningar för gran, respektive björk, och de beräknade värdena blir högre (Tabell 3) följer givetvis att den beräknade inverkan av en viss ozonbelastning vid en viss plats blir större för björk, jämfört med gran (Tabell 4, Figur 14). Detta stämmer med den generella bilden av att björk är ett trädslag som är mer känsligt för ozonpåverkan, jämfört med gran.

IVL-rapport C 57 Ett förenklat koncept för inverkan av ozon på växtligheten i Sverige baserat på ozonflux



**D**  
**Figur 14.** Beräknad relativ biomassa (ett värde 1.00 indikerar ingen påverkan av ozon) hos gran och björk vid tre olika platser i Sverige under tre olika år 2004-2006. Inverkan beräknades baserat på tillgängliga data för ozonhalter, lufttemperatur och luftfuktighet för respektive plats och beräknade dos-respons relationer från experiment i Sverige och Finland. Inverkan beräknades dels baserat på POD1, dels baserat på S-POD 15. På y-axeln anges relativ biomassa där 1.0 anger att biomassan är opåverkad av ozon.

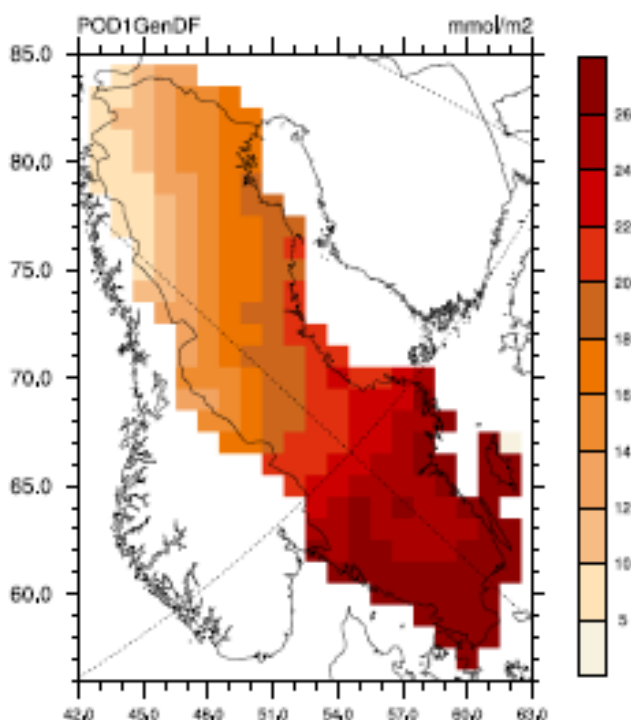
## 11 Möjligheterna till övervakning av måluppfyllelse baserat på POD respektive S-POD

Möjligheterna till beräkning av överskridande av målvärden för ozonets inverkan på växtligheten inom miljömålet Frisk Luft på regional och nationell skala skiljer sig avsevärt beroende på om målvärdet baseras på POD eller S-POD.

För att beräkna POD är den huvudsakliga möjligheten att använda ozonflux som modelleras av EMEP. POD beräknas med EMEP-modellen på en relativt grov geografisk skala, ca 50 \* 50 km, och resultaten finns typiskt tillgängliga med en fördröjning på några år. MATCH-modellen är ännu inte kapabel till att modellera ozonflux utifrån perspektivet inverkan på växtligheten. Ett exempel på information som i nuläget är tillgängligt från EMEP vad gäller ozonflux över Sverige visas i Figur 15. Metodiken är förenklad till att gälla alla lövträd över Europa och gäller således inte specifikt för gran respektive björk. Den kritiska belastningen för ozon och lövträd är satt till 4 mmol m<sup>-1</sup>, vilket överskrids kraftigt i större delen av Sverige.

**Figur 15.** Exempel på den information som på rutinbasis kan erhållas från EMEP vad gäller ozonets inverkan på växtligheten baserat på ozonflux. Beräkningarna publicerades under 2014 och gäller för året 2012. Kartan visar värden för POD1, beräknat enligt en metodik från LRTAP-konventionens Mapping Manual. POD1 beräknas enligt en förenklad metodik som beskriver en ozonflux som är generaliserad för lövträd över Europa. Den kritiska belastningen för ozon och lövträd är satt till 4 mmol/m<sup>2</sup>, vilket överskrids i hela Sverige.

Källa: EMEP DATA NOTE, MSC-W 1/2014.



Den andra möjligheten att beräkna POD är att utnyttja mätplatser som är utrustade med instrument både för att mäta ozonhalter på en timbasis samt att mäta meteorologi på timbasis. Exempel på detta visas i Tabell 3 ovan. De meteorologiska parametrar som krävs är vindhastighet, globalstrålning, lufttemperatur och –fuktighet. För att lagra alla dessa data krävs normalt ett avancerat loggersystem. Dessutom krävs antingen mätningar eller modellerade värden för markfuktighet. I dagsläget finns så vitt vi känner till endast fem platser i Sverige där dessa mätkrav uppfylls. Dessa platser är Östads Säteri i Västra Götalands län, Asa, i Kronobergs län, Aspvreten i Södermanlands

län, Norr Malma i Stockholms län samt Vindeln i Västerbottens län. Ingen av dessa platser ligger inom områden där ozon förekommer i de högsta halterna, såsom i Skåne och på västkusten. Inte ens vid dessa mätplatser beräknas dock markfuktighet. Det är svårt att se att en lokal myndighet såsom t ex en länsstyrelse kommer att ha möjlighet att genomföra dessa relativt avancerade mätningar.

För att beräkna S-POD krävs timvisa mätningar av ozonhalter samt timvisa mätningar av lufttemperatur och –fuktighet. I nuläget finns inom den nationella ozonövervakningen regelbundna mätningar av ozonhalter på timbasis vid 10 platser i landsbygdsmiljö. Dessutom mäts timvisa ozonhalter vid ytterligare fyra platser i förort. Under svenska förhållanden är skillnaden vad gäller ozonförekomst mellan landsbygd och förort minimal. Därutöver finns ytterligare en mätplats i landsbygdsmiljö med timvisa ozonhalter vid Norr Malma, norr om Stockholm, samt en mätplats i Norge vid Prestebakke, mycket nära gränsen till Dalsland. Sålunda finns i dagsläget totalt 16 mätplatser med timvisa ozonhalter representativa för landsbygdsmiljön. Dessa platser skulle kunna utrustas med enkel och billig utrustning för mätning och loggning av timvisa värden för lufttemperatur och –fuktighet. S-POD skulle därefter kunna beräknas för dessa platser efter en fulljord mätsäsong under sommarhalvåret.

Det pågår en långsiktig metodutveckling för att S-POD skall kunna beräknas utifrån mycket enkla mätningar av månadsvisa medelhalter för ozon, mätt med diffusiva, passiva provtagare i kombination med de enkla givare för mätning och loggning av lufttemperatur och –fuktighet som redan nämnts ovan. Om detta lyckas blir det möjligt för lokala myndigheter, t ex länsstyrelser, att övervaka S-POD lokalt till en låg kostnad, kanske samordnat på samma sätt som den nuvarande "Ozonmättnätet i södra Sverige".

**Sammantaget ser vi att det både på nationell och regional nivå skulle vara avsevärt lättare och billigare att övervaka överskridande av ett målvärde baserat på S-POD jämfört med ett baserat på POD. Dessutom är det för en icke-expert lättare att förstå ett koncept baserat på en toxicitets-modifierad ozonhalt jämfört med ozonflux.**

## 12 Sammanfattande slutsatser och förslag

Inom den studie som beskrivs i denna rapport har vi kommit fram till följande:

- Vad gäller att beskriva dos-respons-relationer för inverkan av ozon på biomassan hos unga träd under experimentella förhållanden i Sverige och Finland fungerar ett förenklat, ozonflux-relaterat koncept, S-POD, väl så bra som det mer avancerade konceptet POD och avsevärt bättre än det nu använda konceptet AOT40.
- Bra korrelationer vad gäller dos-respons för unga träd av gran och björk uppnås när ett tröskelvärde för S-POD på 15 ppb modifierad ozonhalt används. Även om ännu bättre korrelationer uppnås vid ett högre tröskelvärde för S-POD, föreslås att tröskelvärdet 15 används eftersom det finns en generell önskan från modellerare m fl., att tröskelvärdet hålls så lågt som möjligt.
- S-POD, liksom POD, måste beräknas med något olika metoder vad gäller gran respektive björk. Vi föreslås att för en eventuell framtida precisering inom miljömålet används metodiken för gran.
- Vid ett målvärde för S-POD 15 på 5 ppm timmar, beräknat med metodik för gran, kan det antas att den årliga minskningen av biomassa för unga granar uppgår till strax över 1 %. Detta kan översättas till en tillväxtminskning hos gran i bestånd i södra Sverige på runt 2%. Detta kan förknippas med en samlad årlig ekonomisk förlust för Sveriges skogsägare på runt 340 MSEK, jämfört med en situation i avsaknad av ozon.

Resultaten från denna studie öppnar för möjligheten att införa en ny indikator för att beskriva ozonets inverkan på växtligheten, att användas inom miljö kvalitetsmålet Frisk Luft, baserat på konceptet S-POD<sub>15</sub> beräknat för gran, med ett årligt målvärde på 5 ppm timmar. Detta målvärde överskrider för närvarande över större delen av Sverige. Överskridandet är dock inte betydande och det får anses möjligt att målvärdet kan uppnås i hela Sverige, om utsläppen av ozonbildande ämnen i Europa och över hela norra hemisfären minskar ytterligare.

Även det nu gällande målvärdet för ozonets inverkan på växtligheten i Europa beräknat som POD överskrider för närvarande över hela Sverige.

De stora fördelarna med indikatorn S-POD är:

- Det går att övervaka nationellt och regionalt i Sverige med relativt rimliga kostnader
- Det är ett index som till stor del speglar betydelsen av klimatet för ozonets toxicitet för växtligheten
- Det bygger på de vetenskapliga framsteg som gjorts under senare tid inom LRTAP-konventionen och på andra håll

Ozonbelastningen över Sverige beror till mycket stor del på utsläpp av ozonbildande ämnen utanför Sveriges gränser. För att preciseringar gällande ozon inom miljömålet Frisk Luft skall kunna uppnås måste det till ytterligare internationella förhandlingar om utsläpps begränsningar, både inom Europa men även över hela norra halvklotet.

Det är i detta sammanhang viktigt att Sverige uppnår internationell acceptans för de metoder som används för att bedöma om ozonförekomsten överstiger vad som bedöms som acceptabelt utifrån bl a påverkan på växtligheten. AOT<sub>40</sub> och POD är koncept som redan är accepterade inom LRTAP konventionen och EU. EU har dock hittills endast inkluderat AOT<sub>40</sub> i sitt direktiv om ozon i luften. Om S-POD skulle införas som en precisering för ozon och växtlighet inom Frisk Luft blir det därför viktigt att uppnå både vetenskaplig och politisk acceptans för konceptet. Kanske skulle de Nordiska länderna kunna driva en gemensam linje vad gäller detta.

Per Erik Karlsson och Håkan Pleijel presenterade arbetet med att ta fram konceptet S-POD vid "The twenty-seventh meeting of the Programme Task Force of ICP Vegetation", 28-30 January, 2014 i Paris, Frankrike. konceptet mottogs positivt med stort intresse och i noteringarna från mötet nämndes följande: "The simplified flux methodology as developed for national application in Sweden should also be tested for other climates".

Det finns i nuläget inget forum för internationell rapportering av olika ozonindex för ozon och växtlighet. Sverige rapporterar till LRTAP-konventionen i nuläget endast uppmätta timvisa ozonhalter till EMEP. POD används inom LRTAP-konventionen som underlag för förhandlingar om utsläpps begränsningar av ozonbildande ämnen men detta grundas sig endast på värden som modellerats av EMEP. Sverige har i nuläget inga möjligheter att validera att dessa POD-baserade beräknade ozonbelastningar för ozon och växtlighet är rimliga för svenska förhållanden. Om ozonbelastningen istället grundas på S-POD skulle en validering bli lättare att göra, utifrån svenska mätningar av ozonhalter, lufttemperaturer samt luftfuktighet.

## 13 Tack

Denna studie har möjliggjorts dels genom en direkt finansiering från Naturvårdsverket, dels genom att Naturvårdsverket under ett antal år finansierat Per Erik Karlsson´s och Håkan Pleijel´s verksamhet inom LRTAP-konventionens ICP Vegetation. Insatsen från David Simpson har finansierats dels från EMEP under UNECE, dels från EU FP7 ECLAIRE projektet (No. 282910).

## 14 Referenser

Derwent, R.G., Stevenson, D.S., Collins, W.J., Johnson, C.E. 2004. Intercontinental transport and the origins of the ozone observed at the surface in Europe. Atmospheric Environment 38, 1891-1901.

Emberson, L. D., Ashmore, M. R., Cambridge, H. M., Simpson, D., Tuovinen, J.-P. 2000. Modeling stomatal ozone flux across Europe. Environmental Pollution 109, 403-414.



- Fuhrer, J., Skärby, L., Ashmore, M.R., 1997. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution* 97, 91-106.
- Jones, H.G. 1983. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press. ISBN 0-521-27016-2.
- Karlsson, P.E., J. Uddling, L. Skärby G. Wallin, G. Selldén. 2003. Impact of ozone on the growth of birch (*Betula pendula*) saplings. *Environmental Pollution*, 124, 485-495.
- Karlsson, P.E., Pleijel, H., Belhaj, M., Danielsson, H., Dahlin, B., Andersson, M., Hansson, M., Munthe, J., Grennfelt, P. 2005. Economic assessment of the negative impacts of ozone on the crop yield and forest production. A case study of the Estate Östads Säteri in southwestern Sweden. *Ambio*, 34, 32-40.
- Karlsson, P.E., Pleijel, H, Danielsson, H., Belhaj, M., Andersson, M., Hellsten, S. 2006. En ekonomisk utvärdering av inverkan av marknära ozon på växtligheten i Sverige i relation till föreslagna miljömål. IVL Rapport B 1678.
- Karlsson, P.E., Braun, S., Broadmeadow, M., Elvira, S., Emberson, L., Gimeno, B.S., Le Thiec, D., Novak, K., Oksanen, E., Schaub, M., Uddling, J. Wilkinson, M. 2007. Risk assessments for forest trees - the performance of the ozone flux versus the AOT concepts. *Environmental Pollution* 146, 608-616.
- Karlsson, P.E., Pleijel, H., Danielsson, H., Pihl Karlsson, G. Piikki, K., Uddling, J. 2009. Evidences for impacts of near-ambient ozone concentrations on vegetation in southern Sweden. *Ambio*, 8, 425-431.
- Laisk, A., Kull, O., Moldau, H. Ozone concentrations in leaf intercellular air spaces is close to zero. *Plant Physiology* 90, 1163-1167.
- Langner, J., Bergström, R., Klein, T. och Skagerström, M. 2004. Nuläge och scenarier för inverkan på marknära ozon av emissioner från Västra Götalands län. SMHI. *Meteorologi*, Nr. 117, 2004. Länsstyrelsen i Västra Götaland Rapport 2004:55.
- Mapping Manual 2004. Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Chapter III Mapping Critical Levels for Vegetation. [http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/mapping\\_manual.html](http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/mapping_manual.html).
- Mills, G. Hayes, F. Simpson, D. Emberson, L. Norris, D. Harmens, H. & Büker, P. 2011. Evidence of widespread effects of ozone on crops and (semi-)natural vegetation in Europe (1990-2006) in relation to AOT40- and flux-based risk maps *Global Change Biology*, 17, 592-613
- Oksanen, E. 2003. Responses of selected birch (*Betula pendula*) clones to ozone change over time. *Plant Cell Environ.* 26, 875-886.
- Pihl Karlsson, G., Karlsson, P.E., Soja, G., Vandermeiren, K. & Pleijel, H. 2004. Test of the short-term critical levels for acute ozone injury on plants – improvements

by ozone uptake modelling and the use of an effect threshold. *Atmospheric Environment*, 38, 2237-2245.

RoyalSociety, 2008. Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications. RS Policy document 15/08, London (available at <http://royalsociety.org>), 133 pp.

Simpson, D.; Benedictow, A. Berge, H. Bergström, R. Emberson, L. D. Fagerli, H. Flechard, C. R.; Hayman, G. D. Gauss, M. Jonson, J. E. Jenkin, M. E. Nyri, A. Richter, C. Semeena, V. S. Tsyro, S. Tuovinen, J.-P. Valdebenito, Á. & Wind, P. 2012. The EMEP MSC-W chemical transport model -- technical description *Atmos. Chem. Physics*, 12, 7825-7865

Simpson, D. Emberson, L. Ashmore, M. & Tuovinen, J. 2007. A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study *Environ. Poll.*, 146, 715-725.

Skärby, L., Ottosson, S., Karlsson, P.E., Wallin, G., Selldén, G., Medin, E.L. & Pleijel, H. 2004. Growth of Norway spruce (*Picea abies*) in relation to different ozone exposure indices. *Atmospheric Environment* 38, 2225-2236.

Tuovinen, J.-P.; Emberson, L. & Simpson, D. 2009. Modelling ozone fluxes to forests for risk assessment: status and prospects *Annals of Forest Science*, 66, 401.

Wallin, G., Karlsson, P-E., Selldén, G., Ottosson, S., Medin E-L., Pleijel, H. and Skärby, L. 2002. Impact of four years exposure to different levels of ozone, phosphorus and drought on chlorophyll, mineral nutrients, and stem volume of Norway spruce, *Picea abies*. *Physiologia Plantarum* 114, 192-206.



IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm  
Tel: 08-598 563 00 Fax: 08-598 563 90  
[www.ivl.se](http://www.ivl.se)