



rapport

IVL Svenska Miljöinstitutet AB

Ozon påverkar tillväxten hos gran i Sverige - rapport från en fyraårig fältkammarmarkstudie



Per Erik Karlsson och Lena Skärby
B 1306
Göteborg, november 1998

Innehållsförteckning	sid.
Sammanfattning	1
Förord	3
Bakgrund	4
Mål	5
Försöksuppläggnig	6
Ozonhalter	9
Effekter på klorofyllinnehåll och ultrastruktur i barr	10
Effekter på biomassa	13
Ozons betydelse i Sverige?	18
Slutsatser	19
Referenser	20
Bilaga 1. Tack för viktiga insatser i Östad-gran experimentet	22
Bilaga 2. Finansiärer för projektet "Effekter av ozon på produktionen hos gran"	23

Sammanfattning

Den svenska skogen växer i ett klimat som är gynnsamt för upptag av ozon. Orsakerna är dels våra ljusa sommarnätter som medför att upptaget av ozon kan pågå kanske 20 timmar per dygn, dels vårt relativt fuktiga klimat som medger att klyvöppningarna kan vara öppna. Detta gör sannolikt skogarna hos oss mer disponibla för ozonskador, jämfört med söder ut i Europa. Det finns därför anledning att ta ozonproblemet på allvar i Sverige.

I ett experiment med unga (3-7 år) granar har ett forskarlag vid IVL (Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning) och Botaniska Institutionen vid Göteborgs Universitet använt sig av s.k. fältkammarmetodik för att undersöka ozons effekter. Fältkammare är öppna, cirkulära växthus försedda med en stor fläkt, där ozonhalterna kan kontrolleras under realistiska klimatförhållanden. Ozonbehandlingar har också kombinerats med torkstress respektive näringsbrist (fosfor), för att på så sätt försöka efterlikna den "multistress"-situation som råder i skogsekosystem. Experimentet är unikt i Europa då det har omfattat ett så stort material (42 st fältkammare, 1200 granar) att effekter på granarnas tillväxt har kunnat följas under fyra år. Förutom tillväxt har granarnas fysiologi undersökts.

De statistiskt säkerställda resultaten visade:

- att ozon ökade klorofyllhalten i 1-åriga barr och därefter reducerade klorofyllhalten i barr som var 2 år och äldre. I 3-åriga barr hade innehållet minskat med 13-24%.
- att ozon vid ett AOT40-värde på i genomsnitt 20 ppm-timmar per säsong (2 ggr den kritiska belastningsnivån för skog) orsakade en minskning i tillväxthastigheten på ca 2% under hela experimentperioden, jämfört med om träden vuxit i ozonhalter som förelåg under förindustriell tid.
- att ozon orsakade förändringar i barrrens minsta beståndsdelar, cellerna, vilket skulle kunna användas för att tidigt och direkt påvisa en ozonpåverkan ute i skogen.

Med datorsimuleringar har vi extrapolerat vilka effekterna på tillväxthastigheten skulle kunna bli om de består under trädets hela livstid. Våra resultat tyder på att dagens ozonnivåer ger en nedsättning av tillväxthastigheten på ca 1%. En 1%-ig

nedsättning av tillväxthastigheten under trädets hela livstid skulle göra att trädet vid normal avverkningsbar ålder har ca 11% mindre stamvolym jämfört med om det vuxit i ozonhalter som förelåg under förindustriell tid. För en skogsägare i södra Sverige som avverkar mogen granskog (timmer), innebär en 11%-ig minskning av trädvolymen ett inkomstbortfall på i storleksordningen SEK 10 000 per hektar. Simuleringarna är teoretiska och innehåller en rad antaganden, men ger en uppfattning om storleksordningen på effekter som ozon idag kan orsaka.

Minskningen av innehållet av det för fotosyntesen så viktiga klorofyllet i äldre barr, ger en indikation om att ozonet kan förorsaka ett onormalt åldrande hos barren. Här finns en intressant, men fortfarande icke bevisad, koppling till den ökande kronutglesningen i Europa som man konstaterat, hos både löv- (ek och bok) och barrträd (främst gran men även tall), under de senaste 10 åren. Ozonet kan ha bidragit till att löv och barr faller av i förtid.

Internationella förhandlingar om utsläppsbegränsningar sker både inom EU och inom FN-organet UN-ECE (Economic Commission for Europe). De resulterar i att olika europeiska länder åtar sig att begränsa sina utsläpp. Inom de närmaste åren kommer nya protokoll för begränsningar av utsläpp av kväveoxider och kolväten att förhandlas fram. Den forskning som beskrivs här syftar till att producera faktaunderlag för dessa förhandlingar. Arbetet med att sätta en ekonomisk prislapp på olika ozoneffekter (växtlighet, människors hälsa) har påbörjats på grund av att politiker kräver sådana siffror inför beslut om åtgärder. En svår men nödvändig utmaning. Inom de närmaste 50 åren finns, trots stora utsläppsminskningar, ingenting som tyder på att ozonhalterna i Europa skulle minska.

Förord

Föreliggande rapport är en sammanfattning av det arbete som en forskargrupp vid IVL och Botaniska Institutionen vid Göteborgs Universitet genomfört mellan 1990 och 1998. Följande personer har deltagit i arbetet under hela projektperioden:

5 seniorforskare (Per Erik Karlsson, Gun Selldén, Lena Skärby, Göran Wallin, Sirkka Sutinen, Finland), 4 doktorander (Susanne Ottosson, Eva-Lena Medin, Minna Mäenpää, Finland, Jaan Klõseiko, Estland), 1 laboratorieassistent (Christina Westberg), och 2 forskningsingenjörer (Kenth Andreasson, Mats Röntfors).

Till följande personer vill vi rikta ett särskilt tack för olika avgörande arbetsinsatser under dessa år: Helena Danielsson, Peringe Grennfelt, Eva Knudsen, Håkan Pleijel, och Anders Ågren. I den ständiga jakten på skadeinsekter och svamp har vi haft experthjälp av Bengt Ehnström och Pia Barklund vid SLU, vilket vi vill tacka för. Dessutom vill vi tacka ytterligare ett stort antal personer som gjort olika arbetsinsatser i projektet (se Bilaga 1).

I Bilaga 2 redovisas finansörerna samt de personer som varit delaktiga i projektet. Ett mycket varmt tack till samtliga! De insatser som Lars Lundgren, framlidne Hans Lundberg och framlidne Rolf Brännland gjorde för att se till att forskningen fick ett gediget stöd vill vi dock uppmärksamma särskilt. Här vill vi också rikta ett särskilt tack till Nils och Dorthi Troëdssons forskningsfond, utan vars stöd detta projekt inte hade kunnat genomföras. Den professur som tilldelats Gun Selldén har varit mycket betydelsefull för hela projektets genomförande. Sist, men inte minst, är det Patrik Alströmer och hans personal vid Östad Säteri som ska ha ett stort och varmt tack för alla olika insatser som gjorts för projektet; allt från den blöta sommarens grävningar 1991 till det fantastiska mottagandet på säteriet hos Patrik och hans fru Eva Alströmer när vi genomförde en internationell workshop 1995.

Bakgrund

Idag råder det ingen vetenskaplig oenighet om att ozon orsakar betydande effekter på vissa växter (främst en del grödor och träd) i de områden där exponeringen är som störst. Det finns inom de närmaste 50 åren, trots stora utsläppsminskningar, ingenting som tyder på att ozonhalterna i Europa kommer att minska.

En viktig europeisk fråga är om även skog i norra Europa är utsatt för en ozonpåverkan som kan ge tillväxtförluster. Från ett svenskt perspektiv är det troligt att skogsträd i södra Sverige är påverkade av ozon. Ozonhalterna är förhöjda även i Norrland, men i mindre grad än i Sydsverige och på kontinenten. Den svenska skogen växer i ett klimat som är gynnsamt för upptag av ozon. Orsaken är dels våra ljusa sommarnätter där upptaget av ozon kan pågå kanske 20 timmar per dygn, dels vårt relativt fuktiga klimat som medger att klyvöppningarna kan vara öppna. Detta gör sannolikt skogarna hos oss mer disponibla för ozonskador, jämfört med söderut i Europa, trots att halterna är högre där.

I början av 1980-talet pekade den europeiska miljödebatten ut skogsskador som ett viktigt miljöhot. Förhöjda ozonhalter fanns med i diskussionen som en möjlig orsak. En långtidsstudie av hur måttligt förhöjda ozonhalter påverkar granplantor startades därför i Sverige 1985. Träden exponerades i fältkammare, en teknik ursprungligen utvecklad för jordbruksgrödor (Heagle *et al.* 1973), vid fältstationen Rörvik på västkusten söder om Göteborg. Granarna exponerades för tre olika ozonhalter i 12 fältkammare under fem växtsäsonger (Skärby *et al.* 1995). Målsättningen med studien var att undersöka hur ozon påverkar processer i växten som är av betydelse för trädens tillväxt, t. ex. fotosyntesen.

Resultaten visade att förhöjda ozonhalter (30 ppb över omgivningsluftens halt, dagtid) kan reducera klorofyllinnehållet och förändra barrens ultrastruktur, framförallt kloroplasternas struktur (Wallin *et al.* 1990; Sutinen *et al.* 1990a). Liknande förändringar uppträdde även i ofiltrerad luft (som har ungefär samma ozonhalt som omgivningsluften), fast vid en senare tidpunkt än i behandlingen med förhöjda ozonhalter. Fotosynteshastigheten påverkades också. I unga skott ökade fotosyntesen, medan i äldre skott minskade den kraftigt. Studien var inte upplagd på ett sådant sätt att

man direkt kunde studera ozons inverkan på tillväxten. Detaljstudier av fotosyntesen visade att påverkan framförallt var kopplad till en lägre karboxyleringseffektivitet. Detta innebär att det ytterst viktiga enzymet Rubisco, som fixerar luftens koldioxid i fotosyntesens så kallade mörkerreaktion, var påverkat. Även fotosyntesens ljusreaktion reagerade på ozonexponering, men denna effekt var av betydelse endast vid låga ljusstyrkor (Wallin 1990; Wallin *et al.* 1992a,b). Dessa resultat användes i en uppskattning av ozons effekt på ett trädets totala fotosyntes genom en modellsimulering. Den visade att kronans totala fotosyntes hos äldre träd (89 år) påverkas i betydligt större utsträckning av ozon jämfört med yngre träd (8 år), vilket förklaras av att de äldre träden har en större andel gamla, och därför mer ozonpåverkade barr (Skärby *et al.* 1995).

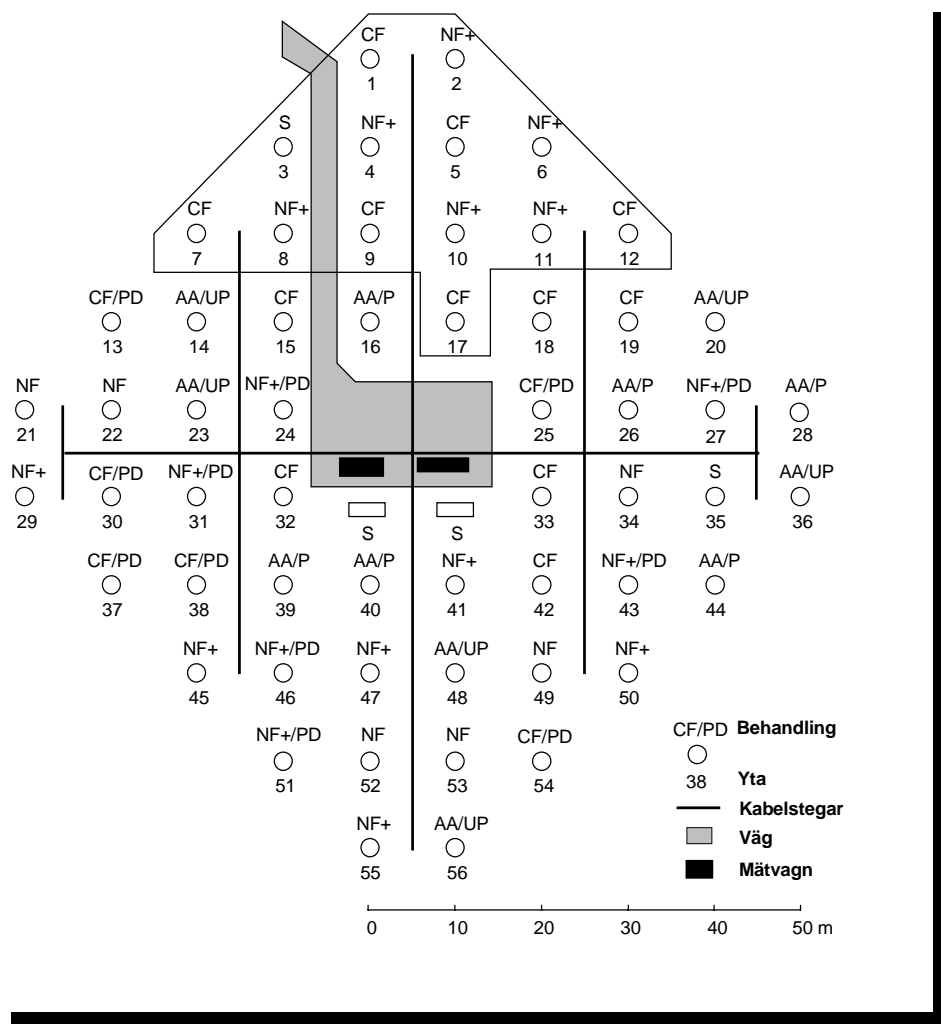
1989 utvärderades ovan beskrivna forskning kring ozons effekter på gran, vid IVL och Botaniska Institutionen vid Göteborgs Universitet, av en internationell forskargrupp. Resultatet av utvärderingen var bra och man rekommenderade att ge forskargruppen stöd för en fortsättning. Ett stort intresse och ett ekonomiskt stöd fanns för att gå vidare på basis av erhållna resultat, som ju visade att ozon kan vara en viktig stressfaktor för skog i Sverige. Baserat på resultaten från försöket vid Rörvik startades ett nytt långtidsexperiment med gran. En ny fältstation byggdes upp vid Östad Säteri, 50 km NO om Göteborg. 1990 startades planeringen för det nya experimentet som skulle gå ut på att studera vilken effekt ozon kan ha på biomassaproduktion hos gran. Det första året användes för detaljplanering av projektet. Bl. a inbjöds Dr. David Tingey från EPA, USA som expert på ozon och användandet av fältkammarmarkteknik.

Mål

Huvudmålsättningen med denna studie var att kvantifiera effekten av ozon, i kombination med klimat- och näringsstress, på tillväxten hos unga granar. Torkstress valdes som klimatfaktor eftersom tidigare försök tydde på att ozon störde klyvöppningarnas reglering (Wallin & Skärby, 1992c). Låg fosfortillgång valdes som näringsstress för att det finns risk för en måttlig fosforbrist eller obalans mellan fosfor och kväve i försurad skogsmark.

Försöksuppläggning

Sammanlagt anlades 56 försöksytor, varav 42 med fältkammare. En karta över fältstationen presenteras i Figur 1.



Figur 1. Karta över försöksområdet vid Östad fältstation. De inramade ytorna (1-12,17) ingick i det så kallade torkförsöket (Ozon-t). Övriga ytor ingick i det så kallade basförsöket (Ozon-b). Behandlingarna förklaras i tabell 1. S = reservyta.

Växtematerialet bestod av en klon (C77-0068 Minsk) av gran, *Picea abies* (L.) Karst, från Hillehöj AB. Klonen är av vitryskt ursprung och har varit föremål för omfattande plantskole- och fältförsök. Den var bland de mest snabbväxande i sin proveniens och har sålts kommersiellt av Hillehöj AB. Två år gamla granar sattes i juni 1991 i sand, en per kruka. När växter odlas i krukor blir krukans förr eller senare för liten vilket leder till att tillväxten begränsas. För att undersöka om krukorna (120 l) begränsade trädens tillväxt under försöksperioden användes ett behandlingsled utan krukor. Här sattes

plantorna, med samma avstånd mellan sig som de krukade, i en gemensam bassäng fylld med sand. Inga signifikanta negativa effekter av krukorna på tillväxt kunde påvisas.

Studien lades upp som två separata experiment, som analyserades statistiskt var för sig: **1)** det s.k. basexperimentet med fokus på ozon och fosfor (Ozon-b), som omfattade behandling 1-7 (tabell 1), och **2)** det s.k. torkexperimentet med fokus på ozon och vatten (Ozon-t), som omfattade behandling 8-11. I bas- och torkexperimentet fanns 18 respektive 24 krukor per yta. I varje kruka växte en gran och vid varje skördetillfälle skördades en gran per yta och behandling. Försöksuppläggningsen utgjordes av tre block som valdes så att granarna successivt kom att gallras i kammaren. Inom varje block var försöket designat enligt en latinsk kvadrat, där variablerna tid (skördetillfälle), behandling, riktning (väderstreck; skuggningseffekter) och yta (t.ex. olikheter i dränering och angrepp av skadedjur) kunde analyseras statistiskt, samtidigt som antalet skördade granar kunde hållas nere. Varje behandling hade 6 replikat.

Tabell 1. Översikt av behandlingar i Östad-gran experimentet. Behandlingarna 1-7 ingick i basförsöket där 1-3 användes för att uppskatta effekten av kammare och krukor, 4-7 för att uppskatta effekter av ozon med låg eller optimal fosfortillgång. Behandlingarna 8-11 användes för att uppskatta effekter av ozon med eller utan torkperioder. AA=omgivningsluft; UP=utan kruka; P=kruka; NF=ofiltrerad luft; NF+=ofiltrerad luft med extra tillsats av ozon; CF=kolfiltrerad luft; PD=låg fosfortillgång; D=torka; W=välvattnad; N=normal; L=låg, H=hög.

	Behandling	Ozon	Vatten	Fosfor	Kammare	Krukor
1	AA/UP	N	N	N	-	-
2	AA/P	N	N	N	-	+
3	NF	N	N	N	+	+
4	CF	L	N	N	+	+
5	NF+	H	N	N	+	+
6	CF/PD	L	N	L	+	+
7	NF+/PD	H	N	L	+	+
8	CF/W	L	N	N	+	+
9	NF+/W	H	N	N	+	+
10	CF/D	L	L	N	+	+
11	NF+/D	H	L	N	+	+

Tabell 2 visar viktiga händelser i Östad-gran-försöket från plantering till experimentets avslutning, med uppgifter om tidpunkt för ozonexponering, bevattning, torkperioder och näringstillförsel under de sex år försöket pågick.

Tabell 2. Tidpunkter för viktiga händelser i Östad-gran-experimentet.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Plantering	5/6					
Kammarinstallation, start filtrering		25/6	15/4	29/4	12/4	3/4
Start ozonexponering		6/7	16/4	21/4	13/4	
Stopp ozonexponering		23/10	30/10	2/11	14/11	
Kammarnedtagning, stopp filtrering		2/11	3/11	2/11	14/11	22/5
Start automatisk bevattning	15/6	15/5	26/4	28/4	15/5	30/4
Stopp bevattning	20/10	6/10	13/10	17/10	12/10	22/5
Start näringstillförsel	18/7	16/5	19/5	12/5	1/6	
Stopp näringstillförsel	31/8	25/8	30/7	18/7	31/7	
Start fosforbrist			19/5			
Start torkperioder		24/8	30/7	23/7	4/8	
Stopp torkperioder		21/9	10/9	15/9	19/9	
Experimentet avslutas						22/5

Vatten- och näringstillförseln kontrollerades med hjälp av ett datoriserat bevattningssystem. Träden vattnades dagligen under hela säsongen. Näring tillfördes dagligen under maj-juli, med maximal tillförsel i mitten av juni. Årstillsförseln av näring beräknades utifrån trädens vikt och förväntad tillväxt, med målsättningen att erhålla optimal tillväxt och ett kväveinnehåll i barren på 18-20 mg g⁻¹ (torrvikt).

Hälften av granarna inom varje försöksyta i Ozon-t utsattes för torkperioder 7-8 veckor vardera under säsongerna 1993, 1994 samt 1995, medan den resterande hälften alltid hölls välvattnade. Den regelbundna bevattningen för de torkstressade granarna upphörde och dessa fick vatten endast vid ett fåtal tillfällen under perioden, beroende på hur fort de torkade ut. Torkstressen kvantifierades genom mätningar av vattenpotentialen i barren tidigt på morgonen. Vattenpotentialerna mäts som det undertryck som uppstår i trädens ledningvävnad när det råder brist på vatten. Ju mer negativt värde desto kraftigare torkstress. Vattenpotentialerna nådde som lägst -1.9, -3.2 och -1.7 MPa under torkperioderna 1993, 1994 respektive 1995. Medelvärdena för vattenpotentialerna under samma perioder var -1.1, -1.0 samt -0.8 MPa. Vattenpotentialerna skiljde sig inte mellan de två ozonbehandlingarna i torkexperimentet.

Fosforinnehållet i årsbarren i basförsöket presenteras i Tabell 3. Kritiska nivåer för granbarrens fosforinnehåll anses vara 1.1-1.3 mg P/g och 0.10-0.12 uttryckt som P:N-kvot. Typiska värden i Sydsveriges skogar är 0.9-1.5 mg P/g och 0.09-0.16 i P:N-kvot. Fosforbristen var alltså måttlig i förhållande till vad man kan finna ute i fält.

Tabell 3. Fosforinnehållet (P, mg/g torrsvikt) och fosfor:kväve-kvoten (P:N) i årsbarren i basförsökets behandlingar med hög respektive låg fosforgiva.

Behandling	Halt/kvot	1992	1993	1994	1995
Hög P	P-halt	2.2	2.0	1.9	1.9
	P:N-kvot	0.10	0.10	0.08	0.12
Låg P	P-halt	2.2	1.9	1.3	1.5
	P:N-kvot	0.10	0.09	0.05	0.09

Ozonhalter

I Tabell 4 presenteras ozonhalterna i de olika behandlingarna, dels som 24-timmarsmedelvärden över säsongen, dels som medelvärdet under dygnets ljusa timmar. Ozonhalterna var lägst under de två första åren och högst det tredje året, 1994. I arbetet inom UNECE's luftkonvention (CLRTAP) med att ta fram s.k. kritisk belastning eller kritiskt gränsvärde för ozon har man gått från ett haltbaserat koncept till ett dosbaserat. Målet med det arbetet är att få fram kartor över Europa som identifierar riskområden och som visar på omfattning av effekter. Dessa kartor ska utgöra underlag vid förhandlingar om minskade utsläpp i Europa. För såväl grödor och vilda växter som för skogsträd har man funnit att effekterna avspeglas bättre, men inte tillräckligt bra, om man räknar fram ozondosen ur det antal timmar som halterna överskrider 40 ppb. Beräkningen görs över dygnets ljusa timmar under vegetationssäsongen (3 eller 6 månader). En kritisk belastning uttrycks som AOT40, vilket betyder "Accumulated exposure Over a Threshold". Experimentets AOT40-värden presenteras i Tabell 5. Nuvarande kritiskt gränsvärde (10 ppm-timmar) överskreds alla åren i NF+. I detta sammanhang kan det inte nog poängteras att konceptet AOT40, som det används för närvarande, är en exponeringsdos som fortfarande inte reflekterar vad som tas upp i växten (dvs. den aktiva dosen).

Tabell 4. Säsongsmedelvärden (24 timmar och ljusa timmar) mellan 1 april och 30 september av ozonhalter (ppb) i fältkammare och omgivningsluft. AA/5m, 5 m ovanför mark i omgivningsluft, övriga förkortningar se tabell 1. Observera att data för 1996 endast omfattar 1 april - 22 maj.

Behandling	24-timmarsmedelvärde					Medelvärde, ljusa timmar				
	1992	1993	1994	1995	1996	1992	1993	1994	1995	1996
AA/5m	-	-	30	26	32			37	33	37
AA	23	24	29	26	30	32	31	37	33	36
NF	22	23	27	25	30	30	30	36	32	36
CF	4	6	8	7	10	8	7	10	9	12
NF+	29	34	38	36	28	39	43	51	45	33
CF/PD	5	7	9	7	9	8	8	11	9	10
NF+/PD	30	34	38	36	29	39	43	50	45	34
CF/W, D	5	6	8	7		6	7	11	9	
NF+/W, D	30	34	38	36		40	43	50	44	

Tabell 5. AOT40 uttryckt som ppm-timmar (1 april - 30 september) summerade över dygnets 24 timmar respektive dygnets ljusa timmar. Förkortningar: se tabell 1. Observera att data för 1996 endast omfattar 1 april - 22 maj.

Behandling	24 timmar					Ljusa timmar				
	1992	1993	1994	1995	1996	1992	1993	1994	1995	1996
AA	6.9	5.3	9.7	5.3	1.8	5.7	4.9	9.2	4.9	1.8
CF	5.8	0.3	1.1	0.2	0.0	4.7	0.3	0.9	0.2	0.0
NF	6.6	4.2	7.8	4.2	1.6	5.4	3.8	7.4	3.8	1.8
NF+	13.8	22.5	38.6	25.5	2.0	11.0	19.1	34.3	22.3	1.6

Effekter på klorofyllinnehåll och ultrastruktur i barr

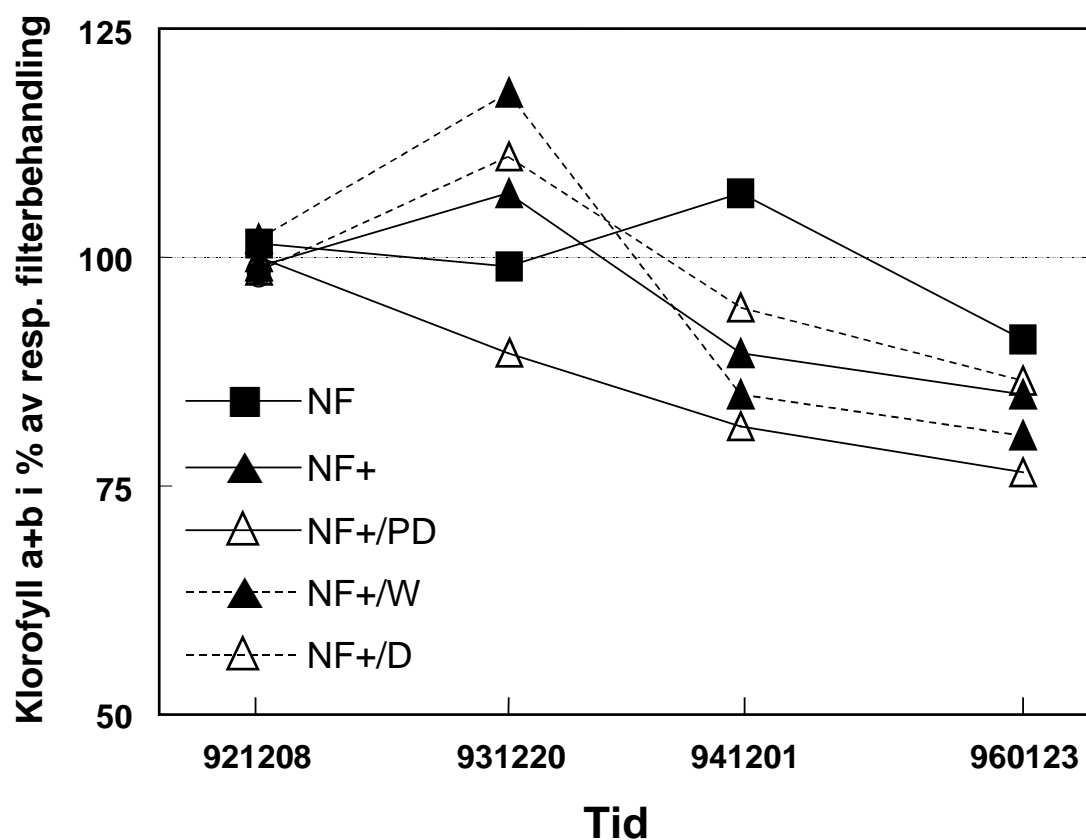
En vanlig effekt av ozonexponering är att klorofyllhalten i bladen eller barren minskar. Resultaten från Rörviksstudien visade att granbarrens klorofyllinnehåll minskade successivt i 2-4-åriga barr (Skärby *et al.* 1995). Liknande resultat erhöles i experimentet på Östad. Barrens klorofyllinnehåll mättes i december varje år (1992-1996).

I Figur 2 visas hur ozon påverkade klorofyllinnehållet i de barr som utvecklades 1992. Klorofyllinnehållet i barr från de olika ozonbehandlingarna presenteras i % (torrvikt) av

innehållet i barr från respektive kontroll (CF; CF/PD; CF/W; CF/D). Resultaten från den statistiska analysen (två-vägs variansanalys), där inte NF ingår, presenteras i Tabell 6.

Alla ozonbehandlade träd, förutom de som exponerats för ozon i kombination med låg fosfortillgång, uppvisade samma mönster över tiden. Klorofyllinnehållet i 1-åriga barr, som erhållit ozon i 2 säsonger, var högre än i respektive kontroll. Ökningen var signifikant i NF+/W (18%) och NF+/D (11%). Klorofyllinnehållet minskade sedan successivt med ökande ålder på barren och i 3-åriga barr hade innehållet minskat med 13-24% jämfört med CF. Minskningen i klorofyllhalt var signifikant i 2-och 3-åriga barr i alla ozonbehandlingarna. En liknande trend uppträdde även i NF, men med ett års förskjutning framåt i tiden jämfört med NF+ (Figur 2).

När träden exponerades för ozon i kombination med låg fosfortillgång erhöles ett annat mönster. Då minskade klorofyllinnehållet kontinuerligt från år till år (Figur 2). En signifikant interaktion mellan ozon och fosfor erhöles endast efter den första säsongen med låg fosfortillgång (1993). Interaktioner mellan ozon och torka kunde inte påvisas.



Figur 2. Förändring i klorofyllinnehåll (% av kontrollen CF) med tiden hos barr från 1992 års skott. NF, ofiltrerad luft; NF+, extra ozon; NF+/W, extra ozon och välvattnad; NF+/D, extra ozon och torkstressad; NF+/PD, extra ozon och låg fosforhalt.

Tabell 6. P-värden från statistisk analys (två-vägs variansanalys) av klorofyllinnehållet i barr. Värden som är mindre än 0.05 visar att det finns signifikanta skillnader mellan behandlingarna (PD, fosfor, T, vattentillgång) eller signifikanta interaktioner mellan ozon och fosfor respektive vattentillgång (O*PD respektive O*T). b= basförsöket, t= torkförsöket.

År	Barrålder	Ozon-b	PD	O*PD	Ozon-t	T	O*T
1992	Årsbarr	0.808	0.346	0.863	0.911	0.087	0.494
1993	1 år	0.545	0.183	0.010	0.034	0.168	0.543
1994	2 år	<0.001	0.052	0.190	0.009	<0.001	0.123
1995	3 år	<0.001	0.148	0.303	<0.001	0.026	0.267

Minskningen av innehållet av det för fotosyntesen så viktiga klorofyllet i äldre barr, ger en indikation om att ozonet kan förorsaka ett onormalt åldrande hos barren. Här finns en intressant, men fortfarande icke bevisad, koppling till den ökande kronutglesningen i Europa som man konstaterat, hos både löv- (ek och bok) och barrträd (främst gran men även tall), under de senaste 10 åren. Ozonet kan ha bidragit till att löv och barr faller av i förtid.

Om vi kunde särskilja ozonpåverkan från påverkan av annan stress skulle vi få goda möjligheter att kvantifiera betydelsen av ozon för svenska skogsträd. Kronutglesning används ofta för att indikera skador på träd. Barravfall är emellertid det sista stadiet i en lång kedja av reaktioner. Med hjälp av ljusmikroskopi och elektronmikroskopi är det möjligt att mycket tidigare spåra reaktioner och förändringar.

De elektronmikroskopiska undersökningarna av barr som har utförts av Dr. Sirkka Sutinen, Finska Skogsforskningsinstitutet, har visat att ozoninducerade förändringar först uppträder i kloroplasterna, den plats i cellen där fotosyntesen sker. Efter att ozon trängt in i barren via klyvöppningarna uppträder förändringar i kloroplasterna först i de cellager som ligger under epidermis, i den del av barret som vetter mot solen. Övriga cellager är helt oskadade. Med tiden uppträder förändringarna djupare in i barret. Kloroplasternas storlek minskar, dess grundsubstans, stroma, blir mörk och kornig, medan dess membraner, tylakoider, blir svåra att urskilja. Andra cellorganeller uppvisar förändringar senare, t.ex.

mitokondrierna uppvisar inga strukturella förändringar förrän cellens cytoplasma är helt förstörd. Äldre barr uppvisar fler och allvarligare förändringar än unga barr.

De flesta studier av hur ozon påverkar barr- och lövträd har utförts på träd som exponerats för ozon i olika exponeringssystem. Vare sig träden har exponerats för ozon under väl kontrollerade förhållanden i laboratoriet, i fältkammare eller i fält med "open release" är responsen på ozon likartad. Ett fåtal studier på träd i fält har utförts i Finland. Dessa undersökningar visar att många träd uppvisar symptom på ozonpåverkan och att graden av påverkan korrelerar med ozonhalten i luften (Sutinen *et al.* 1998).

Effekterna av fosforbrist studerades också i försöket på Östad. Fosforinducerade förändringar uppträdde i kloroplasterna, mitokondrierna och i cytoplasman. Förändringarna, bland annat ökad kloroplaststorlek, uppträdde till skillnad från ozon först i årsbarr.

Andra föroreningar som SO₂, NO₂, surt regn och fluorid ger alla upphov till förändringar i barr som dels skiljer sig från varandra, dels från de som orsakas av ozon. Sammantaget visar dessa resultat att ultrastruktur skulle kunna börja användas för att diagnostisera ozonpåverkan i fält.

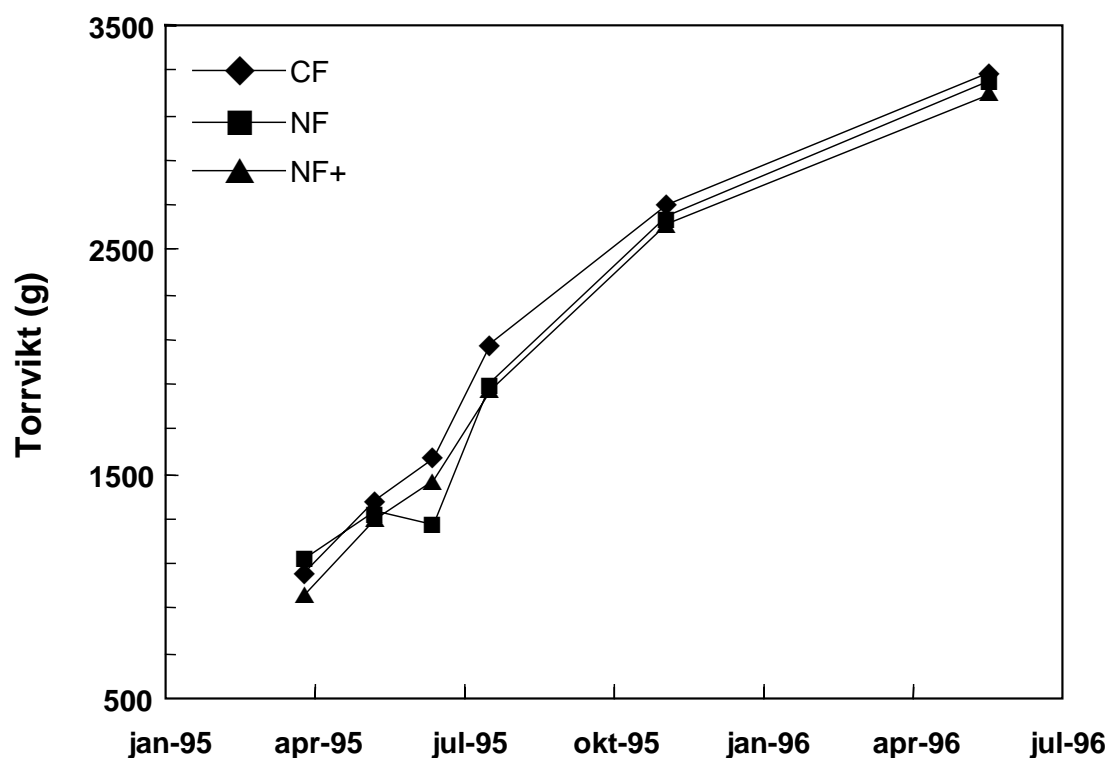
Effekter på biomassa

Granarnas biomassa-tillväxt (barr, grenar, stam, rot) mättes regelbundet under hela försöket. Basförsöket pågick mellan maj 1992 och maj 1996 och omfattade 18 skördar uppdelade på 3 block. Varje block bestod av sex skördar över en viss tidsperiod, där block 1 var de sex första (1992-93), block 2 de sex påföljande (1994) och block 3 de sex sista (1995-96). Torkförsöket pågick mellan maj 1992 och september 1995 och omfattade 6 skördar uppdelade på 3 block. Här skördades alltså granar två gånger per år, i april och september 1993-1995.

Den statistiska analysen (variationsanalys) av granarnas totala biomassa i basförsöket visade effekt av tid och behandling men inte av väderstreck eller ytans placering.

Detta innebar att vi kunde fortsätta den statistiska analysen utan hänsyn till väderstreck och placering.

I Figur 3 presenteras den totala biomassaproduktionen under det sista blockets 6 skördetillfällen i basförsöket för de tre olika ozonbehandlingarna och med balanserad fosforgiva. Inga signifikanta skillnader erhöles mellan behandlingarna vid varje enskilt skördetillfälle, men biomassan var generellt högst i CF och lägst i NF+.

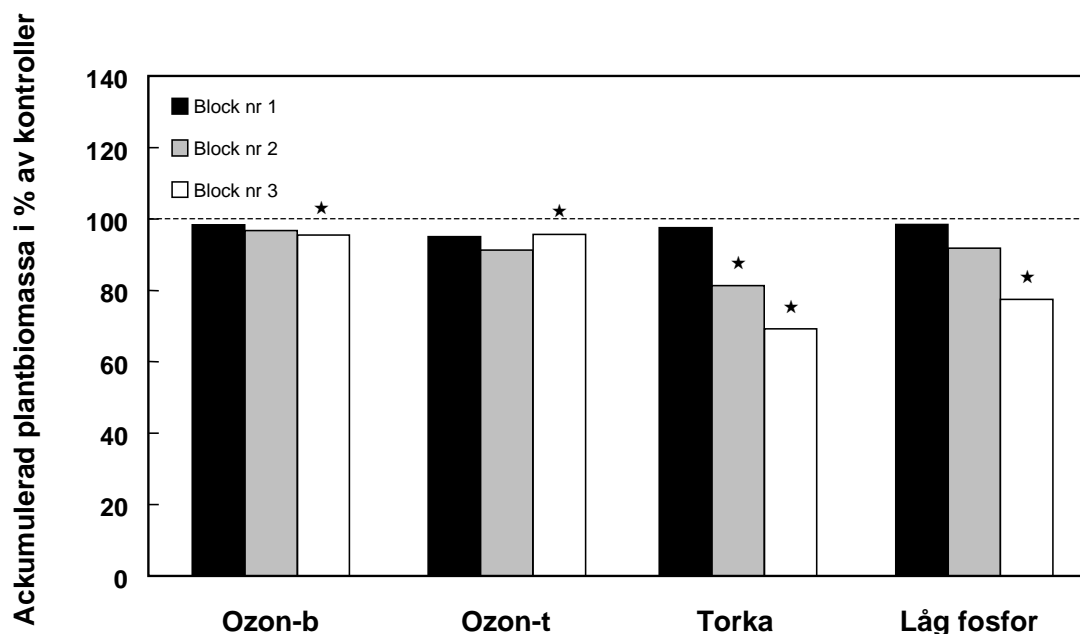


Figur 3. Effekten på tillväxt (total biomassa) av olika ozonbehandlingar i basförsöket, mellan april 1995 och april 1996.

För att komma vidare och få största möjliga antal replikat inom ozonbehandlingarna gjordes variansanalys där effekter av tid (Block 1-3), ozon och näring respektive vatten analyserades.

I Figur 4 presenteras effekterna av den högsta ozonbehandling (NF+, 1,5 x omgivningshalten) på biomassan i basförsökets (Ozon-b) och torkförsökets (Ozon-t) skördar för de tre blocken i % av respektive kontroll (CF). Samtliga data för respektive behandling inkluderades, dvs för ozonbehandlingarna kunde data slås ihop

från såväl balanserad som låg fosfortillgång respektive vattentillgång och jämföras med sin egen kontroll. På så vis erhöles ett större datamaterial att testa. Effekten av ozon var betydligt mindre än effekten av torka eller låg fosforgiva. I basförsöket (Ozon-b) ökade den negativa effekten av ozon på biomassan successivt från år till år, dvs. från block till block. Även i torkförsöket (Ozon-t) reducerade ozon biomassan i alla block, men effekten var mer komplex.



Figur 4. Effekter av ozon (1,5 x omgivningshalt), torka och fosforbrist på hela växtens ackumulerade biomassa i % av biomassan i respektive kontroll i block 1, 2 och 3. I Ozon-b och Ozon-t ingår samtliga ozonbehandlingar i respektive bas- och torkförsöket. * = signifikant skillnad från kontroll ($p < 0.05$).

Effekten av förhöjd ozonhalt var signifikant negativ först i block 3, dvs efter fyra säsonger. Då visade behandlingen med förhöjda ozonhalter (NF+) en 5%-ig minskning i biomassa i basförsöket och en 4%-ig minskning i torkförsöket jämfört med CF (kontrollen med låg ozonhalt). Den låga fosforgivan resulterade i 23% mindre biomassa jämfört med normal giva i block 3. Effekten av torkbehandlingen var signifikant negativ redan i block 2. Efter tre säsonger var biomassan 19% lägre och efter fyra säsonger 31% lägre jämfört med granar som fått vatten regelbundet.

Den relativa tillväxthastigheten under experimentperioden beräknades genom att logaritmera samtliga skörderesultat och avsätta dessa mot tiden. Linjär regressionsanalys visade att samtliga behandlingar hade en linje med en mycket hög korrelationskoefficient. Förhöjda ozonhalter (NF+) orsakade en minskad relativ

tillväxthastighet på ca 2%, både i bas- och torkförsöket, jämfört med kontroll (CF). I Tabell 7 presenteras beräknad storleksordning på behandlingseffekterna. Om man enbart tittade på stamvolym erhöles samma minskning av tillväxthastigheten på 2% (omgivningsluftens halt), torkstress och låg fosfortillgång. Ozoneffekten jämförs med en kolfiltrerad kontroll. Torkstresseffekten jämförs med en välvattnad kontroll och effekten av låg fosfor med en

Tabell 7. Beräknad minskning (%) av relativ tillväxthastighet (total biomassa) orsakad av ozon (1,5 x kontroll som givits en balanserad fosforgiva, oberoende av ozon.

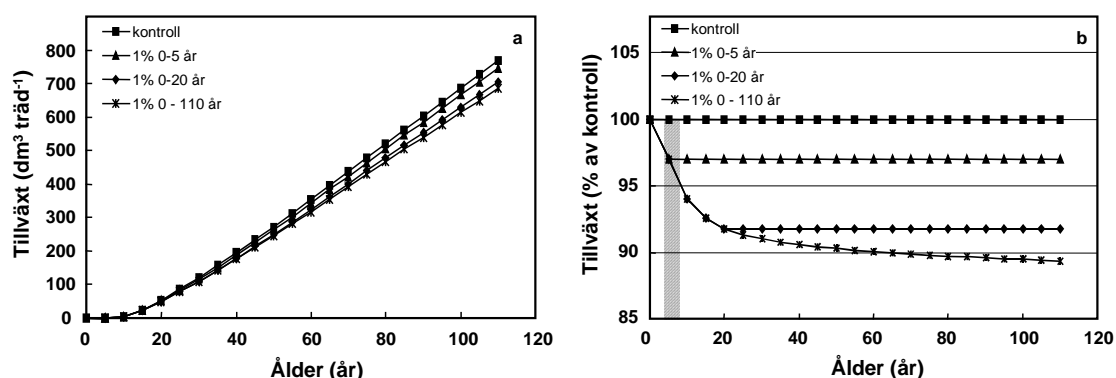
	Ozon basförsöket	Ozon torkförsöket	Torka	Låg fosfor
% minskning av relativ tillväxthastighet	-2	-2	-12	-8

Dessa resultat kan användas för att testa olika scenarion i modellsimuleringar och beräkna produktionsförluster hos gran i södra Sverige orsakade av ozon. Frågan om den nu undersökta klonen kan representera granens reaktion på ozon i Sverige är dock inte utredd. Trädets förmåga att utveckla tolerans mot ozon efter en viss tid eller vid en viss ålder liksom dess förmåga att återhämta sig efter ozonexponering är en annan obesvarad fråga. Dessutom återstår frågan om ozonkänsligheten hos vuxna träd i relation till den hos unga träd. Ett par olika amerikanska studier av ek (Samuelsson *et al.*, 1996) och Ponderosa pine (Miller och Elderman, 1977) visar, att unga och gamla träd kan vara lika ozonkänsliga. En modellsimulering av effekterna av ozon på en grans totala fotosyntes, baserat på våra tidigare data, indikerade att äldre träd förmodligen påverkas i större utsträckning jämfört med yngre träd (Skärby *et al.* 1995). Pågående forskning med grenkammare på vuxna granar i Skogaby kommer att ge mer information om den relativa ozonkänsligheten hos unga respektive vuxna granar.

Den genomsnittliga ozondosen under experimentets 4 år var ca 20 ppm*h, vilket är 2 ggr den kritiska nivån för ozon, 10 ppm*h. Detta gränsvärde överskreds i mellersta och södra Sverige sommaren 1994, 1995 och 1996. Under antagandet att tillväxtnedsättningen är linjärt proportionell mot ozondosen så skulle den nuvarande kritiska haltnivån för ozon medföra en nedsättning av tillväxthastigheten på 1 %.

För att åskådliggöra vad en 1%-ig nedsättning av den relativa tillväxthastigheten kan få för konsekvenser gjorde vi en enkel modellsimulering. Utgångsdata var en

modellsimulering av stamvolymstillväxten hos en gran på en yta med hög bonitet i södra Sverige under 110 år som gjordes av Docent Ulf Söderbergh, Institutionen för Skoglig Resurshushållning och Geomatik, SLU, Umeå. Denna simulering (=kontroll) modifierades på så vis att en 1% minskning av tillväxthastigheten introducerades under tre olika tidsperioder under trädets livscykel, 0-5 års, 0-20 års samt 0-110 års ålder. Detta för att simulera att ozonets negativa påverkan på stamvolymstillväxten endast gäller unga plantor, eller endast unga träd under intensiv tillväxt eller slutligen under trädets hela levnad. Resultaten återges i Figur 5. Om ozon endast påverkade tillväxten hos unga granplantor, så skulle granarna vid avverkningsbar ålder ha ca 3% mindre stamvolym. Om ozon istället verkar under de unga granarnas intensiva tillväxtperiod, 0-20 år, så kommer granarna att bli ca 8% mindre. Slutligen, om ozonet verkar reducerande på tillväxthastigheten under hela granens tillväxt så skulle granarna vid avverkningsbar ålder vara ca 11% mindre.



Figur 5. Simulering av stamvolymtillväxten hos en gran på en yta med hög bonitet i södra Sverige. Den relativa tillväxthastigheten har under olika perioder reducerats med 1% i syfte att simulera ozonets negativa påverkan på tillväxten under en grans olika tillväxtfaser. **a.** Stamvolymtillväxt i absoluta tal (dm³ träd⁻¹). **b.** Stamvolymtillväxt, normaliserad till den opåverkade kontrollen (=100%). Den grå stapeln illustrerar den tidsperiod som ozonexperimentet varade.

De enkla simuleringar som vi genomfört kan ändå ge fingervisningar om vilka scenarion som kan vara relevanta: **1)** Ozons påverkan på unga plantor under en 5-årsperiod innebär, att trädets tillväxt kommer efter och har därför en stor inverkan på trädets slutliga volym alternativt tidpunkt för slutavverkning. **2)** Om ozon påverkar trädets tillväxthastighet under hela dess livscykel på samma sätt som hos unga träd, kan det medföra mycket stora produktionsminskningar. Man utgår då från att trädets förmåga till återhämtning är begränsad.

Tabell 8. Beräknat ekonomiskt bortfall pga ozonpåverkan vid avverkning av gran på en yta med god bonitet i södra Sverige. I beräkningen används två olika nivåer av ozon (Figur 5) och vi särskiljer om de avverkade träden avyttras som sågtimmer eller massaved. Virkesförrådet vid avverkningsbar ålder har antagits vara 300 m³/ha, priset på sågtimmer 450 SEK/m³ samt massaved 250 SEK/m³.

% reduktion stamvolymen pga ozon	Ekonomiskt bortfall (SEK/ha)	
	Sågtimmer	Massaved
3 %	4000	2200
11 %	14800	8200

För en skogsägare i södra Sverige kan volymminskningen orsakad av ozon innebära ett inkomstbortfall på i storleksordningen SEK 4000-15000 per hektar avverkad skog, om den avverkade skogen avyttras som timmer (Tabell 8).

Ozons betydelse i Sverige?

Inledande arbeten med att uppskatta effekter på basis av ozonupptag (Emberson *et al.*, 1998) tyder på att effekterna av marknära ozon kan var större än väntat i norra Europa och möjligen mindre än man tidigare antagit, med hänsyn till de högre ozonhalterna längre söderut i Europa. Detta beror på att ozonupptaget styrs av ljus (långa dagar på sommaren i norr) och fuktighet i luft och mark som till stor del är högre i norra Europa.

Hittills har forskarsamhället arbetat med effekter genom att göra en övergripande kvantifiering av risker för ozonskador på känsliga receptorer med hjälp av uppmätta ozonhalter och utan att ta hänsyn till dos- och responsmodifierande faktorer i form av t ex olika trädålder och ozonupptag (styrs bl a av klimatfaktorer). En konsekvens av detta är, att man använder ett exponeringsindex (AOT40) som inte direkt avspeglar växtens upptag av ozon. Utvecklingen inom området går nu mot att man tar hänsyn till de faktorer som modifierar dos och respons av ozon. Det är först med ett sådant perspektiv som man kan göra tillförlitliga uppskattningar av produktionsbortfall. Det är sannolikt, att nästa generations överenskommelser om gränsöverskridande luftföroreningar, ett stycke in på 2000-talet, kommer att vara baserade på detta perspektiv.

Det kvarstår viktiga frågor när det gäller ozonproblemets exakta geografiska omfattning. För Sverige är det en viktig fråga om även skog långt norrut är utsatt för en ozonpåverkan som kan ge tillväxtförluster. Ozonhalterna är förhöjda också i t ex Norrland, men i mindre grad jämfört med Sydsverige och på kontinenten. Frågan är ändå om ozondosen kan bli väl så stor p.g.a klimat och ljusförhållanden som gynnar större ozonupptag.

Slutsatser

Resultaten från Östad-gran studien visar:

- att ozon ökade klorofyllhalten i 1-åriga barr och därefter reducerade klorofyllhalten i barr som var 2 år och äldre. I 3-åriga barr hade innehållet minskat med 13-24%.
- att ozon vid ett AOT40-värde på i genomsnitt 20 ppm-timmar per säsong (2 ggr den kritiska belastningsnivån för skog) orsakade en minskning i tillväxthastigheten på ca 2% under hela experimentperioden. Modellsimuleringar pekar på att dagens ozonnivåer, jämfört med de ozonnivåer som förekom för 100 år sedan, resulterar i mellan 3 och 11% lägre biomassa hos avverkningsmogen gran i södra Sverige.
- att lågt fosforinnehåll (måttlig brist) reducerade tillväxthastigheten med ca 8% under hela experimentperioden.
- att regelbundna perioder av torra reducerade tillväxthastigheten med ca 12% under hela experimentperioden.

Referenser

- Emberson, L. D., Ashmore, M. R. & Cambridge, H. M. (1998). Development of methodologies for Mapping Level II Critical Levels of Ozone. Imperial College of London, DETR Report no. EPG 1/3/82.
- Heagle, A.S., Body, D. & Heck, W. (1973). An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants. *Journal of Environ. Quality* 2, 365-368.
- Miller, P.R. & Elderman, M.H. (Eds.) (1977). Photochemical oxidant air pollution effects on a mixed conifer forest ecosystem. US EPA Rep no EPA 600/3-77-104. SAPRC, Univ Calif, Riverside.
- Samuelsson, L.J., Kelly, J.M., Mays, P.A. & Edwards, G.S. (1996). Growth and nutrition of *Quercus rubra* L. seedlings and mature trees after three seasons of ozone exposure. *Environmental Pollution*, Vol. 91, 317-323.
- Skärby, L., Wallin, G., Selldén, G., Karlsson, P.E., Ottosson, S., Sutinen, S. & Grennfelt, P. (1995). Tropospheric ozone - a stress factor for Norway spruce in Sweden. *Ecological Bulletin (Copenhagen)* 44, 133-146.
- Sutinen, S., Skärby, L., Wallin, G. & Selldén, G. (1990a). Long-term exposure of Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst., to ozone in open-top chambers. *New Phytologist*. 115, 345-355.
- Sutinen, S., Lumme, I., Mäenpää, M. & Arkhipov, V. (1998). Light microscopic structure of needles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in relation to air pollution and needle element concentrations in S.E. Finland and the Karelian Isthmus, N.W. Russia. *Trees* 12, 281-288.
- Wallin, G. (1990). On the impact of tropospheric ozone on photosynthesis and stomatal conductance of Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst. - *Ph.D. thesis*, Univ of Göteborg, Sweden.
- Wallin, G., Skärby, L. & Selldén, G. (1990). Long-term exposure of Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst., to ozone in open-top chambers. I. Effects on the capacity of net photosynthesis, dark respiration and leaf conductance of shoots of different ages. *New Phytologist* 115, 335-344.
- Wallin, G., Skärby, L. & Selldén, G. (1992a). Long-term exposure of Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst., to ozone in open-top chambers. III. Effectss of the light

response of net photosynthesis in shoots of different ages. - *New Phytologist* 121, 387-394.

Wallin, G., Ottosson, S. & Selldén, G. (1992b). Long-term exposure of Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst., to ozone in open-top chambers. IV. Effects on the stomatal and non-stomatal limitation of photosynthesis and the carboxylation efficiency. - *New Phytologist* 121, 395-401.

Wallin, G. and Skärby, L. (1992c). The influence of ozone on the stomatal and non-stomatal limitation of photosynthesis in Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst., exposed to soil moisture deficit. *Trees* 6, 128-136.

Bilaga 1

Tack för viktiga insatser i Östad-gran experimentet!

Sol-Britt Alexandersson

Kjell Peterson

Ingvar Andersson

Gunilla Pihl-Karlsson

Tom Andersson

Anna Stina Sandelius

Björn Berglind

Ulf Söderbergh

Lovisa Brännland

Jan Tobisson

Luis Calizeia

Magnus Ugander

Anders Carlsson

Johan Uddling

Kristian Grennfelt

Monique Wannding

Nils Gustavsson

Hans Wickström

Henrik Hedenås

Suhaila Younis

Marita Hellgren

David Holmgren

Anders Jansson

Manne Johansson

Linnea Kjellberg

Catharina Lindberg

Lars Lövgren

Lars Munther

Lars Nestor

Nina Ottosson

Bilaga 2

Finansiärer för projektet "Effekter av ozon på produktionen hos gran"

1. Stiftelsen IVL med följande intressenter

Bilindustriföreningen	Karin Kvist
Boliden Mineral AB	Klas Lundbergh
Borealis AB	Jonny Andersson
Elforsk	Gunnar Hovsenius
Hydro Polymers AB	Rune Nicklasson
Jernkontoret	Birgitta Lindblad
Kemikontoret	Anita Ringström
MoDo AB	Carl-Johan Alfthan
Naturvårdsverket	Ulla Bertills, Björn Ejner, Lars Lindau, Håkan Staaf
Norrköpings Energi AB	Anders Jansson
Ovako Steel AB	Istvan Lukacs
Skogsstyrelsen	Mikael Axelsson, Martin Lindell, Maria Norrfalk, Sture Wijk
Stora Skog AB	Ragnar Friberg
SSVL	Nils Jirvall, Jan Remröd
AB Svensk Bilprovning	Anders Laveskog, Mats Wallin
Södra Skogsägarna	Magnus Fagerlind, Jan Åke Lundén, Roland Lövblad, Jan Malmström
Vattenfall	Bengt Hanell, S-O. Ericson
Volvo AB	Eva Axelsson, Henrik Kloo
Vägverket	Jarl Hammarkvist, Anders Sellner, Gerd Åström
Åforsk	Hans G. Forsberg
2. Östad Stiftelse	Patrik Alströmer
3. Naturvårdsverket	
4. SJFR	
5. Nils och Dorthi Troëdssons forskningsfond	Sven-Åke Sjöholm