SÄKERHET OCH TRANSPORT
BRANDFORSKNING

Hur stora är växthusgasutsläppen vid naturvårdsbränning?

Johan Sjöström, Frida Vermina Plathner & Anders Granström

RISE Rapport 2024:39

Hur stora är växthusgasutsläppen vid naturvårdsbränning?

Johan Sjöström, Frida Vermina Plathner & Anders Granström

Johan Sjöström. RISE Research institutes of Sweden, Box 854, 501 15 Borås. johan.sjostrom@ri.se

Frida Vermina Plathner. RISE Research institutes of Sweden, Scheelevägen 17, Ideon Beta 5, 223 70 Lund. frida.vermina.plathner@ri.se

Anders Granström. Skogens ekologi och skötsel, Sveriges Lantbruksuniversitet, 901 83, Umeå, Sweden. anders.granstrom@slu.se

This work is licensed under CC BY 4.0

Abstract

How large are the global warming emissions from prescribed fires in the European boreal?

This report addresses emissions of greenhouse gases during prescribed fires, which are done in Sweden for increased biodiversity. Focus is on CO_2-emissions during the combustion. There are large instantaneous emissions to the atmosphere. However, the CO2-debt, i.e. the difference in atmospheric CO_2 if the burning is conducted or not, decreases rapidly in the years following the burn as carbon is stored in soil and growing plants. The emissions from prescribed burning on protected land can be assessed using field observations of fuel loads, fuel consumption during the fire and post fire plant/litter accretion. The net change in atmospheric CO_2 is thereafter calculated from these data sets for different time since fire. Instantaneous emissions are estimated, for a characteristic fuel type, at 14.4 tonnes CO_2 per hectare. After only ten years 78 % of this is again fixed in the vegetation on the forest floor, and litter. The same number 20 years post fire is 90 % and at 50 years, 98 %.

Key words: Naturvårdsbränder; koldioxid; emissioner; utsläpp; växthusgaser; skogsbrand; klimatförändring; naturvård; Prescribed fires; carbon dioxide; emissions; greenhouse gases; forest fires; wildfires; climate change; bio conservation;

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2024:39
ISBN: 978-91-89896-97-0
Borås 2024

This work is licensed under CC BY 4.0

Innehåll

Abstract **1**
Innehåll **2**
Sammanfattning **3**
1 Bakgrund **4**
1.1 Naturskogen och dess relation till bränder 4
1.2 Skogen som kolsänka 4
1.3 Störningen vid naturvårdsbränder 5
2 Utsläpp av växthusgaser – ett räkneexempel **7**
2.1 Antaganden 8
2.2 Resultat 9
3 Diskussion **10**
3.1 Felkällor och variation 10
3.2 Övriga utsläpp 11
3.3 Vildbränder 11
4 Finansiering **12**
5 Referenser **12**

This work is licensed under CC BY 4.0

Sammanfattning

Denna rapport diskuterar emissionen av växthusgaser vid naturvårdsbränning, främst den CO_2 som bildas vid förbränning. Momentant sker ett stort utsläpp av CO_2 till atmosfären. Koldioxidskulden, det vill säga skillnaden i atmosfäriskt CO_2 om branden genomförs eller ej, minskar dock markant åren efter branden då kolet åter binds i mark och växer. Utsläppen från naturvårdsbränder i naturreservat kan uppskattas med hjälp av fältobservationer av bränslemängder, bränslets konsumtion vid brand och återväxt därefter. Nettotillskottet av atmosfäriskt CO_2 beräknas sedan utifrån dessa data för olika lång tid efter bränning. Momentant uppskattas utsläppen för ett typexempel till 14.4 ton CO_2 per hektar men efter 10 år har 78% av detta åter inlagrats i markens förna och markvegetation, efter 20 år 90% och efter 50 år 98%.

This work is licensed under CC BY 4.0

1 Bakgrund

1.1 Naturskogen och dess relation till bränder

Under århundraden har skogarna och alla dess arter av flora, fauna och funga i vad som idag är Sverige anpassat sig efter återkommande bränder. Bränder har utgjort ett av flera selektionstryck och har skapat specifika biotoper till vilka olika arter har anpassat sig. Fram till den storskaliga exploateringen av svensk skog under senare delen av 1800-talet brann det återkommande med typiska intervall av 80-100 år i norra Sverige [1] och ännu tätare i den södra delen [2]. Under de senaste 150 åren har effektiv brandbekämpning lett till en minskning av andelen bränd skog med över 99 % vilket i sin tur skapat ett ekologiskt underskott av brandpåverkad skog, med stora konsekvenser för det naturliga landskapet, för så kallade pyrofila arter och generellt för skogarnas biodiversitet.

För att behålla naturvärden på skyddad mark genomförs därför naturvårdsbränning i naturreservat som bland annat skapar glesare, brandpåverkade skogar med möjlighet för en större variation av djur, växter och svampar [3]. Även skogsbolag genomför bränningar, inom ramen för miljöcertifieringen FSC (Forest Stewardship Council) [4]. Inom projektet Life2Taiga, som omfattar 17 av Sveriges 21 länsstyrelser, förväntas drygt 3400 hektar brännas under projektets 7-åriga varaktighet [5]. De ekologiska fördelarna med naturvårdsbränder är väl belagda [6] men frågor har väckts kring verksamhetens övriga miljöeffekter. En vanligt återkommande fråga rör omfattningen av växthusgaser som bränningen ger upphov till. Det snabba svaret är att förbränning av biogent kol inte skjuter till något mer kol till det biologiska kretsloppet. Det sker dock ett momentant utsläpp av koldioxid, vilket i sig har samma effekt oberoende om dess ursprung är fossilt eller från biomassa. Nedan diskuteras därför emissioner av växthusgaser samt typexempel från nyligen genomförda naturvårdsbränder och utvecklingen efter branden.

1.2 Skogen som kolsänka

En typisk svensk skog har ett trädbestånd dominerat av tall eller gran, med inslag av björk och asp. På marken växer ofta ett skikt med ris (exempelvis blåbär, lingon eller ljung), varunder marken till stor del täcks av mossa eller (på magra marker) lav. Mossan är vanligen 4 – 12 cm tjock och är uppblandad med förna, dvs dött nedfall från träd och andra växter. Hädanefter benämns detta relativt luckra skikt av mossa/lav/förna som ’förnalagret’ (Figur 1). Under förnalagret går en ganska skarp gräns till det betydligt kompaktare humuslagret, vars mäktighet ofta uppgår till mellan 5 och 20 cm, med varierande densitet [7].

När en skog växer binds atmosfärisk koldioxid genom fotosyntesen, primärt som kolatomer i stärkelse och glukos. Samtidigt frigörs kol genom cellandning samt vid nedbrytning av dött biomaterial som faller ner i förnan, så kallad heterotrof respiration. Skogen agerar också lager av kol som byggts upp över lång tid, främst i form av ved i stammar och grenar. Om skogen skördas till exempelvis biobränsle återförs det biogena kolet till atmosfären och skogens funktion som kollager försvinner. Mycket kol återfinns också i humuslagret som skiljer mineraljorden från förnan. Två tredjedelar av skogsmarkens lager av kol återfinns emellertid nere i mineraljorden [8], men detta anses vara i det närmaste inert och påverkas definitivt inte av brand.

This work is licensed under CC BY 4.0

Efter avverkning utgör skogsmarken en kolkälla under den första tiden, då heterotrof respiration dominerar över växternas inlagring av kol. Därefter ökar sedan kolinlagringen, framförallt via tillväxt av markvegetationen, men efterhand mer och mer via trädens tillväxt. Efter ett årtionde dominerar kolinlagringen i skogen [9] och mer och mer kol byggs in under lång tid framöver. I den riktigt gamla skogen blir dock nettoinlagringen av kol allt lägre. Om ett tillstånd av jämvikt (alltså att kolinlagring balanseras av respiration) någonsin infaller är omdebatterat och inte helt fastställ [10]. Studier visar dock att nettoinlagringen gradvis minskar för äldre bestånd. I en gammal skog domineras kolinlagringen av trädens tillväxt jämfört med den av mossa och ris. Respirationen domineras samtidigt av markens respiration jämfört med den från nedbrytning av död ved [9].

Figur 1. Exempel på profilen hos förnan i barrskog. Till vänster ett exempel på ett relativt tunt mossa/förna-skikt (ca 4 cm) med humus under. Till höger ett betydligt tjockare mossa/förna-skikt (ca 8 cm), i detta fall upplyft från humuslagret. Foto: Anders Granström.

1.3 Störningen vid naturvårdsbränder

De flesta naturvårdsbränningar i naturreservat och nationalparker sker i barrdominerade bestånd. Syftet är bland annat att gynna tall och lövinslag över gran, glesa ut bestånd för bättre solinstrålning, skapa brandljud (partiella värmeskador på trädstammen) samt gynna pyrofila växter, svampar och insekter [6].

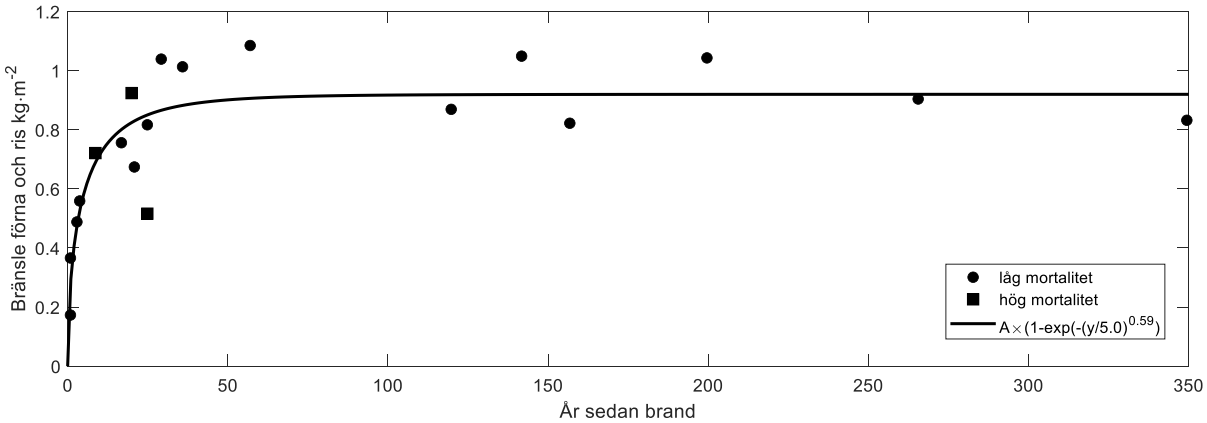
Den typiska branden konsumerar (bränner upp) merparten av risväxternas ovanjordsdelar. Mossa/förna-skiktet konsumeras ner till det djup där fuktkvoten är för hög för att förbränning ska kunna ske. De 28 mätningar av förbränningsdjup som vi har genomfört de senaste åren visar på en reduktion av mossa/förnalagret på i medeltal 54 mm (variation mellan 14 och 92 mm). Ovanpå det kvarvarande obrända organiska materialet återfinns ett i medeltal 9 mm tjockt lager med kol. I de allra flesta fall sker ingen eller enbart marginell konsumtion av humus [11], bland annat på grund av dess relativt höga fuktkvot i de väderlägen när naturvårdsbränningar vanligen genomförs. Konsumtionen av stående och liggande grov död ved är likaså ringa. Mortaliteten bland träden är ofta låg (typiskt under 12 %)**Fel! Bokmärket är inte definierat.** då tallar och större granar ofta överlever medan mindre granar och småtallar dör i branden. En studie från 2019 av

This work is licensed under CC BY 4.0

elva naturvårdsbränder skattade andelen ny död ved efter branden till i medeltal ca 18 m^3/ha [11].

Efter branden finns goda förutsättningar för pionjärarter att snabbt etablera sig. Detta gäller främst örter samt ljuskrävande och snabbt koloniserande trädarter såsom björk. Efter ett 10-tal år är skiktet av risväxter återställt och marken börjar täckas alltmer av skogsmossor och lavar [12]. Den balans mellan kolinlagring och respiration som eventuellt förelåg innan branden har rubbats, och kommer första tiden att domineras av respiration medan kolinlagring småningom tar över allt mer [9].

Schimmel & Granström [12] analyserade återväxten av markvegetationen och bränsleackumuleringen efter brand i en kronosekvens-studie. De första 10 – 20 åren efter brand växte ”bränsleförrådet” i form av mossa/förna och risväxter till sig snabbt, varefter det planade ut och egentligen inte uppvisade någon ökning efter ca 20 år. Finbränslets summerade torrmassa bestående av mossa, lav, smått nedfall från träd och buskar samt alla risväxter kan beskrivas med $0.92 \times [1 - \exp(-(y/5)^{0.59})]$ [kg/m^2], där y är antal år sedan brand (Figur 2).



Figur 2. Torrmassa av finbränsle i förnan samt risväxterna mot antal år sedan brand (summerat från data ur Ref 12). Heldragen linje motsvarar exponentiellt avklingande tillväxt.

This work is licensed under CC BY 4.0

Figur 3. Exempelbilder under och efter bränningen i Lundbosjön (övre) och Kaljoxadalen (nedre). Foto: Kjell Store (c) och Johan Sjöström (a, b, d).

2 Utsläpp av växthusgaser – ett räkneexempel

Vi använder här två exempelbränder genomförda 2022, ett i Kaljoxadalens naturreservat i Örebro län och ett i Lundbosjöns naturreservat i Gävleborgs län, för att räkna på de typiska utsläppen. Båda dessa är talldominerade marker med tjockt lager förna och en hel del risväxter (Figur 3). Massan hos förnalagret får nog anses vara högre än medel och lämpar sig därför för en konservativ beräkning. Innan bränning genomfördes ett stort antal mätningar av ris, förna och humus spritt över området. Torrmassan per ytenhet (destruktiv provtagning), höjden på riset samt djupet på förna och humus bestämdes (Tabell 1). Efter bränning genomfördes därtill ett stort antal mätningar av bränndjup (räknat från mossans ursprungliga övre gräns) och resulterande kolskikt.

This work is licensed under CC BY 4.0

Tabell 1. Mätning av förna, ris och humus vid de två bränningarna.

Före bränning						
	Kaljoxadalen			**Lundbosjön**		
	Torr-massa medel (g/m²)	Variation (g/ m²)	Höjd/djup (cm)	Torr-massa medel (g/m²)	Variation (g/ m²)	Höjd/djup (cm)
Risväxter	137	±80	11 ± 11	13	±10.5	11.5 ± 11
Förna	990	±70	10.3 ± 2.2	720	±224	5.8 ± 5.0
10-h[1]	22	±10		21	±7	
Kottar	5.5	±5		26	±21	
Totalt markbränsle	1 150	±170		780	±263	
Humus			4.5 ± 2.5			7.7 ± 5.0
Efter bränning						
	Kaljoxadalen			**Lundbosjön**		
	Bränn-djup (cm)	Variation (cm)	Kolskikt (mm)	Bränn djup (cm)	Variation (cm)	Kolskikt (mm)
	7.2	3.6	9.5	5.8	5.0	9

[1] Dött bränsle med minsta dimension mellan 1/4 – 1 tum (6.4 – 25 mm).

Bränslets fuktkvot var lägre i bränningen vid Lundbosjön vilken genomfördes vid en relativ luftfuktighet omkring 20 % jämfört med i Kaljoxadalen då luftfuktigheten var över 30 – 40 %. Detta återspeglades i bränndjupet där all förna inte konsumerades (brann upp) vid Kaljoxadalen medan hela lagret av förna konsumerades ner till humusgränsen i Lundbosjön. Ett ca 9 mm tjockt lager av kol återfanns efter bränningen.

2.1 Antaganden

Vi gör följande antaganden för beräkningen:

1. Skogen har stått ostörd länge och före bränningen sker eventuell kolinlagring bara i trädens ved-tillväxt [13].
2. Tillväxt och medföljande kolinlagring i skikten av förna respektive risväxter balanseras helt av frigöring av koldioxid vid nedbrytning av äldre delar av samma lager.
3. Växligheten som konsumeras i bränningen är ett medelvärde av all tillgänglig förna och ris i de två exempelbränderna. Vi tänker alltså att all förna konsumeras vid bränning.
4. Bränderna konsumerar ingen humus [11].

This work is licensed under CC BY 4.0

5. Respiration från lägre jordlager är densamma före och efter branden [9].
6. Tillväxt i levande träd är oförändrad före och efter branden.
7. Förnalagret och risväxterna återväxer efter brand enligt modellen i Figur 2 [12].
8. Vid förbränningen av förna och ris produceras 1.489 kg CO_2 per kg torrt bränsle som konsumeras [14].

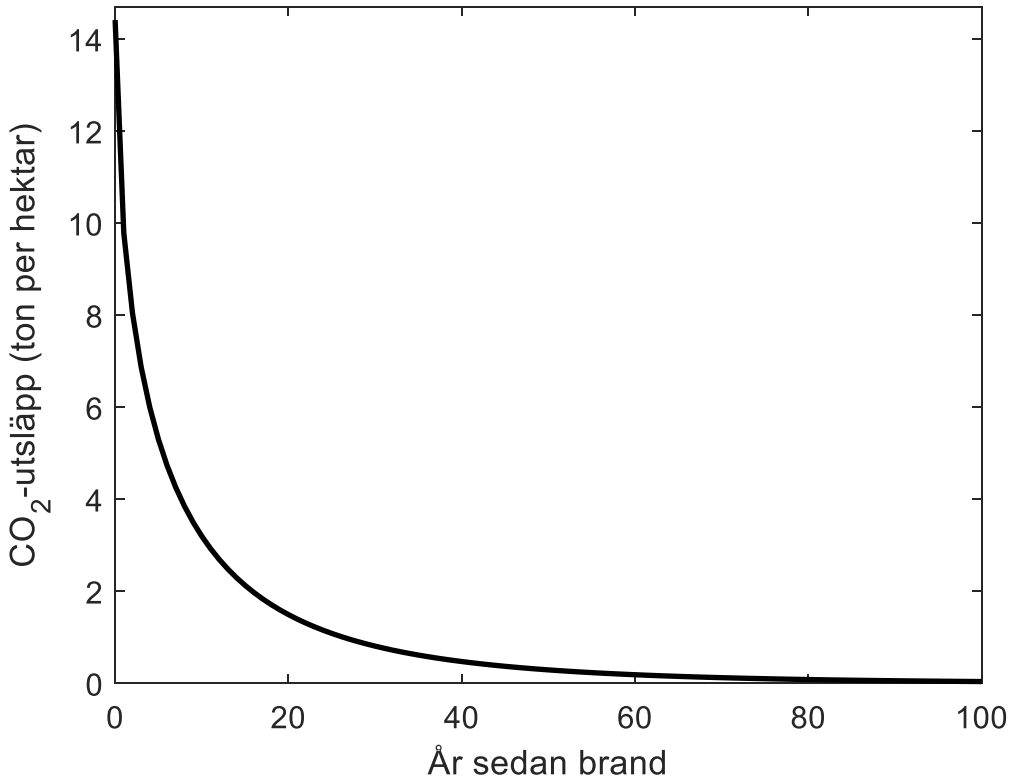
2.2 Resultat

Bidraget till växthusgaserna i atmosfären beräknas som skillnaden mellan atmosfäriskt CO_2 efter branden jämfört med om branden inte hade ägt rum. Denna ”kodioxidskuld” är alltså störst tiden närmast efter branden och minskar därefter. Initialt frigörs ca 14.4 ton CO_2 per bränd hektar men under åren därefter kommer respirationen från nedbrytning av förna minska samtidigt som tillväxten av mossa och ris ökar, vilket leder till nettoupptag av atmosfäriskt kol under åren som följer. Redan efter tio år har ”skulden” minskat med en 78 % och efter 20 år har omkring 90 % åter lagrats in i mark och växtlighet. Över tid beräknas nettotillskottet av atmosfäriskt kol variera enligt nedan (Tabell 2, Figur 4).

Tabell 2. Nettotillskott av atmosfäriskt CO_2 för olika år sedan branden.

År efter branden	**Nettotillskott atmosfäriskt CO_2 (ton/ha)**
0	14.4
1	9.8
10	3.2
20	1.5
50	0.3
100	0.041

This work is licensed under CC BY 4.0



Figur 4. Nettotillskott av atmosfäriskt CO_2 per hektar bränd mark som funktion av tiden efter branden enligt räkneexemplet ovan.

Som jämförelse till dessa siffror kan nämnas att medelsvenskens nettoutsläpp 2021 från privatkonsumtion var 8.44 ton koldioxidekvivalenter per person och år [15, 16].

3 Diskussion

3.1 Felkällor och variation

Det finns naturligtvis stora variationer i utsläppen från naturvårdsbränder. De två exempelbestånden som användes ovan hade rikligt med förna och ligger därmed på övre gränsen av momentana utsläpp. Marker med mer lövinslag karakteriseras av väsentligt lägre konsumtion. Gräsmarker, vilka också ibland bränns i naturvårdssyfte, har bara omkring en tredjedel så mycket förna och denna bryts dessutom ner naturligt på några få år.

I exemplet ovan räknade vi att ingen humus konsumerades, vilket är en regel med många undantag. Fläckvis konsumtion av humus förekommer, ofta i direkt anslutning till trädstammarna. Baserat på kolinnehållet [17] och densiteten hos humus motsvarar en centimeters humus 1.3 kg/m² inlagrad koldioxid, alltså samma storleksordning som övrig konsumerad förna. Humusen regenereras dessutom inte heller lika snabbt som förnan. Å andra sidan är humuskonsumtionen, om den alls förekommer, som sagt enbart fläckvis och i vårt räkneexempel kompenseras detta av antagandet att all förna konsumeras i branden, något som är relativt ovanligt.

This work is licensed under CC BY 4.0

Trädmortaliteten förändrar såklart också kolbalansen. De 18 m^3 ny död ved som i medeltal observerats efter naturvårdsbränning kommer på sikt att brytas ned, men detta är en process över årtionden. Ljus- och rotkonkurrensen är så hård i de flesta bestånd att tillväxtbortfallet för de döda träden inom några år kompenseras av andra individer, antingen stora träd i nära anslutning eller nyetablerande träd i den bildade beståndsluckan. Istället kan branddödade träd ses som ett kollager som bara långsamt kommer att återgå till atmosfären vid nedbrytning. Den stora variationen i hur snabbt en död trädstam bryts ned gör att vi väljer att utesluta dess effekt både som kolbindande och emitterande källa.

Slutligen räknar vi att det kol som bildas vid ofullständig förbränning av organiskt material (charcoal) bryts ner som annat dött material. I realiteten sker nedbrytning av detta kol extremt långsamt och kan under vissa omständigheter bevaras i tusentals år, och då utgöra en långsiktig kolsänka.

3.2 Övriga utsläpp

Vatten och koldioxid utgör den absoluta majoriteten av utsläppen från förbränning med god syretillgång. Av kolatomerna som konsumeras i skogsbränder uppskattas i medeltal 88 % bilda koldioxid, 6 % kolmonoxid (CO), 4 % organiska kolväten och 2 % små partiklar (PM2.5, mindre än 2.5 µm stora) [18]. Av de organiska kolvätena utgörs ungefär en tiondel av metan (CH_4), som ju också är en växthusgas. Effekten av dessa skulle uppskattningsvis kunna bidra med ytterligare 10 % koldioxidekvivalenter än det vi räknat med hittills [18]. Mängden metan som bildas är dock förknippat med höga osäkerheter och andra mätningar vid just kontrollerade bränder visar på ca hälften så höga metanutsläpp [19 -21].

Kolmonoxid, vars utsläpp alltså kan uppskattas till ca 4 % av vikten koldioxid, är inte långlivad och utgör inget direkt bidrag till växthuseffekten. Det är däremot en giftig gas vid inandning eftersom den leder till kraftigt försämrad syreupptagning vilket kan kännas igen från exponering av eldstäder som ryker in.

3.3 Vildbränder

Utsläpp från vildbränder är behäftade med ännu större osäkerhet än de från naturvårdsbränder. En del vildbränder inträffar vid marginell upptorkning och konsumerar då bara det översta skiktet av förnan, vilket alltså resulterar i små momentana utsläpp. Å andra sidan brinner enstaka vildbränder efter långvarig torka, och kan då resultera i stora utsläpp. Naturvårdsbränning genomförs sällan under sådana omständigheter, främst på grund av risken för långvarig glödbrand i humus och torv, med åtföljande problem med rökbeläggning och svår eftersläckning. Bränder efter extremt långvarig torka kan i vissa fall konsumera mellan 5 och 10 cm humus vilket ger upphov till mycket stora utsläpp som inte snabbt reduceras efter några år (tillväxten av humus räknas i hundratals år och inte i tiotals).

This work is licensed under CC BY 4.0

Bränder efter extrem torka kan dessutom äta sig djupt i torvmarker, i synnerhet om den är dikad. Torv räknas som fossilt kol och ger därmed ett permanent tillskott till kolet som existerar i kretsloppet. För varje centimeter torv som brinner uppskattar vi att mellan 9 och 18 ton ”fossilt” CO_2 per hektar frigörs till atmosfären. En effektiv eftersläckning av vildbränder i exempelvis mossar kan alltså kompensera för all planerad naturvårdsbränning i naturreservat.

4 Finansiering

Denna rapport har uppstått efter diskussion inom projektet *Life2Taiga* som finansieras av EU:s LIFE-program. Finansieringen för att skriva rapporten kommer från projektet *Klimatanpassning för framtidens vegetationsbränder*, vilket finansieras av Myndigheten för Samhällsskydd och beredskap (MSB).

5 Referenser

[1] Niklasson, M., & Granström, A. (2000). Numbers and sizes of fires: long-term spatially explicit fire history in a Swedish boreal landscape. Ecology, 81(6), 1484-1499.

[2] Niklasson, M., & Drakenberg, B. (2001). A 600-year tree-ring fire history from Norra Kvills National Park, southern Sweden: implications for conservation strategies in the hemiboreal zone. Biological conservation, 101(1), 63-71.

[3] Nilsson, M. (2005). Naturvårdsbränning. Vägledning för brand och bränning i skyddad skog. Naturvårdsverket. Rapport 5438.

[4] https://se.fsc.org/se-sv (besökt 2024-05-08).

[5] Life2Taiga, Länstyrelsen Västmanland, https://www.lansstyrelsen.se/vastmanland/natur-och-landsbygd/skyddad-natur/skotsel-av-skyddad-natur/naturvardsbranning/life2taiga.html (besökt 2024-05-10).

[6] Granström, A. (2001). Fire management for biodiversity in the European boreal forest. Scandinavian journal of forest research, 16(S3), 62-69.

[7] Berg, B., Johansson, M. B., & Nilsson, Å. (2005). Kolfastläggning i Svensk skogsmarkshumus-direkt mätta värden. Fakta Skog, (8).

[8] Olsson, M. T., Erlandsson, M., Lundin, L., Nilsson, T., Nilsson, Å., & Stendahl, J. (2009). Organic carbon stocks in Swedish Podzol soils in relation to soil hydrology and other site characteristics. Silva Fennica, 43(2), 209-222.

[9] Peichl, M., Martínez-García, E., Fransson, J. E., Wallerman, J., Laudon, H., Lundmark, T., & Nilsson, M. B. (2023). Landscape-variability of the carbon balance across managed boreal forests. Global Change Biology, 29(4), 1119-1132.

[10] Akselsson, C., Berg, B., Meentemeyer, V., & Westling, O. (2005). Carbon sequestration rates in organic layers of boreal and temperate forest soils—Sweden as a case study. Global Ecology and Biogeography, 14(1), 77-84.

This work is licensed under CC BY 4.0

[11] Hermanson, V. C. (2020). Prescribed Burning in Sweden – An Evaluation of Structural Outcomes from Restoration Oriented Prescribed Burns. Examensarbete, Sveriges lantbruksuniversitet. https://stud.epsilon.slu.se/15755/1/hermanson_v_200630.pdf (besökt 2023-05-08)

[12] Schimmel, J., & Granström, A. (1997). Fuel succession and fire behavior in the Swedish boreal forest. Canadian Journal of Forest Research, 27(8), 1207-1216.

[13] Stokland, J. N. (2021). Volume increment and carbon dynamics in boreal forest when extending the rotation length towards biologically old stands. Forest Ecology and Management, 488, 119017.

[14] Turquety, S., Menut, L., Bessagnet, B., Anav, A., Viovy, N., Maignan, F., & Wooster, M. (2014). APIFLAME v1. 0: high-resolution fire emission model and application to the Euro-Mediterranean region. Geoscientific Model Development, 7(2), 587-612.

[15] Naturvårdsverket, https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/konsumtion/vaxthusgaser-konsumtionsbaserade-utslapp-per-person/ (besökt 2023-05-08)

[16] Naturvårdsverket, https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/luft-och-klimat/berakna-klimatpaverkan/ (besökt 2023-05-08)

[17] Berg, B., Johansson, M. B., Nilsson, Å., Gundersen, P., & Norell, L. (2009). Sequestration of carbon in the humus layer of Swedish forests—direct measurements. Canadian Journal of Forest Research, 39(5), 962-975.

[18] Urbanski, S. (2014). Wildland fire emissions, carbon, and climate: Emission factors. Forest Ecology and Management, 317, 51-60.

[19] Simpson, I. J. *et al.* (2011). Boreal forest fire emissions in fresh Canadian smoke plumes: C 1-C 10 volatile organic compounds (VOCs), CO 2, CO, NO 2, NO, HCN and CH 3 CN. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(13), 6445-6463.

[20] Goode, J., Yokelson, R., Ward, D., Susott, R., Babbitt, R., Davies, M., Hao, W., (2000). Measurements of excess O-3, CO2, CO, CH4, C2H4, C2H2, HCN, NO, NH3, HCOOH, CH3COOH, HCHO, and CH3OH in 1997 Alaskan biomass burning plumes by airborne fourier transform infrared spectroscopy. Journal Geophysical Research - Atmospheres. 105, 22147–22166.

[21] Nance, J. D., Hobbs, P. V., Radke, L. F., & Ward, D. E. (1993). Airborne measurements of gases and particles from an Alaskan wildfire. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 98(D8), 14873-14882.

This work is licensed under CC BY 4.0

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.

RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Brandforskning
RISE Rapport 2024:39
ISBN: 978-91-89896-97-0

This work is licensed under CC BY 4.0