



Ökad kollagring i boreal skog

Kan blädningsbrukad skog lagra mer kol än trakthyggesbrukad skog?

Jon Hallgren

Jon Hallgren

Examensarbete i biologi 15 hp

Avseende kandidatexamen

Rapporten godkänd: XX månad 2013

Handledare: Micael Jonsson

Abstract

This study was conducted to test the hypotheses that a forest managed by selective cutting can store more carbon than a forest managed by clearcutting. The study was carried out as a meta-analysis. The data that was found was analyzed by performing t-tests on the proportional effect that the two silvicultural methods had on the driving factors of CO₂-efflux and carbon stores in coniferous boreal forest. In all areas tested, an effect in favor of selective cutting was found, but not all of them significant however. The soil respiration following selective cutting was significantly lower than that of clearcutting, and the primary production of a clearcut area cannot according to reason exceed that of an area post-selective cutting. The result indicates that selective cutting increases boreal forest carbon storage in comparison to clearcutting. Hence, an increased use of selective cutting in boreal forests could help to mitigate climate change by reducing the CO₂ content of the atmosphere.

Key words: Boreal forest, carbon stores, CO₂-efflux, silvicultural methods



Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap (EMG)
901 87 Umeå, Sweden
Telefon 090-786 50 00
Texttelefon 090-786 59 00
www.umu.se

Innehållsförteckning

1 Inledning och bakgrund	1
1.1 Faktorer som påverkar C lagring.....	2
1.1.1 Tillförsel av organiskt material	2
1.1.2 Stabilisering av kol i mark	2
1.1.3 Markrespiration.....	2
1.1.4 C-balansen i brukade skogar	2
1.2 Trakthyggesbruk	3
1.2.1 Solinstrålning.....	3
1.2.2 Markfuktighet.....	4
1.2.3 Markrespiration	4
1.2.4 Markberedning.....	4
1.3 Blädning	5
1.3.1 Solinstrålning.....	5
1.3.2 Fuktförhållande.....	5
1.3.3 Markrespirationen	6
1.3.4 Jämförelser med kalavverkning	6
1.4 Syfte	6
2 Metod och material	6
2.1 Metod	6
2.1.1 Tillvägagångssätt.....	7
2.1.2 Antaganden.....	7
2.4 Material.....	7
3 Resultat	8
3.1 Markrespirationen	8
3.2 C-balansen	10
4 Diskussion	11
4.1 Markrespiration	11
4.1.1 Trakthyggesbruk.....	11
4.1.2 Blädningsbruk kontra trakthyggesbruk.....	12
4.1.3 Markberedning.....	13
4.2 C-balansen	13
4.2.1 Trakthyggesbruk	13

4.2.2 C ovan mark.....	13
4.3 Slutsatser	13
5 Referenser	14

1 Inledning och bakgrund

Klimatförändringar är ett växande problem idag, med potentiellt stora konsekvenser för människor jorden runt. En av de viktigaste faktorerna vad gäller klimatförändringar är den höga koldioxidhalten (CO_2) i atmosfären. Den höga CO_2 halten beror i huvudsak på mänskliga aktiviteter, och då speciellt förbränning av fossila bränslen men även annat som t.ex. förändrad markanvändning leder till ökad atmosfäriska halter av ämnen som kan påskynda förändringar av det globala klimatet (D'Amato m.fl. 2001).

Ett sätt att begränsa klimatförändringarna är att binda mer kol (C) i skog och därmed minska CO_2 i atmosfären. Träden tar upp CO_2 genom fotosyntes och binder det som C i biomassa. En del av det C som binds i träden kommer att hamna på och i marken genom förnafall (växtdelar som fallit till marken, t.ex. barr) och rhizodeposition (rotexudat: rotvätska). Det C, eller delar av det C som deponerats på och i marken kommer över tid att brytas ned av markorganismer och genom deras respiration (heterotrof markrespiration) återgå till atmosfären som CO_2 . Det C som inte bryts ned fullständigt, eller C som tar lång tid att brytas ned, binds i marken och utgör därmed ett relativt stabilt C-lager. Utbytet av CO_2 mellan skogar och atmosfären är i storleksordningen cirka 50 gigaton (1 biljon ton) årligen, vilket är mångfalt mer än vad mänskligheten totalt släpper ut (Rustad m.fl. 2000, Jandl m.fl. 2006). Av det C som finns bundet i skog utgör andelen C i levande biomassa en relativt liten del medan huvuddelen återfinns i marken (Kasischke och Stocks 2000, Stockmann m.fl. 2012). Stockmann m.fl. (2012) fann att förhållandet i C-lagring mellan stående biomassa och i de översta 3 meterna av marken var ungefär 1/5 i ett globalt perspektiv, med ≈ 560 gigaton C i stående biomassa och 2344 gigaton C i marken. Detta innebär att typen av skogsbruk som bedrivs får en central roll i sammanhanget, då påverkan på markens kolförråd varierar mellan olika skogsbruksmetoder (Jandl m.fl. 2006). De två skogsbruksmetoder som behandlas i denna studie; trakthyggesbruk (kalhyggesbruk) och blädning (stamvis blädning; återkommande gallringar) skiljer sig kraftigt åt i den påverkan de har på marken. Trakthyggesbruk anses leda till snabbare upptag av C i den stående biomassan, även om detta är omtvistat, men fokus för denna studie är inte att undersöka vilken metod som ökar CO_2 -upptaget, utan att se om någon av de två metoderna minskar C-förlusten från mark och förna då den huvudsakliga delen av C lagras där (Stockmann m.fl. 2012, Jandl m.fl. 2006).

Boreal skog är ett cirkumpolärt skogsbälte som sträcker sig mellan ungefär 45:e och 70:e breddgraden. Boreal skog upptar ca 14-15 miljoner km^2 vilket motsvarar nästan 40 % av jordens skogar, och gör det till ett av världens största biom (Carter och Scholes 2000, Kasischke och Stocks 2000, Giasson m.fl. 2005). I boreala skogar finns också världens största terrestra kolförråd (Tabell 1). Av detta kan man förstå att en eventuell ökning av kollagringen i boreala skogar skulle kunna ge en förhållandevis tydlig minskning på CO_2 -halten i atmosfären. Av samma anledning skulle därför skogsbruksmetoder som leder till förlust av C som är lagrat i marken orsaka en ökning av CO_2 -halten i atmosfären, eller åtminstone motverka ett ökat upptag.

Tabell 1. Global C-lagring i mark i olika skogsbiom

Studie	C-lager i Gt (gigaton)= 1 biljon ton		
	Boreal	Tropisk	Tempererad
Kasischke och Stocks (2000).	625	216	100
Jobbágy och Jackson (2000).	150	692	262
Carter och Scholes (2000).	338	213	153
WBGU (1988).	471	216	100
Medeltal	396	334,25	153,75

1.1 Faktorer som påverkar C-lagring

1.1.1 Tillförsel av organiskt material

Marken tillförs C genom förnafall och rhizodeposition men allt C som tillförs stabiliseras (binds) inte i marken (Sollins m.fl. 1996, Jandl m.fl. 2006). Förna som har deponerats på marken kommer successivt att sönderdelas av mikrober och detritivorer och en stor del av C-innehållet kommer i denna process relativt snabbt att återges till atmosfären som CO₂. En del av förnan kommer dock inte att fullständigt brytas ned utan kommer i mer eller mindre sönderdelad form att inkorporeras i marken/jordens översta lager, humuslagret, och där vara mera skyddat från nedbrytning (Sollins m.fl. 1996, Jandl m.fl. 2006). Om C-lagret på marken skyddas från fullständig nedbrytning genom begränsande temperatur-, fukt- och syreförhållanden kommer delar av det att successivt att övergå till humus (Sollins m.fl. 1996). Barrträd som dominerar i boreala skogar deponerar generellt mindre C genom rötterna via rhizodeposition än vad lövträd gör, men desto mer på marken genom förnafall. Eftersom nedbrytningen av förna från barrträd dessutom är generellt långsammare än nedbrytningen av förna från lövträd, är C-lagret på marken i barrskog ofta större än i bestånd av lövträd (Vesterdal och Raulund-Rasmussen 1998, Hobbie m.fl. 2000).

1.1.2 Stabilisering av kol i mark

Organiskt material/C som lagras i mark varierar i hur kraftigt bundet det är till marken och, kan något generaliserande, delas upp i stabila och labila (instabila) C-lager. Generellt kan sägas att det organiska skiktet i jordprofilen, humuslagret, innehåller labilt C medan den djupare liggande mineraljorden innehåller stabilt lagrat C (Sollins m.fl. 1996, Jandl m.fl. 2006). Långt ifrån allt C som härstammar från vegetation kommer att lagras i mineraljorden. Det är snarare enbart en liten del som blir stabilt lagrat i mineraljorden, men den del av det organiska materialet som binds starkt till lermineraler och oxider blir i mineraljorden väl skyddat från nedbrytning. När C är bundet i mineraljorden så tål det att utsättas för förhållandevis kraftiga förändringar som kan komma till följd av skogsbruk (Giardina och Ryan 2000, Jandl m.fl. 2006). Humuslagret däremot är relativt känsligt mot förändringar som kan komma av skogsbruk, såsom förändrade temperatur- och fuktförhållande (Sollins m.fl. 1996). Cirka 25 % av det totala C-lagret återfinns utanför mineraljorden och är sålunda instabilt lagrat (Jandl m.fl. 2006).

1.1.3 Markrespiration

Markrespirationen eller markandning återför C till atmosfären i form av CO₂ och för att öka C-lagren i skog är det intressant att minska/minimera markrespirationen, eller åtminstone att inte öka markrespirationen (Bond-Lamberty m.fl. 2004). Markrespirationen utgörs av två olika delar, autotrof och heterotrof markrespiration. Den autotrofa markrespirationen som är trädrötternas respiration styrs helt av trädens produktivitet, och är således låg utanför växtsäsongen och hög under växtsäsongen. Den heterotrofa markrespirationen (markorganismers respiration) ökar vid förbättrade förhållanden för mikrobiologisk aktivitet, det vill säga rätt temperatur-, fukt- och syreförhållande. Faktorer som motverkar/minskar markrespiration påverkar C-ackumuleringen positivt. Både låga och höga temperaturer samt låg och hög markfuktighet motverkar/minskar markrespiration (Sollins m.fl. 1996, Örländer m.fl. 1996, Hobbie m.fl. 2000, Rustad m.fl. 2000, Hashimoto och Suzuki 2003).

Förhållandena för nedbrytning av organiskt material i boreala skogar är ur ett C-lagringsperspektiv fördelaktiga eftersom det boreala klimatet är förhållandevis kallt och fuktigt, vilket leder till att nedbrytningen går relativt långsamt. I boreala skogar ökar nedbrytningshastigheten från ungefär -5 °C till 25 °C och når optimala fuktförhållanden vid cirka 400 % av torrvikten (Hobbie m.fl. 2000).

1.1.4 C-balansen i brukade skogar

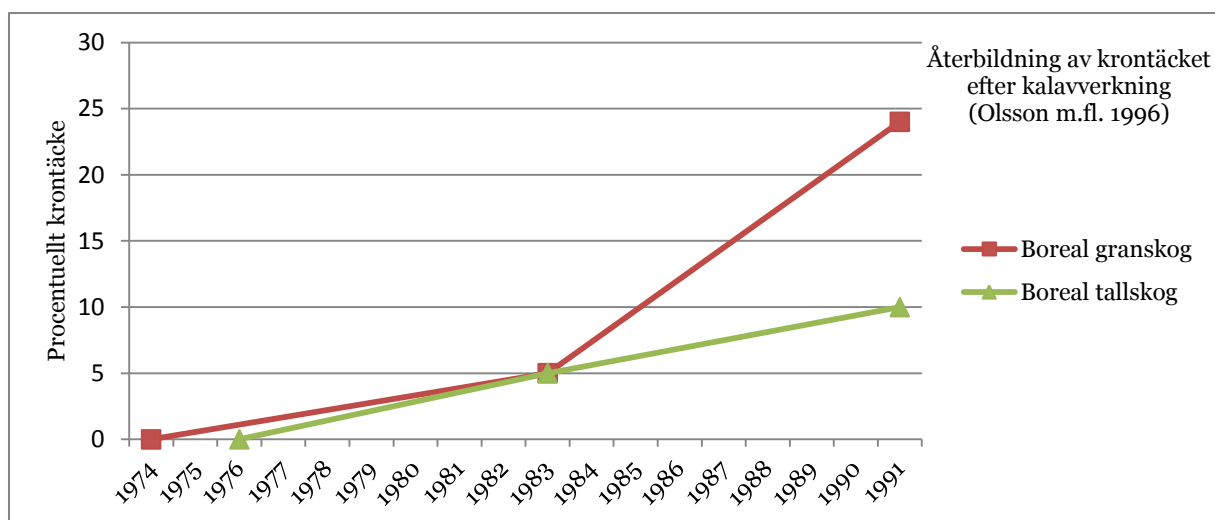
Att kalavverka ett borealt skogsbestånd leder till en minskning av det befintliga C-lagret, inte bara genom att träden skördas utan även på grund av förändrade markförhållanden (temperatur och fuktighet). Området som kalavverkats kommer generellt att utgöra en C-källa (avger mer C än vad som lagras) under en period tills det nyplanterade beståndet kommit att balansera C-utbytet med sin primärproduktion (Olsson m.fl. 1995, Striegl och Wickland 1998, Pypker och Fredeen 2002, Lindroth m.fl. 2009, Payeur-Poirier m.fl. 2011). Anledningen till att kalavverkning leder till en C-förlust kan antingen vara att markrespiration antingen stimuleras, eller att markrespirationen minskar men att upptaget av C genom fotosyntes minskar ännu mer (Jandl m.fl. 2006). Hur avverkning påverkar C-lagret i marken är omdiskuterat och forskningsresultaten varierar relativt mycket. Viss forskning visar på endast svaga C-förluster som avtar och inte ger någon långsiktig effekt (Johnson och Curtis 2001, Jandl m.fl. 2006) medan annan forskning pekar på just långvariga effekter och stora C-förluster (Olsson m.fl. 1995, Jandl m.fl. 2006, Lindroth m.fl. 2009, Payeur-Poirier m.fl. 2011). Till exempel, Kowalski m.fl. (2004) fann att en kalavverkning av ett äldre trädbestånd som fungerade som en C-sänka gjorde att inlagringen av C upphörde och att området istället kom att utgöra en C-källa av liknande storlek som tidigare istället lagrats medan Johnson och Curtis (2001) inte fann någon tydlig effekt av avverkning på C-lagret.

1.2 Trakthyggesbruk

1.2.1 Solinstrålning

Kalhyggen påverkar marktemperaturen genom ökad solinstrålning, vilket i sin tur påverkar C-lagret. Instabilt lagrat C bryts ned relativt fort vid rätt temperatur, vilket i fallet med boreala skogar är ökande temperatur (Hobbie m.fl. 2000). Stabilt lagrat C är däremot inte särskilt känsligt för förändrad temperatur (Sollins m.fl. 1996, Hashimoto och Suzuki 2003, Jandl m.fl. 2006). Temperaturkänsligheten hos organiskt material varierar avsevärt, beroende på var i marken det är lagrat, då organsikt material bundet i mineraljorden tenderar att endast mycket svagt, eller inte alls påverkas av temperaturförändringar, även kraftiga sådana (Giardina och Ryan 2000, Hobbie m.fl. 2000).

De generellt fördelaktiga temperatur- och fuktförhållandena i boreal skog (d.v.s. låg temperatur och hög fuktighet) förändras kraftigt vid en kalavverkning. Vid en kalavverkning försvinner krontaket som fungerat som ett skydd mot solinstrålningen, och därmed skapas gynnsammare förhållanden för nedbrytningen genom högre temperaturer (Hashimoto och Suzuki 2004, Lindroth m.fl. 2009). Under varma perioder av året stiger maximumtemperaturen medan minimitemperaturen endast stimuleras mycket svagt. Samtidigt som temperaturen ökar verkar kalhuggning göra att marktemperaturen kvarhålls sämre i marken, alltså en snabbare värmeförlust över dygnet (Hashimoto och Suzuki 2004). Detta förhållande med minskat krontak och någon grad av förhöjd solinstrålning leder till högre temperaturer och kan vara under relativt långa tidsperioder (Figur 1).



Figur 1. Återbildning av krontäck i boreal gran- och tallskog efter kalavverkningar utförda 1974 och 1976 (Olsson m.fl. 1996)

1.2.2 Markfuktighet

Vattenbalansen kan uttryckas som "Nederbörd:

evapotranspiration+avrinning+magasinering" (Wilson m.fl. 2000). Träd/skog utgör en essentiell del av vattenbalansen då de både transpirerar och fångar upp vatten som avdunstar utan att nå markytan. Om antal träd på en yta minskas så förändras följaktligen vattenbalansen. Kalavverkning leder därför ofta till en höjd grundvattennivå på grund av två faktorer: 1) mer nederbörd når marken och 2) upptaget från marken och åtföljande avgivning av vattenånga minskas radikalt (Adams m.fl. 1991, Rusanen m.fl. 2004, Smerdon m.fl. 2009). Förändringen i vattenbalansen till följd av kalavverkning ger generellt en högre markfuktighet (Smerdon m.fl. 2009). En högre markfuktighet kommer också naturligtvis, utan fördröjning, genom att en ökad mängd nederbörd når marken och blöter jordmaterialet innan det perkolerar (vattnets fortsatta rörelse mot grundvattnet (efter infiltration). Det finns dock scenarion där ökad markfuktighet inte skulle uppstå till följd av en kalavverkning, då grundvattennivåhöjningen är betingad av jordmaterialets kornstorlek och sortering. Om jordmaterialet utgörs av grovt material såsom sand eller grus, och allra helst om det är sorterat, är ofta en höjning av grundvattennivån till följd av kalavverkning mycket liten eller så uteblir höjningen helt (Rusanen m.fl. 2004).

1.2.3 Markrespiration

Markrespirationen styrs av temperatur och fuktförhållanden. Som redan beskrivits så stiger temperaturen oftast efter kalhuggning, och ger ett fördelaktigare förhållande för nedbrytning. Temperaturhöjningens effekt på markrespirationen är dock beroende av de ursprungliga fuktförhållandena i området (Smerdon m.fl. 2009). Hur markrespirationen påverkas av kalhuggning är även beroende av flera andra faktorer: skyddsdikning, mängd kvarvarande grot (grenar och toppar) och förnaffall ifrån avverkningen (Jandl m.fl. 2006).

Markrespirationen kan alltså antingen öka eller minska beroende på ursprungliga fuktförhållanden och andra miljöfaktorer, men generellt har vuxna boreala skogar en relativt hög markfuktighet som påverkar markrespirationen negativt, varför en ökad markfuktighet tenderar att påverka markrespirationen negativt (Hobbie m.fl. 2000). Trots en ökad kollagring i marken, är en ökad grundvattennivå ur en skogsekonomisk synvinkel inte positivt, då detta försvårar föryngring och kan ge ökad mortalitet i omkringliggande skogsbestånd som också drabbas av höjningen (Adams m.fl. 1991, Smerdon m.fl. 2009). Detta leder till att skyddsdikning generellt appliceras till områden som potentiellt kan få en grundvattennivåhöjning som följd av kalavverkning. Följden av detta blir en lägre markfuktighet än innan kalavverkning (Marcotte m.fl. 2008), vilket följaktligen skulle påverka markrespirationen positivt och kollagringen negativt.

1.2.4 Markberedning

Markberedning används för öka produktiviteten/tillväxten hos den skog som skall planteras på ett kalhygge genom att förbättra jordens ”luftning, dränering, temperatur, samt förbättra näringstillgången” (Örlander m.fl. 1996). Markberedning ger generellt ökad produktivitet i förhållande till ett icke markberett kalhygge (Jandl m.fl. 2006). Till exempel så fann Örlander (1996) att produktiviteten ökade över en 70års period och att en minskning i produktivitet till följd av markberedning i ett ännu längre perspektiv inte är troligt.

Markberedning efter kalavverkning leder till C-förlust (Johansson 1994, Örlander m.fl. 1996, Mallik och Hu 1997, Pumpanen m.fl. 2004, Giasson m.fl. 2005, Jandl m.fl. 2006), och ju kraftigare markberedning ju mer ökar C-förlusten (Örlander m.fl. 1996, Mallik och Hu 1997, Giasson m.fl. 2005, Jandl m.fl. 2006, Strömgren och Mjöfors 2012). Förhållandena på ett kalavverkat område respektive ett markberett område är olika, varvid organiskt material ges olika förutsättningar för nedbrytning. (Jandl m.fl. 2006). Exempelvis så fann Johansson (1994) att barr bryts ned snabbare på markberedda områden än på enbart kalhuggna områden.

Temperaturen på ett ej markberett kalhygge kan ofta överstiga vad som är optimalt för nedbrytning. Detta kombinerat med torra förhållanden som kan uppstå vid skyddsdikning gör att förhållanden för nedbrytning ofta är bättre på ett markberett område (Örlander m.fl. 1996). Det är kuperingen av jordytan som sker vid markberedning som skapar ett fördelaktigt mikroklimat i förhållande till ett icke markberett kalhygge, vilket således stimulerar nedbrytning ytterligare (Johansson 1994, Örlander 1996). Dessutom då humus och organiskt material blandas med mineraljorden får jorden en högre kapacitet att kvarhålla fukt, vilket i de flesta fall stimulerar markrespirationen positivt (Örlander 1996). Ökningen av C-förlusten till följd av markberedning beror därför i huvudsak på: förbättrade förhållanden för nedbrytning, men även på minskad primärproduktion till följd av förstörelse av levande vegetation (Johansson 1994, Giasson m.fl. 2005).

1.3 Blädning

1.3.1 Solinstrålning

Blädning förändrar temperaturförhållandet på samma sätt som kalavverkning, genom ökad solinstrålning. Förändringen är dock av mindre omfattning då endast mindre luckor i krontaket uppstår istället för att krontaket helt avlägsnas (Jandl m.fl. 2006, Taylor m.fl. 2008). Temperaturen kommer således att öka till följd av ökad solinstrålning, vilket som tidigare beskrivit generellt ger en högre medeltemperatur (ett högre temperaturmaximum med ungefärligen bibehållet temperaturminimum) (Hashimoto och Suzuki 2004, Lindroth m.fl. 2009) Detta till trots, eftersom blädningsbruk inte skapar lika stora förändringar i lokalklimat som trakthyggesbruk, då krontaket behålls mer intakt, är det organiska materialet som ansamlats på marken mer skyddat från nedbrytning och således stabilare som C-lager (Jandl m.fl. 2006, Taylor m.fl. 2008, Harmon m.fl. 2009).

Luckorna som skapas i krontaket vid blädning ger dock inte bara ökade temperaturer, vilket kan leda till ökad nedbrytning. Den ökade solinstrålningen och den högre temperaturen stimulerar växligheten i markskiktet som till viss del kan kompensera för C-förlust till följd av ökad nedbrytning och den uteblivna kollagringen av de skördade träden (Jandl m.fl. 2006, Davis m.fl. 2009, Pang m.fl. 2012).

1.3.2 Fuktförhållande

Fuktmängden i marken ökar generellt till följd av blädning (Olajuyigbe m.fl. 2012, Pang m.fl. 2012). Fuktförhållandet i marken förändras på samma sätt som vid en kalavverkning, om än i mindre utsträckning, genom minskad evapotranspiration och interception (Pang m.fl. 2012). Även vad gäller jordmaterialets roll så gäller samma regler vid blädning som vid kalhuggning

(Rusanen m.fl. 2004). Sammanfattningsvis så är alltså effekten av blädning samma som den av kalavverkning, dock av en mindre magnitud då en mindre andel av träden avverkas.

1.3.3 Markrespirationen

Den heterotrofa markrespirationen kommer till följd av blädning att öka då förhållandena för nedbrytning generellt förbättras (Olajuyigbe m.fl. 2012, Pang m.fl. 2012). Den autotrofa markrespirationen kommer i däremot att minska som följd av en minskning av den levande vegetationen (Pang m.fl. 2012). Resultat av en blädning kan bli antingen en ökning eller en minskning av ekosystemsrespirationen beroende på hur mycket den heterotrofa markrespirationen ökar i förhållande till hur mycket den autotrofa markrespirationen minskar (Jandl m.fl. 2006, Davis m.fl. 2009, Pang m.fl. 2012)

Markfuktighetens inverkan på markrespirationen är på samma sätt som vid kalavverkning beroende på lokala förhållanden. Till exempel så fann Olajuyigbe m.fl. (2012) att ökande markfuktighet efter blädning hade en negativ effekt på markrespirationen i naturligt fuktigt terräng, medan Pang m.fl. (2012) fann det motsatta vid blädning i naturligt torr terräng.

1.3.4 Jämförelser med kalavverkning

Blädning har inte samma effekt på C-lagret som kalavverkning då den minskade kolinlagringen i trädbeståndet till viss del kompenseras av ökad produktion i markskiktet (Davis m.fl. 2009), och att ”ökningen av den heterotrofa markrespirationen balanserades av en minskning av den autotrofa markrespirationen i samma storlek” (Jandl m.fl. 2006). C-lagret på marken tenderar att minska vid ökande blädningsintensitet till följd av minskat förnafall. Minskningen kan dock kompenseras av förnafall som uppstår vid själva blädningsprocessen (Jandl m.fl. 2006). Taylor m.fl. (2008) och Harmon m.fl. (2009) fann att blädning i ett längre perspektiv lagrade mer kol än kalhyggesbruk. Båda studierna kom fram till att det huvudsakliga skälet till detta var att det kvarvarande beståndet, om än gallrat, fortgående tillförde förna till marken samtidigt som nedbrytningen av organiskt material var begränsad av det kvarvarande krontäcket som höll ned solinstrålningen. Vidare så höll även det kvarvarande beståndet markfuktigheten på mer normala nivåer (Taylor m.fl. 2008, Harmon m.fl. 2009). Blädning har alltså en negativ effekt på C-lagret, men effekten är dock inte lika kraftig som den vid kalavverkning.

1.4 Syfte

Syftet med denna studie är att testa hypotesen att den totala inlagringen av C i boreal skog kan öka med blädningsbruk jämfört med det i Sverige nära totalt rådande trakthyggesbruket/kalhyggesbruket. Med trakthyggesbruk avses här den traditionella formen med en konstant enkelskiktad skog, markberedning och manuell nyplantering, och med blädningsbruk avses här *stamvis blädning*.

Då den absoluta merparten av det C som lagras i boreala skogar, lagras i marken och inte i stående biomassa så fokuserar denna studie i huvudsak på C-lagringen i mark.

2 Metod och material

2.1 Metod

Denna studie utförs som en meta-analys, en undersökning och sammanställning av studier med syfte att kunna urskilja ett mönster. Mönstret i detta fall: om forskningen stödjer hypotesen att mer C kan lagras i blädningsbrukad skog än i trakthyggesbrukad skog.

Litteratursökningen till denna studie skedde med hjälp av databasen EBSCOhost (sökning efter internationella artiklar via Umeå universitetsbibliotek). Vid referenser till intressanta artiklar i material funnet via EBSCO så har sökandet i vissa fall expanderat utanför EBSCO i den mån det har krävts för att finna aktuella artiklar.

Sökord som användes i olika kombinationer var: boreal, boreal forest, thinning, forest thinning, scarification, site preparation, soil CO₂ flux, soil CO₂ efflux, CO₂ flux, CO₂ efflux, soil respiration, selective cutting, selection cutting, selective harvest, partial harvest, continuous cover forestry, clearcutting, clearcut, gross primary production (GPP), net primary production (NPP), gross ecosystem production (GEP), net ecosystem production (NEP), (C)arbon sequestering, (C)arbon stabilization och soil (C)arbon pool.

2.1.1 Tillvägagångssätt

Det första steget i denna studie var att klarlägga hur trakthyggesbruk och blädningsbruk skiljer sig åt med avseende på de faktorer som styr kollagringen i skog.

- Tillförsel av C
- Stabilisering av C
- Förlust av C

Dessa faktorer applicerades på de förhållanden som gäller rent generellt i boreal skog, samt de förhållanden som gäller i trakthyggesbrukad skog och blädningsbrukad skog. Artdiversitet och artkomposition spelar en viktig roll vad gäller C-lagring och några studier har gjorts på området. Men då blädningsbruk förutsätter skuggfördragande arter, vilket för boreala skogar endast innebär gran så kommer artdiversitet och artkompositionens påverkan inte att betraktas i någon vidare utsträckning i denna studie.

Nästa steg i studien var att söka den faktiska informationen som skulle analyseras. Studier kring trakthyggesbruk i boreala skogar och dess inverkan på skogens C-lager finns det ett flertal av. Vad gäller blädningsbruk i boreala skogar och dess inverkan på skogens C-lager så är tillgången på forskning avsevärt mer begränsad. För att kunna samla tillräckligt med material så användes i denna studie tre steg av undantag från att använda material ifrån studier utförda i boreal barrskog; 1) barrskog men ej borealt klimat 2) ej barrskog men borealt klimat och 3) ej barrskog och ej borealt klimat. Exempel på detta: Finns inte den eftersökta informationen i studier utförda i boreal barrskog går sökandet vidare till studier utförda i barrskog utanför den boreala klimatzonen, sedan till studier utförda i boreal bland- eller lövskog, och sedan till studier utförda i bland- eller lövskog utanför den boreala klimatzonen.

De data som litteratursökningen producerade samlades och analyserades sedan för att testa hypotesen. Detta skedde genom att jämföra C-förlusten samt C-balansen före och efter ett ingrepp för att se påverkan. Analysen av dessa data skedde genom att producera medelvärden och genomföra t-test samt vid ett tillfälle att skapa en kurvlinjär prognostrendlinje med R² värde. Eftersom antagandet var att kollagringen är högre efter blädning än vid kalavverkning användes ett ensidigt t-test. Vid t-testen användes därför en säkerhetsgrad på 90%; alfa: 0,1.

2.1.2 Antaganden

- Denna studie antar att blädningsbruk producerar en likvärdig mängd biomassa som trakthyggesbruk.
- På grund av att forskning på blädningsbrukets inverkan på skogens C-lager och speciellt i borealt klimat är ringa, så antar den här studien att blädning och gallring i boreal barrskog har samma effekt på skogens C-lager.
- Denna studie antar att den huvudsakliga förlusten av C från marken via markrespiration härstammar ifrån humuslagret.

2.2 Material

Denna studie har nyttjat en stor vidd av olika vetenskapliga artiklar, i huvudsak rörande skogsbruk men även andra ämnesspecifika studier vars resultat kan appliceras här. Då

studien behandlar skogsbruksmetoder i borealt klimat så har studier som utförts i borealt klimat använts i största möjliga utsträckning. Att uteslutande använda sig av forskning utförd i borealt klimat har dock inte varit möjligt då denna studie inte funnit tillräckligt med forskning på blädning/gallring och dess effekter på C-lagring utförda i borealt klimat. Då blädningsbruk och den absoluta majoriteten av trakthyggesbruk i boreala områden nyttjar barrträd så är även det en begränsande faktor vad gäller tidigare forskning. Forskningen i ämnet är tämligen begränsad och studier utförda i andra klimat och något fall även i lövskog eller blandskog har använts i den här studien. Då forskning som inte utförts i/på boreal barrskog har använts i resultaten så kommer det att markeras.

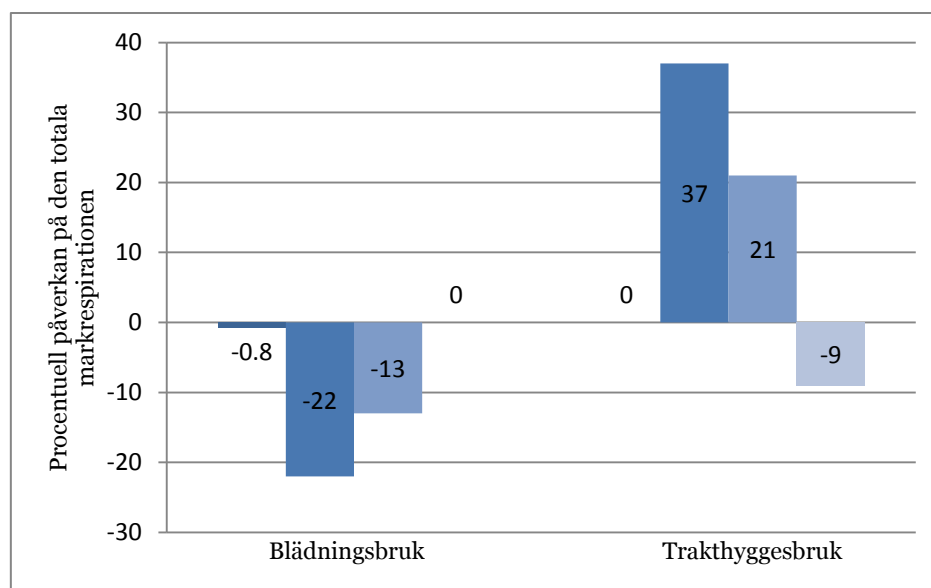
3 Resultat

3.1 Markrespiration

Baserat på och i linje med tidigare forskning, kan en kalavverkning i boreal barrskog leda till både en ökning eller en minskning av den totala markrespirationen (Tabell 2). I kontrast till detta så har denna studie inte funnit något exempel på blädning som ökat den totala markrespirationen (Tabell 2, Figur 2). Figur 2 visar att kalavverkning i genomsnitt ökade den totala markrespirationen med 12,25% medan blädning minskade den totala markrespirationen med 8,95%. T-testet visade på signifikant skillnad; t-kvot: 1,82, t-kritisk ensidig: 1,53, P-värde ensidig: 0,07. Förutsättningarna för de studier som användes i analysen var inte likvärdiga och påverkar följaktligen resultatet (Tabell 3).

Tabell 2. Effekten av avverkning på markrespirationen vid blädningsbruk samt trakthyggesbruk.

Studie	Avverknings- intensitet	Procentuell effekt på markrespirationen
Blädningsbruk		
Pang m.fl. (2012)	Okänd/simulera naturligt bildade skogsluckor	-0,8
Olajuyigbe m.fl. (2012)	42 %	-22
Vesala m.fl. (2005)	26,40%	0
Tang m.fl. (2004)	60 %	-13
Trakthyggesbruk		
Kolari m.fl. (2004)	Kalavverkning	21
Kowalski m.fl. (2004).	Kalavverkning	-9
Pumpanen m.fl. (2004)	Kalavverkning	37
Pumpanen m.fl. (2004)	Kalavverkning	0

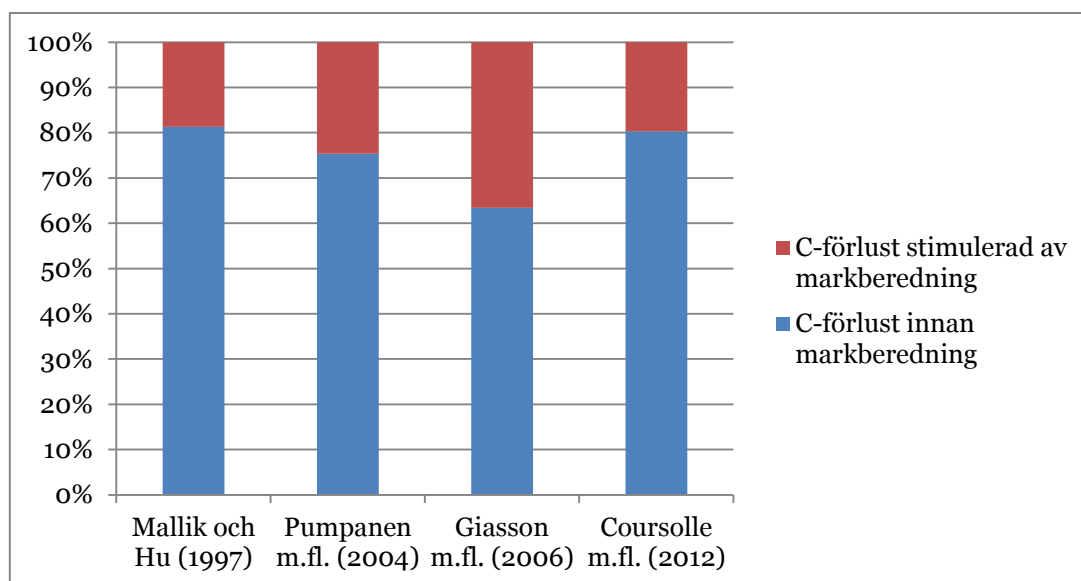


Figur 2. Procentuell förändring av den totala marrespirationen till följd av avverkning vid blädningsbruk respektive trakthyggesbruk i barrskog. Baserat på tabell 2.

Tabell 3. Förutsättningar för studierna i tabell 2 och figur 2. Ålder: beståndets ålder vid observation. Nederbörd anges i medelvärde över året. Medeltemperaturen anges vid annat än boreal klimat. * studie ej utförd i borealt klimat

Studie	Ålder	Jordmaterial	Nederbörd	Medeltemperatur
Blädningsbruk				
Pang m.fl. (2012) *	Medelvärde av observationer 0-3 år	Siltig lerjord	900 mm	8,85 °C
Olajuyigbe m.fl. (2012) *	2 år	Fuktig lerjord	850 mm	9,3 °C
Vesala m.fl. (2005)	0 år	Sandig morän	709 mm	
Tang m.fl. (2004) *	1 år	Sand och silt	1660 mm	14,45 °C
Trakthyggesbruk				
Kolari m.fl. (2004)	4 år	Sandig och stenig	700 mm	
Kowalski m.fl. (2004).	5 år	Rullstensås (sandig och stenig)	700 mm	
Pumpanen m.fl. (2004)	0 år	Sandigt isälvsmaterial	709 mm	
Pumpanen m.fl. (2004)	3 år	Sandigt isälvsmaterial	709 mm	

Mallik och Hu (1997), Pumpanen m.fl. (2004), Giasson m.fl. (2006) och Coursolle m.fl. (2012) rapporterar att markrespirationen ifrån ett kalavverkat borealt barrskogsområde ökar efter markberedning med harv. Den del av markrespirationen som stimulerats av markberedning utgör en relativt stor del med ett medelvärde för studierna på 24,25% (Figur 3). T-testet visade på signifikant högre markrespiration efter markberedning; t-kvot: -5,87, t-kritisk ensidig: 1,63, P-värde ensidig: 0,004.



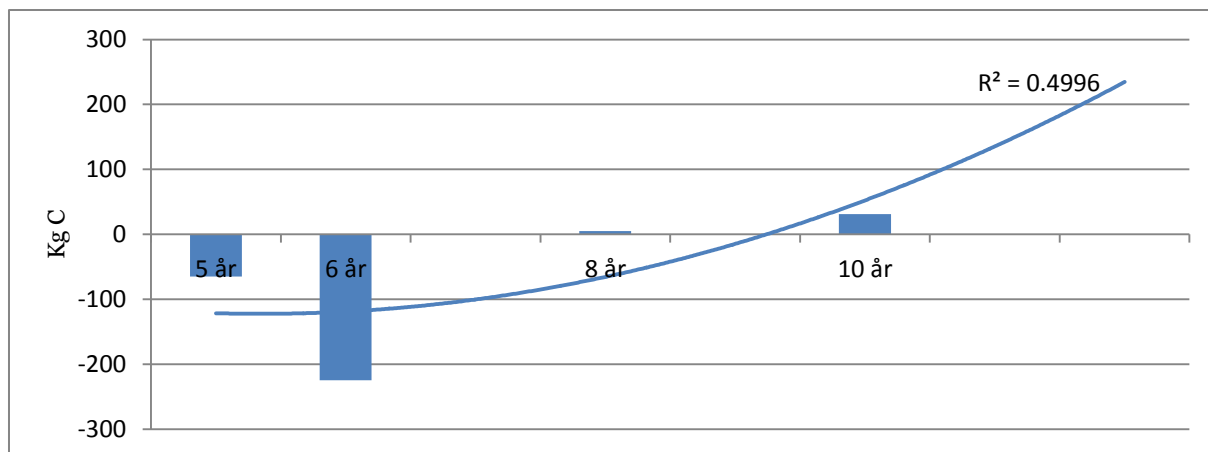
Figur 3. Procentuell fördelning av den totala markrespirationen efter markberedning av ett kalavverkat borealt barrskogsområde

3.2 C-balansen

Studierna visar att kalavverkning i boreal barrskog leder till en nettoförlust av C under en viss tidsperiod, och att brytpunkten då det kalavverkade området åter börjar utgöra en C-sänka är omkring 8 - 9 år efter kalavverkning (Tabell 4, Figur 4). Determinationskoefficienten, R^2 värdet, (0.4996, $n=5$) för den kurvlinjära prognostrendlinjen i Figur 4 indikerar en måttlig passform.

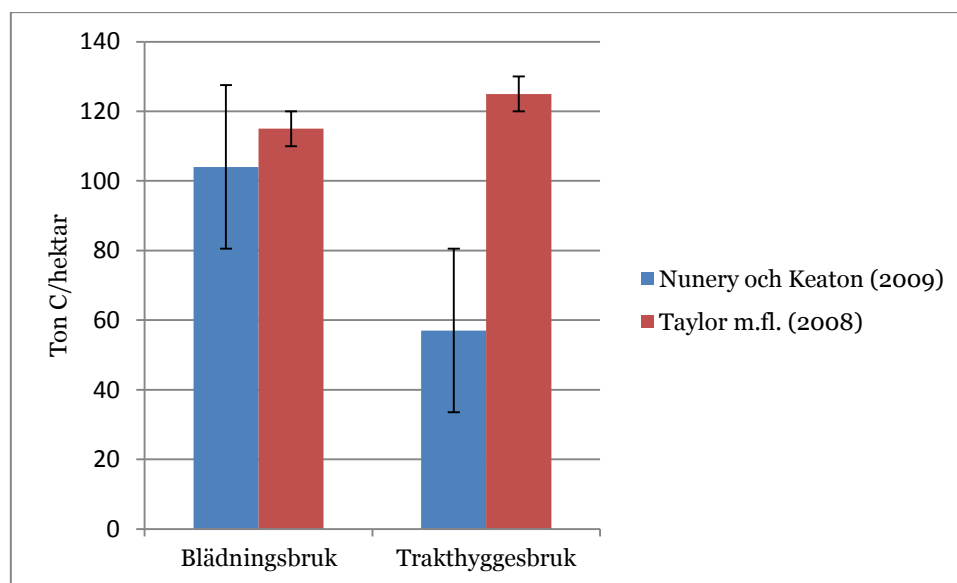
Tabell 4. Effekt av kalavverkning på C-balansen (g C per m^2 /dag). Datum: datum då observationerna gjordes. Ålder: beståndets ålder vid observationstillfället.

Studie	Skogstyp och dominerande trädslag	Datum	Ålder	Genomsnittlig C-balans
Striegl och Wickland (1998).	Boreal (tall)	Maj-Sep	0	-0,96
Gordon m.fl. (1987).	Boreal (gran)	Maj-Sep	3	-3,44
Kowalski m.fl. (2004).	Boreal (gran)	Helår	5	-0,65
Pypker och Fredeen (2002).	Boreal (gran)	Maj-Sep	6	-5,76
Pypker och Fredeen (2002).	Boreal (gran)	Helår	6	≈-2,25
Fredeen m.fl. (2006).	Boreal (gran)	Helår	8	≈0,33
Payeur-Poirier m.fl. (2011).	Boreal (tall)	Helår	8	-0,23
Fredeen m.fl. (2006).	Boreal (gran)	Helår	10	≈0,31



Figur 4. C- balans per hektar/år vid ökande beståndsålder med kurvlinjär prognostrendlinje efter kalavverkning i boreal barrskog. Baserat på helårsobservationer i tabell 3.

Vad gäller C-balansen ovan mark så rapporterar Taylor m.fl. (2008) och Nunery och Keaton (2009) (båda studierna utförda utanför den boreala klimatzonen) mer C i biomassa i blädningsbrukad skog än i trakthyggesbrukad skog efter 160 år. Medelvärdena från dessa studier visar på en skillnad mellan blädningsbruk och trakthyggesbruk på 18,5 ton C per hektar (Figur 5), dock ej signifikant; t-kvot: 0,53, t-kritiskt ensidig: 3,07, P-värde ensidig: 0,34.



Figur 5. Totalt C ovan mark i biomassa (levande och död) vid blädningsbruk respektive trakthyggesbruk efter 160 år. Error bars visar standardfel. Baserat på medelvärdet av Taylor m.fl. (2008) och Nunery och Keaton (2009).

4 Diskussion

4.1 Markrespiration

4.1.1 Trakthyggesbruk

Resultatet i denna studie indikerar att markrespirationen både kan öka och minska till följd av kalavverkning i boreal barrskog. Anledningen till detta är att den autotrofa markrespirationen och den heterotrofa markrespirationen påverkas olika. Den autotrofa markrespirationen minskar då den huvudsakliga källan till autotrofa markrespirationen i skog, träden, avlägsnas (Jandl m.fl. 2006). Den heterotrofa markrespirationen ökar istället då förhållandena för mikrobiologisk aktivitet ökar, samt att det finns mer nedbrytbart

material på marken då ett ökat förnafall uppstår vid avverkningsingreppet (Jandl m.fl. 2006). Om markrespirationen till följd av kalavverkning minskar så innebär det att den autotrofa markrespirationen minskat mer än vad den heterotrofa markrespirationen har ökat. Om markrespirationen istället ökar så har den heterotrofa markrespirationen ökat mer än vad den autotrofa markrespirationen har minskat. Om markrespirationen minskar innebär det inte några C-vinster i ekosystemet eftersom den huvudsakliga källan till nytt C som deponeras i/på marken, träden, har avlägsnats. C-förlusten genom markrespiration kan således, beroende på områdets kvarvarande primärproduktion, komma att utgöra en nettoförlust av C.

4.1.2 Blädningsbruk kontra trakthyggesbruk

T-testet på markrespirationen efter avverkning i blädningsbrukad samt trakthyggesbrukad skog visade på signifikant lägre markrespiration i blädningsbrukad skog vid en effektdifferens på 21,2%.

Förutsättningarna för studierna i analysen var olika. Alla studierna som representerar trakthyggesbruk är utförda i boreal barrskog, men vad gäller blädningsbrukad skog så användes i denna analys tre observationer från studier som inte utförts i borealt klimat. Olajuyigbe m.fl. (2012), Pang m.fl. (2012), Tang m.fl. (2004) är istället utförda i barrskog med avsevärt mycket högre medeltemperatur och alla tre visar på minskad markrespiration till följd av blädning. Den enda av de studier som representerar blädningsbruk i testet som har utförts i borealt klimat; Vesala m.fl. (2005) visade på oförändrad markrespiration till följd av blädning. Vesala m.fl. (2005) var dock den studie med minst intensiv blädning (intensiteten på Pang m.fl. (2012) ej känd), vilket skulle kunna förklara skillnaden mot de andra studierna då den autotrofa markrespirationen inte skulle ha minskat lika mycket, den heterotrofa markrespirationen inte skulle ha ökat lika mycket då krontäcket bibehölls mer intakt, samt att markfuktigheten inte skulle öka lika mycket (Olajuyigbe m.fl. 2012, Pang m.fl. 2012).

Förutsättningarna vad gäller jordmaterialet och följaktligen hur kraftigt markfuktigheten skulle kunna ha ökat, är dock olika studierna emellan. Av de blädningsbrukade områdena är Olajuyigbe m.fl. (2012), som är utförd i ett område med relativt vattenmättad lerjord, den studie som enligt Rusanen m.fl. (2004) borde ha upplevt den mest respirationshämmande effekten av ökad markfuktighet, vilket potentiellt kan utläsas från resultatet. Även Pang m.fl. (2012) som utförde sin studie i ett område med siltig lerjord borde i enlighet med detta ha upplevt en respirationshämmande effekt av ökad markfuktighet men detta speglas inte i resultatet. Istället indikerar studien en relativt svag minskning av markrespirationen. Tang m.fl. (2004) och Vesala m.fl. (2005) är de som borde ha upplevt de minst respirationshämmande effekterna, vilket i alla fall potentiellt speglas i Vesala m.fl. (2005), medan Tang m.fl. (2004) visade en relativt kraftig minskning av markrespirationen. Jordmaterialet i de studier som representerar trakthyggesbruk är motsats till de som representerar blädningsbruk relativt homogent studierna emellan. Den studie som skiljer sig något från övriga (Kolari m.fl. (2004) räknas ej in då beskrivningen av jordmaterialet är otillräcklig) är Kowalski m.fl. (2004) då studien är utförd på en rullstensås. Denna skillnad går även att se i effekten på markrespirationen till följd av kalavverkning, då Kowalski m.fl. (2004) är den enda studie representerande trakthyggesbruk som observerat minskande markrespiration till följd av kalavverkning. Anledningen till denna effekt är troligtvis 1) en rullstensås är upphöjd i förhållande till omgivningen och därmed också i förhållande till grundvattennivån och 2) en rullstensås är uppbyggd av material med hög permeabilitet och låg kappilaritet (hög genomsläpplighet och låg stigkraft/stighöjd av vätska) vilket innebär att den mängd vatten som kvarhålls i närhet av markytan är liten. Denna geologiska formation ger alltså speciella hydrologiska förutsättningar som gör området relativt torrt och okänslig mot ökad nederbörd och infiltration. Sådana torra förhållanden skulle troligtvis verka begränsande på mikrobiologisk aktivitet.

Beståndsåldern vid observationerna var också olika, särskilt mellan de två skogsbruksmetoderna. Observationerna representerande trakthyggesbruket var generellt avsevärt äldre än de observationer som representerade blädningsbruk. Detta förhållande ger resultat att effekten av kalavverkning på markrespirationen verkar mindre än vad den egentligen är eftersom effekten avtar med ålder (Olsson m.fl. 1995, Striegl och Wickland 1998, Pypker och Fredeen 2002, Lindroth m.fl. 2009, Payeur-Poirier m.fl. 2011). Detta styrks av att den observation Pumpanen m.fl. (2004) gjorde samma år som kalavverkning och markberedning (beståndsålder 0) visar den klar högsta markrespirationen. Detta kan också bidra till att Vesala m.fl. (2005) var den av studierna representerande blädningsbruk som rapporterade den högsta (oförändrade) markrespirationen då denna observation är gjord samma år som blädningen utfördes.

4.1.3 Markberedning

Resultatet visade på en signifikant ökning av markrespirationen till följd av markberedning, P-värde: 0,004. Anledningen till detta är som tidigare beskrivit att förhållandena för nedbrytning förbättras genom förändrat mikroklimat och förändrade markegenskaper (Johansson 1994, Örlander m.fl. 1996, Jandl m.fl. 2006). En av studierna använda i analysen, Mallik och Hu (1997), är utförd i boreal blandskog istället för boreal barrskog. Om detta skulle kunna påverka resultatet (procentuell ökning) är inte känt. Av resultat kan man förstå att markberedning svarar för en avsevärd andel av C-förlusten till följd av kalavverkning och att trakthyggesbruk utan markberedning är en klar fördel för C-lagringen i boreal skog.

4.2 C-balansen

4.2.1 Trakthyggesbruk

Vad gäller C-balansen så indikerar resultatet att en kalavverkning av boreal barrskog leder till att det avvertrade området kommer att utgöra en C-källa i cirka 8-9 år (eventuell markberedning beaktades ej). Anledningen till detta är att primärproduktionen minskar då träden avverkas vilket får konsekvensen att markrespirationen, vare sig minskad eller ökad, till viss utsträckning kommer att innebära en nettoförlust av C (Olsson m.fl. 1995, Striegl och Wickland 1998, Pypker och Fredeen 2002, Lindroth m.fl. 2009, Payeur-Poirier m.fl. 2011). Vad resultatet indikerar är således att efter 8-9 år så har något av följande skett: 1) den nyplanterade skogen har uppnått en sådan primärproduktion att den tillsammans med övrig vegetation uppväger ökad markrespiration 2) den nyplanterade skogen har börjat skapa ett krontäcke som försämrar förutsättningarna för mikrobiologisk aktivitet 3) det tillgängliga nedbrytbara materialet på marken har minskat varvid markrespirationen minskar, eller 4) en kombination av dessa tillsammans uppväger den ökade markrespirationen.

4.2.2 C ovan mark

Resultatet visar ingen signifikant skillnad i totalt C ovan mark mellan de två skogsbruksmetoderna. De två studierna använda för att producera resultatet, Taylor m.fl. (2008) och Nunery och Keaton (2009), är dock inte utförda på boreal barrskog utan i tempererad barrskog i sydöstra Kanada samt tempererad blandskog i nordöstra USA. Om resultat skulle bli annorlunda vid boreala barrskogsförhållanden beror på effekten av temperatur och skillnaden i nedbrytningshastighet mellan löv och barr. Vid boreala förhållanden skulle en lägre temperatur och en lägre nedbrytningshastighet hos barr teoretiskt ge lägre markrespiration vilket alltså skulle innebära ett större C-lager. Om och i så fall hur detta förhållande med ökade C-lager ovan mark skulle påverka förhållandet mellan blädningsbruk och trakthyggesbruk spekuleras det inte kring vidare i denna studie.

4.3 Slutsatser

Denna studie visade på signifikant lägre markrespiration i blädningsbrukad skog, dock med hjälp av studier utförda utanför ramen för boreal barrskog. Vad gäller C-balansen så fann denna studie för få vetenskapliga artiklar med observationer av den totala C-balansen både före och efter blädning för att kunna genomföra någon jämförelse med trakthyggesbruk. Ett

kalhygge kan dock inte ha en högre primärproduktion än en bläddad skog med likvärdiga förhållanden för tillväxt och nedbrytning, vilket betyder att C-förlusten från blädningsbrukad skog är mindre än C-förlusten från trakthyggesbrukad skog. Resultatet indikerar alltså att blädningsbruk skulle kunna lagra mer C än trakthyggesbruk. Att övergå till att bruka boreal skog med blädning skulle således ha en effekt på klimatet genom att minska CO₂-halten i atmosfären, vilket skulle minska växthuseffekten och därmed bidra till att åtminstone mildra den globala uppvärmningen. Det visar sig tydligt i denna studie att det behövs mer forskning, både vad gäller blädningsbrukets och trakthyggesbrukets påverkan på C-lagret.

5 Referenser

- Adams, Paul W., Flint, Alan L. och Fredriksen, Richard, L. 1991. Long-term patterns in soil moisture and revegetation after a clearcut of a Douglas-fir forest in Oregon. *Forest Ecology and Management* 41:249–263.
- Bond-Lamberty, Ben, Wang, Chuankuan och Gower, Stith T. 2004. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology* 10:1756–1766.
- Carlson, DW. och Groot, A. 1997. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 87:313–329.
- Carter, A.J. och Scholes, R.J., 2000. Spatial Global Database of Soil Properties. IGBP Global soil data task CD-ROM. International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) Data Information Systems. Toulouse, Frankrike.
- Coursolle, Carole Giasson, Marc-André, Margolis, Hank A. och Bernier, Pierre Y. 2012. Moving towards carbon neutrality: CO₂ exchange of a black spruce forest ecosystem during the first 10 years of recovery after harvest. *Canadian Journal of Forest Research* 11:1908-1918.
- D'Amato, Anthony W., Bradford, John B., Fraver, Shawn och Palik, Brian J. 2011. Forest management for mitigation and adaption to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. *Forest Ecology and Management* 262:803-816.
- Davis, Sarah C., Hessel, Amy E., Scott, Carrie J., Adams, Mary Beth och Thomas, Richard B. 2009. Forest Carbon Sequestration changes in response to timber harvest. *Forest Ecology and Management* 258:2101-2109.
- Fredeen, Arthur L., Waughtal, Jennifer D. och Pypker, Thomas G. 2006. When do replanted sub-boreal clearcuts become net sinks for CO₂? *Forest Ecology and Management* 239:210–216.
- Gamfeldt, Lars, Snäll, Tord, Bagchi, Robert, Jonsson, Micael, Gustafsson, Lena, Kjellander, Petter, Ruiz-Jaen, Maria C., Fröberg, Mats, Stendahl, Johan, Philipson, Christopher D., Mikusinski, Grzegorz, Andersson, Erik, Westerlund, Bertil, Andrén, Henrik, Moberg, Fredrik, Moen, Jon och Bengtsson, Jan. 2012. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications* 4:1340.
- Giardina, Christian P. och Ryan, Michael G. 2000. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature* 404:858-861.

- Giasson, Marc-Andre', Coursolle, Carole och Margolis, Hank A. 2006. Ecosystem-level CO₂ fluxes from a boreal cutover in eastern Canada before and after scarification. *Agricultural and Forest Meteorology* 140:23–40.
- Gordon, A.M., Schlentner, R.E. och Van Cleve, K., 1987. Seasonal patterns of soil respiration and CO₂ evolution following harvesting in the white spruce forests of interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research* 17, 304–310.
- Harmon, Mark E., Moreno, Adam och Domingo, James B. 2009. Effects of Partial Harvest on the Carbon Stores in Douglas-fir/Western Hemlock Forests: A Simulation Study. *Ecosystems* 12:777–791.
- Hashimoto, Shoji och Suzuki, Masakazu. 2004. The impact of forest clear-cutting on soil temperature: a comparison between before and after cutting, and between clear-cut and control sites. *Journal of forest research* 9:125-132.
- Hobbie, Sarah E., Schimel, Joshua P., Trumbore, Susane E. och Randerson, James P. 2000. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils. *Global Change Biology* 6:196-210.
- Ise, Takeshi och Moorcroft, Paul R. 2006. The global-scale temperature and moisture dependencies of soil organic carbon decomposition: an analysis using a mechanistic decomposition model. *Biogeochemistry* 80:217–231.
- Jandl, Robert, Lindner, Marcus, Vesterdal, Lars, Bauwens, Bram, Baritz, Rainer, Hagedorn, Frank, Johnson, Dale W., Minkinen, Byrne och Kari, Kenneth A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. *Geoderma* 137:253–268.
- Jobbágy, Esteban G. och Jackson, Robert B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10:423–436.
- Johansson, Maj-Britt. 1994. The influence of soil scarification on the turn-over rate of slash needles and nutrient release. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9:170-179.
- Johnson, Dale W. och Curtis, Peter S. 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management* 140:227–238.
- Kasischke, Eric S. och Stocks, Brian. 2000. Fire, Climate Change and Carbon Cycling in the Boreal Forest. ISBN: 9780387988900. New York. Springer-Verlag.
- Kolari, Pasi, Pumpanen, Jukka, Rannik, Üllar, Ilvesniemi, Hannu, Hari, Pertti och Berninger, Frank. 2004. Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland. *Global Change Biology* 10:1106–1119.
- Kowalski, Andrew S., Loustau, Dennis, Berbigier, Paul, Manca, Giovanni, Tedeschi, Vanessa, Borghetti, Marco, Valentini, Riccardo, Kolari, Pasi, Berninger, Frank, Rannik, Üllar, Hari, Pertti, Rayment, Mark, Mencuccini, Maurizio, Moncrieff, John och Grace, John. 2004. Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe. *Global Change Biology* 10:1707–1723.
- Lal, Rattan. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123:1–22.

- Law, B.E., Sun, O.J., Cambell, J., Van Tuyl, S. och Thornton, P.E. 2003. Changes in carbon storage and fluxes in a choronsequence of pondorosa pine. *Global Change Biology* 9:510-524.
- Lindroth, Anders, Lagergren, Fredrik, Grelle, Achim, Klemedtsson, Leif, Langvall Ola, Weslin, Per och Tuulik, Janno. 2009. Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. *Global Change Biology* 15:346–355.
- Mallik, A.U. och Hu, D. 1997. Soil respiration following site preparation treatments in boreal mixedwood forest. *Forest Ecology and Management* 97: 265-275.
- Marcotte, Philippe, Roy, Vincent, Plamondon, André P. och Auger, Isabelle. 2008. Ten-year water table recovery after clearcutting and draining boreal forested wetlands of eastern Canada. *Hydrological Processes* 20:4163–4172.
- Morecroft, MD., Taylor, ME. och Oliver, HR. 1998. Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site. *Agricultural and Forest Meteorology* 90:141–156.
- Olajuyigbe, Samuel, Tobin, Brian, Saunders, Matthew och Nieuwenhuis, Maarten. 2012. Forest thinning and soil respiration in a Sitka spruce forest in Ireland. *Agricultural and Forest Meteorology* 157:86– 95.
- Olsson, Bengt A., Staaf, Håkan, Lundkvist, Heléne, Bengtsson, Jan och Kaj Rosén. 1996. Carbon and nitrogen in coniferous forest soils after clear-felling and harvests of different intensity. *Forest Ecology and Management* 82:19-32.
- Ortiz, Carina, Karlton, Erik, Stendahl, Johan, Gärdenäs, Annemieke I. och Ågren, Göran I. 2011. Modelling soil carbon development in Swedish coniferous forest soils—An uncertainty analysis of parameters and model estimates using the GLUE method. *Ecological Modelling* 22:3020– 3032.
- Pang, Xueyong, Bao, Weikai, Zhu, Biao och Cheng, Weixin. 2013. Responses of soil respiration and its temperature sensitivity to thinning in a pine Plantation. *Agricultural and Forest Meteorology* 17: 57– 64.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E.T. och Hunt, H.W., 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48:147–163.
- Payeur-Poirier, Jean-Lionel, Coursolle, Carole, Margolis, Hank A. och Giasson, Marc-André. 2012. CO₂ fluxes of a boreal black spruce chronosequence in eastern North America. *Agricultural and Forest Meteorology* 153:94– 105.
- Potter, BE, Teclaw, RM och Zasada, JC. 2001 The impact of forest structure on near-ground temperatures during two years of contrasting temperature extremes. *Agricultural and Forest Meteorology* 106:331–336.
- Pretzsch, Hans. 2005. Diversity and productivity in forests: evidence from longterm experimental plots. *Ecological Studies* 176:41-64.
- Pumpanen, Jukka, Westman, Carl Johan och Ilvesniemi, Hannu. 2004. Soil CO₂ efflux from a podzolic forest before and after forest clear-cutting and site preparation. *Boreal Environment Research* 9:199-212.
- Pypker, Thomas G. och Fredeen, Arthur L. 2002. Ecosystem CO₂ flux over two

growing seasons for a sub-boreal clearcut 5 and 6 years after harvest. 2002. *Agricultural and Forest Meteorology* 114:15–30.

Pypker, Thomas G. och Fredeen, Arthur L. 2003. Below ground CO₂ efflux from cut blocks of varying ages in sub-boreal British Columbia. *Forest Ecology and Management* 172:249-259.

Rusanen, Kaisa, Finér, Leena, Antikainen, Merja, Korkka-Niemi, Kirsti, Backman, Birgitta och Britschgi, Ritva. 2004. The effects of forest cutting on the quality of groundwater in large aquifers in Finland. *Boreal Environment Research* 9:253-256.

Rustad, L.e., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Mitchell M.J., Hartley, A.e., Comelissen, J.H.C. och Girevitch, J. 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126:543–562.

Sollins, Phillip, Homann, Peter och Caldwell, Bruce A. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma* 74:65-105.

Smerdon, Brian D., Redding, Todd E. och Beckers, Jos. 2009. An overview of the effects of forest management on groundwater hydrology. *BC Journal of Ecosystems and Management* 10:22–44.

Stockmann, Uta, Adams, Mark A., Crawford, John W., Field, Damien J., Henakaarchchia, Nilush, Jenkins, Meaghan, Minasnya, Budiman, McBratneya, Alex B., de Courcellesa, Vivien de Remy, Singh, Kanika, Wheeler, Ichsani, Abbott, Lynette, Angers, Denis A., Baldock, Jeffrey, Birde, Michael, Brookes, Philip C., Chenu, Claire, Jastrow, Julie D., Lal, Rattan, Lehmann, Johannes, O'Donnell, Anthony G., Parton, William J., Whitehead, David och Zimmermann, Michael. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164:80-99.

Striegl, Robert G. och Wickland, Kimberly P. 1998. Effects of a clear-cut harvest on soil respiration in a jack pine - lichen woodland. *Canadian Journal of Forest Research* 28:534-539.

Strömngren, Monika och Mjöfors, Kristina. 2012. Soil-CO₂ flux after patch scarification, harrowing and stump harvest in a hemi boreal forest. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27:754-761.

Tang, Jianwu, Qi, Ye, Xu, Ming, Misson, Laurent och Goldstein, Allen H. 2005. Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada. *Tree Physiology* 25:57–66.

Taylor, Anthony R., Wang, Jian R. och Kurz, Werner A. 2008. Effects of harvesting intensity on carbon stocks in eastern Canadian red spruce (*Picea rubens*) forests: An exploratory analysis using the CBM-CFS3 simulation model. *Forest Ecology and Management* 255:3632–3641.

Vesala, T., Suni, T., Rannik, Ü., Keronen, P., Markkanen, T., Sevanto, S., Grönholm, T., Smolander, S., Kulmala, M., Ilvesniemi, H., Ojansuu, R., Uotila, A., Levula, J., Mäkela, A., Pumpanen, J., Kolari, P., Kulmala, L., Altimir, N., Berninger, F., Nikinmaa, E. och Hari, P. 2005. Effect of thinning on surface fluxes in a boreal forest. *Global Biogeochemical Cycles* 19, doi:10.1029/2004GB002316.

Vesterdal, Lars, Dalsgaard, Mads, Felby, Claus, Raulund-Rasmussen, Karsten och Jörgensen, Bruno Bilde. 1995. Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon,

nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management* 7:1-10.

Vesterdal, Lars och Raulund-Rasmussen, Karsten, 1998. Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient. *Canadian Journal of Forest Research* 28:1636–1647.

WBGU, (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) German Advisory Council on Global Change. 1988. Accounting of biological sinks and sources under the Kyoto Protocol. ISBN: 3980630909.

Weber, M.G., 1990. Forest soil respiration after cutting and burning in immature aspen ecosystems. *Forest Ecology and Management* 31: 1–14.

Wilson, Kell B., Hanson, Paul J., Mulholland, Patrick J., Baldocchi, Dennis D. och Wullschleger, Stan D. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology* 106:153–168.

Zhang, Yu, Chen, Han Y.H. och Reich, Peter, B. 2012. Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. doi: 10.1111/j.1365-2745.2011.01944.x.

Zu, Yuan-Gang, Wang, Wen-Jie, Wang, Hui-Mei, Liu, Wei, Cui, Song och Koike, Takayoshi. 2009. Soil CO₂ efflux, carbon dynamics, and change in thermal conditions from contrasting clear-cut sites during natural restoration and uncut larch forests in northeastern China. *Climatic Change* 96:137–159.

Örlander, Göran, Egnell, Gustaf och Albrektson, Arne. 1996. Long-term effects of site preparation on growth in Scots pine. *Forest Ecology and Management* 86:27-37.