

Effekter på mark av 50 års försurnings- belastning från atmosfärisk deposition och katjonupptag i biomassa

– en analys av data från Riksskogstaxeringen och
Markinventeringen



Johan Iwald, Erik Karlton, Johan Stendahl, Stefan Löfgren

Effekter på mark av 50 års försurnings-belastning från atmosfärisk deposition och katjonupptag i biomassa – en analys av data från Riksskogstaxeringen och Markinventeringen

Effects of 50 years acid load from atmospheric deposition and uptake of base cations in biomass - an analysis of data from the Swedish National Forest Survey and the Swedish Forest Soil Inventory

Johan Iwald	SLU, Institutionen för mark och miljö, johan.iwald@naturvardsverket.se
Erik Karlton	SLU, Institutionen för mark och miljö, erik.karlton@slu.se
Johan Stendahl	SLU, Institutionen för mark och miljö, johan.stendahl@slu.se
Stefan Löfgren	SLU, Institutionen för vatten och miljö, stefan.lofgren@slu.se

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2019

Serietitel: Rapport

Delnummer i serien: 20

ISBN: 978-91-576-9692-2

Elektronisk publicering: <https://pub.epsilon.slu.se>

Bibliografisk referens: Iwald,J., Karlton,E., Stendahl,J., Löfgren,S. (2019). *Effekter på mark av 50 års försurnings-belastning från atmosfärisk deposition och katjonupptag i biomassa – en analys av data från Riksskogstaxeringen och Markinventeringen*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö, Rapport, 20.

Nyckelord: försurning, skogsbruk, atmosfärisk deposition

Sveriges lantbruksuniversitet

Institutionen för mark och miljö

Innehåll

Sammanfattning.....	6
Summary	7
Bakgrund och syfte.....	8
Material och metoder.....	9
Biomassaförråd.....	9
Avverkning.....	9
Deposition.....	9
Markens förråd av utbytbara baskatjoner	10
Provtagning och analys.....	10
Beräkningar	10
Resultat.....	12
Diskussion	19
Slutsatser	21
Referenser	22

Sammanfattning

Den atmosfäriska depositionen av försurande ämnen har i sydvästra Sverige minskat till mindre än en femtedel av vad den var i början av 1990-talet. En möjlig förklaring till den trots detta, långsamma återhämtningen från försurningen av mark och vatten i skogslandskapet, är att den biologiska försurningen har ökat på grund av en ökad tillväxt som möjliggjort en kontinuerlig ökning av både stående biomassa och skörd av skogsråvara. Dessutom har ett ökat uttag av GROT för förbränning ytterligare bidragit till den biologiska försurningsbelastningen. I rapporten kvantifierar och jämför vi förändringarna i försurningsbelastning från deposition, skogstillväxt och avverkning från 1950/60 fram till idag och relaterar denna till skogsmarkens försurningsstatus och förråden av växttillgängliga baskatjoner i mark och biomassa. Rapporten baserar sig på data från Riksskogstaxeringen, Markinventeringen, EMEP och SMHI samt information från olika vetenskapliga artiklar. De stora förändringarna i försurningsbelastning sedan 1950-talet har skett genom förändringar i depositionen, först genom en stor uppgång fram till slutet av 1980-talet och sedan genom en ännu snabbare nedgång under 1990- och 2000-talen. Skogsbrukets bidrag till försurningsbelastningen har ökat något under perioden genom ökad bortförsl av träddelar vid avverkning och ökat upptag i stående biomassa, men ökningen är bara signifikant i den sydöstra regionen. Ökningen är relativt måttlig och förändringarna är små i förhållande till de förändringar som har skett i total försurningsbelastning genom förändringar i depositionsbelastning. Det ökade uttaget av GROT har ökat försurningsbelastningen, främst i sydvästra och sydöstra Sverige där uttaget är störst, men är totalt sett en mindre del av den skogsproduktionsrelaterade försurningsbelastningen i ett brukat skogslandskap. Det finns inte någon tydlig geografisk trend i markens baskatjonförråd relaterat till den totala försurningsbelastningen. Förrådet av utbytbara baskatjoner i marken varierar mer med markens och modermaterialens geokemiska egenskaper än med försurningsbelastningen. Resultaten från den här studien representerar det faktiska GROT-uttaget som skett i skogslandskapet på länsnivå, vilket innebär att slutsatserna från studien inte behöver återspegla effekterna på beståndsnivå där det fortfarande kan vara problem med näringstillgången och behov av kompensation i form av t.ex. askåterföring.

Summary

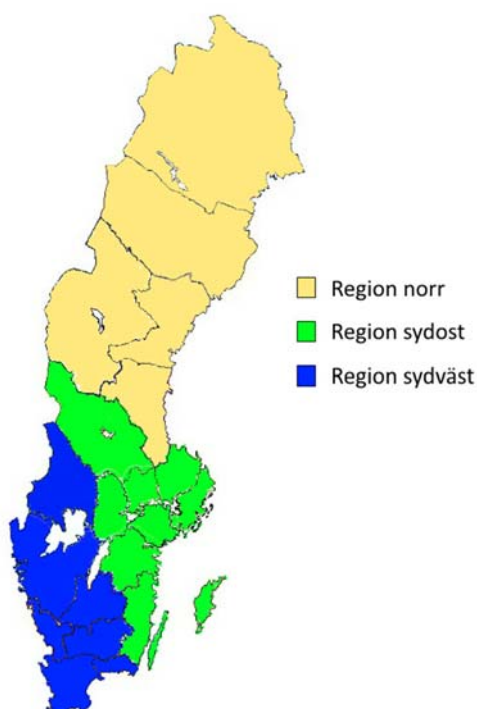
The atmospheric deposition of acidifying substances in southwest Sweden has decreased to less than one fifth of the level reached during the beginning of 1990-ies. A possible explanation for the slow recovery from acidification in soils and freshwaters is that the biological acidification has increased due to increased standing biomass and increased harvesting volume. An increased use of harvest residues (branches, tops and needles) for bioenergy purposes has also contributed to an increased acidity input to soils. In this report we quantify and compare changes in the acidity input from atmospheric deposition, forest growth and harvest from 1955 until 2010 for Sweden. We relate the changes to the acidity status and the pool of base cations in biomass and soils. The report is based on data from the Swedish National Forest Inventory, the Swedish national Forest Soil Inventory, the European Monitoring and Evaluation Programme, the Swedish Meteorological and Hydrological Institute, and information from scientific literature. The largest change in acidity input has occurred as a result of changes in atmospheric deposition, first through a considerable increase from 1950-ies to the late 1980-ies when the deposition level stabilized. From the beginning of the 1990-ies the acid deposition dropped drastically and currently the atmospheric input of acidity is comparable to the input from forest growth. The contribution to acidity input from forestry has increased through increased harvest and through increased uptake in standing biomass, but the increase is only significant in the south-east of Sweden. The increase in the load of acidity from forestry is modest compared to the drastic changes in atmospheric deposition. The increased use of forest residues has increased the acidity load, particularly in south-west and south-east Sweden, but it is a smaller input than harvest and increase in standing biomass in a managed forest landscape. There is no evident spatial trend for exchangeable base cations that is related to the total input of acidity. The variation for cations in soil is more related to geochemical properties of soil and parent material than the load of acidity. The results from this study represent the actual level of forest residue harvest in the forest landscape, which means that the conclusions does not have to reflect the impact on stand level where there may still be problems with the nutrient balance and need for compensation measures in the form of e.g. ash recycling.

Bakgrund och syfte

Depositionen av försurande ämnen har minskat väsentligt sedan slutet på 1980-talet (EMEP, 2016). Minskningen har resulterat i en viss återhämtning av försurande vattendrag (Fölster and Wilander, 2002) och i skogens markvatten (Karlsson et al., 2011) medan återhämtningen i skogsmarken har varit svårare att belägga (Karlton et al., 2003). I en utvärdering av miljömålet ”Bara naturlig försurning” konstateras det att; ”utsikterna är inte ljusa för att nå ett markant förbättrat marktillstånd de närmsta decennierna” (Naturvårdsverket, 2016). En av de möjliga förklaringarna till den långsamma återhämtningen kan vara att den biologiska försurningen har ökat på grund av (1) en ökad tillväxt som möjliggjort en kontinuerlig ökning av både stående biomassa och skörd av stamved och (2) ökat uttag av GROT (grenar och toppar) för förbränning. I många områden medför den biologiska försurningen idag ett större tillskott av aciditet än vad depositionen av försurande ämnen gör (Belyazid et al., 2006). Förändringen av depositionen över tid är väl studerad och det finns tillgång till data över utvecklingen, åtminstone från 1950-talet och framåt (Fern et al., 2019). Storleken av den biologiska försurningen och förändringen över tid är inte lika väl studerad, men data från Riksskogstaxeringens databaser (SLU, 2017) erbjuder en möjlighet att kvantifiera hur stort inflöde av aciditet som ackumuleringen i biomassa och ökande avverkningsvolym har medfört. När det gäller uttaget av GROT är statistiken något sämre, men även här kan man på grundval av Riksskogstaxeringens statistik över avverkning i kombination med viss existerande statistik från GROT-uttag och data på förbränningen av biomassa göra skattningar av hur mycket näringsämnen och alkalinitet som har exporterats från skogen vid skogsbränsleuttag.

Skogen och skogsbruket är i ständig förändring. Skogstillväxten ökar som ett resultat av förbättrad skogsskötsel, varmare klimat och deposition av kväve. Skogsråvara används i ökande utsträckning för att substituera fossila bränslen och råvaror. Det intensivare utnyttjandet av skogarna ökar behovet av korrekta bedömningar av hur den biologiska försurningen påverkar skogsmarkens långsiktiga surhetsstatus och behovet av åtgärder för att begränsa effekterna.

Projektet syftar till att kvantifiera förändringar i försurningsbelastningen från deposition, skogstillväxt och avverkning från 1950/60 fram till idag och att relatera denna till skogsmarkens försurningsstatus och förråden av växttillgängliga baskatjoner i mark och biomassa.



Figur 1. Indelning av Sverige i de tre regioner som refereras till i rapporten.

Figure 1. The Swedish regions that are referred to in the report as north, south-east and south-west.

Material och metoder

Denna studie behandlar skogsmark i Sverige under tidsperioden 1955-2010. Studien omfattar trädslagen tall, gran och björk, vilka tillsammans utgör 95 % av virkesförrådet i Sverige (SLU, 2017). Vid beräkningarna har data på länsnivå använts, men resultaten har aggregerats till att omfatta tre regioner: sydväst, sydost och norr (se figur 1). Dessa tre regioner avspeglar gradienten i depositionen av försurande ämnen i Sverige som minskar från sydväst till norr.

Biomassaförråd

Data från Riksskogstaxeringen (SLU, 2017) har använts för att kvantifiera biomassaförråd av tall, gran och björk för varje län i Sverige från 1955 till 2010. Förändringar i biomassaförråd mellan varje år har beräknats i olika träddelar (stamved, bark, grenar, barr samt rot/stubbe), och med hjälp av uppgifter om halter av katjoner (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) och anjoner ($H_2PO_4^-$, SO_4^{2-} , Cl^-) i dessa fraktioner har den stående biomassans nettokatjonupptag kunnat beräknas. Uppgifter om katjoner och anjoner i olika träddelar härrör från källor i Sverige och Finland (Åhrén and Eriksson, 1998; Björkroth and Rosén, 1977; Eriksson (pers. comm.), 2012; Eriksson and Rosen, 1994; Hägermark et al., 2002; Mälkönen, 1978; Mälkönen and Saarsalmi, 1982; Nilsson and Wiklund, 1994, 1995; Werkelin, 2006; Werkelin et al., 2005; Werkelin et al., 2010).- Trädbiomassans nettokatjonupptag (ΔBC) har beräknats enligt följande formel:

$$\Delta BC = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+) - (H_2PO_4^- + SO_4^{2-} + Cl^-)$$

där laddningsdifferensen angetts i $mol_e ha^{-1}$.

Avverkning

I statistik från Riksskogstaxeringen finns årliga data över avverkning av tall, gran och björk 1955-2010 (SLU, 2017) på landsdelsnivå (N och S Norrland, Svealand och Götaland). För varje landsdel och trädslag har det antagits att en lika stor andel av virkesförrådet har avverkat i varje län.

Med uppskattningar av avverkad biomassa tall, gran och björk i varje län, har nettokatjonuttaget vid avverkning kunnat beräknas med hjälp av uppgifter om katjoner och anjoner i olika träddelar. Netto-katjonförrådet i avverkad och bortförd biomassa motsvarar nettotillskottet av aciditet till marken.

Beräkningarna av GROT uttag är inte metodmässigt konsistent på grund av avsaknad av fullständig statistik. För areal av GROT finns uppgifter från år 1999-2013 och för volym GROT från 2007-2013 i Skogsstatistisk årsbok (Skogsstyrelsen, 1999-2013). Arealdata för GROT är på landsdelsnivå och volymdata är på länsnivå. Dessa uppgifter har använts för att göra en uppskattning av nettokatjonuttaget vid skörd av GROT år 1999-2010. Vid beräkningarna har förhållandet mellan volym och areal GROT 2007-2010 använts för att uppskatta volym GROT 1999-2006. GROT-uttaget har sedan fördelats ner på länsnivå genom att använda volymsandelen för länets volymsandel. Uppdelningen har skett på trädslagsnivå med antagandet att proportionerna mellan dessa trädslag är desamma beträffande GROT-uttag som beträffande avverkning av stamved. Omvandling från volym (m^3sk) till biomassa (ton TS) har skett enligt sambandet $1 m^3 GROT = 0,17 ton TS$ (Christiansen, 2014). GROT:en har fördelats på grenar och barr enligt biomassafunktioner. GROT från tall antogs bestå av 86% gren och 14% barr och för gran 75% gren och 25% barr (Marklund, 1988). Björk-GROT antas bestå av endast grenar och inga löv. Slutligen har katjonöverskottet vid GROT-uttag beräknats med hjälp av uppgifter om katjoner och anjoner i olika träddelar på samma sätt som vid skörd av stamved.

Deposition

Försurningsbelastningen (aciditeten) i det sura nedfallet har uppskattats från depositionen av sulfat (SO_4^{2-}) och kalcium (Ca^{2+}) enligt det förenklade sambandet:

$$Aciditet\ i\ deposition = SO_4^{2-} - Ca^{2+}$$

där värdena för såväl SO_4^{2-} som Ca^{2+} är angivna i $mol_e ha^{-1}$ exklusive havssaltbidrag.

Sambandet bygger på följande antaganden:

- Havssaltskorrigerad sulfat härrör till 100 % från svavelsyra som bildats i atmosfären
- Havssaltskorrigerad Ca^{2+} härrör från Ca-substanser med kalkverkan, t.ex. CaO, motsvarande två ekvivalenter per Ca^{2+} -jon.
- Försurningseffekten för deposition av kväve i form av ammonium (NH_4^+) eller nitrat (NO_3^-) är liten på grund av att depositionen av NO_3^- är lika stor som depositionen av NH_4^+ och båda jonerna tas upp i stort sett helt av skogsekosystemet. Vid upptaget har NO_3^- en kalkeffekt av en ekvivalent per jon medan NH_4^+ har en försurande effekt motsvarande en ekvivalent per jon. Det senare gäller även vid nitrifikation av NH_4^+ med efterföljande upptag av bildat NO_3^- .
- Övriga baskatjoner och Cl^- härrör huvudsakligen från havssalt.

Relevansen i antagandet att använda SO_4^{2-} minus Ca^{2+} har testats med hjälp av ett depositionsdata där även aciditeten har kvantifierats. Antagandet om att NH_4^+ och NO_3^- deponeras i ungefärligen ekvivalenta mängder har kontrollerats med hjälp av depositionsdata. Data från EMEP (2013) har använts för att få uppgifter om deposition av svavel (S) under perioden 1980-2008 och har aggregerats till medelvärden på länsnivå. Eftersom EMEP-data endast är tillgängliga för 1980-2008, har vi gjort en uppskattning av depositionen för perioderna 1955-1980 och 2008-2010. Vi har antagit att depositionen av S i Sverige under perioderna 1955-1980 och 2008-2010 förändrades på samma sätt, relativt år 1980 respektive 2008, som depositionen beräknad för Gårdsjön i Schöpp *et al.* (2003). Data över deposition av kalcium (Ca^{2+}) har vi fått från SMHI som publicerat data över Ca-deposition i hela Sverige år 1998 (SMHI, 2017). Vi har sammanställt data över varje län och antagit att förhållandet mellan Ca^{2+} och SO_4^{2-} i nederbörden varit detsamma som 1998 under hela tidsperioden 1955-2010. En studie av baskatjon-deposition 1971-89 (Hedin *et al.*, 1994) ger ett visst stöd för antagandet om proportionalitet mellan Ca^{2+} och SO_4^{2-} . Den visar att deposition av S och baskatjoner minskade på ett likartat sätt under den perioden. På en lokal i södra Sverige (Sjöängen, Västergötland) balanserades 54-68 % av minskningen i sulfatdeposition av minskning i deposition av baskatjoner. Ca^{2+} stod för 65 % av den totala minskningen av baskatjoner.

Markens förråd av utbytbara baskatjoner

Det sammanlagda förrådet av utbytbara katjoner i humuslagret och ner till 50 cm djup i mineraljorden har skattats genom beräkningar baserade på data från Markinventeringens omdrev 2003-2012. Beräkningar av katjonförråden baseras på data från 3618 provtagna ytor på skogsmark. Provytor på torvmark har uteslutits.

Provtagning och analys

Jordprov har tagits i fyra markhorisonter. Ett prov i humuslagret och mineraljordsprover från 0-10 cm (M10), 10-20 cm (M20) och 55-65 cm (M65) ner i mineraljorden. Provtagningsmetoden finns beskriven i fältinstruktionen för Riksinventering av Skog (RIS) (SLU). Jordproven har därefter torkats och siktats (< 2mm). Finjordfraktionen har sedan extraherats med 1 M ammoniumacetat vid pH=7 och koncentrationen för Ca, Mg, K och Na analyserats med ICP-spektrometri.

Beräkningar

Mängderna av de fyra baskatjonerna ($i=\text{Ca, Mg, K, Na}$) i humuslagret (BC_h) i mol ha^{-1} har beräknats med ekvationen

$$BC_h = \frac{m_h \sum_{i=1}^4 c_{h,i}}{a_h}$$

där m_b är humusprovets (b) finjordsvikt i kg ha^{-1} , c_b koncentrationen av jonladdningsekvivalenter för utbytbara baskatjoner i $\text{mol}_c \text{kg}^{-1}$ och a_b är arealen för provtagningen (provborrens yta*antalet provstick) i ha. Mängderna av baskatjonerna i mineraljordshorisonerna (BC_{M10} , BC_{M20} , BC_{M65}) har beräknats med ekvationen

$$BC_M = (1 - sv) t_M BD_M 10^{-4} \sum_{i=1}^{n=4} c_{M,i}$$

där t_M är respektive provtagningshorisonts mäktighet i m, sv är markprofilens stenvolymandel, BD_M är skrymdensiteten i kg m^{-3} och c_M är koncentrationen av jonladdningsekvivalenter för utbytbara baskatjoner för Ca, Mg, K och Na i $\text{mol}_c \text{kg}^{-1}$. Skrymdensiteten för mineraljordshorisonerna (BD_M) har beräknats med hjälp av följande pedotransfer funktion (Nilsson and Lundin, 2006)

$$BD_M = 2.07 * d_M + 1546.3 e^{-0.3103\sqrt{c_M}}$$

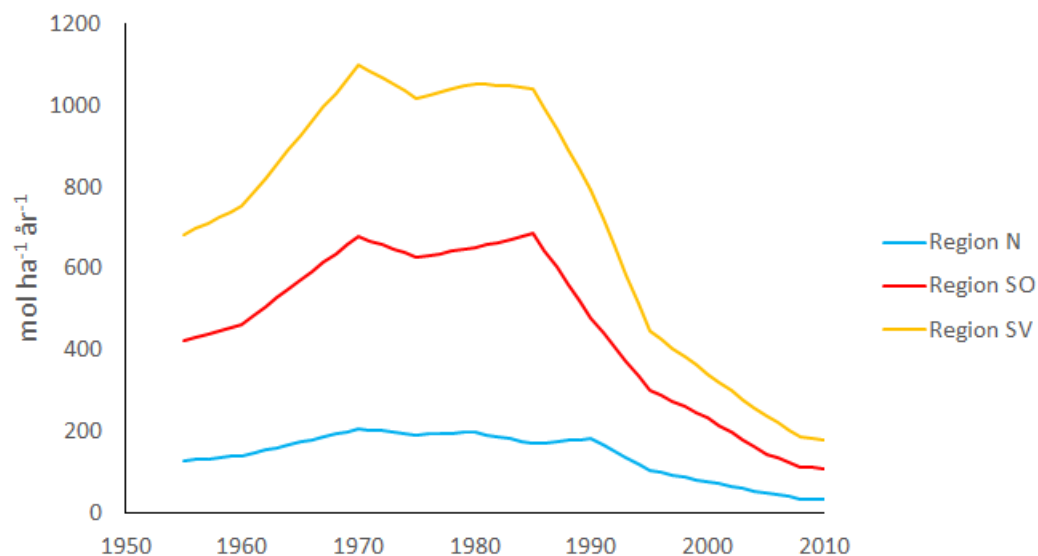
där d_M är medeldjupet för horisonten, och c_M är kolkoncentrationen i horisonten. Stenvolymandelen har bestämts med hjälp av empiriska funktioner baserade på sambandet mellan stenvolymandel, jordart och ytblocksfrekvens (Stendahl et al., 2009). Värdena för baskatjonmängderna i den del av markprofilen som inte provtagits (20 – 50 cm) har sedan interpolerats genom att medelvärden för M20 och M65 provet för baskatjonkoncentrationer, kolhalt och skrymdensitet använts på motsvarande sätt som för de provtagna horisonerna.

Resultat

Nedfallet av sur deposition i Sverige (Figur 2) var högst under 1970- och 80-talen och har minskat drastiskt från 1990-talet och framåt. Det är sydvästra Sverige som har tagit emot de största mängderna sur deposition, följt av sydöstra Sverige och därefter Norrland. När det gäller försurningsbelastning på grund av skogsbruk (förändring i trädbiomassa samt avverkning inklusive GROT-uttag, se *Figur 3*) är även där sydvästra Sverige den del av landet där aciditetstillförseln varit högst. Till skillnad från depositionen, som har minskat med tiden, har försurningsbelastningen orsakad av skogsbruk ökat sedan 1950-talet. Från 1955 till 2010 har försurningsbelastningen i norra Sverige ökat från 96 mol ha⁻¹ år⁻¹ till 142 mol ha⁻¹ år⁻¹, en ökning med 0.85% per år. Motsvarande siffror för sydöstra Sverige är en ökning från 86 mol ha⁻¹ år⁻¹ till 254 mol ha⁻¹ år⁻¹ vilket motsvarar en ökningstakt på 3.6% per år. I sydvästra Sverige har belastningen ökat från 238 mol ha⁻¹ år⁻¹ till 265 mol ha⁻¹ år⁻¹, en ökning på 0.21% år⁻¹. Ser man till hela landet så är ökningen 1.1% år⁻¹. På grund av den stora mellanårsvariationen i avverkning så är det bara trenden i sydöstra Sverige som är statistiskt signifikant.

Beträffande förändringarna i trädbiomassa kan värdet ett enskilt år vara antingen positivt eller negativt, beroende på om tillväxten är högre eller lägre än avverkningen det året. Sett över hela perioden 1955-2010 har dock samtliga trädslag och regioner uppvisat en positiv nettoförändring i trädbiomassa. De enda län där något trädslag har minskat under perioden är Dalarnas och Gotlands län, där förändringen av biomassa för gran varit negativ. I region SV ser man en markant minskning av granbiomassa under 00-talet vilket beror på stormen Gudrun år 2005.

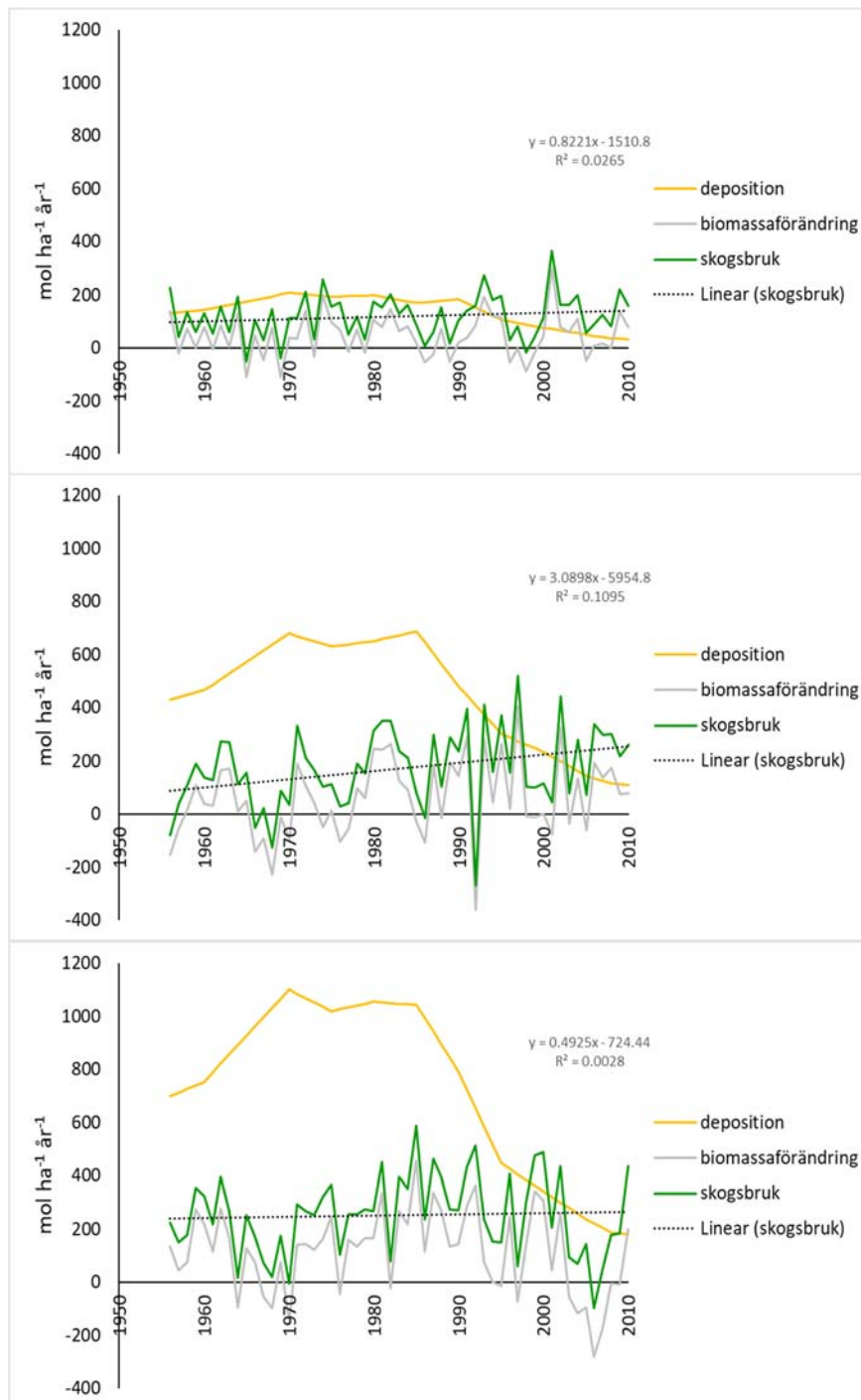
I figur 4 visas den ackumulerade försurningsbelastningen orsakad av skogsbruket under perioden 1955-2010. Såväl nettoökning i trädbiomassa som avverkning, med bortförsl av stamved och GROT, bidrar till förlust av baskatjoner och ökad försurningsbelastning på marken. Det framgår tydligt att försurningsbelastningen från skogsbruket är högst i region SV och lägst i region N. I region N och SO har den försurande effekten av avverkning varit högre än försurningsbelastningen orsakad av nettoökning i trädbiomassa. I region SV har de två typerna av biologisk försurningsbelastning haft ungefär lika stor effekt. Man ser effekten av stormen Gudrun i region SV i och med att avverkningen ökar markant omkring år 2005, med motsvarande minskning i stående biomassa. En jämförelse mellan trädslag visar att avverkning av gran har gett en större tillförsel av aciditet än avverkning av all eller björk. Beträffande aciditetstillförsel på grund av ökning av trädbiomassa har gran varit mer försurande än de andra trädslagen i region SV. I de två andra regionerna har tall, gran och björk haft mer jämnstor försurande effekt på marken. Skillnaden i försurningsbelastning mellan gran och tall beror till viss del på att gran ger en högre försurningsbelastning per avverkad volym, vilket framgår av tabell 1. Ökning av granbiomassa eller skörd av gran med en viss volym ger alltså ett högre katjonuttag från marken än ökning av tallbiomassa eller skörd av tall med samma volym. Det beror på att granen har större barr- och grenbiomassa samt högre baskatjonhalter (Tabell 1). Gran är



Figur 2. Försurningsbelastning på skogsmark genom deposition år 1955-2010 i tre svenska regioner.
Figure 2. Acid deposition on forest land between 1955 and 2010 in three Swedish regions.

också vanligare än tall i södra Sverige vilket leder till att den försurande effekten av gran är högre där.

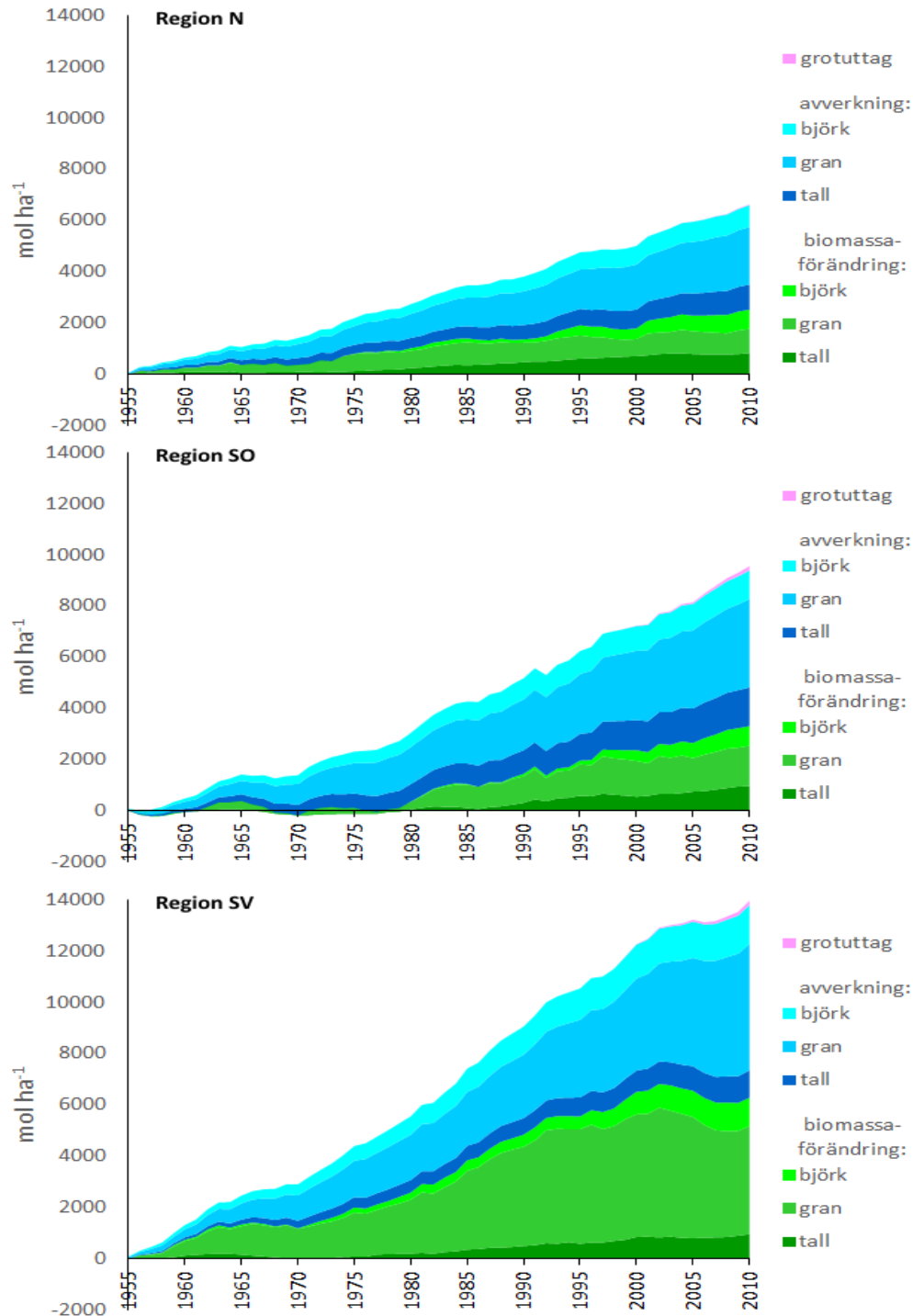
När det gäller björk upptar den en mycket mindre andel av virkesförrådet än tall och gran i Sverige. Av Tabell 1 framgår dock att avverkning av björk leder till ett mycket högre katjonuttag per kubikmeter än avverkning av tall eller gran. Tillväxt av björk orsakar högre katjonuttag per m³ än de två andra trädslagen, vilket förklaras av högre baskatjonhalter i



Figur 3. Aciditetstillförsel till skogsmarken via skogsbruk och deposition. Effekten av skogsbruk visas som total effekt (förändring i stående biomassa plus avverkning inklusive GROT-uttag) samt som effekt av enbart biomassaförändring.

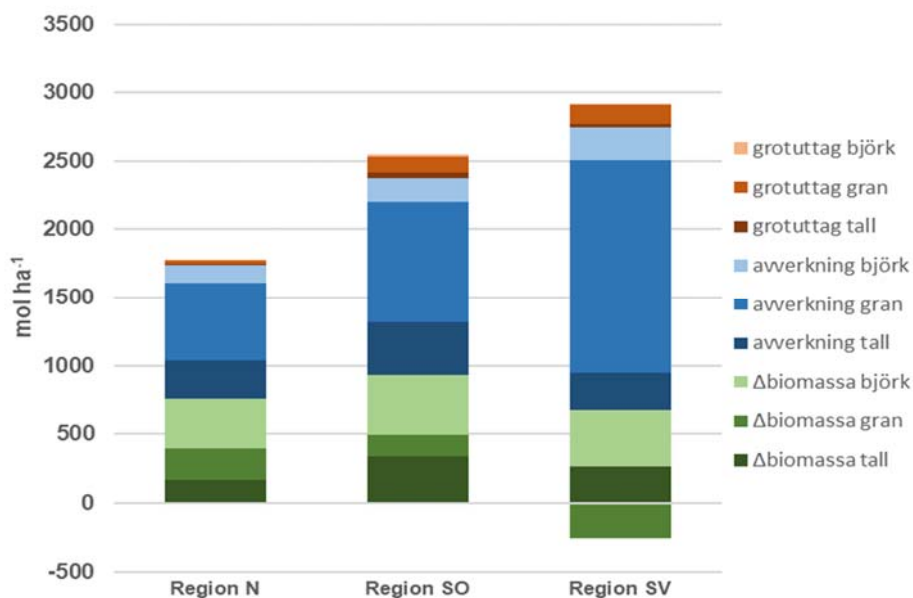
Figure 3. Acidity load to forest land through forestry and atmospheric deposition. The effect of forestry is shown as total effect (change in standing biomass plus logging including harvest residues for bioenergy) and as an effect of change in standing biomass only.

björkens ved (Tabell 1). Det är orsaken till att försurningsbelastningen av björk, utslaget på den totala arealen skogsmark, är jämförbar med försurningsbelastningen orsakad av tall och i vissa fall gran. När det gäller GROT-uttag från alla tre trädslagen tall, gran och björk har det, sedan år 1999, haft en ackumulerad försurande effekt som är marginell i region SV och SO och knappt märkbar i region N (Figur 5). Att den ackumulerade effekten av



Figur 4. Ackumulerad försurningsbelastning på skogsmark pga. förändring i stående biomassa och avverkning 1955-2010 för tall, gran och björk samt totalt GROT-uttag 1999-2010.

Figure 4. Accumulated acidity load on forest land as an effect of change in standing biomass and logging between 1955 and 2010 for Scot's pine, Norway spruce and birch and the total removal of biomass for bioenergy purposes.



Figur 5. Ackumulerat försurningstryck på skogsmark pga. förändring i stående biomassa och avverkning samt GROT-uttag 1999-2010. Negativa värden på Δ biomassa innebär att avverkningen varit större än tillväxten.

Figure 5. Accumulated acidity load on forest land as an effect of change in standing biomass and logging between 1999 and 2010 for Scot's pine, Norway spruce and birch including the total removal of biomass for bioenergy purposes. Negative values on Δ biomass implies that harvest is higher than growth.

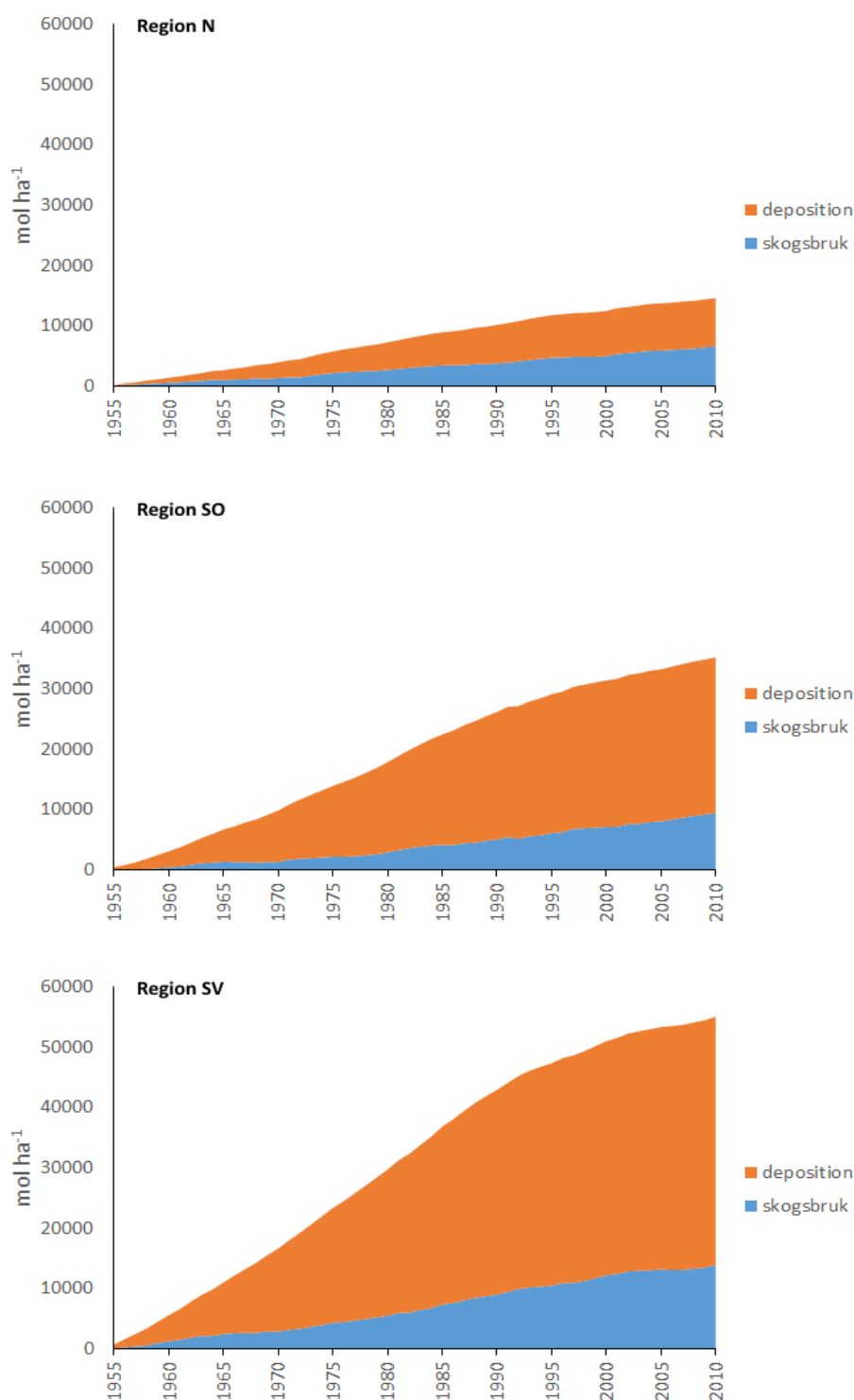
GROT-uttag är så liten beror dock på att GROT har tagits ut under förhållandevis kort tid. I absoluta tal var den ackumulerade försurningsbelastningen mellan 1999 och 2010 på grund av GROT-uttag något mindre än effekten av avverkning av björk eller tall i region SV och SO. I region N var katjonuttaget på grund av GROT-uttag fortfarande avsevärt lägre än uttaget av katjoner vid avverkning av björk eller tall.

Figur 6 visar den ackumulerade totala försurande effekten på skogsmark av skogsbruk (tall + gran + björk) respektive deposition. I södra Sverige (region SV och SO) har effekten av deposition varit mångdubbelt större än effekten av skogsbruk under perioden 1955-2010, medan skogsmark i norra Sverige (region N) har påverkats på mer jämförbara nivåer av de båda aciditetskällorna. Det är uppenbart, framför allt i region SV, att försurningsbelastningen var högst fram till ungefär 1990 för att därefter ha minskat på grund av den minskade depositionen.

Försurningsbelastningen under de gångna decennierna har gett en tydlig effekt på skogsmarkens försurningsstatus. I figur 7 visas en graf över andel försurad skogsmark som funktion av ackumulerad försurningsbelastning 1955-2008. Skogsmark anses försurad, i den här studien, om pH-H₂O är mindre än 4,5 i B-horisonten eller mindre än 4,75 i C-horisonten. Den ackumulerade försurningsbelastningen är lägst i norra Sverige och ökar längre söderut. Likaså är andelen försurad mark lägst i norr och ökar ju längre söderut man

Tabell 1. Nettokatjonupptag per m³sk producerat virke för tall, gran respektive björk
Table 1. Net cation uptake per m³ produced wood for Scot's pine, Norway spruce and birch

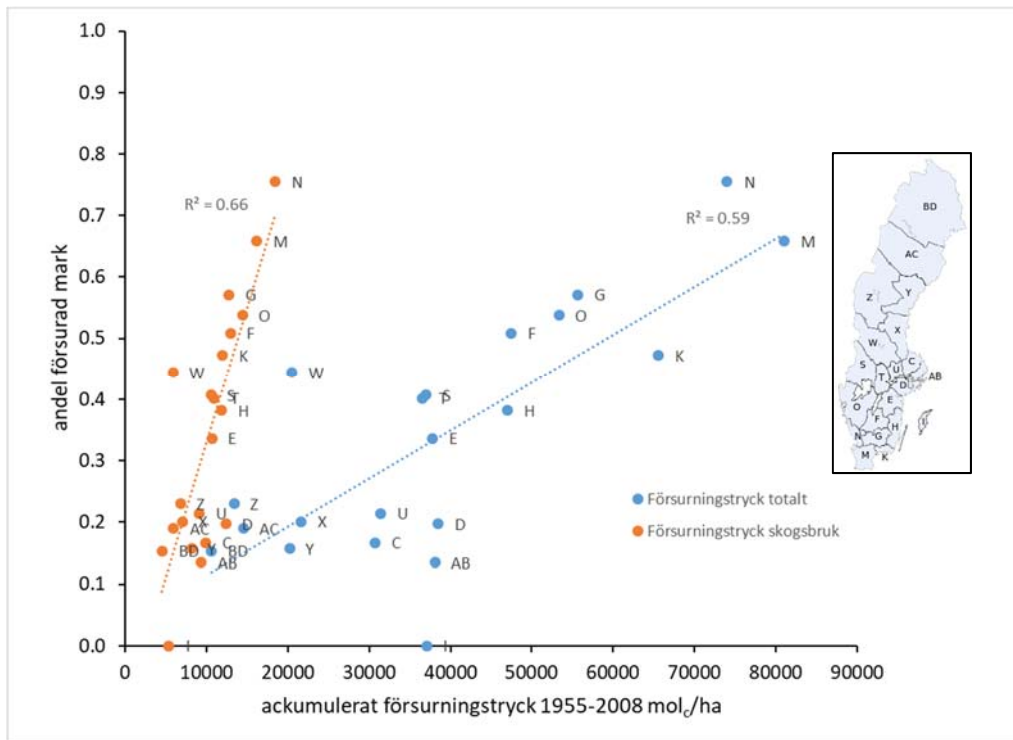
	Tall	Gran	Björk
	mol m ⁻³ sk		
Stamved	22	36	74
GROT	31	84	40
Stubbar	6	9	22
Total	59	129	140



Figur 6. Ackumulerad försurningsbelastning på skogsmark pga. deposition respektive skogsbruk.

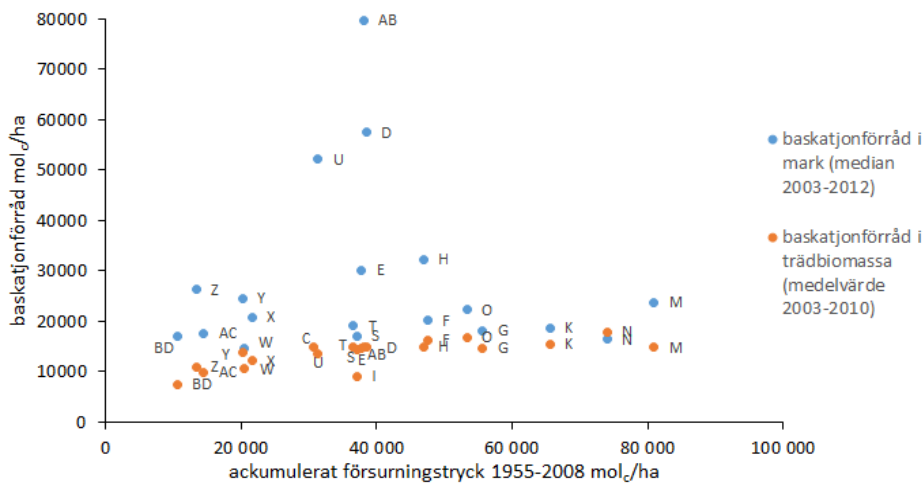
Figure 6. Accumulated acidity load on forest land as an effect of acid deposition and forestry.

kommer. Sambandet mellan andel försurad mark och försurningsbelastning är förhållandevis linjär, såväl för den totala försurningsbelastningen som för den del som skogsbruket står för. Undantag utgörs av län som har en hög andel kalkrik berggrund, framför allt Gotland (I) där andelen försurad mark är lika med noll, och på den andra änden av skalan områden som har en hög andel svårvittrad berggrund som Dalarna (W).



Figur 7. Andel försurad skogsmark som funktion av ackumulerad försurningsbelastning 1955-2008 från skogsbruk (orange) samt total försurningsbelastning (blå).

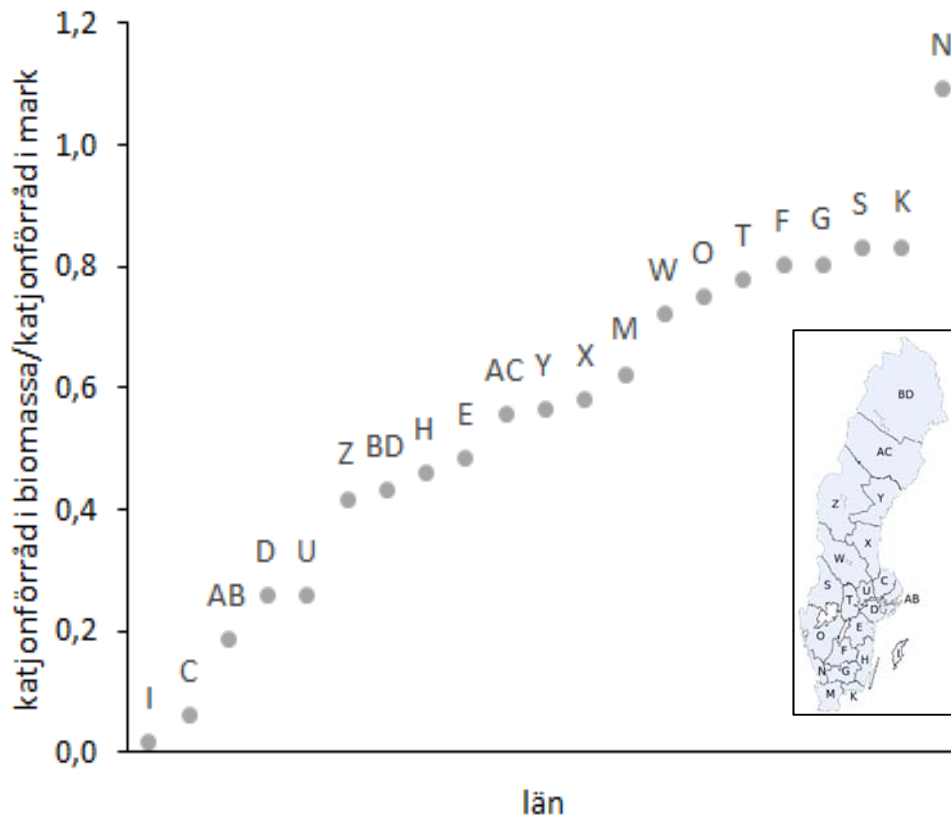
Figure 7. Proportion of acidified forest soils as a function accumulated acidity load 1955 to 2008 from forestry (orange) and total acidity load (blue).



Figur 8. Baskatjonförråd i skogsmark respektive trädbiomassa som funktion av ackumulerad försurningsbelastning 1955-2008 för varje län. För baskatjonförråd i mark visas ej Gotlands län ($480\ 000\ \text{mol}_c\ \text{ha}^{-1}$) och Uppsala län ($240\ 000\ \text{mol}_c\ \text{ha}^{-1}$) i grafen.

Figure 8. Amount of base cation equivalents in soil (blue) and biomass (orange) as a function of accumulated acidity load by county. Two counties, Gotland (I) and Uppsala (C), with very high levels in soils ($480\ 000$ and $240\ 000\ \text{mol}_c\ \text{ha}^{-1}$, respectively) are omitted in the figure. 8

Förrådet av baskatjoner i mark och i trädbiomassa, relaterat till försurningsbelastningen 1955-2008, visas i figur 8. Beträffande förråden i mark är det framför allt de län som har en hög andel kalkrik berggrund som har höga förråd. Länen i sydvästra Sverige, där försurningsbelastningen har varit högst, har låga värden på baskatjoner i mark, men det har en del län i mellersta och norra Sverige också. En orsak till de låga markförråden i norra Sverige, där depositionen har varit låg, är att jordarna i norr generellt har lägre kolförråd än i söder, vilket ger lägre katjonbyteskapacitet. I figur 9 visas kvoten (baskatjoner i biomassa)/(baskatjoner i mark) för varje län. Det är länen med inslag av kalkrik berggrund som har lägst kvot och länen i sydväst, med högst ackumulerad försurningsbelastning, som har högst kvot.



Figur 9. Kvoten mellan baskatjonförråd i trädbiomassa och baskatjonförråd i mark för alla län i Sverige, ordnade från lägsta till högsta.

Figure 9. The ratio between the amount of base cations in tree biomass and the exchangeable soil pool for all counties in Sweden arranged from lowest to highest.

Diskussion

Skogsbrukets bidrag till försurningsbelastningen i skogsmark är idag i samma storleksordning som depositionen av försurande ämnen. Detta beror inte i första hand på att skogsbrukets bidrag har ökat utan att depositionen av försurande ämnen har minskat sedan 1980-talet. I sydvästra Sverige är den försurande depositionen idag mindre än 20 % av vad den var i mitten av 1980-talet; depositionen under 2010 var också avsevärt lägre än depositionen var 1955.

Det har också skett en ökning av skogsbrukets bidrag till försurningsbelastning över tid, men den förändringen är betydligt mindre drastisk än den förändring som har skett för depositionen. I den här rapporten har vi försökt kvantifiera det samlade bidraget till försurningsbelastningen från deposition och skogsbruk från 1955 till 2010. Skogsbrukets bidrag har delats upp i två delar: en del som utgörs av den försurningsbelastning som skett genom att volymen stående skogsbiomassa har ökat och en annan del som utgörs av den bortförsel av skördeprodukter som har skett på grund av avverkning. När det gäller ökningen i skogsbiomassa så vet vi, år för år, hur mycket den har ökat eller minskat och kan beräkna den försurningsbelastning som förändringen i biomassa bidragit med vid den aktuella tidpunkten. De två typerna av försurningsbelastning från skogsbruket skiljer sig principiellt åt. Bortförsel av biomassa vid avverkning blir en fullt ut realiserad försurningsbelastning medan tillförseln av vätejoner på grund av ökningen av den stående biomassan delvis kommer att neutraliseras när skörderester bryts ner efter avverkningen. När det gäller avverkningens bidrag till aciditeten i marken så utgörs den av en aggregerad försurningsbelastning som skett under hela det avverkade beståndets livstid. Försurningen äger alltså inte rum vid avverkningsåret, utan då träden växer. Eftersom avverkning sker kontinuerligt har vi lagt effekten av avverkningen det aktuella avverkningsåret. Det är en förenkling eftersom avverkningsnivåerna varierar betydligt och de har även ökat över tid. Man bör därför inte fästa någon uppmärksamhet vid stora mellanårsvariationer som beror på årliga variationer i avverkningen utan fokusera på de långsiktiga trenderna.

Tidigare studier av skogsbrukets försurningsbelastning har främst fokuserat på bortförsel av stamved, GROT och stubbar (Iwald et al., 2013). Resultaten från den här studien visar att den ökande mängden stående biomassa i svenska skogar också har gett ett betydande bidrag till försurningsbelastningen genom upptag och upplagring av baskatjoner i träden. Den är av ungefär samma storleksordning som den aciditetstillförsel som orsakas av bortförsel av biomassa genom avverkning. Det ökade uttaget av skogsbränsle genom skörd av grenar och toppar, GROT, har på beståndsnivå i flera studier uppmärksamats som en drivkraft för ökad biologisk försurning (Akselsson et al., 2007; Brandtberg and Olsson, 2012; Löfgren et al., 2017; Zetterberg et al., 2013). Ser man till den totala biomassatillväxten och -skörden utgör uttaget av GROT en relativt liten del av den totala försurningsbelastningen på landskapsnivå. Det beror på att GROT inte tas ut på all avverkad areal. Däremot utgör den fraktionen en betydande del av uttaget genom skörd i det enskilda beståndet där GROT-uttag görs (Iwald et al., 2013). Resultaten från den här studien representerar det faktiska GROT-uttaget som skett i skogslandskapet på länsnivå, vilket innebär att tillståndet inte behöver återspegla effekterna på beståndsnivå där det fortfarande kan vara problem med näringstillgången och behov av kompensation i form av t.ex. askåterföring.

Flera tidigare studier har visat att det finns en tydlig geografisk gradient i markens syrabasstatus (Karlton, 1994; Karlton et al., 2003) vilket också stöds av våra resultat i den här rapporten. Mot bakgrund av den kvantitativt betydande försurningsbelastningen orsakad genom deposition är det troligt att den främst är en effekt av deponerad aciditet men eftersom skogens tillväxt varierar över landet på ungefär samma sätt som depositionen är det svårt att separera effekterna av dessa bidrag från varandra. Depositionen kan främst förväntas påverka tillståndet i C-horisonten medan den biologiska försurningen ger effekter främst i de övre markhorisonterna.

Förrådet av baskatjoner i biomassan per hektar varierar som förväntat ganska lite över landet. De län som har lägre förråd är de nordligaste länen, samt Gotland vilket beror på att skogarna i dessa län är glesare. Det totala förrådet av utbytbara baskatjoner i marken varierar däremot mycket. Variationen hänför sig främst till markens mineralogi som i sin tur påverkas av berggrunden. Län som har inslag av kalksten eller andra basiska sedimentära bergarter i berggrunden eller där det finns transporterade moräner och sediment med basrika mineral har ofta stora förråd av baskatjoner. Det gäller till exempel Gotlands län (I), Kalmar län med Öland (H), Östergötlands län (E), Stockholms län (AB), Uppsala län (C), Södermanlands län (D) och Jämtland (Z). De låga förråden i de norra landsdelarna beror på att markens förmåga att lagra katjoner, katjonbyteskapaciteten, är

mindre på grund av lägre förråd av organiskt material i marken. De län som ligger i områden där försurningsbelastningen har varit hög har inte exceptionellt låga förråd av baskatjoner men har en förhållandevis större andel bundet i biomassan än i marken. Hallands län (N) är det enda länet som har större förråd av baskatjoner i biomassan än det utbytbara förrådet i marken. Att Halland avviker så markerat beror på att länet har ett av de lägsta markförråden i kombination med det högsta förrådet av baskatjoner i biomassa av alla län. Halland är även det län som haft störst belastning av surt nedfall. Målet för den svenska energipolitiken är ett ekologiskt och ekonomiskt långsiktigt hållbart energisystem baserat på en stor andel förnybara energikällor (Miljödepartementet, 2017). Det har även föreslagits att andelen löv bör ökas för att öka den biologiska mångfalden och för att minska försurningen av mark och vatten (Naturvårdsverket, 2012). Varje form av ökat uttag av GROT kommer långsiktigt att leda till ett permanentande av en begränsad mängd aciditet i marken. Effekterna av detta kommer sannolikt att vara små på beståndsnivå eftersom ökningen av aciditet i marken är mycket liten jämfört med stamvedsuttag och den aciditet som redan ligger lagrad där. Om man dessutom antar en fortsatt ökning av den stående biomassan minskar den relativa betydelsen av grotuttaget ytterligare. Ökad plantering av t.ex. björk leder också till att tillförseln av vätejoner till marken ökar under björkens tillväxt. Alternativet till att plantera björk utgörs vanligtvis av gran (båda trivs bäst på bördig mark), vars försurande inverkan är nästan lika stor, vilket också innebär små skillnader för markens surhetstillstånd. Effekterna kommer att vara ännu mindre sett över större arealer eftersom uttaget av grot respektive plantering av björk i ett kortare tidsperspektiv endast kommer att ske på begränsade arealer. Sett i ett längre tidsperspektiv över flera skogsgenerationer skulle man på beståndsnivå eventuellt kunna mäta skillnad i markkemin mellan områden med enbart stamvedsuttag kontra de där även GROT tagits ut. Sett över större områden påverkas den möjligheten av hur den stående biomassan utvecklas på angränsande bestånd. Fortsätter den att öka minskar möjligheten att påvisa effekter av GROT-uttag. På motsvarande sätt skulle plantering av björk istället för gran kunna observeras på beståndsnivå, men där är det troligtvis granbeståndet som skulle uppvisa surare övre markskikt (O, E och övre B) eftersom gran ger en kraftigare zoneringsprofil på grund av mindre bioturbation.

Slutsatser

De stora förändringarna i försurningsbelastning sedan 1950-talet har skett genom förändringar i depositionen, först genom en stor uppgång från 1950-talet till början av 1990-talet och sedan genom en ännu snabbare nedgång under 1990- och 2000-talen. Skogsbrukets bidrag till försurningsbelastningen har under hela tidsperioden ökat genom ökad bortförsel vid avverkning och ökat upptag i stående biomassa. Ökningen är relativt måttlig och förändringarna är små i förhållande till de förändringar som har skett i den totala försurningsbelastningen.

Det ökade uttaget av GROT har ökat försurningsbelastningen, främst i sydvästra och sydöstra Sverige där uttaget är störst, men är totalt sett en mindre del av den skogsbruksrelaterade försurningsbelastningen.

Medan den totala försurningsbelastningen uppvisar en tydlig geografisk trend så saknas den för förrådet av utbytbara baskatjoner i marken. Det varierar mer på grund av markens egenskaper och geologiska förutsättningar än med försurningsbelastningen. Skogar i försurningsbelastade områden med basfattig mineralogi har en högre andel av baskatjonförrådet i biomassan jämfört med marken än områden med lägre försurningsbelastning.

Referenser

- Akselsson, C., Westling, O., Sverdrup, H., and Gundersen, P. (2007). Nutrient and carbon budgets in forest soils as decision support in sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* **238**, 167-174.
- Alriksson, A., and Eriksson, H. M. (1998). Variations in mineral nutrient and C distribution in the soil and vegetation compartments of five temperate tree species in NE Sweden. *Forest Ecology and Management* **108**, 261-273.
- Belyazid, S., Westling, O., and Sverdrup, H. (2006). Modelling changes in forest soil chemistry at 16 Swedish coniferous forest sites following deposition reduction. *Environ Pollut* **144**, 596-609.
- Björkroth, G., and Rosén, K. (1977). "Biomassa och näringsmängder på fyra ståndorter." Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Umeå (in Swedish).
- Brandtberg, P. O., and Olsson, B. A. (2012). Changes in the effects of whole-tree harvesting on soil chemistry during 10 years of stand development. *Forest Ecology and Management* **277**, 150-162.
- Christiansen, L. (2014). "Skogsstatistisk årsbok 2014," Skogsstyrelsen, Jönköping.
- EMEP (2013). European Monitoring and Evaluation Programme. In "<http://www.emep.int/index.html>".
- EMEP (2016). WebDab search - Trends of emissions as used in EMEP models.
- Eriksson (pers. comm.), H. (2012).
- Eriksson, H. M., and Rosen, K. (1994). Nutrient distribution in a Swedish tree species experiment. *Plant and Soil* **164**, 51-59.
- Ferm, M., Granat, L., Engardt, M., Pihl Karlsson, G., Danielsson, H., Karlsson, P. E., and Hansen, K. (2019). Wet deposition of ammonium, nitrate and non-sea-salt sulphate in Sweden 1955 through 2017. *Atmospheric Environment: X* **2**, 1-10.
- Fölster, J., and Wilander, A. (2002). Recovery from acidification in Swedish forest streams. *Environmental Pollution* **117**, 379-389.
- Hägermark, I., Grundén, N., and Eriksson, S. (2002). Skog & miljö : miljöbeskrivning av skogsmarken i Söderhamns kommun. Rapport 2002:12, Skogsstyrelsen, Jönköping (in Swedish).
- Hedin, L. O., Granat, L., Likens, G. E., Buishand, T. A., Galloway, J. N., Butler, T. J., and Rodhe, H. (1994). Steep declines in atmospheric base cations in regions of Europe and North America. *Nature* **367**, 351-354.
- Iwald, J., Löfgren, S., Stendahl, J., and Karlton, E. (2013). Acidifying effect of removal of tree stumps and logging residues as compared to atmospheric deposition. *Forest Ecology and Management* **290**, 49-58.
- Karlsson, G. P., Akselsson, C., Hellsten, S., and Karlsson, P. E. (2011). Reduced European emissions of S and N - Effects on air concentrations, deposition and soil water chemistry in Swedish forests. *Environmental Pollution* **159**, 3571-3582.
- Karlton, E. (1994). Principal geographic variation in the acidification of Swedish forest soils. *Water, Air, and Soil Pollution* **76**, 353-362.
- Karlton, E., Stendahl, J., and Lundin, L. (2003). Acid-base status and changes in Swedish forest soils. *Kungl Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift* **142**, 31-36.
- Löfgren, S., Ågren, A., Gustafsson, J. P., Olsson, B. A., and Zetterberg, T. (2017). Impact of whole-tree harvest on soil and stream water acidity in southern Sweden based on HD-MINTEQ simulations and pH-sensitivity. *Forest Ecology and Management* **383**, 49-60.
- Mälkönen, E. (1978). Annual primary production and nutrient cycle in a birch stand. *Commun. Inst. For. Fenn.* **91**, 1-35.
- Mälkönen, E., and Saarsalmi, A. (1982). Hieskoivikon biomassatuotos ja ravinteiden menetykset kokopuun korjuussa. Summary: Biomass production and nutrient removal in whole tree harvesting of birch stands. *Folia Forestalia* **534**, 17.

- Marklund, L. G. (1988). Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch (*Betula verrucosa* B. *pendula* and *B. pubescens*) in Sweden. In "Rapport 45 - Institutionen for Skogstaxering, Sveriges Lantbruksuniversitet".
- Miljödepartementet (2017). Energipolititikens inriktning. Vol. 2017/18:228. Miljödepartementet, Stockholm.
- Naturvårdsverket (2012). "Steg på vägen. Fördjupad utvärdering av miljömålen 2012," Rep. No. 6500.
- Naturvårdsverket (2016). Bara naturlig försurning - Försurad skogsmark.
- Nilsson, L. O., and Wiklund, K. (1994). Nitrogen uptake in a Norway spruce stand following ammonium-sulfate application, fertigation, irrigation, drought and nitrogen-free fertilization. *Plant and Soil* **164**, 221-229.
- Nilsson, L. O., and Wiklund, K. (1995). Nutrient balance and P, K, Ca, Mg, S and B accumulation in a Norway spruce stand following ammonium-sulfate application, fertigation, irrigation, drought and N-free fertilization. *Plant and Soil* **168**, 437-446.
- Nilsson, T., and Lundin, L. (2006). "Uppskattning av volymvikten i svenska skogsjordar från halten organiskt kol och markdjup." Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Schöpp, W., Posch, M., Mylona, S., and Johansson, M. (2003). Long-term development of acid deposition (1880-2030) in sensitive freshwater regions in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* **7**, 436-446.
- Skogsstyrelsen (1999-2013). Skogsstatistisk årsbok. Skogsstyrelsen, Jönköping.
- SLU (2017). Riksskogstaxeringen. SLU, Umeå.
- SMHI (2017). Kartläggning lufthalt och deposition.
- Stendahl, J., Lundin, L., and Nilsson, T. (2009). The stone and boulder content of Swedish forest soils. *Catena* **77**, 285-291.
- Werkelin, J. (2006). Ash-forming elements and their chemical forms in woody biomass fuels. PhD, Åbo Academy, Åbo, Finland.
- Werkelin, J., Skrifvars, B. J., and Hupa, M. (2005). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: Summer harvest. *Biomass & Bioenergy* **29**, 451-466.
- Werkelin, J., Skrifvars, B. J., Zevenhoven, M., Holmbom, B., and Hupa, M. (2010). Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel* **89**, 481-493.
- Zetterberg, T., Olsson, B. A., Löfgren, S., von Brömssen, C., and Brandtberg, P. O. (2013). The effect of harvest intensity on long-term calcium dynamics in soil and soil solution at three coniferous sites in Sweden. *Forest Ecology and Management* **302**, 280-294.