



rappport

IVL Svenska Miljöinstitutet AB

Återhämtning av försurad skogsmark med olika uttag av biomassa

Filip Moldan, Bibbi Manngård och Olle Westling

B 1424

Göteborg och Aneboda, augusti 2001

| | |
|--|---|
| Organisation/Organization IVL Svenska Miljöinstitutet AB IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd. | RAPPORTSAMMANFATTNING Report Summary |
| Adress/address Box 47086 402 58 Göteborg | Projekttitel/Project title Anslagsgivare för projektet/ Project sponsor IVLs samfinansierade program Elforsk Energimyndigheten |
| Telefonnr/Telephone 031 725 62 00 | Rapportförfattare/author Filip Moldan, Bibbi Manngård och Olle Westling |
| Rapportens titel och undertitel/Title and subtitle of the report Återhämtning av försurad skogsmark med olika uttag av biomassa | |
| Sammanfattning/Summary <p>IVL har beskrivit effekter av fem olika scenarier för framtida skogsbruk under en skogsgeneration på markens och avrinningens återhämtning från försurning. Studien har utförts med hjälp av den dynamiska datamodellen MAGIC. Beräkningarna har tillämpats på välstuderat skogsbestånd i norra Skåne med försurad mark och bördig granskog som är representativt för sydvästra Sverige. Skogsmarken på den studerade lokalen försurades kraftigt under en period i mitten av 1900-talet med ökande deposition av försurande luftföroreningar, i synnerhet svavel, enligt modellberäkningarna. Samtidigt etablerades dessutom ett bördigt granbestånd som med tiden ökade upptaget av baskatjoner, vilket bidrog till markförsurningen. Den kraftigt minskade depositionen av svavel efter 1980 gav ett utrymme för en återhämtning från försurning, indikerat av stigande ANC och minskande halter av oorganiskt aluminium i markvatten, som kommer att vara märkbar under de närmaste decennierna oavsett typen av skogsbruk. Enligt beräkningarna planar återhämtningen därefter ut på en nivå som är långt från utgångsläget för mer än 100 år sedan med avseende på surhetstillstånd.</p> <p>Modellberäkningarna visar att kombinationen deposition och växande skog har resulterat i ett underskott av baskatjoner på 36 mekv/m² och år under perioden 1850 till 2015. Motsvarande framtida underskott med lägre deposition, men med effekter av skogsbruk med hög intensitet (uttag av stamved och GROT inklusive barr), kan beräknas till 15 mekv/m² och år under perioden 2015 till 2085 (en omloppstid) utan kompensationsgödsling. Mängden kvarlämnade avverkningsrester har stor betydelse för den långsiktiga balansen av baskatjoner i skogsmarken enligt beräkningarna i denna studie. Skillnaden i genomsnittliga nettoförluster i nästa skogsgeneration från år 2015 i den studerade skogsytan beräknades variera mellan 4 och 15 mekv/m² och år beroende på avverkningsalternativ utan kompensationsgödsling. Denna studie indikerar att skogsbruk med uttag av GROT, men även enbart uttag av stamved, kan motverka en återhämtning från försurning. Kompensationsgödsling kan minska denna påverkan och sannolikt ytterligare motverka försurning om dosen ökas så att den även motsvarar uttaget av stamved.</p> | |
| Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren /Keywords Skogsmark, försurning, skogsavverkning, biobränslen, deposition, återhämtning, kompensationsgödsling, biogeokemiska modeller | |
| Bibliografiska uppgifter/Bibliographic data IVL Rapport/report B 1424 | |
| Beställningsadress för rapporten/Ordering address IVL, Publikationsservice, Box 21060, S-100 31 Stockholm fax: 08-598 563 90, e-mail: publicationservice@ivl.se | |

Innehåll

| | |
|---|-----------|
| Sammanfattning | 3 |
| Summary | 4 |
| Inledning | 5 |
| Bakgrund | 5 |
| Markens historiska försurning | 5 |
| Nedfallets försurande inverkan och avtal om minskningar av luftföroreningar | 6 |
| Skogens tillväxt och markförsurning | 7 |
| Skogsbrukets uttag och markförsurning | 8 |
| Markens återhämtning | 8 |
| Studiens syfte | 9 |
| Modellbeskrivning | 9 |
| Lokalen | 9 |
| Scenarios..... | 9 |
| Kalibrering av MAGIC..... | 11 |
| Beräkning av massbalans för baskatjoner | 12 |
| Skogens upptag..... | 12 |
| Baskatjoninnehåll i olika träddelar | 13 |
| Askans baskatjoner | 14 |
| Beräkning av vittring | 15 |
| Resultat | 16 |
| De modellberäknade resultatens spridning..... | 16 |
| Beräkningar av det framtida skogsbrukets påverkan..... | 18 |
| Basmättnad efter år 2015 | 19 |
| Avrinningens sammansättning efter år 2015 | 21 |
| Baskatjonbalans i marken under åren 1850 till 2085..... | 24 |
| Baskatjonbalans med fullständig kompensation för uttag | 26 |
| Slutsatser och diskussion | 28 |
| Modellberäkningarnas osäkerhet | 28 |
| Effekter av minskad belastning av luftföroreningar | 29 |
| Effekter av skogens tillväxt och skörd..... | 30 |
| Effekter av askåterföring och kvarlämnade avverkningsrester..... | 31 |
| Referenser | 32 |

Sammanfattning

IVL har beskrivit effekter av fem olika scenarier för framtida skogsbruk under en skogsgeneration på markens och avrinningens återhämtning från försurning. Studien har utförts med hjälp av den dynamiska datamodellen MAGIC. Beräkningarna har tillämpats på välstuderat skogsbestånd i norra Skåne med försurad mark och bördig granskog som är mycket vanligt i sydvästra Sverige.

Skogsmarken på den studerade lokalen försurades kraftigt under en period i mitten av 1900-talet med ökande deposition av försurande luftföroreningar, i synnerhet svavel, enligt modellberäkningarna. Samtidigt etablerades dessutom ett bördigt granbestånd som med tiden ökade upptaget av baskatjoner, vilket bidrog till markförsurningen. Den kraftigt minskade depositionen av svavel efter 1980 gav ett utrymme för en återhämtning från försurning, indikerat av stigande ANC och minskande halter av oorganiskt aluminium i markvatten, som kommer att vara märkbar under de närmaste decennierna oavsett typen av skogsbruk. Enligt beräkningarna planar återhämtningen därefter ut på en nivå som är långt från utgångsläget för mer än 100 år sedan med avseende på surhetstillstånd.

Modellberäkningarna visar att kombinationen deposition och växande skog har resulterat i ett underskott av baskatjoner på 36 mekv/m² och år under perioden 1850 till 2015. Motsvarande framtida underskott med lägre deposition, men med effekter av skogsbruk med hög intensitet (uttag av stamved och GROT inklusive barr), kan beräknas till 15 mekv/m² och år under perioden 2015 till 2085 (en omloppstid) utan kompensationsgödslning.

Mängden kvarlämnade avverkningsrester har stor betydelse för den långsiktiga balansen av baskatjoner i skogsmarken enligt beräkningarna i denna studie. Skillnaden i genomsnittliga nettoförluster i nästa skogsgeneration från år 2015 i den studerade skogsytan beräknades variera mellan 4 och 15 mekv/m² och år beroende på avverkningsalternativ utan kompensationsgödslning. Denna studie indikerar att skogsbruk med uttag av GROT, men även enbart uttag av stamved, kan motverka en återhämtning från försurning. Kompensationsgödslning kan minska denna påverkan och sannolikt ytterligare motverka försurning om dosen ökas så att den även motsvarar uttaget av stamved.

Modellberäkningar av försurningsutveckling med olika typer av skogsbruk har vissa osäkerheter som beror på säkerheten i ingångsdata, gjorda antaganden och modellens förmåga att beskriva dynamiska förlopp. I denna studie införs fler moment i modellberäkningarna som teoretiskt kan öka osäkerheten; den långa tidsrymden i prognosen, effekter av uttag av biomassa och kvarlämnade avverkningsrester samt kompensationsgödslning i form av aska. Trots det visar resultaten på en metod för att skapa underlag för bedömningar av möjligheterna att underlätta återhämtning från försurning med anpassat skogsbruk, samt även behovet av ytterligare minskning av utsläppen av luftföroreningar utöver de nuvarande internationella avtalen. Metoden behöver dock utvecklas och tillämpas vidare för att generalisera resultaten.

Summary

IVL has described the effects of five scenarios of future forest management on recovery from acidification of soil and run off during a rotation. The study was conducted by use of the dynamic model MAGIC. The calculations were applied on a forest site in the South part of Sweden with acidified soil and a productive spruce forest, which is common in the Southwest part of Sweden.

The soil of the studied site was acidified several decades ago when the emissions of air pollutants in Europe, especially sulphur, increased according to the model calculations. At the same time a productive spruce forest was established, which also contributed to the acidification by cation uptake and ion exchange with H^+ . The reduction of the emissions of sulphur after 1980 enabled a recovery process, indicated by, for example, increased ANC and decreased concentrations of inorganic aluminium in soil water. But the recovery will not be complete and the achieved degree of recovery will be depending of the type of forest management according to the calculations.

The model calculations show that the combination between deposition of air pollutants and growing forests have resulted in a yearly net loss of 36 meq/m^2 of base cations (resulting in soil acidification) from the soil during the period 1850 to 2015. The future yearly net loss of base cations, with lower deposition, could reach 15 meq/m^2 with whole tree harvesting (including needles) during one rotation between 2015 and 2085. The amount of branches, tops and needles left after clearcutting and thinning contribute to the variation between 4 and 15 meq/m^2 in average yearly net loss of base cations from the soil depending of the amount of biomass removed by harvest.

The model calculations of the historic and future development of acidification in this study involve several sources of uncertainty. The long time span, assumed removal of biomass by harvest and compensatory fertilisation contributes to the uncertainties. In spite of that the method has proved to be a valuable tool to assess the need of additional reductions of emissions of air pollutants and also the impact of different forest management methods on future soil and water acidification. But the method need to be further developed and applied to assess the role of acidifying air pollutants in relation to forest management for recovery in acidified areas.

Inledning

Försurningen av mark och vatten uppmärksammades på allvar i Sverige i slutet av 1960-talet (Staafl, 1996). Orsaken till försurningen är till stor del luftföroreningar (svaveldioxid och kväveoxid), främst från förbränning av fossila bränslen. En gradient med minskande deposition sträcker sig från södra Sverige till norra. Depositionen av starka syror leder till utlakning av kationer (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ och K^+) från markens utbytbara förråd genom jonbyte, samt en tillförsel av aciditet. Den förhöjda utlakningen av kationer sker genom en uttransport tillsammans med rörliga anjoner, främst sulfat.

Skogsbruk bidrar också till markförsurning genom upptag av näringsämnen (och tillförsel av aciditet) som delvis övergår i en permanent förlust då träden avverkas och biomassa förs bort. Stor tillförsel av aciditet från luftföroreningar och skogsbruk, jämfört med tillskott av syraneutraliserande förmåga i form av deposition av alkali och vittring, kan sänka markens basmättnadsgrad. Det innebär att andelen kationer i procent av alla utbytbara kationer minskar medan väte- och aluminiumjoner i marklösning och på markpartiklar ökar.

Depositionen av starka syror har minskat kraftigt de senaste 15 åren på grund av utsläppsbegränsningar i hela Europa (Warfvinge & Bertills, 2000). Detta ger möjlighet till en återhämtning från försurning som dock kan vara långsam på grund av att olika markkemiska processer fördröjer förloppet. Även skogsbrukets framtida tillförsel av aciditet har sannolikt stor betydelse för återhämtningen. Hur stor påverkan blir, med teoretiska utgångspunkter, beror främst på biomassauttagets storlek samt om någon form av kompensationsgödning utförs. Denna studie beräknar effekter av flera olika scenarier för framtida skogsbruk under en skogsgeneration på markens och avrinningens återhämtning från försurning. Dessutom beskrivs ett troligt historiskt försurningsförlopp under 150 år fram till i dag. Beräkningarna har utförts i ett välstuderat skogsbestånd med försurad mark och bördig granskog som är representativt för sydvästra Sverige. Resultaten utgör ett underlag för bedömningar av möjligheterna att underlätta återhämtning från försurning med anpassat skogsbruk, samt även behovet av ytterligare minskning av utsläppen av luftföroreningar utöver de nuvarande internationella avtalen.

Studien har finansierats av IVLs samfinansierade forskningsprogram, med Elforsk som näringslivsintressent, samt av Energimyndigheten inom ramen för myndighetens delprogram ”Uthållig produktion av skogsbränsle”.

Bakgrund

Markens historiska försurning

Marken har försurats långsamt under många tusen år genom naturliga processer. Många markområden i landet har även påverkats i olika riktningar av mänsklig aktivitet.

Undersökningar i 14 svenska sjöar med hjälp av bland annat diatomers förekomst i sjösediment (Renberg m. fl., 1993) visar pH-variationen i sjövattnet sedan istiden. Där konstateras fyra försurningsfaser i områden som på senare tid haft en hög belastning av försurande luftföroreningar enligt följande:

- I. 12000 f. Kr – 2300 f. Kr, naturlig försurning, pH sjunker från 7 till 5,5. Den blottade mineraljorden efter istiden var rik på basiska ämnen. Vegetationens invandring startar jordmånsbildningen som med tiden förändrar utlakningen av baskatjoner, vätekarbonat och organiska syror. Upplagringen av oorganiska syror i marken ökar markens totala jonbyteskapacitet och ändrar successivt förhållandet mellan sura och basiska ämnen.
- II. 2300 f. Kr till 1900-talet, antropogen alkalisering, pH ökar från 5,5 till 6 i många områden. Mer intensiv markanvändning börjar påverka marktillståndet utöver naturliga jordmånsbildande processer. Jordbruk och bränning av mark ökar omsättningen av många olika ämnen i marken, vilket sannolikt kan ha medfört ökning av pH i ytvatten under relativt långa perioder.
- III. 1950-1960, den senaste försurningsperioden, pH sjunker snabbt från 6 till 4,5-5 i vissa områden med försurningskänsliga marker. Industrialisering som medför utsläpp av luftföroreningar och även förändrad markanvändning (jordbruksmark överges och beskogas) är huvudsaklig orsak till denna försurning.
- IV. Från 1970 och framåt i tiden, kalkningsperioden, pH ökar från 4,5 till 6-7 i kalkade vattendrag.

Både arealen och volymen skog har ökat under 1900-talet, i synnerhet i södra Sverige, på bekostnad av åker- och betesmark. Förändringen från ett relativt öppet landskap i södra Sverige till brukade barrskogar påverkar i sig markförsurningen. Denna utveckling kan komma att fortsätta, vilket gör att markförsurningen kan öka genom uttag av baskatjoner via skörd, samt uppbyggnad av organiskt material i marken.

Nedfallets försurande inverkan och avtal om minskningar av luftföroreningar

Studier från de senaste decennierna visar att pH i södra Sveriges skogsmarker minskat med 0,3-1,0 pH-enheter och förråden av utbytbara baskatjoner minskat med 30-70 % från 1950-talet (Staaf m.fl., 1996). Det är inte förlusten av baskatjoner som i sig orsakar försurning utan det faktum att de ersätts av väte- och aluminiumjoner. Förändringar av mängden baskatjoner är dock en indikator på markförsurning orsakad av starka syror. En stor del av förändringen förklaras med nedfallet av framför allt svavel i form av stark syra. Tillförseln av stark syra försurar både mark och vatten genom att den rörliga sulfatjonen bidrar till att utlaka baskatjoner och när basmättnaden sjunker ökar förekomsten av väte- och aluminiumjoner.

År 1985 undertecknades ett första protokoll i Helsingfors om minskade svaveldioxidutsläpp i Europa. Utsläppen skulle minskas med minst 30 % mellan 1980-1993 (jämfört med 1980 års utsläpp). Ett andra protokoll upprättades i Oslo 1994 då de skandinaviska länderna i EU åtog sig att minska svaveldioxidutsläppen med 80 % till år 2010 (jämfört med 1980 års utsläpp). För kväveoxid frystes utsläppen till 1988 års nivå. I december 1999 skrevs det så kallade Göteborgsprotokollet under, där de totala

utsläppen i Europa ska minskas med 63 % för svaveldioxid, 40 % för kväveoxider, 40 % för kolväten samt 17 % för ammoniak (jämfört med 1990 års utsläpp).

Sverige är ett av fyra länder i Europa som är nettoimportör av både försurande och eutrofierande föroreningar (de övriga tre är Österrike, Lettland och Norge). Utsläppen av SO_x kommer från förbränningsindustri och dess processer, allmän kraftproduktion, kraftvärmeverk och fjärrvärme. Nedfallet av svavel i Sverige beräknas minska med cirka 50-60 % fram till år 2010 jämfört med 1990 års nivå. Utsläpp av kväveoxider har samma utsläppskällor som svavel med tillägg för utsläppen från transporter (EMEP, 1998). Jordbruket står för huvuddelen av ammoniakutsläppen. De förväntade minskningarna av kvävenedfallet till år 2010 efter det senaste avtalet om utsläppsbe- gränsningar är inte lika stora som för svavel. Det medför att depositionen kan komma att ligga kvar på en förhöjd nivå i stora delar av Sverige även efter 2010 och målet att undvika försurnings- och eutrofieringseffekter på grund av kvävedeposition kan vara svårt att nå.

Skogens tillväxt och markförsurning

Den ökade skogstillväxten i Sverige under 1900-talet kan ha orsakats av ett flertal faktorer som till exempel förbättrad skogsskötsel, ökat kvävenedfall, markavvattning och beskogning av tidigare odlingsmark. Träden har anpassat sig till en situation där kväve är begränsande och konkurrerar därmed med andra växter om kvävet. För att på lång sikt växa optimalt kräver träden att näringsämnen står i viss proportion till varandra och det nödvändiga ämne som finns i minst mängd i marken bestämmer till- växten. Nedfall av försurande luftföroreningar och skogens tillväxt kan minska bas- mättnaden i marken. Nedfallet av starka syror leder till en början till ökade koncent- rationer av baskatjonerna Ca^{2+} , Mg^{2+} och K^+ i marklösningen. Lösta baskatjoner kan sedan lakas ut till grund- och ytvatten.

Förlusten av baskatjoner kan orsaka näringsobalans i marken som på lång sikt kan orsaka minskad tillväxt om något annat ämne än kväve blir tillväxtbegränsande (Ro- sén, 1988; Sverdrup & Rosen 1998). För närvarande finns det inte några belegg för att en utbredd näringsobalans som påverkar skogstillväxten har uppstått på mineraljordar i Sverige (Johansson m. fl., 1999). Däremot har den minskning av skogsmarkens basmättnadsgrad som noterats i stora delar av södra Sverige orsakat en kraftig försur- ning av avrinnande vatten, med låga pH-värden och höga halter av oorganiskt alumi- nium som följd (Nilsson & Tyler 1995; Moldan m. fl., 1999).

Skogens tillväxt är försurande i sig. Vätejoner frigörs då rötterna tar upp näring (främst baskatjoner och ammoniumjoner) från marken. Ju snabbare tillväxt desto stör- re blir tillskottet av vätejoner till marken. I ett system som inte skördas är denna för- surningseffekt reversibel. När träden dör och bryts ner återförs baskatjonerna.

Bildning och upplagring av organiskt material i ytliga marklager i samband med sko- gens tillväxt har också en försurande effekt genom tillskottet av organiska syror, samt en fastläggning av baskatjoner (Skjällberg m fl., 2000). Tillskottet av syra beror på att organisk substans innehåller en hög koncentration av protonerade, potentiellt sura funktionella grupper. Ett ökat tillskott av organiskt material i mineraljordshorisonter leder i de flesta fall till en minskad basmättnadsgrad på grund av en utspädning av redan existerande organiskt bundna baskatjoner. Utspädningen innebär att mängden

basketjoner i marken är oförändrad, men markpartiklarna har fått ett tillskott av främst vätejoner (och den totala mängden utbytbara katjoner har ökat). Det gör att förändringar av mängden basketjoner inte är en lika bra indikator på försurning när den sker genom organiska syror, istället för starka syror.

En försurning av mark med organiska syror har inte en lika tydlig effekt på avrinnande vatten som tillförsel av starksyra, eftersom de organiska syrornas anjoner inte är så rörliga i markprofilen. Ökad mängd organiska syror och sänkt pH minskar dock kolsyrasystemets vittring, vilket leder till ett minskat tillskott av alkalinitet till vatten i form av vätekarbonatjoner. Den syraneutraliserande förmågan (ANC) förskjuts från vätekarbonat till organiska ämnen som kan uppträda både som syra och bas.

Skogsbrukets uttag och markförsurning

Flera studier har visat att skogsmarkens basmättnadsgrad och förråd av basketjoner minskar vid skogsbrukets uttag av biomassa. Intensiteten i uttaget påverkar förändringarnas storlek (Egnell m. fl., 1998). Bördiga marker med gran får större relativa förändringar av basmättnaden än lågproduktiva tallskogar, trots de rikare markerna på de bördiga ståndorterna. Uttag av avverkningsrester (GROT, Grenar Och Toppar) ger relativt stora förluster av näringsämnen i förhållande till den mängd biomassa som skördas. Den relativa skillnaden av näringsförlust mellan enbart stamvedsuttag och helträdsutnyttjande tenderar att vara mindre på bättre boniteter i södra Sverige med högt kvävenedfall. Det beror sannolikt på att kvarlämnat ris efter slutavverkning kan öka nitratutlakningen som i sin tur ökar utlakningen av basketjoner.

Flera regionala och nationella beräkningar av massbalanser av basketjoner har pekat på risken för nettoförluster av basketjoner i samband med skogsbruk. Helträdsuttag kan leda till utarmning av kalcium, magnesium och kalium i marken i svenska skogar enligt en studie av Olsson m. fl., 1993. Beräkningarna bygger enbart på vittring och upptag av basketjoner. Oftast är utlakningen större än depositionen i Sverige, vilket ökar förlusterna av basketjoner från skogsmarken.

En annan massbalans beräknad för svenska skogar visar att vittring och basketjondeposition inte räcker till för att kompensera för utlakning och trädens upptag av basketjoner (Sverdrup och Rosen, 1998). I undersökningen är trädens upptag dock inte begränsat av näringstillgången i marken vilket kan leda till att upptaget överskattas. Helträdsuttag utan återförsel av basketjoner riskerar att påtagligt minska tillgången på näringsämnen i form av basketjoner i marken inom en till två omloppstider i större delen av landet.

Förenklade och yttäckande massbalanser i brukad skogsmark innehåller stora osäkerheter på grund av bristen på underlag i form av säkra mått på de olika komponenter som ingår i beräkningarna (Egnell m. fl., 1998). Därför är det viktigt att komplettera bilden med beräkningar från välundersökta lokaler.

Markens återhämtning

Om nedfallet av starka syror minskar tillräckligt mycket kan skogsmarken till viss del återhämta sig från försurning. Hur mycket, och med vilken hastighet, kan bland annat modellberäkningar ge en uppfattning om. Ett scenario som tidigare studerats är hur

markens tidigare försurning och eventuella återhämtning i 20 skogsytor i södra Sverige påverkas av ett ökat och sedan reducerat nedfall (Moldan, m. fl., 1999). Scenariot innebär att det andra svavelprotokollet följs fullt ut, det vill säga svavelnedfallet reduceras med ca 70 % (från 1980), och skogen avverkas inte när den når hög ålder utan står kvar med låg tillväxt. Med få undantag sker en viss förbättring av vattenkvaliten i avrinningen, men basmättnadsgraden i marken fortsätter att sjunka i de flesta skogsytorna. Avrinningsvattnet i de mest försurade områdena kan inte uppnå en acceptabel kvalitet före år 2020 enligt dessa beräkningar. Den syraneutraliserande förmågan (ANC) kommer inte att uppnå förindustriella nivåer i någon av de 20 ytorna. Många skogsytor kommer att fortsätta att vara försurade under lång tid framöver. Om skogen avverkas, i synnerhet med uttag av GROT (grenar och toppar) utan kompensationsåtgärder, och nya generationer med hög tillväxt påverkar skogsmarken kan försurningen öka ytterligare i framtiden.

Studiens syfte

Syftet med denna studie är att med hjälp av den dynamiska datamodellen MAGIC (Model of Acidification of Groundwaters in Catchments, Cosby m. fl., 1985) beskriva den framtida fortsatta försurningen, eller återhämtningen, i en skogsmark. Olika grad av bortförsel av stamved och GROT, med och utan barr, samt kompensationsåtgärder i form av askåterförsel utgör olika scenarier. Avtalade minskningar av luftföroreningar ingår som grundförutsättning i scenarierna. Beräkningarna har utförts på en representativ lokal i Skåne med bördig granskog på försurad moränmark. Scenarierna omfattar brukningsmetoder som används i praktisk drift idag och utfallet av modelleringen ger en uppskattning av en trolig framtida utveckling av markens och avrinningsvattnets kemiska status om brukningsmetoderna tillämpas under en skogsgeneration.

Modellbeskrivning

Lokalen

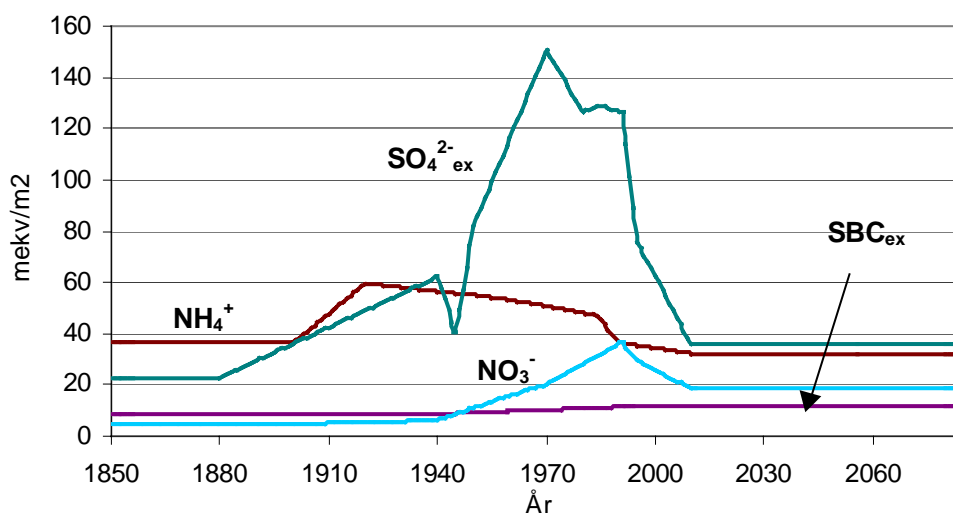
Lokalen som utnyttjats för modellberäkningarna är en permanent provyta med granskog som har använts inom nationell och regional miljöövervakning för nedfallsmätningar och undersökningar av skogsskador (Hallgren Larsson m. fl., 1997). Speciella undersökningar av skogens tillväxt och markkemi är även utförda på lokalen (Örlander m. fl., 1994). Skogsytan, som ligger i norra Skåne, benämns L7 Västra Torup. Granskogen planterades 1941 och den har ett relativt högt ståndortsindex på G32. Skogen ligger på 120 meters höjd över havet och jordarten är sandig morän med jordmånen brunjord/podsol. Nedfallet år 1994 var 9 kg kväve och 20 kg svavel (kronddropp) per ha och år, vilket motsvarar 64 resp 62 mekv. per m² och år.

Scenarios

Nedfall

Framtida nedfall i modellberäkningarna följer Göteborgsprotokollets avtal. För södra Sveriges del innebär det att utsläppen år 2010 av svavel ska ha minskat med ca två tredjedelar av 1990 års nivå.

För nitrat gäller en minskning med ca hälften och för ammoniak ca en tiondel. Efter 2010s är nedfallet i modellen konstant, det vill säga på 2010 års nivå, då det inte finns underlag för längre prognoser (figur 1).



Figur 1. Depositionen i modellen av basketjoner och sulfat (då bidraget från havssalt är borträknat), samt nitrat och ammonium.

Depositionen av basketjoner (då havssaltsbidraget är borträknat) ökar mycket lite under modelleringsperioden, från 8,7 till 11,4 mekv/m²/år. Nedfallet av havssalt, som dominerar basketjonbidraget, är däremot konstant och det har en kloridmängd på 101 mekv/m²/år.

Skogsbruksmetoder

Modellberäkningarna antar att den befintliga granskogen slutavverkas vid 74 års ålder (år 2015) och plantering sker året därpå med gran. Under den simulerade skogsgenerationen kommer gallring att ske vid 25- respektive 40 års ålder (dvs år 2040 och 2055). Slutavverkning sker vid 70 års ålder (år 2085). Modellberäkningarna utförs mellan åren 1850 och 2085. De fem skogsbruksscenarierna skiljer sig åt först efter år 2015.

De fem skogsbruksscenarierna för åren 2015 till 2085 är följande:

1. Vid slutavverkning bortförs 100 % av stamveden, 0 % av GROT och 0 % av barren (100/0/0). Ingen askåterföring (effekten av kompensation för stamvedsuttag redovisas i avsnittet om basketjonbalans med fullständig kompensation för uttag).
2. Vid slutavverkning bortförs 100 % av stamveden, 70 % av GROT och 30 % av barren. (100/70/30). Ingen askåterföring.

3. Vid slutavverkning bortförs 100 % av stamveden, 70 % av GROT och 30 % av barren. (100/70/30A). Askåterföring motsvarande uttag av baskatjoner från GROT och barr sker vid första gallringen.
4. Vid slutavverkning bortförs 100 % av stammarna, 70 % av GROT och 70 % av barr. (100/70/70). Ingen askåterföring.
5. Vid slutavverkning bortförs 100 % av stammarna, 70 % av GROT och 70 % av barr. (100/70/70A). Askåterföring motsvarande uttag av baskatjoner från GROT och barr sker vid första gallringen.

Återföringen av baskatjoner är tidsmässigt olika i scenarierna. Näringen kommer marken till godo antingen direkt efter avverkning då avverkningsresterna får ligga kvar på marken och brytas ner, eller vid första gallringen då den del av GROT och barr som togs ut vid slutavverkningen återförs i form av aska (figur 2 och tabell 1). Modellberäkningarna antar att gallringsresterna alltid ligger kvar efter gallring, vilket ger ett näringstillskott till marken. I scenario 1, 2 och 4 återförs ingen aska vilket leder till att näringstillförseln från GROT och barr vid tidpunkten för gallring är lika. Näringsförlusten vid slutavverkningen varierar dock med uttaget av GROT och barr och scenario 3 och 5 kompenserar för denna näringsförlust vid tidpunkten för gallring.

I studien antas att GROT bryts ner linjärt på femton år efter avverkning, samt att motsvarande tid för barr är fem år. Nedbrytningshastighet för aska (O. Westling, pers. medd.) kan beroende på behandling av askan variera från ett till hundra år. I detta exempel har en linjär nedbrytningshastighet på trettio år antagits. Beroende på när i omloppstiden som marken får tillgång till den återförda näringen så kommer en inbördes förskjutning ske i tre av scenarierna (nr 1, 3 och 5). Summan av tillsatt näring är alltså lika för dessa tre scenarier. I de två scenarierna utan askåterförelse är näringsförlusten större under en omloppstid, jämfört med övriga scenarier.

Kalibrering av MAGIC

MAGIC-modellen som utnyttjas i denna studie är kalibrerad sedan tidigare med data från den skogsyta som utnyttjas för beräkningarna (Moldan m. fl., 1999). Den tidigare studien var inriktad på att beskriva effekten av minskande deposition på återhämtningen från försurning. Denna studie utnyttjar resultaten av dessa beräkningar, men adderar effekten av olika skogsbruk till de faktorer som påverkar framtida försurningsutveckling.

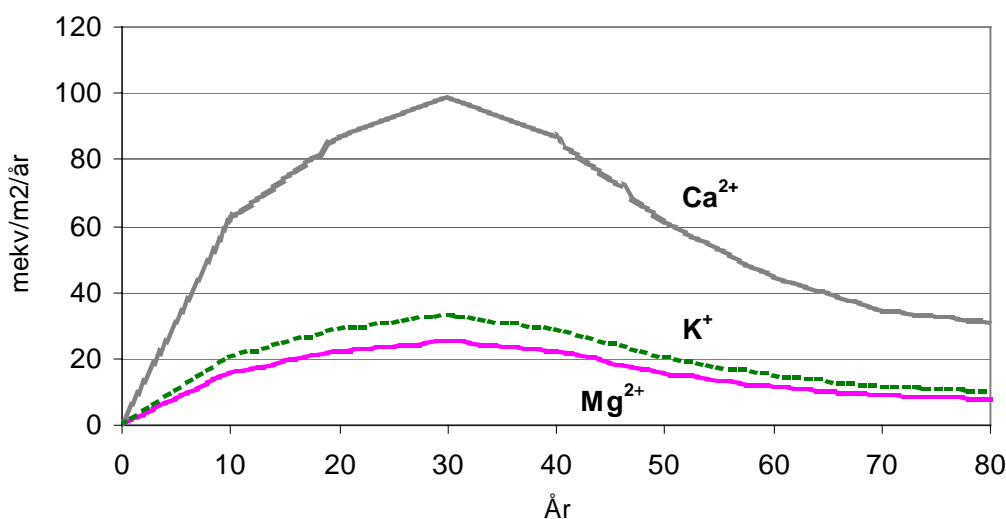
Ett nytt avtal om minskade utsläpp undertecknades i Göteborg i slutet av år 1999 vilket modellberäkningarna anpassats till. Det innebär att depositionen minskar något mer till 2010, jämfört med den tidigare studien. En annan skillnad mot tidigare modellberäkning är att SkogForsks näringssnurra (excel baserat program för beräkning av askgivor) utnyttjats för att beräkna skogens upptag av näringsämnen (data på upptag är hämtade från Egnell m. fl., 1998) i stället för data framtagna av Rosén (1988). Modellen kalibreras om för att motsvara de nya förhållandena, vilket får konsekvenser för bland annat markens beräknade basmättnad och vittring.

Beräkning av massbalans för baskatjoner

Skogens upptag

SkogForsks näringsnurra beräknar upptaget av baskatjoner i skogsytan i denna studie till att vara ca 2,5 gånger högre än genomsnittligt värde för södra Sverige beräknat från Rosén (1988). Det beror huvudsakligen på den relativt höga bördigheten i Västra Torup. Snurran beräknar mängden näringsämnen som förs bort från olika typer av ståndorter vid varierande avverkningsintensitet och används huvudsakligen till att beräkna kompenserande askgivor. Näringsnurran tar hänsyn till läge (södra eller norra Sverige), ståndortsindex, trädslagsblandning samt uttag av grenar och toppar vid gallring och slutavverkning. Uttaget per hektar och omloppstid räknas i denna studie om till milliekvivalenter per kvadratmeter (mekv/m^2).

En funktion för hur mycket näringsämnen skogen tar upp vid olika ålder har tagits fram genom anpassning till mätdata från 20 skogsytor (Moldan m. fl., 1999). Denna upptagsfunktion har kombinerats med beräkningen av det ackumulerade näringsupptaget under en åttioårig omloppstid. Det ackumulerade nettoupptaget av kalcium, magnesium och kalium under en omloppstid i stam GROT och barr vid avverknings-tillfällena är 4915 mekv/m^2 , 1259 mekv/m^2 respektive 1645 mekv/m^2 enligt beräkningarna. Den tidsmässiga variationen i upptaget av kalcium, kalium och magnesium i skogsytan som utnyttjas i modellberäkningarna framgår av figur 2. I denna studie har näringsackumuleringen i rotsystemet antagits vara noll, det vill säga rotsystemets tillväxt är lika stort som nedbrytningen av gamla rötter.



Figur 2. Variationen av nettoupptag i träden av baskatjoner under en omloppstid (80 år). Det ackumulerade upptaget är beräknat med SkogForsks näringsnurra.

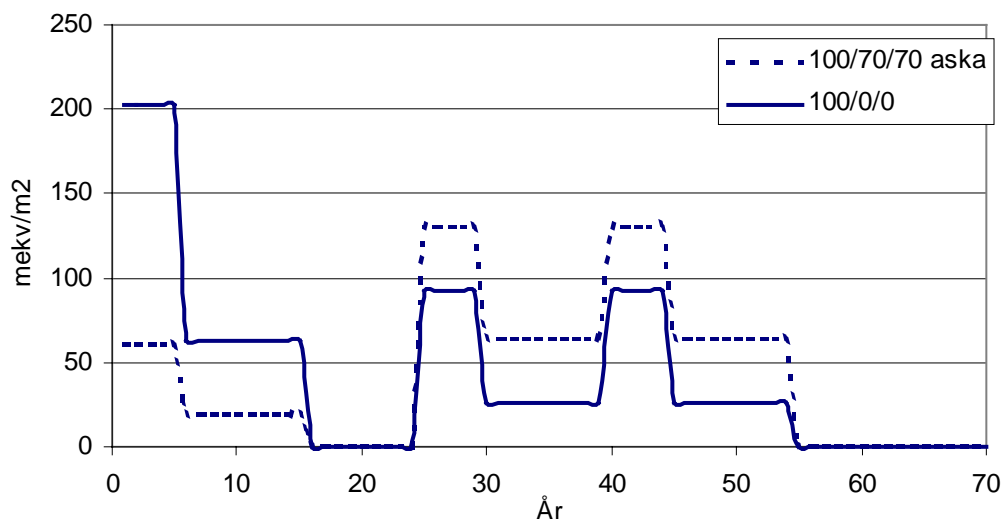
Basketjoninnehåll i olika träddelar

Det beräknade innehållet av kalcium, magnesium och kalium som återförs i form av kvarliggande GROT och barr efter avverkning och gallring framgår av tabell 1. I de fem scenarierna kommer all näring från kvarliggande *gallringsrester* marken tillgodo vid de två gallringstillfällena. Gallringen antas ske vid 25 och 40 års ålder på skogen. Mängden näringsämnen från kvarlämnat GROT och barr från *avverkningen* är olika för de fem scenarierna i denna studie.

Tabell 1. Näringsinnehåll i avverkningsrester.

| Näring i kvarliggande 100 % GROT och 100 % barr efter slutavverkning (mekv/m ²) | | | |
|---|------------------|------------------|----------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ |
| GROT | 933 | 255 | 312 |
| Barr | 704 | 189 | 284 |
| <i>summa</i> | <i>1637</i> | <i>444</i> | <i>596</i> |
| Näring i kvarliggande 30 % GROT och 30 % barr efter slutavverkning (mekv/m ²) | | | |
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ |
| GROT | 279 | 74 | 92 |
| Barr | 210 | 58 | 84 |
| <i>summa</i> | <i>489</i> | <i>132</i> | <i>176</i> |
| Näring i kvarliggande 30 % GROT och 70 % barr efter slutavverkning (mekv/m ²) | | | |
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ |
| GROT | 279 | 74 | 92 |
| Barr | 494 | 132 | 197 |
| <i>summa</i> | <i>773</i> | <i>206</i> | <i>289</i> |
| Näring i kvarliggande GROT och barr efter gallring (mekv/m ²) | | | |
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ |
| GROT | 788 | 214 | 263 |
| Barr | 659 | 181 | 263 |
| <i>summa</i> | <i>1447</i> | <i>395</i> | <i>527</i> |

Fördelningen av kalciumtillförseln under en omloppstid visas i figur 3 då slutavverkningsrester (år 1–15) och gallringsrester (år 25–40, 40–55) och aska (år 25–55) lämnats kvar. Den totala mängden tillförd kalcium är lika stor, men fördelningen är olika under omloppstiden.



Figur 3. Tillförsel av kalcium från avverknings- och gallringsrester och aska under en omloppstid. De antagna nedbrytningstiderna är 5 år och 15 år för barr respektive GROT och upplösningstiden för aska är 30 år.

Askans baskatjoner

Den askåterföring som sker i scenario 100/70/30A och 100/70/70A motsvarar baskatjonmängden i de borttagna avverkningsresterna (tabell 2). Askans tillförs vid den första gallringen.

Tabell 2. Askans innehåll av baskatjoner.

| Aska från 70 % GROT och 70 % barr (mekv/m ²) | | | |
|--|------------------|------------------|----------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ |
| GROT | 654 | 181 | 217 |
| Barr | 494 | 132 | 197 |
| <i>summa</i> | <i>1148</i> | <i>313</i> | <i>414</i> |
| Aska från 70 % GROT och 30 % barr (mekv/m ²) | | | |
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ |
| GROT | 654 | 181 | 217 |
| Barr | 210 | 58 | 84 |
| <i>summa</i> | <i>863</i> | <i>239</i> | <i>302</i> |

Beräkning av vittring

Vitringshastigheten har beräknats på två sätt; historisk vittring (Olsson & Melkerud, 1991) och med PROFILE (Sverdrup & Warfvinge, 1993). Beräkningarna ger något olika resultat och kan närmast ses som ett intervall för sannolik vittring. De olika metoderna räknar normalt på olika vittringsdjup (1 respektive 0,5 m), vilket i sig ger en skillnad i vittringshastighet (tabell 3). Tabellen visar även vittringshastigheten med PROFILE då andelen finjord reduceras till 40 %, vilken baseras på en uppskattning av stenigheten i skogsytan. Normalt beräknas vittringen med utgångspunkt från 100 % finjord.

Tabell 3. Vitringshastighet beräknad med olika metoder och finjordandel.

| Vitrिंग mekv/m ² /år | PROFILE | PROFILE | Historisk vittring |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| | 40 % finjord 0,5 m | 100 % finjord 0,5 m | 1 m |
| Ca | 14 | 35 | 14 |
| Mg | 3 | 8 | 11 |
| Na | 6 | 15 | 17 |
| K | 4 | 10 | 16 |

Vid modellkalibreringen av MAGIC tillåts markens basmättnad (utbytbara baskatjoner dividerat med katjonbyteskapaciteten) och vittring variera inom relativt vida intervall (tabell 4). Modellen anpassas till ett miljötillstånd som var rimligt år 1850 och 1990, vilket innebär att intervallen för värden på basmättnad och vittring minskas.

Tabell 4. Möjlig variation av basmättnad (BS) år 1850 och 1990 samt vittring vid kalibrering av modellberäkningarna med MAGIC

| | | Före kalibrering | | Efter kalibrering | | Slutligt värde i modellberäkningarna |
|--------------------------------------|--------------|------------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------------------------|
| | | Min | Max | Min | Max | |
| Basmättnad (%) 1990 | Ca | 2,6 | 10,4 | 5,6 | 7,9 | 6,5 |
| | Mg | 1,1 | 4,2 | 1,1 | 2,0 | 1,7 |
| | Na | 0,5 | 2 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| | K | 0,9 | 3,6 | 1,3 | 2,7 | 2,0 |
| | <i>summa</i> | <i>5,1</i> | <i>20,2</i> | <i>9,0</i> | <i>13,6</i> | <i>11,2</i> |
| Basmättnad (%) 1850 | Ca | 5,2 | 31,2 | 21,6 | 23,6 | 22,4 |
| | Mg | 2,1 | 12,6 | 5,4 | 7,0 | 6,6 |
| | Na | 1 | 6 | 1,8 | 1,9 | 1,8 |
| | K | 1,8 | 10,8 | 5,2 | 7,0 | 6,1 |
| | <i>summa</i> | <i>10,1</i> | <i>60,6</i> | <i>34,0</i> | <i>39,5</i> | <i>36,9</i> |
| Vitrिंग (mekv/m ² /år) | Ca | 5,6 | 35 | 15,2 | 21,4 | 18,3 |
| | Mg | 1,2 | 7,5 | 1,2 | 7,5 | 2,6 |
| | Na | 2 | 15 | 2,0 | 3,0 | 2,2 |
| | K | 1,6 | 10 | 4,5 | 10,0 | 7,3 |
| | <i>summa</i> | <i>10,4</i> | <i>67,5</i> | <i>22,9</i> | <i>41,9</i> | <i>30,4</i> |

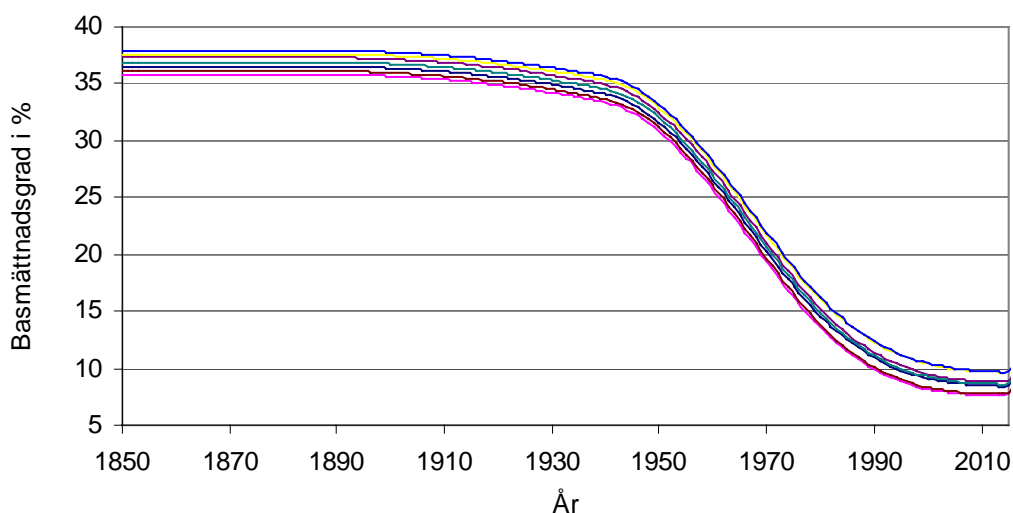
Resultat

De modellberäknade resultatens spridning

Vittring och historisk basmättnad är båda viktiga faktorer som påverkar modelleringen och kan vid olika kalibreringar ge skilda resultat. För att undersöka hur stor skillnaden kan bli utförs flera kalibreringar och som sedan kan jämföras med resultatet för scenarierna. I detta fall utförs sju olika kalibreringar med rimliga utfall baserat på de intervall (tabell 4, kolumn ”efter kalibrering”) som vittring och basmättnad kan tillåtas variera inom. En modellberäkning med högre ursprunglig basmättnadsgrad och lägre vittring kan ge samma resultat kalibreringsåret, i detta fall 1990, som en annan körning med lägre historisk basmättnadsgrad och högre vittring då övriga ingående variabler är lika.

Basmättnadens förändring och spridning

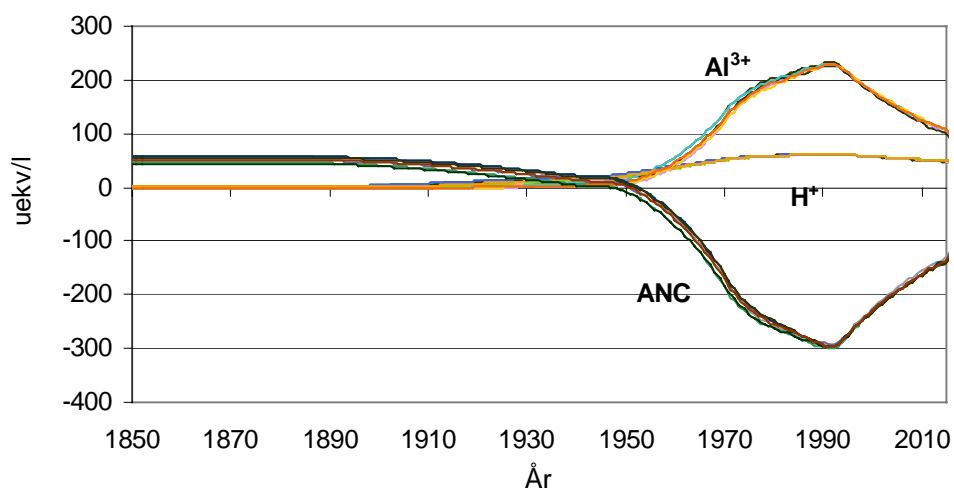
Modellberäkningarna indikerar att basmättnaden låg på ca 37 % år 1850 varefter den sjönk till följd av depositionen av försurande luftföroreningar och skogens tillväxt. År 1990 är basmättnaden mindre än en tredjedel av ursprungsvärdet. Spridningen i resultaten illustreras av figur 4. Den största spridningen för basmättnaden under hela modelleringsperioden inträffar i mitten av 1970-talet och är $\pm 1,3$ % jämfört med medelvärdet. Det betyder att oavsett vilken kalibrering som skogsscenarierna slutligen baseras på så kan den maximala variationen i resultat att vara högst 2,6 % i faktisk basmättnad.



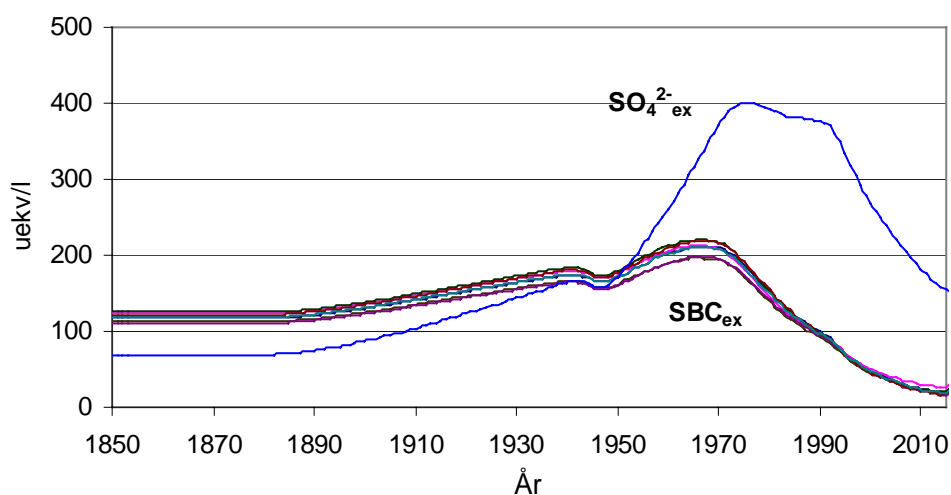
Figur 4. Beräknad spridning i basmättnad under den studerade perioden.

Olika ämnens förändring och spridning

På samma sätt beräknas den största spridningen för halten av oorganiskt aluminium (Al^{3+}) och ANC i avrinningen till slutet av 1960-talet då koncentrationen varierar mellan ca 100 ± 10 respektive -130 ± 10 $\mu\text{ekv/l}$ (figur 5). Halten vätejoner i avrinningen (figur 6) beräknas ha en maximala variation på ca 10 ± 5 $\mu\text{ekv/l}$ i början av 1930-talet.



Figur 5. Beräknad spridning i halten av oorganiskt aluminium, vätejoner och ANC under den studerade perioden.



Figur 6 Spridning för sulfat och summan av baskatjoner (då bidraget från havssalt är borträknat).

Summan av baskatjoner i avrinningen sjunker i 1970-talets början och en ersättning sker med Al^{3+} och H^+ enligt beräkningarna (figur 5 och 6). Att pH inte minskar ännu kraftigare beror på att aluminiumkomplex buffrar pH i detta intervall, varvid Al^{3+} ökar kraftigt i avrinningen. Nedgången i sulfathalten runt 1990 beror på minskad deposition.

Beräkningar av det framtida skogsbrukets påverkan

De fem scenarierna för framtida skogsbruk baseras på samma parametrering av skogsytan L7 Västra Torup, vilket är medelvärdet av de olika kalibreringarna (figur 4-6). Tidsserier för deposition, skogens näringsupptag och hydrologi är lika för alla scenarier under hela perioden 1850 till 2085. Skillnaderna mellan scenarierna uppstår mellan år 2015 och 2085 beroende på olika återförande av GROT, barr och aska (tabell 5). Scenario 100/70/70 har ett något lägre ackumulerat upptag (en minskning med totalt 122 mekv/m^2) av kalcium på grund av att vittring och basmättnad inte är tillräckligt höga för att försörja upptaget under en hel omloppstid. Det minskade upptaget är dock relativt litet och kan sannolikt inte orsaka bristnivåer i träden. Den uppmätta halten av kalcium i barr 1996 i skogsytan vid västra L7 Torup var $2,4 \text{ mg/g}$ (Torgny Näsholm, pers. medd.), vilket är relativt långt från empiriskt framtagna bristnivåer som bedöms vara värden under $1-1,5 \text{ mg/g}$ (Staaf m. fl., 1996).

Tabell 5. Tillförda mängder samt upptag av baskatjoner under perioden 1850-2085 i de olika scenarierna.

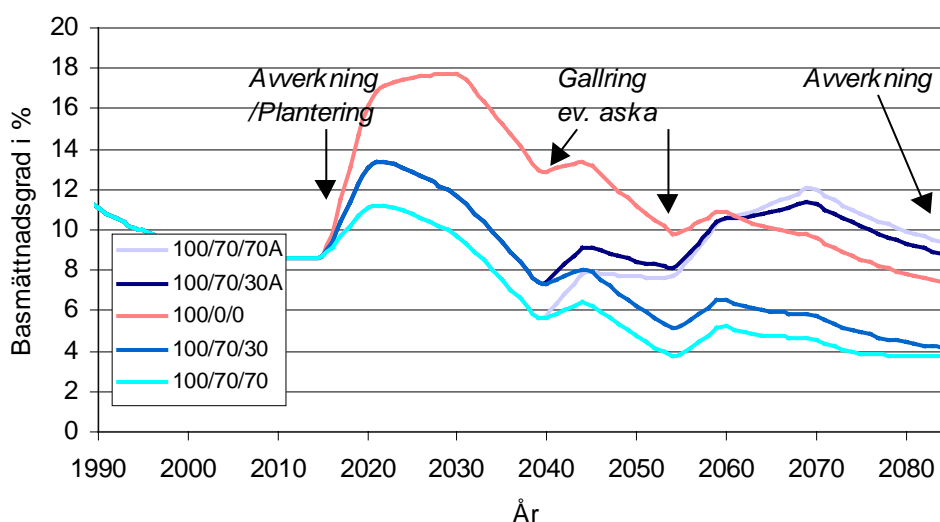
| Scenario | | Ca^{2+} (mekv/m ²) | Mg^{2+} (mekv/m ²) | Na^+ (mekv/m ²) | K^+ (mekv/m ²) |
|------------|------------|--|--|---|--|
| Deposition | | 2176 | 4900 | 20390 | 1391 |
| Vittring | | 4311 | 615 | 518 | 1727 |
| Upptag | 100/0/0 | 7928 | 1994 | 0 | 2613 |
| | 100/70/30 | 7928 | 1994 | 0 | 2613 |
| | 100/70/30A | 7928 | 1994 | 0 | 2613 |
| | 100/70/70 | 7806 | 1994 | 0 | 2613 |
| | 100/70/70A | 7928 | 1994 | 0 | 2613 |
| Tillförsel | 100/0/0 | 3084 | 839 | 0 | 1123 |
| | 100/70/30 | 2220 | 600 | 0 | 816 |
| | 100/70/30A | 3084 | 840 | 0 | 1117 |
| | 100/70/70 | 1936 | 526 | 0 | 703 |
| | 100/70/70A | 3083 | 841 | 0 | 1117 |

Basmättnad efter år 2015

Basmättnadens tidsutveckling

Efter år 1850 sjunker den beräknade basmättnaden från ca 37 till ca 9 % år 2015 enligt beräkningarna (figur 4 och 7). Skillnaden mellan scenarierna efter 2015 framgår av figur 7. Ökningar i markens basmättnadsgrad sker vid återföring av näringsämnen vid slutavverkning, gallring och askåterföring. För 100/0/0 är återföringen som högst efter slutavverkning (för Ca^{2+} 1637 mekv/m², tabell 1) medan bidraget från gallringsresterna bidrar med något mindre (för Ca^{2+} 1447 mekv/m² uppdelat på två tillfällen, tabell 1). Små ökningar i basmättnadsgrad uppträder efter tillförsel av barr i gallringsresterna, men när enbart GROT återstår efter fem års nedbrytning börjar basmättnaden att sjunka. Upptaget av näringsämnen i träden är som störst fram till skogen är ca 30 år, vilket ökar förlusten från marken under denna tid. Det leder till att basmättnaden inte ökar på samma sätt som vid omloppstidens början. Vid 45 års ålder på skogen sker en ny gallring som ger ytterligare en liten ökning av basmättnaden, men efter en kort tid minskar den åter.

Under tiden mellan planteringen och den första gallringen är tidsutvecklingen för basmättnaden parvis lika för scenarierna med och utan asktillförsel (100/70/30 och 100/70/30A, respektive 100/70/70 och 100/70/70A). Skillnader uppträder vid gallring och askåterföring enligt modelleringen (figur 7). Den kvarlämnade näringen i gallringsresterna ger tillsammans med tillförseln från askan en kraftigare ökning av basmättnaden jämfört med scenarierna utan aska. Då barren brutits ner räcker näringsinnehållet från GROT knappt till för att hålla basmättnaden konstant efter första gallringen. Efter andra gallringen vid 45 års ålder då skogens tillväxt börjat avta uppvisar de två scenarierna med askåterföring en viss ökning av basmättnaden, under tiden för nedbrytning av GROT. Därefter sjunker basmättnadsgraden långsamt igen.



Figur 7. Förändring av basmättnadsgrad efter år 2014 med fem olika scenarier för framtida skogsbruk. Sorteringen i legenden motsvarar linjernas ordning vid beräkningens slutår.

Scenarier utan askåterföring (100/70/30 och 100/70/70) visar genomgående en lägre basmättnad än övriga scenarier. Stora mängder näringsämnen tas bort vid slutavverkningen och tillförseln av baskatjoner till marken från de kvarliggande avverkningsresterna är liten. Scenario 100/70/30 följer nästan parallellt med 100/70/70, fast med någon procents högre basmättnadsgrad efter år 2015.

Den beräknade basmättnadsgradens förändringar under en omloppstid är relativt stor då behovet av baskatjoner från växande skog först ökar och sedan avtar. Samtidigt varierar tillförseln av baskatjoner från nedbrutna avverkningsrester och i vissa fall askåterföring. Den långsiktiga effekten på markens basmättnadsgrad av de olika scenarierna kan beskrivas genom att jämföra basmättnadsgraden år 2014 med år 2085, det vill säga vid de två avverkningstillfällena. Det beräknade resultatet indikerar en dryg halvering av basmättnadsgraden för de två scenarierna utan asktillförsel (tabell 6). En minskning sker även i scenariot med bara stamvedsuttag (100/0/0), men förändringen är inte så stor som med uttag av GROT och barr. Scenarierna med askåterföring resulterar i en mindre ökning av basmättnaden, jämfört med tidpunkten för slutavverkning år 2014.

Tabell 6. Förändring i basmättnadsgrad efter en omloppstid. Vid slutavverkningen år 2014 är skogens ålder 74 år och vid efterföljande slutavverkning 2085 är åldern 70 år.

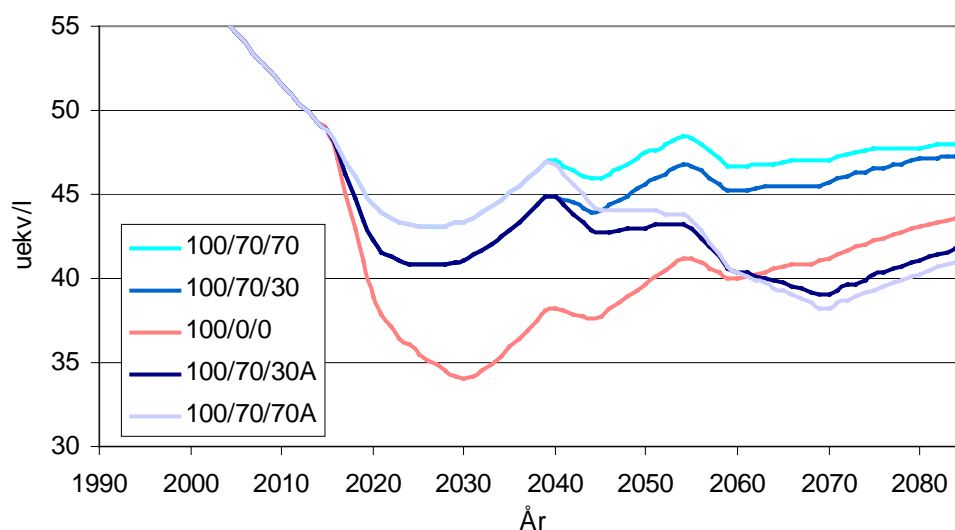
| Basmättnads- grad i % | Scenario | | | | |
|--------------------------|----------|-----------|------------|-----------|------------|
| | 100/0/0 | 100/70/30 | 100/70/30A | 100/70/70 | 100/70/70A |
| År 2014 | 8,6 | 8,6 | 8,6 | 8,6 | 8,6 |
| År 2085 | 7,3 | 4,1 | 8,7 | 3,7 | 9,3 |
| Differens | -1,3 | -4,5 | 0,1 | -4,9 | 0,7 |

Tidpunkten för näringstillförsel under perioden spelar en stor roll för tillfälliga ökning och sänkningar samt basmättnadens slutliga nivå efter en omloppstid enligt beräkningarna. Bortförslaget av baskatjoner med avverkad stamved är lika i alla fem scenarierna och bortförslaget av baskatjoner i avverkningsrester i scenarierna 100/70/30A och 100/70/70A kompenseras till fullo med askåterföring. Därmed är scenarierna 100/0/0, 100/70/30A och 100/70/70A likvärdiga med avseende på total summa av bortförda baskatjoner, då det bara är stamvedsuttag som innebär en permanent förlust av baskatjoner. Att det uppstår skillnader i basmättnadsgraden i slutet av omloppstiden mellan de tre scenarierna beror på fördelning av upptag och tillskott av baskatjoner över tiden. Den stora ökningen av basmättnadsgraden i scenariot 100/0/0 efter plantering (efter år 2015) ökade halterna av baskatjoner i avrinningen och gav därmed upphov till högre utlakning (se tabell 7 nedan). Ett mindre läckage mot slutet av omloppstiden kompenserar detta till viss del. Den slutliga skillnaden efter en omloppstid blir en beräknad högre basmättnad på 2 % för scenariot 100/70/70A, jämfört med 100/0/0.

Avrinningens sammansättning efter år 2015

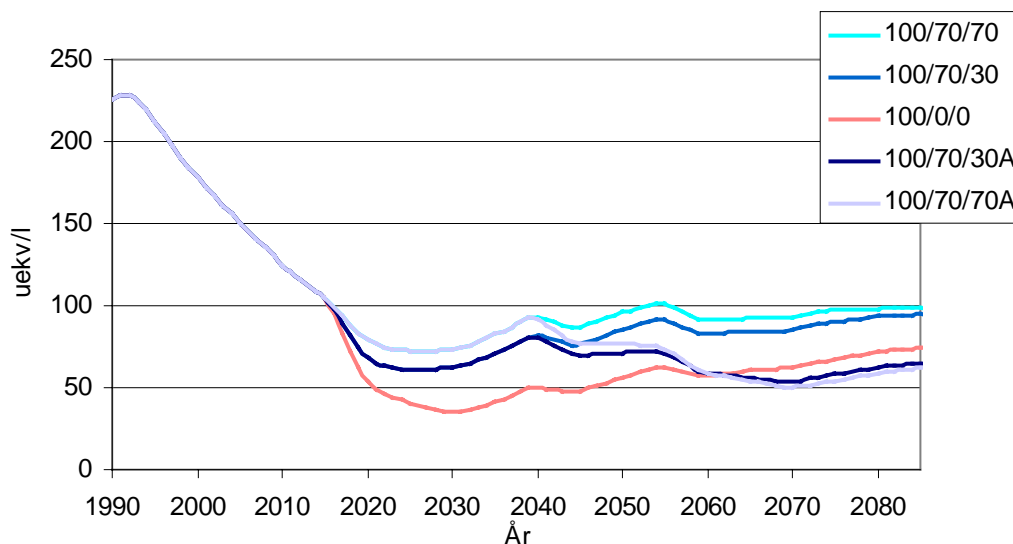
Avrinningens vätejonkoncentration ökar från början av 1900 och når sitt maximala värde år 1992 med drygt 60 $\mu\text{ekv/l}$ (figur 5). Därefter sjunker den till knappt 50 $\mu\text{ekv/l}$ år 2015 vid tidpunkten för planteringen (figur 8). Halten sjunker därefter inte så mycket att förindustriella värden uppnås utan den stabiliseras vid ca 2/3 av den maximala halten enligt beräkningarna. Det beror främst på att basmättnadsgraden fortsätter att ligga på en låg nivå. Den nuvarande granskogen ligger på tidigare kulturmark och beskogningen med barrträd innebär i sig en sänkning av basmättnadsgraden. Till detta kommer den historiska belastningen av försurande luftföroreningar och en ofullständig återhämtning av markens syra/bas-status som gör att marken sannolikt kommer att vara försurad under överskådlig tid enligt beräkningarna.

Uttag av avverkningsrester utan askåterföring (100/70/30 och 100/70/70) leder till att vätejonkoncentrationen i slutet av omloppstiden nästan är lika hög som år 2015. Däremot ger scenarierna med askåterföring och bara stamvedsuttag en viss sänkning av halten, som omräknat till pH betyder en ökning från ca 4,3 till 4,4 i slutet av omloppstiden.



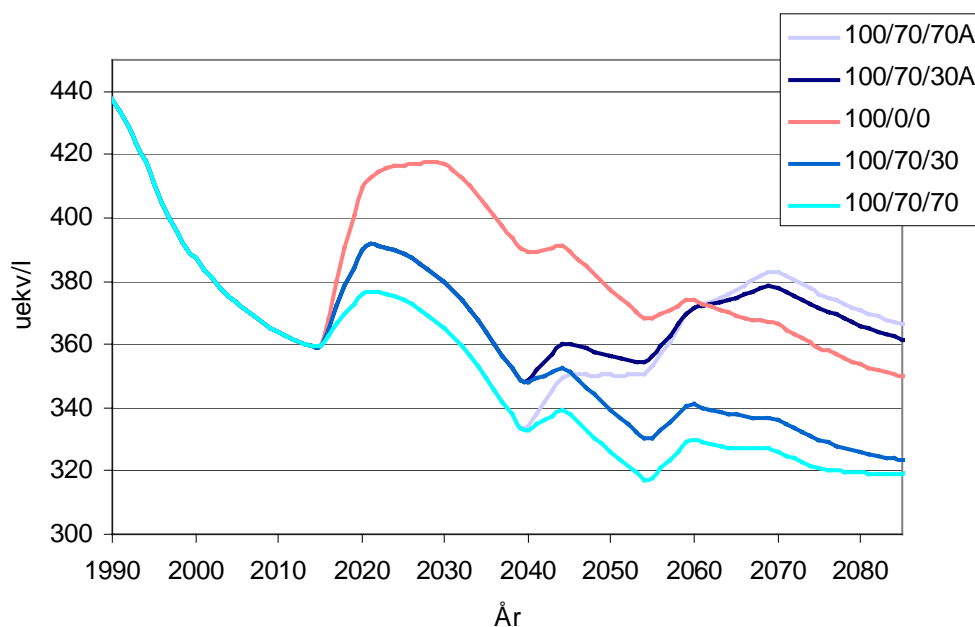
Figur 8. Vätekonscentrationen i avrinningen år 1990- 2085. Sorteringen i legenden motsvarar linjernas ordning vid beräkningens slutår.

Halten av oorganiskt aluminium (Al^{3+}) i avrinningen följer samma mönster som vätejonkoncentrationen. Maximala halten var år 1992 228 $\mu\text{ekv/l}$ (figur 5) och en stabilisering sker vid knappt 1/5 av den maximala koncentrationen (figur 9). Även här bidrar scenarierna 100/70/30 och 100/70/70 nästan inte alls till någon minskning av oorganisk aluminium efter en omloppstid. Den beräknade halten blir ca 40 $\mu\text{eq/l}$ högre än efter askåterföring, samt ca 30 $\mu\text{eq/l}$ högre än enbart stamvedsuttag.



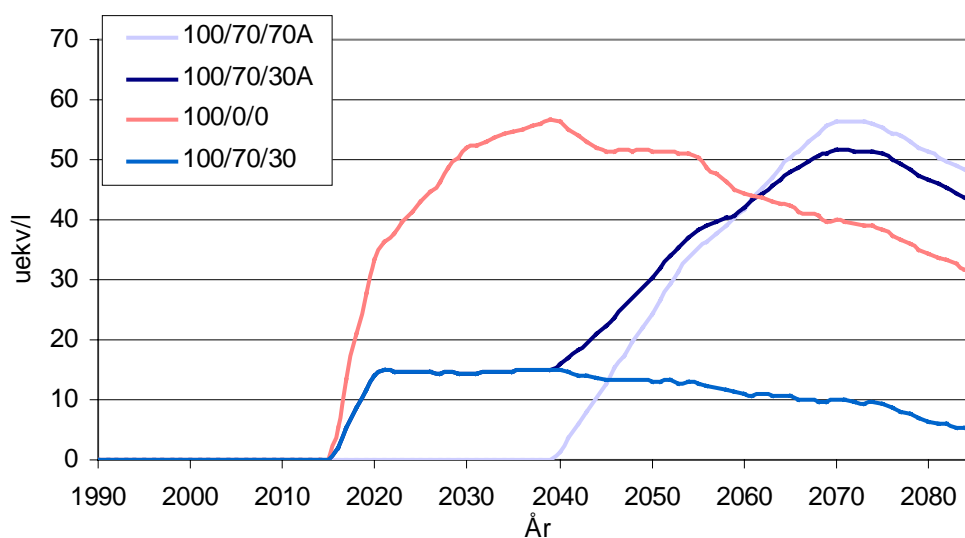
Figur 9. Koncentration av oorganiskt aluminium (Al^{3+}) i avrinningen år 1990-2085. Sorteringen i legenden motsvarar linjernas ordning vid beräkningens slutår.

År 1850 var summan av baskatjoner (SBC) i avrinningen drygt 450 $\mu\text{ekv/l}$ (SBC_{ex}, exklusive havssaltets bidrag, drygt 100 $\mu\text{ekv/l}$) (figur 6) enligt beräkningarna. Till år 2015 minskar baskatjonhalten till ca 360 $\mu\text{ekv/l}$. Avrinningen i scenario 100/0/0 har högst halter av SBC i början av omloppstiden i de ingående scenarierna, medan halten minskar i slutet av omloppsperioden (figur 10). Samtidigt uppnår de två scenarierna med asktillförsel de högsta halterna av SBC. Samma tidsutveckling gäller för den syreneutraliserande förmågan, ANC, i avrinningen.



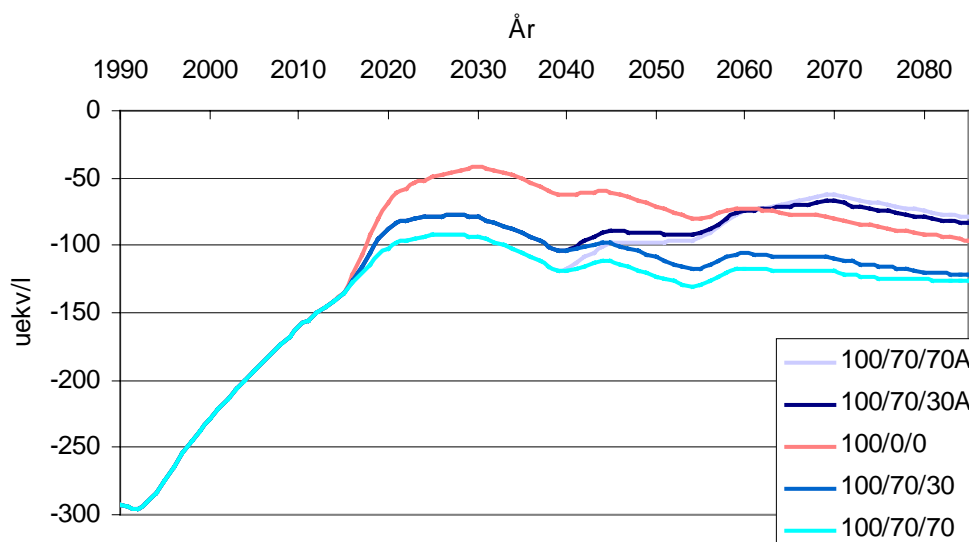
Figur 10. Summan av halten baskatjoner i avrinningen 1990-2085 inklusive havssalt. Sorteringen i legenden motsvarar linjernas ordning vid beräkningens slutår.

Höga halter av baskatjoner i avrinningsvattnet indikerar en kraftig utlakning, vilket i sin tur minskar markens förråd. Samtidigt är utlakningen en nödvändig förutsättning för en mängd akvatiska organismer, inte minst för fisk. Skillnaden i SBC i avrinningen mellan enbart stamvedsuttag (100/0/0) och maximalt uttag utan askåterföring (100/70/70) är relativt stor under hela omloppstiden med en maximal skillnad på nära 60 $\mu\text{ekv/l}$ (figur 11). Däremot är skillnaderna mellan scenarierna 100/70/70 och 100/70/30 relativt små enligt beräkningarna.



Figur 11. Summa av halten baskatjoner i olika scenarier jämfört med 100/70/70. Sorteringen i legenden motsvarar linjernas ordning vid beräkningens slutår.

Återhämtningen av ANC efter 1990-talet planar mer eller mindre ut efter etableringen av en ny skogsgeneration år 2015 enligt beräkningarna. Det finns dock relativt stora skillnader på vilken nivå ANC ökningen avstannar (figur 12). Mot slutet av omloppstiden har scenario 100/70/70A högst ANC på $-79 \mu\text{ekv/l}$ och scenariot 100/70/70 lägst med $-126 \mu\text{ekv/l}$. Variationen av ANC under en hel omloppstid har också betydelse för risken för biologiska effekter i ytvatten. För vattenlevande organismer kan det vara viktigt att ANC inte sjunker under en viss nivå. Till exempel har scenariot 100/0/0 högst ANC under större delen av omloppstiden. Det lägsta värdet för scenario 100/0/0 är under hela omloppstiden högre än det lägsta värdet för 100/70/70A.



Figur 12. ANC i avrinningen. Sorteringen i legenden motsvarar linjernas ordning vid beräkningens slutår.

Basketjonbalans i marken under åren 1850 till 2085

Förändringen av markens innehåll av utbytbara basketjoner under perioden 1850 till 2085 har beräknats med hjälp av MAGIC, som omfattar dynamiska massbalansberäkningar där bortförelsen subtraheras från tillförelsen enligt formeln nedan:

Förändring = (tillförelse av avverkningsrester och aska + vittring + deposition) – (upptag + avrinning)

Av de komponenter som ingår i massbalansen är fyra uppmätta eller beräknade och ingår som ”indata” i modellberäkningarna med MAGIC. Modellberäkningarna ger ett mått på bortförelsen av basketjoner med avrinningen (tabell 7).

Tabell 7. Mängden bortförda basketjoner med avrinningen under åren 1850 till 2085, mekv/m² (kg/ha).

| Scenario | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ |
|------------|-----------------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | mekv/m ² (kg/ha) | | | |
| 100/0/0 | 5848 (1172) | 5265 (640) | 21024 (4833) | 2586(1011) |
| 100/70/30 | 5443 (1091) | 5096 (619) | 21034 (4836) | 2409 (942) |
| 100/70/30A | 5684 (1139) | 5210 (633) | 21019 (4832) | 2513 (983) |
| 100/70/70 | 5301 (1062) | 5040 (612) | 21036 (4836) | 2339 (915) |
| 100/70/70A | 5617 (1126) | 5189 (630) | 21017 (4832) | 2483 (971) |

Massbalansen för basketjoner under tiden innan planteringen 2015 (år 1850 till 2015) utgör utgångsläget för utvecklingen med de olika scenarierna under perioden år 2016 till 2085. Tiden före respektive under de olika scenarierna redovisas separat i tabell 8.

Tabell 8. Ackumulerad baskatjonbalans i mekv/m² (kg/ha) under perioden 1850 till 2015 samt under 2016 till 2085. Negativa värden betyder förlust från marken, positiva ackumulering.

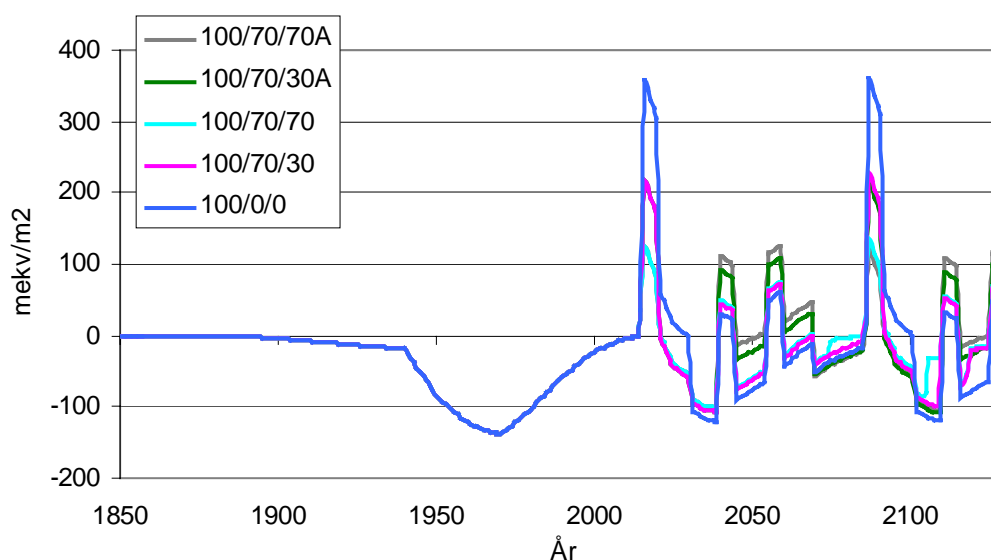
| Scenario | År | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Summa |
|-----------------------------|-----------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------|
| mekv/m ² (kg/ha) | | | | | | |
| Alla scenarier | 1850-2015 | -3792 (-760) | -1011 (-123) | -141 (-32) | -935 (-366) | -5879 |
| 100/0/0 | 2016-2085 | -413 (-83) | 105 (13) | 26 (6) | -22 (-9) | -305 |
| 100/70/30 | 2016-2085 | -872 (-175) | 35 (4) | 16 (4) | -153 (-60) | -974 |
| 100/70/30A | 2016-2085 | -248 (-50) | 162 (20) | 31 (7) | 45 (18) | -11 |
| 100/70/70 | 2016-2085 | -893 (-179) | 18 (2) | 14 (3) | -195 (-76) | -1056 |
| 100/70/70A | 2016-2085 | -183 (-37) | 183 (22) | 33 (8) | 75 (29) | 108 |

Den modellberäknade perioden 1850 till 2015 (165 år) uppvisar ett ackumulerat underskott av baskatjoner på knappt 5900 mekv/m² i marken. Trädens upptag och markens avrinning har fört bort mer baskatjoner än tillförseln från vittring och deposition. Förlusten av Ca²⁺ står för drygt 60 % av den totala bortförseln av baskatjoner enligt beräkningarna. Perioden med olika skogsbruksscenarioer (70 år) visar den största nettoförlusten av baskatjoner för skogsbruk med uttag av avverkningsrester utan askåterföring. Scenarierna med uttag av bara stamved, samt de med askåterföring motsvarande 70 % GROT och 30 % barr, får ett mindre underskott av baskatjoner i marken efter en omloppstid. Enbart scenario 100/70/70A får ett överskott på baskatjoner. En skillnad mellan perioden 2016 till 2085 och historisk markanvändning är att Mg²⁺, Na⁺ och i vissa scenarier K⁺ uppvisar ett överskott och en möjlig ökning i marken under den senaste perioden. Skillnaden beror på att till effekten av den historiska markanvändningen adderades en hög deposition av försurande luftföroreningar under framför allt perioden 1950 till 1990 som ökade utlakningen av baskatjoner. I en framtid med kraftigt minskad deposition kommer utlakningen av baskatjoner via avrinningen att minska, vilket ökar förutsättningarna för ett överskott i massbalansen under förutsättning att skörd av biomassa inte orsakar nettoförluster. De genomsnittliga förändringarna beräknade som medelvärde per år framgår av tabell 9. m²

Tabell 9. Genomsnittlig baskatjonbalans i mekv/m²/år (kg/ha/år) under perioden 1850 till 2015 samt under 2016 till 2085. Negativa värden betyder förlust från marken, positiva ackumulering.

| Scenario | År | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | summa |
|------------------------------------|-----------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------|
| mekv/m ² (kg/ha) per år | | | | | | |
| Alla scenarier | 1850-2015 | -23 (-5) | -6 (-1) | -1 (0) | -6 (-2) | -36 |
| 100/0/0 | 2016-2085 | -6.0 (-1) | 1.5 (0) | 0.4 (0) | -0.3 (0) | -4.4 |
| 100/70/30 | 2016-2085 | -12.6 (-3) | 0.5 (0) | 0.2 (0) | -2.2 (-1) | -14.1 |
| 100/70/30A | 2016-2085 | -3.6 (-1) | 2.3 (0) | 0.4 (0) | 0.6 (0) | -0.2 |
| 100/70/70 | 2016-2085 | -12.9 (-3) | 0.3 (0) | 0.2 (0) | -2.8 (-1) | -15.3 |
| 100/70/70A | 2016-2085 | -2.7 (-1) | 2.7 (0) | 0.5 (0) | 1.1 (0) | 1.6 |

En stor ackumulerad nettoförlust av baskatjoner har skett framför allt under perioden 1940 till 1990 enligt beräkningarna, främst på grund av hög deposition av svavel men även på grund av skogens tillväxt. Både dessa faktorer varierar under åren fram till 1990, vilket ger upphov till en årlig variation i baskatjonbalans som framgår av figur 13. Försurningsbelastningens roll för baskatjonbalansen börjar synas efter 1900-talets början. Vid 1940 ökar nettoförlusten av baskatjoner kraftigt efter det att skogen planteras 1941. Efter 2015 uppvisar baskatjonbalansen en mycket kraftig variation på grund av slutavverkning, gallringar och askåterföring. Under kortare perioder med hög skogstillväxt efter år 2015, men före första gallring, kan nettoförlusten av baskatjoner närma sig nivåerna på 1970-talet då depositionen av svavel var som högst.



Figur 13. Årlig variation i baskatjonbalans, i mekv/m² under perioden 1850 till 2085. Sorteringen i legenden motsvarar linjernas ordning vid beräkningens slutår.

Baskatjonbalans med fullständig kompensation för uttag

Kompensationsgödsling efter avverkningar har i första hand diskuterats, och tillämpats, som metod att motverka näringsförluster efter GROT uttag. På senare tid har även stamvedsuttagets effekt på näringsbalanserna i skogsmark uppmärksammats, men för närvarande finns ingen praktisk verksamhet med kompensation för den näringsförlusten. Till skillnad mot GROT, som tas ut som skogsbränsle, finns ingen aska att tillgå för kompensationsgödsling i ett kretslopp (med undantag för en viss mängd aska från eldning av lutar, bark och sågverksavfall). Separat från övriga scenarier, som speglar en pågående verksamhet med skörd av skogsbränslen med och utan askåterföring, utfördes en speciell analys av ett scenario där stamvedsuttaget kompenenserades med avseende på baskatjoner genom en tänkt kompensationsgödsling vid tidpunkten för första gallring. Kompenseringen innebär att den långsiktiga förlusten av baskatjoner på grund av uttag av biomassa är noll. Detta scenario ger även en uppfattning om utvecklingen i en försurad skogsmark där inget uttag av biomassa sker.

Full kompensering av stamvedsuttag (och inget uttag av GROT) kan medföra en tydlig ökning av basmättnadsgraden efter en omloppstid enligt beräkningarna (tabell 10). Resultaten indikerar att basmättnadsgraden kan komma att stiga från knappt 9 % till över 15 % under omloppstiden. Den massbalans som ligger till grund för beräkningarna ger ett utrymme för denna ökning eftersom den enda förlustposten är utlakning. Övriga scenarios som redovisats tidigare (tabell 6) medför ytterligare minskningar av basmättnadsgraden eller en liten ökning vid kompensation av uttag av GROT.

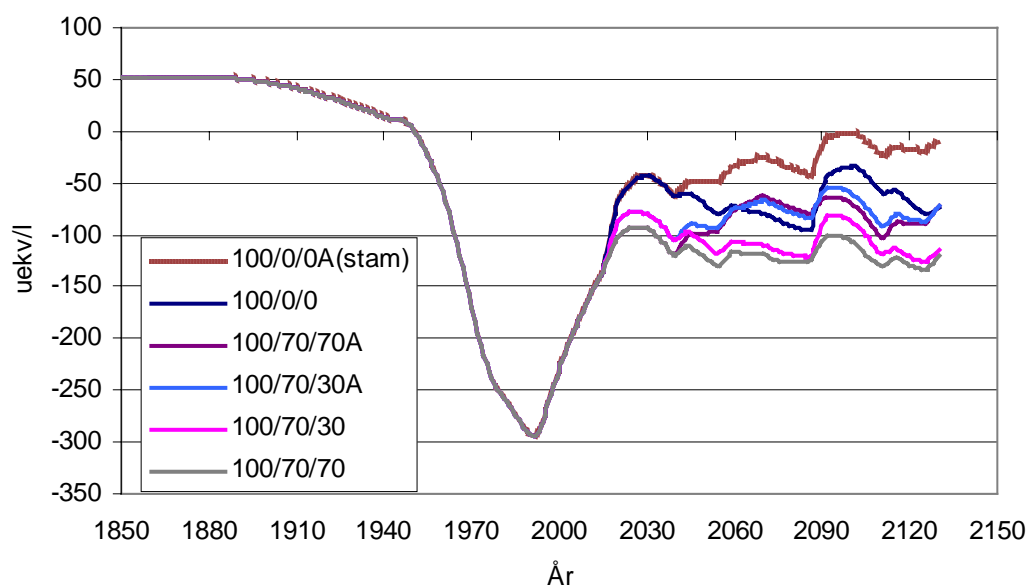
Tabell 10. Förändring i basmättnadsgrad efter en omloppstid. Det inramade scenariot (100/0/0A(stam)) innebär att uttag av stamved kompenseras med askåterföring vid tidpunkten för första gallring. Vid slutavverkningen år 2014 är skogens ålder 74 år och vid efterföljande slutavverkning 2085 är åldern 70 år.

| Basmättnads- grad i % | Scenario | | | | | |
|--------------------------|----------------|---------|-----------|------------|-----------|------------|
| | 100/0/0A(stam) | 100/0/0 | 100/70/30 | 100/70/30A | 100/70/70 | 100/70/70A |
| År 2014 | 8,6 | 8,6 | 8,6 | 8,6 | 8,6 | 8,6 |
| År 2085 | 15,4 | 7,3 | 4,1 | 8,7 | 3,7 | 9,3 |
| Differens | 6,8 | -1,3 | -4,5 | 0,1 | -4,9 | 0,7 |

Den möjliga ökningen i basmättnadsgrad i scenariot med kompensering av stamvedsuttag påverkar utvecklingen av avrinningsvattnets kvalitet enligt beräkningarna. Resultaten indikerar att vätejonhalten kan komma att sjunka (vilket innebär att pH stiger) utan att utvecklingen planar ut som i de andra scenarierna. Avverkningar utan full kompensering av baskatjonförlusterna gör att återhämtningsförloppet efter 1990 med minskande vätejonkoncentrationer planar ut på en nivå som innebär fortsatt låga pH-värden mellan 4,3 och 4,4. Stabiliseringen kring dessa låga pH-värden beror på att basmättnadsgraden inte ökar påtagligt i något scenario utan full kompensation av baskatjoner efter uttag.

Halten av oorganiskt aluminium är beroende av pH-utvecklingen i mark och avrinnande vatten, vilket gör att full kompensering av baskatjonförlusterna vid uttag av biomassa även kan minska dessa halter successivt under en kommande omloppstid enligt beräkningarna. Övriga scenarios uppvisar en stabilisering på en nivå som fortfarande är kraftigt förhöjd med en tendens till ökning med tiden för alternativ med uttag av GROT utan kompensering.

Modellberäkningarna av utvecklingen av ANC i avrinningen efter den tänkta slutavverkningen 2014 indikerar att scenarios utan full kompensering av baskatjonförlusterna kan innebära att ANC aldrig når positiva värden (figur 14). Med kompensering av stamvedsuttag (scenario 100/0/0A(stam)) kan ANC i avrinningen närma sig noll under slutet av omloppstiden. Eftersom ökningen beror på att basmättnadsgraden successivt stiger med tiden finns förutsättningar att ANC kan fortsätta att öka i nästa skogsgeneration under förutsättning av uttag av biomassa kompenserar fullt ut med avseende på baskatjoner.



Figur 14. ANC i avrinningen med kompensation för stamvedsuttag (100/0/0A(stam)), jämfört med andra scenarios för skogsbruk. Sorteringen i legenden motsvarar linjernas ordning vid beräkningens slutår.

Slutsatser och diskussion

Modellberäkningarnas osäkerhet

Modellberäkningar av försurningsutveckling med olika typer av skogsbruk har vissa osäkerheter som beror på ingångsdata, gjorda antaganden och modellens förmåga att beskriva dynamiska förlopp. I denna studie införs fler moment i modellberäkningarna som teoretiskt kan öka osäkerheten; den långa tidsrymden i prognosen, effekter av uttag av biomassa och kvarlämnade avverkningsrester samt kompensationsgödsling i form av aska.

Den historiska markanvändningen i ett specifikt skogsbestånd är ofta okänd eller uppgifterna är osäkra. Det gäller även den studerade provytan i V. Torup. Det påverkar bland annat bedömningen av miljötillståndet i mitten av 1800-talet. En annan osäkerhet är ingångsvärden på vittring. Metoderna för beräkning av vittring med utgångspunkt från markegenskaper bygger på genomsnittliga samband mellan vittring samt geokemi och textur i hela Sverige. På en enskild plats kan sambanden avvika och den beräknade vittringshastigheten kan bli osäker. Detta var sannolikt fallet i provytan i V. Torup där det var svårt att få rimliga resultat inför modellberäkningarna med beräknad vittring från uppmätt geokemi och textur (både beräkningar enligt "PROFILE" och "Historisk vittring").

På grund av osäkerheterna i historisk basmättnad och beräknad vittring utfördes upprepade kalibreringar för att analysera vilka intervall som gav rimliga resultat med hänsyn till att de modellberäknade förloppen måste passera genom uppmätt tillstånd un-

der 1990-talet. Kalibreringarna utgick från stora intervall för ingångsparametrarna historisk basmättnadsgrad och vittring, men de beräkningar som gav rimliga resultat minskade det möjliga intervallet kraftigt.

Modellberäkningarnas variation var mindre än spridningen mellan scenarierna. Trots detta bör det noteras att kalibreringen av modellen kan ge vissa skillnader i framförallt nivån på slutresultatet, och det gör att slutsatser baserade på tolkningen av skillnaderna mellan scenarier är säkrare än den absoluta nivån på beräknade halter och flöden.

Osäkerheten i upplösningstid av kvarlämnade avverkningsrester och tillförd aska påverkar främst tidsutvecklingen, liksom även tidpunkten för askåterföringen, eller om fler gallringar introduceras under omloppstiden.

Det finns en osäkerhet i alla ingångsparametrarna i modellberäkningarna. Markens totala jonbyteskapacitet och upptaget av baskatjoner per producerad mängd biomassa är sannolikt dynamiska förlopp i en skog som genomgår stora förändringar i form av beskogning och kraftigt minskad basmättnadsgrad och tillgång till näringsämnen. Till exempel har försök med kalkning och asktillförsel visat att granskog tar upp mer kalcium när tillgången ökar, trots att nivåerna i barr är långt från en bristsituation (Larsson m. fl., 1999). De genomsnittliga upptagshastigheter som använts för baskatjoner per producerad volym biomassa baseras på att halterna av baskatjoner i olika träddelar är samma i hela landet (de varierar dock mellan olika träddelar). Använda halter i träddelarna är inte självklart representativa för den försurade skogsmarken i V. Torup. I denna studie visade sig det särskilt för kalcium där upptaget justerades ner för att få rimliga beräkningsresultat. Om upptaget av baskatjoner minskar som en funktion av minskad basmättnad kommer försurningsutvecklingen att bli mindre uttalad jämfört med om upptaget per producerad mängd biomassa är opåverkat under hela beräkningssperioden i modellen. Samtidigt finns det gränser för hur mycket upptaget kan minska, i ett visst läge uppstår en bristsituation i trädet som i sin tur påverkar på ett dynamiskt sätt genom framför allt minskad tillväxt.

Dynamiska beräkningar av skogsmarkens försurningsutveckling med olika typer av skogsbruk kommer sannolikt att vara ett viktigt verktyg i framtiden för att kunna bedöma miljökonsekvenserna av olika alternativa utvecklingar av sektorerna skog och energi. Därför är det angeläget att förbättra metoderna och minska osäkerheterna genom ett fortsatt utvecklingsarbete.

Effekter av minskad belastning av luftföroreningar

Skogsmarken i provytan vid V. Torup försurades kraftigt, enligt modellberäkningarna, under en period med ökande deposition av försurande luftföroreningar, i synnerhet svavel. Samtidigt etablerades dessutom ett bördigt granbestånd som med tiden ökade upptaget av baskatjoner, vilket bidrog till markförsurningen. Den kraftigt minskade depositionen av svavel efter 1980 gav ett utrymme för en återhämtning från försurning, indikerat av stigande ANC och minskande halter av oorganiskt aluminium i markvatten, som kommer att vara märkbar under de närmaste decennierna oavsett typen av skogsbruk. Därefter planar återhämtningen ut på en nivå som är långt från utgångsläget för mer än 100 år sedan med avseende på surhetstillstånd.

Den stora skillnaden är att basmättnadsgraden sjunkit kraftigt och en ökning med tiden är mycket långsam eller obefintlig. De förbättringar som trots allt uppstår under början av 2000-talet är knutna till att depositionen och flödet av starksyra genom skogsmarken minskar. Den låga basmättnadsgraden får även effekten att halterna av baskatjoner i avrinnande vatten från 50 cm i marken blir mycket låga när belastningen av starksyra via luftföroreningar minskar. Kvoten mellan baskatjoner och oorganiskt aluminium i mark- och ytvatten används ofta som mått på försurningsgraden och risken för skadliga effekter. Kritiska gränser är dock svårt att fastställa, i synnerhet effekter på skogsträdens tillväxt och vitalitet (Örlander m. fl., 1995). Halterna är sannolikt betydligt lägre än någonsin tidigare i området, vilket gör att kvoten mellan baskatjoner och aluminium förblir låg eller till och med minskar ytterligare. Detta utgör sannolikt en fortsatt risk för biologiska försurningseffekter, inte minst i vattendrag nedströms skogsmarken.

Effekter av skogens tillväxt och skörd

Skogens bördighet i provytan vid V. Torup är sannolikt påverkad av luftföroreningar, främst genom att kvävedeposition har ökat skogsträdens tillväxt. Det försvårar en tydlig uppdelning mellan luftföroreningarnas och skogsbrukets bidrag till markförsurningen. Tillväxt och skörd har dock en betydande potential att försura marken. Modellberäkningarna i denna studie indikerar att återhämtningen kan komma att brytas kring 2030 när tillväxten åter ökar i det nya beståndet som etablerats 15 år tidigare. Detta gäller för alla avverkningsalternativ, men i synnerhet helträdsuttag utan kompensationsgödsling. Modellberäkningarna visar att kombinationen deposition och växande skog har resulterat i ett underskott av baskatjoner på 36 mekv/m² och år under perioden 1850 till 2015. Motsvarande framtida underskott med lägre deposition, men med effekter av skogsbruk med hög intensitet (scenario 100/70/70), kan beräknas till 15 mekv/m² och år under perioden 2015 till 2085 (en omloppstid) utan kompensationsgödsling. Det bör dock noteras att depositionen av starka syror inte är utan betydelse från och med 2010, utan fortfarande förhöjd om än på en mycket lägre nivå än perioden 1960 till 1990.

Beräkningarna av uttag av biomassa från skogen utan kompensering av näringsförlusten visar att försurningseffekterna är betydande i ett långsiktigt perspektiv i försurad skogsmark med hög trädutväxt och begränsad vittringskapacitet, även med låg framtida deposition av luftföroreningar. Modellberäkningarna av ett scenario med full kompensering av baskatjoner (även kompensering av uttag av stamved) indikerar en framtida försurningsutveckling som är relativt opåverkad av biomassauttag och där återhämtningen fortskrider, om än i långsam takt. Uttag av biomassa utan eller begränsad kompensering leder enligt beräkningarna till att återhämtning som beror på minskad starksyradeposition efter 1980 stannar av på en nivå som fortfarande innebär ett försurat tillstånd. Med full kompensering av baskatjonförlusterna efter avverkningar skapas ett teoretiskt utrymme för en successiv förbättring. För att nå ett stabilt tillstånd som inte är försurat (till exempel uttryckt som ANC över 20 uekv/l i avrinning) krävs sannolikt en utveckling under mer än en omloppstid på den studerade lokalen. Hur stort utrymmet är för en återhämtning med olika typer av skogsbruk är i hög grad beroende av markens vittringskapacitet. Marker med geologiska förutsättningar till en hög vittringshastighet har teoretiska möjligheter att klara både återhämtning och skogsbruk utan full kompensering. Detta är viktigt att ta hänsyn till vid generalisering av resultaten från denna studie.

Massbalansberäkningarna under en omloppstid efter den tänkta slutavverkningen år 2014 visar även att små förändringar i flödet av baskatjoner kan få stora konsekvenser på lång sikt. Om balansen mellan tillförsel och bortförsel ligger nära noll, som den ofta gör med scenarierna i denna studie, kan en liten ökning eller minskning av tillförsel respektive bortförsel av baskatjoner innebära att en återhämtning övergår i ökad försurning eller tvärt om. Om försurningen ökar eller minskar enligt modellberäkningarna kan vara svårt att avgöra, om massbalansen ligger nära noll, med tanke på de osäkerheter som finns i dataunderlaget. Denna studie, med de förenklingar som modellberäkningar alltid innebär, indikerar dock klart att de två ytterligheterna i scenarierna; full kompensering av allt uttag av biomassa respektive uttag av helträd där en mindre del avverkningsrester lämnas (tekniskt spill), medför stora skillnader i markens långsiktiga försurningsutveckling. Generella bedömningar av behovet av kompensationsåtgärder i Sverige kräver förbättrat dataunderlag, en utveckling av modellberäkningarna samt tillämpningar på många olika marktyper och ståndorter.

Beräkningarna indikerar även att basmättnadsgrad och avrinningskemi kan komma att variera relativt mycket under en omloppstid beroende på volymtillväxt och återföring av näringsämnen efter avverkningar under olika faser av skogsskötseln. Den starkaste försurningen beräknas till det avverkningsmogna beståndet, vilket överensstämmer med fältobservationer i olika skogstyper (Hallgren Larsson m. fl., 1997). Det finns en möjlighet att modellberäkningarna överskattar variationen i avrinningskemi under en omloppstid. Beräkningarna förutsätter att frigjorda näringsämnen från avverkningsrester, samt upplöst aska i alternativen med kompensationsgödsling, fördelas jämt i markprofilen momentant efter upplösning. Avrinnande vatten från fastmark med en grundvattenyta som ligger djupare än 50 cm påverkas i stor utsträckning av djupare markskikt, samtidigt som en tillförsel från ytan av näringsämnen tar lång tid att nå dessa skikt. Det kan i verkligheten verka utjämnande på variationen under en omloppstid utan att den slutliga nivån på halter i avrinningen påverkas.

Effekter av askåterföring och kvarlämnade avverkningsrester

Modellberäkningarna utformades så att baskatjonförlusterna vid avverkning av GROT och barr i två alternativ kompenseras med en tänkt askgiva. Om askåterföringen skett direkt efter slutavverkning hade beräkningsresultaten varit lika som för enbart stamvedsuttag (100/0/0). Skillnaden som uppstår i beräkningarna i denna studie beror helt på fördröjningen på 25 år av askåterföringen som är tänkt att ske efter första gallringen. Den beräknade effekten att avrinningen från alternativen med askåterföring kommer att vara mindre sur vid slutpunkten på modellberäkningen (år 2085 då omloppstiden tar slut), jämfört med enbart stamvedsuttag, är även det en effekt av den fördröjda kompensationsåtgärden. Under flera omloppstider med askåterföring vid tidpunkten för första gallring kommer den skillnaden att försvinna om inte några andra förhållanden ändras samtidigt.

Mängden kvarlämnade avverkningsrester har stor betydelse för den långsiktiga balansen av baskatjoner i skogsmarken enligt beräkningarna i denna studie. Skillnaden i genomsnittliga nettoförluster i nästa skogsgeneration från år 2015 i den studerade skogsytan beräknades variera mellan 4 och 15 mekv/m² och år beroende på avverkningsalternativ. Speciellt i redan markförsurade områden är det angeläget att tillståndet inte ytterligare förvärras. Då är det viktigt att skogens tillväxt och skörd kompenseras med askåterföring eller annan form av gödsling. Denna studie indikerar att

skogsbbruk med uttag av GROT, men även enbart uttag av stamved, kan motverka en återhämtning från försurning. Kompensationsgödning kan minska denna påverkan och sannolikt ytterligare motverka försurning om dosen ökas så att den även motsvarar uttaget av stamved.

Denna studie är främst ett försök att tillämpa ett modellverktyg och visa på en möjlig väg att analysera långsiktiga konsekvenser av framtida markanvändningsalternativ. Det går inte att göra långtgående generaliseringar från ett exempel på granbestånd i norra Skåne. Den undersökta skogsytan är dock inte extrem för kraftigt markförsurade områden med granskog i södra Sverige utan vald från ett datamaterial som omfattar ca 20 välundersökta provytor (Örlander m. fl., 1994).

Referenser

Berden, M. & Nilsson, S. I. Influence of added ammonium sulphate on the leaching of aluminium, nitrate and sulphate - A laboratory experiment. *Water Air and Soil Pollution* 87(1-4), 1-22. 96.

Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Galloway, J. N. & Wright, R. F. 1985. Modelling the effects of acid deposition: assessment of a lumped parameter model of soil water and streamwater chemistry. *Water Resources Research* 18: 51-63.

Dahlgren, R. A. & Driscoll, C. T. The Effects of Whole-Tree Clear-Cutting on Soil Processes at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, USA. *Plant and Soil* 158(2), 239-262. 94.

Egnell, G., Nohrstedt, H.-Ö., Weslien, J., Westling, O. & Örlander, G. 1998 Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränsleuttag, asktillförsel och övrig näringskompensation. Skogsstyrelsen Rapport 1:1998. Jönköping.

EMEP, 1998, Transboundary Acidifying Air Pollution in Europe. EMEP/MS-Clear Status report – Part 1.

Hallgren Larsson E., Knulst, J., Lövblad, G., Malm, G., Sjöberg, K & Westling, O. 1997. Luftföroreningar i södra Sverige 1985-1995. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning (IVL) Aneboda, B1257. 142 s. samt bilaga.

Johansson, M-B., Nilsson, T. & Olsson, M. 1999. Miljökonsekvensbeskrivning av Skogsstyrelsens förslag till åtgärdsprogram för kalkning och vitalisering. Skogsstyrelsen rapport 1:1999.

Larsson, P.-E., Akselsson, C. Bengtsson, R. & Bjelke, U. 1999. Biologiska effekter i kalkad skog. Årsrapport 1998. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödning av skogsmark. IVL Svenska Miljöinstitutet, B 1343. Aneboda 59 s.

Moldan F., Westling O. & Munthe J. 1999. Geochemical modelling of acidification and recovery in forest soils. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning, IVL B 1323. Göteborg 56 s.

Nilsson, S.I. & Tyler, G. 1995. Acidification-induced chemical changes of forest soils during recent decades - a review. - *Ecological Bulletins* 44:54-64. Copenhagen.

Olsson, M. & Melkerud, P.-A., 1991. Determination on weathering rates based on geochemical properties in soil. I: E. Pulkkinen (red.), *Environmental Geochemistry in Northern Europe*, Geological Survey of Finland, Special Paper 9, Espoo, 69-78.

Olsson M, Rosen K, & Melkerud P-A. 1993. Regional modelling of base cation losses from Swedish forest soils due to whole-tree harvesting. *Applied Geochemistry*, suppl. issue 1993; 189-194.

Renberg I., Korsman T. & Anderson N.J., 1993. A temporal perspective of lake acidification in Sweden. *Ambio* Volume 22, 264-271.

Rosén K., 1988. Effekts of biomass accumulation and forestry on nitrogen in forest ecosystems. In: Nilsson J. and Grennfelt P-I., eds., *Critical loads for sulphur and nitrogen, report from a workshop held at Skokloster, Sweden 19-24 March 1988*, Miljörapport 1988:15, Nordic Council of Ministers, Copenhagen.

Skyllberg U., Jacks, G. & Westling, O. 2001. Markförsurningsprocesser. Skogsstyrelsen Jönköping (i tryck).

Staaf, H., Persson, T. & Bertills (red.) 1996. Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet. Rapport 4559: 111-120. ISSN 0282-7298.

Sverdrup, H. & Rosen, K. Long-term base cation mass balances for Swedish forests and the concept of sustainability. *Forest Ecology and Management* 110(1-3), 221-236. 98.

Sverdrup, H. & Warfvinge, P. 1993. Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model PROFILE. *Applied Geochemistry* 8, 273-283.

Warfvinge, P. & Bertills (red.), U. 2000. Naturens återhämtning från försurning. Naturvårdsverket. Rapport 5028.

Örlander, G., Westling, O. & Petersson, P., 1994. Markvattnets innehåll av baskatjoner och aluminium och dess påverkan på tillväxt och kådflöde i kraftigt försurad gran-skog. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning (IVL) Aneboda, B 1155. 18 s.

IVL Svenska Miljöinstitutet AB

IVL är ett oberoende och fristående forskningsinstitut som ägs av staten och näringslivet. Vi erbjuder en helhetssyn, objektivitet och tvärvetenskap för sammansatta miljöfrågor och är en trovärdig partner i miljöarbetet.

IVLs mål är att ta fram vetenskapligt baserade beslutsunderlag åt näringsliv och myndigheter i deras arbetet för ett bärkraftigt samhälle.

IVLs affärsidé är att genom forskning och uppdrag snabbt förse samhället med ny kunskap i arbetet för en bättre miljö.

Forskning- och utvecklingsprojekt publiceras i

IVL Rapport: IVLs publikationsserie (B-serie)
IVL Nyheter: Nyheter om pågående projekt på den nationella och internationella marknaden
IVL Fakta: Referat av forskningsrapporter och projekt
IVLs hemsida: www.ivl.se

Forskning och utveckling som publiceras utanför IVLs publikationsservice registreras i IVLs A-serie. Resultat redovisas även vid seminarier, föreläsningar och konferenser.



IVL Svenska Miljöinstitutet AB

IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd

P.O.Box 210 60, SE-100 31 Stockholm
Hälsingegatan 43, Stockholm
Tel: +46 8 598 563 00
Fax: +46 8 598 563 90

P.O.Box 470 86, SE-402 58 Göteborg
Dagjämningsgatan 1, Göteborg
Tel: +46 31 725 62 00
Fax: +46 31 725 62 90

Aneboda, SE-360 30 Lammhult
Aneboda, Lammhult
Tel: +46 472 26 77 80
Fax: +46 472 26 77 90

www.ivl.se