

SKOGSBRUK – MARK OCH VATTEN



Skogsskötselserien är en sammanställning för publicering via Internet av kunskap om skogsskötsel utan ställningstaganden eller värderingar.

Texterna har skrivits av forskare och har bearbetats redaktionellt både sakligt och språkligt. De är upphovsrättsligt skyddade och får inte användas för kommersiellt bruk utan medgivande.

I Skötselserien ingår:

1. Skogsskötselns grunder och samband
2. Produktion av frö och plantor
3. Plantering av barrträd
4. Naturlig förnyring av tall och gran
5. Sådd
6. Røjning
7. Gallring
8. Stamkvistning
9. Skötsel av björk, al och asp
10. Skötsel av ädellövskog
11. Blädningsbruk
12. Skador på skog
13. *Skogsbruk – mark och vatten*
14. Naturhänsyn
15. Skogsskötsel för friluftsliv och rekreation
16. Produktionshöjande åtgärder
17. Skogsbränsle
18. Skogsskötselns ekonomi
19. Skogsträdsförädling
20. Slutavverkning

Skogsskötselserien har tagits fram med finansiering av Skogsstyrelsen, Skogsindustrierna, Sveriges lantbruksuniversitet och LRF Skogsägarna. Bidrag har även lämnats av Energimyndigheten för behandling av frågor som rör skogsbränsle och av Stiftelsen Skogssällskapet.

Omarbetningar (revisioner) för att ta fram andraupplagor har till stor del även bekostats av Erik Johan Ljungbergs Utbildningsfond och Stiftelsen Skogssällskapet.

Skogsskötselserien – Skogsbruk – mark och vatten

Första upplagan, mars 2009

Andra omarbetade upplagan, mars 2015

Författare:

Tord Magnusson, Skog Dr, universitetslektor

© Tord Magnusson och Skogsstyrelsen

Redaktör: Clas Fries, Skogsstyrelsen

Typografisk formgivning: Michael Ernst, Textassistans AB

Grafisk profil: Louise Elm, Skogsstyrelsen

Diagrambearbetning, layout och sättning: Bo Persson, Skogsstyrelsen

Foto omslag: Ulf Johansson, fältundervisning i marklära, Tönnersjöheden, Halland

Utgivning: Skogsstyrelsen, www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien

Innehåll

Innehåll	3
SKOGSBRUK – MARK OCH VATTEN	5
Energibalansen	7
Frost, luftens temperatur	10
Markens temperatur	10
Tjäle	11
Vattenbalansen	13
Vattnets flödesvägar	14
Vattnets bindning i olika jordar	16
Luften i marken	18
Skogens näringsomsättning	19
Vittring	20
Kvävefixering	21
Deposition av luftföroreningar	22
Näringsupptagning	23
Nedbrytning och mineralisering	26
Nitrifikation	30
Markens jonbyte	31
Denitrifikation	33
Utlakning	33
Det aktiva skogsbrukets åtgärder	35
Kalavverkning	35
Temperaturvariationer, avrinning och näringstillgång ökar	35
Utlakning till vattendrag och sjöar	38
Hygget och frostrisken	39
Mekanisk markberedning	42
Markberedning minskar konkurrensen om vatten och näring	42
Markberedning och uppfrysning	44
Effekter på näringsutlakning och erosion	45
Markberedningens långsiktiga produktionseffekter	47
Hyggesbränning	48
Röjning och gallring	50
Terrängkörning och markskador	51
Markkompaktering	51
Markbrott och rotskador	52
Erosionsrisk	52
Markstörning och kvicksilverutlakning	53
Skador på forn- och kulturlämningar	54
Våtmarker och skogsdikning	56
Våtmarksterminologi	56
Effekter på näringsomsättning	60
Effekter på hydrologi, marktemperatur och torvdensitet	61
Effekter på vattenkvalitet	64
Skogsgödsling	69
Produktionsgödsling med kväve på fastmark	69
Behovsanpassad gödsling – en intensivodlingsform	74
Torvmarksgödsling	75

Kalkning och asktillförsel på fastmark	78
Markens långsiktiga produktionsförmåga.....	81
Historiska debatter	81
”Tallhedsproblemet”	81
“Den gamla råhumusgranskogens” – marktillstånd.....	82
Intensivt nyttjande av biomassa	85
Näringsfördelning mark – bestånd.....	85
Effekter av GROT-skörd	89
Effekter av stubbrytning.....	91
Tar baskatjonerna i marken slut?	92
Litteratur	96

SKOGSBRUK – MARK OCH VATTEN

Allmänt. De olika organismerna i ett skogsekosystem konkurrerar ständigt om grundläggande tillväxtfaktorer - framför allt energi, vatten och näringsämnen. Alla åtgärder i skogsbruket har effekter på mark och vatten. För att förstå hur, är det nödvändigt att ha en inblick i skogens omsättning av energin, vattnet och näringsämnena.

Energibalansen. Strålningsenergin från solen driver processerna i biosfären, innan den slutligen avgår till rymden i form av värmestrålning. Huvuddelen av inkommande solstrålning åtgår för uppvärmning av atmosfär, vegetation och mark, samt för vattenavdunstning. Genom växternas fotosyntes omvandlas en liten del av solstrålningen till kemiskt bunden energi i organiskt material.

Vattenbalansen. Vatten omsätts i ett globalt kretslopp som inbegriper vattenmagasin i lösa jordlager och sprickig berggrund, sjöar, hav, samt atmosfären.

Luften i marken. När växtrötterna andas (respirerar) konsumeras syrgas och bildas koldioxid. Därför måste det ständigt ske en luftväxling mellan markens porer och atmosfären, så att det finns syrgas i den jord som omger rötterna.

Skogens näringsomsättning. Växter tar upp mineralnäringsämnen från marken och bygger in dem i organiskt material. Nedbrytarorganismer frigör näringsämnena från dött organiskt material och gör dem återigen tillgängliga för växter. Växternas näringsbehov är allra störst för kväve, och därefter kalium. De resterande makronäringsämnena behövs i ungefär lika stora mängder.

Det aktiva skogsbrukets åtgärder. Kalavverkning, röjning och gallring, mekanisk markberedning, hyggesbränning, skogsdikning samt gödsling är åtgärder som på olika sätt påverkar mark- och vattenförhållanden.

Markens långsiktiga produktionsförmåga. Skogsbruksmetodernas påverkan på markens långsiktiga produktionsförmåga har alltid varit viktiga inslag i den skogliga debatten. Sådana diskussioner speglar hur kunskaper om skogsekosystemet växt fram och även ge en förklarande bakgrund till de skogsbruksmetoder som tillämpas idag.

De olika organismerna i ett skogsekosystem konkurrerar ständigt om grundläggande tillväxtfaktorer – framför allt energi, vatten och näringsämnen. Den stenhårda konkurrensen lättar ibland tillfälligt, efter ”katastrofartade” förändringar i livsmiljön. Exempel på naturliga katastrofer som påverkar förutsättningarna för både växter och nedbrytare är skogsbrand, stormskador, sjukdomar och insektshärjningar.

Människan har lärt sig att använda kraftig störning som huvudmetod i all odling. De produktions- och föryngringsinriktade skötselåtgärderna i skogsbruket avser att gynna vissa individer eller organismgrupper i förhållande till andra, eller att aktivt motverka konkurrenter genom att försämra livsmiljön för dessa.

Alla åtgärder i skogsbruket har effekter på mark och vatten. För att förstå hur, är det nödvändigt att ha en inblick i skogens omsättning av energi, vatten och näringsämnen.

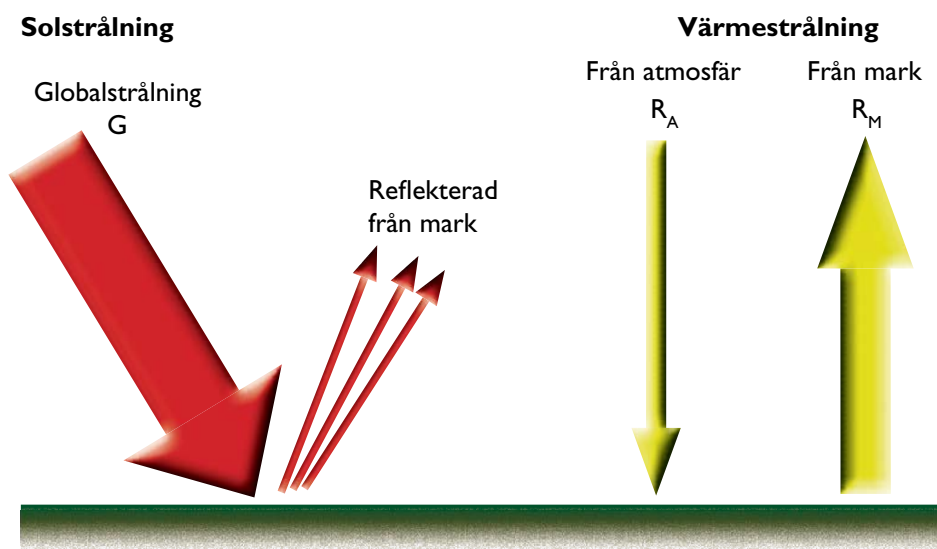
Skogsekosystemen drivs i grunden av strålningsenergin från solen. De gröna växterna omvandlar en del av solenergin till kemisk energi i form av organiskt material. Det organiska materialet byggs samman av koldioxid från luften samt vatten och mineralnäringsämnen från marken. Nedbrytarorganismerna – djur, svampar och bakterier – lever på den kemiskt bundna energin i organiskt material. De är således beroende av döda rester, så kallade förna, från de gröna växterna. De inbyggda näringsämnena i det organiska materialet blir, genom mikrobiell nedbrytning, så småningom återigen tillgängliga för växterna. Förnans mängd, dess kvalitet som energikälla och dess halter av mineralnäringsämnen blir därmed av avgörande betydelse för ståndortens uthålliga produktionsförmåga.

Vattnets ständiga genomströmning utgör den viktiga länken för materialtransport mellan land- och vattnekosystemen.

Energibalansen

Strålningsenergin^{1,2,3} från solen driver, direkt eller indirekt, processerna i biosfären. Energin i sig själv är oförstörbar, men den kan omvandlas och uppträda i olika former och kan spridas på olika sätt. Strålningsenergin kan exempelvis omvandlas till kemiskt bunden energi, eller till värme. Det förstnämnda, d.v.s. fotosyntesens omvandling av strålning till kemiskt bunden energi i organiskt material, utgör endast en mycket liten del av inkommande solstrålning (ca 1–2 %).

Nettostrålningen för en yta (Q_N) är nettoresultatet av all in- och utstrålning, d.v.s. både kortvågig solstrålning och långvågig värmestrålning (figur MV1; faktaruta 1). Under vissa tidsperioder är nettostrålningen positiv – till exempel vid klart väder mitt på dagen, särskilt sommartid – och då värms vegetation och mark upp. Andra perioder är den negativ – vid klart väder under natten – varvid vegetation och mark avkyls.



Figur MV1 Strålningsbalansen vid jordytan. Det sammantagna resultatet av in- och utgående strålningskomponenter avgör nettostrålningen, Q_N (se Faktaruta 1). Efter Odin, 1969.⁴

¹ Odin, H. 1983. *Kompendium i skogsmeteorologi*. SLU, inst. för skoglig ståndortslära.

² Lundmark, J.-E. 1988. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 1 – Grunder*. Skogsstyrelsen.

³ Ottosson Löfvenius, M. & Perttu, K. 2005. *Kompendium i Klimatologi – med introduktion till Skogsmeteorologi*. SLU, inst. för skogsekologi.

⁴ Odin, H. 1969. Hyggesstruktur och mikroklimat. I: *Föryngringsfrågor i det mekaniserade skogsbruket*. Kurskompendium. Sveriges Jägmästares och Forstmästares Riksförbunds Fortbildnings AB, samt SLU, inst. för skogsföryngring.

$$Q_N = G(1-a) + R_A - R_M$$

Faktaruta 1

där

Q_N = Nettostrålning

G = Globalstrålning, d.v.s. den kortvågiga instrålningen (solljus) som träffar vegetationen/marken

a = mark- eller vegetationsytans albedo, d.v.s. den omedelbara reflektion av en del av solstrålarna som sker då de träffar en yta

R_A = inkommande långvågig strålning (värmestrålning) från gaser och partiklar i atmosfären

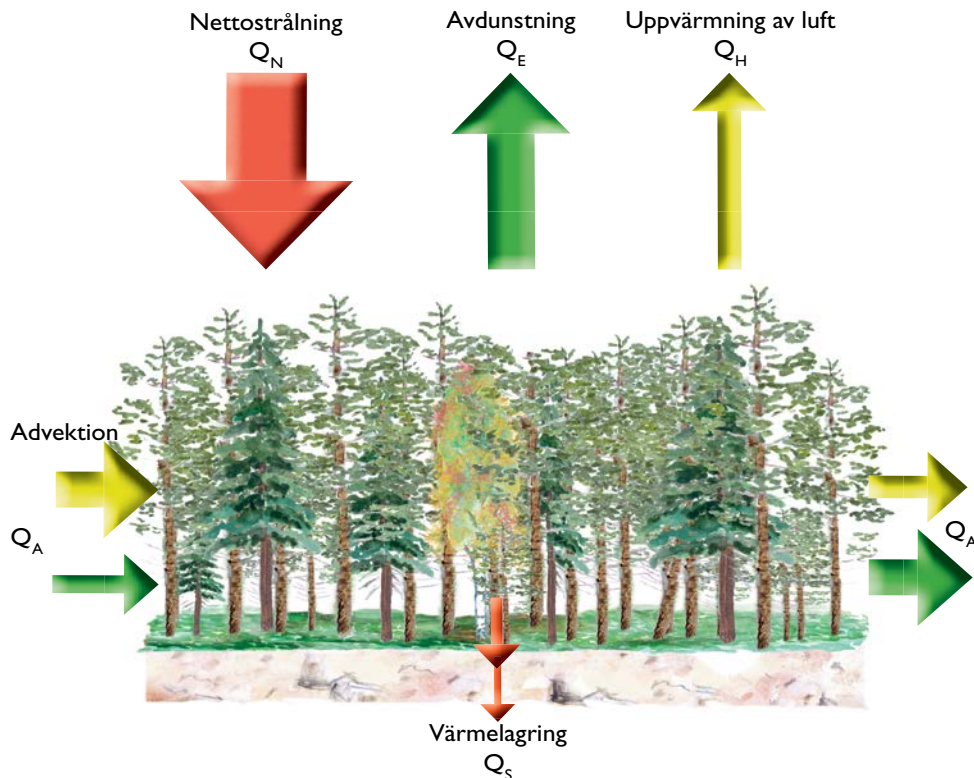
R_M = avgående långvågig strålning (värmestrålning) från mark eller vegetation tillbaka till atmosfären

Energibalansen är en principmodell som beskriver utbytet av energi i olika former mellan ett område och dess omgivning (figur MV2). Energibalansen kan i ord uttryckas på följande sätt (se faktaruta 2 för fullständig ekvation och vedertagna beteckningar):

Nettostrålning + tillfört värme – förlorat värme +/- värmelagring i bestånd/mark = 0

Här är det alltså inte bara strålning som beaktas, utan även till- och bortförsel av värme genom luft rörelser och genom värmeledning. Luftflödet kan vara horisontellt eller vertikalt. Luftens energiinnehåll kan delas upp i den torra luftens energi samt dold energi i vattenånga. Energin i den luftmassa som tillförs eller lämnar området avgörs alltså av om den är varm eller kall och om den har hög eller låg luftfuktighet. All avdunstning till atmosfären, d.v.s. bortförsel av vattenånga, medför värmeförluster.

Energibalansens variabler påverkas exempelvis av trädslag och av skogsbruksåtgärder såsom avverkning, markberedning, hyggesbränning och dikesdränning och därmed påverkas också markens och den marknära luftens temperaturförhållanden.



Figur MV2 Schematisk skiss av energiflöden under dagtid, för ett skogsbestånd (beteckningar förklaras i faktaruta 2). Efter Odin, 1976.⁵ Illustration Bo Persson.

$$\pm Q_N \pm Q_A \pm Q_E \pm Q_H \pm Q_S = 0$$

Faktaruta 2

eller, om de horisontella värmeflödena med vind till och från området ifråga antas ta ut varandra

$$\pm Q_N \pm Q_E \pm Q_H \pm Q_S = 0$$

där

Q_N = Nettostrålning.

Q_A = Nettoadvektion. Horisontell transport av luftmassor (vind), som tillför eller bortför sensibelt och latent värme (se nedan).

Q_E = Vertikalt flöde av latent (dolt) värme i form av tillförsel / bortförsl av vattenånga. Kopplat till vattnets fasövergångar*.

Q_H = Konvektion. Vertikalt flöde av sensibelt (kännbart) värme.

Q_S = Lagringsterm. Värmeflöden som genom värmeledning ger upphov till höjd eller sänkt temperatur i beståndsluft och i systemets ”fasta kroppar”, framför allt biomassa och mark. Lagringstermen innefattar i princip även långsiktiga lagringsförändringar av kemiskt bunden energi, d.v.s. nettoresultatet av fotosyntes minus respiration.

* Värme avges till en yta då vattenånga kondenserar (ånga → vatten), eller fryser (vatten → is), exempelvis vid bildning av dagg eller rimfrost. Värme konsumeras däremot (dvs avkyler ytan) vid avdunstning.

⁵ Odin, H. 1976. Skogsmeteorologiska faktorer förändring med kalhuggning. Del I. Skogshögskolan, inst. för skogsförnygring. *Rapporter och uppsatser* nr 73–1976.

Frost, luftens temperatur

Med frost⁶ menas att lufttemperaturen är under 0 °C. Begreppet brukar också innefatta den avsättning av iskristaller på vegetations- och markytor som kan bildas.

Frost vid markytan och i marknära luftlager uppstår på två olika sätt, vilka dock ofta samverkar:

- Advektionsfrost uppstår då redan kall luft (< 0 °C) tränger in över ett större område. Den kalla luften kan föras till ett visst område genom storskaliga luftrörelser i atmosfären. Kall luft har större densitet än varm luft, d.v.s. den är tyngre och tenderar att röra sig nedåt i terrängen.
- Strålningsfrost uppkommer då vegetations- eller markytan och de marknära luftlagren successivt avkyls genom långvågsstrålning ut till atmosfären under klara och vindstilla nätter. Avkylningsprocessen vid markytan går mycket snabbare på kal mark än i bestånd, eftersom de överskärmande träden minskar värmeutstrålningen från marken. Denna typ av frost uppstår alltså främst på kalmark. Frostrisken är störst i den lokala topografins flacka partier och i sänkor, där den marknära luften ligger stilla under natten.

Markens temperatur

Markens *värmeledningsförmåga* och *värmelagringsförmåga* är mycket viktiga begrepp för att förstå dygns- och årstidsvariationer i markens temperatur.

Värmelagringsförmågan anger hur mycket energi som måste tillföras, per viktsenhet material, för att dess temperatur ska öka en grad.

Värmeledningsförmågan anger hur effektivt värme sprids i marken.

Markluften, markvattnet och de två huvudtyperna av fast material – organiskt material respektive mineralpartiklar – har mycket olika värmeledningsförmåga (tabell MV1). Därför är det stor skillnad mellan torr och fuktig jord, och mellan torv- och mineraljord, när det gäller hur marken som helhet leder värme. På liknande sätt har markens beståndsdelar olika värmelagringsförmåga – vatten har störst och luft minst.

⁶Ottosson Löfvenius, M. & Loman, G. 1997. Lokal- och mikroklimat. I: *Marken i skogslandskapet*. Skogsstyrelsen.

Tabell MVI Värmeledningsförmåga och värmelagringsförmåga för de olika huvudkomponenterna i jord. Data från Hillel, 1982.⁷

	Luft	Vatten	Mineralmaterial (genomsnitt)*	Organiskt material*
Värmeledningsförmåga (<i>W/m, °C</i>)	0,025	0,57	2,9	0,25
Värmelagringsförmåga (<i>MJ/m³, °C</i>)	0,0012	4,2	2,0	2,5

* Observera att angivna värden för mineralmaterial och organiskt material gäller materialet som sådant, d.v.s. massiv fast substans. Jorden som helhet består däremot av en stor volymsandel porer, fyllda antingen med luft eller vatten. Värmelagringsförmågan i torr mineraljord och torr organisk jord är därför bara ca hälften respektive en fjärdedel av tabellens värden för respektive material. Värmeledningsförmågan i torr mineraljord och torr organisk jord är i bägge fallen i storleksordningen en tiondel av tabellens värden för respektive material (Odin, 1983).⁸

För att få en uppfattning om hur markens temperaturförhållanden skiljer sig mellan jordar måste man ta hänsyn till både värmeledningsförmåga och värmelagringsförmåga. Några grova generaliseringar kan göras.

Fuktiga jordar värms upp långsammare än torra jordar, eftersom vattnet kräver stor mängd tillförd energi per grad temperaturhöjning. I gengäld sker avkyllningen också långsammare i fuktig jord. Detta gäller i princip för såväl mineraljordar som torvjordar. Likaså kan konstateras att värme sprider sig långsammare i organiskt material än i mineralmaterial, på grund av det organiska materialets låga värmeledningsförmåga. Skillnaden blir särskilt stor vid jämförelse av torra mineral- och organiska material. En viktig konsekvens av detta är att organiska ytskikt som mossa och humuslager har värmeisolerande egenskaper, både när det gäller uppvärmning (instrålning) och avkyllning (utstrålning).

Tjäle

Isbildning i marken benämns *tjäle*.^{9,10} Markens värmeförluster under hösten och vintern gör att marktemperaturen sjunker. Slutligen fryser markvattnet från ytan och neråt. Torra och väl-dränerade jordar tjälar snabbt och djupt. Marker med stor värmelagningskapacitet, såsom finkorniga och därmed vattenhållande jordar, samt låglänta områden med ytligt liggande grundvattnenytta, tjälar senare och till mindre djup.

Snö är isolerande och minskar därför markens värmeförluster. Tidig bildning av snötäcke på förvintern, och mäktigt snötäcke under vintern, har avgörande betydelse för att begränsa markytans avkyllning och därmed tjälens nedträngande under en vinter.

⁷ Hillel, D. 1982. *Introduction to Soil Physics*. Academic Press Inc.

⁸ Odin, H. 1983. *Kompendium i skogsmeteorologi*. SLU, inst. för skoglig ståndortslära.

⁹ Troedsson, T. & Nykvist, N. 1973. *Marklära och markvård*. Almqvist & Wiksell Läromedel AB. Stockholm.

¹⁰ Grip, H. & Rohde, A. 1988. *Vattnets väg från regn till bäck*. Hallgren & Fallgren, Studieförlag AB.

Tjälningdjupet påverkas även av skogsbeståndet. Tjälningen i skogen fördröjs genom att beståndet minskar markens värmeutstrålning till atmosfären. Tjälningdjupet kan därför vara mindre i skogen än på kal mark. Men om beståndet är så tätt att snötäcket på marken blir mycket tunnare än ute på kalmarken, kan denna faktor ta överhanden och den sammantagna effekten blir tvärtom ett större tjälningdjup i skogen.

Tjälskjutning

Vatten får ca 10 % större volym när det fryser till is. Detta ger upphov till så kallad *tjälskjutning*. Mycket fuktig jord utvidgas vid frysning och skjuter markytan uppåt.

Jord som vid isbildningen inte är särskilt fuktig, såsom till exempel väl-dränerad sandjord, får obetydligt förhöjd markyta eftersom de växande iskristallerna får plats i jordens luftfyllda porer.

Jord som innehåller mycket finmo- och mjälapartiklar¹¹ är särskilt starkt tjälskjutningsbenägen. Sådan jord är oftast nära vattenmättnad när den fryser på hösten och har dessutom stor förmåga att från större djup suga upp ytterligare vatten till isbildningszonen under frysningsprocessen. Rena islinser kan på så sätt bildas och bli flera cm mäktiga.

Ojämn tjälskjutning, så kallat *tjälskott*, beror på att vatten från omgivande och underliggande jord har sugits in mot en tillväxande islins som därför skjuter upp markytan särskilt mycket i förhållande till omgivande markyta. Detta fenomen blir särskilt märkbart på vägar och ger ofta upphov till stora hål när tjällossning sker. Det ansamlade vattnet under upphöjningen rinner bort, under samtidig erosion av jordmaterial.

¹¹ En mineraljordart har en viss partikelsammansättning (textur). Olika kornstorlekar har olika namn. Huvudfraktionerna är följande: Ler (<0,002 mm diam.); mjäla (0,002–0,02 mm); mo (0,02–0,2 mm); sand (0,2–2 mm); ; grus (2–20 mm); sten (2–20 cm); block (>20 cm).

Vattenbalansen

Vatten omsätts i ett globalt kretslopp som inbegriper vattenmagasin i lösa jordlager och sprickig berggrund, sjöar, hav, samt atmosfären. Vattnet avdunstar från både land och hav till atmosfären – landytorna tillförs vatten via nederbörden – och avrinnande vatten rör sig via sjöar och floder mot havet.

Till- och bortförsel av vatten för ett begränsat skogsområde utan tillrinning, eller ett hydrologiskt avrinningsområde (figur MV3), d.v.s. vattenbalansen,^{12,13} kan i ord uttryckas på följande sätt (se faktaruta 3 för fullständig ekvation och vedertagna beteckningar):

Nederbörd = evapotranspiration (avdunstning) + avrinning +/- lagring

Nederbörden kan antingen avdunsta tillbaka till atmosfären, rinna bort, eller lagras tillfälligt inom området. Den totala avdunstningen, eller evapotranspirationen, består av två olika delposter:

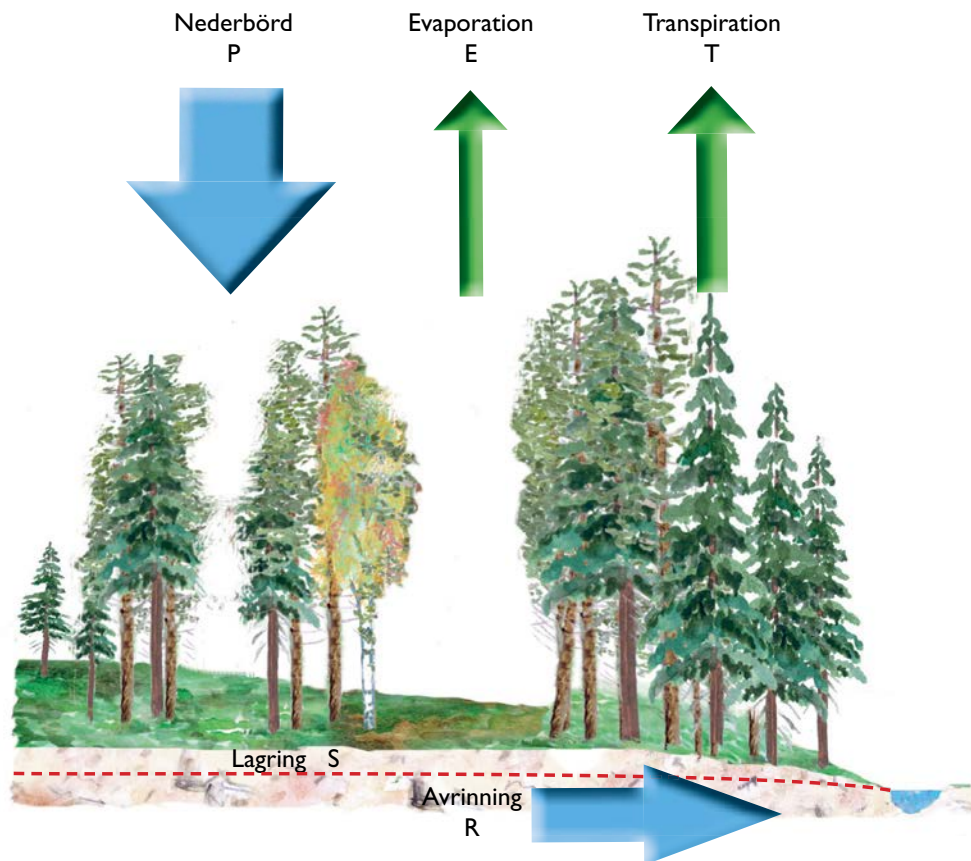
- Med *evaporation* menas avdunstning från våta ytor (vattenytor, våta blad eller barr, hållar, jord, snö, etc).
- Med *transpiration* menas vatten som via växters ledningsvävna-der och klyvöppningar avdunstar till atmosfären.

Avrinningen kan ibland delas upp på *grundvattenavrinning* och *ytavrinning*, där det sistnämnda avser vatten som aldrig tränger ner i jorden utan rinner bort på markytan. Förändringar i den tillfälliga lagringsposten kan till exempel vara höjning eller sänkning av grundvattenytan inom området, uppfuktning eller uttorkning av jorden ovan grundvattenytan, eller ansamling eller avsmältning av snötäcke, m.m. Förrådsfluktuationer av denna typ kan ofta ignoreras då man översiktligt beskriver ett områdes vattenbalans på årsbasis.

Många skogsbruksåtgärder, i synnerhet trädavverkning och dikning, påverkar vattenbalansen på ett mycket påtagligt sätt.

¹² Grip, H. & Rohde, A. 1988. *Vattnets väg från regn till bäck*. Hallgren & Fallgren, Studieförlag AB.

¹³ Rodhe, A. 1997. Vattnet i skogen. I: *Marken i skogslandskapet*, s. 81–103. Skogsstyrelsen.



Figur MV3 Vattenbalansens huvudkomponenter (beteckningar förklaras i texten och i faktaruta 3). Illustration Bo Persson.

$$P = (E + T) + R \pm S$$

Faktaruta 3

där

P = nederbörd, regn och snö (eng. Precipitation)

E = evaporation

T = transpiration

R = avrinning (eng. Runoff)

S = lagring, magasinering (eng. Storage)

Vattnets flödesvägar

Vattnet i marken kan karaktäriseras som antingen *fritt vatten* eller *bundet vatten*. Fritt vatten är vatten i sjöar och vattendrag, grundvatten i jord och berg, ytavrinnande vatten, samt det vattenöverskott som efter kraftig nederbörd är på väg att dräneras ner genom markprofilen till grundvattenytan (s.k. sjunkvatten). Det fria vattnets allmänna rörelseriktning genom marken och landskapet beror i grunden på gravitationen, men styrs av de olika flödesvägarnas kapacitet att leda vatten.

Vattnets infiltration i marken är en viktig process som påverkar vattnets flödesvägar fram till vattendragen. *Infiltrationskapaciteten*, i förhållande till nederbördens intensitet, avgör om ytvatten bildas och om ytvattenavrinning kan förekomma. Ytvattenavrinning kan i sin tur ge upphov till erosion av marken.

Grundvatten nybildas

I vårt humida klimat tillför nederbörden tämligen regelbundet nytt vatten över hela landskapet. Detta ger ständig nybildning av grundvatten, vilket kompenserar för grundvattenavrinningen till lägre liggande terräng. Variationer i grundvattenytans läge över tiden orsakas dock av långa torr- och nederbördsperioder, liksom av vinterns snöackumulation och vårens snösmältning.

Grundvattnet rör sig hela tiden sakta ner mot terrängens lägsta delar, där grundvattenytan närmar sig markytan och ytvatten uppträder. Nivåskillnaden mellan vattenytan i dalgångarnas ytvatten och de upphöjda terrängavsnitens grundvattenyta upprätthåller den tryckskillnad som driver grundvattnets ständiga rörelse mot lägre terräng.

I ett landskap med oregelbunden topografi kommer grundvattnet på sin färd nedåt mot bäckdalar och sjöar att tränga upp till markytan på många lokalt låglänta ställen. Den hydrologiska benämningen på dessa platser (myrar, surdråg, o.s.v.) är *utströmningsområden*. I vissa av områdena blir utströmningen så kontinuerlig och så omfattande att ytvatten uppstår, d.v.s. avrinningen fortsätter på markytan. De områden i landskapet där nederbörden istället infiltrerar ner i marken och överskottsvattnet bildar nytt grundvatten som sedan sakta rör sig nedåt i grundvattenzonen, kallas *inströmningsområden*. Arealmässigt dominerar inströmningsområdena över utströmningsområdena.

Vattnet i grundvattenzonen rör sig dock långsamt eftersom vattenledningsförmågan är begränsad (tabell MV2). Denna bestäms av jordporernas storlek, vilket i sin tur avgörs av jordartens partikelstorlek och packningsgrad. I de flesta jordar är vattenledningsförmågan mycket högre nära markytan än på större djup, på grund av porösare jord med rotkanaler, m.m.

Tabell MV2 Överslagsvärden för vattenledningsförmåga (mättad hydraulisk konduktivitet) i olika mineraljordar*. Data från Fagerström och Wiesel, 1972.¹⁴

Sediment	Morän	Vattenledningsförmåga* vid mättnad (m/s)
Grovsand		$10^{-2} - 10^{-4}$
Mellansand		$10^{-3} - 10^{-5}$
Grovmo		$10^{-4} - 10^{-6}$
Finmo	Grusig morän	$10^{-5} - 10^{-7}$
	Sandig morän	$10^{-6} - 10^{-8}$
Mjäla	Moig morän	$10^{-7} - 10^{-9}$
Lera	Moränlera	$< 10^{-9}$

* Vattenledningsförmågan i torvjordar minskar på analogt sätt med partikelstorlek. I låghumifierad vitmossstorv är den mättade vattenledningsförmågan i storleksordningen 10^{-4} m/s, och i höghumifierad torv $10^{-6} - 10^{-8}$ m/s.¹⁵

¹⁴ Fagerström, H., Wiesel, C.-E. & SGF:s laboratoriekommitté. 1972. Permeabilitet och kapillaritet. *BFRs informationsblad* B7:1972.

¹⁵ Malmström, C. 1928. Våra torvmarker ur skogsdikningssynpunkt. *Meddelanden från Statens skogsförsöksanstalt* 1928, 24.

Grundvattenytan i ett skogslandskap dominerat av mäktiga moränavlagringar ligger ofta nära markytan även i högre terränglägen. I områden med sandiga och grusiga jordar, till exempel isälvsediment, sammanfaller däremot grundvattenytans läge inte lika väl med markytans topografi. Det grova materialets större vattenledningsförmåga leder till en snabbare genomströmning av grundvatten och grundvattenytan ligger därför på större djup under markytan i sådan terrängs höjdlägen.

Ytavrinning ovanlig

Ytavrinning (på markytan) förekommer relativt sällan i normal väl-dränerad skogsmark i Sverige. En viktig orsak till detta är den klimatbetingade ansamlingen av organiskt material i ett humuslager vid markytan, vilket ger hög infiltrationskapacitet. Ytavrinning kan dock förekomma i sluttningar, framför allt i samband med snabb snösmältning på tjälad mark, eller efter mycket häftiga regn. Det förekommer också i högre utsträckning på kal mark, såsom hyggen, än i skog.

Vattnets bindning i olika jordar

Alla jordar innehåller vatten. Även i en ”torr” jord är luftfuktigheten nere i marken normalt 100 %, vilket medför att alla fasta ytor är täckta av åtminstone ett tunt skikt av adsorberade vattenmolekyler. Kapillärkrafter kan sedan bygga på detta skikt av bundet vatten så att det fyller ut alltmer av utrymmet mellan partikelytorna.¹⁶ Detta så kallade *markvatten* hålls kvar i det porösa jordmaterialet ovanför grundvattenytan. På dränerade marker utgör det bundna markvattnet vegetationens huvudsakliga vattenförråd mellan nederbördsperioderna. När nederbörd infiltrerar i marken återställs först mängden bundet markvatten, upp till den aktuella jordens vattenhållande kapacitet, varefter fritt vatten på grund av gravitationen dräneras till grundvattnet.

Kapaciteten för att binda och hålla kvar vatten står i omvänd proportion till storleken på de hålrum (porer) som finns mellan jordens fasta partiklar. Ju större andel små porer desto fuktigare jord. Porstorleken är i sin tur relaterad till partikelstorleken, d.v.s. små partiklar ger små porer. I väl sorterade¹⁷ jordar är sambandet mellan partikelstorlek och porstorlek mycket starkt, och porsystemet domineras därför ofta av en viss porstorlek. I osorterade jordar, såsom moräner, är porfördelningen bredare. Huvudprincipen är dock att det i första hand är de minsta partikelstorlekarna som bestämmer porstorleken, eftersom finmaterialet fyller ut hålrummen mellan stora partiklar.

Den vattenhållande förmågan är mycket liten i väl sorterade grovkorniga jordarter, till exempel sand, medan den är mycket stor i finkorniga mjåla- och lersediment. Moränjordar med genomsnittlig sammansättning, d.v.s. sandiga till moiga, har tack vare andelen finfraktioner tämligen goda vattenhållande egenskaper. Den normalt stora volymandelen block och sten i morän innebär dock att den ”effektiva” jordvolymen ibland kan vara mindre än 50 % av totala jordvolymen.

¹⁶ Grip, H. & Rohde, A. 1988. *Vattnets väg från regn till bäck*. Hallgren & Fallgren, Studieförlag AB.

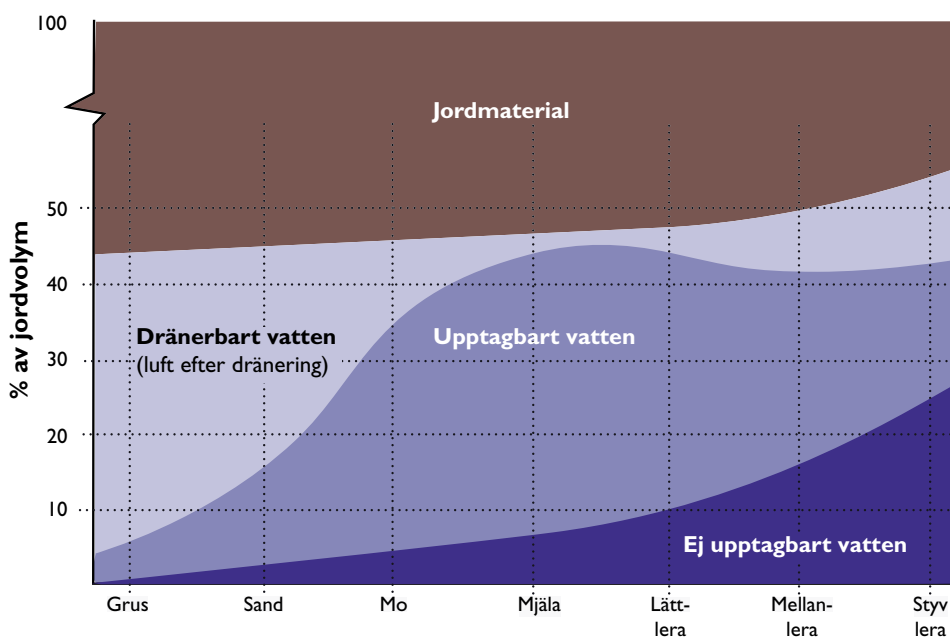
¹⁷ Mineraljordarna indelas i sorterade (framför allt vattensorterade sedimentjordar) och osorterade (framför allt moränjordar). Sorterade jordar, exempelvis sand eller mjåla, domineras av en eller ett fåtal partikelfraktioner, medan osorterade normalt innehåller alla fraktioner.

I finkorniga jordar som håller kvar mycket bundet vatten, medför den alltför höga vattenhalten risk för syrgasbrist kring växtrötterna och för mikroorganismer, samt problem med tjälksjutning och uppfrysning.

Vatten binds olika hårt

Det är inte bara mängden bundet vatten som är betydelsefullt, utan även hur hårt det är bundet. I mycket finkorniga jordar, med små porer, är inte bara de flesta porer vattenfyllda, utan vattnet är dessutom hårdare bundet än vatten i större porer. Små porer suger alltså åt sig vattnet starkare. En stor del av vattnet kan till och med vara så hårt bundet att det inte är upptagbart för växterna. I en lera kan upp till hälften av allt vatten vara bundet i så små porer att det är otillgängligt (figur MV4).

Med begreppet *kapillär uppsugning* menar man en jords förmåga att suga vatten från grundvattenytan upp mot markytan. Denna förmåga är direkt kopplad till storleken (diametern) på jordens porer. Den så kallade kapillära stighöjden för en jord anger till vilken höjd ovan grundvattenytan vatten sugs upp. Kapillära stighöjden är mindre än 1 dm i en ren grovsand, medan den kan vara flera tiotals meter i en starkt lerhaltig jord. Detta innebär exempelvis att vegetation som växer i en väl-dränerad sandjord, i praktiken är helt beroende av regelbunden nederbörd för sin vattenförsörjning.



Figur MV4 Vattenhållande egenskaper i naturligt sorterade sedimentjordar. Relativa mängder av dränerbart, upptagbart och icke upptagbart vatten i det övre mineraljordsskiktet (med viss inblandning av organiskt material). Ungefärliga värden baserade på data från Andersson & Wiklert, 1972.¹⁸

¹⁸ Andersson, S. & Wiklert, P. 1972. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XXIII. Grundförbättring Nr 2-3, 1972.

Luften i marken

När växtrötterna andas (respirerar) konsumeras syrgas och bildas koldioxid. Fastmarksväxter har inga luftledningsvävnader ner genom stammen till rötterna. Därför är de helt beroende av att det finns syrgas i jorden som omger rötterna. Markens luftväxling innebär att ny syrgas tränger ner i marken från atmosfären och att bildad koldioxid på omvänt sätt försvinner upp till atmosfären. Detta gasutbyte sker främst genom molekylär diffusion, d.v.s. koncentrationsutjämning.

Tillgången på syrgas i jorden är en förutsättning inte bara för växterna utan också för mikroorganismernas nedbrytning av dött organiskt material.¹⁹ Dessutom regleras eller påverkas flera andra centrala kemiska och biokemiska markprocesser av syrgastillgången.

Syrgasen i marken finns främst i markluften. Luft, i en någorlunda dränerad jord, finns i de allra största porerna (> ca 0,05 mm diam.). Allvarlig brist på syrgas uppstår när vatten helt tränger bort luften från markens porsystem. Syrgasbrist är därför kopplad till jordar med hög markfuktighet. Hög fuktighet nära markytan kan orsakas av en mycket ytligt liggande grundvattenyta, eller av att jordarten är så finkornig att stark kapilläruppsugning sker från en grundvattenyta på större djup.

Syrgas löser sig dock även i någon mån i vatten. Det är emellertid så låga koncentrationer att det bara räcker en mycket kort tid för en aktiv syrgas-konsumerande rot i vattnet. Stillastående vatten medför därför snabbt total syrgasbrist. Men om nytt vatten med däri löst syrgas ständigt tillförs området kring roten, kan syrgastillförseln ändå vara långsiktigt tillräcklig. *Lateralt rörligt grundvatten*, oftast benämnt ”rörligt markvatten”, eller i äldre litteratur ”översilning”, är en sådan situation. Jorden kan alltså ständigt vara nära vattenmättnad, utan att syrgasbrist för rötterna inträder. Det sidledes rörliga grundvattnet för också med sig lösta näringsämnen till rötternas närhet. Sammantaget brukar detta fenomen kallas *slutningseffekten*. I skogliga sammanhang är det ett viktigt specialfall, eftersom det medför högre bonitet.

¹⁹ Gröna växter omvandlar vid fotosyntesen strålningsenergi till kemiskt bunden energi i form av kolhydrater med mera. Processen kräver tillgång till vatten och koldioxid, men frisätter syrgas till atmosfären. Växterna själva, liksom nedbrytande mikroorganismer, utviner sedan vid respirationen (andningen) den lagrade energin i det organiska materialet. Vid denna nedbrytning åtgår syrgas, medan vatten och koldioxid återbildas, d.v.s. omvända reaktioner jämfört med fotosyntesen.

Skogens näringsomsättning

Kväve (N), fosfor (P), kalium (K), kalcium (Ca), magnesium (Mg) och svavel (S) är de näringsämnen^{20,21} som för både växter och djur behövs i störst mängd, så kallade makronäringsämnen. Atmosfären är den primära källan för kväve. Berggrunden är den primära källan för de fem återstående makronäringsämnena. Växternas näringsbehov är allra störst för kväve, och därefter kalium. De resterande makronäringsämnen behövs i ungefär lika stora mängder.

Omsättningen av ämnen i naturen brukar beskrivas som *biogeokemiska kretslopp*. Begreppet antyder att såväl biologiska, geologiska, som kemiska omvandlingsprocesser kan bidra till de ämnesflöden som till slut bildar ett kretslopp.

Omsättning i den allra största skalan, d.v.s. utbytet av ämnen mellan landmassor, hav och atmosfär, kallas *globala kretslopp*. Om man går ner i skala och specifikt betraktar näringsomsättningen i en skog, växer det fram ett eget lokalt kretslopp som domineras av näringsflöden mellan vegetation och mark, mellan uppbyggande växter och nedbrytande mikroorganismer. Detta ”*lilla kretslopp*” är dock sammanlänkat med de stora globala kretsloppen via flera viktiga processer som orsakar till- eller frånflöden av näringsämnen. Kvävefixering, vittring av bergartsmaterial, och utlakning till vattensystemen, är exempel på sådana processer.

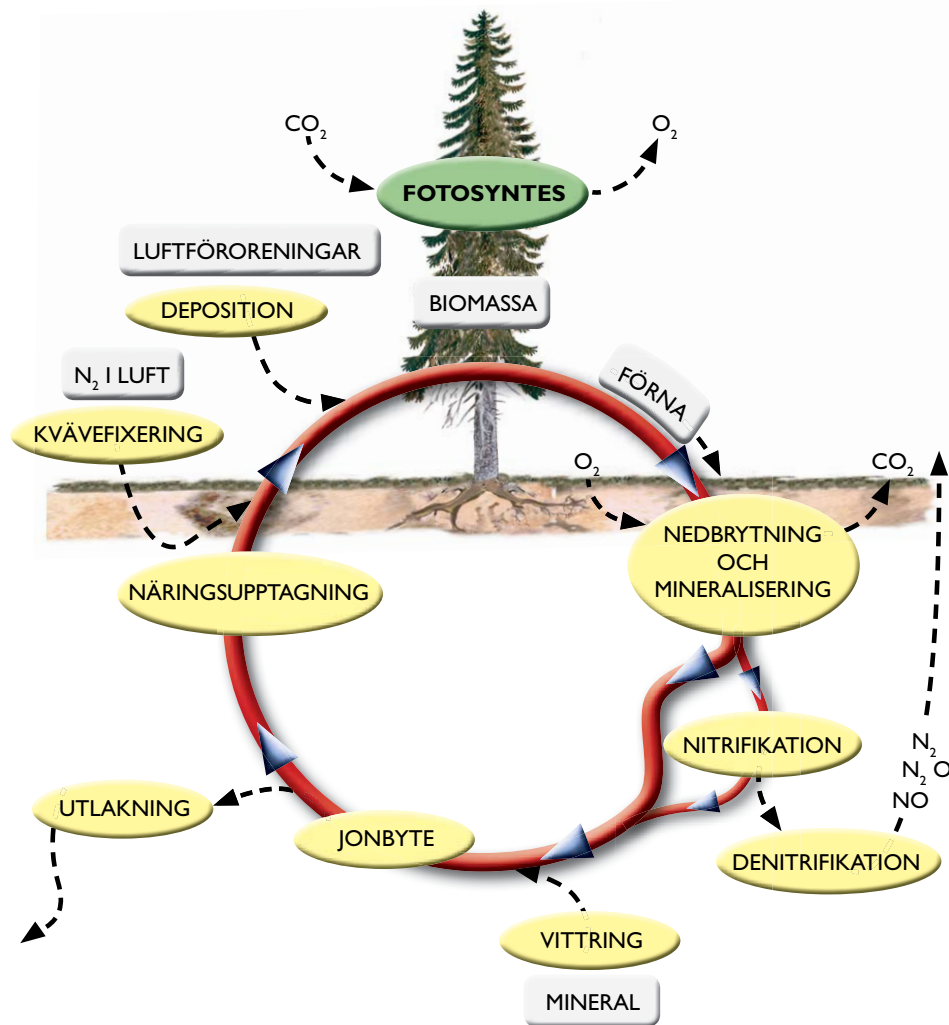
Lilla kretsloppet, kompletterat med de processer som länkar till de stora globala kretsloppen, utgör en grund för förståelsen av mark-växtsystemets näringsomsättning och ståndortens produktionsförmåga (figur MV5). Många skogliga skötselåtgärder påverkar direkt eller indirekt processerna som driver näringsämnenas omsättning i detta kretslopp.

Mineralvittring, kvävefixering (kvävebindning) och deposition från luften är tillförselprocesser som utgör kontaktlänkar mellan de globala kretsloppen och en ståndorts biogeokemiska kretslopp. Processerna tillför kontinuerligt men långsamt nya näringsresurser.

På omvänt sätt förloras ständigt näring till de globala kretsloppen genom denitrifikation (bara kväve) och utlakning. Mer oregelbunda förluster genom brand och genom människans skörd av biomassa tillkommer.

²⁰ Troedsson, T. & Nykvist, N. 1973. *Marklära och markvård*. Almqvist & Wiksell Läromedel AB. Stockholm.

²¹ Lundmark, J.-E. 1988. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortanpassat skogsbruk. Del 1 – Grunder*. Skogsstyrelsen.



Figur MV5 Viktiga processer som påverkar ståndortens biogeokemiska kretslopp av näringsämnen – ”Lilla kretsloppet”. Processerna beskrivs i nedanstående avsnitt. Illustration Bo Persson.

Vittring

Fysikalisk vittring innefattar mekanisk krossning och nötning av bergartsmaterial, is-, salt- och rotsprängning längs befintliga sprickor, samt sprickbildning på grund av starka temperaturvariationer. All sådan sönderdelning ökar angreppsytan för den påföljande kemiska vittringen.

Bergartsfragmenten – sten, grus, sand o.s.v. – består av olika mineral, med varierande kemisk sammansättning. Olika mineral har olika vittringsbenägenhet. Den kemiska vittringens intensitet i en jord är dessutom omvänt proportionell mot partikelstorleken. Därför är finkorniga jordar, särskilt lerrika jordar, näringsrikare än grovkorniga.

Kemisk vittring av mineralpartiklar är en mycket långsam process. Under de ca 10 000 år som gått sedan istidens slut har endast de minsta och mest lättvittrade primära mineralpartiklarna vittrat bort och då främst från det översta mineraljordsskiktet.

Vittringsreaktionerna påverkas dock också i hög grad av markens organismer, så kallad biokemisk vittring. Organiska syror som utsöndras av både

växtrötter och mikroorganismer påskyndar vittringen. Det är också visat att *mykorrhizasvampar* och vissa bakterier på ett än mera direkt och aktivt sätt kan öka vittringshastigheten.^{22,23,24} Den framtida vittringshastigheten är därför mycket svår att förutsäga.

Vittringen skapar lösta näringsämnen och fasta restprodukter

Vittringsprocessen medför sönderfall av mineralens kristallstruktur och frigörelse av lösta ämnen däribland växtnäringsämnen. Dessa kan sedan tas upp av växterna och förs då in i ståndortens näringskretslopp. Dessutom bildas, i större eller mindre omfattning, två mycket viktiga fasta restprodukter:

- En restprodukt är *sekundära lermineral*, vilka är små partiklar med den speciella egenheten att som helhet vara svagt negativt laddade. Detta medför att de ständigt attraherar alla positivt laddade lösta joner i omgivande markvätska (se *katjonbyte* nedan).
- En annan typ av fast restprodukt är så kallade *seskvioxider*, d.v.s. oxider eller hydroxider av järn, aluminium och mangan. Dessa har tvärtom en benägenhet att bli positivt laddade och kan därför istället binda till sig negativa joner från markvätskan.

En jord som utsätts för intensiv vittring under mycket lång tid (10 000-tals år) kommer i allt högre grad att bestå av dessa vittringsprodukter. Huvuddelen av lerpartiklarna som finns i nutida leror och leriga jordar har bildats genom kemisk vittring under tidigare mellanistider eller lösgjorts från svagt omvandlade lerstenar och lerskiffrar i berggrunden.

Vittringen motverkar försurning

Kemisk vittring är en *alkaliniserande* (basverkande) process, d.v.s. vätejoner konsumeras i vittringsreaktionerna. Samtidigt produceras fria baskatjoner, vilka bland annat bidrar till att höja jordens basmättnadsgrad. Vittringens kapacitet för att neutralisera försurning är mycket stor. Vid mycket intensiv försurningspåverkan kan dock vittringsreaktionernas hastighet vara otillräcklig jämfört med försurningshastigheten. Då sänks markens pH trots den stora potentiella neutralisationskapaciteten.

Kvävefixering

Växter kan inte alls utnyttja den form av kväve, kvävgas (N_2) som är den dominerande komponenten i atmosfären. Kvävet måste först kombineras med väte och bilda ammoniak eller ammonium (NH_3/NH_4^+) eller med syre och bilda till exempel nitrat (NO_3^-).

Omvandlingsprocessen från N_2 till NH_3/NH_4^+ (vilket därefter omedelbart

²² Unestam, T. & Finlay, R. 1998. Träd kan äta sten: nya perspektiv öppnas. *SLU. FaktaSkog* nr 9–1998.

²³ Breemen, N. van, Finlay, R., Lundström, U., Jongmans, A.G., Giesler, R. & Olsson, M. 2000. Mycorrhizal weathering – a true case of mineral plant nutrition. *Biogeochemistry* 49, s. 53–67.

²⁴ Rosling, A. & Finlay, R. 2004. Mykorrhizasvampar kan vittra mineraljord. *SLU. FaktaSkog* nr 15–2004.

byggs in i en aminosyra) utförs av speciella kvävefixerande bakterier. En del av dessa lever helt fritt i vatten eller i jord. Andra lever tillsammans med kärlväxter, mossor eller lavar. Flera bakteriesläkten har utvecklat ett intimt symbiotiskt levnadssätt tillsammans med växtarter – växtens rötter bildar små knölar eller svulster där bakterierna finns. Bakterierna får där en skyddad livsmiljö och fotosyntesprodukter från växten, medan växten får tillgång till kväve i form av aminosyror. Genom nedbrytning av värdväxtens förna och mineralisering av det däri bundna kvävet, kommer kväve att tillföras växt-marksystemets omsättningsbara kvävepool och därmed komma alla andra organismer tillgodo.

Vissa av dessa rotsymbioser har hög kapacitet när det gäller att tillföra ekosystemet användbart kväve. En sådan är den globalt betydelsefulla symbiosen mellan ärtväxter (såväl örter som trädarter) och en grupp bakterier som bland annat innefattar släktet *Rhizobium*. Ett annat exempel är symbiosen mellan trädsläktet al (både klibbal och gråal) som har en liknande rotsymbios med mikrobsläktet *Frankia*.

I våra skogar finns inga trädarter som tillhör gruppen ärtväxter. Al-arterna är av betydelse i vissa speciella typer av växtsamhällen men förekommer sparsamt i fastmarksskogar. I de flesta svenska skogsekosystem finns således ingen symbios med stor kapacitet att fixera kväve.

Där finns däremot både frilevande kvävefixerare nere i jorden och kvävefixerande cyanobakterier associerade till bottenskiktets mossor och lavar. I barrskogar med friskmarksmossor i bottenskiktet har den årliga kvävefixeringen beräknats till 0,5–2 kg kväve per hektar.²⁵ Detta är troligtvis en underskattning av den totala kapaciteten på och i marken. Fixeringskapaciteter på i genomsnitt 1,5–2 kg N per hektar och år knutna enbart till den vanligaste mossarten väggmossa (*Pleurózium schréberi*), har nämligen påvisats.²⁶ Fuktig skogsmark med vitmossor i bottenskiktet har större fixeringskapacitet än mark med friskmarksmossor.

Deposition av luftföroreningar

Deposition av luftföroreningar är en naturlig process, men den har under det senaste århundradet fått ett allt större antropogent bidrag (orsakat av människan). Tillförseln sker via nederbörden (våtdeposition) och via deposition av gaser och partiklar (torrdeposition). Fördelningen mellan våt- och torrdeposition varierar mellan olika ämnen, vegetationsytor och regioner. För kväve och svavel är förhållandet ungefär 2:1 över öppen yta (enbart låg vegetation), d.v.s. torrdepositionen är ungefär en tredjedel av totaldepositionen.²⁷ Skogklädd mark får större totaldeposition än öppen yta, beroende på trädens effektivare uppfångning av torrdeposition. Den kan vara ungefär dubbelt så stor som våtdepositionen mätt på öppen yta (tabell MV3).

²⁵ Rosén, K. & Lindberg, T. 1980. Biological nitrogen-fixation in coniferous forest watershed areas in central Sweden. *Holarctic Ecology* 3, s. 137–141.

²⁶ DeLuca, T., H., Zackrisson, O. & Nilsson, M.C. 2002. Quantifying nitrogen-fixation in feather moss carpets of boreal forests. *Nature* 419, s. 917–920.

²⁷ Sjöberg, K., Pihl Karlsson, G., Svensson, A., Wängberg, I., Brorström-Lundén, E., Hansson, K., Potter, A., Rehgren, E., Sjöblom, A., Areskoug, H., Kreuger, J., Södergren, H., Andersson, C., Holmin Fridell, S. & Andersson, S. 2013. Nationell Miljöövervakning – Luft. Data t.o.m. 2011. IVL Svenska miljöinstitutet. *Rapport B 2109*.

Under svenska förhållanden är den naturliga bakgrundsdepositionen av växtnäringsämnen relativt liten. Men den antropogent orsakade depositionen av kväve och svavel har under 1900-talets andra hälft varit omfattande. Högst var den under 1980-talet, då kväve- och svaveldepositionen i sydvästra Sverige var ungefär dubbelt respektive fyra gånger så hög²⁸ som 2009–2010²⁷. Svavlet och den del av kvävet som deponerats som syra har orsakat allvarlig mark- och vattenförsurning. Allt deponerat kväve, oavsett om det tillförts som ammonium eller nitrat, har dessutom verkat som en kontinuerlig kvävegödsling av vegetationen. Denna produktionshöjande effekt är svår att särskilja från effekter av förbättrad skogsskötsel och förändrad markanvändning, men är sannolikt en viktig orsak bakom de synbara förändringar som observerats i naturligt lågproducerande system i södra Sverige, exempelvis på tallhedar och odikade mossemyrar.

Tabell MV3 Ungefärlig spännvidd, över Sverige, av atmosfärisk deposition (kg/ha, räknat som rent grundämne) av växtnäringsrelaterade och försurande ämnen. Deposition över öppet fält, 2009–2010. Från låg deposition i norra Norrlands inland till områden med högst deposition i södra/sydvästra Götaland (framför allt Halland och västra Skåne). Data extraherade från IVL Rapport B 2109.²⁷

	^a NO _x -N	^b NH _x -N	^c SO _x -S	^d Ca	^d K	^d Mg
N Norrl. inland	1–1,5	0,5–1	ca 1	0,5–1	ca 1	0,1–0,2
SV Götaland	5–7	6–8	4–6	2–4	1,5–2,5	1,5–2

a) NO_x = Oxiderat N, framför allt nitratkväve (NO₃⁻); Totaldeposition.

b) NH_x = Reducerat N, framför allt ammoniumkväve (NH₄⁺); Totaldeposition.

c) SO_x = Oxiderat S, framför allt sulfatsvavel (SO₄²⁻); Totaldeposition.

d) Enbart våtdeposition.

Näringsupptagning

Det tillväxtbegränsande näringsämnet i svensk skogsmark är normalt kväve. Kväveupptaget bestämmer alltså nivån på biomassaproduktionen, förutsatt att växten inte lider akut brist på något av de andra näringsämnena. Behoven av P, K, Ca, Mg och S står i proportion till den assimilerade mängden av kväve. Det är dock så att både de absoluta och de relativa (till N) behoven skiljer sig något mellan olika växtarter och växtgrupper. Viktiga mikronäringsämnen är bland annat järn (Fe), mangan (Mn), bor (B), zink (Zn) och koppar (Cu).

Upptaget (assimilationen) av näringsämnena hos vedväxter sker via de rotspetsar på finrötterna som inte förvedats. Det kritiska steget är passagen in genom de yttersta rotcellernas och rothårens cellmembran. Flera specifika upptagsmekanismer, varav de flesta är energikrävande, är inblandade.

Bildningen av näringsupptagande rötter är inte slumpmässig utan är mest intensiv där näringstillgången är störst. I en skogsmark finns huvuddelen av växternas rotbiomassa, och i än högre grad de näringsupptagande finrötterna, nära markytan.²⁹ Detta är särskilt utpräglat i den vanligaste typen av skogsjordar, podsoler med mårager.

²⁸ Lundmark, J.-E. 1988. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortanpassat skogsbruk. Del 2 – Tillämpning*. Skogsstyrelsen.

²⁹ Persson, H. 1983. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil* 71, s. 87–101.

Näringsämnen tas normalt upp som laddade joner (tabell MV4). En del är positivt laddade (*katjoner*) och andra negativt laddade (*anjoner*). Oorganiskt kväve förekommer i två olika grundformer, NH_4^+ och NO_3^- . I skogsekosystem dominerar ammoniumformen. De flesta skogsväxter föredrar ammonium, men kan utnyttja även nitrat. Det finns dock exempel på växter med omvänd preferens, så kallade nitratväxter.³⁰

Det är numera känt att många skogsväxter kan ta upp även organiskt bundet kväve, i form av lösta aminosyror.^{31,32} Detta innebär en ”genväg” i kvävet omsättning – det krävs alltså inte fullständig mineralisering för att kvävenäringen återigen ska kunna assimileras av växterna. Det är dock ännu oklart hur betydelsefull denna kvävekälla är för skogsväxterna, jämfört med mineralformerna NH_4^+ och NO_3^- , men nya rön antyder att aminosyra-kväve till och med kan utgöra den dominerande kvävekällan i nordliga barrskogar.³³

Tabell MV4 Makronäringsämnen för växter, förekomstformer, samt approximativa behov för gran och tall.

Ämne	Mineraliserad Form ^{a)}	Assimilerad form ^{b)}	Relativt behov ^{c) 34}	”Medelskogens” årsupptag, kg/ha ^{d) 35}
N	NH_3	NH_4^+ NO_3^-	100	19
P	PO_4^{3-}	aminosyra-N H_2PO_4^- (HPO_4^{2-})	10	2
K	K^+	K^+	39	6
Ca	Ca^{2+}	Ca^{2+}	4	23 ^{e)}
Mg	Mg^{2+}	Mg^{2+}	4	2
S	SO_4^{2-}	SO_4^{2-}	5	2

^{a)} Mineraliseringens slutprodukt för kväve är NH_3 (ammoniak), men denna form omvandlas normalt spontant till NH_4^+ (ammonium) då den kommer i kontakt med neutral till sur markvätska. Liknande gäller för fosfat, som i markvätskan kan uppträda som PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , eller H_3PO_4 , beroende på markvätskans pH-värde.

^{b)} Dominerande upptagbara former.

^{c)} Optimala proportioner, relativt kväve, för makronäringsämnen i gran- och tallbarr.

^{d)} Trädvegetationens genomsnittliga näringsupptag skattat för ett skogsområde med normal-sluten barrblandskog. Innefattar bestånd i olika åldrar (genomsnittlig ålder ca 75 år).

^{e)} Växter tar normalt upp mer Ca^{2+} än de behöver, sannolikt beroende på att halten är relativt hög i markvatten och att det passivt följer med vid vattenupptagningen. Fenomenet benämns ibland ”lyxkonsumtion av Ca^{2+} ”.

³⁰ Hesselman, H. 1917. Om våra skogsföryngringsåtgärders inverkan på salpeterbildningen i marken och dess betydelse för barrskogens föryngring. *Meddelanden från Statens skogsförsöksanstalt* 13–14, s. 297–528.

³¹ Melin, E. & Nilsson, H. 1953. Transfer of labelled nitrogen from glutamic acid to pine seedlings through the mycelium of *Boletus variegates*. *Nature* 171, s. 134.

³² Person, J., Näsholm, T. & Högberg, P. 2000. Aminosyror – en ny kvävekälla i skogen! SLU. *FaktaSkog*, nr 14–2000.

³³ Inselsbacher, E. & Näslund, T. 2012. The below-ground perspective of forest plants: soil provides mainly organic nitrogen for plants and mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 195, s. 329–334.

³⁴ Braekke, F. 1994. Diagnostiske grenseverdier for næringsselementer i gran- og furunåler. *NISK*, No. 15

³⁵ Albrektson, A. & Lundmark, T. 1991. Vegetationens storlek och omsättning inom en barrskog i norra Sverige, samt näring i vegetation och mark och dess omsättning i samband med växandet. SLU, inst. för skogsskötsel. *Arbetsrapporter* nr 52.

Mykorrhiza

Hos en stor del av de högre växterna finns en speciell anpassning till miljöer med stark näringskonkurrens, nämligen *mykorrhiza*.^{36,37} Nästan alla vedartade växter, inklusive trädarter, och en stor del av övriga kärlväxter, bildar någon form av mykorrhiza. Mykorrhiza betyder svamprot, och betraktas allmänt som en symbios mellan växt och svamp. Med beteckningen symbios menas en ömsesidig anpassning som är till nytta för bägge parter. Ny forskning tyder emellertid på att samspelet mellan träd och mykorrhizasvamp i boreala skogar kan vara mer komplext än tidigare anat – att svampen i vissa situationer snarare kan försvåra än underlätta värdträdets näringsupptag.³⁸ Mykorrhizasymbiosen har, oavsett detta, en avgörande betydelse för näringsomsättningen i ett skogsekosystem. Nästan alla vedartade växter, inklusive trädarter, och en stor del av övriga kärlväxter, bildar någon form av denna symbios.

Det finns många mykorrhizabildande svamparter – fler än 1 000 är kända i Sverige. Bland dessa finns exempelvis huvuddelen av våra storsvampar (däribland matsvamparna).

Svampens hyfer omsluter eller växer in i finrötternas celler så att de två organismerna helt enkelt sitter ihop. Symbiosen ger svampen konkurrensfördelen att få tillgång till energisubstrat direkt från växtens fotosyntesorgan. Fördelen för växten är att svampen, via sina tunna men mycket vittförgrenade hyfer, kan ta upp näringsämnen från en mycket större jordvolym än vad trädets egna rötter kan. Energikostnaden för att bygga upp det näringsupptagande nätverket blir lägre för tunna svamphyfer än för ”tjocka” växtrötter. Speciellt viktig är mykorrhizasymbiosen för växtens upptag av fosfor och kväve. Den dominerande mykorrhizatypen bland de svenska skogsträden kallas *ekto-mykorrhiza*. Denna typ bildar en tät väv av hyfer, en mantel, som helt innesluter trädets korrötter.

Mykorrhizasvamparna kan binda samman skogens träd

En del svamparter är specifika med avseende på värdväxtart, men många kan bilda mykorrhiza med flera närbesläktade växtarter eller släkten. Ett enskilt träd är ofta förenat med olika svamparter i olika delar av rotsystemet. Det svampmycel som från trädrötterna växer ut i marken kan bilda bryggor till andra träd. Nätverket av de dominerande mykorrhizasvamparnas mycel i en skogsmark kan alltså rent fysiskt binda samman olika trädindivider i en skog.

I likhet med hur växtsamhället varierar med ståndortens näringsförhållanden, fuktighet, och över tiden, så varierar också artsammansättningen bland mykorrhizasvamparna. Det är därför naturligt att skötselrelaterade åtgärder som påverkar närings- och fuktighetsförhållanden, till exempel gödsling och dikning, också påverkar mykorrhizasvamparnas artsammansättning och aktivitet.

³⁶ Melin, E. 1927, Studier över barrträdsplantans utveckling i råhumus II. Mykorrhizas utbildning hos tallplantan i olika råhumusformer. *Meddelande från Statens Skogsförsöksanstalt* 23, s. 433–494.

³⁷ Melin, E. 1927, Studier över barrträdsplantans utveckling i råhumus II. Mykorrhizas utbildning hos tallplantan i olika råhumusformer. *Meddelande från Statens Skogsförsöksanstalt* 23, s. 433–494.

³⁸ Näsholm, T., Högberg, P., Franklin, O. & Högberg, M.N. 2014. Är mykorrhizan en bidragande orsak till skogens kvävebrist? SLU. *FaktaSkog* 1–2014.

Näringsupptagningens försurande effekt

Näringsupptagningen kan innebära att växten tar upp större laddningsmängd positiva joner (ammonium-, kalcium-, kalium-, magnesiumjoner, m.fl.) än negativa (fosfat-, nitrat-, sulfatjoner, m.fl.). Växtroten avger då positiva vätejoner (H^+) för att förhindra att bli elektriskt laddad i förhållande till marken. På analogt sätt avges negativa laddningar (OH^- eller HCO_3^-) för att kompensera för ett överskott av negativa joner i näringsupptaget.

Om näringsupptaget domineras av positiva joner medför det att växandet försurar marken, medan dominans av negativa joner istället har en basverkande effekt på marken.

Eftersom kväve tas upp i stor mängd, avgörs den totala laddningsbalansen i näringsupptaget i hög grad av vilken växttillgänglig kväveform – NH_4^+ eller NO_3^- – som dominerar i marken.

I skogsmark i allmänhet, och i synnerhet i barrträdsdominerade skogar med naturligt låga pH-värden i mårslagret och dominans av kväveformen NH_4^+ , har tillväxten därför en försurande effekt på marken. pH-värdet i marken sjunker långsamt, i takt med beståndets ålder och ackumulering av biomassa. Det är viktigt att inse att denna så kallad ”biologiska försurning” av marken är tillfällig, förutsatt att den uppbyggda biomassan aldrig skördas och förs bort. När vegetationen dör och bryts ner på samma ställe, så kommer återbördandet av mineralnäringsämnen till marken att medföra en lika stor alkaliserings effekt som den tidigare försurningseffekten. Pendlingen av humuslagrets pH-värde, från hyggesfas (høgt pH) till mogen skog (lågt pH) kan på högproduktiv mark i södra Sverige uppgå till nästan en pH-enhet.³⁹

Nedbrytning och mineralisering

Skogsekosystemens näringsomsättning, särskilt i mår-podsoljordar,⁴⁰ sker koncentrerat nära markytan. Huvuddelen av förnan tillförs markytan och blir kvar där eftersom det oftast finns sparsamt med stora grävande markdjur, såsom dagmaskar, i dessa ekosystem. Följaktligen är också den mikrobiella nedbrytningen och näringsfrigörelsen som mest intensiv i dessa ytliga markskikt.

Nedbrytarna tillgodogör sig energi och skapar restprodukter

Organiskt material tillförs marken i form av fallförna från träd, bottenförna från markvegetation och markförna från döda rötter, markdjur och mikroorganismer i marken. Dessutom utsöndras en avsevärd mängd vattenlösliga

³⁹ Tamm, C.-O. & Hallbäcken, L. 1988. Changes in soil acidity in two forest areas with different acid deposition: 1920s to 1980s. *Ambio* 17, s. 56–61.

⁴⁰ De två viktigaste typerna av humuslager på fastmark benämns mår och mull.

Humusformen mår dominerar i barr- och blandskog och karaktäriseras av att det mesta organiska materialet ansamlas ovanpå mineraljorden. Mull kan naturligt förekomma i örtrika lövskogar och karaktäriseras av att det organiska materialet är väl inblandat i de övre mineraljordsskikten. De två viktigaste jordmånsgrupperna i Sverige kallas podsol och brunjord. Podsolen karaktäriseras av att mineraljorden har ett ljusst färgat blekjordsskikt och ett rödaktigt rostjordsskikt. Brunjorden karaktäriseras av större inblandning av organiskt material och därav brunfärgad mineraljord. De normala kombinationerna av humusform och jordmån är mår-podsol respektive mull-brunjord.

organiska föreningar från barr och blad samt finrötter. Den sammantagna mängden enbart av trädens fall- och rotförna kan i en genomsnittlig fullsluten barrskog uppgå till ca 5 ton torrsvikt per hektar och år, varav rotförnan sannolikt utgör drygt en tredjedel.^{41,42,43}

Till detta kommer markvegetationens förna som kan vara ungefär hälften så stor som trädens. I täta bestånd utan fältskikt är givetvis markvegetationens bidrag obetydligt men trädens desto större.

Det är i skogsskötselsammanhang mycket viktigt att förstå att det finns ett starkt samband mellan storleken på de årliga förnatillskotten och beståndets aktuella tillväxt.

Nedbrytning⁴⁴ av organiskt material ger först och främst energi för de nedbrytande organismerna så att de kan bygga upp sin egen biomassa. De tar även sitt behov av mineralnäringssämnen från det nedbrutna materialet men frigör överskottet till marken. Processen kräver syrgas och leder till bildning av koldioxid, vatten, vattenlösliga mineralnäringssämnen och organiska restprodukter.

Växtrester som kolonieras av ett nedbrytarkollektiv förlorar först lättnedbrytbara vattenlösliga beståndsdelar och därefter de kedjeformiga kolhydraterna cellulosa och hemicellulosa. Lignin bryts ner mycket långsamt.

Nedbrytningshastigheten sjunker exponentiellt med tiden (figur MV6). Mycket svårnedbrytbara organiska restprodukter från nedbrytningsprocessen anrikas över tiden, och kallas *humusämnen*. Dessa innehåller mer eller mindre omvandlade ligninstrukturer, men till stor del består de också av sekundära restprodukter, d.v.s. svårnedbrytbara rester av döda nedbrytare, exempelvis svampar. Andelen svårnedbrytbara rester blir större för kväverik än för kvävefattig förna.⁴⁵

Humusämnena har liten betydelse för ståndortens kortsiktiga näringsfrigörelse men desto större betydelse för jordens förmåga att binda vatten och för att binda frigjorda näringskätjoner.

Eftersom ny förna ständigt tillförs finns hela tiden material i alla stadier av nedbrytning. Detta framträder tydligast i podsoljordarnas mårager vilka ofta uppvisar en ökande nedbrytningsgrad från ytan och ner mot kontakten med mineraljorden.

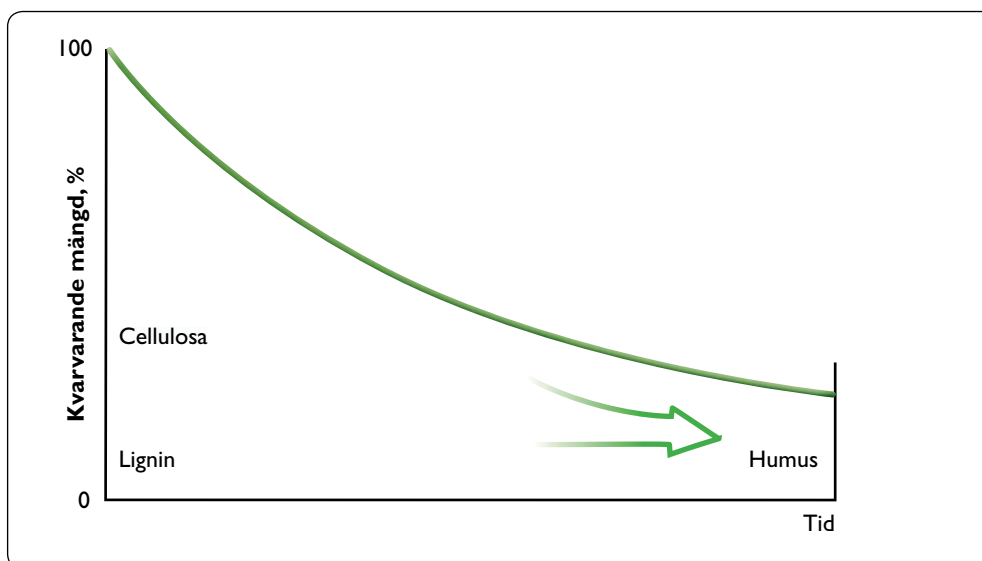
⁴¹ Albrektson, A. & Lundmark, T. 1991. Vegetationens storlek och omsättning inom en barrskog i norra Sverige, samt näring i vegetation och mark och dess omsättning i samband med växandet. SLU, inst. för skogsskötsel. *Arbetsrapporter* nr 52.

⁴² Lundmark, J.-E. 1988. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 2 – Tillämpning*. Skogsstyrelsen.

⁴³ Persson, H. 1983. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil* 71, s. 87–101.

⁴⁴ Berg, B. 2000. Uppbyggnad av humuslager i boreal skog – från förna till humus. *Energimyndigheten. TB 00/5*.

⁴⁵ Berg, B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133, s. 13–22.



Figur MV6 Principfigur för nedbrytning av förna. Tidsperspektivet varierar med förnatyp och nedbrytningsförhållanden men kan för barrförna vara ca 5–10 år. Modifierad efter Berg 1999.⁴⁶

Nedbrytande bakterier och svampar har huvudrollerna i denna fundamentala process, men markdjuren⁴⁷ kan i någon mån påverka nedbrytningshastigheten genom att sönderdela förnan i mindre bitar, blanda om i jorden (bioturbation) och skapa gynnsamma mikromiljöer för mikroorganismer i sina exkrementer. Eftersom många markdjur lever på svamp och bakterier, eller är rovdjur, har de också viktiga reglerande funktioner för nedbrytarsamhällets sammansättning.

Mineralisering är omvandlingen av organiskt bundna ämnen till oorganiska mineralformer. Vid nedbrytningen frigörs de flesta näringsämnen i den mineralform de hade när de togs upp. Undantaget kan vara kväve, vilket vid fullständig nedbrytning alltid frigörs som ammonium, oavsett om det ursprungligen togs upp som ammonium eller nitrat. Som tidigare påpekats kan kvävet kretslopp också slutas via en ”genväg”, d.v.s. ofullständig nedbrytning till aminosyror som direkt kan assimileras av växtrötterna.

Kvävemineralisering sker successivt under det organiska materialets nedbrytning. Mikroorganismerna har dock själva ett stort behov av kväve, varför nettofrigörelse av kväve från många förnamaterial kan vara liten i början av nedbrytningen.

Förnamaterialets så kallade *kol/kväve-kvot* (C/N-kvot) indikerar hur sannolikt det är att kväve frigörs. Kvoten anger viktsförhållandet mellan kol och kväve i substratet. Om C/N-kvoten är mycket hög använder mikroorganismerna själva det kväve som finns och kan till och med behöva ta upp ytterligare kväve från omgivningen. Detta kallas *mikrobiell kväveimmobilisering*. Vid lägre kvot är det mer sannolikt att kväve frigörs och kommer växterna till godo. Ren ved har en C/N-kvot omkring 500 och barrförna ca 50.

⁴⁶ Berg, B. 1999. Humusupplagring i svensk skogsmark – en sänka för koldioxid. SLU. *FaktaSkog* nr 6–1999.

⁴⁷ Exempelvis amöbor, kvalster, hoppstjärtar, rundmaskar (nematoder) och ringmaskar (daggmaskar).

Näringsrika blad från örter och vissa ädla lövträd kan ha kvoter ner mot 20–25. Kvoten sjunker under nedbrytningens gång allt eftersom kol avgår som koldioxid. En grov tumregel anger att nettofrigörelsen av kväve börjar bli betydande när C/N-kvoten i ett initialt kolrikt material sjunkit ner mot 25–30.

Mikrobiell kväveimmobilisering är ett fenomen att räkna med om stora mängder kolrikt men kvävefattigt förnamaterial tillförs marken. Mikrobernas stora kvävebehov kan då tillfälligt sänka kvävetillgången för växterna, och därmed tillväxten, på svaga marker. I mycket kväverika system kan det däremot vara en fördel att kväve tillfälligt binds upp och därigenom minskar risken för kväveutlakning.

Det organiska materialets betydelse i marken

Organiskt material i marken har stor betydelse för markens surhet. En del av surhetsbegreppet är *pH-värdet* vilket beskriver surhetens ”intensitet”. Närmare bestämt anger pH-värdet koncentrationen av fria vätejoner i markvätskan. Den andra delen av surhetsbegreppet brukar benämnas markens *aciditet*, med vilket menas det totala förråd av bundna vätejoner som under vissa förhållanden kan frigöras till markvätskan. Aciditeten anger alltså en ”kapacitet”.

Markens organiska material i allmänhet och humusämnen i synnerhet har stor aciditet. Materialet har ett stort antal svagt sura grupper som kan avstöta en fri vätejon till markvätskan. En grupp som redan avgivit sin vätejon kan dock reagera på omvänt sätt och istället binda till sig en fri vätejon. Det organiska materialet kan alltså agera som en pH-buffert, d.v.s. stabilisera pH i markvätskan ungefär som en termostat reglerar temperaturen.

Vilket pH-värde som på detta sätt skapas i markvätskan beror framför allt på de sura gruppernas inneboende syrastyrka, d.v.s. deras benägenhet att avge sin vätejon till markvätskan. Normalt har dock jordar med hög halt organiskt material lägre pH-värde än rena mineraljordar.

Det organiska materialets sura reaktion i marken blir svagare i den mån det innehåller bundna så kallade baskatjoner (kalium, kalcium, magnesium, natrium). De primärt sura grupperna binder då baskatjoner istället för vätejoner, varför de inte längre kan ha sur reaktion. Vid tillförsel av färskt förnamaterial till marken blir därför effekterna på markens surhet beroende av förnans innehåll av baskatjoner. Allmänt näringsrika växtrester med höga halter av baskatjoner ger upphov till en lägre aciditet och ett högre pH i marken än näringsfattiga växtrester med låga halter baskatjoner.

En ytterligare funktion, vilken är avgörande för att minska utlakningsförluster av positiva näringsjoner i grovkorniga mineraljordar, är det organiska materialets förmåga att fungera som katjonbytare i jorden. Denna egenskap är en direkt konsekvens av de ovan nämnda sura gruppernas benägenhet att avstöta vätejoner till markvätskan. Efter avgivande av positivt laddade vätejoner från en organisk partikel blir partikelytan negativt laddad. Denna så kallade negativa överskottsladdning gör att partikeln därefter kommer att attrahera och kunna binda till sig allehanda positivt laddade joner från markvätskan – vätejoner, baskatjoner, ammoniumjoner med flera (se vidare ”Markens jonbyte”).

Organiskt material, i olika nedbrytningsstadier, är slutligen mycket viktigt för att öka markens vattenhållande förmåga i grovkorniga mineraljordar. Detta beror på att organiska partiklar är porösa, i motsats till mineralpartik-

lar. I finkorniga mineraljordar, som redan är starkt vattenhållande, är det istället viktigt för att luckra upp och skapa stora porer som kan innehålla luft.

Den fullständiga mineraliseringens basverkande effekt

Som beskrivits ovan har organiskt material under nedbrytning en sur reaktion vilket yttrar sig som en tillfällig nedreglering av pH-värdet. Detta hängde samman med att sura grupper kan avstöta en del vätejoner till markvätskan. Vid *fullständig* nedbrytning av det organiska materialet bryts emellertid även de sura grupperna ner – allt mineraliseras till slutprodukterna vatten, koldioxid och mineralnäringsämnen. En avsevärd mängd fria vätejoner kommer då att tas upp från markvätskan och ingå i slutprodukten vatten. Detta betyder att slutresultatet efter fullständig nedbrytning av organiskt material är att marken alkaliserar.

Den basverkande effekten efter fullständig nedbrytning av organiskt material är av samma storleksordning som den försurande effekt som uppkommer vid näringsupptagning och uppbyggnad av biomassan. Vid nedbrytningen kommer de växtnäringsämnen som en gång togs upp från marken att frigöras från sina organiska bindningar och återgå till mineralform. Frigörelsen av dessa positivt eller negativt laddade joner medför omvända syra/bas-effekter jämfört med de som beskrivits för näringsupptagningen (se ”Näringsupptagningen försurande effekt”). Eftersom en större laddningsmängd positiva än negativa joner frigörs, kommer en nettokonsumtion av vätejoner att ske.

Nitrifikation

Nitrifikation⁴⁸, kvävet omvandling från ammonium till nitrat, är en process som endast berör kvävet omsättning. Den kan kallas en ”sidoprocess” i den meningen att omvandlingen inte är nödvändig för att knyta ihop ståndortens kvävekretslopp.

Nitrifikation⁴⁹ utförs av ett begränsat antal bakteriesläkten, vilka är specialiserade på att oxidera ammoniumkväve till nitratkväve, via mellanprodukten nitritkväve.



Ammonium är den kväveform som frigörs vid det organiska materialets nedbrytning. I denna form kan det direkt användas som näringsämne av växter och andra organismer. Nitrifikationsbakterierna utnyttjar dock ammonium på ett helt annat sätt. De är inte i första hand ute efter kvävenäringen som sådan, utan efter den energi som frigörs när ammonium oxideras till nitrat. De tar således sin livsenergi från denna reaktion, och inte från nedbrytning av organiskt material som de föränedbrytande mikroorganismerna gör.

⁴⁸ Tamm, C.-O. 1991. Nitrogen in the terrestrial Ecosystems. Questions of Productivity, Vegetational changes, and Ecosystem Stability. *Ecological Studies* 81. Springer Verlag.

⁴⁹ Här avses så kallad autotrof nitrifikation, d.v.s. bakterier som utnyttjar oxidationen av NH_4/NH_3 till NO_3^- som energikälla. Även så kallad heterotrof nitrifikation, utförd av helt andra grupper av organismer, förekommer.

Nitrifikationsbakterier finns i alla jordar och populationerna ökar snabbt om rätt förutsättningar inträder:

- För det första måste deras markmiljö vara välluftad så att det finns syrgas för oxidationen.
- För det andra bör det finnas god tillgång på ammonium, det substrat de använder. Ammonium produceras vid nedbrytarorganismernas kväve mineralisering, vilken är starkt beroende av det organiska materialets C/N-kvot. Därför är C/N-kvoten en viktig indikator även för nitrifikation.
- En tredje mycket avgörande faktor är markens pH-värde, eftersom nitrifikationsbakterierna inte trivs vid lågt pH. Man har funnit att nitratbildningen normalt är obetydlig när pH-värdet understiger 4,5.

Sammantaget medför detta att typiska barrskogsekosystem, med ständigt hård konkurrens om mineraliserat ammoniumkväve och lågt pH-värde i mårskiktet, oftast har mycket låg nitrifikationsaktivitet. Undantagen från denna ”normalsituation” är dock mycket viktiga att känna till, och likaså hur åtgärder i skogsbruket, såsom dränering, avverkning och skörd av biomassa, markberedning, kvävegödsling, kalkning m.m., direkt eller indirekt kan påverka nitrifikationsprocessen.

Om förutsättningarna för nitrifikationsprocessen är mycket goda kommer en stor del av allt mineraliserat kväve att omsättas via denna form. Detta har betydelse för växtarternas inbördes näringskonkurrens eftersom vissa arter föredrar ammoniumkväve medan andra föredrar nitratkväve. Det har även betydelse för markens aciditet och pH-förhållanden, eftersom nitrifikationsprocessen i sig är försurande.

En helt annan men synnerligen viktig aspekt rör de två kväveformernas olika utlakningsbenägenhet. Det är nämligen så att nitrat binds mycket svagt i marken, jämfört med ammonium, och därför mycket lättare förloras till vattenkosystemen. Detta medför risk för övergödningseffekter i vattnen och utgör samtidigt en definitiv förlust av det viktigaste näringsämnet för skogsekosystemet.

Markens jonbyte

Vattenlösliga joner i markvattnet kan hållas kvar i marken genom att de attraheras och adsorberas till markpartiklarnas ytor. Om ”bindningen” till ytorna är svag kan jonen ifråga trängas bort av en annan jon med lika stor laddning och återigen frigöras till markvätskan. Denna egenskap att kunna binda joner på ett reversibelt sätt kallas markens jonbyte eller jonadsorptionsförmåga.⁵⁰ Jonbyteskapaciteten varierar starkt mellan olika jordar beroende på jordart och innehåll av organiskt material.

⁵⁰ Eriksson, J., Nilsson, I. & Simonsson, M. 2005. *Wiklanders Marklära*. Studentlitteratur.

Jonbytesmekanismerna är mycket viktiga för att sluta ståndortens näringskretslopp, särskilt i kalla klimat där vegetationen har viloperioder. Markens jonbyteskapacitet kan sägas utgöra ett tillfälligt lagringsförråd för positivt eller negativt laddade näringsjoner, såsom Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , m.fl. Näringsämnen skyddas från utlakning till grundvattnet, men de kan ändå snabbt göras tillgängliga för rötternas näringsupptag, genom jonbytesprocesser.

Katjonbyteskapacitet

Jonbytet av positiva joner har störst omfattning och betydelse. Organiskt material (humuspartiklar) och lerpartiklar fungerar som *katjonbytare* i marken, i kraft av att bägge typerna av partiklar har en negativ överskottsladdning (se ”Vittring” samt ”Nedbrytning och mineralisering”). Detta gör att positiva joner (s.k. motjoner) från markvätskan attraheras till partiklarnas ytor. Kring den negativt laddade katjonbytare bildas en zon där markvattnet har en förhöjd koncentration av positiva joner, relativt den opåverkade markvätskan längre ut från partikelytan. Denna zon med elektrostarkt attraherade katjoner kallas det ”diffusa dubbelskiktet”. Laddningsmängden positiva joner som kan bindas på detta sätt är lika stor som jonbytarens negativa överskottsladdning, varför helheten blir oladdad.

Bindningen är reversibel, med innebörden att bundna joner kan förträngas av lika stor laddningsmängd nya inkommande joner. Det pågår ett ständigt utbyte av joner mellan markvätskan och jonbytare, eftersom markvätskans koncentrationer av olika jonslag hela tiden förändras, bland annat genom tillskott från vittring och nedbrytningens mineralisering och bortförel genom utlakning och växternas näringsupptagning.

Styrkan av attraktionen till katjonbytare varierar mellan olika jonslag, bland annat beroende på deras jonladdning. Trevärt positiva joner (exempelvis Al^{3+}) attraheras starkare än tvåvärda (exempelvis Ca^{2+}), vilka i sin tur attraheras starkare än envärda (exempelvis Na^+). Bland de näringsmässigt viktiga baskatjonerna Ca^{2+} , K^+ och Mg^{2+} är kaliumjonen (K^+) den som binds svagast, och således löper störst risk för att bli kvar i den fria markvätskan och eventuellt utlakas. Den tvåvärt positiva kalciumjonen binder starkast.

Anjonbyteskapacitet

Jordens förmåga att binda negativa joner, så kallad anjonbyteskapacitet, är betydligt mindre än katjonbyteskapaciteten, förutom i vissa tropiska jordar. Den kapacitet som finns är framför allt knuten till jordens *seskvioxider*, vars yta kan ha en positiv överskottsladdning och följaktligen kan attrahera fria negativa joner i omgivande markvätska. Dessa järn- och aluminiumoxider bildas vid vittringen och är i våra podsoljordar särskilt koncentrerade i rostjorden.

Seskvioxidernas benägenhet att binda till sig negativa joner från markvätskan har störst betydelse för näringsämnet fosfor. Fosfatjoner binds till och med så starkt att man talar om en ”fixering”, d.v.s. adsorptionen är inte utan vidare reversibel. Därför används ofta benämningen anjonadsorption istället för anjonbyte, för att indikera att vissa adsorberade anjoner inte enkelt kan förträngas och bytas ut. Denna starkare bindning har flera viktiga

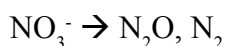
konsekvenser. En är att det fosfat som finns i marken ofta är svårtillgängligt för både växter och mikroorganismer. Tillväxtbegränsning på grund av fosforbrist för vegetationen är vanligt i stora delar av världen. I svensk skogsmark är det dock inte så, dels för att de geologiskt unga jordarna fortfarande innehåller tillräckligt mycket primära fosforhaltiga mineral, och dels för att våra växtsamhällen normalt är ännu mer begränsade av tillgången på kvävenäring.

Den andra viktiga konsekvensen av fosfatfixeringen är att utlakning av fosfor från naturliga växtsamhällen på mineraljordar normalt är mycket liten. I den mån mätbara förluster av fosfor från skogecosystem på mineraljordsmark sker, är det därför främst genom erosion, d.v.s. hela jordpartiklar som i suspenderad form förs ut till vattendragen.

Denitrifikation

Denitrifikationsprocessen är ännu en process som bara berör omsättningen av kväve. Processen medför en överföring av kväve från ståndortens lilla kretslopp till det stora globala kretsloppet. I det avseendet är processen en motsats till kvävefixeringen.

Denitrifikation kan ske när det råder syrgasbrist, så kallade anaeroba förhållanden. Då kan vissa bakterier omvandla nitrat (som producerats av nitrifikationsbakterier) till lustgas eller till kvävgas.



Denitrifierande bakterier finns i alla jordar. Inträder brist på syrgas i en miljö där det finns god tillgång på lättnedbrytbart organiskt material och nitrat sker denitrifikation. Skogsbruksåtgärder som ger fuktigare markförhållanden, eller som på något sätt gynnar nitrifikationsprocessen, kommer alltså att ge bättre förutsättningar för denitrifikationen. Denitrifikationen är, i motsats till nitrifikationen, pH-höjande.

De bildade gasformiga kväveföreningarna avgår till atmosfären vilket innebär en oåterkallelig förlust av växttillgänglig kväve från ekosystemet. Samtidigt är denitrifikationen den process som kan minska höga nitrathalter i avrinnande vatten och därmed förhindra övergödning i vattendrag. Sådan ”kväverening” sker naturligt i exempelvis fuktsvackor och myrfläckar i anslutning till hyggen.

I den mån denitrifikationen leder till bildning av lustgas (N₂O) istället för kvävgas (N₂) medför det ett klimatrelaterat miljöproblem. Lustgas är nämligen en mycket kraftfull växthusgas.

Utlakning

Utlakning av löst organiskt material och lösta växtnäringsämnen från marken till ytvattnen är en ständigt pågående naturlig process. Beroende på områdets geologi, klimat och vegetation skapar detta vattenecosystem med olika organismliv och produktivitet.

Effekterna av makronäringsämnen på vattenecosystemens allmänna produktivitet, skiljer sig mellan baskatjoner (kalium, kalcium och magnesium) å

ena sidan, och kväve och fosfor å andra sidan. Förhöjd tillförsel av baskatjoner har inte någon direkt påverkan alls. Kväve och fosfor är däremot så kallade produktionsbegränsande ämnen i vattenekosystem och tillskott av dessa ämnen leder därför till högre produktivitet. Vid kraftigt ökad tillförsel sker dessutom stora förändringar av hela organismsamhället och då talar man om *övergödning* av vattendrag och sjöar.

Utlakningen av kväve från skogsmark domineras av det organiskt bundna kväve som är en inbyggd del i utlakat löst organiskt material. Den historiska ”naturliga” utlakningen av sådant kväve från beskogad mark i Sverige har uppskattats till ca 0,5–2 kg N per hektar och år.^{51,52} I Götaland kan denna bakgrundsutlakning vara något högre.⁵³ Kväveutlakning utöver dessa bakgrundsnivåer är mycket starkt kopplad till förekomst av nitratkväve.

Koncentrationen av fosfatfosfor i vatten från skogsmark är genomgående mycket låg. Detta beror på att fosfatjoner i markvätskan binds hårt till ytorna av vissa markmineral, i kombination med att både växter och mikroorganismer konkurrerar om det viktiga näringsämnet. I den mån fosfor förloras till vattensystemen, är det därför främst som en del av det utlakade lösta organiska materialet, samt i samband med erosionsskador och borttransport av hela partiklar.

Förhöjd utlakning av växtnäringsämnen från skogsekosystem uppträder typiskt under perioder när växternas totala upptagningskapacitet tillfälligt är lägre än den samlade näringsfrigörelsen från nedbrytning och mineralvittring. Sådana situationer kan ha naturliga orsaker, såsom stormskador, insekts- och svampangrepp, skogsbrand, med mera. De kan också vara effekter av skogsbruk, såsom avverkning, markberedning, dikning, med mera.

⁵¹ Löfgren, S. 1991. Naturliga och antropogena källors betydelse för de ökade halterna av kväve och organiskt material i Västerdalälven och Klarälven, 1965–89. Naturvårdsverket *Rapport 3902*.

⁵² Nohrstedt, H.-Ö. 1993. Den svenska skogens kvävestatus. Skogforsk. *Redogörelse* nr 8–1993.

⁵³ Löfgren, S. 2006. Åtgärder i skogen försumbara för Östersjön. I: *Formas fokuserar, Östersjön – hot och hopp*, s. 177–187. Formas.

Det aktiva skogsbrukets åtgärder

Kalavverkning

Kalavverkning⁵⁴ har under lång tid varit den dominerande metoden för skörd och generationsväxling i de nordliga barrdominerade skogar där produktions-skogsbruk bedrivits. Den beprövade metoden har starkt stöd i såväl det vetenskapliga kunskapsunderlaget som i de praktiska erfarenheterna. Även om andra skogsbrukssätt då och då har diskuterats finns idag inget väl beprövat alternativ som kan appliceras schablonmässigt.

Kalavverkningens effekter på markens produktionskapacitet är så gott som odelat positiva. Negativa effekter på grund- och ytvatten kan förekomma, men detta representerar inte normalfallet.

En viktig grundorsak till att negativa effekter på mark och vatten oftast är små i Sverige är att skogsekosystemen är starkt kvävebegränsade. En annan är att våra skogsjordar, mestadels moränjordar och sandiga sediment med ett heltäckande organiskt ytskikt (mår), inte är särskilt erosionsbenägna.

Utvecklingen mot mindre stark kvävebegränsning i skogsekosystemen, i takt med ökad ackumulering av antropogent kväve från atmosfären, och eventuell kvävegödning, gör dock ovanstående bedömningar allt mindre säkra. Detta kan underminera kalhyggesbrukets ställning som den sammantaget bästa metoden för ett skogsbruk som ska uppfylla såväl produktions- som miljökrav.

Temperaturvariationer, avrinning och näringstillgång ökar

Då en skog kalavverkas innebär det en katastrofal störning för många organismer i det befintliga ekosystemet. Samtidigt ger det möjligheter för nya individer och arter, vilka tidigare varit frånvarande eller levt på sparlåga. Den hårda konkurrensen om de grundläggande livsresurserna lättar tillfälligt något. Ett nyupptaget hygge är en gynnsam miljö för trädplantor, med avseende på ljus-, vatten- och näringstillgång.

Solinstrålningen till markytan ökar

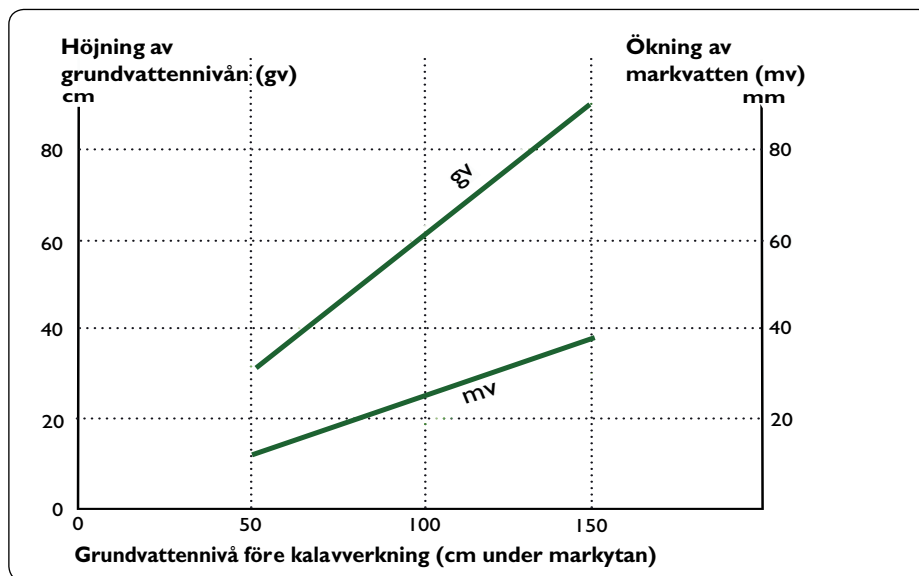
Vid kalavverkning försvinner trädens beskuggning och den kortvågiga solstrålningen mot markytan ökar. Den nya ljusmiljön missgynnar skuggfördragande växter och gynnar de ljuskrävande. Förändringen i växtsamhället blir alltså mer omvälvande än enbart trädskiktets försvinnande.

Energiutbytet med atmosfären efter hyggesupptagningen ändras dock på fler sätt, bland annat ökar också de nattetida värmeförlusterna genom långvågig strålning från markytan till atmosfären. Kalhuggningens nettoeffekt på markens dygnsmedeltemperatur blir därför oftast bara en liten ökning. Temperaturvariationerna mellan dag och natt blir dock mycket större än i skogen, och marktemperaturen dagtid, under vegetationsperioden, blir avsevärt mycket högre på hygget.

⁵⁴ Lundmark, J.-E. 1988. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 2 – Tillämpning*. Skogsstyrelsen.

Grundvattenytan höjs och avrinningen ökar

Efter kalvhuggning når en större del av nederbörden marken. Avdunstningen från markytan och markvegetationen ökar visserligen, men inte alls till de avdunstningsnivåer som var kopplade till träd Kronornas aktiva och passiva avdunstning (transpiration respektive evaporation). Konsekvensen blir en högre genomsnittlig vattenhalt i marken och högre grundvattennivå, vilket leder till större avrinning från området (figur MV7).^{55,56,57,58}



Figur MV7 Förändring av grundvattenytans nivå, samt av mängden markvatten i det omrättade skiktet 0–55 cm, efter kalavverkning. Anm: En markvattenökning med 1 mm innebär 1 liter vatten per m² markyta. Klotten-området, Västmanland. Efter Lundin, 1979.⁵⁹

I vårt klimat brukar avrinningen från skogsbeklädd mark vara ungefär en tredjedel till hälften av tillförd nederbörd. När skogen kalavverkas kan avrinningen öka med 50–100 % under åren närmast efter en kalavverkning, d.v.s. nästan fördubblas.

Den tillfälliga avrinningsökningen återgår i takt med att transpirerande hyggesvegetation och därefter träd återkoloniserar ytan. Då plantskogen övergått till en välsluten ungskog råder återigen det beskogade tillståndets vattenbalans.

Den höjda grundvattenytan i hyggesfasen ger något mindre utrymme för magasinering av nederbörd, varför ytavrinning lättare kan uppstå efter långvariga regnperioder. Djupa traktorspår som blottlägger kompakterad mineraljord kan öka och styra ytavrinningen med lokalt allvarlig partikelerosion som följd. På grund av höjningen av grundvattenytan och markvattenhalten blir det fuk-

⁵⁵ Grip, H. & Rohde, A. 1988. *Vattnets väg från regn till bäck*. Hallgren & Fallgren Studieförlag.

⁵⁶ Lindroth, A. & Grip, H. 1987. Orsaker till avrinningsökning efter kalavverkning. *Vatten* 43, s. 291–298.

⁵⁷ Lundin, L. 1995. Vattnet i skogsmarken. Skogsbrukets effekter på hydrologi och vattenkemi. *Skog och Forskning* 1995, s. 8–16.

⁵⁸ Rodhe, A. 1997. Vattnet i skogen. I: *Marken i skogslandskapet*, s. 81–103. Skogsstyrelsen.

⁵⁹ Lundin, L. 1979. Kalvhuggningens inverkan på markvattenhalt och grundvattennivå. *SLU. Rapporter i skogsekologi och skoglig marklära* 36.

tigare i svackor och lägre delar av sluttande hyggen. Lokala utströmningsområden ökar alltså arealmässigt. Vattenmättnad och påföljande syrgasbrist i marken kan försvåra etableringen av ett nytt trädbestånd på dessa platser, vilket kan föranleda så kallad skyddsdikning (se ”Skogsdikning”). Den negativa effekten av alltför hög grundvattenyta och fuktighet gäller dock främst för planterade trädplantor. Deras rotsystem ges ingen möjlighet till anpassning utan ”tvingas” ner i en ogynnsam rotmiljö. Situationen är annorlunda för självföryngrade trädplantor, vilka har möjlighet att utveckla sina rotsystem där det finns bäst förutsättningar, d.v.s. mycket nära markytan. Dessutom är gröningsbetingelser i försumpade svackor ofta goda.

På väl-dränerad, frisk mark förekommer normalt inte syrgasbrist i mårslaget i sådan omfattning att det allvarligt skadar plantrötter. Men om en planterad plantas hela rotsystem hamnar i finkornig och därmed starkt vattenhållande mineraljord kan plantdöd däremot ske under det känsliga etableringsskedet. Detta måste beaktas i vid val av planteringspunkt i samband med markberedning (se ”Markberedning”).

Marken tillförs energi- och näringsrikt förnamaterial

Kalavverkning med stamuttag medför att markytan tillförs flera årsgivor av fallförna. Även om GROT (grenar och toppar) tas ut, blir förnatillförseln till markytan betydande. Mycket av den ursprungliga fält- och bottenvegetationen dör av skador vid avverkning och körning och även på grund av det abrupt ändrade ljusklimatet på hygget.

Under marken tillförs dessutom en stor mängd rotförna från de avdöende rotsystemen. Denna post innefattar även stora kvantiteter av mycel från mykorrhizasvampar, vilka inte längre får tillgång till energirika fotosyntesprodukter från träden och därför så småningom dör.⁶⁰ Svampmycel innehåller mycket höga halter kväve jämfört med växtrötter. Den sammantagna bilden är alltså att markens nedbrytarorganismer tillförs energisubstrat och organiskt bundna växtnäringsämnen motsvarande flera års förnatillskott i skogen.

Näringstillgången och pH-värdet i marken ökar

Kalhuggningens tillförsel av hyggesrester och rotassocierad förna ger ett stort tillskott av organiskt bundna mineralämnen till marken. Vid nedbrytningen mineraliseras dessa, vilket som tidigare beskrivits har en alkaliserande effekt på marken. pH-värdet i humuslagret höjs avsevärt, ofta med mer än en pH-enhet.⁶¹

I vissa fall, om intensiv mineralisering ger höga halter av ammoniumkväve och om även övriga förutsättningar för nitrifikationsprocessen är goda, kan pH-höjningen bli mindre, utebli, eller till och med vändas till en pH-sänkning. Detta beror på att nitrifikationen av ammonium till nitrat är en starkt försumrande process.

Den större substrattillgången möjliggör större nedbrytarpopulationer. Högre markfuktighet, något högre marktemperatur nära markytan och ett

⁶⁰ Romell, L.-G. 1938. Markreaktionen efter gallringar och dess orsaker. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 43, s. 1–8.

⁶¹ Nykvist, N. & Rosén, K. 1985. Effect of clear-felling and slash removal on the acidity of northern coniferous soils. *For. Ecol. Manage.* 11, s. 157–169.

ökande pH-värde, gör livsmiljön än gynnsammare. Den mikrobiella nedbrytningen av organiskt material ökar. Nettofrigörelsen av kväve kan dock fördröjas på grund av mikrobiell kväveimmobilisering i lågproduktiva barrskogar med hög C/N-kvot i mårslagret (se ”Nedbrytning och mineralisering”).

Det sammantagna resultatet av ovanstående blir dock ändå alltid att tillgången på växtnäringsämnen för nya trädplantor ökar omedelbart efter kalavverkning. Detta gäller alltså även om nettofrigörelsen av kväve inte skulle öka alls, i absoluta tal, eftersom upptagskapaciteten (behovet) minskar dramatiskt då trädens näringsupptag plötsligt upphör.

Hyggesvila har länge varit ett välkänt begrepp i det skogliga föryngringsarbetet. Hyggesvilan har motiverats av att risken för snytbaggeskador avtar efter några år. Ibland har dock hyggesvila, eller ”hyggesmognad”, tolkats som att det behöver ske viss nedbrytning innan det är lämpligt att plantera. Så är det inte. Tvärtom pekar såväl produktionsmässiga som miljömässiga aspekter entydigt mot att man absolut ska eftersträva omedelbar etablering av det nya beståndet.

Utlakning till vattendrag och sjöar

Historiskt sett har utlakning av växtnäring⁶² från hyggen på normal kvävebegränsad skogsmark inte ansetts medföra allvarliga miljöproblem i vattenekosystemen.⁶³ Det är visserligen så att den förhöjda tillgängligheten av alla växtnäringsämnen, i kombination med den ökade vattengenomströmningen, ger större årliga näringsförluster från hygget till vattensystemen jämfört med sluten skog. Lokalt och tillfälligt kan utlakning på grund av hyggeseffekten ge förhöjda halter i små vattendrag. Men i jämförelse med ett obrukat skogslandskap utsatt för naturliga katastrofer har kalhuggningens normala nivåer av näringsutlakning sannolikt inte gett onaturliga övergödningseffekter i vattensystemen. Kalytornas storlek och geografiska spridning inom ett avrinningsområde är dock viktiga påverkande faktorer i detta sammanhang.

I södra Sverige återgår vanligtvis utlakningen inom några få år efter kalavverkning. I Norrlands inland är utlakningsökningarna mycket svagare men förhöjningen kan i vissa fall pågå under mer än 10 år.

Utlakningen av kalium ökar ofta mer än för andra baskatjoner, vilket beror på att denna lättlösliga näringskatjon snabbt frigörs när levande vävnader dör, och dessutom binds relativt svagt till markens katjonbytare.

Den totala utlakningen av kväve kan efter kalavverkning fördubblas till i storleksordningen 2–4 kg N per ha och år, men huvuddelen av detta är organiskt bundet kväve knutet till ökad utlakning av löst organiskt material.⁶⁴ Dessa måttliga utlakningsförluster gäller dock bara under förutsättning att inte omfattande nitratbildning inträffar. Om så sker är risken för nitratutlakning överhängande eftersom markens bindningskapacitet för nitratjonen är mycket låg.

⁶² KSLA. 2007. How to estimate N and P losses from forestry in northern Sweden. *Kungl. Skogs- och Lantbruksakad. Tidskr.* 2–2007.

⁶³ Löfgren, S. 2006. Åtgärder i skogen försumbara för Östersjön. I: *Formas fokuserar, Östersjön – hot och hopp*, s. 177–187. Formas.

⁶⁴ Rosén, K., Aronsson, J.-A. & Eriksson, H.M. 1996. Effects of clear-cutting on streamwater quality in forest catchments in central Sweden. *For. Ecol. Manage.* 83, s. 237–244.

Förutom utlakningen av växtnäringsämnen, sker ofta också en tillfälligt ökad uttransport av löst organiskt material. I samband med försöken att spåra källorna för det kvicksilver som under 1900-talets senare hälft uppmätts i höga halter i många skogssjöar, har man funnit att färskas hyggen bidrar till detta genom att avge mer kvicksilver till vattensystemen än beskogad mark (se ”Terrängkörning”).

Nitrifikationen kritisk

Nitrifikationen är alltså den kritiska processen. Om mineraliserat ammonium i alltför hög grad omvandlas till nitrat av nitratbakterier, så kan växttäcket samlade upptagskapacitet tillfälligt vara otillräcklig och nitraten utlakas. En viss nitratbildning under den initiala kalhyggesfasen förekommer normalt i skogsmark av medelgod bördighet och bättre. Detta gäller hela Sverige men i synnerhet de södra delarna.

Fröträds- och skärmställningar kan avsevärt minska risken för nitratutlakning under hyggesfasen. Av samma skäl är snabb etablering av hyggesvegetation önskvärt.

Nitratutlakningen från hyggen har tveklöst ökat över tiden i de områden av Sverige som utsatts för stor mängd ackumulerat kvävenedfall. Dessa observerade ökningars orsakas inte bara av hyggeseffekten, utan inbegriper också effekter av den markberedning som normalt görs (se ”Markberedning”).

I de mest kvävebelastade sydvästra delarna av Sverige kan utlakningen av enbart nitratkväve från rotzonen uppgå till betydligt mer än 10 kg N per hektar och år, under en period av ca 5 år efter beståndsavvecklingen.⁶⁵ Den regionala variationen för kväveutlakning i Götaland är dock stor.⁶⁶ Modellberäkningar har indikerat att den totala kväveutlakningen från hyggen i östra Götaland är mindre än 5 kg N per ha och år, under den ca 5 år långa hyggesfasen. I de mest drabbade västra delarna av Götaland (nordvästra Skåne, Halland, sydvästra Västergötland), kan de totala utlakningsförlusterna däremot vara 20–35 kg N/ha och år.

I dagsläget är den tidigare vedertagna generella bedömningen – att skogsmark brukad med trakthyggesbruk i mycket liten grad bidrar till övergödning av vattnekosystemen med kväve – på väg att bli alltmer tveksam för vissa ståndortstyper i sydvästra Sverige.

Hygget och frostrisken

Frostskador⁶⁷ på barr och skott är en vanlig orsak till plantavgång. Lufttemperaturer under fryspunkten, speciellt om detta inträffar under den del av vegetationsperioden då tillväxten är som intensivast, kan orsaka cellskador som leder till plantdöd.

Plantor på ett hygge drabbas mer av frostskador än plantor i en skog, därför att lufttemperaturen nära marken under klara och vindstilla nätter blir lägre på ett hygge än i skogen. Detta kallas strålningsfrost. Huvudorsaken är

⁶⁵ Westling, O., Örlander, G. & Andersson, I. 2004. Effekter av askåterföring till granplanteringar med riståkt. IVL. *Rapport B 1552*.

⁶⁶ Akselsson, C., Westling, O. & Örlander, G. 2004. Regional mapping of nitrogen leaching from clearcuts in southern Sweden. *For. Ecol. Manage.* 202, s. 235–243.

⁶⁷ Ottosson Löfvenius, M. & Loman, G. 1997. Lokal- och mikroklimat. I: *Marken i skogslandskapet*. Skogsstyrelsen.

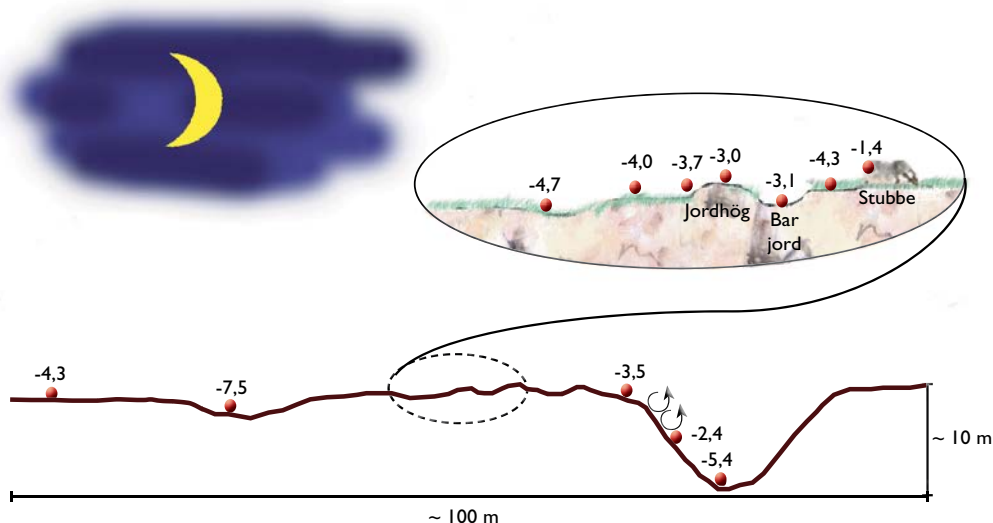
att den långvågiga värmestrålning som nattetid avges från markytan på hygget går förlorad upp i atmosfären. I skogen minskas däremot utstrålningen av kronskiktet.

De översta markskikten kan visserligen vid tiden för solnedgången ha högre temperatur ute på hygget än i skogen, men de avkyls i snabbare takt under natten och sänker då genom kontaktavkylning även temperaturen i de marknära luftlagren. Temperaturgradienten nära marken just före soluppgången kan vara mycket brant avtagande från någon meters höjd och ner mot markytan.

Typen av markvegetation har också betydelse för frostrisken. Det är exempelvis visat att gräsbevuxen mark är särskilt frostlänt.⁶⁸

Strålningsavkylning under klara och vindstilla nätter ger bildning av kall marknära luft över såväl plan kalmark som kala sluttningar. I en sluttning kommer sådan kallluft på grund av sin större densitet att sättas i rörelse ner mot terrängens lägre partier. Då uppstår emellertid friktion mot vegetation och terrängens ojämnheter, vilket orsakar turbulens och vertikal omblandning. Varmare luft från högre liggande luftlager blandas in och den marknära luften blir därför mindre kall än över plan mark och i grunda sänkor, där luftens temperaturskiktning förblir mer ostörd under natten.

Sammantaget får plan kalmark och grunda svackor de lägsta minimitemperaturerna (figur MV8). Detta gäller i både stor och liten skala.



Figur MV8 Exempel på minimitemperaturer i luften nära markytan under en klar och vindstilla natt i mitten av juni. Baserat på likartade mätningar dels från Vindeln, Västerbotten och Tönnersjöheden, Halland. Det är kallast i grunda sänkor (i bägge skalorna) och varmare över bar jord, nära markytan under en klar och vindstilla natt. Det är kallast i grunda sänkor (i alla skalor) och varmare över bar jord, nära uppstickande föremål (skärm-effekt) och i branta sluttningar (turbulenta luftförelser). Efter Odin (opubl.) och Odin, 1969.⁶⁹

⁶⁸ Braekke, F. 1972. Varmehusholdning og mikroklima på ulike myrtyper. *Meddelanden fra det Norske Skogsforsøksvesen* nr 119, hefte 1.

⁶⁹ Odin, H. 1969. Hyggesstruktur och mikroklimat. I: *Föryngringsfrågor i det mekaniserade skogsbruket*. Kurskompendium. Sveriges Jägmästares och Forstmästares Riksförbunds Fortbildnings AB, samt SLU, inst. för skogsföryngring.

Vid plantering på ej markberedd mark kan man i viss mån ta hänsyn till den småskaliga variationen för att minska frostskaferisken. Alla föremål som står upp från markytan, såsom stenblock, stubbar och buskar, ger ett litet skydd i närområdet (figur MV8). Frostrisken på ett hygge kan avsevärt minskas genom skärmställning. Ju tätare och ju högre skärmträden är, desto mer dämpas avkyllningen nära marken.⁷⁰

⁷⁰ Odin, H. 1969. Hyggesstruktur och mikroklimat. I: *Föryngringsfrågor i det mekaniserade skogsbruket*. Kurskompendium. Sveriges Jägmästares och Forstmästares Riksförbunds Fortbildnings AB, samt SLU, inst. för skogsföryngring.

Mekanisk markberedning

Mekanisk markberedning^{71,72,73,74,75} medför i flera avseenden en förstärkning av hyggeseffekterna. Konkurrensen om näringsämnen och vatten minskar ännu mer i de markberedda fläckarna, spåren och på högarna jämfört med det ej markberedda hygget. I detta avseende är alltså markberedningen positiv, men inte absolut nödvändig åtgärd, för etablering av planterade trädplanter. Däremot är det en nödvändig och avgörande åtgärd vid frösådd.

Tekniken för maskinell markberedning utvecklades snabbt under 1970-talet. Utvecklingen påskyndades troligen av att snytbaggens gnagskador på plantor visade sig minska vid plantering i markberedningsfläckar. De varianter av mekanisk markberedning som används mest idag är hyggesharvning (dominerande), fläckmarkberedning och olika varianter av högläggning. Mer radikala markberedningsmetoder såsom total upparbetning och utplaning av markytan samt hyggesplöjning förekommer på vissa håll i världen men inte i Sverige.

Under en period på 1970- och 1980-talen tillämpades dock hyggesplöjning på svårföryngrade marker i Norrlands inland. Metoden gav mycket goda föryngringsresultat, men kritiserades hårt utifrån flera aspekter – risk för näringsförluster och långsiktig bördighetssänkning, negativ för renskötseln, förfulande av landskapet, m.m. – och förbjöds 1994.

Markberedning minskar konkurrensen om vatten och näring

Markberedningsmetoder som river upp och fläker bort humuslagret (mår-lagret) skapar på fastmark två typer av planteringsmiljöer – nedsänkta barjordsfläckar, samt mer eller mindre sammanhållna sjok av upprivet och omvänt humuslager blandat med mineraljord (figur MV9). Den totala störda markytan blir minst vid fläckmarkberedning och högläggning för att sedan öka vid hyggesharvning (ca 50 %) och vara störst efter hyggesplöjning.

I blottad mineraljord, där nätverket av rötter och risens jordstammar rivits bort, ger minskad konkurrens om vatten och ljus goda förutsättningar för en planta. Eftersom vattentillgången är den mest kritiska faktorn under en planterad plantas etableringsfas är den blottade mineraljorden en särskilt gynnsam planteringspunkt i grovkorniga eller torra jordar. Om jordarten istället är finkornig och klimatet mycket fuktigt under vegetationssäsongen, kan dock plantan istället hämmas eller dö på grund av syrgasbrist när vatten tillfälligt ansamlas i barjordsfläcken. Valet av planteringspunkt måste alltså ståndortsanpassas.

⁷¹ Söderström, V. 1974. Markberedning. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1, s. 157–403.

⁷² Söderström, V. 1979. *Ekonomisk skogsproduktion. Del 2. Föryngring*. LTs förlag, Stockholm.

⁷³ Lundmark, J.-E. 1988. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 2 – Tillämpning*. Skogsstyrelsen.

⁷⁴ Örlander, G. & Gemmel, P. 1989. Markberedning. *Sv. Skogsvårdsför. Tidskr.* 3–89.

⁷⁵ Normark, E. 2011. *Riktlinjer för uthålligt skogsbruk*. Holmen Skog. Tillgänglig på: <http://www.holmen.com/sv/Skog/>

Vidare är risken för frostsador generellt något mindre för plantor som står i mineraljordsfläckar. Detta beror på att bar mineraljord effektivare leder ner och lagrar värme under dagen, än ytor täckta av ett humuslager. Därför blir också ytans temperatur och den motriktade långvågsutstrålningen under natten, både större och uthålligare från dessa ytor.



Figur MV9 Grov karaktärisering av planteringsmiljöer som skapas vid maskinell markberedning (harvning – profil tvärs körriktning; högläggning – profil längs körriktning). Angivna effekter är i jämförelse med ej markberedd planteringsmiljö. Illustration Bo Persson

I den upprivna och oftast omvända torvan sker intensifierad nedbrytning och mineralisering. Tillgången på näring och ljus är där god för en trädplanta. Den positiva effekt på näringstillgången som kalhuggningen i sig innebär förstärks ytterligare; mer avdödat växtmaterial tillförs, temperaturförhållandena i rotzonen blir än gynnsammare o.s.v. Nitrifikationen, och därmed risken för nitratutlakning, gynnas dock också i motsvarande grad.

Vattenbrist kan vara ett problem, eftersom det luckra grovporiga humuslagret snabbt dränerar överskottsvatten och framför allt ofta har dålig fysisk kontakt med underliggande markyta. Det sistnämnda gör att luftspalter bildas, vilka förhindrar den kapillära uppsugning av vatten från underliggande markskikt som annars skulle ske.

Kontakten med underlaget och dess vattenförråd är alltså avgörande för plantans förutsättningar att etablera sig. En omvänd torva får inte hamna på en bädd av grenar och ris. Inblandning eller pålagring av mineraljord ger större tyngd åt torvan, vilket ofta räcker för att ge den nödvändiga kontakten med underlaget. Känsligheten för bristande kapillär uppsugning och uttorkning i en omvänd torva varierar givetvis med klimatet – problemet är störst i sommartorra delar av landet, liksom under allmänt nederbördsfattiga år.

Vid plantering i omvänd torva bör plantan alltid sättas så djupt att dess

rötter kommer i kontakt med det underliggande intakta humuslagret. En planteringsmetod som därför kan underlätta plantans vattenförsörjning under etableringsfasen är så kallad djupplantering.

Högläggning förbättrar dränering och minskar frostsador

Högläggning är en vidareutveckling av fläckmarkberedningens plantering i omvänd torva. Den upplagda högen kan variera i storlek, beroende på om markberedare med högläggningssaggregat eller grävmaskin använts. Högen består i regel mest av uppgrävd mineraljord med inblandade fragment av sönderrivet humuslager. Vid högläggning på fuktig mark eller dikad kärjord kan välhumifierat organiskt material utgöra huvuddelen.

Ett viktigt syfte med högläggning är att skapa en upphöjd planteringspunkt för att minska frostrisken. Om plantan placeras någon eller några decimeter högre än omgivande markyta når den varmare luftlager, vilket kan ha avgörande betydelse för frostsaderisken. Ett annat syfte, på fuktiga och våta marker med risk för syrgasbrist för plantrötterna, är att skapa väl-dränerade planteringspunkter.

Temperatur- och näringsförhållandena i upplagda högar är oftast mycket gynnsamma. Blottad mineraljord ger snabb uppvärmning och höga dagtemperaturer i högen. Kombinationen av gynnsamma vatten- och temperaturförhållanden och färskt förnamaterial i en lucker blandning med mineraljord, ger de allra bästa förutsättningarna för mikrobiell mineralisering av växtnärsämnen. Detta har ibland kallats ”komposteringseffekt”.

Markberedning och uppfrysning

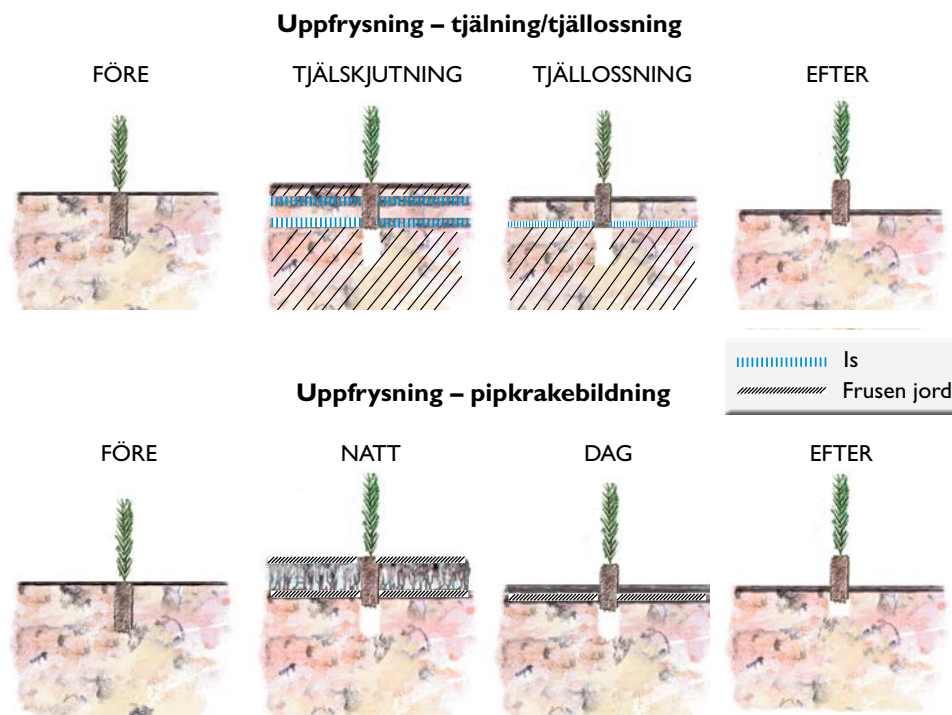
*Uppfrysning*⁷⁶ av föremål kan ske i jordar som uppvisar tjälskjutning. De känsligaste mineraljordarterna är finmo- och mjälasediment, lättlera, samt moiga, mjäliga och leriga moräner. Grövre jordarter såsom grovmosediment och sandiga moräner, samt riktigt finkorniga såsom tyngre leror och moränleror, ger av olika skäl mindre uppfrysning.

Stenar och block, pålar i marken, samt planterade plantor kan frysa upp. Mekanismen är i samtliga fall att föremålets övre del fryser fast i omgivande jord och följer med detta skikt uppåt, när tjälen sedan expanderar underliggande jordskikt. Vid tjällossning på våren smälter dock tjälen från markytan och nedåt. Det medför att föremålets nedre delar fortfarande är fixerade i tjälad mark, när jorden kring dess övre delar tinar och sjunker ihop (figur MV10).

Benämningen *pipkrake* betecknar en särskild typ av uppfrysningmekanism, vilken ”över en natt” kan orsaka stora skador på nyligen planterade plantor (figur MV10).

Pipkrake uppträder typiskt på bar jord (och i grunda vattenansamlingar), under senhösten och på våren, när jorden tjälår på natten men tinar upp på dagen. Det fuktiga ytligaste jordskiktet fryser först ihop till ett sammanhållet tunt flak, där även plantan sitter fast. Flaket med den fastfrusna plantan lyfts sedan upp genom att isen undertill tillväxer i form av ”isstänglar”. När sedan markytan på dagen värms upp, faller det frusna ytskiktet tillbaka till markytans nivå.

⁷⁶ Goulet, F, 2000. Frost heaving of planted seedlings in the boreal forest of Northern Sweden. SLU, inst. för skogsskötsel. *Rapport* nr 45.



Figur MV10 Mekanismer för uppfrysning av planter. Överst: Uppfrysning i samband med vinterns tjälskjutnings-/tjällossningscykel. Underst: Uppfrysning i samband med pipkrakebildning.

De skogsskötselmässiga konsekvenserna av uppfrysning är framför allt knutna till plantering i bar jord, efter markberedning. I de mest uppfrysningsbenägna mineraljordarna, liksom i höghumifierad torv, bör plantering aldrig ske i bar jord. Täckrotsplanter är mycket känsligare än barrotsplanter när det gäller den speciella pipkrake-uppfrysningen. Beträffande vanlig uppfrysning, d.v.s. sådan som beror på vinterhalvårets tjälskjutnings- och tjällossningscykel, är skillnaden mellan planttyperna liten.

De flesta skogsjordar är medelkorniga moräner med podsoljordmån, och i dessa blir det något starkare uppfrysning vid plantering i jordmaterial från rostjorden än vid plantering i blekjord.⁷⁷

Plantering i omvänd torva är den metod som på ett effektivt sätt kan minska uppfrysningen i en markberedd uppfrysningsbenägen jord. Det beror på att det mellanliggande porösa mårtäcket minskar den kapillära uppsugningen av vatten mot ytskiktet och inte expanderar vid frysning.

Djupplantering minskar generellt risken för uppfrysning och kan i vissa situationer vara en avgörande anpassning av planteringstekniken.

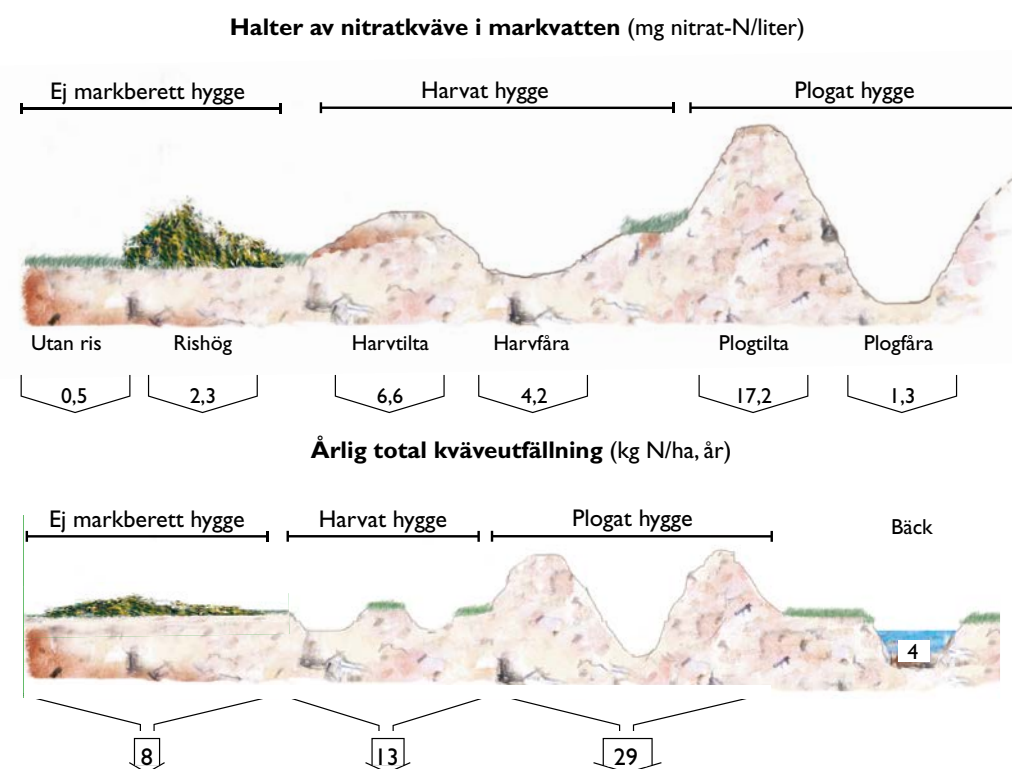
Effekter på näringsutlakning och erosion

Jämfört med hygget ökar markvattnets halter av mineralnäringsämnen ytterligare genom markberedningen. Flerfaldigt förhöjda halter i markvattnet under rotzonen kan förekomma, och de ökar i proportion till markberedningsmetodens totala störningseffekt (figur MV11). Detta ökar självklart risken för näringsutlakning av bland annat nitratkväve till grundvatten och

⁷⁷ Holt Hansen, K., Granhus, A., Bergsten, U., Ottosson Löfvenius, M., Grip, H. & de Chantal, M. 2007. Frost-heaving damage to one-year-old *Picea abies* seedlings increases with soil horizon depth and canopy gap size. *Can. J. For. Res.* 37, s. 1236–1243.

vattendrag.^{78,79,80,81} Det kväve som lämnar rotzonen är sannolikt förlorat som näringsresurs för vegetationen på platsen ifråga, men därmed inte sagt att allt kommer att nå närliggande vattendrag (figur MV11, underst). Dels kan mikrobiell denitrifikation omvandla nitratkvävet till gasform, dels kan både mikroorganismer och växtsamhällen i utströmningsområden tillgodogöra sig kvävet innan det kommer ut i vattendraget.

I de mest kvävebelastade sydvästra delarna av Sverige (till exempel Halland) kan utlakningen av nitratkväve från rotzonen, efter kalavverkning och markberedning, uppgå till betydligt mer än 10 kg N per hektar och år. Dessutom kan i vissa fall utlakningen pågå i 5–7 års tid.⁸²



Figur MV11 Näringsutlakning efter markberedning (Hälsingland).

Modifierat efter Rosén & Lundmark-Thelin, 1986.

Överst: Halter av nitratkväve i vatten som dräneras från rostjorden (ca 30–40 cm från markytan) under olika markbehandlingar, ett år efter markberedning.

Underst: Beräknad årlig total kväveutlakning från hyggen med angiven typ av markbehandling. Tillrinningsområdet för bäcken är till 50 % harvat och till 20 % plogat.

⁷⁸ Rosén, K. & Lundmark-Thelin, A. 1986. Hyggesbruket och markvården. I: Skogen som natur och resurs – mark-flora-fauna. Skogshögskolans höstkonferens 3–4 december 1985, Uppsala. SLU. *Skogsfakta Konferens* nr 9, s. 42–49.

⁷⁹ Akselsson, C., Westling, O. & Örlander, G. 2004. Regional mapping of nitrogen leaching from clearcuts in southern Sweden. *For. Ecol. Manage.* 202, s. 235–243.

⁸⁰ Westling, O., Örlander, G. & Andersson, I. 2004. Effekter av askåterföring till granplanteringar med riståkt. IVL. *Rapport B 1552*.

⁸¹ KSLA. 2007. How to estimate N and P losses from forestry in northern Sweden. *Kungl. Skogs- och Lantbruksakad. Tidskr.* 2–2007.

⁸² Akselsson, C., Westling, O. & Örlander, G. 2004. Regional mapping of nitrogen leaching from clearcuts in southern Sweden. *For. Ecol. Manage.* 202, s. 235–243.

Partikelerosion från hyggen kan uppstå genom olämplig markberedning och spårskador i anslutning till diken och bäckar. Detta kan lokalt ge allvarliga skador i vattendragen. Skyddszoner utmed vattendrag där markberedning ej utförs, liksom skyddszoner med kvarlämnad skog, är mycket viktiga inslag i ett ståndortsanpassat kalhyggesbruk.

Markberedningens långsiktiga produktionseffekter

Den störning av humuslagret som markberedningen ger påskyndar mineraliseringen av det organiskt bundna näringsförrådet, framför allt kväve. Detta är positivt för det nya beståndet. Men om en avsevärd del av det mineraliserbara näringsförrådet förloras genom utlakning under perioden närmast efter markberedningen så skulle de långsiktiga produktionseffekterna kunna bli negativa. Farhågan för att detta kan ske, i första hand efter radikal markberedning och på primärt näringsfattiga ståndorter med tall som trädslag, har diskuterats sedan 1970-talet.^{83,84} Utfallet är inte självklart, eftersom markens framtida produktionskapacitet inte bara bestäms av kväveförrådets storlek utan också av dess omsättningshastighet. Ett litet förråd med hög omsättningshastighet kan således medge lika stor tillväxt som ett stort förråd med låg omsättningshastighet.

Undersökningar av äldre markberedningsförsök med föryngring av tall, har hittills inte på ett otvetydigt sätt kunnat belägga att tillväxtnedsättningar sker.⁸⁵ Tvärtom visar de flesta studierna en positiv tillväxteffekt, som kan kvarstå åtminstone upp till ca 50 år.⁸⁶ Dessa försök inkluderar även radikala markberedningsformer, såsom hyggesplöjning.

⁸³ Lundmark, J.-E. 1977. Marken som en del av det skogliga ekosystemet. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 2, s. 109–122.

⁸⁴ Johansson, M.-B. 1987. Radikal markberedning – olämpligt sätt att utnyttja kväveförrådet i avverkningsresterna. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 2, s. 35–41.

⁸⁵ Örlander, G., Nordborg, F. & Gemmel, P. 2002. Effects of complete deep-soil cultivation on initial forest stand development. *Studia For. Suec.* nr 213.

⁸⁶ Örlander, G., Nordborg, F. & Gemmel, P. 2002. Effects of complete deep-soil cultivation on initial forest stand development. *Studia For. Suec.* nr 213.

Hyggesbränning

Hyggesbränning^{87,88,89,90} är en speciell form av radikal markbehandling som allmänt tillämpades i norra Sverige under flera årtionden i mitten av 1900-talet. Den har under senare år rönt förnyat intresse. Som skoglig åtgärd görs den i syfte att underlätta förnygring, vanligtvis med tall.

I likhet med mekaniska markberedningsmetoder innebär utslagningen av befintlig vegetation att konkurrensen om vatten och näring minskar, men inte bara fläckvis utan över nästan hela ytan. Den brända mörka markytan absorberar mer solstrålning och fläckar av mineraljord kan blottas. Marktemperaturen, särskilt maximitemperaturen, blir därför högre.

Risk för kväveutarmning vid hård bränning

När det organiska materialet brinner upp försvinner kolet som koldioxid upp i atmosfären. Det mesta kvävet försvinner som kvävgas, kväveoxider och i viss mån även i form av ammoniak. Följaktligen kan en stor del av humuslagrets kväveförråd ”gå upp i rök” om allt organiskt material brinner upp. Huvuddelen av baskatjonerna blir däremot kvar i askan, även om framför allt kaliumförlusterna med rökgaser och flygaska kan vara betydande. Askan har en starkt basisk reaktion vilket ger en kraftig höjning av markens pH.

Höjningen av marktemperatur och pH medför mycket gynnsamma miljöförhållanden för överlevande nedbrytarorganismer. Ammoniumhalterna i marken brukar öka efter bränningen. Intensifierad nedbrytningsaktivitet och kväveminerisering efter bränningen kan dock bara ske om det finns lättnedbrytbart organiskt material kvar. Detta avgörs av hur ”hård” bränningen varit.

Nitrifikationsbakterier gynnas sannolikt ännu mer än nedbrytande organismer. Förutom högre marktemperatur och pH, ökar också tillgången till ammonium som är bakteriernas substrat (energikälla). Förhöjd nitrifikation på brända hyggen jämfört med obrända har påvisats. Risken för omfattande nitratutlakning ökar med markens allmänna bördighet (humus med låg C/N-kvot), och minskar om hyggesvegetationen snabbt koloniserar det brända hygget.

Högre pH i avrinningsvattnet

Avrinnande vatten får normalt högre pH-värde och högre syraneutraliserande förmåga (alkalinitet). Ökad utlakning av baskatjoner är normalt efter bränning. Detta ger dock inga övergödningseffekter i vattendragen. Nitrathalterna kan dock öka.

Eftersom bränd jord har en benägenhet att bli något vattenavvisande kan ytavrinning uppstå lättare. Detta ökar utlakningsrisken ytterligare och kan i vissa fall även ge förluster av fosfor med suspenderade askpartiklar. Risken

⁸⁷ Wretling, J.E. 1932. Om hyggesbränningen inom Malå revir. *Norrlands skogsvårdsförbunds tidskrift*, 1932, s. 243–332.

⁸⁸ Wretling, J.E. 1948. *Nordsvensk hyggesbränning*. Tryckeri A.-B. Thule. Stockholm.

⁸⁹ Lundmark, J.-E. 1988. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortanpassat skogsbruk. Del 2 – Tillämpning*. Skogsstyrelsen.

⁹⁰ Ring, E. 1997. Miljöeffekter av bränder i skogsekosystem – en litteraturöversikt med Norden i brännpunkten. SkogForsk. *Redogörelse* nr 2–1997.

för stora initiala förluster är störst om det kommer häftig nederbörd omedelbart efter hård bränning.

Produktionen kan påverkas såväl positivt som negativt

Hyggesbränningens effekter på näringsutbud och växtproduktion varierar från mycket positiva till mycket negativa. Erfarenheterna från de hyggesbränningar som gjordes i norra Sverige fram till 1960-talet var mestadels goda, förutom vissa problem med rotmurkla (*Rhizina undulata*), en parasitisk skadesvamp. Självföryngring av tall och björk gynnas. Produktionseffekterna i de etablerade bestånden har oftast varit positiva i tallbestånd men negativa i granbestånd.⁹¹

En hyggesbränning bör från föryngringssynpunkt vara så hård att den dödar markvegetationen, men från produktionssynpunkt så lätt att den inte bränner fram mineraljorden. Lämplig marktyp för hyggesbränning är frisk moränmark med normalt till tämligen mäktigt mårager. Bränning på torr mark och på frisk mark med tunt mårager medför risk för kväveutarmning och sänkt produktionsförmåga. Torvmark ska inte brännas, eftersom en mycket stor andel av systemets totala förråd av fosfor och lättlösliga baskationer (kalium och magnesium) finns i ytskiktets levande växtdelar och färskas fönamaterial. Risker för utlakningsförluster av dessa viktiga mineralnäringsämnen är stor då en torvmarks ytskikt bränns bort. Detta kan ha mycket stora och långsiktiga negativa konsekvenser för systemets produktionskapacitet.

Hyggesbränningens lämplighet i södra Sverige är mycket tveksam ur produktionssynvinkel och i vissa fall även tveksam ur vattenkvalitetssynvinkel. Där finns inte samma behov av att öka marktemperatur och kväveminerisering för att gynna föryngringen, och risken för nitrifikation och miljöskadlig nitratutlakning är större vid bränning av humuslager med relativt låg C/N-kvot.

Naturvårdsbränning

Hyggesbränning och så kallad naturvårdsbränning har helt olika syften. Naturvårdsbränning görs i uppvuxna bestånd, ibland partiellt avverkade. Syftet är att gynna brandanpassade växter och andra organismer, inte att underlätta för skogens föryngring och tillväxt. Ska exempelvis de förr så vanliga brandpräglade lavrika tallhedarna återskapas, så är hård bränning som verkar kväveutarmande och produktionsänkande ett medel för att åstadkomma detta.

Oavsett bränningens syfte så är effekterna på markprocesser och det avrinnande vattnets kvalitet likartade.

⁹¹Hallsby, G. 1995. Hyggesbränningens inflytande på virkesproduktionen i boreala skogar. En uppdatering av kunskapsläget beställd av MoDo skog november 1995. SLU, inst. för skogsskötsel. *Arbetsrapporter* nr 109.

Röjning och gallring

Huvudsyftet med röjning och gallring är att omfördela arealtillväxten från många till färre trädindivider. Åtgärderna har också effekter på markförhållandena. Viktiga direkta markeffekter är ökad solinstrålningen till markytan, ökad marktemperatur och ett engångstillskott av förna.

Markens temperatur under vegetationsperioden ökar, vilket generellt förbättrar förutsättningarna för biologisk aktivitet. Temperatureffekterna har sannolikt störst betydelse för skogsproduktionen i norra Sveriges kyliga temperatorklimat, och särskilt i jordar som är kalla på grund av hög finjordshalt och fuktighet.⁹²

Effekterna på markens näringsutbud efter röjning och gallring är i princip desamma som efter kalavverkning – en gödslingseffekt. Åtgärderna slår ut en del av de trädindivider som tidigare i hård konkurrens tagit sin del av nedbrytarnas nettomineralisering. Kvarvarande och inväxande individer får då bättre näringstillgång under en period. Men dessutom tillförs nedbrytarna nya energi- och näringsrika växtrester i form av avdöende rotsystem och mykorrhiza-mycel. Det sistnämnda utgör en betydande kväveresurs, eftersom svampvävnad innehåller höga halter kväve.

Kombinationseffekten av minskad näringskonkurrens och ökad kväveminerisering har påvisats genom så kallade rotavskärnings- och rotisoleringsexperiment.^{93,94} Ekologen och markforskaren Lars Gunnar Romell föreslog termen *röjningsgödslings-effekten* för denna mekanism, vilken ända från svedjebrukets dagar systematiskt har utnyttjats av människan för att mobilisera bundna näringsresurser.⁹⁵

⁹² Lundmark, J.-E. 1988. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 2 – Tillämpning*. Skogsstyrelsen.

⁹³ Romell, L.-G. 1938. Markreaktionen efter gallringar och dess orsaker. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 43, s. 1–8.

⁹⁴ Romell, L.-G. & Malmström, C. 1945. Henrik Hesselmanns tallhedsförsök åren 1922–42. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt* 34, s. 609–625.

⁹⁵ Romell, L.-G. 1966. Röjningsbruket och dess hemlighet. *Ymer*. Årsbok 1966, s. 183–196.

Terrängkörning och markskador

Mekaniseringen av skogsbruket har medfört ökad belastning på marken.^{96,97,98} Maskinerna är stora och tunga, allt fler åtgärder utförs maskinellt vilket innebär återkommande körning i bestånden, och en större andel körning sker under otjälade markförhållanden. Förutom slutavverkning och markberedning har maskinell gallring och GROT-skörd tillkommit. Och kanske i framtiden även regelmässig askspridning, stubbskörd, med mera. Detta kan skada beståndet, marken, vattnet och skyddsvärda kulturlämningar, med både kortsiktiga och långsiktiga negativa konsekvenser.

Markkompaktering

Markkompaktering ökar partiklarnas lagringstäthet och höjer jordens volymvikt. Negativa effekter på växterna kan uppstå på två olika sätt.

För det första uppstår ett ökat jordmotstånd för rottillväxt, vilket försämrar vatten- och näringsupptagning och leder till lägre tillväxt.⁹⁹ Rotspetsar har liten kraft att tränga undan partiklar när de växer framåt.¹⁰⁰ Den ”sprängkraft” som ibland tillskrivs framför allt vedväxters rötter, beror på deras successiva diametertillväxt. Finrötternas tjocklek varierar mellan växtarter, och därför har arterna olika kritiska minimivärden för pordiameter.

Den andra skadeorsaken är att det uppstår syrgasbrist för rötterna. Risker för detta ökar eftersom minskad porstorlek i jorden leder till större vattenhållande förmåga, och vatten tränger bort luft. Finkorniga jordar är mer känsliga än grovkorniga beträffande bägge skademekanismerna.

Riskerna för kompaktering beror förutom på jordart även på rådande vattenhalt. Nästan alla jordarter är som mest känsliga när jorden är ”fuktig”. Om jorden är mycket torr motverkas kompaktering av friktion mellan partiklar. Om jorden är våt, d.v.s. porerna fyllda med vatten, motverkas kompakteringen av att vattnet först måste pressas ut ur jorden innan partiklarna kan packas tätare.

Värst under hjulspåren

Med dagens skogsbruksmetoder är riskerna för kompaktering främst knutna till skördares och skotares hjulspår. Kompaktering har visats kunna ske ner till 30–50 cm djup. Kompaktering i markens ytskikt kan med tiden återställas genom rötters och markdjurs aktivitet. Kompaktering djupare i mineraljorden kan sannolikt bestå mycket längre tid. Djupgående tjälbildning är dock en viktig återställningsmekanism i de delar av landet där sådan sker regelbundet.

⁹⁶ Olsson, M. 1977. Körskador i skogsbruket – ett markvårdsproblem. I: Markvård – skogsmarkens egenskaper och nyttjande. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 2–3 1977 (specialnummer), s. 233–247.

⁹⁷ Wästerlund, I. 1992. Extent and causes of site damage due to forestry traffic. *Scand. J. For. Res.* 7, s. 135–142.

⁹⁸ Jansson, K.-J. 1998. Effects of machinery traffic in forestry on soil properties and tree growth. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria* 66.

⁹⁹ Wästerlund, I. 1985. Compaction of till soils and growth tests with Norway spruce and Scots pine. *For. Ecol. Manage.* 11, s. 171–189.

¹⁰⁰ Scott Russel, R. 1982. *Plant Root Systems. Their function and interaction with the soil.* ELBS/McGraw-Hill Book Company Ltd.

Förstärkning av mårtäcket och dess nätverk av rötter genom risläggning kan minska kompaktionsskadorna avsevärt.¹⁰¹ Det är därför viktigt att uttag av GROT (grenar och toppar) från hyggen och gallringar inte medför att denna skyddsåtgärd blir mindre väl utförd i framtiden.

Markbrott och rotskador

Djupa hjulspår orsakar också *markbrott*, vilket medför mekaniska skador på trädrötterna. I vårt kalla klimat, och särskilt i bestånd på fuktig mark, ligger nästan alla rötter nära markytan. Därför kan denna skadetyper få allvarliga konsekvenser. I gallringsskogar kan skadorna minska tillväxten, försämra trädens stabilitet och öka risken för angrepp av rotpatogener.¹⁰²

Man har funnit att mer än hälften av alla träd inom en meter från ett djupt hjulspår får minskad tillväxt. Tillväxtförluster på 25–40 % har uppmätts i granskog, under en 5-årsperiod efter gallring. Förlusterna gäller tillväxten för granar inom påverkansområdet utmed stickvägar med djup spårbildning.

Enligt en skadeberäkningsmodell presenterad av Wästerlund¹⁰³ är ca 5 % en rimlig skattning av tillväxtnedsättningen utslagen över hela arealen. Dessa skadebedömningar gäller dock bara låga granboniteter (G20–G24). Granskog på höga boniteter, samt tallskog, får mindre tillväxtförluster.

Långsiktiga negativa tillväxteffekter på grund av ökad rotröteinfektion kan dock tillkomma. En omfattande undersökning av synliga bark- och vedskador på stam, stubbe och grövre rötter, har gjorts i gallringsbestånd.¹⁰⁴ Resultaten visar att i genomsnitt 5 % av kvarstående träd har någon skada. Det är mycket stor sannolikhet att dessa skador leder till rotröteinfektion i granskog och därmed långsiktiga negativa effekter.

Erosionsrisk

En ytterligare konsekvens av körskador kan vara erosion och partikeltransport ut till vattendragen. Problemet uppstår i regel genom att bar jord friläggs i körspåren och därför lättare kan eroderas av regn och ytavrinnande vatten.

Torvjordar, speciellt med höghumifierat organiskt material, är oftast erosionskänsliga. Bland mineraljordarna är de med stor andel finmo- och mjälpartiklar mycket känsliga. Stark marklutning ökar erosionsrisken. Det gör också kompaktering av jorden, eftersom markens infiltrationskapacitet då sänks och eroderande ytavrinning tilltar.

De negativa effekterna för vattensystemen orsakas i första hand av de suspenderade partiklarna. Vattnets ljusförhållanden förändras och det material som sedimenterar på botten bokstavligen begraver bottenlevande organismsamhällen.

¹⁰¹ Eliasson, L. & Wästerlund, I. 2007. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. *For. Ecol. Manage.* 232, s. 118–123.

¹⁰² Olsson, M. 1977. Körskador i skogsbruket – ett markvårdsproblem. I: Markvård – skogsmarkens egenskaper och nyttjande. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 2–3 1977 (specialnummer), s. 233–247.

¹⁰³ Wästerlund, I. 1983. Kanträdens tillväxtförluster vid gallring på grund av jordpackning och rotskador i stickväg – en sammanställning och bearbetning av litteraturuppgifter. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 2–83.

¹⁰⁴ Fröding, A. 1992. Gallringsskador – en studie av 403 bestånd i Sverige 1988. SLU, inst. för skogsteknik. *Rapport* nr 193.

Det viktigaste för att förhindra erosionsskador är att minimera sönderkörning och därmed blottläggning av bar jord i fuktiga terrängavsnitt nära strömmande ytvatten. Man bör undvika att skapa djupa hjulspår i markens lutningsriktning. Bäck- och dikeskanter får inte skadas. Risläggning vid körning över fuktig mark och tillfällig broläggning över diken och bäckar är mycket viktiga skyddsåtgärder.

För närvarande sker en intensiv utveckling av e-karttjänster som visar skogliga bestånds- och marktytedata baserade på nationell laserscanning av skogsmark.¹⁰⁵ Kopplat till terrängklassificering, pågår exempelvis vid SLU arbete med att kombinera höjdmodeller (visar markytans höjdvariationer med hög precision) med hydrologiska modeller (beräknar grundvattensytans läge under markytan), till mycket exakta markfuktighetskartor. Denna typ av markfuktighetskartor kan komma att bli viktiga verktyg som underlättar planering av körstråk till lämpliga terrängavsnitt, och undvika terränger med dålig bärighet, erosionsrisk och andra negativa effekter på vattendrag.

Markstörning och kvicksilverutlakning

Uttransport av kvicksilver^{106,107} till sjöar i skogslandskapet har varit ett uppmärksammat miljöproblem sedan 1970-talet. Under senare år har kunskaperna om inblandade markprocesser och transportmekanismer ökat. Det som hittills framkommit pekar mot att skogsbruk och skogsbruksåtgärder behöver beaktas i sammanhanget.

Bakgrunden är att gasformigt kvicksilver under lång tid spridits via atmosfären till alla landtytor och adderats till de naturligt förekommande halterna i marken. Kvicksilverjoner binds mycket starkt till organiskt material, varför det över tiden anrikats i skogsmarkernas organiska ytskikt. I framför allt våtmarker, där det tidvis råder syrgasbrist, kan en liten del av detta kvicksilver via mikrobiella processer omvandlas till biotillgängligt metylkvicksilver.

Avrinningsvatten från skogsmark för ständigt med sig löst organiskt material till ytvatten, och därmed också små mängder kvicksilver och metylkvicksilver. Våtmarker och fuktiga utströmningsområden utmed vattendrag, med undantag för de allra näringsrikaste kärren (framför allt alkärr), är de viktigaste källorna för metylkvicksilvret. I vattensystemen anrikas särskilt metylkvicksilvret mycket starkt i levande organismer och kan nå skadligt höga halter bland annat i fisk.

Fältstudier har visat att:

- Bildningen av metylkvicksilver är starkt kopplad till varierande grundvattenstånd i fuktiga och torvtäckta utströmningsområden.
- Uttransport av kvicksilver till vattensystemen är starkt kopplad till uttransport av organiskt material.

Förhöjd uttransport av kvicksilver och metylkvicksilver har påvisats efter i) kalavverkning och markberedning, ii) körskador från skogsmaskiner i anslut-

¹⁰⁵ Se: www.skogsstyrelsen.se/Aga-och-bruka/Skogsbruk/Karttjanster/Laserskanning/

¹⁰⁶ Skyllberg, U. 2003. Kvicksilver och metylkvicksilver i mark och vatten. SLU. *FaktaSkog* nr 11–2003.

¹⁰⁷ Bishop, K. & Åkerblom, S. 2006. Skogsbruk och kvicksilverproblematik i mark och vatten. En översikt av kunskapsläget. SLU, inst. för Miljöanalys. *Rapport* 2006:21.

ning till bäckar och diken, och iii) stormskador i skog.^{108,109,110} Kalavverkning och markberedning kan båda tillfälligt öka bildning och utlakning av löst organiskt material, jämfört med bakgrundsutlakningen. Detta medför ofta ökad utlakning även av kvicksilver (enligt ovan). Grundvattenhöjningen och den intensivare nedbrytningen som alltid sker på ett hygge, gynnar dessutom nybildningen av metylkvicksilver i marken. Markskador i och nära vattendrag orsakar erosion av suspenderade humuspartiklar. Detta fasta organiska material bär med sig adsorberat kvicksilver och metylkvicksilver ut i vattendragen, utöver de mängder som är knutna till det lösliga organiska materialet.

Tidiga studier av skogsbrukets betydelse för utlakningen av kvicksilver pekade mot tydlig förhöjd uttransport, medan vissa senare studier inte visat lika entydiga resultat. Därför är det för närvarande svårt att bedöma hur omfattande och allvarlig skogsbrukets påverkan egentligen är, på kvicksilverhalterna i våra skogssjöar.^{111,112}

Skador på forn- och kulturlämningar

Enligt kulturminneslagen ska fasta fornlämningar¹¹³ bevaras i oskadat skick. Övriga kulturlämningar ska enligt skogsvårdslagen skyddas och värnas. En skogsbrukare är skyldig att ta reda på om fornlämningar berörs och ansvarar för skydd och hänsynstagande.¹¹⁴

Oavsiktlig skadegörelse, framför allt i samband med kalavverkning och markberedning, är ett mycket allvarligt skogligt markskadeproblem. Riksantikvarieämbetet och Skogsstyrelsen har utfört inventeringar av skadefrekvensen på forn- och kulturlämningar i samband med avverkning och markberedning.¹¹⁵ Dessa visar att ungefär hälften av forn- och kulturminnesobjekten skadades 2013. Markberedning orsakar mest allvarlig skadepåverkan, följt av körskador. Trots att markskadeproblematiken uppmärksammas mycket, och insatser för att underlätta och förbättra skogsbrukets hänsyn vidtagits, har årliga inventeringar ännu inte kunnat påvisa påtagliga minskningar av skadefrekvensen.

¹⁰⁸ Porvari, P., Verta, M., Munthe, J. & Haapanen, M. 2003. Forestry practices increase mercury and methyl mercury output from boreal forest catchments. *Environmental Sciences and Technology* 37, s. 2389–2393.

¹⁰⁹ Munthe, J. & Hultberg, H. 2004. Mercury and methylmercury in run-off from a forested catchment – concentrations, fluxes and their response to manipulations. *Water Air and Soil Pollution* 4, s. 607–618.

¹¹⁰ Karlsson, P.E., Zetterberg, T., Hellsten, S. & Munthe, J. 2007. Kviksilverutlakning från växande, avverkad och stormskadad skog. *IVL Rapport* B1767.

¹¹¹ Eklöf, K. & Bishop, K. 2010. Export av kvicksilver tuill akvatiska miljöer – skogsbrukets påverkan. SLU. *FaktaSkog* nr 7–2010.

¹¹² Eklöf, K., Kraus, A., Weyhenmeyer, G.A., Meili, M. & Bishop, K. 2010. Forestry influence by stump harvest and site preparation on methylmercury, total mercury and other stream water chemistry parameters across a boreal landscape. *Ecosystems* 15, s. 1308–1320.

¹¹³ Hällström, C., Karlsson, L., Gren, L., Myrdal-Runebjer, E., Kardell, Ö. & Lorén, D. 2001. Fornlämningar och kulturmiljöer i skogsmark. Skogsstyrelsen. *Rapport* 8E–2001.

¹¹⁴ Skogsstyrelsen. 2014. Skogsstyrelsens föreskrifter och allmänna råd till skogsvårdslagen. *Skogsstyrelsens författningssamling*. SKSFS 2011:7/2014:7.

¹¹⁵ Ulfhielm, C. 2014. Hänsynen till forn- och kulturlämningar. Resultat från Hänsynsuppföljning Kulturmiljöer 2013. Skogsstyrelsen. *Rapport* 4–2014.

De kända fornlämningarna finns i Riksantikvarieämbetets Fornlämningsinformationssystem (FMIS). Detta är allmänt tillgängligt via e-tjänsten ”Fornsök”, och innehåller alla kända fornlämningar och många övriga kulturlämningar. Kompletterande information om kulturlämningar finns i Skogsstyrelsens databas ”Skog och historia”, vilken är allmänt tillgänglig via e-tjänsten ”Skogens pärlor”. Ofta kan det också finnas detaljerad lokal kunskap om oregistrerade kulturminnen, men inte sammanställd och inte alltid hos skogsbrukaren eller markägaren själv.

Orsakerna till dagens höga skadefrekvens beror sannolikt till stor del på brister i informationsöverföringen till den som planerar en avverkning eller sitter i en skogsmaskin och utför åtgärderna. Förutsättningar för att undanröja denna okunskap har blivit mycket bättre, i och med Riksantikvarieämbetets och Skogsstyrelsens fritt tillgängliga e-databaser. Fortfarande skulle dock denna information behöva kompletteras med rutiner för att i planeringsskedet fånga upp lokal kunskap om skyddsvärda objekt.

Våtmarker och skogsdikning

Historiska dikningsåtgärder har medfört att ca 1,5 miljoner hektar skoglig våtmark, 15 % av totalarealen skoglig våtmark, är dikningspåverkad.¹¹⁶ Den andel som blivit tillfredsställande dränerad för skogsproduktion (1 MHa; 10 %), utgör knappt 5 % av Sveriges totala skogsmarksareal. Detta är ofta marker med relativt hög produktionsförmåga, förutsatt att dräneringen fortfarande är tillfredsställande. Skötseln av dikade marker kräver kunskap om de speciella markförhållandena som råder där. Detta gäller inte bara dikesunderhållet, utan även ståndortsanpassningen av övriga skogliga åtgärder.^{117,118,119,120,121}

Dikningens primära syfte är att sänka vattenhalten så att jorden i rotzonen kan innehålla tillräckligt mycket luftfyllda porer med syrgas. Som en följd av detta kan trädbiomassan öka och i takt med ökningen mer och mer bidra till markens avvattning genom avdunstning från trädsiktet. Den förbättrade markluftningen ökar också den mikrobiella nedbrytningen, inklusive kväve-mineraliseringen. Detta ger utrymme för ytterligare tillväxtökning.

Sammantaget innebär förändringarna att ståndortens bördighet för trädvegetation ökar starkt. Det är inte säkert att den totala produktionen av biomassa per ytenhet ökar, men oftast är så fallet eftersom det bättre dränerade systemet ökar omsättningen av ackumulerat näringskapital i torven.

Det ”nya” ekosystemet med ett slutet trädsikt uppvisar alltså:

- Ändrad vattenbalans där större andel vatten återgår till atmosfären.
- Mer näringsämnen i kretsloppsflödet mellan biomassa och mark.
- En förskjutning av biomassaproduktionen från markvegetation till träd.

Våtmarksterminologi

Våtmark¹²² är mark som i odikat tillstånd har så hög grundvattenyta att växtsamhället påverkas. *Skogliga våtmarker* är alla våta marker inom skogslandskapet där trädens tillväxt är hämmad på grund av för hög markfuktighet. Flertalet trädarters utveckling begränsas av syrgasbrist och myrväxter förekommer eller dominerar. Dessa våtmarker benämns i dagligt tal oftast som

¹¹⁶ Hånell, B. 2009. Möjlighet till höjning av skogsproduktionen i Sverige genom dikesrensning, dikning och gödsling av torvmarker. I: Fahlvik, N., Johansson, U & Nilsson, U. (eds.). Skogsskötsel för ökad tillväxt. Faktaunderlag till MINT-utredningen. SLU. *Rapport*. Bilaga 4:1–28.

¹¹⁷ Heikurainen, L. 1973. *Skogsdikning*. P.A. Nohrstedt & Söners Förlag, Stockholm.

¹¹⁸ Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. 1980. Skogsproduktion på våtmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. *Redogörelse* nr 3–1980.

¹¹⁹ Simonssons, P. 1987. Skogs- och myrdikningens miljökonsekvenser. Naturvårdsverket. *Rapport* 3270.

¹²⁰ Paavilainen, E. & Päiväven, J. 1995. *Peatland Forestry – ecology and principles*. Springer Verlag. 248 s.

¹²¹ Hånell, B. 1987. Torvmark. I: Lundmark J.-E. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 2 – tillämpning*. Skogsstyrelsen.

¹²² Holmen, H. 1980. Produktionsförutsättningar, klassificering och arealtillgång. I: Skogsproduktion på torvmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. *Redogörelse* nr 3–1980.

myr, kärr eller *mosse*. Myr, liksom våtmark, är en övergripande beteckning vilken innefattar huvudtyperna kärr och mosse. Kärr och mosse kan definieras såväl hydrologiskt som botaniskt. Här återges den terminologi som grundar sig på bildningarnas hydrologiska och hydrokemiska förhållanden och som förklarar varför olika näringsförhållanden, vegetationssamhällen och torvslag uppkommit.

Olika bildningstyper

En våtmark kan tillföras vatten via nederbörden, via tillrinnande grundvatten, eller både och. Grundvatten som tillförs via omgivande fastmarker innehåller lösta vittrings- och nedbrytningsprodukter från mineraljordarna, däribland växtnäringsämnen. Omfattningen av denna näringstillförsel varierar beroende på den lokala geologin och hydrologin. Nederbördsvatten som faller direkt på våtmarksytan tillför däremot mycket lite näringsämnen (historiskt sett). Detta gör att förutsättningarna för långsiktig näringstillförsel kan variera mellan olika våtmarker. Man särskiljer mellan tre hydrologiska bildningstyper (figur MV13):

- Topogena myrar (= kärr) ligger i lokala sänkor i terrängen, dit vatten rinner och ansamlas från omgivningen. De har alltså utvecklats under tillförsel av så kallat minerogent grundvatten, och näringsförhållandena kan variera från näringsfattiga till näringsrika. De har ofta uppstått genom successiv igenväxning av öppna vattensamlingar. Denna bildningstyp har en plan markyta.
- Soligena myrar (= kärr) utvecklas också under påverkan av minerogent grundvatten, men bildas i lutande terräng, utan uppbromsande avrinningströsklar. Därför har bildningstypen ofta ett mer kontinuerligt genomflöde av vatten. Kan vara näringsfattiga eller näringsrika. Våtmarkens yta blir lutande.

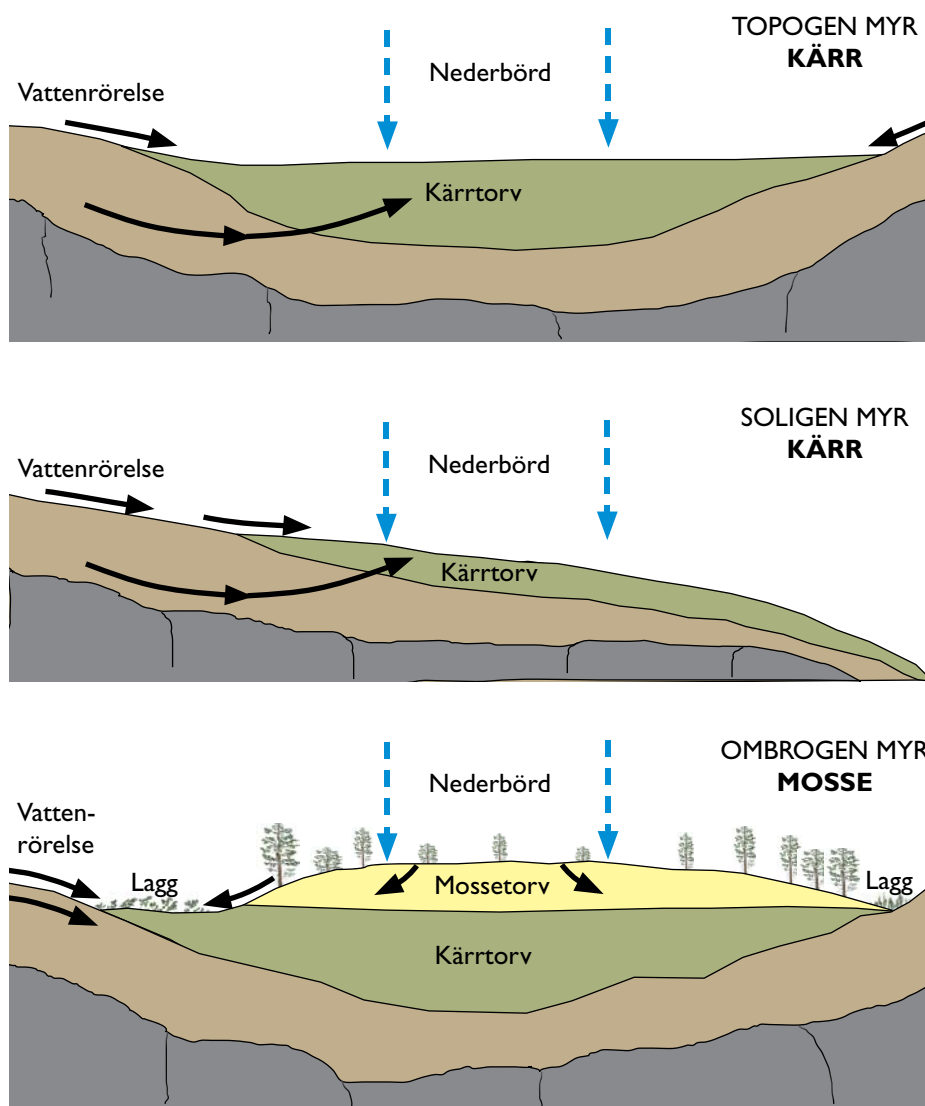
Topogena och soligena våtmarker bildas alltså i utströmningsområden för grundvatten och är olika varianter av kärr.

- Ombrogena myrar är mossar. Till skillnad mot ovanstående myrtyper får en mosse och mossevegetationen vatten och näring enbart från nederbörden. Detta beror oftast på att myrytan är mer eller mindre upphöjd i förhållande till sin närmaste omgivning. Den mest välkända typen av ombrogena bildningar i Sverige är den så kallade högmossen, vilken har en välvd yta som höjer sig över omgivande lagg. Dessa förhållanden har ofta uppstått när en topogen eller soligen bildning genom torvackumulation tillväxt så mycket i höjd att påverkan av det minerogena vattnet på torvytans vegetation i praktiken upphört (figur MV12).

Mossepartier kan även uppstå i centrala delar av större myrkomplex, där påverkan av minerogent vatten i praktiken är obefintlig trots att mosseytan inte är nämnvärt upphöjd.

De ombrogena skikten i en myr är, hydrologiskt sett, inströmningsområden, d.v.s. vattnets rörelse är nedåtriktad. Mossar är extremt näringsfattiga.

I praktiken har många kärr soligena partier längs fastmarksgränserna, och topogena partier i mer centrala delarna. Det är också vanligt att stora myrkomplex är så kallade blandmyrar vilka har såväl mosse- som kärrelement.



Figur MV12 Schematisk bild av olika torvbildningstyper. Modifierad efter Holmen, 1980.¹²³ Illustration Bo Persson

Träd tillväxt och torvdjup viktiga skogliga indelningsgrunder

Skogliga våtmarker indelas med avseende på skogsproduktionsförmåga i de två klasserna *myrimpediment* och *produktiv skogsmark* (figur MV13).

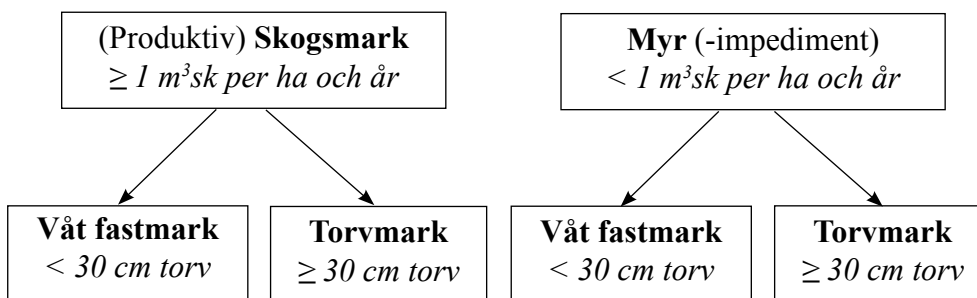
I den förstnämnda klassen ingår alla öppna och glest beskogade kärr och mossar, medan den senare dels innefattar naturliga sumpskogar, dels de våtmarker som genom dikning beskogats och därmed överförts till skogsproduktiv mark.

Det finns en parallell indelning av samma skogliga våtmarker vilken grundar sig på mäktigheten av markens organiska ytskiktet.

Våt fastmark är definierad som våt mark med mindre än 3 dm organiskt

¹²³ Holmen, H. 1980. Produktionsförutsättningar, klassificering och arealtillgång. I: Skogsproduktion på torvmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Redogörelse nr 3–1980.

material (mår eller torv) ovanpå en mineraljord, medan *torvmark* har minst 3 dm mäktigt torvlager. En våt fastmark är ofta samtidigt en produktiv skogsmark, men inte alltid. På liknande sätt sammanfaller ofta, men inte alltid, begreppen torvmark och myrimpediment.



Figur MV13 Indelning av skogliga våtmarker. Klassifikationsgrunder är dels den skogliga produktionsförmågan och dels torvdjupet.

Det är viktigt att skilja mellan grunda och djupa torvmarker, eftersom dikningseffekterna skiljer sig i flera viktiga avseenden. Dels påverkas avrinningsvattets kvalitet om dräneringsdikena når ned i underliggande mineraljord. Dels påverkas trädbeståndets långsiktiga näringsförsörjning genom att torvdjupet avgör om rötterna når ned till och kan ta upp näring från mineraljorden.

Det finns ingen allmänt vedertagen gräns mellan grund och djup torvmark. Men ca 30–50 cm brukar ofta anges som ”kritiska” torvdjup, i den meningen att mineraljordens direkta inflytande på markytans fastmarksvegetation blir obetydligt vid större torvdjup. Denna ungefärliga gräns sammanfaller någorlunda väl med gränsen mellan våt fastmark och torvmark, d.v.s. 30 cm torvdjup.

Torvens *humifieringsgrad* (nedbrytningsgrad), enligt von Post’s 10-gradiga skala, är en mycket viktig allmän karaktärisering. Humifieringsgraden är motsvarigheten till bestämning av textur i mineraljordar. Vidare är klassifikation av ytvegetationens *vegetationstyp* grunden för skoglig ståndortsbonitering och för den så kallade dikningsboniteten.¹²⁴

Dikningstermer

Dikningsåtgärder kan klassas som antingen *markavvattning*, *skyddsdikning*, eller *dikesrensning*.¹²⁵ Markavvattning (nydikning) är generellt förbjuden inom stora delar av Götaland och Svealand,¹²⁶ men dispens kan ges av länsstyrelser. I övriga Sverige är den tillståndspliktig. Skyddsdikning är inte tillståndspliktig, men ska i förväg anmälas till Skogsstyrelsen. Dikesrensning är i vissa fall också anmälningspliktig. Skogsstyrelsen rekommenderar att anmälan alltid görs så att eventuella brott mot hänsynsparagrafer i miljöbalken

¹²⁴ Hånell, B. 2008. *Handledning i bonitering. Del 4. Torvmark: praktiska anvisningar*. Skogsstyrelsen. 16 s.

¹²⁵ Skogsstyrelsen. 2009. *Dikesrensningens regelverk*. Skogsstyrelsen. *Meddelande 1–2009*.

¹²⁶ Svensk författningssamling, 1998. *Förordning (1998:1388) om vattenverksamhet m.m.*

och skogsvårdslagen kan undvikas.¹²⁷

Vid markavvattning (nydikning) är syftet att långvarigt sänka vattenhalten eller grundvattenytan, medan skyddsdikning enbart syftar till att föra bort det vattenöverskott som tillkommer under kalhyggesfasen och som kan försvåra föryngringens etablering. Skyddsdiken ska inte underhållas. Dikesrensning syftar till att återställa ett befintligt dikessystems ursprungliga dränerande kapacitet.

Olika typer av diken bidrar till avvattningen på olika sätt. Några viktiga grundtyper är *avskärningsdiken*, *tegdiken* (dräneringsdiken) och *avloppsdiken* (uppsamlingsdiken).¹²⁸

- *Avskärningsdikena* syftar inte i första hand till att sänka grundvattenytan, utan till att avskära och leda bort ytliga påflöden av grundvatten, riktade mot nedanförliggande markområden.
- *Tegdiken* läggs däremot i det försumpade och oftast flacka området där grundvattenytan behöver sänkas.
- *Avloppsdiken* ligger i terrängens lägsta delar och ska ha kapacitet att ta emot och leda bort avrinnande vatten.

Effekter på näringsomsättning

Förutsättningarna för växtproduktion skiljer sig på ett principiellt sätt mellan mineraljordar och torvjordar. Rena torvjordar saknar mineralpartiklar och därmed också de stora förråd av mineralbundna växtnäringsämnen som kan frigöras genom långsam kemisk och biokemisk vittring. Däremot finns det ett stort totalförråd av kväve i torvjord, eftersom hela jorden består av humifierat organiskt material, vilket generellt innehåller någon till några viktsprocent kväve.

Den näringsfattigaste mossetorven innehåller vanligen mindre än en procent kväve, medan de starrdominerade kärrens torv kan innehålla 2–3 procent.¹²⁹ Mineraliseringen av kväve från ett torvmaterial är dock inte kopplat till totalmängderna, utan till torvens *halt* av kväve, samt till kolstrukturernas nedbrytbarhet. Skillnaderna i kvävehalt mellan en, relativt sett, ”kvävefattig” och en ”kväverik” torv, har därför stor betydelse för torvjordens utbud av växttillgängligt kväve.

Dikesdräneringen syresätter det organiska jordlagret ner till större djup än tidigare vilket ökar nedbrytning och kvävemineralisering. I torvmaterial med låga kvävehalter ökar dock kvävetillgången för vegetationen ytterst lite och långsamt och blir liksom på mineraljordarna fortsatt starkt tillväxtbegränsande.

Vegetationens tillgång på fosfor och kalium förbättras inte efter dikning av djup torvjord. När träd tillväxten ökar på grund av större kvävetillgång och

¹²⁷ Skogsstyrelsen. 2013. Skogsstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om anmälnings-skyldighet för samråd enligt 12 kap. 6 § miljöbalken avseende skogsbruksåtgärder. *Skogsstyrelsens författningssamling*. SKSFS 2013:3.

¹²⁸ Gustafsson, J. 1980. Dikningsteknik. I: Skogsproduktion på torvmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. *Redogörelse* nr 3–1980.

¹²⁹ Gustafsson, J. 1980. Dikningsteknik. I: Skogsproduktion på torvmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. *Redogörelse* nr 3–1980.

biomassa successivt ackumuleras blir därför fosfor eller kalium ofta mer tillväxtbegränsande än kväve. I det avseendet är det liten skillnad mellan högproduktiva och lågproduktiva djupa torvjordar (tabell MV5).

Tabell MV5 Torvens kemiska egenskaper i skiktet 0–20 cm och skogens löpande tillväxt i 45- till 75-åriga bestånd på dikad djup torvmark, samtliga belägna inom samma större torvmarksområde (Jägarmossen, Uppland). Indelningen i de bördighetsrelaterade torvmarkstyperna I till V baseras på vegetationens sammansättning, där I motsvarar ”Fattigristyp” och IV–V motsvarar ”Lågörstyper”. I–II är talldominerade och III–V grandominerade. Tabellen ger medelvärden för 1–3 bestånd per torvmarkstyp. ts = torrsubstans. Data från Holmen, 1964.¹³⁰

	Torvmarkstyp (Fattigristyp (I) ----- Örttyp (IV–V))				
	I	II	III	IV	V
Torvens pH	3,2	3,4	3,7	4,3	4,5
Totalhalt:					
N, % av ts	0,98	1,54	1,73	2,32	3,14
P, % av ts	0,05	0,06	0,06	0,06	0,10
K, % av ts	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04
Ca, % av ts ^{a)}	0,28	0,44	0,94	2,04	2,70
Lättillgängligt ^{b)} :					
P, kg/ha	11	16	16	12	10
K, kg/ha	36	42	46	33	45
Löpande tillväxt,					
m ³ sk/ha, år	3,5	7,7	9,7	10,1	11,7
Volym, m ³ sk/ha	66	156	259	289	284

a) Jägarmossens bördiga kärrtorv (IV–V) har Ca-halter som är högre än genomsnittet för liknande torvtyp. Området är sannolikt något påverkat av kalkhaltiga glaciala avlagringar med ursprung i Bottenhavets kambrosiluriska berggrund.

b) Lättilgängligt (lättillgängligt) förråd av P och K skattat genom AL-extraktion (ammoniumlaktat och ättiksyra).

Det faktum att torvens P- och K-halter är ungefär lika låga på både låg- och högproduktiva torvjordar i tabell MV5, ska alltså inte tolkas som att tillgången på dessa näringsämnen är betydelslös för produktionen. Tolkningen är istället att allt mobiliserbart fosfor och kalium på de högproduktiva ståndorterna har överförts från torven till den stora trädbiomassans aktiva vävnader.

Dessa förhållanden är typiska för beskogade djupa torvmarker, och ger en bild av att ekosystemets tillgängliga resurser av fosfor och kalium används mycket effektivt. Akuta bristsymptom kan ibland uppträda. Trädbestånd på grunda torvmarker uppvisar sällan tecken på fosfor- eller kaliumbrist.

Effekter på hydrologi, marktemperatur och torvdensitet

I låghumifierad torv är en sänkning av grundvattenytan med några decimeter normalt tillräckligt för att dränera och syresätta rotmiljön.

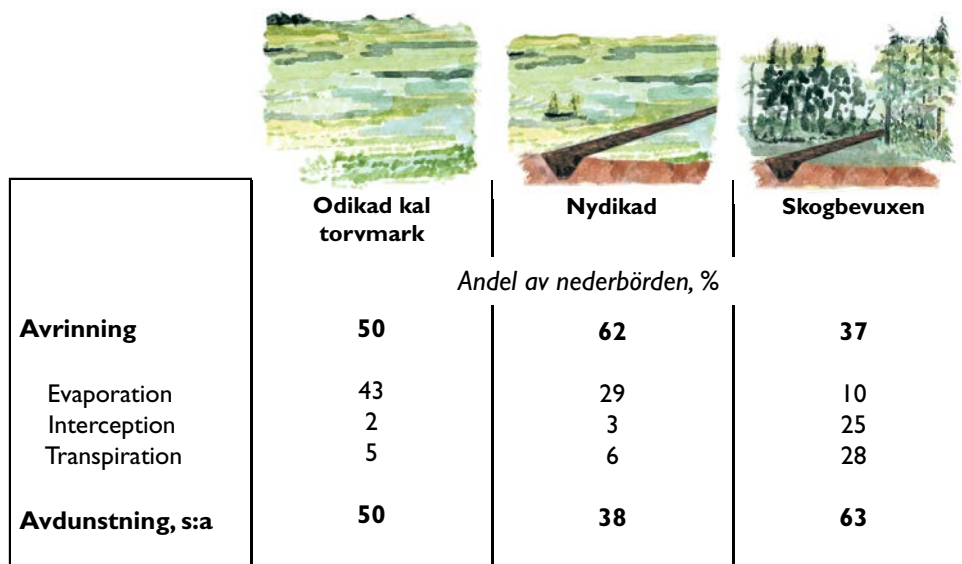
¹³⁰ Holmen, H. 1964. Forest Ecological Studies on Drained Peat Land in the Province of Uppland, Sweden. Parts I–III. *Studia Forestalia Suecica*, no. 16.

Höghumifierad torv är däremot svår att dränera med diken eftersom den är ”finkornig” och vattenhållande, och har låg vattenledningsförmåga. Dikena har då liten dräneringseffekt. Deras främsta funktion blir istället att förhindra vattentillförsel från sidorna och att snabbt avleda ytligt överskottsvatten vid snösmältning och kraftiga regn. I denna situation utgör vegetationens transpiration det viktigaste ”dräneringsverktyget”.

Avrinningen minskar på sikt

Den totala årsavrinningen ökar under året eller åren närmast efter dikning, men minskar därefter till en nivå lägre än före dikning (figur MV14). Det uppväxande trädbeståndet transpirerar stora mängder vatten genom klyvöppningarna. Dessutom medför trädens så kallade interception¹³¹ att mycket av nederbörden avdunstar till luften utan att överhuvudtaget ha kommit ner till marken.^{132,133}

Sammantaget blir dessa avdunstningsförluster större än totala avdunstningen från markvegetation och fuktig markyta i det odikade tillståndet. Ovanstående generalisering gäller dock inte om det dikade myrområdet förblir kalmark.



Figur MV14 Exempel på förändringar i vattenbalansen efter dikning och beskogning. Medeltal av värden från Braekke, 1970¹³⁴ och Heikurainen, 1972.¹³⁵ Illustration Bo Persson.

Oftast – men inte alltid – lägre högvattenflöden

Avrinningens fördelning över året kan grovt beskrivas med storleken av högvatten- respektive lågvattenflöden. Flera undersökningar har visat att högvattenflödena ofta blir något lägre och lågvattenflödena något högre efter dik-

¹³¹ Interception betecknar den del av nederbörden som fångas upp i träd Kronorna och avdunstar därifrån utan att komma ner till marken.

¹³² Grip, H. & Rohde, A. 1988. *Vattnets väg från regn till bäck*. Hallgren & Fallgren Studieförlag.

¹³³ Lundin, L. 1995. Vattnet i skogsmarken. Skogsbrukets effekter på hydrologi och vattenkemi. *Skog och Forskning* 1995, s. 8–16.

¹³⁴ Braekke, F. 1970. Mygroftning for skogsproduksjon. *Tidskr. for Skogsbruk* 78, 227–238.

¹³⁵ Heikurainen, L. 1972. Hydrological changes caused by forest drainage. *International Association of Hydrological Science (IASH-AISH), Publ. 105*, s. 493–499.

ning. Det sistnämnda kan möjligen verka förvånande men hänger samman med att avloppsdikena sänker ”avrinningströsklar”. Detta gör att avrinningen både kan starta tidigare och vara mer uthållig över tiden.

Det finns dock också några studier som visar att i vissa situationer kan högvattenflödena tvärtom bli större efter dikning. Detta kan inträffa då vattentillförseln är så stor att den snabbt överstiger den dikade torvmarkens magasineringsskapacitet. Efter ovanligt snabb avsmältning av ett mäktigt snötäcke, eller efter mycket häftiga och ihållande regn, kan den dikade markens effektiva avledningssystem göra så att högvattenflödet tillfälligt blir högre än från odikad mark.¹³⁶

Risken för översvämningar i vattensystemen beror inte bara på avrinningsmönstret för den enskilda torvmarken utan också på hur dikade och odikade torvmarker är fördelade inom ett avrinningsområde. Om enbart torvmarker belägna i de övre (yttre) delarna av ett avrinningsområde dikas ökar risken för mycket höga vårflöden i vattensystemets nedre delar. Detta beror på att dikning generellt gör så att avrinning i samband med snösmältning startar tidigare på våren, och därför kommer maximiflödena för avrinningsområdets övre och nedre delar att sammanfalla i tiden. Om däremot de dikade områdena huvudsakligen är belägna i avrinningsområdets nedre delar, eller är jämnt fördelade, kommer översvämningensrisken att bli mindre jämfört med ett helt odikat avrinningsområde.¹³⁵

Torven blir varmare i ytan men kallare på djupet

Dikningens effekter på markens temperaturförhållanden är komplicerade.¹³⁷ Huvuddragen är dock att yttorven under vegetationsperioden blir varmare, medan djupare skikt blir kallare. På grund av lägre vattenhalt i det dränerade ytskiktet får en dikad torv både lägre värmelagringskapacitet och värmeledningsförmåga. Kortvågsinstrålningen dagtid under vår/sommar höjer yttorvens temperatur både snabbare och mera efter dikning, men omvänt sänker långvågsutstrålningen temperaturen både snabbare och mer nattetid och under höstens/förvinterns avkylning. Yttorvens temperaturvariationer under dygnet och över året blir alltså större. Lägre nattemperaturer medför att frostrisken i marknära luftskikt ökar efter dikning. Det gamla talesättet inom jordbruket att ”dika bort frosten” är således inte alls giltigt i detta fall.

Det dränerade ytskiktet får starkare isolerande egenskaper efter dräneringen. Detta leder till mindre uppvärmning av torvens djupare skikt under sommarhalvåret. Vad gäller tjäldjupet kan detta öka såväl som minska beroende på faktorer såsom torvens humifieringsgrad, torvdjup och dräneringsdjup.

När den dikade marken blivit beskogad förändras in- och utstrålningen radikalt på grund av beståndet precis som på fastmark. Temperaturvariationer i markens ytskikt och i marklära luftlager minskar.

Markytan sjunker

Yttorven får efter dikning så småningom större skrymdensitet¹³⁸ och marky-

¹³⁶ Paavilainen, E. & Päiväven, J. 1995. *Peatland Forestry – ecology and principles*. Springer Verlag. 248 s.

¹³⁷ Paavilainen, E. & Päiväven, J. 1995. *Peatland Forestry – ecology and principles*. Springer Verlag. 248 s.

¹³⁸ Skrymdensitet = volymvikt = massa av torrt material / jordvolym; enhet: kg/dm³.

tan sjunker. Upphöjda rotben och stubbar är tydliga tecken på att detta skett efter trädens etablering. Dessa förändringar är dock endast till liten del orsakade av ökad nedbrytning av torven.

Den viktigaste orsaken är istället att den från början luckra torven sjunker ihop när vattnet dräneras från porerna. Trycket från det uppväxande trädbeståndet bidrar till att pressa samman det dränerade ytskiktet.

En viktig konsekvens av markytans sänkning är att dikesdjupet minskar i samma mån eller mer. Dikesbotten sjunker nämligen inte utan snarare höjs något på grund av ansamling av eroderat material.

Dikesrensning är således en nödvändig underhållsåtgärd. Eftersom beståndets transpiration successivt övertar dikenas roll är dikessystemets försämrade dräneringseffekt dock inte alltid så uppenbar förrän trädbeståndet slutavverkas.

Effekter på vattenkvalitet

Dikningens effekter på vattenkvaliteten^{139,140,141} är inte entydigt positiva eller negativa. Men i den mån påverkan sker, så kan det ha stor betydelse eftersom dikesvattnet ofta ansluter till små källflöden i de naturliga vattensystemen. Dikesvattnet kan därför utgöra en stor andel av vattnet i många småbäckar.

Markstörningen kan ge grumligt vatten

Avrinningsvattnet från opåverkade våtmarker innehåller naturligt högre halter av löst organiskt material än fastmarksvatten. Dikning kan förstärka detta. Sådana effekter uppstår framför allt i samband med dikesgrävningen och avvattningsfasen samt under närmast följande högvattenperioder. Mängderna av både uppslammat fast material och vattenlösligt organiskt material kan då öka flerfaldigt. Detta försämrar ljusförhållandena i vattnet och om bäckbotten täcks av ett lager sedimenterade partiklar kan en stor del av den befintliga bottenfaunan slås ut, med följd effekter för andra arter. I sjöar har det organiska materialet en syrgastärande effekt.

Efter det att störningen i samband med dikesgrävning upphört sker en viss stabilisering av dikessidor, men känsligheten för erosion vid högvatten är stor ända tills materialet blir bättre fixerat av rötter och skyddat av ett vegetationstäck. Uppslammade mineralpartiklar har mer allvarliga negativa effekter på vattendragen än organiska partiklar. Dikning i finmo- och mjälasediment bör helt undvikas eftersom dessa jordar är extremt erosionsbenägna.

Dikesgrävning bör helst utföras vid lågt grundvattenstånd i marken. Om terrängens fallförhållanden tillåter kan problemet med suspenderat material i avrinnande vatten mildras genom olika dikestekniska konstruktioner. Sedimentationsbassänger kan anläggas. Ibland kan man låta avloppsdiket sluta ”blint”, innan det når ett naturligt vattendrag, och låta vattnet svämma ut och silas genom vegetationen (s.k. översilning). En liknande teknik är att även längre upp från avloppsdikets utlopp göra ett avbrott på diket när det når en sänka i terrängen och nedanför fånga upp vattnet med ett så kallat gaffeldike.

¹³⁹ Simonssons, P. 1987. Skogs- och myrdikningens miljökonsekvenser. Naturvårdsverket. Rapport 3270.

¹⁴⁰ Lundin, L. 1995. Vattnet i skogsmarken. Skogsbrukets effekter på hydrologi och vattenkemi. *Skog och Forskning* 1995, s. 8–16.

¹⁴¹ KSLA. 2007. How to estimate N and P losses from forestry in northern Sweden. *Kungl. Skogs- och Lantbruksakad. Tidskr.* 2–2007.

Grävningsarbetet kan läggas upp så att den avslutande dikessträckan ner mot utloppet i befintligt vattensystem grävs ut allra sist. Detta förkortar tidsperioden med mycket stark störning i nedanförliggande vatten. Uttransport av suspenderat material under grävningsarbetet kan i någon mån också minskas genom tillfällig tät risläggning nedströms aktuell grävningssträcka.

Dikesrensning

Dikesrensningen är en nödvändig åtgärd för att upprätthålla produktionsförmågan på dikad mark.^{142,143,144} Enligt Riksskogstaxeringen bedömdes kring senaste sekelskiftet ca 200 000 hektar utav drygt en miljon hektar dikade skogsproduktiva skogsmarker ha ej fungerande diken¹⁴⁵.

Den nya störningen medför risk för att erosion och uttransport av uppslammat material återigen kan påverka vattendrag negativt. Därför bör dikesslänter med sin täckande vegetation, så långt möjligt, hållas intakta.

Vattnet får ofta högre pH

Avrinningsvattnet från naturtorvmarker har normalt lägre pH-värden än vatten från omgivande fastmarker. Dikningen kan orsaka såväl höjningar som sänkningar, dels beroende på myrtyp och torvdjup, och dels beroende på det beaktade tidsperspektivet. pH-värdena i det mottagande vattensystemet sjunker vanligen något under diknings- och avvattningsfasen. Därefter blir dock effekten oftast den omvända, d.v.s. dikesvattnet får ett högre pH.^{146,147,148}

Den spridda föreställningen att dikning generellt försurar vattensystemen stöds alltså inte av gjorda studier. Det faktum att de flesta dikningar i Sverige har gjorts på våtmarker med tämligen grunda torvlager är en viktig förklaring till den positiva pH-effekten. Grundvatten med ursprung från mineraljord har högre pH, större alkalinitet och lägre halter löst organiskt material, än grundvatten med ursprung från organisk jord.

Diken som skär igenom torvskiktet och ner i mineraljord kommer därför att ge bättre vattenkvalitet. Utflödet i diket av sådant minerogent vatten sker på grund av grundvattnets övertryck.

Om den underliggande mineraljorden är grovkornig och därför har hög vattenledningsförmåga förstärks utströmningen än mer. De genomskärande dikenna ”punkterar” alltså torvlagret och avlänkar det uppströmmande grundvattnet innan dess vattenkvalitet hunnit försämrats genom kontakt med torven.

¹⁴² Ahti, E. & Päivänen, J. 1997. Responses of stand growth and water table level to maintenance of ditch networks within forest drainage areas. In: Trettin, C., Jurgensen, M., Grigal, M., Gale, M. & Jeglum, J. (eds.). *Northern Forested Wetlands. Ecology and Management*. Lewis Publishers.

¹⁴³ Hökkä, H., Alenius, V. & Salminen, H. 2000. Predicting the need for ditch network maintenance in drained peatland sites in Finland. *Suo* 51, s. 1–10. Helsingfors.

¹⁴⁴ Lauhanen, R. & Ahti, E. 2001. Effects of maintaining ditch networks on the development of Scots pine stands. *Suo* 52, s. 29–38. Helsingfors.

¹⁴⁵ Hånell, B. 2004. Arealer för skogsgödsling med träaska och torvaska på organogena jordar i Sverige. *Värmeforsk. Miljöriktig användning av askor* 872.

¹⁴⁶ Ramberg, L. 1981. Increase in stream pH after forest drainage. *Ambio* 10, no 1.

¹⁴⁷ Bergquist, B., Lundin, L. & Andersson, A. 1984. Hydrologiska och limnologiska konsekvenser av skogs- och myrdikning. Siksjöbäcksområdet 1979–1983. Uppsala universitet. Limnologiska institutionen. *Rapport LIU* 1984 B:4.

¹⁴⁸ Lundin, L. 1995. Vattnet i skogsmarken. Skogsbrukets effekter på hydrologi och vattenkemi. *Skog och Forskning* 1995, s. 8–16.

Äldre dikade områden, där bestånd etablerats och dikeskanter stabiliserats och täckts av vegetation, ger i flera avseenden allt bättre vattenkvalitet. Exempelvis fann Heikurainen m.fl.¹⁴⁹ vid studier av ett stort antal 20–40 år gamla odikade och dikade torvmarker i Finland att pH i medeltal var högre, halten organiskt material lägre och totalkvävehalten oförändrad i avrinningsvatten från dikad jämfört med från odikad mark.

Risken för nitratutlakning

Det kan bli intensiv nitratbildning efter dränering av mycket kväverika torvslag, såsom rikkärr av olika slag. Precis som på näringsrika fastmarker, är ett vitalt trädbestånd med stort kvävebehov en avgörande faktor för att minska risken för nitratutlakning. Liksom på fastmark, återigen, är kalhyggesperioden den kritiska fasen. Torvmarkernas läge, i nära anslutning till vattendrag, tillkommer som faktor i riskbedömningen.

Huvuddelen av de för skogsbruk dikade torvmarkerna hör inte till denna riskgrupp. Det är dock inte särskilt väl undersökt hur stor nitratutlakningen blir från de ansenliga arealer av äldre dikade medelgoda kärr, vilka nu är mogna för beståndavveckling och därefter dikesrensning och återbeskogning. Denna osäkerhet gäller särskilt södra Sverige, där högre marktemperaturer gynnar såväl kväveminalisering som nitrifikationsprocessen, och där dessutom kvävenedfallet varit stort. Ytterligare markstörningar, såsom exempelvis de stormfällningar som skedde under stormen Gudrun i januari 2005, ökar risken för obalans mellan nitratbildning och vegetationens nitratupptag.

Utfällning och grumling av järnockra

Ett allmänt och naturligt fenomen där grundvatten strömmar upp mot markytan och får kontakt med luftens syrgas är så kallad järnockra-bildning. Grundvattnet från mineraljordar innehåller ofta höga halter reducerade järnjoner vilka av bakterier oxideras till olösliga järnoxider. Processen är försurande.

De rostbruna utfällningarna förekommer i såväl åkermarkernas diken som i diken från dråg och kärr i skogen. Kulturlandskapets många diken har synliggjort processen och fenomenet. I fall med extrem järnockrabildning kan vattengrumling ske¹⁵⁰ vilket innebär en störning för vattenorganismerna.

Oxidation av sulfidrika sediment – ett specialfall

Skogsdikningens övervägande positiva effekt på pH, som beskrivits ovan, gäller inte alls för ett viktigt specialfall, nämligen vid utdikning av järnsulfidrika avlagringar.

Finkorniga sulfidhaltiga sediment kan framför allt finnas i de delar av Sverige som varit täckta av ett saltvattenhav under någon period efter istiden. De förekommer utmed alla nuvarande kuster, särskilt längs norra Norrlands flacka kustland.

¹⁴⁹ Heikurainen, L., Kenttämies, K. & Laine, J. 1978. The environmental effects of forest drainage. *Suo* 29, s. 49–58. Helsingfors.

¹⁵⁰ Svensson, M. 2006. Vattenkvaliteten i Fredstorpsbäcken – dikad bäck på fastigheten Rämningstorp i Skara kommun. SLU, inst. för skogens ekologi och skötsel. *Examensarbete* 2007:4.

Dessutom i den mellansvenska sänkan, med störst utbredning runt Mälaren och i övriga Uppland och Södermanland.¹⁵¹

Svavelinnehållet kan i extremfall uppgå till mer än en procent av mineraljordens torrsvikt. Dessa finkorniga och näringsrika sediment har vanligtvis utvecklats till topogena kärrbildningar och huvuddelen har uppodlats till jordbruksmark. I samband med nedläggning av jordbruksmark kan de ha beskogsats genom spontan igenväxning eller trädplantering. Andra kärr av denna typ kan ha undgått uppodling för att i ett senare skede istället skogsdikas. Kärrtorven som bildats ovanpå det sulfidsvavelrika sedimentet är ofta också mycket svavelrik, särskilt i bottenorven.

Vid dränering och tillströmning av syrgas omvandlas sulfidsvavlet till för-surande svavelsyra.¹⁵² Jord och avrinnande vatten kan få pH-värden lägre än 3. Järnet i den upplösta järnsulfiden omvandlas till järnockra. Halterna av löst aluminium kan också bli mycket höga under denna försurningsprocess.

Det finns ett antal dokumenterade och uppmärksammade fall i Skandinavien där dräneringsföretag på sådana jordar fått mycket allvarliga miljöeffekter, bland annat på fisk.^{153,154,155} Dräneringsvattnet skadeverkningarna hänger samman med den extrema surheten, skadligt höga halter av löst aluminium, samt utfällningar av aluminium på bland annat fiskars gälar. Det är naturligtvis mycket viktigt att vid nutida dikesrensningar vara medveten om var sådana marktyper kan finnas.

Dikning och klimatpåverkan

Enligt IPCC¹⁵⁶ (Intergovernmental Panel on Climate Changes) pågår en global uppvärmning på grund av förändringar i jordens strålningsbalans. Strålningsbalansen påverkas av atmosfärens innehåll av så kallade växthusgaser. Koncentrationerna av dessa gaser i atmosfären har ökat.

Det är vidare, enligt IPCC, mycket sannolikt att huvuddelen av den observerade uppvärmningseffekten har orsakats genom förbränning av fossila bränslen, men delvis även genom förändringar i människans markanvändning. Det är nämligen så att flertalet av växthusgaserna både produceras och konsumeras genom motriktade naturliga processer i biosfären¹⁵⁷. Förändringar i markanvändning kan påverka dessa naturliga processer och orsaka förskjutningar i ”jämvikterna” mellan biosfär och atmosfär.

¹⁵¹ Statens energiverk, 1985. Förbränning av torvbränslen: hur kan miljökraven tillgodoses? *Statens energiverk*. 1985:2.

¹⁵² $\text{FeS (järnsulfid)} + 4,5 \text{ O}_2 + 5 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Fe(OH)}_3 \text{ (järnhydroxid)} + 2 \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ (svavelsyra)}$

¹⁵³ Dahl, K. 1923. Massedöd blandt ørret ved forgiftning med avløbsvand fra myrer. *Norsk Jaeger og Fisker*. Hefte 2, s. 1–5.

¹⁵⁴ Christensen, W. 1941. Moseafvanding og svovelsyreforgiftning i vandløb. *Ferskvandsfiskeribladet* 39, s. 67–78.

¹⁵⁵ Magnusson, T. 1982. Skogs- och myrdikningens inverkan på försurningen av ytvatten – en litteraturstudie. Naturvårdsverket. *Rapport* 1626.

¹⁵⁶ IPCC. 2014. *Climate change 2014: Synthesis Report. Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Pachauri, R.K. & Meyer, L. IPCC, Geneva, Switzerland).

¹⁵⁷ Med biosfären menas den mycket tunna kontaktzonen mellan jordskorpan och atmosfären, d.v.s. där de levande organismerna som är beroende av mineralämnen, vatten och syrgas, kan existera. Det vi kallar marken eller jorden (ner till någon eller några meters djup), är en mycket viktig del av biosfären, särskilt när det gäller de mikrobiella processer som kan bilda eller bryta ner växthusgaser.

Skogsbruk är en typ av markanvändning. En stor del av den ökade emission av växthusgaser som IPCC tillskriver markanvändningen ”skogsbruk”, kan härledas till skogsavverkning som leder till permanent avskogning.

Beroende på hur skogsbruk bedrivs, kan dock även ett uthålligt skogsbruk påverka flödet av växthusgaser mellan atmosfär och biosfär. Bland de skogsbruksåtgärder som tillämpats i Sverige finns det anledning att skärskåda hur torvmarksdikningen påverkar växthuseffekten. Torvbildande våtmarker har stor utbredning på nordliga latituder och det är väl känt att dessa ekosystem är betydelsefulla för bland annat den globala kolbalansen.

Våtmarkers påverkan på växthuseffekten, samt de förändringar som uppstår efter dikning^{158,159,160}, berör växthusgaserna koldioxid (CO₂), metan (CH₄) och lustgas (N₂O):

- CO₂ är helt dominerande i gasutbytet mellan mark och atmosfär. Organiskt material byggs upp av kol från atmosfärens CO₂ och nedbrytningens slutprodukt är CO₂ som avges tillbaka till atmosfären. Torvbildande våtmarker har en liten obalans i dessa två motriktade flöden vilket har gjort att torv har ackumulerats över tiden.
- CH₄ bildas vid nedbrytning av organiskt material vid fullständig syrgasbrist vilket oftast råder under grundvattenytan i en torvmark. Produktion och emission av CH₄ jämfört med CO₂, är mycket lägre men dess växthuseffekt per gasmolekyl är i gengäld ca 25 ggr större än för CO₂.
- N₂O bildas i torvmarker främst i samband med denitrifikationsprocessen (se ”Denitrifikation”). Denitrifikationsbakteriernas bildning av N₂O förutsätter att kväve först mineraliserats från kvävehaltigt organiskt material och därefter omvandlats till nitrat av nitrifikationsbakterier. Produktion och emission av N₂O från kvävefattiga organiska material (hög C/N-kvot) är normalt extremt låg, men kan vara avsevärt högre från kväverika material (låg C/N-kvot). N₂O-molekylens växthuseffekt är stor, ca 300 ggr större än för CO₂.

Frågan om hur odikade och dikade våtmarker skiljer sig vad gäller den sammanlagda klimatpåverkan är komplex, eftersom grundvattensänkningen kan förstärka vissa processer men försvagar andra. För att göra bedömningen krävs att man vet nettoavgivningen eller nettoupptaget av alla gaser som passerar markytan, samt också det upptag av CO₂ som vid fotosyntesen binds in i ett eventuellt trädbestånd. Dessa mätningar är svåra att göra och den naturliga variationen är stor.

¹⁵⁸ Kasimir Klemedtsson, Å., Nilsson, M., Sundh, I. & Svensson, B. 2000. Växthusgasflöden från myrar och organogena jordar. Naturvårdsverket. *Rapport* 5132.

¹⁵⁹ von Arnold, K., Weslien, P., Nilsson, M., Svensson, B.H. & Klemedtsson, L. 2005. Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from drained coniferous forests on organic soils. *For. Ecol. Manage.* 210, 239–254.

¹⁶⁰ Ernfors, M., von Arnold, K., Stendahl, J., Nordin, A., Giesler, R., Högberg, M. & Högberg, P. 2007. Nitrous oxide emissions from drained organic forest soils – an up-scaling based on C:N ratios. *Biogeochemistry* 84, s. 219–231.

Senare års fältforskning har dock visat att de dikade och beskogade torvmarkerna, jämfört med odikade och ej beskogade, typiskt uppvisar:

- något högre emissioner av koldioxid
- mycket lägre emissioner av metan
- högre emissioner av lustgas från torvmarkstyper med kväverik torv (C/N-kvot < 25).

Överslagsberäkningar av den sammantagna klimatpåverkan från totala arealen av dikade och skogsproduktiva torvmarker (<30 cm torv) och våtmarker (<30 cm torv) i Sverige, har gjorts.¹⁶¹ Alla tre växthusgaserna har beaktats, och även inbindningen av CO₂ i de växande bestånden. Skattningarna har gjorts på två olika sätt. Den ena beräkningsmodellen indikerar att dessa marktyper för närvarande är betydande nettosänkor för växthusgaser, d.v.s. inte bidrar till utan motverkar växthuseffekten. Den andra beräkningsmodellen pekar mot att de är svagt bidragande till växthuseffekten.

¹⁶¹ von Arnold, K., Hånell, B., Stendahl, J. & Klemedtsson, L. 2005. Greenhouse gas fluxes from drained organic forestland in Sweden. *Scand. J. For. Res.* 20, s. 400–411.

Skogsgödsling

Insikterna om vilka näringsämnen som begränsar skogsproduktionen i svenska skogar växte fram under 1900-talets första hälft. Huvuddragen var tydliga; kväve är det primärt produktionsbegränsande ämnet på nästan alla fastmarker (mineraljordar), medan fosfor och kalium, ofta tillsammans med kväve, kan begränsa produktionen på torvmarker.

Experimentell fältforskning under 1950- och 1960-talen gav underlag för mer detaljerade prognoser för kvävet's produktionseffekter på fastmark och gödslingsreaktionens varaktighet.

Produktionsgödsling med kväve på fastmark^{162,163}

Produktionsgödsling med kväve har i Sverige tillämpats i det praktiska skogsbruket sedan tidigt 1960-tal.^{164,165} Denna typ av skogsgödsling kulminerade 1976 med en gödslad areal av 180 000 ha. Under 1990-talet minskade den årliga gödslingsarealen till ca 20 000–30 000 ha, och låg på ungefär denna nivå i ett decennium framåt. Nedgångstrenden sammanföll med att skogsbrukets miljöfrågor alltmer stod i fokus. Från 2005 skedde en markant uppgång som nådde 80 000 ha år 2010, varefter årliga gödslingsareal återigen gått ner till drygt 20 000 ha (2013).¹⁶⁶

Traditionell produktionsgödsling på fastmark görs med ca 150 kg kväve per hektar. Den förväntade totala tillväxteffekten brukar anges till 10–20 skogskubikmeter per hektar, fördelad inom en effektperiod på ca 7–11 år. Ett vanligt utförande har varit att göra en engångsgödsling mot slutet av omloppstiden. Gödslingsprogram med tidigare gödslingsstart och därefter upprepade gödslingar ungefär vart tionde år, har dock blivit allt vanligare.

Under skogsgödslingsepokens början, på 1960-talet, användes mest *urea* (faktaruta 4). I början av 1970-talet övergick skogsbruket till *ammoniumnitrat* (AN) eftersom fältförsök då hade visat att tillväxteffekten med detta gödselmedel kunde bli upp till 30 % större per tillsatt mängd kväve. Vid mitten av 1980-talet övergick man alltmer till *kalkammonsalpeter* (KAS), d.v.s. ammoniumnitrat med kalkinblandning. Bytet av gödselmedel var en reaktion på oron för mark- och vattenförsurning och särskilt diskussioner om kvävegödslingens bidrag till detta.

¹⁶² Skogsstyrelsen. 2007. Kvävegödsling av skogsmark. *Meddelande 2–2007*.

¹⁶³ Skogsstyrelsen. 2014. Skogsstyrelsens föreskrifter och allmänna råd till skogsvårdslagen. *Skogsstyrelsens författningssamling*. SKSFS 2011:7/2014:7.

¹⁶⁴ Tamm, C.-O. & Carbonnier, C. 1961. Växtnäringen som skoglig produktionsfaktor. *Kungliga Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift* 1–2.

¹⁶⁵ Lundmark, J.-E. 1988. *Skogsmarkens ekologi. Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 2 – Tillämpning*. Skogsstyrelsen.

¹⁶⁶ Skogsstyrelsen. 2014. *Skogsstatistisk Årsbok 2014*.

Faktaruta 4

Ammoniumnitrat, AN (NH_4NO_3) innehåller 34,5 % kväve. Det består till lika delar av ammonium och nitrat. Gödselmedlets pH-reaktion är neutral, d.v.s. det är varken basverkande eller försurande.

Kalkammonsalpeter, KAS ($\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$) innehåller 26–28 % kväve. Det är en variant av ammoniumnitrat där 18–20 % kalciumkarbonat (kalksten) eller magnesiumhaltig kalciumkarbonat (dolomitkalksten) tillsatts. Kalkstenen ger gödselmedlet en långsamverkande basisk effekt.

Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) innehåller 46 % kväve i form av urinämne. När urea löser sig i humuslagrets sura markvatten bildas ammoniumkväve*. Vid denna reaktion neutraliseras vätejoner, d.v.s. gödselmedlet har en initial basisk effekt. Effekten motverkas senare av ”biologisk försurning”, kopplad till näringsupptagningen.

* Vid ureagödsling finns risk för betydande initiala förluster av kväve till luften, i form av ammoniak. Torrt och varmt väder efter spridningen ökar den risken.

Kvävegödslingens effekter på mark, vatten och vegetation

Kvävegödslingens miljökonsekvenser är resultatet av många komplicerade interaktioner mellan växter, mikroorganismer och kemiska processer i marken.^{167,168,169,170} Typ och giva av gödselmedel, gödslingens tidpunkt och utförande, beståndets egenskaper samt inte minst objektets mark- och hydrologiska förhållanden, är alla faktorer av betydelse för de effekter som åtgärden kan få. De samlade erfarenheterna är redovisade i miljökonsekvensbeskrivningen för skogsgödsling.¹⁶⁹ Huvuddragen är följande:

Mark

- Samtliga kvävegödselmedel tycks ge upp till några tiondels enheter högre pH-värde i humuslagret, jämfört med kontrolltytor. I underliggande mineraljord kan ibland pH-värdet tvärtom sjunka någon tiondels enhet. Ovanstående gäller även vid upprepad kvävegödsling. Slutsatsen är att skogsgödsling under beståndsfasen normalt har små effekter på markens pH-värde.

¹⁶⁷ Nõmmik, H. & Wiklander, G. 1983. Syra/bas verkan hos kvävegödselmedel använda vid skogsgödsling. Naturvårdsverket. *Rapport PM 1657*.

¹⁶⁸ Westling, O. & Nohrstedt, H.-Ö. 1995. *Miljökonsekvensbeskrivning av STORA SKOGS gödslingsprogram, Del 2, bedömning*. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning, B 1219, Aneboda.

¹⁶⁹ Högbom, L. & Jacobson, S. 2002. Kväve 2002 – en konsekvensbeskrivning av skogsgödsling i Sverige. Skogforsk. *Redogörelse* nr 6–2002.

¹⁷⁰ Högberg, P., Larsson, S., Lundmark, T., Moen, J., Nilsson, U. & Nordin, A. 2014. Effekter av kvävegödsling på skogsmark. Kunskapssammanställning utförd av SLU på begäran av Skogsstyrelsen. Skogsstyrelsen. *Rapport 1*.

- Markens, och i synnerhet humuslagrets, förråd av utbytbart kalcium och magnesium är oförändrat eller ökar efter gödsling. Ökningen är tydligast efter gödsling med kalkammonsalpeter. Förråden av utbytbart kalium och fosfor tenderar istället att minska efter upprepade kvävegödslingar. Vid intensiv kvävegödsling med täta intervall sker en tydlig omfördelning av baskatjoner från mineraljord till humuslager. I dessa fall kan basmättnadsgraden och pH-värdet i mineraljorden sänkas påtagligt.
- Endast ca 20–30 % av det tillförda kvävet tas upp i träden. Huvuddelen fastläggs i marken. Upprepad kvävegödsling har visats sänka C/N-kvoten långsamt i markens organiska material. Tendensen är starkast i initialt lågproduktiv mark.
- Effekterna på nitrifikation i marken är oftast små, så länge marken är beskogad. Ökad nitratbildning i skogbevuxen mark, efter gödsling med ammoniumnitrat, har belagts endast efter upprepade gödslingar med höga ackumulerade givor (>1000 kg N/ha). Urea-gödsling har visats kunna ge en viss effekt även vid lägre givor. Urea har alltså större benäget att öka nitrifikationen i marken än ammoniumnitrat.

Under hyggesfasen kan dock situationen bli annorlunda, eftersom ökad kväve mineralisering, minskat näringsupptag och pH-höjning gynnar nitrifikationen. Upplagring av markkväve och sänkt C/N-kvot,¹⁷¹ orsakat av upprepade kvävegödslingar i det tidigare beståndet, kan då medföra kraftig nitrifikation, nitratutlakning och försurning (se vidare ”Avrinnande ytvatten” nedan).

- Den mikrobiella nedbrytningsaktiviteten i marken, räknat per vikt av organiskt material, avtar i regel något. Tendensen är starkast på initialt lågproduktiva marker. Samtidigt tillförs dock marken mer organiskt material via årligt förnafall när beståndets tillväxt ökar. Markens humustäcke blir mäktigare och nedbrytningsaktiviteten per ytenhet markyta blir därför oförändrad eller ökar lite.
- Mykorrhizasvamparnas symbios med trädrötter missgynnas sannolikt initialt, men eftersom en del missgynnas mer än andra kan vissa arter tvärtom bli vanligare än tidigare. Effekterna på svampars fruktkropps bildning är likartad, d.v.s. oftast en initial minskning av totala fruktkroppsproduktionen och en något förändrad artsammansättning. Flera långtidsförsök tyder på ganska snabb återhämtning och att effekterna på längre sikt således är små.

¹⁷¹ Vid lägre kvot än ca 25 ökar risken för försurande nitrifikation och nitratutlakning. Så låga kvoter erhålls dock inte ens efter mycket stora ackumulerade kvävegivor i Norrland, men kan inom vissa områden och marktyper i Götaland vara förhanden redan utan kvävegödsling.

Avrinnande ytvatten

- *Engångsgödslingar*: Förändringar av vattenkemin i avrinnande vatten har ofta observerats efter gödsling. Vanliga kortsiktiga effekter är pH-höjning efter gödsling med urea och kalkammonsalpeter, medan ammoniumnitrat ofta sänker pH. Ökad utlakning av kationerna kalcium och magnesium sker oavsett gödselmedel. Likaså har förhöjda halter av oorganiskt kväve, främst nitrat, noterats i bäckvatten. Effekterna har varat från några månader upp till ett par år efter gödslingen.

Huvuddelen av ovan redovisade erfarenheter gäller efter *spridning från luften* varvid gödselmedel ofta hamnat i och nära vattendrag. Det är troligt att dessa effekter på vattenkvalitet avsevärt kan minskas om de numera gällande gödslingsråden för objektval och för fri-zoner utmed vattendrag följs.¹⁷²

- *Intensiv kvävegödsling eller upprepade gödslingar*. Under besko-gad fas uppträder normalt inga förändringar av vattenkemin, förutom de ovan beskrivna effekterna i samband med spridningstillfället.

Nitratutlakning efter kalavverkning av upprepat kvävegödslade bestånd har studerats i ett fåtal försök. Förhöjda nitrathalter i avrinnande markvatten har kunnat konstateras på ytor med höga ackumulerade givor (som lägst ca 500 kg N/ha).

Bilden av nitratutlakning efter kalavverkning ser dock olika ut beroende på om försöken legat på ursprungligen lågproduktiva eller högproduktiva marker. Detta kan hänga samman med hur stor förändring av C/N-kvoten som gödslingen medfört.

Störst relativ utlakningsökning, d.v.s. jämfört med ogödslad kontroll, har uppmätts på de initialt lågproduktiva markerna. På dessa marker har humuslagret initialt haft en hög C/N-kvot, vilken har sänkts kraftigt av kvävegödslingen.

I kontrast till detta står försöken på ursprungligen ganska bördiga marker. Efter kalavverkningen uppvisar de kraftigt kvävegödslade ytorna ingen förhöjd utlakning jämfört med kontrolltytor. I dessa fall är C/N-kvoten redan på de obehandlade kontrolltytorna lägre än 25 och tillförseln av det extra gödslingkvävet på gödslade ytor har inte sänkt kvoten ytterligare.

Vegetation

- Kvävegödsling kan medföra att vegetations- såväl som markorganismernas artsammansättning förändras. Den förbättrade kvävetillgången i marken förändrar konkurrensförhållandena mellan de arter som redan finns på platsen.
- Bland växterna ökar de arter som gynnas särskilt mycket av större kvävetillgång. Vid höga givor eller upprepade gödslingar, och om gräs finns på lokalen, förskjuts ofta dominansen från risväxter mot gräs. Lavar och vissa mossor missgynnas.

¹⁷² Skogsstyrelsen. 2007. Kvävegödsling av skogsmark. *Meddelande 2–2007*.

- Bärproduktionen av blåbär ökar ofta, medan lingonproduktionen minskar. Bäreus smaklighet försämras.

Varaktigheten av kvävegödslingens effekter på mark, vatten och vegetation är en viktig fråga. Studier av återhämtningsförlopp tyder på att de flesta nämnda förändringar är tillfälliga, d.v.s. återgår inom ca 10 år. Förändringar i växtsamhällets artsammansättning, samt minskad mikrobiell nedbrytningsaktivitet i humuslagret, tycks dock kräva längre tid för återhämtning.

Behovsanpassad gödsling – en intensivodlingsform

Om kvävebegränsning upphävs genom kvävetillförsel så kan tillgången på något annat näringsämne bli en begränsande faktor. Rimligen ökar denna risk vid intensiv, långvarig och ensidig kvävetillförsel. Vilket ämne som i så fall kan bli begränsande beror både på trädslag och på växtplatsens naturgivna förutsättningar. Sådan sekundär tillväxtbegränsning av andra ämnen än kväve har dock hittills bara kunnat påvisas i några få fall när det gäller fastmarker i Sverige. I dessa fall har positiva tillväxteffekter av fosfor eller kalium konstaterats eller indikerats.^{173,174} Likaså har bristsymptom på det viktiga mikronäringsämnet bor visats kunna uppstå.¹⁷⁵ Ovanstående resonemang och farhågor ligger bakom utvecklingen av den gödslingsmetodik som kallas näringsoptimering, balanserad näringstillförsel, eller behovsanpassad gödsling.

Teori och metodik för behovsanpassad och intensiv fullgödsling har utvecklats stegvis under 1900-talets senare hälft.^{176,177} Det är ett intensivodlingssystem som syftar till att förse träden med alla viktiga näringsämnen och tillföra näringen med större precision än vid vanlig produktionsgödsling med kväve.

De bakomliggande idéerna kan förenklat beskrivas på följande sätt:

- En växt växer bäst och mest när barr eller blad har optimal näringshalt av varje näringsämne. Med detta menas ett koncentrationsområde där ämnet ifråga inte längre begränsar produktionen av biomassa på något sätt men inte heller finns i störande överskott.
- För att kunna uppnå detta tillstånd för alla näringsämnen samtidigt så bör det vara en viss, optimal, balans mellan olika näringsämnen i näringsupptaget, så att tillförseln av varje ämne stämmer överens med växtens faktiska behov.

¹⁷³ Tamm, C.-O. 1985. De skogliga bördighetsförsöken. Mål, metoder, tillväxtresultat. *Kungliga Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift, supplement* 17, s. 9–29.

¹⁷⁴ Nohrstedt, H.-Ö. 1990. Tillväxteffekter vid gödsling med olika näringsämnen i barrskog. En sammanfattning av resultat erhållna vid Institutet för skogsförbättring. I: Liljelund L.-E., Lundmark, J.-E., Nihlgård, B., Nohrstedt, H.-Ö. & Rosén, K. Skogsvitalisering. Kunskapsläge och forskningsbehov. Naturvårdsverket. *Rapport* 3813.

¹⁷⁵ Möller, G. 1983. Borbristkadador efter upprepad kvävegödsling på fastmark. Föreningen skogsträdsförädling, Institutet för skogsförbättring. *Årsbok* 1982, s. 47–70.

¹⁷⁶ Sveriges Lantbruksuniversitet. 1983. Det biologiska taket för skogsproduktionen. Skogshögskolans höstkonferens 1982. *Skogsfakta Suppl.* nr 2.

¹⁷⁷ Linder, S. 1997. Virkesproduktionens gränser. *Kungliga Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift* 136, s. 21–27.

- Och för att vidmakthålla oförändrat näringstillstånd i barr eller blad måste tillförselastigheten av näringsblandningen till rötterna stämma överens med trädets tillväxtrytm över året och över omloppstiden.

Regelbundna näringsanalyser av barr eller blad utgör styrmekanismen för odlingsmetoden. Optimumhalter för olika näringsämnen i de fotosyntetiskt aktiva vävnaderna – barr eller blad – finns framtagna för flera trädarter, bland annat tall och gran.^{178,179} De kan uttryckas antingen som *absoluta* halter av näringsämnet ifråga, eller som *relativa* halter i förhållande till kvävehalten.

Normalt använder man de mer stabila relativa näringshalterna, d.v.s. P/N, K/N, Mg/N, Ca/N, S/N o.s.v., som indikatorer på aktuell näringsstatus för andra ämnen än kväve. Dessa relativa halter ger också uttryck för det viktigaste balanskravet – det mellan kväve och varje annat näringsämne.

En annan styrmekanism är regelbunden kontroll av utlakningsförluster i dränerande markvatten. Om utlakningen av något ämne överstiger bakgrundsnivån (ogödslad kontrolllyta), är det ett tecken på att systemet läcker och gödslingsgivan måste justeras. Denna kontrollmekanism är självklart mycket viktig för odlingsteknikens miljömässiga trovärdighet.

Experimentella försök med balanserad näringstillförsel i Sverige har koncentrerats på gran. De har gett ett underlag för fortsatt metodutveckling och anvisningar för praktisk tillämpning.¹⁸⁰ Potentialen för ökad produktion är mycket hög om näringsbegränsningarna elimineras på detta sätt, särskilt i mycket humida regioner. Volymproduktionen kan fördubblas i södra Sverige och mer än tredubblas i norra Sverige.¹⁸¹ Det krävs dock kompetens och regelbunden uppföljning vid genomförandet.

Intensiv skogsodling med behovsanpassad gödsling kan dock för närvarande inte utföras i det praktiska skogsbruket i Sverige. Metodiken har utvärderats genom en så kallad miljöanalys, men Skogsstyrelsen har gjort bedömningen att i nuläget avråda från att tillämpa odlingskonceptet på skogsmark.¹⁸²

Torvmarksgödsling

Innehållet av både fosfor och kalium i torvjordar är ofta så litet att det begränsar trädvegetationens tillväxt. Av det befintliga totalförrådet av kalium, är dock en stor andel också direkt tillgängligt för växterna. I detta avseende är således stor skillnad jämfört med kväve, som visserligen finns i stora totalmängder men vars tillgänglighet är låg och helt bestäms av mikroorganismernas kväveminerisering.

¹⁷⁸ Braekke, F. 1994. *Diagnostiske grenseverdier for næringselementer i gran- og furunåler*. NISK, No. 15.

¹⁷⁹ Linder, S. 1995. Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce. *Ecological Bulletins* 44, s. 178–190.

¹⁸⁰ Bergh, J. & Oleskog, G. 2006. Slutrapport för Fiberskogsprogrammet. SLU, inst. för sydsvensk skogsvetenskap. *Arbetsrapport* nr 27.

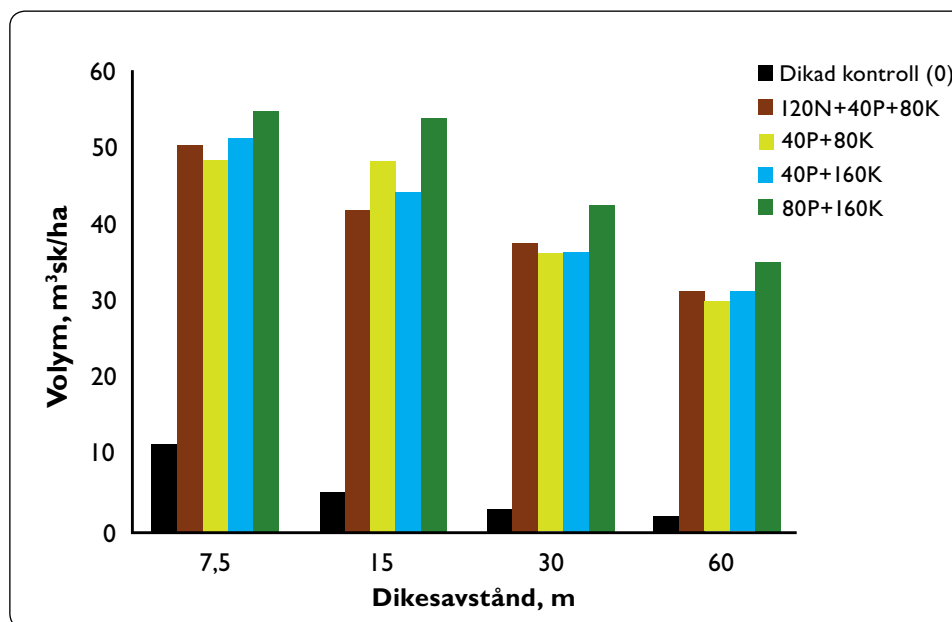
¹⁸¹ Bergh, J., Linder, S. & Bergström, J. 1999. Intensivodling av gran – en utnyttjad möjlighet. SLU. *FaktaSkog* nr 2–1999.

¹⁸² Skogsstyrelsen. 2014. Allmänna råd om kvävegödsling beslutade, 2014-07-10. *Skogsstyrelsens Nyhetsarkiv*. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se.

Erfarenheter visar¹⁸³ att uthållig skogsproduktion knappast är möjlig om det vid beståndsanläggningen finns mindre än 75–100 kg K och 150–200 kg P per hektar, räknat som totalmängder ner till 20 cm djup. På de flesta djupa torvmarker (> ca 50 cm torv) är därför gödsling med fosfor och kalium nödvändigt om ett uthålligt och aktivt skogsbruk ska bedrivas.

Rekommendationerna för torvmarksgödsling är att gödsla etablerade bestånd med minst 40 kg fosfor och 80 kg kalium per hektar.^{184,185}

Tillväxteffekterna av en initial giva fosfor och kalium på dikade djupa torvmarker är ofta mycket stora. Detta gäller i synnerhet nyanlagda bestånd på torvmark som tidigare inte varit dikad eller burit skog (figur MV15).



Figur MV15 Exempel på produktionseffekter av gödsling och dikesavstånd, 16 år efter etablering av tallbestånd. Gödselgiva angiven i kg N, P eller K per hektar. Djup torvmark av lågstarr-typ (Hillesjö mossen, Halland). Modifierad från Hannerz m.fl., 1988.¹⁸⁶

Mer representativa för ett genomsnitt av dikade torvmarker och våta fastmarker är sannolikt de av Holmen¹⁸⁷ redovisade värdena på förväntad ökning av medelproduktionen efter gödsling. Merproduktionen, d.v.s. ökningen utöver dikningseffekten, anges till ca 2 m³sk per ha och år för de bättre vegetations typerna (lågört- och fräken-högstarrtyper) och ca 3 m³sk per ha och år för de sämre typerna (bärris- och lågstarrtyper).

För att upprätthålla hög produktion över en hel omloppstid behöver i regel

¹⁸³ Holmen, H. 1980. Produktionsförutsättningar, klassificering och arealtillgång. I: Skogsproduktion på torvmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Redogörelse nr 3–1980.

¹⁸⁴ Skogsproduktion på våtmark. 1980. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Redogörelse nr 3–1980.

¹⁸⁵ Paavilainen, E. & Päiväven, J. 1995. *Peatland Forestry – ecology and principles*. Springer Verlag. 248 s.

¹⁸⁶ Hannerz, M., Holmen, H. & Sundström, E. 1988. Från myr till skog. Skogsodlingsförsök med olika dikesavstånd och gödselgivor på kal myr. SLU. Inst. för skoglig ståndortslära. Stencil nr 9.

¹⁸⁷ Holmen, H. 1980. Produktionsförutsättningar, klassificering och arealtillgång. I: Skogsproduktion på torvmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Redogörelse nr 3–1980.

åtminstone en omgödsling göras. Anledningen till att givorna bör vara så måttliga, och istället hellre upprepas, är att bägge ämnena kan utlakas om de inte snabbt tas upp av vegetation eller mikroorganismer.

Utlakningsrisken är störst för kalium men detta ämne har inga negativa miljökonsekvenser i vattendragen. Risken för fosforutlakning är betydligt lägre, men i den mån det sker kan det få allvarliga konsekvenser eftersom det har starkt produktionshöjande effekt i vattenekosystemen.

Av praktiska skäl tillförs de två näringsämnen ofta i form av PK-kombinationsgödselmedel. Vid enkel fosforgödsling bör ämnet tillföras i svårslöslig form, såsom råfosfat eller krossad apatit. Detta minimerar risken för fosfatutlakning till vattendrag, utan att försämra gödslingseffekten. Den vattenlösliga formen av fosforgödselmedel, så kallat superfosfat, är inte lämplig. För enkel kaliumgödsling finns för närvarande inget svårslösligt alternativ på marknaden, utan bara lättlösliga kalialter (kaliumklorid eller kaliumsulfat).

Tillväxten på de sämre torvmarkstyperna är oftast även begränsad av kvävetillgången. Ur ren produktionssynvinkel kan därför en ”startgiva” av kväve vara befogad. Det finns dock flera skäl att ge låg prioritet åt sådan kvävegödsling:

- För det första finns tecken på att fosforgödslingen på ett naturligt sätt ökar kväveutbudet med tiden, eftersom fosfor kan stimulera nedbrytarorganismernas aktivitet och öka kväveminaliseringen.
- För det andra talar försiktighetsprincipen emot kvävetillförsel till mark som redan innehåller ganska stora totalmängder kväve, och vars dräneringssystem leder direkt till de naturliga vattendragen.
- För det tredje är lönsamheten för kvävegödsling av mark med låg naturlig bonitet tveksam.

Askgödsling på torvmark

Åtgärden är produktionshöjande på samma sätt som PK-gödselmedel.^{188,189,190} Samtidigt kan tillförsel av trädbränsleaska ses som en kompensationsåtgärd för att ersätta de näringsresurser som bortförs vid skörd av skogen (se ”Kalkning och asktillförsel på fastmark”). I Sverige har askgödsling av torvmarker nästan inte alls tillämpats i praktiskt skogsbruk utan enbart i ett mindre antal skogliga försök. I Finland finns däremot mer omfattande erfarenhet av åtgärden.¹⁹¹

Trädbränsleaskan tillför alla nödvändiga växtnärsämnen utom kväve. Produktionseffekten står i proportion till påförda mängder av fosfor och ka-

¹⁸⁸ Magnusson, T. & Hånell, B. 1996. Aska till skog på torvmark. *NUTEK. Ramprogram Askåterföring*, R 1996:85.

¹⁸⁹ Magnusson, T. & Hånell, B. 2000. Aska för beskogning av torvtäcker. Påverkan på växtnärsförhållanden, tungmetallhalter och vattenkvalitet. *Energimyndigheten, ER*.

¹⁹⁰ Sikström, U., Björk, R.G. & Klemetsson, L. 2012. Tillförsel av aska i skog på dikad torvmark i södra Sverige – skogsproduktion och emission av växthusgaser. Värmeforsk. Askprogrammet. *Arbetsrapport nr 29*.

¹⁹¹ Silfverberg, K. 1996. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. The Finnish Forest Research Institute. *Research Papers* 558.

lium, varför askans halter av dessa ämnen är den från produktionssynpunkt viktigaste kvalitetsaspekten.

Pelletering och härdning av askan sänker den färska askans skadligt höga pH-värde och salthalt, vilket gör att skador på markvegetationen i samband med spridning undviks eller minskar. En annan fördel är att flera ämnen, bland annat fosfor, blir något mer svårösliga.

Den viktigaste markkemiska effekten, vilket skiljer aska från PK-gödselmedel, är att askan påtagligt och långvarigt höjer yttorvens pH-värde.

Önskvärd askgiva, beräknad utifrån den rekommenderade minimigivan för fosfor (40 kg P/ha) samt medelhalt av fosfor i svenska trädbränsleaskor¹⁹², blir ca 4,5 ton torrsbstans per hektar. Skogsstyrelsen har för närvarande inga rekommendationer specifikt för asktillförsel till dikade skogbevuxna torvmarker. De allmänna råd till skogsvårdslagen som finns gäller allmänt för askåterföring vid uttag av avverkningsrester.¹⁹³ Där rekommenderas en giva på högst 3 ton ts per hektar inom en tioårsperiod och sammantaget högst 6 ton ts per hektar under en hel omloppstid.

Kalkning och asktillförsel på fastmark

Två motiv – motverka försurning och kompensera näringsförluster!

Kalkning av vattendrag, för att motverka vattenförsurning, började göras under 1970-talet. Behovet av åtgärder mot markförsurning debatterades intensivt under 1980-talet och framåt. Viss försöksverksamhet med markkalkning startade i slutet av 1980-talet. 1993 presenterade Skogsstyrelsen ett förslag till åtgärdsprogram mot försurning, vilket innefattade markkalkning mot försurning och ”vitaliseringsgödsling” för vegetationen. Detta program reviderades 1997, och sedan återigen 2001.^{194,195}

Kalknings- och vitaliseringsprogrammet har genomförts i Skogsstyrelsens regi. Åtgärderna har främst berört de mest försurningsdrabbade sydvästra delarna av landet. Eftersom syftet varit att påverka både land- och vattenekosystem är behandlingsenheterna avrinningsområden snarare än enskilda skogsbestånd. Normalgivan har varit 2 ton kalk plus 2 ton aska per hektar. Åtgärderna har samordnats med Naturvårdsverkets och länsstyrelsernas program för sjö- och vattendragskalkning. Skogsstyrelsens åtgärdsprogram har varit kontroversiellt.¹⁹⁶ Det avslutades 2003 och därefter har omfattande utvärdering skett. År 2008 drogs slutsatsen att inte längre verka för att övergå till storskalig skogsmarkskalkning.¹⁹⁷

¹⁹² Jönsson, O. & Nilsson, C. 1996. Aska från biobränslen. *Kungliga Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift* 135, s. 25–36.

¹⁹³ Skogsstyrelsen. 2014. *Skogsvårdslagstiftningen*. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/Aga-och-bruka/Lagen/Skogsvardslagen.

¹⁹⁴ Skogsstyrelsen. 2001. Markförsurning & Motåtgärder. Skogsstyrelsen. *Temaserie. Rapport* nr 11A, nr 11B, nr 11C, nr 11D, nr 11E, nr 11F, nr 11G, nr 11H, nr 11I.

¹⁹⁵ Skogsstyrelsen. 2001. Åtgärder mot markförsurning och för ett uthålligt brukande av skogsmarken. *Meddelande* 4–2001.

¹⁹⁶ Naturvårdsverket, 1996. Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från naturvårdsverkets försöksverksamhet (red. Staaf, H., Persson, T. och Bertills, U.). Naturvårdsverket. *Rapport* 4559.

¹⁹⁷ Hjerpe, K., Olsson, P. & Eriksson, H. 2008. Skogsmarkskalkning. Skogsstyrelsen. *Rapport* 15–2008.

Under samma tidsperiod fördes också en annan debatt, nämligen om de långsiktiga produktions- och försurningseffekterna av ökat biomassauttag från skogen. En logisk kompensationsåtgärd för förlusterna av baskatjoner med biomassauttag är att återföra askrester från trädbränsle i syfte att skapa ett kretslopp. Samtidigt kan askan motverka försurning av mark och vatten. Skogsstyrelsens allmänna råd till skogsvårdslagen¹⁹⁸ för askåterföring är kopplade till uttag av skogsbränsle, varför det är markägaren som ansvarar för denna åtgärd. Rekommenderade askgivor är i dessa sammanhang upp till ca 3 ton ts per hektar.

Askans och kalkens effekter

Kalk sprids normalt i form av krossad kalksten och aska i form av härdad (hopsintrad) och därefter krossad trädbränsleaska. Aska som sprids i skog måste uppfylla vissa kvalitetskrav vad gäller minimihalter av viktiga näringsämnen och maximihalter av potentiellt skadliga ämnen. Förorenade askor kan innehålla alltför höga halter av spårämnen, exempelvis den starkt toxiska och bioackumulerande tungmetallen kadmium. Vidare kan trädbränsleaska från vissa regioner i södra och mellersta Norrland innehålla höga halter av radioaktivt cesium vilket också lätt tas upp och anrikas i levande organismer.

Både kalksten och aska har syraneutraliserande och pH-höjande effekt. Neutralisationskapaciteten – ”kalkeffekten” – i kalksten är ungefär dubbelt så stor som i vedaska. Dolomitkalk innehåller, förutom kalcium, även en del magnesium. Aska tillför samtliga viktiga växtnäringsämnen, förutom kväve.

Kalkning och asktillförsel på fastmark har likartad verkan på markens kemiska egenskaper, markens organismer, markvegetation och trädens tillväxt.^{199,200,201,202,203,204,205,206} Detta gäller såväl de avsedda nyttoeffekterna som

¹⁹⁸ Skogsstyrelsen. 2014. *Skogsvårdslagstiftningen*. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/Aga-och-bruka/Lagen/Skogsvardslagen.

¹⁹⁹ Derome, J., Kukkola, M. & Mälkönen, E. 1986. Forest liming on mineral soils. Results from Finnish experiments. Naturvårdsverket. *Rapport 38*.

²⁰⁰ Nohrstedt, H.-Ö. 1990. Tillväxteffekter vid gödsling med olika näringsämnen i barrskog. En sammanfattning av resultat erhållna vid Institutet för skogsförbättring. I: Liljelund L.-E., Lundmark, J.-E., Nihlgård, B., Nohrstedt, H.-Ö. & Rosén, K. Skogsvitalisering. Kunskapsläge och forskningsbehov. Naturvårdsverket. *Rapport 3813*.

²⁰¹ Egnell, G., Nohrstedt, H.-Ö., Weslien, J., Westling, O. & Örlander, G. 1998. Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränsleuttag, asktillförsel och övrig näringskompensation. Skogsstyrelsen. *Rapport 1–1998*.

²⁰² Johansson, M.-B., Nilsson, T. & Olsson, M. 1999. Miljökonsekvensbeskrivning av Skogsstyrelsens förslag till åtgärdsprogram för kalkning och vitalisering. Skogsstyrelsen. *Rapport 1–1999*.

²⁰³ Andersson, S. & Hildingsson, A. 2004. Effekttuppföljning av skogsmarkskalkning. Skogsstyrelsen. *Rapport 1–2004*.

²⁰⁴ Energimyndigheten, 2006. Miljöeffekter av skogsbränsleuttag och askåterföring i Sverige. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram 1997 till 2004. Energimyndigheten *Rapport ER 2006:44*.

²⁰⁵ Löfgren, S., Zetterberg, T., Larsson, P.-E., Cory, N., Klarqvist, M., Kronnäs, V. & Lång, L.-O. 2008. Skogsmarkskalkningens effekter på kemin i mark, grundvatten och ytvatten i SKOKAL-områdena 16 år efter behandling. Skogsstyrelsen. *Rapport 16–2008*.

²⁰⁶ Kronnäs, V., Westerberg, I., Zetterberg, T., Pröjts, J., Holmström, C. & Stibe, L. 2012. Långsiktiga effekter på vattenkemi, öringsbestånd och bottenfauna efter ask- och kalkbehandling i hela avrinningsområden i brukad skogsmark – utvärdering 13 år efter åtgärder mot försurning. Skogsstyrelsen. *Rapport 6–2012*.

riskan för oönskade effekter. I den mån medlen skiljer sig åt är det oftast till askans fördel, d.v.s. något mindre risk för vissa oönskade effekter. I korthet kan effekterna av låga givor sammanfattas på följande sätt:

Huvudeffekt

- Höjer långsiktigt markens pH och basmättnadsgrad, och minskar det totala förrådet av vätejoner. Effekten är dock på kort sikt koncentrerad till markens organiska ytskikt.

Följeffekter

- Kan ge något minskad nedbrytning, kväveminerisering och nitrifikation i näringsfattiga och starkt kvävebegränsade jordar (hög C/N-kvot). Effekterna blir ofta omvända, d.v.s. något ökad nedbrytning, kväveminerisering och nitrifikation, i bördiga och kväverika (låg C/N-kvot) jordar.
- Kan minska tillväxten (med ca 0–20 %) på starkt kvävebegränsad skogsmark. Kan tvärtom öka tillväxten (med ca 0–10 %) på bördig, kväverik mark med granskog.
- Ger artförskjutningar bland markdjur och mykorrhizasvampar, d.v.s. vissa arter eller artgrupper minskar medan andra ökar. Daggmaskar gynnas entydigt.
- Ger artförskjutningar bland markväxterna i enlighet med arternas pH-preferenser. På bördig mark ökar dessutom kvävegynnade arter. Mossor och lavar anpassade till näringsfattiga marker med naturligt lågt pH drabbas entydigt negativt.
- De låga givor som ges vid kompensationsgödsling ger normalt inga mätbara effekter på avrinningsvatten, vare sig önskvärda (högre pH eller alkalinitet) eller oönskade (nitratutlakning). Behandling av både fastmarker och våtmarker, d.v.s. större del av avrinningsområdet, kan dock ge mätbart högre pH och alkalinitet i vattnet.

Markens långsiktiga produktionsförmåga

Historiska debatter

Skogsbruksmetodernas påverkan på markens långsiktiga produktionsförmåga har varit viktiga inslag i flera långvariga skogliga debatter under föregående sekel. Här ska ges korta beskrivningar av några sådana historiska debatter. De kan ge en viss inblick i hur kunskaper om skogsekosystemet växt fram och även ge en förklarande bakgrund till de skogsbruksmetoder som tillämpas idag.

”Tallhedsproblemet”

Begreppen ”markdegeneration” och markutarmning har länge använts för att beskriva situationer där marken producerar avsevärt mindre biomassa än den egentliga naturgivna produktionsförmågan. Under 1900-talets första årtionden var de extremt glesa och lavdominerade tallhedarna på sandsediment och grovkorniga moränmarker i Norrland en omdiskuterad skogstyp. De hade vid 1900-talets början mycket större utbredning än i nutid och förekom också i södra Sverige. I övre Norrland fanns dessa glesa tallhedsskogar även på mer finkorniga moränjordar.

Skogarna var mycket lågproduktiva och föryngringen misslyckades ofta helt med dåtidens gängse metoder på tallhedar (svaga så kallade ljushuggningar). De karaktäriserades av glest ställda tallöverståndare, med öppna och till synes outnyttjade mellanliggande ytor. Oväxtliga små tallplantor och ”martallar” förekom ofta, enstaka eller i smågrupper, men dessa utvecklades sällan till någon beståndsbildande ungskog. Wretlind²⁰⁷ myntade begreppet ”extrem tallhed” för den mest utpräglade formen, där tallföryngring nästan enbart förekom ”i skydd” under de gamla tallarnas kronor.

Dessa vegetationstyper hade alla en likartad beståndshistorik, nämligen att de utsatts för regelbundet återkommande lågintensiva skogsbränder som förtärde mårлагret och dödade plantor och småträäd. I många fall hade de dessutom blivit utsatta för upprepad plockhuggning av stora träd.

Den vetenskapliga debatten gällde dels orsakerna till den allmänt låga produktionsnivån och dels de specifika orsakerna till föryngringssvårigheterna. Omfattande fältforskning bedrevs. Faktorer som diskuterades i sammanhanget var bland annat vattenbrist, kvävebrist, rotkonkurrens, klimatskador och parasitsvampar.

Brist på kväve

Markforskaren Henrik Hesselman kom fram till att det ytterst var en *kvävefråga*.²⁰⁸ Markens förråd av organiskt bundet kväve var litet och omsättning av det som fanns var mycket låg, vilket orsakade den låga tillväxten. Han menade att det bristande kväveutbudet även var grundorsaken till utebliven föryngring. Det tunna mårлагret på de öppna ytorna uppvisade nästan ingen nettomineralisering av kväve. Mårлагret under trädskronor och vid lågor hade

²⁰⁷ Wretlind, J. 1931. Bidrag till belysande av de norrländska tallhedsproblemen. *Norrk. Skogsvårdsförb. Tidskr.* 1931, s. 263–314.

²⁰⁸ Hesselman H. 1919. Studier över de norrländska tallhedarnas föryngringsvillkor. II. *Sv. Skogsvårdsför. Tidskr.* 1919, s. 29–76.

däremot något större kvävemineralisering, och detta sammanföll med, och förklarade, förekomsten av någorlunda växtliga plantor där.

Tillämpad skogsskötsel forskning bedrivna av bland annat Joel Wretlind bekräftade både den allmänna bilden av de lågproduktiva glesa tallhedarnas uppkomstsätt, och betydelsen av kväveförrådet. Det ogynnsamma marktillståndet var sannolikt kopplat till brandens återkommande utarmning av markens organiska material och därmed också utarmning av dess kväveförråd. Situationen hade ofta förvärrats genom utglesande plockhuggning. Sammantaget ledde dessa upprepade störningar till en negativ spiral med successivt minskande förnafall och mårlager, vilket gav minskande kväveutbud och produktionskapacitet.

Wretlind menade dock att *konkurrensen* om kvävenäringen ibland var en avgörande faktor i sammanhanget.²⁰⁷ De härskande träden var överlägsna i denna konkurrens och kunde förhindra nya plantors utveckling. Han visade med praktiska försök att de större trädens konkurrenszoner uppenbarligen sträckte sig även in över hedens öppna ytor. Där överståndare runtom sådana öppna ytor högs bort, kom livskraftig förnygring upp även på de öppna ytorna.

Kalavverkning lösningen

De brandpräglade och glesa tallhedarnas förnygringsproblem kunde således lösas på ett radikalt sätt – genom kalavverkning och kvarlämnande av enbart ett fåtal fröträd. När det gällde restaureringen av markens långsiktiga produktionsförmåga var det avgörande steget etableringen av ett fullslutet nytt trädbestånd. Detta kunde successivt öka ståndortens kväveomsättning via ökande förnatillskott till marken.

Brandbekämpning, kalhyggesbruk med anläggning av fullslutna bestånd, och i viss mån även antropogent kvävenedfall, har under 1900-talets gång höjt produktionskapaciteten på många av dessa ur produktionssynpunkt ”degenererade” marker. Samtidigt har dock de organismsamhällen och andra naturvärden som var förknippade med de öppna tallhedsskogarna blivit mindre vanliga, liksom att deras värde för rennäringen minskat.

”Den gamla råhumusgranskogens” marktillstånd

En annan typ av ”markdegeneration” beskrevs från de norrländska skogsmarkerna under 1900-talets första hälft. ”Den gamla råhumusgranskogen” var en av flera ganska oprecisa beteckningar som användes i den mångåriga debatten.^{209,210,211,212,213} Stora arealer av gles grandominerad skog i Norrlands höghöjds lägen uppvisade onormalt svag tillväxt och var mycket svåra att för-

²⁰⁹ Berg, A. 1932. Studier över restbeståndet i den svårförnygrade granskogen. *Norrl. Skogsvårdsförb. Tidskr.* 1932, s. 182–235.

²¹⁰ Holmgren A & Törngren E, 1932. Studier i den norrländska förnygringsfrågan. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1932, s. 9–133.

²¹¹ Ebeling, F. 1972. *Norrländska skogsvårdsfrågor*. Skogsstyrelsen.

²¹² Eneroth, O, 1937. Självförnygringen på kalhuggna granråhumusmarker. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1937.

²¹³ Teikmanis, A. 1954. Några studier över de mossrika granskogarna i Norrland och deras förnygringsproblem. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1954, s. 307–434.

yngra genom naturlig beståndsförnyring.^{214,215} Typfallet hade ett tjockt mår-
lager (råhumus äldre term) och den ymniga markvegetationen dominerades
av friskmarksmossor i bottenskiktet och blåbär i fältskiktet. Det ogynnsamma
tillståndet ansågs ha uppkommit genom den successiva utglesning av välslut-
na bestånd (naturskogar) som skedde under det sena 1800-talets och tidiga
1900-talets ”timmerhuggningar” och ”dimensionshuggningar”.

Nöjaktig förnyring och återväxt infann sig inte i de utglesade bestånden,
inte heller efter ytterligare utglesning (förnygringshuggningar). Enligt scha-
blonbeskrivningen blev de kvarlämnade trädens tillväxtreaktion mycket svag
eller ingen alls, även om Näslund²¹⁶ visade att det var en överdrift och inte
gällde för glesa granskogar särskilt på bättre boniteter. Tolkningen av den
svaga tillväxtreaktionen var att det inte alls uppstod någon förbättrad närings-
tillgång i marken efter huggningsgreppen.

Fenomenet tillskrevs ogynnsamma markförhållanden, ”inaktiva råmumus-
täcken”. Det är viktigt att poängtera att det marktillstånd man avsåg förekom
främst i just *glesa svagväxande bestånd med mycket konkurrensstark ris- och
mossvegetation i markskiktet, i kärva klimat*. De stora kväveresurser som
otvivelaktigt fanns lagrade i det mäktiga mårslagret omsattes inte på normalt
sätt. Problemet tycktes således återigen vara kväve – men inte det totala kvä-
veförrådet, utan enbart kvävemineriseringens hastighet och fördelningen av
mineraliserat kväve mellan systemets olika organismgrupper.

Sannolikt var det beskrivna mark- och skogstillståndet en följd av kom-
plexa biotiska konkurrensmekanismer som påverkade samspelet mellan träd-
bestånd, markens mikroorganismer (framför allt svampar) och markvegeta-
tion. Men dåtidens kunskaper om markens biologi var inte tillräckliga för att
ge en sammanhängande vetenskaplig förklaring.^{217,218,219} Senare tiders skogs-
ekologiska forskning har påvisat mekanismer som i hög grad kan förklara
den successivt minskade näringsomsättning och otillräckliga förnyring som
ofta karaktäriserade gamla och ostörda nordliga barrskogar.^{220,221,222,223} Ett hu-
vuddrag i bilden som framträder är att de normalt symbiotiska mykorrhiza-

²¹⁴ Teikmanis, A. 1954. Några studier över de mossrika granskogarna i Norrland och deras
förnygringsproblem. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1954, s. 307–434.

²¹⁵ Sirén, G. 1955. The development of Spruce forest on raw humus sites in northern Finland
and its ecology. *Acta For. Fenn.* 62.

²¹⁶ Näslund, M. 1942. Den gamla norrländska granskogen reaktionsförmåga efter genom-
huggning. *Medd. Stat. skogsforskningsanst.* 33.

²¹⁷ Romell, L-G. 1934. *En biologisk teori för mårbildning och måraktivering*. Stockholm.

²¹⁸ Hesselman, H. 1937. Om humustäckets beroende av beståndets ålder och sammansättning
i den nordiska granskogen av blåbärsrik Vacciniumtyp och dess inverkan på skogens förnyg-
ring och tillväxt. *Medd. Stat. Skogsforskningsanst.* 30, 529–716.

²¹⁹ Lindquist, B. 1937. Om några parasitiska marksvampar i nordsvenska råhumusmarker.
Norr. Skogsvårdsförb. Tidskr. 1937, 289–317.

²²⁰ Nilsson, M-C. & Wardle, D. 2005. Understory Vegetation as a Forest Ecosystem
Driver: Evidence from the Northern Swedish Boreal Forest. *Frontiers in Ecology and the
Environment* 3, 421–428.

²²¹ Korkama, T., Fritze, H., Pakkanen, A. & Pennanen, T. 2007. Interactions between extr-
aradical ectomycorrhizal mycelia, microbes associated with the mycelia and growth rate of
Norway spruce (*Picea abies*) clones. *New Phytol.* 173, 798–807.

²²² Högberg, M.N., Myrold, D.D., Giesler, R. & Högberg P. 2006. Contrasting patterns of soil
N-cycling in model ecosystems of fennoscandian boreal forests. *Oecologia* 147, 96–107.

²²³ Näsholm, T., Högberg, P., Franklin, O. & Högberg, M.N. 2014. Är mykorrhizan en bidra-
gande orsak till skogens kvävebrist? *SLU. Fakta Skog* 2014:1.

svamparna i gamla ostörda skogsekosystem kan övergå från att underlätta till att försvåra trädens näringsupptag. Det tillväxtbegränsande näringsämnet i våra skogar är kväve. Trädet tar upp kväve från marken via svamparnas mycel och ”i utbyte” levererar trädet energirika fotosyntesprodukter till svampen. Nya studier har visat att mykorrhizasvampar i gamla ostörda skogar tenderar att ändra denna ”jämvikt” till sin egen fördel – levererar allt mindre kväve till trädet och kräver allt större andel av fotosyntesprodukterna. Svampen använder större andel av upptaget kväve för eget bruk, d.v.s. bildning av egen svampbiomassa. Denna negativa spiral, ur trädens synvinkel, leder till allt större kvävebegränsning och allt större kostnader för näringsupptaget i form av fotosyntesprodukter. Därmed får träden sämre förutsättningar för egen tillväxt.

Total störning återigen lösningen

Problemet med vissa gamla granskogars ”inaktiva råhumustäcken” fick dock så småningom sin åtgärdsmissiga lösning. Det ogynnsamma marktillståndet försvann nämligen efter kalavverkning – i vissa fall krävdes dock att kalavverkningen följdes av hyggesbränning eller mekanisk markberedning, för att få igång en kväveminerisering som möjliggjorde snabb etablering av ett nytt trädbestånd. De nyetablerade fullslutna bestånden fick sedan en utveckling som visade att markens naturgivna produktionsförmåga återstälts.

Kalavverkningen och de efterföljande markbehandlingarna innebar alltså en total störning av såväl befintlig träd- och markvegetation som associerade mikroorganismer i mårtäcket.

De goda erfarenheterna – ur skogsförnygrings- och skogsproduktionssynvinkel – av stark störning genom kalavverkning gällde för båda typerna av lågproduktiva och svårförnygrade marker, utglesade tallhedar och ”råhumusgranskogar”. Samma metodik kunde framgångsrikt tillämpas på nästan alla marker. Dessa erfarenheter fick stor tyngd i den långvariga skogliga debatt som slutade med att kalavverkning (trakthyggesbruk) blev allmänt betraktat som det mest ansvarsfulla och lämpliga skogsbrukssättet, särskilt i Norrland. Vid 1900-talets mitt (efter andra världskriget) kom metodiken att utgöra grunden för den omfattande så kallade ”restaurering” av glesa och lågproducerande skogar som skapats under tidigare epokers timmer-, dimensions- och plockhuggningar, kreatursbete och skogsbränder.

Intensivt nyttjande av biomassa

Tillväxten i dagens välslutna skogar är hög – även utan kvävegödsling. Skogsskötseln har förbättrats och en större andel av trädbiomassan skördas. Den skördade biomassan innehåller växtnäringsämnen som i ett ostört kretslopp skulle ha återbördats till marken och till en ny generation träd. Det är därför befogat att fråga sig var gränsen går för ett uthålligt nyttjande av trädens biomassa.

Näringsfördelning mark – bestånd

Mineralvittringen och kvävefixeringen är de grundläggande tillförselprocesserna i näringsbalansen. En ytterligare post, av varierande betydelse, är näringstillförsel från luften. Dessa tillskott ska balanseras mot förlusterna av växtnäring i den skördade biomassan samt eventuella förluster till vattendrag och atmosfär:

<i>Tillskott</i>	<i>Förluster</i>
<i>Mineralvittring</i>	<i>Biomassaskörd</i>
<i>Kvävefixering (N)</i>	<i>Denitrifikation (N)</i>
<i>Atmosfäriskt nedfall (Gödsling)</i>	<i>Brand (framför allt N, S, K)</i>
<i>(Tillfört med rörligt markvatten)</i>	<i>Utlakning</i>

Ett stort problem när man försöker beskriva näringsomsättningen genom att ställa tillskott mot förluster i en så kallad massbalans, är bristande kunskapsunderlag för att rätt skatta flödesposternas storlek. Detta gäller inte minst vittringen. Men även mycket enkla skattningar av tillskott eller förluster kan ge en uppfattning om ett skogsekosystems långsiktiga produktionsförmåga. En naturlig utgångspunkt är att beakta storleken på befintliga förråd av näringsresurser, och hur dessa är fördelade. Jämförelser mellan näringsförråden i bestånd respektive mark ger en grov bild av systemets känslighet för skördeförluster.

Näringskapitalet i en skog kan delas upp i den stående trädbiomassans näringsinnehåll och markens näringsinnehåll (figur MV16–17; tabell MV6).

Enkla storleksjämförelser mellan olika typer av förråd visar bland annat att:

- Det är stor skillnad mellan organiska jordar och mineraljordar vad gäller totalförråd av vissa näringsämnen.
- Det är avsevärd skillnad mellan olika näringsämnen, varför man inte kan dra slutsatser om ”näringsämnen” som en enhetlig grupp.
- Det är stor skillnad mellan markens kortsiktigt tillgängliga och dess långsiktigt tillgängliga (totala) näringsförråd i mineraljordar men liten skillnad i torvjordar.
- Barren är den trädslag som innehåller allra mest näringsämnen i förhållande till sin vikt.
- Mårlagret utgör ett näringsförråd av ungefär samma storleksordning som näringsmängderna i trädbeståndet.



Garpenberg

	N	P	K	Ca	Mg
Årsnederbörd	3	0,2	3	3	0,5
Träd ovan stubbe	370	35	160	460	50
Stubbar+rötter >2mm	45	4	25	50	6
Mår + rötter < 2mm	1150	65	90	270	75
Mineraljord 0-50 cm - totalt (< 2 mm)	2750	1000	79000	34000	16000
- lättlösligt		6	60	110	20



Flakaträsk

	N	P	K	Ca	Mg
Årsnederbörd	3	0,1	2	3	0,5
Träd ovan stubbe	300	35	160	380	50
Stubbar+rötter >2mm	65	10	40	115	12
Mår + rötter < 2mm	560	50	70	210	25
Mineraljord 0-50 cm - totalt (< 2 mm)	1650	1750	88000	46000	20000
- lättlösligt		15	80	170	35

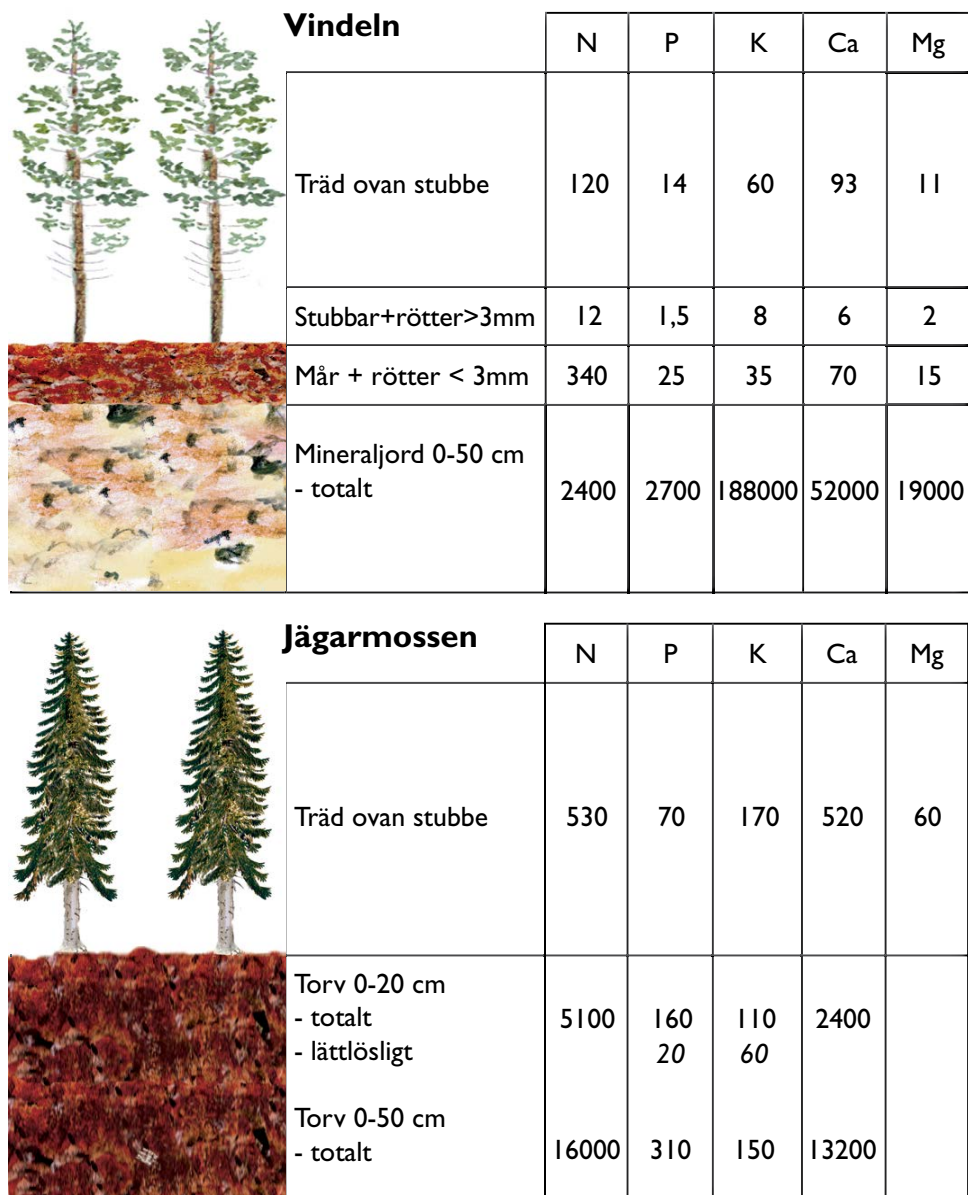
Figur MV16. Exempel på näringsämnenas fördelning i några skogsekosystem på moränmark (kg/ha). Modifierad efter Nykvist, 1977.²²⁴ Data från Nykvist, 2000.²²⁵ Överst: Granbestånd på sandigt-moig morän, Garpenberg, Dalarna. Ålder (1964) ca 100 år; volym 331 m³sk per ha; medeltillväxt 2,6 m³sk per ha och år. Underst: Granbestånd på sandigt-moig morän, Flakaträsk, Västerbotten. Ålder (1965) ca 140 år; volym 278 m³sk per ha; medeltillväxt 2,6 m³sk per ha och år. Illustration Bo Persson.

Anm. 1: Totalförråden för P, K, Ca och Mg i mineraljord 0–50 cm innefattar endast jordmaterial < 2 mm. Om fraktionerna grus, sten och block inbegrips är förråden 2,1 och 1,7 gånger större för Garpenberg respektive Flakaliden.

Anm. 2: Lättlösligt (växttillgängligt) förråd är skattat med AL-extraktion.

²²⁴ Nykvist, N. 1977. Skogliga åtgärders inverkan på storlek och tillgänglighet av ekosystemets näringsförråd. I: Markvård. Skogsmarkens egenskaper och nyttjande. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 75, s. 167–178.

²²⁵ Nykvist, N. & Rosén, K. 1985. Effect of clear-felling and slash removal on the acidity of northern coniferous soils. *For. Ecol. Manage.* 11, s. 157–169.



Figur MV17. Exempel på näringsämnenas fördelning i skogsekosystem på sandsediment och torvmark (kg/ha). Överst: Tallbestånd på sandigt älvsediment, Vindeln, Ålder (1990) ca 65 år; volym 148 m³sk per ha. Data från Egnell m.fl., 1991.²²⁶ Underst: Granbestånd, Jägarmossen, Uppland. Ålder (1963) ca 65 år; volym 312 m³sk per ha; löpande (10 år) tillväxt 11,8 m³sk per ha och år. Data från Holmen, 1964.²²⁷ Illustration Bo Persson.

Anm. 1: Lättlösligt (växttillgängligt) förråd är skattat med AL-extraktion.

Anm. 2: Jägarmossens kärrtorv har Ca-halter som är högre än genomsnittet för liknande torvtyper.

²²⁶ Egnell, G., Albrektson, A., Örlander, G., Jansson, E. & Sjögren, H. 1991. Hesselmanns helhackningsförsök på tallhed i Vindeln – tillväxt och näringsförhållanden 67 år efter markberedning. SLU, inst. för skogsskötsel. *Arbetsrapporter* nr 55.

²²⁷ Holmen, H. 1964. Forest Ecological Studies on Drained Peat Land in the Province of Uppland, Sweden. Parts I–III. *Studia Forestalia Suecica*, no. 16.

Tabell MV6 Näringsmängder i ”medelskogen”. Skattade värden för ett skogsområde med normalsluten barrblandskog i Västerbottens kustland. Området domineras av medelålders bestånd. Genomsnittlig beståndsålder är 74 år, genomsnittlig stående volym är 163 m³sk per ha, och genomsnittlig löpande tillväxt 5,9 m³sk per ha och år. Data från Albrektson & Lundmark, 1988.²²⁸

	Torrsvikt	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg per hektar						
Stam	57000	54	6	31	82	11	6
<i>varav bark</i>	<i>5100</i>	<i>18</i>	<i>3</i>	<i>10</i>	<i>41</i>	<i>3</i>	<i>1</i>
Grenar	22000	125	16	61	76	11	14
<i>varav barr</i>	<i>6700</i>	<i>67</i>	<i>8</i>	<i>34</i>	<i>34</i>	<i>5</i>	<i>4</i>
Träd ovan mark	79000	180	22	92	158	22	20
Stubbe + rotsystem	23500	45	8	24	33	7	9
<i>varav stubbe</i>	<i>6200</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Träd	102000	224	31	116	191	29	29
Markvegetation ovan mark	4000	40	4	20	16	4	6
Mårskikt inkl. rötter	35000	525	24	52	140	35	28
Markvegetation och mår	39000	565	29	72	156	39	34
Ståndort (växter + mår)	141000	789	60	188	347	68	63

Fosfor och baskatjoner

Bestånd på fastmarker har mycket stora totalförråd av kalcium, kalium och magnesium men mindre totalförråd av fosfor (figur MV16; figur MV17, överst). Huvuddelen finns i mineraljorden. Tillgängligheten av näringsämnen från dessa totalförråd bestäms dock av de mycket långsamma vittringsprocesserna; det är därför frigörelsehastigheterna, inte förrådets storlek, som är det relevanta på kort sikt.

De lösliga (växttillgängliga) förråden, vilka förnyas i takt med mineralvittring och mineralisering av organiskt material, utgör däremot kortsiktigt tillgänglig näring. Det bör här påpekas att dessa skattningar av ”växttillgängliga” näringsmängder i jorden i grunden är osäkra, eftersom bestämningarna görs genom kemisk extraktion av jorden. Man kan dock konstatera att storleksordningen av dessa förråd i mineraljorden är väldigt mycket mindre än de totala förråden och har en mycket begränsad kapacitet för att buffra mot systemförluster.

Ett antagande om att näringsämnena i biomassan förs bort en gång vart 100:e år, kan ses som en enkel känslighetsanalys. Det blir då tydligt (figur MV16–17) vilka ungefärliga krav som måste ställas på tillskott genom vittring under 100-årsperioden (om mårslagrets totalförråd och de lösliga förråden ska hållas intakta).

Kväve

Situationen för kväve är något annorlunda (figur MV16; figur MV17, överst). Markens förråd av kväve är inte bundet i mineral utan i det ackumulerade organiska materialet. Kvävet frigörelse från förrådet avgörs därför av

²²⁸ Albrektson, A. & Lundmark, T. 1991. Vegetationens storlek och omsättning inom en barrskog i norra Sverige, samt näring i vegetation och mark och dess omsättning i samband med växandet. SLU, inst. för skogsskötsel. *Arbetsrapporter* nr 52.

den mikrobiella nedbrytningen och kvävemineraliseringen. Den totala kvävemängden i marken jämfört med mängden i beståndet kan tyckas tämligen stor, men det faktum att mycket av markkvävet är bundet i svårnedbrytbara humusämnen innebär en stark begränsning av kväveomsättningen. En avsevärd del av kvävet i mårлагret och huvuddelen av mineraljordens kväve är bundet i sådana stabila föreningar. De mest svårnedbrytbara har genomsnittliga omsättningstider på flera hundra år.

Förråden av lättillgängligt mineraliserat kväve i marken är oftast helt marginella (endast några kg per hektar – ej angivet i figuren). Kvävet tas upp av mikroorganismer eller växter så fort det blir tillgängligt. Storleken på vegetationens kväveupptag och tillväxt är alltså mycket nära kopplat till kvävemineraliserings hastighet.

Omvända förhållanden på torvmarker

Bestånd på djup torvmark saknar det långsiktiga förrådet knutet till vittningen av mineralpartiklar. De förråd av fosfor, kalium, kalcium och magnesium som finns i torven är näringsämnen som tillförts med tillrinnande grundvatten och med nederbörd, och som sedan byggts in i den torvbildande vegetationen. De totala förråden av fosfor, kalium (och även magnesium) är mycket små (figur MV17, underst). Av de totalmängder som finns i torven är dock en stor andel lösligt, särskilt för kalium.

En jämförelse av den stående biomassans innehåll av fosfor och kalium med totalförråden i torven pekar mot att systemet har mycket liten buffertförmåga mot näringsförluster med skörd.

Beträffande kvävet skiljer sig situationen istället till torvjordens fördel (figur MVF17, underst). Eftersom allt jordmaterial består av kvävehaltigt organiskt material finns det stora totalmängder kväve i torven. Visserligen är även i detta fall huvuddelen av kvävet bundet i svårnedbrytbara humusämnen. Men eftersom det totala förrådet är så stort, räcker det med en ganska blygsam nedbrytningshastighet av torven för att den sammantagna kvävemineraliseringen under 100 år ska motsvara det kväveinnehåll som år ackumuleras i beståndet.

Effekter av GROT-skörd

GROT (grenar och toppar) är avverkningsrester som ofta tas ut vid avverkning, främst slutavverkning. Denna skogsråvara används som biobränsle. Forskning kring följderna av en sådan ökad skördeintensitet har bedrivits alltsedan 1970-talet och erfarenheterna har successivt sammanställts.^{229,230,231,232,233}

²²⁹ Kardell, L. 1987. Kan marken undvara ris och stubbar? I: Skogen och energiförsörjningen. SLU. *Skogsfakta Konferens* nr 10, s. 9–27.

²³⁰ Wiklander, G. 1997. Skogsmarkens kemi. I: *Marken i skogslandskapet*, s. 163–186. Skogsstyrelsen.

²³¹ Egnell, G., Nohrstedt, H.-Ö., Weslien, J., Westling, O. & Örlander, G. 1998. Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränsleuttag, asktillförsel och övrig näringskompensation. Skogsstyrelsen. *Rapport* 1–1998.

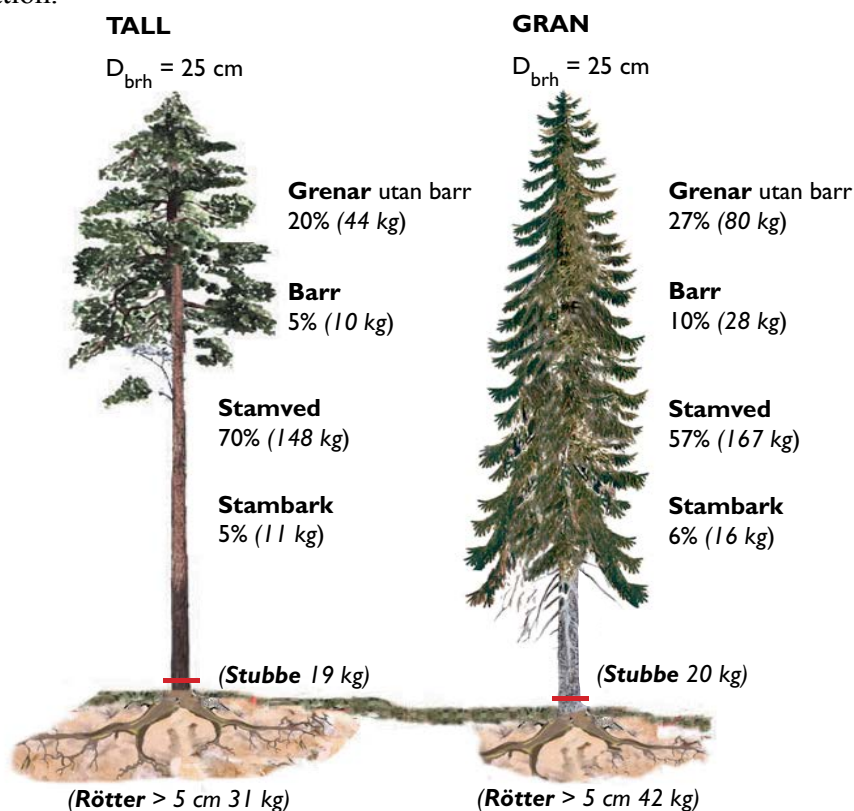
²³² Jacobson, S., Kukkola, M., Mälkönen, E. & Tveite, B. 2000. Effects of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. *For. Ecol. Manage.* 129, s. 47–56.

²³³ Energimyndigheten, 2006. Miljöeffekter av skogsbränsleuttag och askåterföring i Sverige. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram 1997 till 2004. Energimyndigheten *Rapport ER* 2006:44.

Som tidigare fastslagits, är det en vedertagen uppfattning att kvävetillgången begränsar produktionen i huvuddelen av våra skogar. De varierande boniteter vi kan mäta upp är alltså direkt kopplade till storleken på trädens faktiska upptag av kvävenäring (mineralkväve och aminosyra-kväve). Av detta följer att förlust av förna som skulle kunna ge nettomineralisering av kväve, i princip kan förväntas minska markens produktionsförmåga.

Vidare är det rimligt att anta att trädproduktionen drabbas mest negativt om en sådan förnaförlust inträffar under den period av beståndets livscykel när konkurrensen om kväve är som starkast – d.v.s. inte i plant- eller hyggesfasen utan i det slutna beståndet.

Vid bedömning av näringsförluster och produktionseffekter av biomassauttag kan erfarenheterna av konventionell stamskörd vara en rimlig jämförelsesituation.



Figur MV18. Fördelning av trädets biomassa. Angiven dels i procent av total biomassa ovan stubbe, dels som absoluta mängden torrsubstans. Beräknat för träd med 25 cm brösthöjdsdiameter, med Marklunds biomassafunktioner.²³⁴ Illustration Bo Persson

GROT med barr eller löv utgör ca 1/3 av biomassan ovan stubben (figur MV18). Det kan sköras färskt, d.v.s. med barr eller löv kvar på grenarna. Tillsammans med skörden av stammarna blir detta liktydigt med så kallat helträdsuttag. Uttag av GROT med kvarstående barr kan medföra 3–4 gånger större näringsförluster jämfört med enbart stamuttag, beroende på att halterna är höga i barr (tabell MV6). Alternativt kan GROT sköras efter avbarrning, även om detta i praktiken har visat sig problematiskt.

Näringsförlusterna blir då endast fördubblade jämfört med stamuttag.

²³⁴ Marklund, L.G. 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. SLU, inst. för skogstaxering. Rapport 45.

GROT-skörd ger tillväxtförluster

I de flesta fall ger GROT-uttag vid kalavverkning tillväxtförluster i granplanteringar. De negativa tillväxteffekterna 15–30 år efter avverkning motsvarar några års fördröjd tillväxtutveckling. I tallplanteringar har däremot tillväxtförluster inte kunnat påvisas. Efter röjning eller gallring med GROT-uttag är tillväxtförlusterna ca 10 % av grundyte- eller volymstillväxten och ungefär lika stora för gran och tall. Det är också visat att denna tillväxtförsämring i huvudsak beror på begränsad tillgång på kväve, inte på baskatjoner eller fosfor.²³⁵ Det är dock fortfarande oklart hur stora de ackumulerade förlusterna blir efter en full omloppstid, och likaså hur utvecklingen ser ut på ännu längre sikt. Kommer systematiskt upprepade GROT-uttag även under nästa trädgeneration att ytterligare minska tillväxten jämfört med traditionell stamskörd, eller kommer näringsutbudet och tillväxten att stabiliseras på en visserligen lägre men uthållig nivå?

GROT-skörd ger viss markförsurning

Uttag av GROT medför att den ökning av basmättnadsgraden i humuslagret som normalt sker efter hyggesupptagning blir mindre.^{236,237} Likaså blir normalt pH-ökningen mindre kraftig, jämfört med situationen då riset lämnas kvar. Vidare minskar utlakningen av baskatjoner (Ca, K, Mg). Riståktens effekter på nitratutlakningen är inte helt entydiga, men oftast minskar kväveutlakningen något, eftersom det mest kväverika förnamaterialet bortförs. Sammantaget kan alltså GROT-uttag vara en positiv åtgärd för att minska näringsutlakning under hyggesfasen, men samtidigt ha en försurande verkan på marken.

Olämpligt på torvmarker

På vissa djupa torvmarker kan till och med konventionell stamskörd leda till brist på fosfor eller kalium under nästa trädgeneration. De ytterligare förluster av fosfor och kalium som sker med uttag av GROT, gör en sådan åtgärd mycket olämplig på dessa marker. Om däremot ståndorten kompenseras genom PK-gödsling eller askgödsling, kan GROT-skörd möjligen vara försvarbart. Detta är dock inte studerat.

Effekter av stubbrytning

Skörd av stubbar stör ståndortens näringskretslopp på samma sätt som skörd av GROT. Biomassan som tas ut vid brytning av stubbar och grova rötter domineras emellertid av vedvävnad och bark, varför växtnäringsförlusterna blir avsevärt mindre än vid GROT-uttag (figur MV18; tabell MV6). Allvarliga negativa effekter på markens långsiktiga produktionsförmåga torde därför vara osannolika, möjligen med viss tvekan ifråga om grovkorniga, torra och humusfattiga mineraljordar, samt djupa torvjordar. Produktionsförluster på

²³⁵ Jacobson, S., Kukkola, M., Mälkönen, E. & Tveite, B. 2000. Effects of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. *For. Ecol. Manage.* 129, s. 47–56.

²³⁶ Nykvist, N. & Rosén, K. 1985. Effect of clear-felling and slash removal on the acidity of northern coniferous soils. *For. Ecol. Manage.* 11, s. 157–169.

²³⁷ Staaf, H. & Olsson, B.A. 1994. Effects of slash removal and stump harvesting on soil water chemistry in a clearcutting in SW Sweden. *Scand. J. For. Res.* 9, s. 305–310.

grund av stubbrytning har inte heller kunnat påvisas.^{238,239}

På likande sätt kan markförsurningseffekten av stubbskörd förväntas vara lägre än för GROT-skörd. Stubbarnas ved innehåller dock mycket kol, vilket dessutom avsätts nere i jorden där nedbrytningsförhållandena är mindre gynnsamma än på ytan, varför markens kolförråd skulle kunna påverkas mer negativt av stubbrytning än av GROT-skörd. En studie av markens kolförråd 20–25 år efter stubbskörd tyder på att markförrådet kan minska på vissa ståndortstyper, men att denna kolförlust kompenseras av större inbindning av kol i beståndet.²⁴⁰

Effekterna på grund- och ytvatten bör vara starkt kopplade till graden av markstörning, vilken är av samma storleksordning som efter markberedning. De två viktigaste aspekterna är partikelerosion till ytvatten och kväveutlakning. Liksom vid markberedning, beror sedimenttransporten till ytvatten i hög grad på markskadornas omfattning nära vattnet. En studie av stubbrytning i sydvästra Sverige har indikerat att nitrifikation och kortvarigt ökad kväveutlakning kan uppstå.²⁴¹

Tar baskatjonerna i marken slut?

Skogsbeståndens kvävebegränsning har under 1900-talet mildrats genom bland annat förbättrat skogstillstånd, större kvävenedfall från atmosfären och i någon mån även skogsgödsling. Effekten av detta är högre tillväxt, vilket ställer större krav på tillgång av andra näringsämnen i marken.

En viktig samtida förändring är ökningen av det försurande atmosfäriska nedfallet. Detta har under senare delen av 1900-talet medfört onaturligt stora förluster av framför allt baskatjoner från marken. Lägg slutligen därtill större biomassauttag i form av GROT och eventuellt även stubbar – vilket innebär avsevärt mycket större bortförsel av bland annat baskatjoner och fosfor. Mot denna bakgrund är det naturligt att fråga sig om tillväxten i framtidens skogar kan bli begränsad av något annat näringsämne än kväve.

Den kritiska frågan blir om vittringen, tillsammans med det atmosfäriska nedfallet, långsiktigt har kapacitet att tillföra de mängder baskatjoner och fosfor som krävs för att balansera summan av förluster genom försurningsrelaterad utlakning och genom biomassauttag.

Historisk vittringshastighet har skattats genom att jämföra ytskiktets mineralsammansättning med ovittrat material på större djup i profilen.²⁴² Framskrivning av sådana beräkningar till att gälla även den framtida vittringshastigheten är problematisk, eftersom det måste bygga på en del osäkra

²³⁸ Kardell, L. 1987. Kan marken undvara ris och stubbar? I: Skogen och energiförsörjningen. SLU. *Skogsfakta Konferens* nr 10, s. 9–27.

²³⁹ Energimyndigheten. 2007. Miljökonsekvenser av stubbskörd – en sammanställning av kunskap och kunskapsbehov. Energimyndigheten. *Rapport ER 2007:40*.

²⁴⁰ Egnell, G., Jurevics, A. & Peicl, M. 2015. Negative effects of stem and stump harvest and deep soil cultivation on the soil carbon and nitrogen pools are mitigated by enhanced tree growth. *For. Ecol. Manage.* 338, s. 57–67.

²⁴¹ Staaf, H. & Olsson, B.A. 1994. Effects of slash removal and stump harvesting on soil water chemistry in a clearcutting in SW Sweden. *Scand. J. For. Res.* 9, s. 305–310.

²⁴² Olsson, M. & Melkerud, P.-A. 1991. Determination of weathering rates based on geochemical properties of the soil. I: Environmental Geochemistry in Northern Europe. Proc. Symp. in Rovaniemi, Finland, 17–19 Oktober, 1989 (ed. Pulkinen, E.). *Geol. Survey of Finland, Special Paper* 9, s. 69–78.

antaganden. Inbegripet dessa osäkerheter, pekar emellertid resultaten mot att den beräknade vittringen inte kommer att kunna uppväga förluster av baskatjoner i ett skogsbruk med intensivt biomassanyttjande, samtidigt som nedfall av försurande ämnen fortgår.^{243,244}

Prognoserna förutsäger vidare, att underskottet av kalcium sannolikt blir allra störst, samt att inte ens traditionellt stamuttag är uthålligt inom vissa regioner i Sverige.

Ett annat angreppssätt har varit att skatta den framtida vittringen med simuleringsmodeller. Dessa modeller beräknar de befintliga markmineralens sönderfall med hjälp av kemiska jämviktsmodeller.²⁴⁵ Även denna prognosmetodik har indikerat att tillförsel av baskatjoner med nedfall och vittring inte kommer att kunna uppväga de sammantagna förlusterna orsakade av försurande nedfall och intensivt skogsbruk. Med detta som grund har allvarliga konsekvenser för skogarnas vitalitet och produktionsförmåga förutspått.^{246,247}

Debatt om skogsbrukets uthållighet

Med utgångspunkt från ovan beskrivna förutsägelser, fördes från 1990-talets början en debatt om skogsbrukets uthållighet och om de troliga framtida konsekvenserna för skogsekosystemen.²⁴⁸ Diskussionen om skogsbrukets uthållighet och konsekvenser är svår, eftersom denna fråga ingår i ett större och komplext sammanhang. För det första innefattar problemkomplexet inte bara förlust av baskatjoner genom biomassaskörd och genom antropogen försurning, utan även effekter av kvävenedfall och andra luftföroreningar. För det andra gäller konsekvensbedömningarna inte bara skogsträden och deras tillväxt, utan också ett stort antal andra skogsväxter och markorganismer med varierande toleransnivåer när det gäller markens kemiska tillstånd. Och för det tredje påverkar skogsmarken vattenekosystemen via avrinningsvattnet, varför även dessa konsekvenser måste beaktas.

I debatten bestreds aldrig åsikten att utarmning av markens tillgängliga förråd av baskatjoner, på grund av försurning och intensivt biomassanyttjande, kan få allvarliga och långsiktiga konsekvenser. Däremot ifrågasattes tillförlitligheten i simuleringsmodellernas resultat, liksom i de konsekvensbeskrivningar för skogsekosystemen som framfördes.^{249,250}

²⁴³ Olsson, M. Melkerud, P.-A. & Rosén, K. 1993. Regional modelling of base cation losses from Swedish forest soils due to whole-tree harvesting. I: *Applied Geochemistry, suppl.* Issue No. 2 (Hichon, B. & Fuge, R., eds.). Proc. From 2nd Internat. Symp. on Environmental Geochemistry, Uppsala 1991, s. 189–194.

²⁴⁴ Wiklander, G. 1997. Skogsmarkens kemi. I: *Marken i skogslandskapet*, s. 163–186. Skogsstyrelsen.

²⁴⁵ Warfvinge, P. & Sverdrup, H. 1992. Calculating critical loads of acid deposition with PROFILE – a steady state chemistry model. *Water, Air and Soil Pollution* 63, s. 119–143.

²⁴⁶ Sverdrup, H., Warfvinge, P. & Nihlgård, B. 1994. Assessment of soil acidification effects on forest growth in Sweden. *Water Air Soil Poll.* 78, s. 1–36.

²⁴⁷ Sverdrup, H. & Warfvinge, P. 1995. Critical loads of acidity for Swedish forest ecosystems. *Ecol. Bull.* 44, s. 75–89.

²⁴⁸ FRN. 1993. Behöver skogen intensivvårdas? *FRN, Källa* 42.

²⁴⁹ Lökke, H., Bak, J. Falkengren-Grerup, U., Finlay, R.D., Ilvesniemi, H., Nygardh, P.H., & Starr, M. 1996. Critical loads of acidic deposition for forest soils – is the current approach adequate? *Ambio* 25, s. 510–516.

²⁵⁰ Binkley, D. & Högberg, P. 1997. Does atmospheric deposition of nitrogen threaten Swedish forests? *For. Ecol. Manage.* 92, s. 119–152.

En avgörande osäkerhet i sammanhanget var att skogsekosystemets dynamiska natur till stor del blev obeaktad i de modeller som låg till grund för framförda scenarier. Med detta avses till exempel markorganismernas och växternas förmåga att anpassa sig till ändrade markförhållanden, liksom deras förmåga att direkt eller indirekt påverka vittringshastigheten.²⁵¹

De ”aktiva motåtgärder” som föreslogs, markkalkning och asktillförsel, ifrågasattes också. Osäkerheten gällde främst huruvida kalkning och asktillförsel verkligen skulle ge övervägande positiva och önskade effekter, jämfört med de negativa och oönskade effekter som åtgärderna förvisso också kan ha.^{252,253,254,255}

Försöksverksamhet med kalkning och asktillförsel

Mediadebatten om skogsskador var i slutet av 1980-talet och början av 1990-talet mycket intensiv. I Sverige rapporterades eskalerande skogsskador i form av barrförluster som gav kronutglesning, samt onormala kådflöden i granskog. Hotbilden mot skogen förstärktes av larmrapporter om stora arealer döende skog i framför allt Tyskland och Tjeckien (”Waldsterben”, ”Skogsdöden”, ”Forest Decline”).²⁵⁶

Skogsvårds- och naturvårdsmyndigheter efterfrågade kunskapsunderlag för att eventuellt vidta motåtgärder, däribland kalkning och asktillförsel. Skogsstyrelsen fick 1989 i uppdrag att ”planera och utveckla beredskap för kalknings- och vitaliseringsinsatser i skogsmark”.²⁵⁷ Trots oenigheten bland forskare startades en tämligen omfattande försöksverksamhet i sydvästra Sverige. Denna pågick mellan 1993 och 2002 (se ”Gödsling”). Syftet var dels att åtgärden skulle motverka skogsmarkens försurning och följeffekter av denna, såsom näringsobalans (baskatjoner), sämre trädvitalitet och floraförändringar, dels att den skulle motverka försurningen av ytvatten.

En slutlig utvärdering av Skogsstyrelsens kalkningsverksamhet mellan 1993 och 2003 har emellertid lett till en omsvängning så att storskalig kalkning inte längre rekommenderas.²⁵⁸ Det finns flera skäl till att den sammantagna bedömningen ändrats.

²⁵¹ Rosling, A. & Finlay, R. 2004. Mykorrhizasvampar kan vittra mineraljord. SLU. *FaktaSkog* nr 15–2004.

²⁵² Naturvårdsverket, 1996. Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från naturvårdsverkets försöksverksamhet (red. Staaf, H., Persson, T. och Bertills, U.). Naturvårdsverket. *Rapport* 4559.

²⁵³ Johansson, M.-B., Nilsson, T. & Olsson, M. 1999. Miljökonsekvensbeskrivning av Skogsstyrelsens förslag till åtgärdsprogram för kalkning och vitalisering. Skogsstyrelsen. *Rapport* 1–1999.

²⁵⁴ Skogsstyrelsen. 2001. Markförsurning & Motåtgärder. Skogsstyrelsen. *Temaserie. Rapport* nr 11A, nr 11B, nr 11C, nr 11D, nr 11E, nr 11F, nr 11G, nr 11H, nr 11I.

²⁵⁵ Energimyndigheten. 2006. Miljöeffekter av skogsbränsleuttag och askåterföring i Sverige. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram 1997 till 2004. Energimyndigheten *Rapport ER* 2006:44.

²⁵⁶ Huettl, R.F. & Mueller-Dombois, D. (eds.). 1993. *Forest decline in the Atlantic and Pacific region*. Springer Verlag.

²⁵⁷ Skogsstyrelsen. 2001. Åtgärder mot markförsurning och för ett uthålligt brukande av skogsmarken. *Meddelande* 4–2001.

²⁵⁸ Hjerpe, K., Olsson, P. & Eriksson, H. 2008. Skogsmarkskalkning. Skogsstyrelsen. *Rapport* 15–2008.

Det finns inte längre starka motiv för den ”vitalisering” av barrskogsbestånd som på tidigt 1990-tal ansågs behövas. Skogsskador i form av kronutglesning och kådflöden har inte kunnat knytas till försurad mark, och tendenser till minskad tillväxt i försurade områden har inte kunnat påvisas.^{259,260}

I bok- och ekbestånd i sydligaste Sverige har dock ett samband mellan kronutglesning och basmättnadsgrad i marken påvisats.²⁶¹

Det allmänna försurningsläget i skogsmark, mätt som markens pH och basmättnadsgrad, har efter de senaste årtiondenas nedgång i svaveldeposition förbättrats snabbare än förväntat.²⁶² Likaså har en naturlig återhämtning skett i försurade ytvatten. Dessa trender har dock inte märkbart förstärkts i de områden där kalkning utförts. Den relativt låga giva som spridits i Skogsstyrelsens kalkningsprogram (ca 3 ton kalkverkan/ha) har visserligen höjt pH och basmättnadsgrad i markens ytskikt, men har visat sig otillräcklig för att få avsedd verkan på större djup i marken och i avrinnande vatten från de kalkade områdena.²⁶³

Avslutningsvis bör sägas att även om inställningen till storskalig skogsmarkskalkning har ändrats, så är frågan om skogsbrukets påverkan på skogsmarkens näringsbalanser och ytvattens kvalitet fortsatt viktig. Alternativa långsiktiga strategier för att förändra skogsbrukets påverkan på mark och vatten i önskad riktning, kommer sannolikt att uppmärksammas mera. Det kan exempelvis gälla näringskompensation vid intensivt biomassanyttjande, anpassad skogsskötsel och trädslagssammansättning.

²⁵⁹ Elfving, B. & Tegnhamar, L. 1996. Trends of tree growth in Swedish forests 1953–1992: an analysis based on sample trees from the National Forest Inventory. *Scand. J. For. Res.* 11, s. 38–49.

²⁶⁰ Andersson, S. & Hildingsson, A. 2004. Effekttuppföljning av skogsmarkskalkning. Skogsstyrelsen. *Rapport 1–2004*.

²⁶¹ Andersson, S. & Sonesson, K. 2000. Skogsskadeinventering av bok och ek i Sydsverige 1999. Skogsstyrelsen. *Rapport 6–2000*.

²⁶² Stendahl, J. 2007. Utvärdering av miljötillståndet och trender i skogsmark. I: Bara naturlig försurning. Bilagor till underlagsrapport till fördjupad utvärdering av miljömålen, bilaga 2. Naturvårdsverket. *Rapport 5780*.

²⁶³ Löfgren, S., Zetterberg, T., Larsson, P.-E., Cory, N., Klarqvist, M., Kronnäs, V. & Lång, L.-O. 2008. Skogsmarkskalkningens effekter på kemin i mark, grundvatten och ytvatten i SKOKAL-områdena 16 år efter behandling. Skogsstyrelsen. *Rapport 16–2008*.

Litteratur

- Ahti, E. & Päivänen, J. 1997. Responses of stand growth and water table level to maintenance of ditch networks within forest drainage areas. In: Trettin, C., Jurgensen, M., Grigal, M., Gale, M. & Jeglum, J. (eds.). Northern Forested Wetlands. Ecology and Management. Lewis Publishers.
- Akselsson, C., Westling, O. & Örlander, G. 2004. Regional mapping of nitrogen leaching from clearcuts in southern Sweden. *For. Ecol. Manage.* 202, s. 235–243.
- Albrektson, A. & Lundmark, T. 1991. Vegetationens storlek och omsättning inom en barrskog i norra Sverige, samt näring i vegetation och mark och dess omsättning i samband med växandet. SLU, inst. för skogsskötsel. Arbetsrapporter nr 52.
- Andersson, S. & Hildingsson, A. 2004. Effekttuppföljning av skogsmarkskalkning. Skogsstyrelsen. Rapport 1–2004.
- Andersson, S. & Sonesson, K. 2000. Skogsskadeinventering av bok och ek i Sydsverige 1999. Skogsstyrelsen. Rapport 6–2000.
- Andersson, S. & Wiklert, P. 1972. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XXIII. Grundförbättring Nr 2–3, 1972.
- Berg, A. 1932. Studier över restbeståndet i den svårförnygrade granskogen. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1932, s. 182–235.
- Berg, B. 1999. Humusupplagring i svensk skogsmark – en sänka för koldioxid. SLU. FaktaSkog nr 6–1999.
- Berg, B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133, s. 13–22.
- Berg, B. 2000. Uppbyggnad av humuslager i boreal skog – från förna till humus. Energimyndigheten. TB 00/5.
- Bergh, J., Linder, S. & Bergström, J. 1999. Intensivodling av gran – en outnyttjad möjlighet. SLU. FaktaSkog nr 2–1999.
- Bergh, J. & Oleskog, G. 2006. Slutrapport för Fiberskogsprogrammet. SLU, inst. för sydsvensk skogsvetenskap. Arbetsrapport nr 27.
- Bergquist, B., Lundin, L. & Andersson, A. 1984. Hydrologiska och limnologiska konsekvenser av skogs- och myrdikning. Siksjöbäcksområdet 1979–1983. Uppsala universitet. Limnologiska institutionen. Rapport LIU 1984 B:4.
- Binkley, D. & Högberg, P. 1997. Does atmospheric deposition of nitrogen threaten Swedish forests? *For. Ecol. Manage.* 92, s. 119–152.
- Bishop, K. & Åkerblom, S. 2006. Skogsbruk och kvicksilverproblematik i mark och vatten. En översikt av kunskapsläget. SLU, inst. för Miljöanalys. Rapport 2006:21.
- Bohlin, E., Hämäläinen, M. & Sundén, T. 1989. Botanical and chemical characterization of peat using multivariate methods. *Soil Science* 147, s. 252–263.
- Braekke, F. 1970. Myrgröftning för skogsproduktion. *Tidskrift för Skogsbruk* 78, s. 227–238.
- Braekke, F. 1972. Varmehusholdning og mikroklima på ulike myrtyper. *Meddelanden fra det Norske Skogsforsøksvesen* nr 119, hefte 1.
- Braekke, F. 1994. Diagnostiske grenseverdier for nærings-elementer i gran- og furunåler. NISK, No. 15.
- Breemen, N. van, Finlay, R., Lundström, U., Jongmans, A.G., Giesler, R. & Olsson, M. 2000. Mycorrhizal weathering – a true case of mineral plant nutrition. *Biogeochemistry* 49, s. 53–67.
- Christensen, W. 1941. Moseafvanding og svovelsyreforgiftning i vandløb. *Ferskvandsfiskeribladet* 39, s. 67–78.
- Dahl, K. 1923. Masedød blandt ørret ved forgiftning med avløbsvand fra myrer. *Norsk Jaeger og Fisker*. Hefte 2, s. 1–5.
- Dahlberg, A., Croneberg, H. & Hallingbäck, T. 2000. Sveriges mykorrhizasvampar – en översikt av arter, förekomst och ekologi. *Svensk Botanisk Tidskrift* 94, s. 267–285.
- DeLuca, T. H., Zackrisson, O. & Nilsson, M.C. 2002. Quantifying nitrogen-fixation in feather moss carpets of boreal forests. *Nature* 419, s. 917–920.
- Derome, J., Kukkola, M. & Mälkönen, E. 1986. Forest liming on mineral soils. Results from Finnish experiments. Naturvårdsverket. Rapport 38.
- Ebeling, F. 1972. Norrländska skogsvårdsfrågor. Skogsstyrelsen.

- Egnell, G., Albrektson, A., Örlander, G., Jansson, E. & Sjögren, H. 1991. Hesselmanns helhackningsförsök på tallhed i Vindeln – tillväxt och näringsförhållanden 67 år efter markberedning. SLU, inst. för skogsskötsel. Arbetsrapporter nr 55.
- Egnell, G., Nohrstedt, H.-Ö., Weslien, J., Westling, O. & Örlander, G. 1998. Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränsleuttag, asktillförsel och övrig näringskompensation. Skogsstyrelsen. Rapport 1–1998.
- Egnell, G., Jurevics, A. & Peicl, M. 2015. Negative effects of stem and stump harvest and deep soil cultivation on the soil carbon and nitrogen pools are mitigated by enhanced tree growth. *For. Ecol. Manage.* 338, s. 57–67.
- Eklöf, K. & Bishop, K. 2010. Export av kvicksilver tuill akvatiska miljöer – skogsbrukets påverkan. SLU. FaktaSkog nr 7–2010.
- Eklöf, K., Kraus, A., Weyhenmeyer, G.A., Meili, M. & Bishop, K. 2010. Forestry influence by stump harvest and site preparation on methylmercury, total mercury and other stream water chemistry parameters across a boreal landscape. *Ecosystems* 15, s. 1308–1320.
- Elfving, B. & Tegnhammar, L. 1996. Trends of tree growth in Swedish forests 1953–1992: an analysis based on sample trees from the National Forest Inventory. *Scand. J. For. Res.* 11, s. 38–49.
- Eliasson, L. & Wästerlund, I. 2007. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. *For. Ecol. Manage.* 232, s. 118–123.
- Energimyndigheten. 2007. Miljökonsekvenser av stubbskörd – en sammanställning av kunskap och kunskapsbehov. Energimyndigheten. Rapport ER 2007:40.
- Energimyndigheten. 2006. Miljöeffekter av skogsbränsleuttag och askåterföring i Sverige. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram 1997 till 2004. Energimyndigheten Rapport ER 2006:44.
- Eneroth, O. 1937. Självföryngringen på kalhuggna granråhumusmarker. Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift 1937.
- Eriksson, J., Nilsson, I. & Simonsson, M. 2005. Wiklanders Marklära. Studentlitteratur.
- Ernfors, M., von Arnold, K., Stendahl, J., Nordin, A., Giesler, R., Högberg, M. & Högberg, P. 2007. Nitrous oxide emissions from drained organic forest soils – an up-scaling based on C:N ratios. *Biogeochemistry* 84, s. 219–231.
- Fagerström, H., Wiesel, C.-E. & SGF:s laboratoriekommitté. 1972. Permeabilitet och kapillaritet. BFRs informationsblad B7:1972.
- Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. 1980. Skogsproduktion på våtmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Redogörelse nr 3–1980.
- FRN, 1993. Behöver skogen intensivvårdas? Källa 42.
- Fröding, A. 1992. Gallringsskador – en studie av 403 bestånd i Sverige 1988. SLU, inst. för skogsteknik. Rapport nr 193.
- Goulet, F. 2000. Frost heaving of planted seedlings in the boreal forest of Northern Sweden. SLU, inst. för skogsskötsel. Rapport nr 45.
- Grip, H. & Rohde, A. 1988. Vattnets väg från regn till bäck. Hallgren & Fallgren Studieförlag.
- Gustafsson, J. 1980. Dikningsteknik. I: Skogsproduktion på torvmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Redogörelse nr 3–1980.
- Hallsby, G. 1995. Hyggesbränningens inflytande på virkesproduktionen i boreala skogar. En uppdatering av kunskapsläget beställd av MoDo skog november 1995. SLU, inst. för skogsskötsel. Arbetsrapporter nr 109.
- Hannerz, M., Holmen, H. & Sundström, E. 1988. Från myr till skog. Skogsodlingsförsök med olika dikesavstånd och gödselgivor på kal myr. SLU, inst. för skoglig ståndortslära. Stencil nr 9.
- Heikurainen, L. 1972. Hydrological changes caused by forest drainage. International Association of Hydrological Science (IAHS-AISH), Publ. 105, s. 493–499.
- Heikurainen, L. 1973. Skogsdikning. P.A. Nohrstedt & Söners Förlag, Stockholm.
- Heikurainen, L., Kenttämies, K. & Laine, J. 1978. The environmental effects of forest drainage. *Suo* 29, s. 49–58. Helsingfors.
- Hesselman, H. 1917. Om våra skogsföryngringsåtgärders inverkan på salpeterbildningen i marken och dess betydelse för barrskogens föryngring. Meddelanden från Statens skogs-försöksanstalt 13–14, s. 297–528.
- Hesselman, H. 1919. Studier over de norrländska tallhedarnas föryngringsvillkor. II.

- Svenska Skogsvårdsföreningens Tidskrift 1919, s. 29–76.
- Hesselman, H. 1937. Om humustäckets beroende av beståndets ålder och sammansättning i den nordiska granskogen av blåbärsrik *Vaccinium*typ och dess inverkan på skogens förnyring och tillväxt. Meddelanden från Statens skogsförsöksanstalt 30, s. 529–716.
- Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics. Academic Press Inc.
- Hjerpe, K., Olsson, P. & Eriksson, H. 2008. Skogsmarkskalkning. Skogsstyrelsen. Rapport 15–2008.
- Holmen, H. 1964. Forest Ecological Studies on Drained Peat Land in the Province of Uppland, Sweden. Parts I–III. *Studia Forestalia Suecica*, no. 16.
- Holmen, H. 1980. Produktionsförutsättningar, klassificering och arealtillgång. I: Skogsproduktion på torvmark. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Redogörelse nr 3–1980.
- Holmgren A & Törngren E, 1932. Studier i den norrländska förnyrningsfrågan. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1932, s. 9–133.
- Holt Hansen, K., Granhus, A., Bergsten, U., Ottosson Löfvenius, M., Grip, H. & de Chantal, M. 2007. Frost-heaving damage to one-year-old *Picea abies* seedlings increases with soil horizon depth and canopy gap size. *Can. J. For. Res.* 37, s. 1236–1243.
- Huettl, R.F. & Mueller-Dombois, D. (eds.). 1993. Forest decline in the Atlantic and Pacific region. Springer Verlag.
- Hånell, B. 2008. Handledning i bonitering. Del 4. Torvmark: praktiska anvisningar. Skogsstyrelsen. 16 s.
- Hånell, B. 1987. Torvmark. I: Lundmark J.-E. Skogsmarkens ekologi. Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 2 – tillämpning. Skogsstyrelsen.
- Hånell, B. 2004. Arealer för skogsgödsling med träaska och torvaska på organogena jordar i Sverige. Värmeforsk. Miljöriktig användning av askor 872.
- Hånell, B. 2009. Möjlighet till höjning av skogsproduktionen i Sverige genom dikesrensning, dikning och gödsling av torvmarker. I: Fahlvik, N., Johansson, U & Nilsson, U. (eds.). Skogsskötsel för ökad tillväxt. Faktaunderlag till MINT-utredningen. SLU. Rapport. Bilaga 4:1–28.
- Hällström, C., Karlsson, L., Gren, L., Myrdal-Runebjer, E., Kardell, Ö. & Lorén, D. 2001. Fornlämningar och kulturmiljöer i skogsmark. Skogsstyrelsen. Rapport 8E–2001.
- Högberg, P., Larsson, S., Lundmark, T., Moen, J., Nilsson, U. & Nordin, A. 2014. Effekter av kvävegödsling på skogsmark. Kunskapssammanställning utförd av SLU på begäran av Skogsstyrelsen. Skogsstyrelsen. Rapport 1.
- Högberg, M.N., Myrold, D.D., Giesler, R. & Högberg, P. 2006. Contrasting patterns of soil N-cycling in model ecosystems of fennoscandian boreal forests. *Oecologia* 147, s. 96–107.
- Högbom, L. & Jacobson, S. 2002. Kväve 2002 – en konsekvensbeskrivning av skogsgödsling i Sverige. Skogforsk. Redogörelse nr 6–2002.
- Hökkä, H., Alenius, V. & Salminen, H. 2000. Predicting the need for ditch network maintenance in drained peatland sites in Finland. *Suo* 51, s. 1–10. Helsingfors.
- Inselsbacher, E. & Näslund, T. 2012. The below-ground perspective of forest plants: soil provides mainly organic nitrogen for plants and mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 195, s. 329–334.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis Report. Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds. Pachauri, R.K. & Meyer, L. IPCC, Geneva, Switzerland).
- Jacobson, S., Kukkola, M., Mälkönen, E. & Tveite, B. 2000. Effects of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. *For. Ecol. Manage.* 129, s. 47–56.
- Jansson, K.-J. 1998. Effects of machinery traffic in forestry on soil properties and tree growth. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria* 66.
- Johansson, M.-B. 1987. Radikal markberedning – olämpligt sätt att utnyttja kväveförrådet i avverkningsresterna. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 2, s. 35–41.
- Johansson, M.-B., Nilsson, T. & Olsson, M. 1999. Miljökonsekvensbeskrivning av Skogsstyrelsens förslag till åtgärdsprogram för kalkning och vitalisering. Skogsstyrelsen. Rapport 1–1999.
- Jönsson, O. & Nilsson, C. 1996. Aska från biobränslen. Kungliga Skogs- och

- Lantbruksakademiens Tidskrift 135, s. 25–36.
- Kardell, L. 1987. Kan marken undvara ris och stubbar? I: Skogen och energiförsörjningen. SLU. Skogsfakta Konferens nr 10, s. 9–27.
- Karlsson, P.E., Zetterberg, T., Hellsten, S. & Munthe, J. 2007. Kvicksilverutlakning från växande, avverkad och stormskadad skog. IVL Rapport B1767.
- Kasimir Klemedtsson, Å., Nilsson, M., Sundh, I. & Svensson, B. 2000. Växthusgasflöden från myrar och organogena jordar. Naturvårdsverket. Rapport 5132.
- Korkama, T., Fritze, H., Pakkanen, A. & Pennanen, T. 2007. Interactions between extraradical ectomycorrhizal mycelia, microbes associated with the mycelia and growth rate of Norway spruce (*Picea abies*) clones. *New Phytologist* 173, s. 798–807.
- Kronnäs, V., Westerberg, I., Zetterberg, T., Pröjts, J., Holmström, C. & Stibe, L. 2012. Långsiktiga effekter på vattenkemi, öringbestånd och bottenfauna efter ask- och kalkbehandling i hela avrinningsområden i brukad skogsmark – utvärdering 13 år efter åtgärder mot försurning. Skogsstyrelsen. Rapport 6–2012.
- KSLA. 2007. How to estimate N and P losses from forestry in northern Sweden. Kungl. Skogs- och Lantbruksakad. Tidskr. 2–2007.
- Lauhanen, R. & Ahti, E. 2001. Effects of maintaining ditch networks on the development of Scots pine stands. *Suo* 52, s. 29–38. Helsingfors.
- Linder, S. 1995. Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce. *Ecological Bulletins* 44, s. 178–190.
- Linder, S. 1997. Virkesproduktionens gränser. Kungliga Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift 136, s. 21–27.
- Lindquist, B. 1937. Om några parasitiska marksvampar i nordsvenska råhumusmarker. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1937, s. 289–317.
- Lindroth, A. & Grip, H. 1987. Orsaker till avrinningsökning efter kalavverkning. *Vatten* 43, s. 291–298.
- Lundin, L. 1979. Kalhuggningens inverkan på markvattenhalt och grundvattennivå. SLU. *Rapporter i skogsekologi och skoglig marklära* 36.
- Lundin, L. 1995. Vattnet i skogsmarken. Skogsbrukets effekter på hydrologi och vattenkemi. *Skog och Forskning* 1995, s. 8–16.
- Lundmark, J.-E. 1977. Marken som en del av det skogliga ekosystemet. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 2, s. 109–122.
- Lundmark, J.-E. 1988. Skogsmarkens ekologi. *Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 1 – Grunder*. Skogsstyrelsen.
- Lundmark, J.-E. 1988. Skogsmarkens ekologi. *Ståndortsanpassat skogsbruk. Del 2 – Tillämpning*. Skogsstyrelsen.
- Löske, H., Bak, J., Falkengren-Grerup, U., Finlay, R.D., Ilvesniemi, H., Nygardh, P.H., & Starr, M. 1996. Critical loads of acidic deposition for forest soils – is the current approach adequate? *Ambio* 25, s. 510–516.
- Löfgren, S. 1991. Naturliga och antropogena källors betydelse för de ökade halterna av kväve och organiskt material i Västerdalälven och Klarälven, 1965–89. Naturvårdsverket Rapport 3902.
- Löfgren, S. 2006. Åtgärder i skogen försumbara för Östersjön. I: *Formas fokuserar, Östersjön – hot och hopp*, s. 177–187. Formas.
- Löfgren, S., Zetterberg, T., Larsson, P.-E., Cory, N., Klarqvist, M., Kronnäs, V. & Lång, L.-O. 2008. Skogsmarkskalkningens effekter på kemin i mark, grundvatten och ytvatten i SKOKAL-områdena 16 år efter behandling. Skogsstyrelsen. Rapport 16–2008.
- Magnusson, T. 1982. Skogs- och myrdikningens inverkan på försurningen av ytvatten – en litteraturstudie. Naturvårdsverket. Rapport 1626.
- Magnusson, T. & Hånell, B. 1996. Aska till skog på torvmark. NUTEK. Ramprogram Askåterföring, R 1996:85.
- Magnusson, T. & Hånell, B. 2000. Aska för beskogning av torvtäcker. Påverkan på växtnäringförhållanden, tungmetallhalter och vattenkvalitet. Energimyndigheten, ER 2000.
- Malmström, C. 1928. Våra torvmarker ur skogsdikningssynpunkt. *Meddelanden från Statens skogsförsöksanstalt* 1928, 24.
- Marklund, L.G. 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. SLU, inst. för skogstaxering. Rapport 45.
- Melin, E. 1927. Studier över barrträdsplantans utveckling i råhumus II. Mykorrhizas utbildning hos tallplantan i olika råhumusformer. *Meddelande från Statens*

- Skogsförsöksanstalt 23, s. 433–494.
- Melin, E. & Nilsson, H. 1953. Transfer of labelled nitrogen from glutamic acid to pine seedlings through the mycelium of *Boletus variegates*. *Nature* 171, s. 134.
- Munthe, J. & Hultberg, H. 2004. Mercury and methylmercury in run-off from a forested catchment – concentrations, fluxes and their response to manipulations. *Water Air and Soil Pollution* 4, s. 607–618.
- Möller, G. 1983. Borbristskador efter upprepad kvävegödsling på fastmark. Föreningen skogsträdförädling, Institutet för skogsförbättring. Årsbok 1982, s. 47–70.
- Naturvårdsverket, 1996. Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från naturvårdsverkets försöksverksamhet (red. Staaf, H., Persson, T. och Bertills, U.). Naturvårdsverket. Rapport 4559.
- Nilsson, M.-C. & Wardle, D. 2005. Understorey Vegetation as a Forest Ecosystem Driver: Evidence from the Northern Swedish Boreal Forest. *Frontiers in Ecology and the Environment* 3, s. 421–428.
- Nohrstedt, H.-Ö. 1990. Tillväxteffekter vid gödsling med olika näringsämnen i barrskog. En sammanfattning av resultat erhållna vid Institutet för skogsförbättring. I: Liljelund L.-E., Lundmark, J.-E., Nihlgård, B., Nohrstedt, H.-Ö. & Rosén, K. Skogsvitalisering. Kunskapsläge och forskningsbehov. Naturvårdsverket. Rapport 3813.
- Nohrstedt, H.-Ö. 1993. Den svenska skogens kvävestatus. Skogforsk. Redogörelse nr 8–1993.
- Nohrstedt, H.-Ö. & Westling, O. 1995. Miljökonsekvensbeskrivning av STORA SKOGs gödslingsprogram, Del 2, bedömning. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning, B 1219, Aneboda.
- Nömmik, H. & Wiklander, G. 1983. Syra/bas verkan hos kvävegödselmedel använda vid skogsgödsling. Naturvårdsverket. Rapport PM 1657.
- Normark, E. 2011. Riktlinjer för uthålligt skogsbruk. Holmen Skog. Tillgänglig på: <http://www.holmen.com/sv/Skog/>
- Nykvist, N. 1977. Skogliga åtgärders inverkan på storlek och tillgänglighet av ekosystemets näringsförråd. I: Markvård. Skogsmarkens egenskaper och nyttjande. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 75, s. 167–178.
- Nykvist, N. 2000. Effects of clearfelling, slash removal and prescribed burning on amounts of plant nutrients in biomass and soil. *Studia Forestalia Suecica* no 210.
- Nykvist, N. & Rosén, K. 1985. Effect of clear-felling and slash removal on the acidity of northern coniferous soils. *For. Ecol. Manage.* 11, s. 157–169.
- Näsholm, T., Högberg, P., Franklin, O. & Högberg, M.N. 2014. Är mykorrhizan en bidragande orsak till skogens kvävebrist? SLU. FaktaSkog 1–2014.
- Teikmanis, A. 1954. Några studier över de mossrika granskogarna i Norrland och deras förnyrningsproblem. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1954, s. 307–434.
- Odin, H. 1969. Hyggesstruktur och mikroklimat. I: Förnyrningsfrågor i det mekaniserade skogsbruket. Kurskompendium. Sveriges Jägmästares och Forstmästares Riksförbunds Fortbildnings AB, samt SLU, inst. för skogsförnyring.
- Odin, H. 1976. Skogsmeteorologiska faktorer förändring med kalhuggning. Del I. Skogshögskolan, inst. för skogsförnyring. Rapporter och uppsatser nr 73–1976.
- Odin, H. 1983. Kompendium i skogsmeteorologi. SLU, inst. för skoglig ståndortslära.
- Olsson, M. 1977. Körskador i skogsbruket – ett markvårdsproblem. I: Markvård – skogsmarkens egenskaper och nyttjande. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 2–3 1977 (specialnummer), s. 233–247.
- Olsson, M. & Melkerud, P.-A. 1991. Determination of weathering rates based on geochemical properties of the soil. I: *Environmental Geochemistry in Northern Europe*. Proc. Symp. in Rovaniemi, Finland, 17–19 Oktober, 1989 (ed. Pulkinen, E.). Geol. Survey of Finland, Special Paper 9, s. 69–78.
- Olsson, M. Melkerud, P.-A. & Rosén, K. 1993. Regional modelling of base cation losses from Swedish forest soils due to whole-tree harvesting. I: *Applied Geochemistry*, suppl. Issue No. 2 (Hichon, B. & Fuge, R., eds.). Proc. From 2nd Internat. Symp. on Environmental Geochemistry, Uppsala 1991, s. 189–194.
- Ottosson Löfvenius, M. & Loman, G. 1997. Lokal- och mikroklimat. I: Marken i skogslandskapet. Skogsstyrelsen.
- Ottosson Löfvenius, M. & Perttu, K. 2005. Kompendium i Klimatologi – med introduktion

- till Skogsmeteorologin. SLU, inst. för skogsekologi.
- Paavilainen, E. & Päiväven, J. 1995. *Peatland Forestry – ecology and principles*. Springer Verlag. 248 s.
- Person, J., Näsholm, T. & Högberg, P. 2000. *Aminosyror – en ny kvävekälla i skogen!* SLU. FaktaSkog, nr 14–2000.
- Persson, H. 1983. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil* 71, s. 87–101.
- Pessi, Y. 1958. On the influence of bog draining upon thermal conditions in the Soil and in Air near the ground. *Acta Agriculturae Scandinavica* VIII:4, s. 359–374.
- Porvari, P., Verta, M., Munthe, J. & Haapanen, M. 2003. Forestry practices increase mercury and methyl mercury output from boreal forest catchments. *Environmental Sciences and Technology* 37, s. 2389–2393.
- Ramberg, L. 1981. Increase in stream pH after forest drainage. *Ambio* 10, no 1.
- Ring, E. 1997. Miljöeffekter av bränder i skogsekosystem – en litteraturoversikt med Norden i brännpunkten. SkogForsk. Redogörelse nr 2–1997.
- Rodhe, A. 1997. Vattnet i skogen. I: Marken i skogslandskapet, s. 81–103. Skogsstyrelsen.
- Romell, L.-G. 1934. En biologisk teori för mårbildning och måraktivering. Stockholm.
- Romell, L.-G. 1938. Markreaktionen efter gallringar och dess orsaker. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 43, s. 1–8.
- Romell, L.-G. 1966. Röningsbruket och dess hemlighet. *Ymer. Årsbok* 1966, s. 183–196.
- Romell, L.-G. & Malmström, C. 1945. Henrik Hesselmanns tallhedsförsök åren 1922–42. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt* 34, s. 609–625.
- Rosén, K., Aronsson, J.-A. & Eriksson, H.M. 1996. Effects of clear-cutting on streamwater quality in forest catchments in central Sweden. *For. Ecol. Manage.* 83, s. 237–244.
- Rosén, K. & Lindberg, T. 1980. Biological nitrogen-fixation in coniferous forest watershed areas in central Sweden. *Holarctic Ecology* 3, s. 137–141.
- Rosén, K. & Lundmark-Thelin, A. 1986. Hyggesbruket och markvården. I: Skogen som natur och resurs – mark-flora-fauna. Skogshögskolans höstkonferens 3–4 december 1985, Uppsala. SLU. Skogsfakta Konferens nr 9, s. 42–49.
- Rosling, A. & Finlay, R. 2004. Mykorrhizasvampar kan vittra mineraljord. SLU. FaktaSkog nr 15–2004.
- Scott Russel, R. 1982. *Plant Root Systems. Their function and interaction with the soil*. ELBS/McGraw-Hill Book Company Ltd.
- Silfverberg, K. 1996. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. *The Finnish Forest Research Institute. Research Papers* 558.
- Simonssons, P. 1987. Skogs- och myrdikningens miljökonsekvenser. Naturvårdsverket. Rapport 3270.
- Sirén, G. 1955. The development of Spruce forest on raw humus sites in northern Finland and its ecology. *Acta Forestalia Fennica* 62.
- Sikström, U., Björk, R.G. & Klemedtsson, L. 2012. Tillförsel av aska i skog på dikad torvmark i södra Sverige – skogsproduktion och emission av växthusgaser. Värmeforsk. Askprogrammet. Arbetsrapport nr 29.
- Sjöberg, K., Pihl Karlsson, G., Svensson, A., Wängberg, I., Brorström-Lundén, E., Hansson, K., Potter, A., Rehgren, E., Sjöblom, A., Areskoug, H., Kreuger, J., Södergren, H., Andersson, C., Holmin Fridell, S. & Andersson, S. 2013. *Nationell Miljöövervakning – Luft*. Data t.o.m. 2011. IVL Svenska miljöinstitutet. Rapport B 2109.
- Skogsproduktion på våtmark. 1980. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Redogörelse nr 3–1980.
- Skogsstyrelsen. 2001. Markförsurning & Motåtgärder. Skogsstyrelsen. Temaserie. Rapport nr 11A, nr 11B, nr 11C, nr 11D, nr 11E, nr 11F, nr 11G, nr 11H, nr 11I.
- Skogsstyrelsen. 2001. Åtgärder mot markförsurning och för ett uthålligt brukande av skogsmarken. Meddelande 4–2001.
- Skogsstyrelsen. 2007. Kvävegödsling av skogsmark. Meddelande 2–2007.
- Skogsstyrelsen. 2008. Rekommendationer vid uttag av avverkningsrester och askåterföring. Meddelande 2–2008.
- Skogsstyrelsen. 2009. Dikesrensningens regelverk. Skogsstyrelsen. Meddelande 1–2009.
- Skogsstyrelsen. 2013. Skogsstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om anmälnings- skyldighet för samråd enligt 12 kap. 6 § miljöbalken avseende skogsbruksåtgärder.

- Skogsstyrelsens författningssamling. SKSFS 2013:3.
- Skogsstyrelsen. 2014. Allmänna råd om kvävegödsling beslutade, 2014-07-10.
- Skogsstyrelsens Nyhetsarkiv. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se.
- Skogsstyrelsen, 2014. Skogsstyrelsens föreskrifter och allmänna råd till skogsvårdslagen.
- Skogsstyrelsens författningssamling. SKSFS 2011:7/2014:7.
- Skogsstyrelsen, 2014. Skogsstatistisk Årsbok 2014.
- Skyllberg, U. 2003. Kviksilver och metylkviksilver i mark och vatten. SLU. FaktaSkog nr 11–2003.
- StAAF, H. & Olsson, B.A. 1991. Acidity in four coniferous forest soils after different harvesting regimes of logging slash. *Scand. J. For. Res.* 6, s. 19–29.
- StAAF, H. & Olsson, B.A. 1994. Effects of slash removal and stump harvesting on soil water chemistry in a clearcutting in SW Sweden. *Scand. J. For. Res.* 9, s. 305–310.
- Statens energiverk, 1985. Förbränning av torvbränslen: hur kan miljökraven tillgodoses? Statens energiverk. 1985:2.
- Stendahl, J. 2007. Utvärdering av miljötillståndet och trender i skogsmark. I: Bara naturlig försurning. Bilagor till underlagsrapport till fördjupad utvärdering av miljömålen, bilaga 2. Naturvårdsverket. Rapport 5780.
- Svensk författningssamling, 1998. Förordning (1998:1388) om vattenverksamhet m.m.
- Svensson, M. 2006. Vattenkvaliteten i Fredstorpsbäcken – dikad bäck på fastigheten Rämningstorp i Skara kommun. SLU, inst. för skogens ekologi och skötsel. Examensarbete 2007:4.
- Sverdrup, H. & Warfvinge, P. 1995. Critical loads of acidity for Swedish forest ecosystems. *Ecological Bulletin* 44, s. 75–89.
- Sverdrup, H., Warfvinge, P. & Nihlgård, B. 1994. Assessment of soil acidification effects on forest growth in Sweden. *Water Air and Soil Pollution* 78, s. 1–36.
- Sveriges Lantbruksuniversitet. 1983. Det biologiska taket för skogsproduktionen. Skogshögskolans höstkonferens 1982. Skogsfakta Suppl. nr 2.
- Söderström, V. 1974. Markberedning. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1, s. 157–403.
- Söderström, V. 1979. Ekonomisk skogsproduktion. Del 2. Föryngring. LTs förlag, Stockholm.
- Tamm, C.-O. 1985. De skogliga bördighetsförsöken. Mål, metoder, tillväxtresultat. *Kungliga Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*, supplement 17, s. 9–29.
- Tamm, C.-O. 1991. Nitrogen in the terrestrial Ecosystems. *Questions of Productivity, Vegetational changes, and Ecosystem Stability*. *Ecological Studies* 81. Springer Verlag.
- Tamm, C.-O. & Carbonnier, C. 1961. Växtnäringen som skoglig produktionsfaktor. *Kungliga Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift* 1–2.
- Tamm, C.-O. & Hallbäcken, L. 1988. Changes in soil acidity in two forest areas with different acid deposition: 1920s to 1980s. *Ambio* 17, s. 56–61.
- Teikmanis, A. 1954. Några studier över de mossrika granskogarna i Norrland och deras föryngringsproblem. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1954, s. 307–434.
- Troedsson, T. & Nykvist, N. 1973. Marklära och markvård. Almqvist & Wiksell Läromedel AB. Stockholm.
- Ulfhielm, C. 2014. Hänsynen till forn- och kulturlämningar. Resultat från Hänsynsuppföljning Kulturmiljöer 2013. Skogsstyrelsen. Rapport 4–2014.
- Unestam, T. & Finlay, R. 1998. Träd kan äta sten: nya perspektiv öppnas. SLU. FaktaSkog nr 9–1998.
- Warfvinge, P. & Sverdrup, H. 1992. Calculating critical loads of acid deposition with PROFILE – a steady state chemistry model. *Water, Air and Soil Pollution* 63, s. 119–143.
- Westling, O. & Nohrstedt, H.-Ö. 1995. Miljökonsekvensbeskrivning av STORA SKOGS gödslingsprogram, Del 2, bedömning. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning, B 1219, Aneboda.
- Westling, O., Örlander, G. & Andersson, I. 2004. Effekter av askåterföring till granplanteringar med riståkt. IVL. Rapport B 1552.
- Wiklander, G. 1997. Skogsmarkens kemi. I: Marken i skogslandskapet, s. 163–186. Skogsstyrelsen.
- von Arnold, K., Weslien, P., Nilsson, M., Svensson, B.H. & Klemedtsson, L. 2005. Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from drained coniferous forests on organic soils. *For. Ecol. Manage.* 210, s. 239–254.
- von Arnold, K., Hånell, B., Stendahl, J. & Klemedtsson, L. 2005. Greenhouse gas fluxes

- from drained organic forestland in Sweden. *Scand. J. For. Res.* 20, s. 400–411.
- Wretling, J.E. 1932. Om hyggesbränningen inom Malå revir. *Norrlands skogsvårdsförbunds tidskrift*, 1932, s. 243–332.
- Wretling, J. 1931. Bidrag till belysande av de norrländska tallhedsproblemen. *Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 1931, s. 263–314.
- Wretling, J.E. 1948. *Nordsvensk hyggesbränning*. Tryckeri A.-B. Thule. Stockholm.
- Wästerlund, I. 1983. Kantträdens tillväxtförluster vid gallring på grund av jordpackning och rotskador i stickväg – en sammanställning och bearbetning av litteraturuppgifter. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 2–83.
- Wästerlund, I. 1985. Compaction of till soils and growth tests with Norway spruce and Scots pine. *For. Ecol. Manage.* 11, s. 171–189.
- Wästerlund, I. 1992. Extent and causes of site damage due to forestry traffic. *Scand. J. For. Res.* 7, s. 135–142.
- Zackrisson, O., Nilsson, M.C., Dahlberg, A. & Jäderlund, A. 1997. Interference mechanisms in conifer-Ericaceae-feathermoss communities. *Oikos* 78, s. 209–220.
- Örlander, G. & Gemmel, P. 1989. Markberedning. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift* 3–89.
- Örlander, G., Egnell, G. & Albrektson, A. 1996. Long-term effects of site preparation on growth in Scots pine. *For. Ecol. Manage.* 86, s. 27–37.
- Örlander, G., Nordborg, F. & Gemmel, P. 2002. Effects of complete deep-soil cultivation on initial forest stand development. *Studia For. Suec.* nr 213.