

Tillförsel av aska i tallskog på dikad torvmark i södra Sverige – effekter på skogsproduktion, avgång av växthusgaser och vattenkemi

Ulf Sikström, Maria Ernfors, Staffan Jacobson, Leif Klemedtsson, Mats Nilsson och Eva Ring

**Tillförsel av aska i tallskog på dikad
torvmark i södra Sverige**

**Effekter på skogsproduktion, avgång av
växthusgaser och vattenkemi**

**Addition of ash on drained forested
peatlands in southern Sweden**

**Effects on forest production, fluxes of
greenhouse gases and water chemistry**

Ulf Sikström, Maria Ernfors, Staffan Jacobson,
Leif Klemedtsson, Mats Nilsson och Eva Ring

Q4-227/281

Tillförsel av aska på dikad torvmark – skogsproduktion och
miljöeffekter

Förord

De här redovisade studierna har genomförts som ett projekt inom Värmeforsks program ”Miljövänlig användning av askor”. Studierna har pågått under åren 2003 – 2005.

Projektet belyser den del av programmet som behandlar återföring av aska till skogsmark, mer specifikt tillförsel av aska på dikad och beskogad torvmark.

Projektet har varit ett samarbetsprojekt mellan forskare från Skogforsk (SF), Göteborgs universitet (GU) och Sveriges Lantbruksuniversitet i Umeå (SLU). Ulf Sikström (SF) har varit projektledare och tillsammans med Staffan Jacobson (SF) ansvarat för försöksanläggning samt studier av skogsproduktion och barr. Eva Ring (SF) har varit ansvarig för studierna av vattenkemi (grundvatten och avrinnande vatten). Leif Klemedtsson (GU) och Mats Nilsson (SLU) har ansvarat för studierna av växthusgaser och tillsammans med Maria Ernfors (GU) genomfört arbetet. I ansvaret har ingått installation av mätutrustning i fält, dimensionering och genomförande av provtagning och datainsamling samt bearbetning, analys och redovisning av data. Författarna är angivna i bokstavsordning, förutom Ulf Sikström, som har haft huvudansvaret för projektet och utformningen av rapporten.

En rådgivande referensgrupp har varit knuten till projektet, bestående av Anna Lundborg, Energimyndigheten, Hans Samuelsson, Skogsstyrelsen och Tord Magnusson, SLU (ersättare för Göran Bergqvist, som då arbetade för Holmen Skog, som i sin tur ersatte Ola Kårén, Holmen Skog, i ett tidigare skede av projektet). Dessutom har Claes Ribbing (programansvarig för ”Askprogrammet”) deltagit i referensgruppsmötena. Vi vill framföra ett tack till dessa personer för deras synpunkter och diskussioner. Vi vill även tacka våra fältprovtagare, huvudansvarige Krister Bergman och Jonas Persson, som på ett engagerat och förtroendeingivande sätt samlat in prover på både gas och vatten samt utfört vissa försöksinstallationer. Slutligen också ett stort tack till Hagos Lundström (SF) som på ett förtjänstfullt sätt ansvarat för merparten av fältarbete vid försöksanläggningarna.

Värmeforsks ”Askprogram” har stått för i stort sett hela finansieringen. Men även markvärden Sveaskog, liksom flera Skogsvårdsstyrelser och privata markägare i Götaland har bidragit med egen arbetstid genom att ge förslag på och rekognosera försöksmark. Askungen Vital AB stod för spridningen av askan i det behandlade avrinningsområdet i försök 274 Bredaryd och Svenska Energiaskor finansierade de kemiska analyserna av de barr som provtogs i parcellförsöket 273 Anderstorp.

Uppsala i mars 2006

Ulf Sikström

Abstract

Effects of wood ash addition in drained, oligotrophic peatland forests were studied in two field experiments located in southern Sweden. During the first two and a half years after the addition of crushed ash (3.3 and 6.6 tonnes DM ha⁻¹) neither the accumulation of biomass in the forest stand nor the annual emission of greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O) were statistically significantly affected by the treatments. However, there was a tendency of an elevated CH₄ emission, although from a low control level. In the run off from the main ditch, several elemental concentrations were elevated within the first year after treatment with 3.1 tonnes DM crushed ash ha⁻¹ (e.g. B, Ca, K, Li, Mn and Zn) and a few (e.g. V) was reduced. Similar effects were detected in ground water as in run off.

Sammanfattning

I Sverige produceras cirka 1 miljon ton aska årligen, varav omkring en tredjedel (250 000 – 300 000 ton) bedömts härröra från skogsbränslen, exv. grenar och toppar (GROT) från skogsavverkning och spill från massa-, pappers- och träindustri. En del av denna aska läggs idag på deponi. En möjlig användning är att återföra askorna till skogsmark. I bioaska finns flertalet för växter nödvändiga näringsämnen, dock inte kväve, vilket avgår i gasform vid förbränningen.

På merparten fastmark (minerogena jordar) i Sverige är kväve det tillväxtbegränsande näringsämnet. På torvmark (organogena jordar) ökar i regel trädttillväxten efter tillförsel av fosfor och kalium, exempelvis i form av aska. Det finns alltså en potential att öka skogsproduktionen på torvmark genom att tillföra aska. Askgödsling kan vara en lönsam investering. Kompensation av bortförd näring i samband med avverkning är en annan form av asktillförsel. Det är en åtgärd som är angelägen på många torvmarker vid uttag av GROT för att förebygga näringsbrist och minskad skogsproduktion. Bättre kunskaper om övriga miljöeffekter är dock nödvändig för att möjliggöra en storskalig tillämpning av asktillförsel på dikad torvmark.

Projektets övergripande syfte är att studera skogsproduktion och miljöeffekter efter tillförsel av aska från biobränslen på dränerad och beskogad torvmark. Studierna avser effekter på trädens tillväxt, avgång av växthusgaser och vattenkemi (grundvatten och avrinnande vatten). En viktig fråga är om en förväntad ökad fixering av kol (CO_2) genom ökad skogsproduktion kan kompensera för en trolig ökad emission av växthusgaser i form av kol – koldioxid (CO_2) och metan (CH_4) – från nedbrytning av torv. Även den mycket effektiva växthusgasen lustgas (N_2O) måste beaktas.

Två fältförsök anlades i SV Småland år 2003 där aska från biobränslen tillfördes på dikad torvmark. Det ena försöket är ett parcellförsök (273 Anderstorp) där effekter på skogsproduktion och växthusgaser (CO_2 , CH_4 , N_2O) studerades. Cirka 10 km från parcellförsöket etablerades ett avrinningsområdesförsök (274 Bredaryd) där vi mätte flöden av växthusgaser och vattenkemi (grundvatten och avrinnande vatten). Vid försöksanläggningen dominerades de båda försöksområdena av tall (*Pinus sylvestris* L.). Alla områden gallrades och nydikades i slutet av 1980-talet.

De fem behandlingarna i parcellförsöket (273 Anderstorp) var förutom en obehandlad kontroll, en låg dos ($3,3 \text{ ton t.s. ha}^{-1}$) och en hög dos ($6,6 \text{ ton t.s. ha}^{-1}$) med krossaska respektive en ”granulerad”¹ aska från biobränslen. I avrinningsområdesstudien (274 Bredaryd) tillfördes $3,1 \text{ ton t.s. krossaska ha}^{-1}$.

Två år efter asktillförseln i parcellförsöket (273 Anderstorp) kunde ingen tillväxtförändring påvisas, vilket inte var att förvänta med tanke på den korta effektperioden. Det fanns statistiskt påvisbara ökningar av halterna av kalium och bor i tallbarren efter tillförsel av krossaska jämfört med obehandlad kontroll. För kaliumhalten fanns även en effekt av askgivans storlek.

¹ Granuleringen var inte lyckad. Se vidare avsnitt 2.1.2.1.

Tillförseln av krossaska ledde inte till statistiskt signifikanta skillnader i årlig avgång av växthusgasen metan i parcellförsöket. Dock var avgivningen andra året efter asktillförsel ca 60 % högre (ej signifikant) jämfört med kontrollen. Metanavgången från kontrolltyterna var liten (ca 3 och 6 kg CH₄ ha⁻¹ år⁻¹). Avgången av koldioxid (ca 8 000 och 12 000 kg CO₂ ha⁻¹ år⁻¹) skiljde sig inte från kontrollen och halten lustgas i försöket var i regel under detektionsnivån.

Om den förhöjda metanavgången från marken p.g.a. asktillförseln betraktas som en faktisk ökning skulle det, sett i termer av koldioxid-ekvivalenter, krävas ca två procents ökad ackumulation av biomassa för att ur växthusgassynpunkt kompensera ökningen av metan.

I det avrinnande vattnet (274 Bredaryd) ökade den elektriska konduktiviteten (κ) samt halterna av B, Br, Ca, Cd, Co, K, Cl, Li, Mg, Mn, Na, P, PO₄-P, S, SO₄-S och Zn. För de flesta ämnena kom ökningen i direkt anslutning till behandlingen (3,1 ton t.s. krossaska ha⁻¹) och varaktigheten varierade från några månader till att omfatta hela mätperioden (ca 1 år). Halterna av Pb och V var lägre än förväntat i ca sex respektive nio månader. Därefter tenderade halten Pb att öka. En minskning noterades även för TOC-halten som var lägre än förväntat i ca åtta månader. pH-värdet var lägre än förväntat i tre månader efter asktillförseln.

Effekterna på grundvattenkemin (274 Bredaryd) överensstämde med de effekter som noterades för motsvarande ämnen i avrinnande vatten i diken. Två månader efter behandling var halterna av B, Ca, Cd, Co, K, Cl⁻, Li, Mn, Na, P, S och SO₄²⁻-S högre i grundvattnet i avrinningsområdet där aska tillfördes än i det obehandlade området. Skillnaden var för vissa ämnen påvisbar ända ner till 90 – 100 cm djup. Halten As och TOC i grundvattnet på 30 – 40 cm djup tenderade att vara lägre i det askade området.

Ovanstående resultat visar de initiala effekterna (1 – 2,5 år) efter asktillförsel på några dikad och relativt lågproduktiva torvmarker med tallskog i södra Sverige. Med tanke på att asktillförsel kan ge långvariga effekter på skogsekosystemet är det nödvändigt med en fortsatt långsiktig uppföljning av försöken för att bekräfta de kortsiktiga effekterna, för att följa utvecklingen av mer långsiktiga effekter och för att påvisa effekter som kan uppkomma på länge sikt, exempelvis till följd av ändrad omsättning i torven. Denna långsiktiga uppföljning är nödvändig för att mer fullständigt kunna utvärdera både nyttan och ej önskade miljöeffekter av åtgärden.

Nyckelord: Aska, skogsproduktion, torvmark, vattenkemi, växthusgaser.

Summary

In Sweden, about one million tonnes of wood ashes are produced annually, of which about 250 000 – 300 000 tonnes originate from biofuels, e.g. forest residues. Some of the ashes produced are deposited today. One alternative use is bringing back the ashes to the forest, recycling the mineral nutrients and base compounds. In bioashes, most essential mineral nutrients for plants are included, except for N, which is gasified at combustion.

On most mineral soils in Sweden, plant available nitrogen is the nutrient limiting tree growth. On organic soils, tree growth is usually increased after addition of phosphorous and potassium. Thus, there is a potential for increased forest production on peatlands after ash fertilization. This can be a profitable measure. Nutrient compensation after harvesting involve ash addition with quite low doses. This is especially important in peatlands after whole-tree harvesting in order to prevent nutrient deficiency and reduced tree growth. However, there is a need for better knowledge concerning other environmental effects before ash addition can be put into large-scale practice.

The general objective of this project is to study the effects of wood-ash addition on forest production and some other environmental variables on drained, forested peatlands. The studies concern tree growth, emissions of greenhouse gases and water chemistry (ground water and run off). An important issue addressed was if an expected increased accumulation of carbon (CO₂) due to increased tree growth can compensate for an expected increased emission of greenhouse gases (e.g. CO₂ and CH₄) from the peat. In addition, the very effective greenhouse gas laughing gas (N₂O), must be taken into consideration.

In 2003, two field experiments were established in the county of Småland in southwest Sweden, where wood ashes from biofuels were applied. One experiment was designed as a randomized block experiment (273 Anderstorp) where effects on forest production and greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) were studied. The other experiment (274 Bredaryd), 10 km away, was established in two drainage areas where emissions of greenhouse gases and water chemistry (ground water and run off) were studied. At the establishment of the experiments, the forests were dominated by Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). In the end of the 1980's, the forest stands had been thinned and the soils drained at both experimental sites.

Experiment 273 Anderstorp included five treatments: an untreated control, and, one low dose (3.3 tonnes DM ha⁻¹) and one high dose (6.6 tonnes DM ha⁻¹) of crushed ash and "granulated" wood ash, respectively. It should be noted that the "granulated" product was of a poor standard. In experiment 274 Bredaryd 3.1 tonnes DM ha⁻¹ of crushed ash was applied.

Two years after treatment in 273 Anderstorp no effects of the treatments on tree growth was detected, which could be expected considering the short effect period. There was a statistically significant effect of the addition of crushed ash on concentrations of potassium and boron in the Scots pine needles. For potassium there was an effect of the dose.

The addition of wood ash did not change the CO₂-flux from the soil during the first 2.5 years of study. The annual emissions from the control plots were approximately 8 000 kg CO₂ ha⁻² during 2004 and 12 000 kg CO₂ ha⁻² during 2005. No significant effect of the treatments on the annual CH₄-flux was detected by analysis of variance, but there was a tendency for increased CH₄-emissions at the treated plots during late summer and autumn. The annual emissions on the control plots were approximately 3 kg CH₄ m⁻² during 2004 and 6 kg CH₄ ha⁻² during 2005. N₂O-flux was only occasionally detected.

In 2005, the mean CH₄ emission of the ash fertilized plots was 60% higher (non significant) than the mean of the control plots. This corresponds to an increased emission of 90 kg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹ to the atmosphere. To compensate for such an emission, accumulation of tree biomass needs to increase by approximately 2%.

In run off, sampled in the main ditches, the electric conductivity (κ) increased after addition of 3.1 tonnes of crushed ash, as well as the concentrations of B, Br, Ca, Cd, Co, K, Cl, Li, Mg, Mn, Na, P, PO₄-P, S, SO₄-S och Zn. For most elements, the increase appeared immediately after the ash application, and lasted from a few months to the whole observation period (c. one year). The concentrations of Pb and V was lower than expected during six and nine months, respectively. Thereafter, the Pb-concentration tended to be higher than the control. The concentration of TOC was reduced during eight months, and pH was reduced during three months after the ash addition.

The effects on ground water chemistry corresponded to the effects on chemistry in run off. Two months after treatment, the concentrations of B, Ca, Cd, Co, K, Cl⁻, Li, Mn, Na, P, S och SO₄²⁻-S were elevated in the groundwater in the ash treated area. For some of the elements this was evident down to 90 – 100 cm depth. The concentrations of As and TOC at 30 – 40 cm tended to be lower in the area treated with ash.

The results from this study demonstrate the initial effects (1 – 2.5 years) of wood ash addition in some drained, oligotrophic peatland forests in southern Sweden. Ash addition may affect the turn over of the peat, and potentially affect other ecosystem properties, for several decades. Hence, in order to confirm the duration of the shown short-term effects, to establish the duration of not yet ceased effects, and, establish effects that might show up in a long-term perspective, continuous follow up of the established experiments is important. This long-term monitoring is also a prerequisite of a more complete evaluation of the benefits and possible detrimental effects on the environment of wood ash addition.

Key words: Ash, forest production, greenhouse gases, peatlands, water chemistry.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	MOTIV OCH SYFTE.....	2
2	MATERIAL OCH METODER.....	4
2.1	BESKRIVNING AV FÖRSÖKSOMRÅDEN	4
2.1.1	<i>Temperatur och nederbörd.....</i>	4
2.1.2	<i>Försök 273 Anderstorp.....</i>	4
2.1.3	<i>Försök 274 Bredaryd</i>	7
2.2	SKOGBESTÅND OCH FÖRÄNDRING AV BIOMASSA	9
2.2.1	<i>Tillväxt och biomassa.....</i>	9
2.2.2	<i>Barrkemi och barrvikt.....</i>	10
2.2.3	<i>Databearbetning och analys</i>	10
2.3	GASFLÖDEN	10
2.4	VATTENKEMI	11
2.4.1	<i>Avrinnande vatten</i>	12
2.4.2	<i>Grundvatten</i>	13
2.4.3	<i>Databearbetning och analys</i>	13
3	RESULTAT	15
3.1	HYDROLOGI.....	15
3.2	BESTÅNDSDATA.....	18
3.2.1	<i>Tillväxt och biomassa.....</i>	18
3.2.2	<i>Barrkemi och barrvikt.....</i>	19
3.3	GASFLÖDEN	19
3.3.1	<i>Koldioxid</i>	19
3.3.2	<i>Metan</i>	19
3.4	VATTENKEMI	25
3.4.1	<i>Avrinnande vatten - huvuddiken.....</i>	25
3.4.2	<i>Grundvatten</i>	31
4	DISKUSSION.....	33
4.1	GASFLÖDEN OCH ACKUMULATION AV BIOMASSA.....	33
4.2	VATTENKEMI	34
4.3	FORTSATT UPPFÖLJNING	36
5	LITTERATURREFERENSER	37

Bilagor

A HALTER I GRUNDVATTENPROV FRÅN FÖRSÖK 274 BREDARYD

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I Sverige produceras cirka 1 miljon ton aska årligen, varav omkring en tredjedel (250 000 – 300 000 ton) bedömts härröra från biobränslen, i huvudsak skogsbränsle [3]. Med skogsbränsle avses i detta fall främst avverkningsrester, exv. grenar och toppar (GROT) från skogsavverkning samt spill från massa-, pappers- och träindustri. Biobränslen utgör redan nu en viktig del av den svenska energiförsörjningen. Prognosen är att betydelsen kommer att öka framgent, vilket medför ökad produktion av aska.

En del av den aska som idag produceras i Sverige läggs på deponi, vilket medför kostnader för askproducenterna. Deponeringen har dock minskat under senare år och ett alternativ är att återföra askorna till skogsmark. Syftet är att den mineralnäring och de basiska ämnen som blir kvar i askan ska återföras och ingå i ett kretslopp. I askan finns flertalet för växter nödvändiga näringsämnen, dock inte kväve (N), vilket avgår som gas vid förbränningen.

Skörd från skogen för energiändamål innebär med dagens tillämpning (merparten av träd ovan mark) ett större uttag av biomassa, och inte minst av mineralnäringsämnen, jämfört med konventionell skörd av enbart trädstammar. Det finns farhågor om att denna mer intensiva skörd är ett hot mot skogsmarkens långsiktiga produktionsförmåga (exv. [32], [33]) och att återföring av näring därför är nödvändig för att upprätthålla produktionsförmågan på sikt. I en miljökonsekvensbeskrivning av bl.a. skogsbränsleuttag och asktillförsel framhålls att GROT-uttag inte bör förvärpa skogsmarkens och skogsvattnets surhet och näringstillstånd [5]. Skogsstyrelsens rekommendation är att aska bör återföras efter biobränsleuttag [31].

I riskbedömningen om uthållig skogsproduktion och behov av kompensationsåtgärder, finns det skäl att skilja på olika typer av skogsmark, nämligen fastmark (minerogena jordar) och torvmark (organogena jordar).

För svenska förhållanden är N det tillväxtbegränsande ämnet på merparten fastmark (exv. [34], [25]). Minskad tillgång på växttillgängligt N [11] är också den mest sannolika förklaringen till uppmätt minskad tillväxt efter GROT-uttag i fältförsök på denna marktyp [13]. Även påverkan på trädutväxten efter tillförsel av aska på fastmark tycks vara en indirekt förändrad tillgång på växttillgängligt N [23], [24], [12].

I torvmark är mängderna av extraherbart fosfor (P) och kalium (K) små [4]. En stor andel av vissa näringsämnen (exv. P och K) finns i trädskiktet i dessa skogsekosystem. Detta innebär att behovet av kompensation är extra stort vid uttag av GROT på torvmark p.g.a. risken för näringsstörningar och minskad skogsproduktion (se exv. [5]). Detta betonas också för skog på torvmark i Skogsstyrelsens rekommendationer [31].

Ett flertal studier har visat att trädutväxten som regel ökar efter tillförsel av P och K på torvmark, både i form av handelsgödselmedel [2], [19] och i form av aska [17], [15], [29], [8], [20]. Några förutsättningar är att torvmarken är tillfredsställande dränerad och att tillgången på växttillgängligt N är tillräcklig [29], [19].

Förutom att nyttja aska som kompensation för uttagen näring, finns det även en potential att öka skogsproduktionen på torvmark genom att tillföra högre givor (askgödsling) än vid näringskompensation. Tillväxten kan öka med en faktor tio efter asktillförsel och tillväxtökningen är vanligtvis mer uthållig jämfört med PK-handelsgödselmedel [30]. En mertillväxt av aska på ca 100 m³ under en period på 30 – 40 år är inte ovanlig [30]. Baserat på finska försöksresultat har internräntan för investeringen i askgödsling på torvmark beräknats till mellan 4 % och 9 % över en period på 44 – 56 år [14].

I Sverige finns det ca 0,8 miljoner ha dikad torvmark, vilka skulle vara möjliga att askgödsla [8]. Av dessa är ca 560 000 ha torvmark med produktiv skog (torvdjup > 3 dm; årlig tillväxt > 1 m³sk per ha), varav knappt 200 000 ha har bedömts som de mest lämpade för att erhålla god tillväxtökning och ge möjlighet till ökad avverkning inom några decennier [8].

En uppskattning av årlig möjlig avsättning av aska för askgödsling ligger i storleksordningen 40 000 ton. Det bygger på antaganden om tillförsel av 5 ton aska per ha vart 25:e år på 200 000 ha och en omloppstid för skogsbestånden på 100 år. Givan 5 ton per ha motsvarar en vanligt rekommenderad fosforgiva på ca 50 kg P [22] och ca 150 kg K per ha, eftersom vanliga halter av P och K i biobränsleaskor är omkring 1 % respektive 3 % [7], [6], [9]. En fördubbling av givan och/eller arealen skulle ge en avsättning i intervallet 80 000 – 160 000 ton aska per år.

Bättre kunskaper om övriga miljöeffekter är dock nödvändig för att möjliggöra en storskalig tillämpning av asktillförsel på dikad torvmark. Det konstateras i en litteraturstudie [17], liksom i en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränseuttag, asktillförsel och övrig näringstillförsel [5]. En slutsats i MKB:n var att utökade miljöstudier är ett måste om åtgärden ska tillämpas i stor skala. Några exempel på frågor är omsättning av N och P i torven och långsiktiga effekter av tungmetaller samt omsättning av växthusgaser och effekter på avrinnande vatten (exv. löst organiskt kol och nitrat). Behovet av kunskap gäller för asktillförsel både med låga givor (kompensation) och med relativt höga givor (askgödsling).

En förutsättning för att tillförsel av aska på torvmark ska kunna tillämpas i stor skala är att verksamheten inte ger oacceptabla effekter på miljön. Därför är det nödvändigt att ta fram nya data för att kunna göra en sådan bedömning. För att bättre belysa frågan har Skogforsk, i samarbete med forskare vid Göteborgs universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet, anlagt två fältförsök där aska från biobränslen har tillförts på dikad torvmark.

1.2 Motiv och syfte

Motivet för projektet är att det finns en potential att öka skogsproduktionen på dikade torvmarker efter tillförsel av aska. Ett annat motiv är att uttag av skogsbränsle (GROT) sannolikt kräver näringskompensation, exv. i form av aska, för uthållig skogsproduktion på merparten torvmark. Ett hinder för dessa åtgärder är att övriga miljöeffekter är lite eller inte alls studerade.

Projektets övergripande syfte är att studera skogsproduktion och miljöeffekter efter tillförsel av aska från biobränslen på dränerad och beskogad torvmark. Studierna avser effekter på trädens tillväxt, avgång av växthusgaser och vattenkemi (i grundvatten och avrinnande vatten).

En viktig fråga är om en förväntad ökad fixering av kol (CO_2) genom ökad skogsproduktion kan kompensera för en trolig ökad emission av växthusgaser i form av kol – koldioxid (CO_2) och metan (CH_4) – från nedbrytning av torv. Även den mycket effektiva växthusgasen lustgas (N_2O) måste beaktas. Det gäller speciellt näringsrik torvmark (låg C/N-kvot, < 25) där N_2O -avgången vanligtvis är hög [10] och där små förändringar kan ge stor påverkan på växthuseffekten. En annan viktig fråga är effekter på halterna av tungmetaller och näringsämnen i grundvatten och avrinnande vatten.

2 Material och metoder

2.1 Beskrivning av försöksområdena

Inom projektet anlades två fältförsök i Småland under hösten 2003. Ett parcellförsök (273 Anderstorp) etablerades där vi studerade effekter på skogsproduktion och växthusgaser (CO_2 , CH_4 , N_2O). Cirka 10 km från parcellförsöket etablerade vi ett avrinningsområdesförsök (274 Bredaryd) där vi mätte flöden av växthusgaser och vattenkemi (grundvatten och avrinnande vatten).

2.1.1 Temperatur och nederbörd

Månadsmedeltemperaturen i området där försöken ligger är $-2,7\text{ }^\circ\text{C}$ i januari och $15,5\text{ }^\circ\text{C}$ i juli enligt SMHIs station 7309 Stora Segerstad [1]. Årsmedeltemperaturen är $6,2\text{ }^\circ\text{C}$ och årliga medelnederbörden 864 mm. Stationen ligger ca 10 km från de båda försöksområdena. Nederbörden uppmättes dagligen med en SMHI-kanna placerad 1,5 m över marken på en plats belägen ca 9 km från försök 273 Anderstorp och ca 5 km från försök 274 Bredaryd.

2.1.2 Försök 273 Anderstorp

Försök 273 Anderstorp är beläget ca 5 km SO Gislaved ($57^\circ15'\text{N}$, $13^\circ35'\text{O}$) 150 m ö h. Vid försöksanläggningen dominerades försöksbeståndet av tall (*Pinus sylvestris* L.) (Tabell 1). Enligt markägaren gallrades och nydikades skogsområdet där försöket ligger i slutet av 1980-talet. Cirka 1 m djupa diken grävdes med ett avstånd på 17 – 28 m mellan diken.

Tabell 1. Beskrivning av beståndsdata på de båda försökslokalerna. Medeltal och medelfel.

Table 1. Stand characteristics at the experimental sites. Mean and standard error.

Variabel	273 Anderstorp	274 Bredaryd	
	(n = 20)	Område Syd (n = 9)	Område Nord (n = 9)
Medelhöjd, m	$11,6 \pm 0,3$	$14,9 \pm 0,2$	$15,1 \pm 0,2$
Träd ha^{-1}	800 ± 40	730 ± 40	770 ± 80
Volym stamved inkl. bark, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	$110 \pm 3,7$	130 ± 5	134 ± 14
Biomassa inkl. rötter, kg ha^{-1}	87100 ± 2400	93600 ± 4200	98500 ± 11500
Trädslagsblandning ^a	100 – 0 – 0	99 – 1 – 0	89 – 10 – 1

^aAngiven som procent av stamvolymen: tall – gran – björk.

Fältskiktet dominerades av olika ris, lingon (*Vaccinium vitis-idea* L.), blåbär (*Vaccinium myrtillus* L.), odon (*Vaccinium ulliginosum* L.), klockljung (*Erica tetralix* L.), ljung (*Calluna vulgaris* L.) samt tuvull (*Eriophorum vaginatum* L.) och kruståtel (*Deschampsia flexuosa* (L.) Trin.). Bottenskiktet utgjordes framförallt av olika

torktåliga mossor såsom väggmossa (*Pleurozium schreberi* Willd.), myrbjörnmossa (*Polytricum strictum* Banks ap. Sm.) kvastmossor (*Dicranum spp.*) samt vissa vitmossor (*Sphagnum spp.*).

Torvdjupet var > 1 m på alla provytor. Torven dominerades av vitmossa. Humifieringsgraden varierade mellan H3 och H7 enligt von Post. Det ytligaste skiktet (5 – 15 cm) var oftast något mindre humifierat (H3 – H6), medan skiktet från 15 – 25 cm vanligen varierade mellan H5 – H7. Markens pH, (mätt i en ca 1:10 jord:vattenblandning) var $4,7 \pm 0,14$ (medeltal $\pm$ standardavvikelse) i markskikten 5 – 15 och 15 – 25 cm från ytan.

Försöket anlades som ett randomiserat blockförsök med fyra block (upprepningar) och fem behandlingar. Rektangulära provytor etablerades på dikestegarna mellan kanterna på två diken. Det innebar att ingen del av själva diket ingick i provytan. Eftersom storleken på provytorna var konstant (680 m² stora bruttoytor) och avståndet mellan två diken varierade (17 – 28 m), blev längden på ytorna längs dikestegarna olika (24,3 – 40,0 m). Inom varje bruttoyta markerades även en nettoyta (400 m²) genom att en zon på 5,0 – 8,2 m i båda ändarna av bruttoytan drogs bort. Det gav nettoytor som varierade i form mellan $17,0 \times 23,5$ m² och $28,0 \times 14,3$ m². Provytorna delades in i block baserat på okulär bedömning av olika fältskiktsarter och deras täckning, ytornas belägenhet inom mossen samt trädens grundtyta (1,3 m över marken) och trädantal på ytorna.

2.1.2.1 Tillförsel av aska

De fem behandlingarna var förutom en obehandlad kontroll (0), en låg (KA) och en hög dos (2KA) med krossaska samt en låg (GA) och en hög dos (2GA) med ”granulerad” aska. Den låga dosen var 3,3 ton per ha och den höga 6,6 ton per ha. All aska tillfördes för hand som en engångsdos under 5 – 6 september 2003. Vid spridningen delades bruttoytan in i mindre delytor för att få en jämn spridning av askan.

Innan askan spreds i fält togs två generalprov, vilka i sin tur bestod av två delprov, från varje storsäck med aska som levererades till försöket. Askans kemiska innehåll bestämdes i dessa två generalprov (Tabell 2). De båda testade askprodukterna hade samma ursprung – Ljungbyverket i Ljungby (Sydkraft Värme Syd AB) (se även avsnitt 2.1.3.1). Krossaskan tillverkades genom tillsats av vatten, varefter askan fick självhärda under några månader. Därefter krossades den och siktades. Vid tillverkningen av ”granulerna” tillsattes ca 10 % lera. Trots detta blev denna s.k. ”granulering” inte lyckad. Granulerna föll sönder under transporten till försöket och det bildades stora klumpar, vilket gjorde det svårt att sprida askan jämnt. En möjlig förklaring till den mindre lyckade ”granuleringen” kunde vara askans karaktär, bl.a. en relativt hög andel bottenaska. Tillsatsen av lera förändrade den kemiska sammansättning av produkten (Tabell 2). Glödförlusten (vid 1 000 °C) var ca 60 % av den i krossaskan. Jämfört med halterna i krossaskan var totalhalterna av flera ämnen (Na, Si, Al, Ti, Be, Sc, Y och Zr) $\geq 1,5$ gånger högre, medan vissa andra låg på nivån 60 – 70 % (Ca, Mg, P, Mn, Cd, Cu, Pb, S och Zn). Dessutom var den ”granulerade” askan mer heterogen i sin sammansättning. I krossaskan var en enskild halts avvikelse från medeltalet 0 – 2 % för de flesta ämnena, medan den var 2 – 10 % för den ”granulerade” askan (Tabell 2).

Tabell 2. Halter av olika ämnen i de askor som nyttjats i försöken 273 Anderstorp och 274 Bredaryd. Medeltal av två prov. Analyserna^a utfördes av Analytica AB i Luleå.

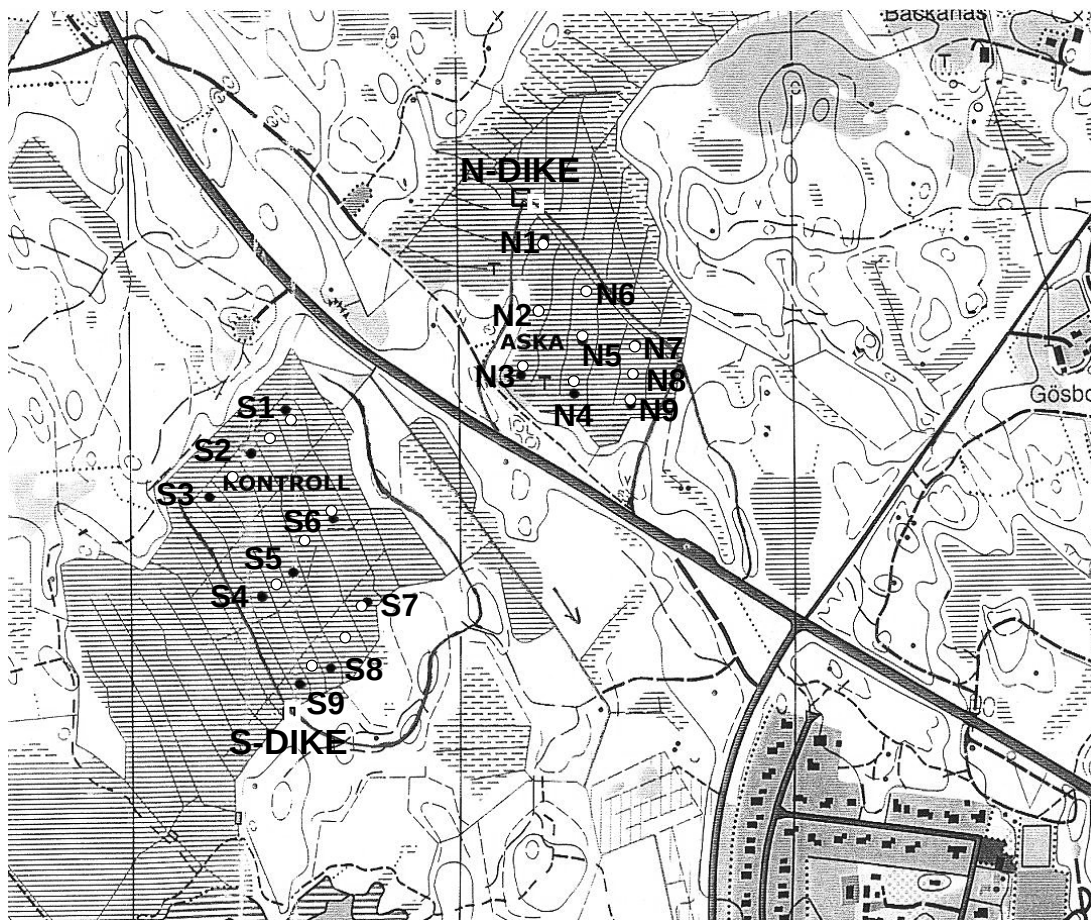
Table 2. Elemental concentrations in the ashes tested at the experimental sites 273 Anderstorp and 274 Bredaryd. Mean of two samples. The analyses were performed by Analytica AB in Luleå.

Variabel/ Ämne	273 Anderstorp				274 Bredaryd	
	Kross		"Granulerad"		Kross	
	Medeltal	Std avv	Medeltal	Std avv	Medeltal	Std avv
Vattenhalt ^b (%)	37	3.9	28	0.49	38	0.4
LOI ^c (%)	27	0.5	17	1.3	20	0.7
	[mg (g t.s.) ⁻¹]					
Ca	220	1.0	140	11	200	1.5
Mg	24	0.3	16	0.9	24	0.3
P	6.3	0.0	4.2	0.3	13	0.0
K	23	0.1	27	0.8	58	1.0
Na	8.2	0.2	14	1.0	12	1.2
Mn	7.8	0.1	5.2	0.5	9.2	0.5
S	4.1	0.05	2.7	1.8	14	0.3
Si	110	1.7	194	11	112	0.3
Al	21	0.6	38	2.7	25	0.4
Fe	9.9	0.2	14	0.3	16	1.8
Ti	1.1	0.1	1.9	0.1	2.0	0.0
	[µg (g t.s.) ⁻¹]					
As	< 3	–	< 3	–	33	9.0
Ba	1460	35	1240	35	2630	77
Be	< 0.6	–	0.94	0.14	< 0.6	–
Cd	6.8	0.76	3.8	0.83	14	1.6
Co	7.4	0.40	7.3	0.62	< 9	–
Cr	71	0.57	100	27	75	12
Cu	82	8.3	56	6.5	120	13
Hg	0.26	0.11	0.11	0.01	0.1	0.01
La	12	4.1	13	2.3	8.5	3.5
Mo	< 6	–	< 6	–	7.7	2.1
Nb	< 6	–	< 6	–	< 6	–
Ni	20	0.28	16	2.3	36	4.7
Pb	59	9.9	40	2.4	135	8.5
Sc	1.8	0.21	2.7	0.14	2.5	0.84
Sn	< 20	–	< 20	–	< 20	–
Sr	507	7.8	385	27	1110	28
V	22	0.42	30	1.8	31	2.6
W	< 60	–	< 60	–	< 60	–
Y	8.4	0.48	16	1.1	9.8	0.54
Zn	950	33	633	35	2380	198
Zr	96	21	228	21	99	4.9

^aInnan den kemiska analysen torkades proverna vid 50°C och sedan TS-korrigerades elementhalterna till 105°C. As, Cd, Cu, Co, Hg, Ni, Pb, Sb, Se och S analyserades efter uppslutning av torkade prover med HNO₃:H₂O (1:1) i slutna kärl av teflon i mikrovågsugn. Övriga ämnen analyserades efter att 0.125 g av provet smälts tillsammans med 0.375 g LiBO₂, för att därefter lösa upp återstoden i HNO₃. Halterna bestämdes därefter med ICP-AES and ICP-MS.

^bProverna torkades vid 105°C.

^cGlödförlusten (LOI) bestämdes vid 1 000°C.



Figur 1. Försöksområdet i försök 274 Bredaryd. Av figuren framgår de permanenta mätpunkterna inom område Syd (kontroll) och Nord (askbehandling). Fyllda cirklar visar vart de preliminära provpunkterna planerades på kontoret medan tomma cirklar visar faktisk placering i fält (S1 – S9 och N1 – N9). De vita rutorna visar provtagningspunkterna i huvuddikena (S-dike och N-dike).

Figure 1. The two areas within the experimental site 274 Bredaryd. The circles show the permanent sampling points in the southern untreated area ("Kontroll") and northern area treated with ash ("Aska"). Filled circles are the preliminary points planned at the office, and open circles the actual points in the field (S1 – S9 och N1 – N9). The open boxes show the sampling points in run off from the main ditches (S-dike och N-dike).

2.1.3 Försök 274 Bredaryd

Försök 274 Bredaryd är beläget ca 20 km V Värnamo (57°11'N, 13°44'O) 155 m ö h. Det består av två närliggande avrinningsområden, område Syd och Nord (Figur 1). Område Syd är totalt ca 12 hektar varav ca 6 hektar utgörs av en dikad torvmark. Motsvarande arealer i område Nord är ca 3,5 och ca 7 hektar. Således är andelen torv ca 50 % inom de båda områdena. I båda områdena omges torvmarken av fastmark, troligtvis morän.

När försöket anlades på hösten 2003 utgjordes skogen på torvmarkerna främst av tall (Tabell 1). Enligt markägaren gallrades och nydikades skogsområdet där försöket ligger i slutet av 1980-talet. Cirka 0,5 – 1 m djupa diken grävdes med avstånd på i huvudsak mellan 20 m och 30 m mellan diken.

På torvmarken i de två avrinningsområdena lades nio permanenta mätpunkter ut i vardera området (S1 – S9 respektive N1 – N9) (Figur 1). På tre av tegarna placerades tre mätpunkter ut på olika avstånd från huvuddiket. En mätpunkt placerades nära huvuddiket, inom ca 5 – 10 m. Nästa mätpunkt placerades ungefär på mitten av de omgivande tegdikenas totala längd räknat från huvuddiket och den sista mätpunkten placerades strax nedströms där tegdikena började (Figur 1). Mätpunkterna placerades ungefär mitt på varje teg. Vid mätpunkterna mättes beståndsdata (se avsnitt 2.2.1.2), gasflöden (se avsnitt 2.3) och grundvattennivån. Även prover på grundvatten samlades in (se avsnitt 2.4.2).

Torven var mer än 1 m djup i de nio mätpunkterna som lades ut i vardera området. Markens pH, (mätt i en jord:vattenblandning, ca 1:10) var $4,7 \pm 0,14$ (medel $\pm$ standardavvikelse) i markskikten 5 – 15 och 15 – 25 cm från ytan.

I fältskiktet förekom tuvull (*E. vaginatum*) och olika ris – lingon (*V. vitis-idea*), blåbär (*V. myrtillus*), odon (*V. uliginosum*) – i olika proportioner. Även ljung (*C. vulgaris* L.) och kråkbär (*Empetrum nigrum* L.) förekom.

2.1.3.1 Tillförsel av aska

I oktober 2004, dvs. efter ca ett års referensmätningar, behandlades den dikade torvmarken i område Nord (ca 3,5 ha) med krossaska. Askan spreds med en gödslingscentrifugalspridare (Hypro AB, Osby, Lönsboda). Den 25 oktober spreds askan på en fjärdedel av området (SÖ delen) och på resterande del den 27 oktober. Orsaken till uppdelningen var ett maskinhaveri på den traktor som utförde spridningen. Område Syd utgjorde den obehandlade kontrollen.

Vid spridningen av askan gjordes en kontroll av medelgivan och jämnheten på spridningen. På 16 provtagningspunkter placerades 0,25 m² stora, runda nylonhåvar på marken. Utifrån en slumpmässig startpunkt lades provpunkterna ut systematiskt med 25 m avstånd längs två transekter inom området som behandlades. Vid varje punkt placerades tre håvar i en triangel med en meters mellanrum. Totalt gav det 48 håvar (16 $\times$ 3 stycken). Efter spridningen tömdes håvarna och den uppsamlade askan från varje enskild håv torkades (105 °C i 24 timmar) och vägdes. Medelgivan och standardavvikelsen för de 16 provpunkterna var $3,1 \pm 2,1$ ton t.s. aska per ha (min = 0,1 och max = 6,9). Min och max för de individuella håvarna var 0,0 och 12,7 ton t.s. per ha. Vid spridningen lämnades en 5 m bred obehandlad zon mot huvuddiket i den norra delen av torvmarken. Att ingen aska hamnade inom den zonen bekräftades av en visuell inspektion dagen efter det att spridningen slutfördes. Ingen hänsyn togs till tegdikena vid spridningen.

För att få en korrekt giva i de permanent installerade ramarna för gasmätningarna (se avsnitt 2.3), täcktes ramarna med en 2 m $\times$ 2 m stor plastfolie vid traktorspridningen.

Den täckta ytan behandlades för hand med 3.1 ton t.s. per ha, dvs. samma som medelgivan för hela området.

Den krossaska som användes var en blandning av bibränsleaskor från två värmeverk – Ljungbyverket i Ljungby (Sydkraft Värme Syd AB) och Västhamnsverket (Öresundskraft AB). Pannan i Ljungbyverket var en rörlig trappstegsroster typ ”Järnforsen”. Bibränslet där bestod av 75 % bark, 20 % skogsflis och 5 % sågspån. Askan bestod av 60 % bottenaska och 40 % flygaska som blandades. Därefter tillsattes vatten i en tvångsblandare och sedan lagrades askan under en säsong vid värmeverket. I Västhamnsverket hade man en pulvereldad kraftverkspanna som eldades med träpulver (träpellets). Till den flygaska som bildades tillsattes vatten. De båda askorna självhårdade under några månader upp till ca ett halvår innan den krossades och sållades (10 mm såll).

Innan askan spreds i försöksområdet togs prover från den stora hög med aska som levererades till försöket. Fyra generalprov på cirka 1,5 liter samlades in, där varje prov bestod av 10 delprov. Två prover analyserades kemiskt genom att de fyra proverna slogs ihop parvis (Tabell 2). Variationen mellan de två proven var relativt liten för de flesta ämnen, med en avvikelsen från medeltalet för ett individuellt prov på mellan 0 och 5 %. För några ämnen (As, Cr, Mo, Sc, La) var avvikelsen större, 10 – 29 %.

2.2 Skogsbestånd och förändring av biomassa

2.2.1 Tillväxt och biomassa

2.2.1.1 Försök 273 Anderstorp

Alla träd på nettoytan som hade diametern > 5 cm i brösthöjd (1,3 m över marken) numrerades permanent vid försöksanläggningen innan behandling hösten 2003. Dessutom markerades brösthöjden på träden. Samtliga träd korsklavades i brösthöjd (mm) och höjdmättes (dm). Det fanns mellan 23 och 53 träd på ytorna, och totalt ingick 640 träd i försöket. I september 2005, dvs. två år efter behandlingen, korsklavades träden igen på samma sätt som vid anläggningen.

Grundytetillväxten för tvåårsperioden beräknades. Empiriska funktioner för enskilda träd nyttjades för att uppskatta stamvolymen [21], biomassan ovan jord (exkl. stubbar) [18], och biomassan under jord (inkl. stubbar och rötter ner till 2 mm) (pers. medd., Hans Pettersson, SLU, Umeå). Stamvolymen uppskattades vid försöksanläggningen och biomassan både vid försöksanläggningen och revisionen.

2.2.1.2 Försök 274 Bredaryd

I oktober 2004, innan behandlingen i område Nord, gjordes en uppmätning av skogsbestånden inom de båda områdena. Vid varje provpunkt (nio per område, se avsnitt 2.1.3) registrerades träddata på cirkelprovytor ($r = 10$ m; 314 m²). Alla träd på ytorna med diametern > 5 cm numrerades permanent. I genomsnitt fann det 24 träd per yta i område (Syd) (min = 16; max = 40), och 23 träd per yta i område Nord (min = 17; max = 29). Diametern (d ; mm) registrerades för alla träd genom korsklavning i brösthöjd (1.3 m ovan marken). Höjden (h ; dm) mättes på ett stickprov av träden och

höjdkurvor togs fram med regressionsanalys (procedur REG; [27]) för att kunna åsätta höjder till samtliga träd på ytorna. Höjdkurvor togs fram för tall i båda områdena och för gran (*Picea abies* L. Karst) och glasbjörk (*Betula pubescens* Ehrh.) i område Syd. Regressionsmodellen för höjdkurvorna var: $h = a + b \times d + c \times d^2$, där a och b är konstanter. Dessutom nyttjades empiriska funktioner för enskilda träd för att uppskatta stamvolymen [21], biomassan ovan jord (exkl. stubbar) [18], och biomassan under jord (inkl. stubbar och rötter ner till 2 mm) (pers. medd., Hans Pettersson, SLU, Umeå).

2.2.2 Barrkemi och barrvikt

Prover av årsbarr (C0) och fjolårsbarr (C+1) togs i dec. 2006, ca 2,5 år efter behandling. Barren samlades in från åtta träd per provyta. Dessa träd stod inom bruttoytan strax utanför gränsen på vardera sida om nettoytan. Kvistar från sydsidan på den övre tredjedelen av kronan sköts ner med hagelgevär. Barren från provträden på en provyta slogs samman till ett generalprov per barråtgång representerande provytan.

Generalproven torkades i vakuumtork i 70 °C, maldes och blandades väl före kemisk analys. Kväve och kol (C) bestämdes med elementaranalysator (Elemental Analyzer, PerkinElmer 2400 CHN, Norwalk, Connecticut, USA). Övriga ämnen (P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, B) analyserades med ICP/MS-DRC - Elan 6100 (PerkinElmer, Norwalk, Connecticut, USA) efter våtuppslutning med salpetersyra och väteperoxid ($\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$) i ett slutet uppslutningssystem. De kemiska analyserna utfördes av Markvetenskapliga laboratoriet, Institutionen för Skogsekologi, SLU, Umeå.

Vikten på årsbarren bestämdes genom vägning av cirka 10 delprov från de insamlade generalproven från provytorn. Varje delprov bestod av 15 slumpmässigt utvalda oskadade barrpar. I den fortsatta analysen nyttjades medeltalet per yta av de 10 delproven.

2.2.3 Databearbetning och analys

Effekter av behandlingen på både grundytetillväxten och ackumulationen av total biomassa under två år samt barrvikt (C0) och näringhalter i barr (C0 och C+1) testades statistiskt med tvåvägs variansanalys (procedur GLM; [27]). Följande modell nyttjades:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + b_j + e_{ij} \quad (1)$$

där: μ = ”overall mean”; α_i = fix effekt av behandling, $i = 1, \dots, 5$ alt. $1, \dots, 3$; b_j = slumpmässig effekt av block, $\text{IND}(0, \sigma_b^2)$, $j = 1, \dots, 4$; e_{ij} = slumpmässigt fel,

$\text{IND}(0, \sigma_e^2)$. Vid analysen av grundytetillväxt och ackumulationen av biomassa testades dessutom flera kovariater (antal träd per ha, grundyta och total biomassa vid anläggning) i modellen. Vid testen av skillnader mellan medeltalen för de olika blocken och behandlingarna nyttjades Tukey’s test för multipla jämförelser.

2.3 Gasflöden

Utbytet av koldioxid (CO_2), metan (CH_4) och lustgas (N_2O) mellan marken och atmosfären mättes med statiska mörka kammare. Användningen av mörka kammare

innebär att mätningarna inte inbegriper fastläggning av koldioxid via fotosyntes utan enbart CO₂-respiration. För att minimera störningen vid varje enskilt mättillfälle installerades metallramar permanent i marken ($n = 4$ inom varje provyta i försök 273 Anderstorp och $n = 9$ i vart och ett av de två försöksområdena, Syd och Nord, i försök 274 Bredaryd). Ramarnas sidor var ca 45 cm × 45 cm och de hade en fals som stack upp några cm över markytan. Den effektiva höjden på kyvetterna var 9 ± 2 cm i försök 273 Anderstorp och 13 ± 7 cm i försök 274 Bredaryd. Vid varje provtagningstillfälle under det första årets mätningar tätades anslutningen mellan kyvett och ram med vattenlås. År två ersattes vattenlåset med en tätningslist av gummi. I försök 273 Anderstorp togs gasprov var 10:e minut med början 5 minuter efter förslutning och provtagningen avslutades efter 35 minuter vilket gav totalt 4 prov. I försök 274 Bredaryd togs totalt 5 gasprov med 8 minuters intervall med början direkt efter förslutning och sista provet efter 32 minuter. Vid varje tillfälle togs prov om 22 ml gas. Proverna transporterades därefter till Botaniska Institutionen, Göteborgs Universitet för analys på gaskromatograf (GC). Provtagning i fält samt analys på GC har skett enligt [10].

Flödes hastigheten av respektive gas mellan marken och atmosfären beräknades från förändringen i gaskoncentration i kyvetten. Förändringen skattades med linjär regression. De skattningar av flödes hastigheten som accepterades hade antingen en riktningskoefficient som var skild från 0 och ett $R^2 > 0,9$ eller en riktningskoefficient som var mindre än 2 gånger det totala felet i mätningen för respektive gas. De mätningar som förkastades var med andra ord de värden där riktningskoefficienten var större än 2 gånger det totala mätfelet och hade ett $R^2 < 0,9$.

Effekter av behandlingarna med krossaska på den årliga (2004 och 2005) avgången av metan testades statistiskt med tvåvägs variansanalys (jämför avsnitt 2.2.3).

2.4 Vattenkemi

Prover på både avrinnande vatten och grundvatten togs i 274 Bredaryd. Alla prover samlades in i 100 ml syradiskade plastflaskor och förvarades i frys tills de skickades med post för kemisk analys till Markvetenskapliga Laboratoriet vid Institutionen för skogsekologi, SLU, Umeå. Proverna analyserades med avseende på elektrisk konduktivitet (κ), pH, alkalinitet ner till pH = 4,5, aciditet ner till pH = 4,5, aciditet i intervallet $4,5 < \text{pH} < 5,4$, aluminium (Al), arsenik (As), bor (B), kalcium (Ca), kadmium (Cd), kobolt (Co), krom (Cr), koppar (Cu), järn (Fe), kalium (K), litium (Li), magnesium (Mg), mangan (Mn), molybden (Mo), natrium (Na), nickel (Ni), total-fosfor (tot-P), bly (Pb), total-svavel (tot-S), selenium (Se), kisel (Si), vanadin (V), zink (Zn), fluorid (F⁻), klorid (Cl⁻), nitrit-kväve (NO₂⁻-N), nitrat-kväve (NO₃⁻-N), bromid (Br⁻), fosfat-fosfor (PO₄³⁻-P), sulfat-svavel (SO₄⁻-S), ammonium-kväve (NH₄⁺-N), total-kväve (tot-N), total-kol (tot-C), oorganiskt kol (oorg-C) och totalt organiskt kol (TOC). I tabell 3 anges analysmetoderna som användes. De halter som låg under detektionsgränsen antogs vara lika med halva detektionsgränsen.

Tabell 3. Kemiska analysmetoder för vatten.

Table 3. Chemical analysis methods used for water samples.

Ämne	Metod/apparatur	Detektionsgräns/ mätosäkerhet
Ammonium	FIA - Tecator 5012, Foss Tecator, Sollentuna, Sverige	0,004 – 0,07 mg l ⁻¹
Konduktivitet	Jenway 4010 kopplad till Mettler DL70 titrator. Elektrod-PCM 121	-
pH	Mettler DL70 titrator. Elektrod-8162SC ROSS	-
Alkalinitet	Mettler DL70 titrator, Greifensee, Schweiz.	-
Aciditet	Titring till pH-värde 4,5 följt av titring till pH-värde 5,4 (två aciditetsmått: till pH-värde 4,5 resp. från 4,5 – 5,4)	-
Totalkväve i vatten	Oxidation med kaliumperoxodisulfat	0,02 – 0,45 mg l ⁻¹
	FIA - Tecator 5012, Foss Tecator, Sollentuna, Sverige	
Totalanalys-katjoner	ICP/MS-DRC - Elan 6100, PerkinElmer, Norwalk, Connecticut, USA	mg l ⁻¹ : 0,002 – 3 µg l ⁻¹ : 0,008 – 180
Anjoner	HPLC - Dionex 4000i, Sunnyvale, Kalifornien, USA	NO ₂ -N och NO ₃ -N: 0.05 mg l ⁻¹ , övriga: 0.10 mg l ⁻¹
Organiskt kol	TOC-5000, Shimadzu, Kyoto, Japan	tot-C: 1,8 – 12 mg l ⁻¹ oorg C: 0,3 – 0,54 mg l ⁻¹ TOC: 1,9 – 12 mg l ⁻¹

2.4.1 Avrinnande vatten

Prover på det avrinnande vattnet togs i huvuddiket i område Syd (S-diket) respektive Nord (N-diket) (Figur 1). Provtagningen påbörjades den 30 oktober 2003 och har pågått med 1 – 2 veckors intervall sedan dess. I denna rapport redovisas resultaten fram till och med 1 november 2005, d v s ett år före och ett år efter tillförseln av aska.

Vid varje provtagning togs ett prov i S- respektive N-diket. Från och med i mars 2005 togs ytterligare ett prov vid varje provtagningstillfälle ca 40 – 50 m uppströms den ordinarie provtagningspunkten i S-diket. Orsaken till den extra punkten var att i januari 2005 fällde orkanen ”Gudrun” merparten av skogen på fastmarken öster om huvuddiket i område Syd, bl.a. fyra stora granar som kantade huvuddiket uppströms provtagningspunkten i S-diket. Detta skapade fyra stora rotvältor (ca 3 m diameter) i östra kanten på diket (fastmarkssidan) från provtagningspunkten och ca 30 – 40 m uppströms. Detta riskerade att påverka vattenkemin i den ordinarie provtagningspunkten efter tjällossningen, särskilt transporten av sediment. De fyra rotvältorna längs S-diket trycktes tillbaka vid upparbetningen av vindfällena under våren 2005 och tre av de fyra vältorna låg då helt mot marken. Provtagaren har inte sett några tecken på att rotvältorna skulle ha orsakat en stor utförsel av sediment i S-diket. Förutom eventuella effekter av rotvältorna kan den omfattande vindfällningen medföra ökad utlakning av nitrat m.m. från hygget.

Det stora diket som ligger norr om område Syd och rinner i SO riktning dämades under en period. Anledningen var att man kört över diket när man forslade ut det avverkade virket, vilket medförde att vägtrumman slutade att fungera. S-diket ansluter till detta

dike. I ett försök att kontrollera eventuella effekter till följd av Gudrun kompletterades område Syd med den ovan beskrivna extra mätpunkten i huvuddiket. I område Nord bedömde vi att de skador som orkanen orsakat inte skulle komma att påverka kemin i huvuddiket.

Innan askbehandlingen togs prover under ca ett år för att undersöka hur de två avrinningsområdena förhöll sig till varandra. Förutom att dessa data ligger till grund för att utvärdera effekterna av asktillförseln kan data användas för att bedöma eventuella effekter av orkanen Gudrun.

Vattenståndet i S- och N-diket mättes vid varje provtagning på en aluminiumprofil som installerades i botten några meter nedströms mätpunkterna. Dessa mätningar ger en grov uppfattning om vattenflödet varit stort eller litet vid ett provtagningstillfälle.

2.4.2 Grundvatten

I mitten av september 2003 installerades tre piezometrar och ett grundvattenrör i alla 18 mätpunkter i försök 274 Bredaryd. Piezometrar och grundvattenrör tillverkades av vita elrör (VP-rör 20 Uponor, yttre diameter = 20 mm, inre diameter = 17 mm) med en röd stopphylsa i botten. Piezometrarna borrades i ett 10 cm långt område med 65 – 80 hål (diameter = 1,5 – 2 mm) per piezometer. Grundvattenrören borrades med en 3,5-mm borrhål 3 – 4 cm. Rören tvättades inte före utsättning. Grundvattenrören installerades på 125 cm djup och piezometrarna med intag på ca 90 – 100 cm, 60 – 70 cm och 30 – 40 cm djup. Piezometrarna sattes ut i en liksidig triangel med sidan 30 cm på ca 3 – 9 dm avstånd från grundvattenröret (Figur 2).

Prover på grundvattnet togs med hjälp av piezometrarna. Piezometrarna tömdes dagen före provtagning efter det att grundvattennivån i piezometrarna och grundvattenrören mätts upp. Följande dag sögs det nytillrunna vattnet in i genom en plastslang kopplad till en provflaska med hjälp av en handpump. Varje piezometer provtogs separat men efter analys av elektrisk konduktivitet, pH, alkalinitet och aciditet slogs proverna ihop för resterande analyser. Hopslagningen baserades på avståndet till huvuddiket. Prover från samma avstånd och provtagningsdjup slogs ihop till ett prov (N1+N6+N7, N2+N5+N8, N3+N4+N9, S7+S8+S9, S4+S5+S6 och S1+S2+S3, härafter benämnda N167 o.s.v.). Prov på grundvattnet togs två gånger före asktillförseln (20 dec. 2003 och 3 juli 2004) och en gång efter (17 dec. 2004).

I samband med mätningarna av gasutbytet mellan marken och atmosfären (se avsnitt 2.3) mättes grundvattenytan i de grundvattenrör som var installerade vid varje enskild kammare (metallram) i de båda försöken.

2.4.3 Databearbetning och analys

2.4.3.1 Avrinnande vatten

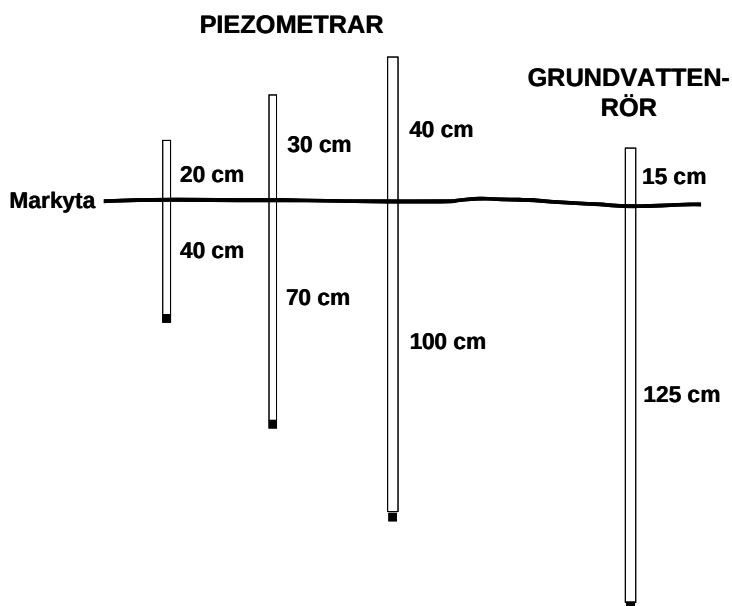
Kemiska data bedömdes visuellt utifrån grafer som visade de kemiska variablernas utveckling över tiden för område Syd och Nord samt de förväntade värdena för område Nord. De förväntade värdena representerar obehandlade förhållanden och beräknades med hjälp av observationerna i område Syd. Beräkningen gjordes enligt linjära samband

för perioden innan behandling ($\text{Conc}_{\text{Nord}} = k \times \text{Conc}_{\text{Syd}} + m$) för de variabler där sambanden bedömdes kunna bidra till tolkningen av resultaten.

2.4.3.2 Grundvatten

Kemiska data från de sammanslagna grundvattenproverna analyserades genom att beräkna ett medelvärde för varje nivå (30 – 40 cm, 60 – 70 cm och 90 – 100 cm) för område Syd och Nord ($n = 3$, proverna S123, S456 och S789 resp. N349, N257 och N167). Medelvärdena för område Syd och Nord testades om de var signifikant olika i en t-test (procedur T-TEST; [27]). Detta gjordes för varje variabel och provtagning. I några fall då det var en signifikant skillnad mellan de två områdena redan före asktillförseln så tolkades en avsevärt högre halt efter asktillförseln som att denna ändå berodde på asktillförseln.

En t-test gjordes även för att utröna om förhållandet i halt (kvoten) mellan område Nord och Syd ($\text{medelvärde}_{\text{Nord}}/\text{medelvärde}_{\text{Syd}}$) ändrades efter asktillförseln (kvoten för den 20 dec. 2003 jämfört med kvoten för den 17 dec. 2004).



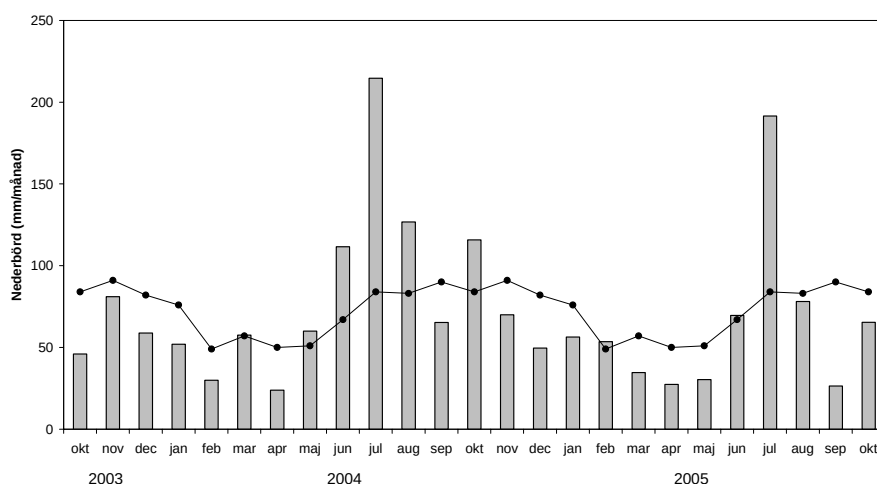
Figur 2. Beskrivning av installationen av piezometrar och grundvattenrör i mätpunkterna S1 – S9 och N1 – N9 i försök 274 Bredaryd.

Figure 2. A principle drawing of the installation of piezometers and groundwater tubes at the sampling points (S1 – S9 och N1 – N9) at the experimental site 274 Bredaryd.

3 Resultat

3.1 Hydrologi

Månadsnederbörden under mätperioden var oftast lägre än normalnederbörden vid SMHI:s mätstation 7309 Stora Segerstad. I juli år 2004 och 2005 var nederbörden ungefär dubbelt så hög som normalt (Figur 3).



Figur 3. Månadsnederbörd i Eskilstorp (staplar), 9 km från försök 273 Anderstorp och 5 km från försök 274 Bredaryd. Punkterna visar 30-års medelvärdet för varje månad uppmätt på mätstation 7309 Stora Segerstad [1].

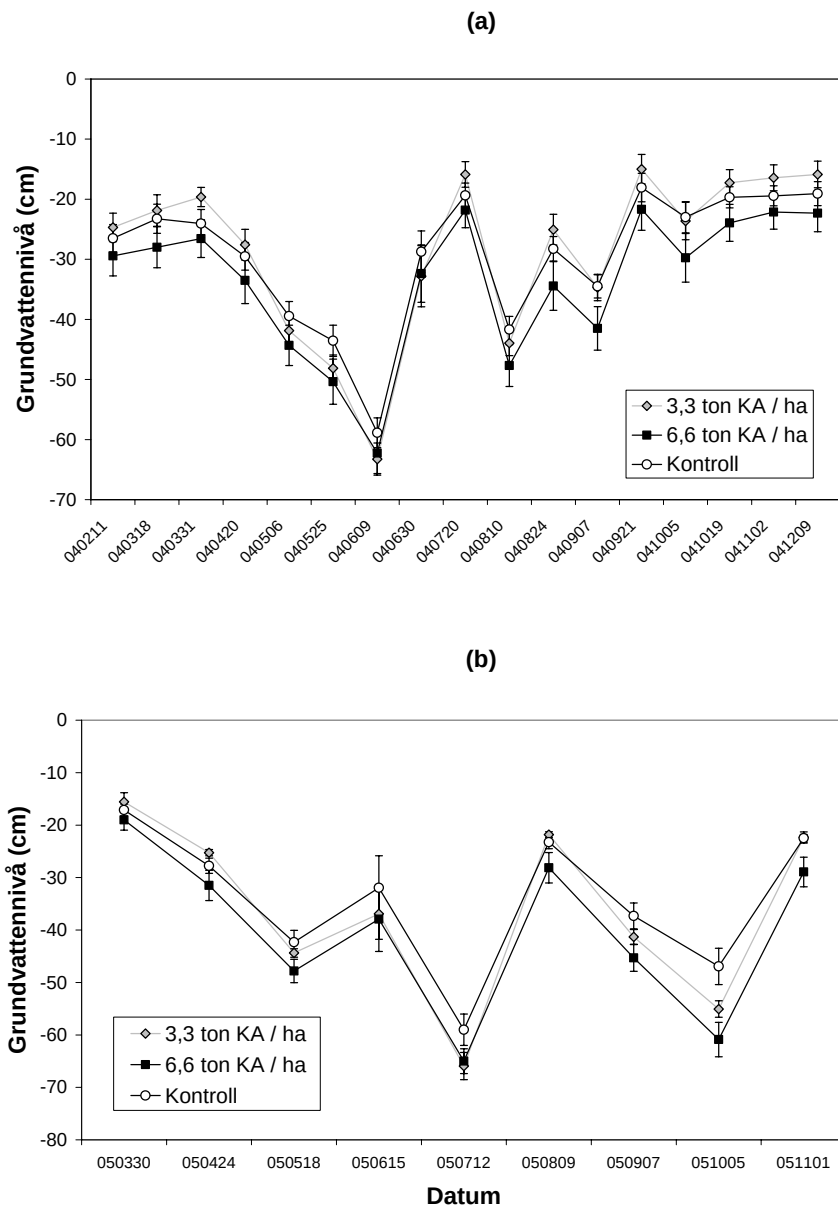
Figure 3. Monthly precipitation at Eskilstorp (bars), 9 km away from the experimental site 273 Anderstorp and 5 km from the experimental site 274 Bredaryd. The dots show monthly 30-years means measured at the field station 7309 Stora Segerstad [1].

I försök 273 Anderstorp låg grundvattenytan som högst under hela mätperioden ca 20 cm under markytan (Figur 4). Under växtsäsongen sjönk vattenytan båda åren ned till som mest ca 60 cm djup, för att under höst och vinter variera mellan 20 och 40 cm djup under markytan.

I försök 274 Bredaryd låg grundvattenytan generellt något högre (0 – 10 cm) jämfört med 273 Anderstorp (Figur 5). I de båda områdena (Syd och Nord) i Bredaryd låg nivån mellan 10 och 15 cm under en stor del av observationsperioden (Figur 5). Under några korta perioder sjönk nivån till 30 – 40 cm och som mest ner till 50 – 60 cm (hösten 2003). Under 2005 var vattenytan generellt betydligt lägre än under 2004.

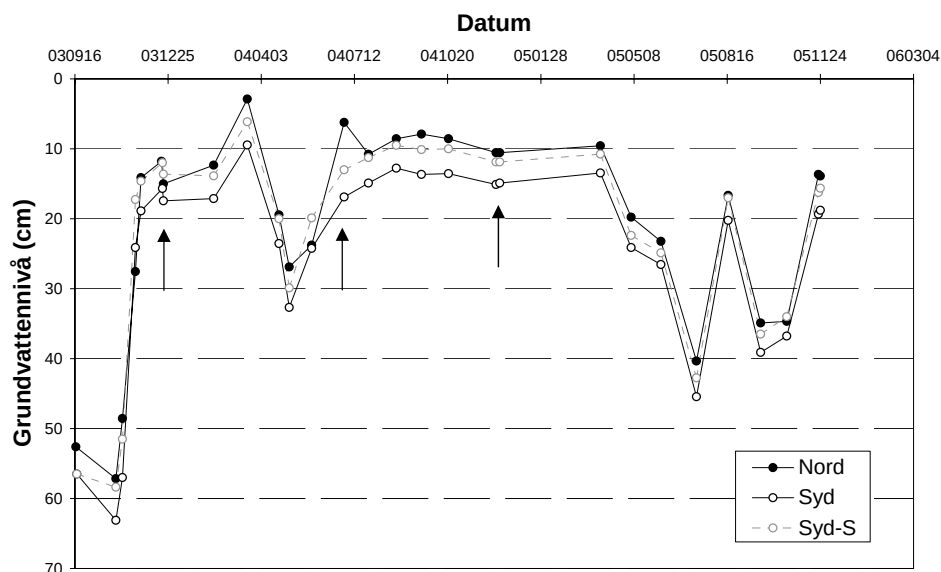
Medelgrundvattennivån var i genomsnitt för hela mätperioden 4,4 cm lägre i område Syd än i område Nord (Figur 5). Mätpunkten S7 avvek betydligt från övriga mätpunkter.

Då medelgrundvattennivån beräknades utan S7 för område Syd var skillnaden 1,1 cm. Grundvattennivån i båda områdena varierade på ett likartat sätt över tiden.



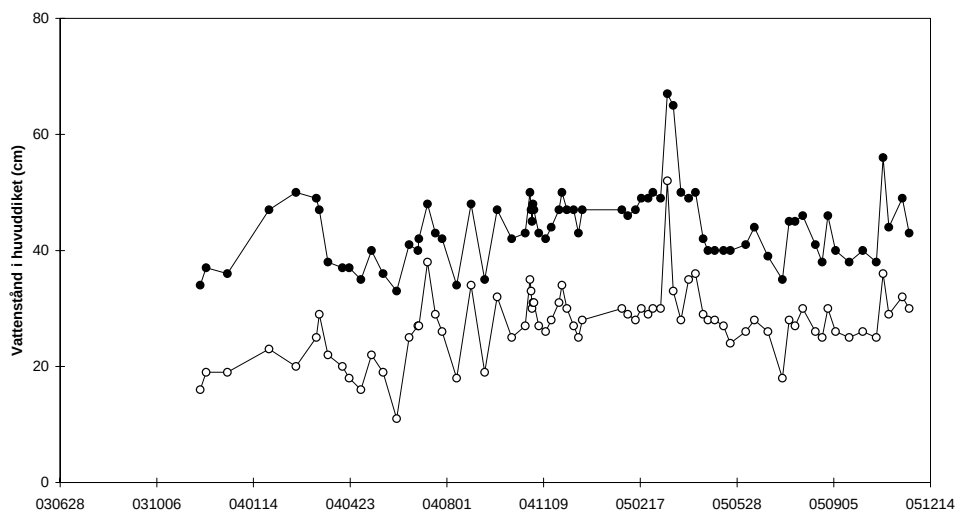
Figur 4. Grundvattennivå i försök 273 Anderstorp under 2004 (a) och 2005 (b). Medeltal per försöksled vid tidpunkterna för gasprovtagning. Nivån mättes intill varje gaskyvet och medelvärden beräknades först för varje block och behandling ($n = 4$) och sedan för varje behandling ($n = 4$). KA = krossaska.

Figure 4. Groundwater levels at experimental site 273 Anderstorp during 2004 (a) and 2005 (b). The level was measured in tubes adjacent to the permanently installed metal frames for gas sampling at the same occasions as gases were sampled. Means per block and treatment were calculated ($n = 4$), and thereafter means by treatment ($n = 4$). KA = crushed ash.



Figur 5. Grundvattennivå i försök 274 Bredaryd under år 2004 och 2005. Medelnivå i område Nord ($n = 9$) respektive område Syd ($n = 9$ eller 8; med och utan mätpunkten S7). Pilarna visar vid vilka tidpunkter som grundvatten provtogs för kemisk analys.

Figure 5. Groundwater levels at the experimental site 274 Bredaryd during 2004 and 2005. Means for the northern area ("Nord"; $n = 9$) and the southern area ("Syd"; $n = 9$) or ("Syd-S"; $n = 8$) (with and without point S7). The arrows indicate the time of sampling of groundwater for chemical analyses.



Figur 6. Vattenståndet i huvuddikena (nivån i diket) i område Syd ($\circ$) och område Nord ($\bullet$) under mätperioden i försök 274 Bredaryd.

Figure 6. Water level in the main ditches in area "Syd" ($\circ$) and area "Nord" ($\bullet$) during the observation period at the experimental site 274 Bredaryd.

Vattenståndet i huvuddikena i område Syd och Nord uppvisade ett likartat mönster över tiden (Figur 6). Förklaringsgraden (R^2) för det linjära sambandet mellan vattenståndet i område Syd och Nord var 0,69 för hela mätperioden.

3.2 Beståndsdata

3.2.1 Tillväxt och biomassa

I försök 273 Anderstorp fanns inga statistiskt signifikanta ($p < 0,05$) skillnader mellan de olika behandlingarna avseende grundytetillväxt ($p_{\text{behandling}} = 0,85$) eller förändring av total biomassa ($p_{\text{behandling}} = 0,85$) under de två första åren efter behandling. Den genomsnittliga grundytetillväxten under tvåårsperioden var för alla ytor i försöket ("overall mean") $0,55 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$, vilket motsvarade en ackumulationen av biomassa på $3,3 \text{ Mg t.s. ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$. Det senare motsvarar ett upptag av $0,59 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ ($5900 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$). I variansanalysen påverkade antalet träd per ha både grundytetillväxten ($p = 0,016$) och ackumulationen av biomassa ($p = 0,092$). Införandet av dessa kovariater i den statistiska modellen påverkade behandlingseffekten marginellt.

Tabell 4. Halter av olika ämnen i årsbarr (C0) och fjolårsbarr (C+1) samt barrvikter (BV) för årsbarr hos tall i försök 273 Anderstorp. Medeltal ($n = 4$). Värden i fet stil följer av en asterisk visar statistiskt signifikant skilda värden ($p < 0,05$) från obehandlad kontroll (0). KA = $3,3 \text{ ton krossaska ha}^{-1}$ och 2KA = $6,6 \text{ ton krossaska ha}^{-1}$.

Table 4. Elemental concentrations in current (C0) and one-year old Scots pine needles (C+1), and, needle weight (BV) of current needles in experiment 273 Anderstorp. Means ($n = 4$). Bold values with an asterisk is statistically significantly ($p < 0.05$) different from the control. KA = $3.3 \text{ tonnes crushed ash ha}^{-1}$ and 2KA = $6.6 \text{ tonnes crushed ash ha}^{-1}$.

Ämne	C0			C+1		
	0	KA	2KA	0	KA	2KA
N (mg g ⁻¹)	16	15	15	14	14	15
P (mg g ⁻¹)	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2
K (mg g ⁻¹)	5,1	5,0	5,6*	4,2	4,4*	4,9*
Ca (mg g ⁻¹)	2,4	2,5	2,8	3,4	3,6	3,8
Mg (mg g ⁻¹)	1,4	1,4	1,4	0,9	1,0	0,9
S (mg g ⁻¹)	2,8	1,8	2,8	3,8	4,2	4,2
Cu (µg g ⁻¹)	3,2	4,2	5,0	3,7	4,1	4,4
Fe (µg g ⁻¹)	24	39	27	60	48	68
Zn (µg g ⁻¹)	60	63	65	62	64	69
B (µg g ⁻¹)	25	27	29	17	27*	24*
C (%)	52	51	52	52	51	52
BV (g 15 barr ⁻¹)	0,62	0,70	0,74	–	–	–

3.2.2 *Barrkemi och barrvikt*

Två år efter asktillförseln fanns det påvisbara effekter på halterna av K och B i barren jämfört med obehandlad kontroll (Tabell 4). Halten K var 10 % högre i årsbarren på de ytor som fick den höga givan krossaska (2KA). I fjolårsbarren ökade K-halten i båda askgivorna (5 % i KA och 17 % i 2KA) och det fanns en statistiskt påvisbar ($p < 0,05$) effekt av ökad dos. Även B-halten ökade i fjolårsbarren i båda askgivorna (59 % och 41 %), men i det fallet fanns ingen statistiskt signifikant effekt av dosen.

Enligt medeltalen var årsbarren något tyngre i de försöksled som fick aska än i kontrollen (13 % i KA och 19 % i 2KA), men skillnaderna var inte statistiskt påvisbara (Tabell 4).

3.3 Gasflöden

Utbytet av lustgas (N_2O) kunde endast sporadiskt registreras och var vanligtvis under detektionsnivån i båda försöken.

3.3.1 *Koldioxid*

Mörkerrespirationen av koldioxid påverkades ej av asktillförseln vare sig i försök 273 Anderstorp eller försök 274 Bredaryd (Tabell 5–6, Figur 7–8). Avgivningen i Anderstorp var ca $8\,000 \pm 15 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ under år 2004 och ca $12\,000 \pm 43 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ under 2005 (Tabell 5). I Bredaryd var avgivningen år 2004 $14\,000 \pm 92 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ och under 2005 $16\,000 \pm 64 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (Tabell 6).

3.3.2 *Metan*

Avgivningen av metan från ytorna inom försök 273 Anderstorp varierade från ett svagt upptag under våren till en avgivning av $100 - 150 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ tim}^{-1}$ under sommar och höst 2004 (Figur 7). Under 2005 varierade den maximala avgivningen mellan $100 - 300 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ tim}^{-1}$.

Variansanalys på den totala årliga avgivningen (2004 och 2005) av metan visade inte på några statistiskt signifikanta ($p_{\text{behandling}} > 0,5$) skillnader efter tillförsel av krossaska. Det gällde för de båda testade givorna. Sett till medeltalen var metanavgången 144 % i försöksledet med den låga givan (KA) och 108 % i de höga givan (2KA) i förhållande till kontrollen (100 %) under 2004 (Tabell 5). Under 2005 var motsvarande värden 176 % för KA och 152 % för 2KA. En ökning av metanavgivningen med 60 % motsvarar ca $90 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-2} \text{ år}^{-1}$ ur växthussynpunkt.

Däremot fanns tendenser till effekt om man studerar de årliga mönstren i avgivning. Tillförsel av aska ledde till en ökning av metanavgivningen från och med slutet av sommaren 2004, d.v.s. knappt ett år efter spridningen av aska. Under 2005 avgavs mer metan från de askbehandlade ytorna under hela året.

Metanavgivningen från ytorna i försök 274 Bredaryd var i samma storleksordning eller något högre än i 273 Anderstorp (Tabell 6, Figur 8). Under ”kalibreringsåret” 2004 var

avgivningen från det blivande behandlingsområdet (Nord) ca 50 % högre än från referensområdet. Om relationen i metanavgivning mellan de två områdena används för att prediktera den metanavgivning som borde skett i område Nord (det askbehandlade området) om aska inte tillförts erhöles värdet $11.2 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$. Det predikterade värdet är i stort sett exakt detsamma som det uppmätta värdet ($11.6 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$). Baserat på mätningarna under ett år efter asktillförseln i Bredaryd gick det inte att detektera någon effekt av asktillförseln.

Tabell 5. Avgivning av koldioxid och metan från marken i dikad och beskogad torvmark (försök 273 Anderstorp) med och utan tillförsel av krossaska. Askan tillfördes 3 – 4 september 2003.

Table 5. Emissions of carbon dioxide and methane from the soil in a ditched peatland forest (experiment 273 Anderstorp) with and without addition of crushed ash. The ash was applied during 3–4 September 2003.

Behandling	Koldioxid ^a ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ år}^{-1}$)		Metan ^a ($\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ år}^{-1}$)	
	2004	2005	2004	2005
Kontroll	$815^b \pm 147^c$	1174 ± 185	$0,34 \pm 0,08$	$0,64 \pm 0,09$
3,3 ton krossaska ha^{-1}	812 ± 104	1258 ± 173	$0,49 \pm 0,29$	$1,13 \pm 0,57$
6,6 ton krossaska ha^{-1}	787 ± 122	1230 ± 179	$0,37 \pm 0,08$	$0,97 \pm 0,22$

^a Mätningar med mörka kammare innebär att upptag genom fotosyntes utesluts.

^b Medelvärde beräknat över blocken ($n = 4$)

^c Standardfel ($\text{SD}/n^{0.5}$)

Tabell 6. Avgivning av koldioxid och metan från marken i dikad och beskogad torvmark (försök 274 Bredaryd) med och utan tillförsel av krossaska. Askan tillfördes 27 oktober 2004.

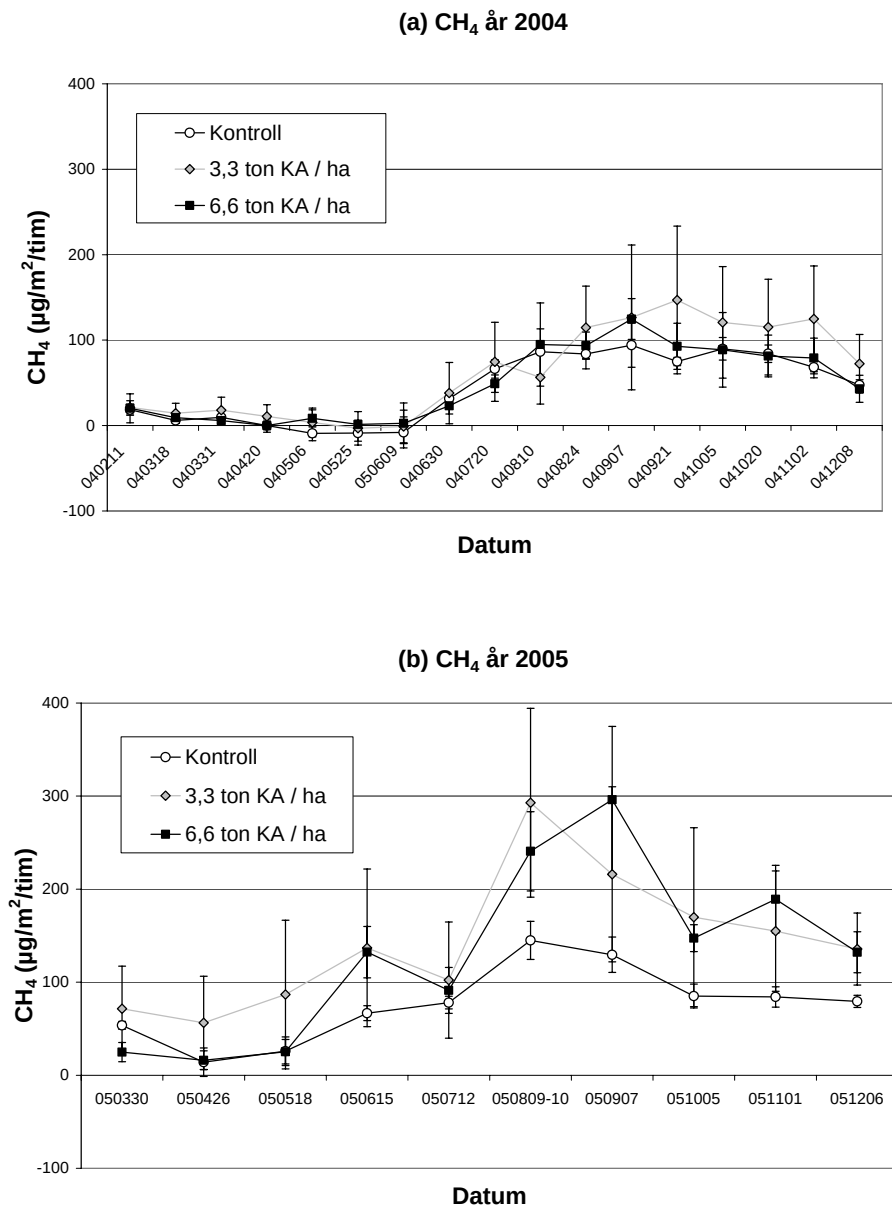
Table 6. Emissions of carbon dioxide and methane from the soil in a ditched peatland forest (experiment 274 Bredaryd) with and without addition of crushed ash. The ash was applied on 27 October 2004.

Behandling	Koldioxid ^a ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ år}^{-1}$)		Metan ^a ($\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ år}^{-1}$)	
	2004	2005	2004	2005
Kontroll	$1320^b \pm 211^c$	1650 ± 201	$1,14 \pm 0,53$	$0,72 \pm 0,38$
3,1 ton krossaska ha^{-1}	1450 ± 273	1560 ± 219	$1,78 \pm 0,91$	$1,16 \pm 0,50$

^a Mätningar med mörka kammare innebär att upptag genom fotosyntes utesluts.

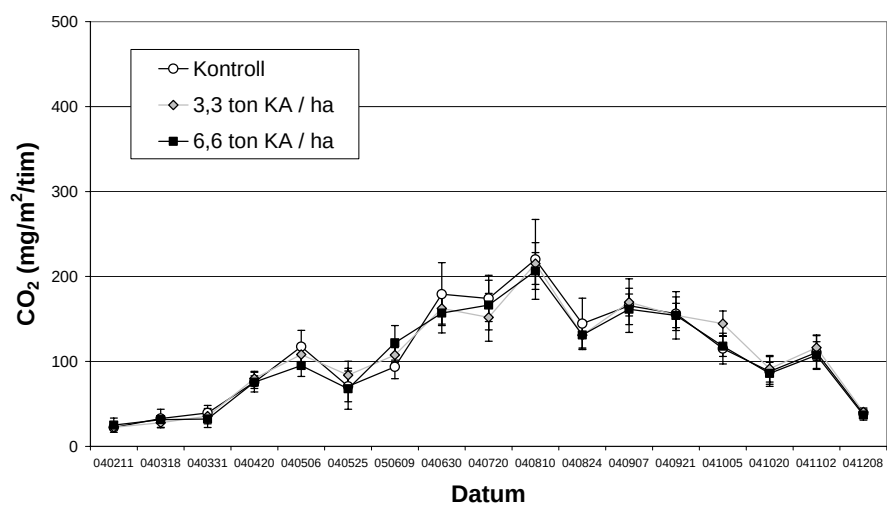
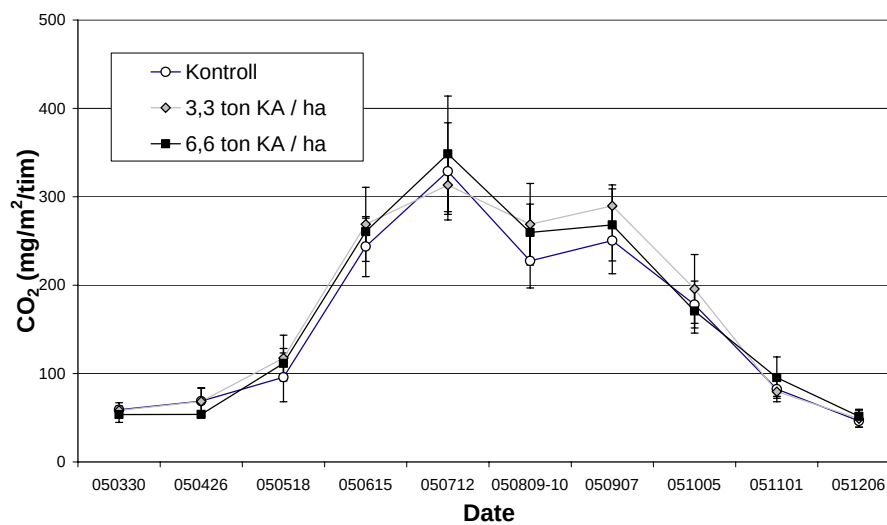
^b Medelvärde beräknat över blocken ($n = 4$)

^c Standardfel ($\text{SD}/n^{0.5}$)

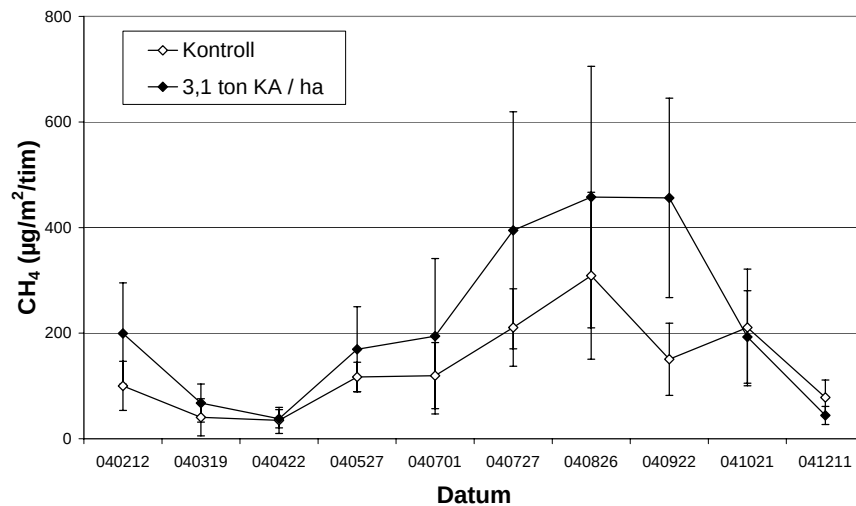
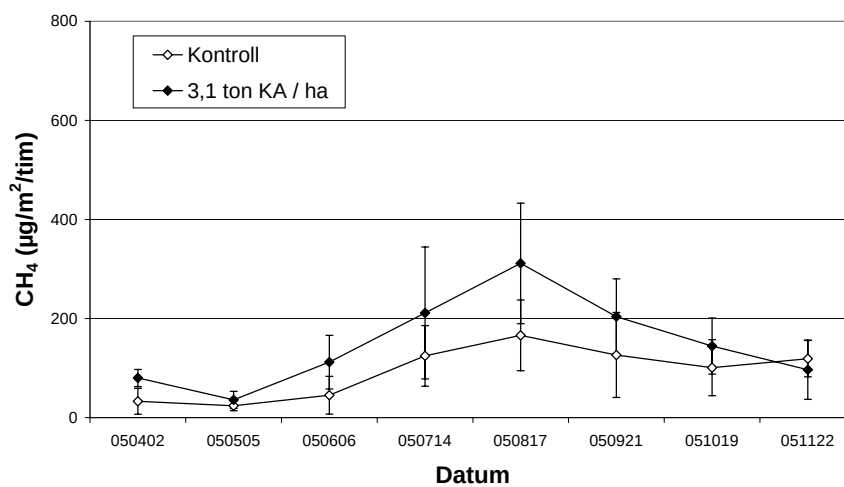


Figur 7. Avgivning av metan ($\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ tim}^{-1}$) under 2004 (a) och 2005 (b) samt koldioxid ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ tim}^{-1}$) under 2004 (c) och 2005 (d). Data från ytor utan tillförsel av aska (kontroll) samt från ytor som erhållit 3,3 respektive 6,6 ton krossaska (KA) ha^{-1} . Medeltal ($n = 4$) och medelfel per behandling och provtagningstidpunkt. Askan tillfördes 3–4 september 2003. Data från försök 273 Anderstorp.

Figure 7. Emission of methane ($\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) during 2004 (a) and 2005 (b), and of carbon dioxide ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ tim}^{-1}$) during 2004 (c) and 2005 (d). Data from untreated sample plots ("Kontroll") and from plots where crushed ash ("KA") was added, 3.3 and 6.6 tonnes ha^{-1} , respectively. Means ($n = 4$) and standard error per treatment and time of sampling. The ash was applied on 3–4 September 2003. Data from the experimental site 273 Anderstorp.

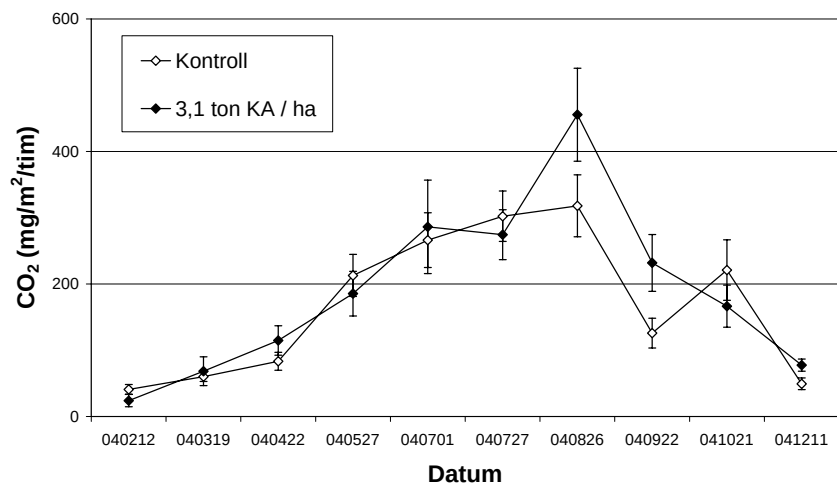
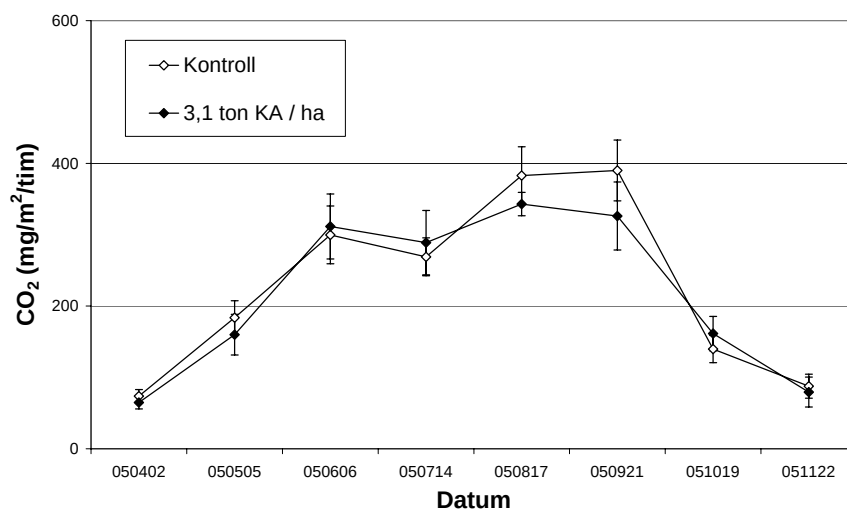
(c) CO₂ år 2004(d) CO₂ år 2005

Figur 7 forts.; Figure 7 continues.

(a) CH₄ år 2004(b) CH₄ år 2005

Figur 8. Avgivning av metan ($\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ tim}^{-1}$) under 2004 (a) och 2005 (b) samt av koldioxid ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ tim}^{-1}$) under 2004 (c) och 2005 (d). Data från område Syd (Kontroll) och område Nord (3,1 ton krossaska (KA) ha^{-1}) i försök 274 Bredaryd. Medeltal ($n = 9$) och medelfel per behandling och provtagningstidpunkt. Asktilförseln gjordes 2004-10-27.

Figure 8. Emission of methane ($\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) during 2004 (a) and 2005 (b), and of carbon dioxide ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) during 2004 (c) and 2005 (d). Data from the untreated area "Syd" ("Kontroll") and area "Nord" treated with crushed ash (3,1 ton KA ha^{-1}) at the experimental site 274 Bredaryd. Means ($n = 9$) and standard error per treatment and time of sampling. The ash was applied on 27 October 2004.

(c) CO₂ år 2004(d) CO₂ år 2005

Figur 8 forts.; Figure 8 continues.

3.4 Vattenkemi

3.4.1 *Avrinnande vatten - huvuddiken*

Några få dagar efter tillförseln av aska ökade den elektriska konduktiviteten (κ) och halterna av B, Br⁻, Ca, Cd, Co, K, Cl⁻, Li, Mg, Mn, Na, P, PO₄³⁻-P, S, SO₄-S och Zn (Figur 9). Ökningarnas varaktighet varierade för olika ämnen:

- Två–fyra månader: Cd, Co, Mg och Na och κ .
- Ca sex månader: Cl⁻ och SO₄-S.
- Hela mätperioden: B, Ca, K, Li, Mn och Zn.

För halterna av Br⁻, PO₄³⁻-P och P dröjde det ca tre månader innan de första förhöjningarna noterades, vilka sedan varade i sju till åtta månader (Figur 9).

Efter asktillförseln var halterna av Pb och V lägre än förväntat i ca sex respektive nio månader (Figur 9). Därefter tenderade halten Pb att öka. Halten As tenderade att minska initialt. En minskning noterades även för TOC-halten som var lägre än förväntat i ca åtta månader.

Halterna av As, Pb och V samvarierade linjärt ($p < 0,01$) med TOC-halten inom område Nord (alla observationer både före och efter asktillförseln ingår i sambanden):

$$C_{As} = 0,011C_{TOC} + 0,24, R^2 = 0,65;$$

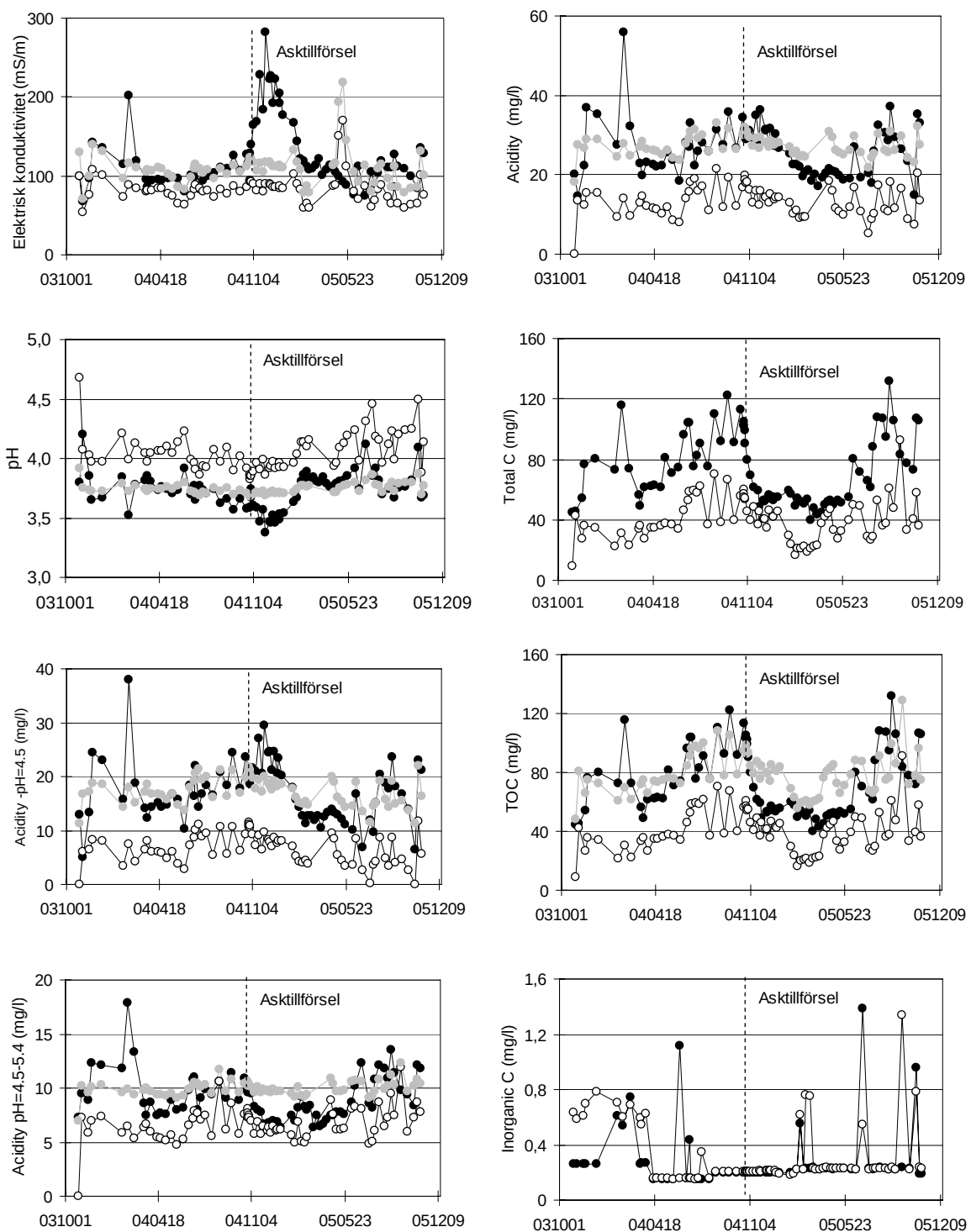
$$C_{Pb} = 0,065C_{TOC} - 0,21, R^2 = 0,87;$$

$$C_V = 0,014C_{TOC} - 0,036, R^2 = 0,68.$$

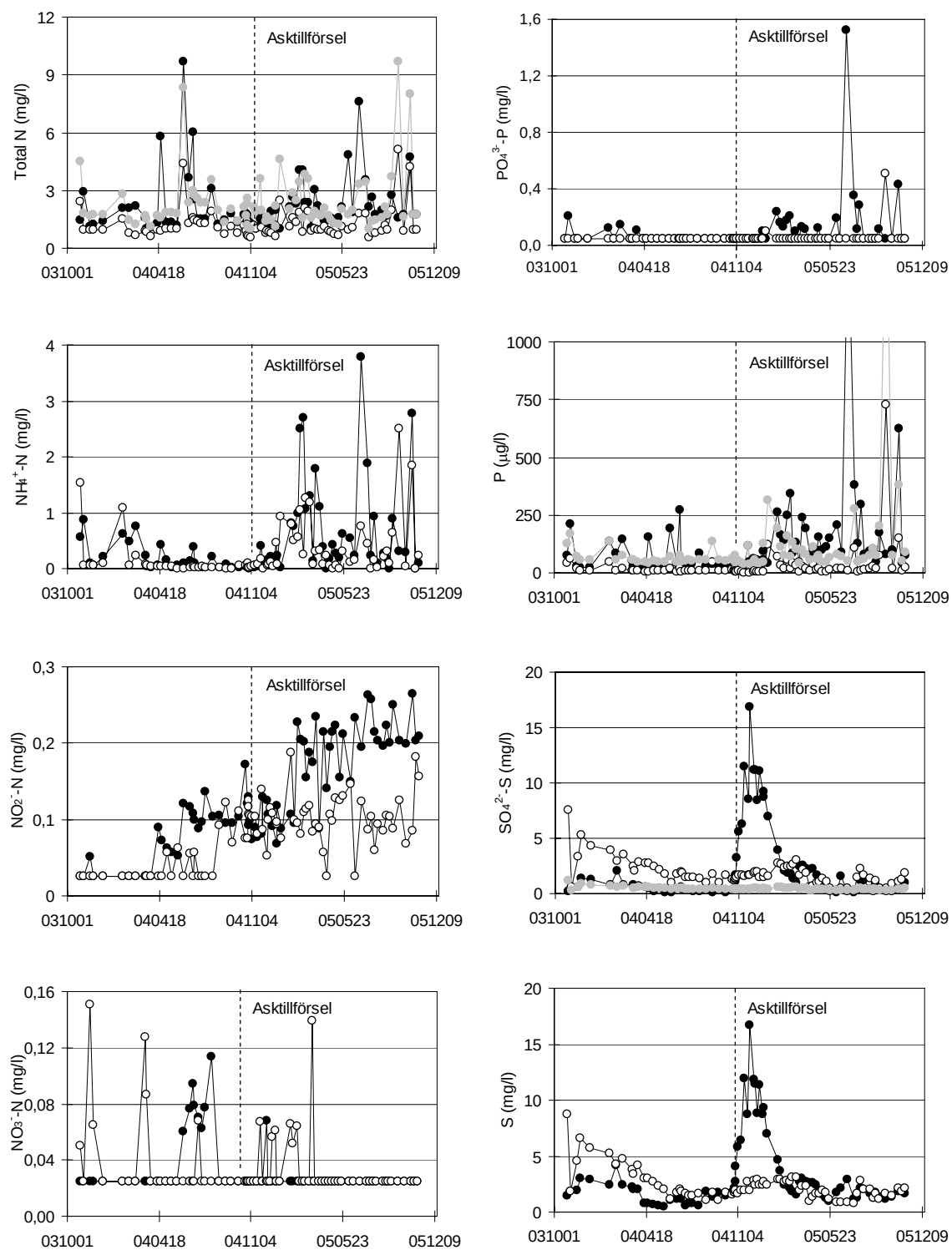
pH-värdet var lägre än förväntat i tre månader efter asktillförseln (Figur 9). Under denna period tenderade den totala aciditeten (till pH-värde 5,4) att vara förhöjd. Under de därefter kommande fem månaderna var aciditeten lägre än förväntat samtidigt som pH-värdet var något förhöjt. Den totala aciditeten samvarierade linjärt (positivt) med TOC-halten (Område Nord, alla observationer: $Acid = 0,19C_{TOC} + 13, R^2 = 0,43, p < 0,01$).

Figur 9. Halten av olika ämnen, elektrisk konduktivitet och pH-värde i avrinnande vatten från huvuddikena i område Syd (○; obehandlad kontroll) och område Nord (●; askbehandling) under mätperioden i försök 274 Bredaryd. För vissa variabler visas den förväntade halten i område Nord (◐) om aska inte hade tillförts, dvs den halt som beräknats utgående från halten i område Syd. Den lodräta streckade linjen anger tidpunkten för asktillförseln (2004-10-27).

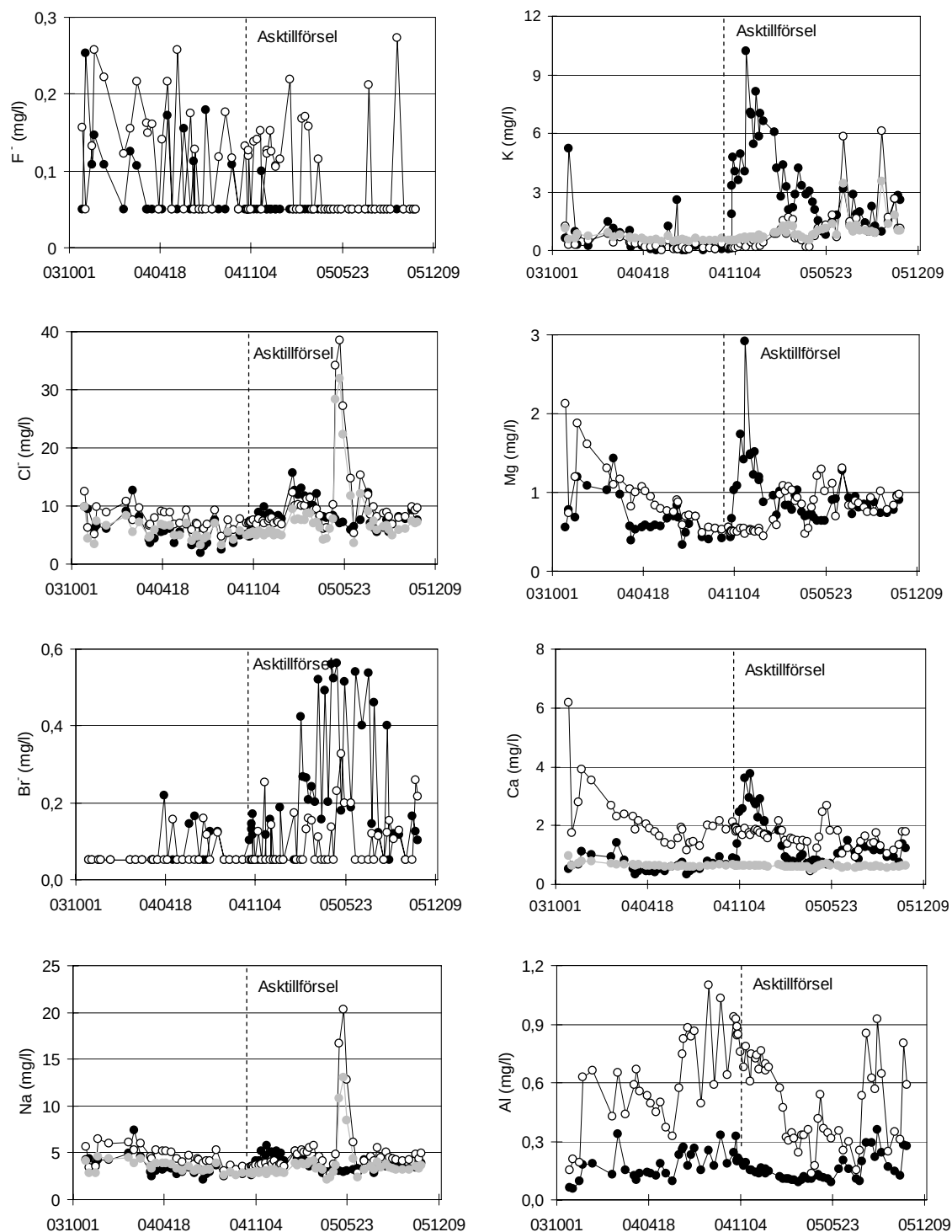
Figure 9. Elemental concentrations, electric conductivity and pH in run off from the main ditches in area "Syd" (○; untreated control) and area "Nord" (●; ash treatment) during the observation period at the experimental site 274 Bredaryd. For some variables, the expected concentration without ash addition is given for area Nord (◐) based on a relation to the concentration in area "Syd". The dashed vertical line denote the time of ash addition (2004-10-27).



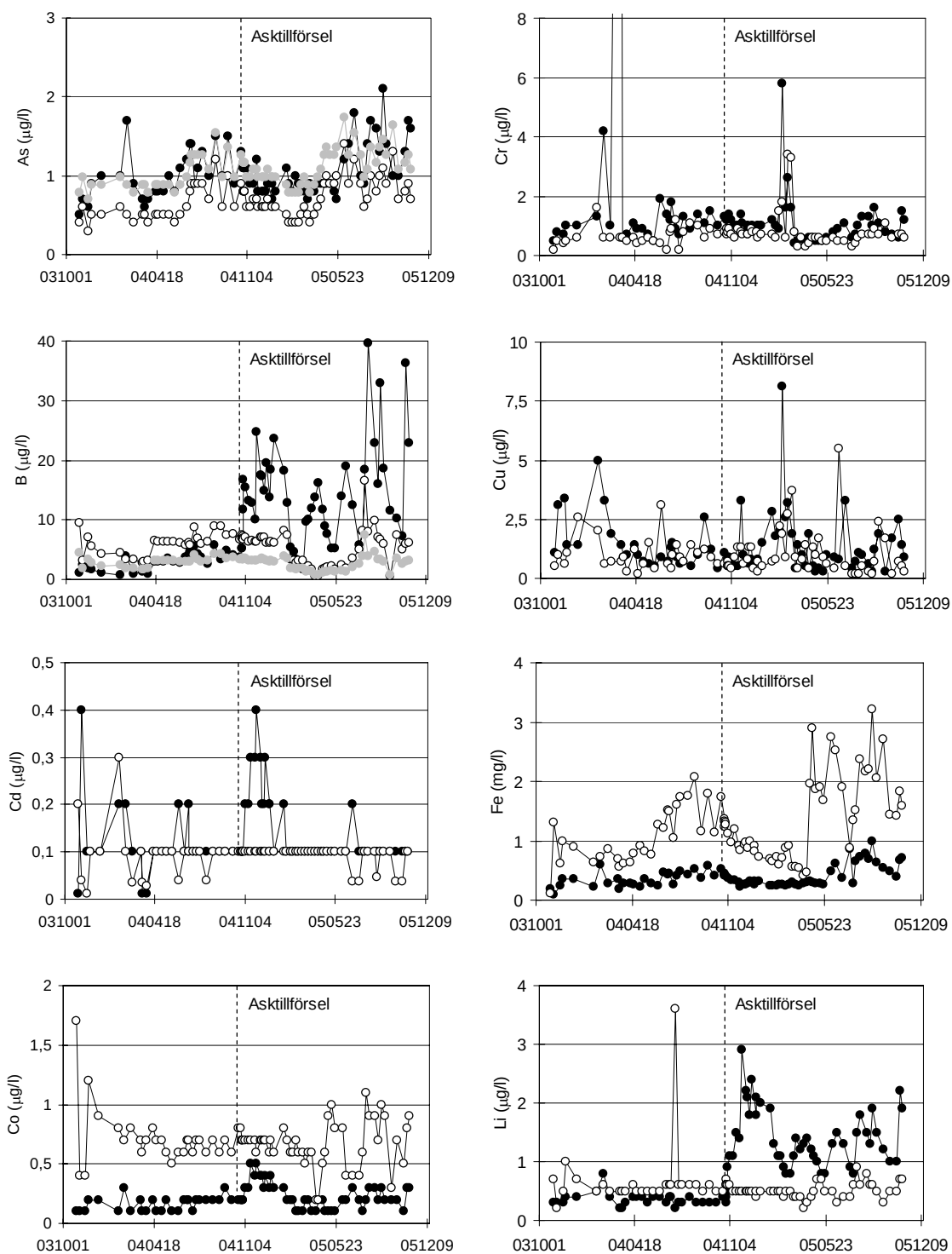
Figur 9 forts.; Figure 9 continues.



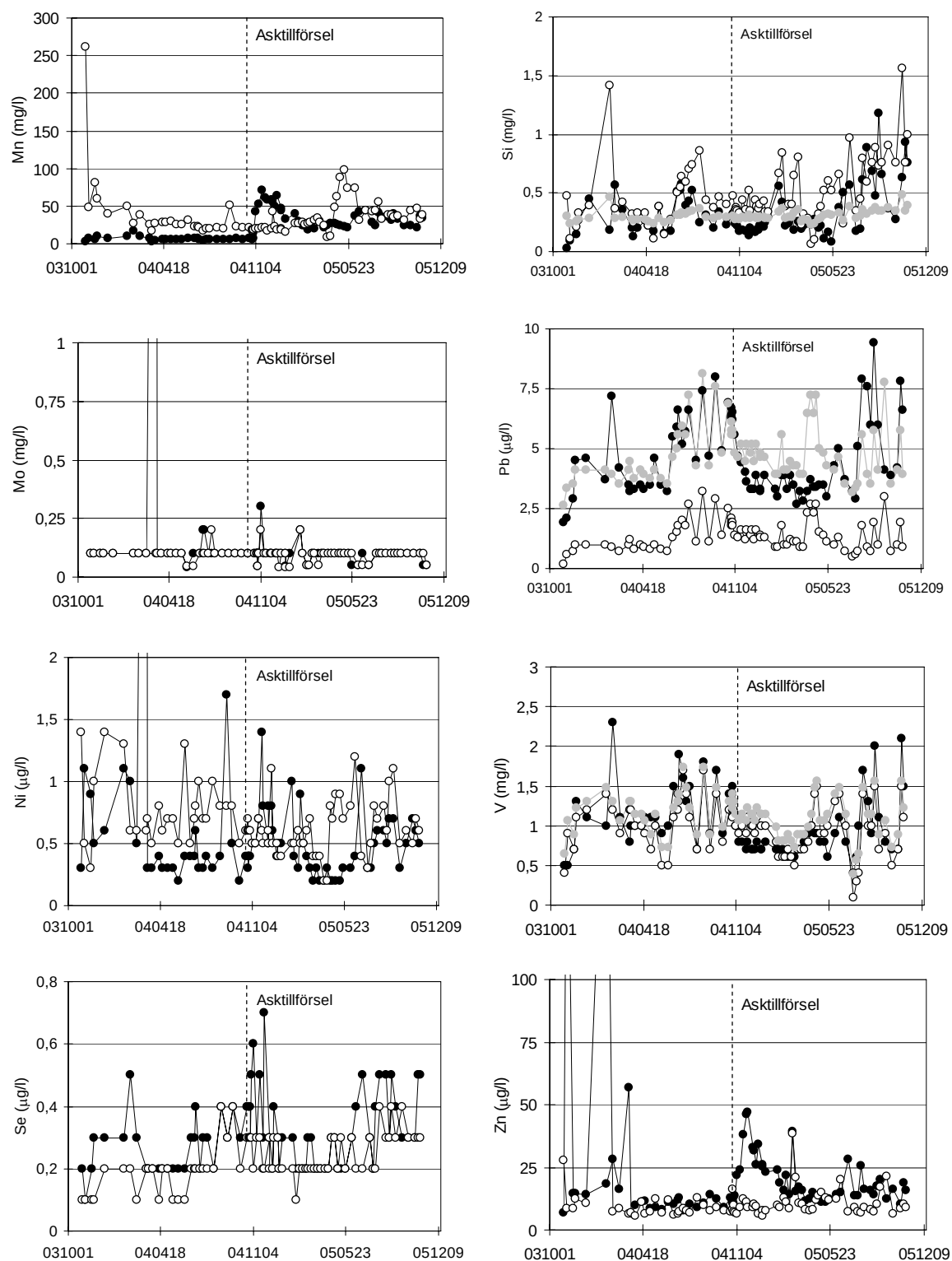
Figur 9 forts.; Figure 9 continues.



Figur 9 forts.; Figure 9 continues.



Figur 9 forts.; Figure 9 continues.



Figur 9 forts.; Figure 9 continues.

3.4.2 Grundvatten

Det var få signifikanta skillnader i grundvattenkemi mellan områdena (Syd och Nord) före behandling (Bilaga 1 – 3). Det gällde framför allt provtagningen i dec. 2003 (se K och NH_4^+ -N i bilaga 2 samt S i bilaga 3). Vid den andra provtagningen före behandling, i juli 2004, var det fler halter som var eller tenderade att vara olika (Bilaga 1 – 3).

Två månader efter tillförseln av aska var halterna av B, Ca, Cd, Co, K, Cl^- , Li, Mn, Na, P, S och SO_4^{2-} -S högre i grundvattnet i område Nord än i område Syd (Tabell 7, Bilaga 1–3).

- B, K och Mn var förhöjda ända ner till 90 – 100 cm djup. Halterna av dessa ämnen avtog med ökande djup i det behandlade området.
- Ca, Li, P, S och SO_4^{2-} -S var förhöjda ner till 60 – 70 cm djup.
- Cd, Co, Na och Cl^- var endast förhöjda på 30 – 40 cm djup.
- Halten As och TOC på 30 – 40 cm djup tenderade att vara lägre i område Nord än i område Syd.

Effekterna på grundvattenkemin överensstämde med effekterna som noterades för motsvarande ämnen i diken. De effekter som noterades i t-testerna för NH_4^+ -N och V tycks vara slumpmässigt uppkomna. Ett skäl som talar för detta var att effekterna endast påvisades på det största djupet (Tabell 7).

I en alternativ analys av kemiska data på grundvatten testades istället förhållandet i halter (kvoten) mellan område Nord och Syd. Resultaten som erhöles var liknande de ovan redovisade, men antalet påvisade skillnader efter behandling var färre.

Den elektriska konduktiviteten, pH-värdet och aciditeten analyserades i varje grundvattenprov för att få en uppfattning om den rumsliga variationen inom de två områdena (Syd och Nord). Vattnet räckte emellertid inte till fullständiga provomgångar, vilket medförde att analysen av den rumsliga variationen försvårades. Det gick inte att se några tydliga effekter av asktillförseln på någon av dessa variablerna.

Tabell 7. Medelhalter i grundvattnet på olika djup två månader efter asktillförsel (3,1 ton t.s. krossaska ha^{-1}) i försök 274 Bredaryd. Data för de variabler som på något djup hade statistiskt signifikant olika medelhalt ($p < 0,10$) i område Syd och Nord. Värden i fet stil följt av en asterisk visar signifikant skilda värden ($p < 0,05$) mellan område Syd och Nord. Värden i kursiv stil visar skillnader där $0,05 < p < 0,10$.

Table 7. Mean groundwater concentrations at different depths two months after ash addition (3.1 tonnes DM of crushed ash ha^{-1}) at the experimental site 274 Bredaryd. Data given for the variables showing a statistically significantly ($p < 0.10$) difference between the untreated area ("område Syd") and the treated area ("område Nord"). Bold values indicate a significant ($p < 0.05$) difference between the two areas (Syd and Nord), and values in italics indicate a difference where $0.05 < p < 0.10$.

Tabell 7 fortsätter; Table 7 continues.

Ämne	Djup (cm)	Område Syd, (Kontroll)	Område Nord, (3,1 ton krossaska ha ⁻¹)
As (µg l ⁻¹)	30 – 40	1,6	1,3*
	60 – 70	1,2	1,2
	90 – 100	0,83	0,97
B (µg l ⁻¹)	30 – 40	1,5	14*
	60 – 70	0,87	4,8*
	90 – 100	0,63	2,0*
Ca (mg l ⁻¹)	30 – 40	0,68	3,5*
	60 – 70	0,88	1,8*
	90 – 100	1,1	1,3
Cd (µg l ⁻¹)	30 – 40	0,10	0,40*
	60 – 70	0,087	0,17
	90 – 100	0,051	0,10
Co (µg l ⁻¹)	30 – 40	0,10	0,47*
	60 – 70	0,11	0,13
	90 – 100	0,074	0,081
K (mg l ⁻¹)	30 – 40	0,098	6,4*
	60 – 70	0,15	1,1*
	90 – 100	0,26	0,73*
Cl ⁻ (mg l ⁻¹)	30 – 40	3,8	8,0*
	60 – 70	5,1	5,8
	90 – 100	7,4	6,7
Li (µg l ⁻¹)	30 – 40	0,23	2,2*
	60 – 70	0,27	0,60*
	90 – 100	0,37	0,53*
Mn (µg l ⁻¹)	30 – 40	4,7	63*
	60 – 70	7,4	42*
	90 – 100	9,2	24*
Na (mg l ⁻¹)	30 – 40	2,6	5,2*
	60 – 70	2,8	3,4
	90 – 100	3,5	3,6
NH ₄ ⁺ -N (mg l ⁻¹)	30 – 40	0,37	0,38
	60 – 70	0,79	0,40
	90 – 100	1,1	0,52*
P (µg l ⁻¹)	30 – 40	36	165*
	60 – 70	39	89*
	90 – 100	40	120
S (mg l ⁻¹)	30 – 40	2,6	12*
	60 – 70	2,6	3,6*
	90 – 100	2,6	2,6
SO ₄ ²⁻ -S (mg l ⁻¹)	30 – 40	0,41	12*
	60 – 70	0,40	1,5*
	90 – 100	0,18	0,27
TOC ^a (mg l ⁻¹)	30 – 40	91	53*
	60 – 70	78	69
	90 – 100	67	73
V (µg l ⁻¹)	30 – 40	1,2	0,90
	60 – 70	0,57	0,43
	90 – 100	0,30	0,40*

^aSignifikanta skillnader erhöles även för tot-C men redovisas inte p g a att tot-C helt utgjordes av organiskt bundet C (TOC) (bilaga 1 – 3).

4 Diskussion

4.1 Gasflöden och ackumulation av biomassa

Även om ett detekterbart flöde av lustgas mättes upp i enskilda kammare vid ett fåtal tillfällen under mätperioden så var det totala flödet från försöken inte detekterbart på årsbasis. Tidigare studier på dikade organogena jordar utnyttjade för antingen jord- eller skogsbruk har visat på allt från ingen avgivning till relativt höga flöden [10]. Den enskilda faktor som avgör huruvida lustgas kan avges från dikade organogena jordar är förhållandet mellan kol och kväve (C:N-kvot) i de ytliga torvlagren [10]. Först vid en C:N-kvot under 25 uppträder en mätbar avgivning av lustgas. Om detta kriterium är uppfyllt kommer ytterligare faktorer att reglera storleken på avgivningen. Torvslagssammansättningen och markvegetationens sammansättning på bägge försöksområdena tyder på att C:N-kvoten är långt över 25 vilket i så fall förklarar avsaknaden av lustgasavgivning. Detta betyder också att de hitintills uteblivna effekterna på N_2O -avgivningen efter tillförsel av aska i den här studien sannolikt inte är överförbara till mer bördiga (C:N-kvot < 25) dikade torvmarker.

Tillförsel av krossaska gav inga detekterbara effekter på avgivningen av CO_2 från marken i något av försöken. Möjligen kan en tendens till högre CO_2 -avgivning under 2005 skönjas i försök 273 Anderstorp. Statistiskt signifikanta effekter på avgivningen av metan i försök 273 Anderstorp kunde inte heller påvisas. Dock fanns det en trend i det tidsmässiga mönstret som tyder på att högsta tillförseln av aska leder till en förhöjd avgivning av metan. I försök 274 Bredaryd fanns däremot ingen tendens till effekt ett år efter asktillförsel. Förvisso var avgivningen i det område som erhöll aska högre än i kontrollområdet, men samma relation fanns redan året innan aska hade tillförts. Några faktorer skiljde sig mellan försöken som skulle kunna tala för olikheter i respons eller olika lång tid innan en respons uppkommer, dels ligger grundvattenytan i Bredaryd ytligare i än i Anderstorp, dels är myren i Bredaryd sannolikt något näringsrikare.

I försök 273 Anderstorp kunde en trend till ökad avgivning av metan noteras redan första året (2004) efter tillförseln av krossaska för att öka ytterligare under 2005. Avgivningen av metan från markytan utgör summan av två motverkande processer, dels produktion av metan, dels konsumtion av metan. Baserat på de utförda mätningarna kan vi inte uttala oss om vilken av processerna som påverkas eller vari påverkan från aska består.

Eftersom ingen N_2O avgavs från försöken inbegriper följande beräkningar och diskussioner därför bara koldioxid och metan. Bägge dikade och beskogade objekten avgav mer kol än vad som togs upp genom fotosyntesen. Beräknat som GWP ("Global warming potential") representerar trädutväxten ett upptag av $5900 \text{ kg } CO_2 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ medan medelvärdet av den totala avgivningen för de två åren 2004 och 2005 var ca $10\,000 \text{ kg } CO_2 \text{ ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ vilket motsvarar 170% av skogens upptag. Av den totala avgivningen (omräknat till GWP) utgjordes 99% av koldioxid och enbart 1% av metan. Olika skogsvårdsåtgärder som resulterar i en tillväxtökning hos skogen som är större än en eventuell ökad avgivning av växthusgaser kommer därför att leda till en förbättrad växthusgasbalans för dessa dikade och beskogade torvmarker.

Tillförseln av aska påverkade inte tallarnas tillväxt under den studerade tvåårsperioden. Det var heller inte att förvänta så kort tid efter behandling, eftersom det finns resultat som visat att en tillväxtökningen kan dröja upp till sju år efter behandling [28], beroende på exempelvis torvmarkens bördighet, grad av dränering och askgiva. Silfverberg [28] påtalar också att finska erfarenheter visat på små eller inga tillväxtökningar om askgivan varit $< \text{ca } 2 \text{ ton per ha}$, vilket är i närheten av den lägre givan i det här redovisade parcellförsöket (273 Anderstorp). Då är det mer sannolikt att förvänta en tillväxtökning efter tillförseln av den högre givan, med tanke på att torvmarken är hyggligt dränerad (Figur 4) och torvens N-halt tycks vara relativt god bedömt utifrån tallbarrens kvävestatus (Tabell 4) (jmf. [28]). En ökad K-halt i barren och något tyngre barr (ej statistiskt signifikant), speciellt på ytorna med hög giva, kan vara några indikationer på att en tillväxtökning är att förvänta på sikt.

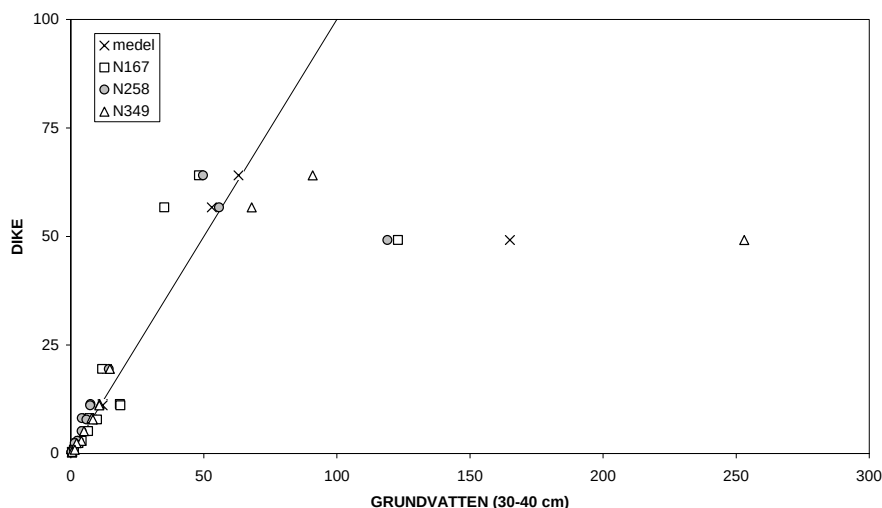
Om avgången av metan under andra året efter tillförseln av aska i parcellförsöket skulle vara en faktisk ökning, motsvarar det en avgång på $\text{ca } 90 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-2} \text{ år}^{-1}$. För att balansera denna ökning av växthusgas till atmosfären skulle det krävas en ökning av ackumulerad biomassa i storleksordningen 2 % i det aktuella försöksbeståndet i Anderstorp.

4.2 Vattenkemi

De stora likheterna mellan områdena Nord och Syd i försök 274 Bredaryd både avseende hydrologi (vattenstånd och grundvattennivåer samt deras variation över tiden) och vattenkemi innan behandling ger goda förutsättningar för att kunna påvisa eventuella effekter av asktillförseln.

Tillförseln av aska i 274 Bredaryd gav effekter på vattenkemin både i grundvattnet och i avrinnande dikesvatten. I dikesvattnet syntes effekterna redan efter någon eller några dagar för de flesta av de påverkade variablerna. Grundvattnet provtogs vid ett tillfälle ca två månader efter behandling. Då var halterna av B, K och Mn förhöjda ända ner till 90 – 100 cm djup. Håltförändringarna återspeglades på liknande sätt i både grundvatten och avrinnande vatten. Vissa av de uppmätta variablerna i avrinnande vatten ökade under en begränsad period medan B, Ca, K, Li, Mn och Zn var förhöjda under hela mätperioden efter asktillförseln.

De halter som var förhöjda i grundvattnet i område Nord den 17 dec. 2004 (förutom haltskillnaderna för NH_4^+ -N och V som anses vara slumpmässiga effekter) jämfördes med halterna i huvuddiket den 19 dec. Med undantag för P-halten, överensstämde halterna av As, B, Ca, Cd, Co, K, Cl⁻, Li, Mn, Na, S, SO_4^{2-} -S och TOC på 30 – 40 cm djup i grundvattnet väl med halterna i huvuddiket (Figur 10). I grundvattnet på 60 – 70 cm och 90 – 100 cm djup var halterna generellt lägre än i huvuddiket. Våra slutsatser av detta är att vattnet i huvuddiket till stor del härstammar från den dikade torvmarken. Omgivande fastmark verkar ha liten påverkan på vattenkemin i huvuddiket i område Nord. Denna första utvärdering tyder även på att det är den övre delen av torven som bidrar mest till vattenflödet i huvuddiket, vilket stämmer överens med tidigare studier som visar att den hydrauliska konduktiviteten generellt är högst ytligt i torvmark.



Figur 10. Halten i avrinnande vatten i huvuddiket (DIKE) jämfört med halten i grundvattnet på 30–40 cm djup (GRUNDVATTEN) i område Nord för de ämnen som uppvisade statistiskt signifikanta effekter av asktillförseln (3,1 ton t.s. krossaska ha⁻¹) i försök 274 Bredaryd.

Figure 10. Elemental concentrations in run off in the main ditch ("DIKE") compared with ground water at 30–40 cm depth ("GRUNDVATTEN") in area "Nord". Data given for the variables showing statistically significantly effects after addition of ash (3.1 tonnes DM of crushed ash ha⁻¹) at the experimental site 274 Bredaryd.

Halterna av As och TOC i grundvattnet var de enda halterna som tenderade att minska efter asktillförseln. Minskade TOC-halter återfanns även i avrinnande vatten. För As-halten syntes en svag tendens till minskning i avrinnande vatten. I det avrinnande vattnet minskade även halterna av Pb och V efter asktillförseln. De starka sambanden mellan As, Pb respektive V och TOC visar att dessa ämnen i hög utsträckning var bundna till organiska föreningar. De minskade halterna av As, Pb och V berodde därför troligen på att TOC-halten minskade.

Asktillförseln minskade pH-värdet i avrinnande vatten i ca tre månader. Därefter tenderade pH-värdet att vara något förhöjt i ca fyra månader. Detta mönster återspeglades omvänt i den totala aciditeten. Den totala aciditeten samvarierade med TOC-halten ($R^2 = 0,37$ efter asktillförseln), vilket tyder på att organiska syror påverkade vattnets syra-basstatus. Eftersom asktillförseln minskade halten, och sannolikt utlakningen, av TOC minskade antagligen även utlakningen av organiska syror. Då man studerar effekterna på aciditeten i olika pH-intervall ser man att aciditeten mellan aktuellt pH-värde till pH-värde 4,5 ökar direkt efter asktillförseln under samma period som pH-värdet sjunker. Aciditeten mellan pH-värde 4,5 och 5,4 minskar under denna period. Asktillförseln tycks därmed ha påverkat sammansättningen av TOC. De minskade TOC-halterna som observerades efter asktillförseln i 274 Bredaryd står i motsats till de ökade halter som uppmäts i markvattnet efter tillförsel av kalk eller aska på fastmark [16], [26].

Effekterna av orkanen Gudrun verkar ha varit begränsade med avseende på vattenkemin i diken. Förutom i maj, fyra månader efter orkanen, syntes ingen tydlig påverkan på vattenkemin. I maj däremot fyrdubblades halterna av Na och Cl⁻ i område Syd. Dessa ökningarna skulle kunna härröra från saltningen av väg 27. Ett stort dike ansluter till väg 27 och rinner parallellt med tegdiken i område Syd. Huvuddiket i område Syd är ihopkopplat med det stora diket men vi har bedömt att vattenflödet från det stora diket till huvuddiket oftast är försumbart. Vid upparbetningen och uttransporten av stormfällt virke förstördes en vägtrumma nedströms i det stora diket och vissa områden översvämmades. Detta arbete pågick under perioden 2005-03-13--04-15 och en ny vägtrumman var färdigt installerad 2005-06-11. Under denna period kan vatten från det stora diket ha tvingats in i huvuddiket i område Syd och fört med sig vägsalt från väg 27. Vattenflödena bör dock ha varit relativt låga med tanke på den låga nederbörden, totalt 58 mm i april och maj (Figur 3), vilket delvis talar emot ovanstående förklaring. En annan oklarhet är hur länge effekterna av vägsaltningen kan förväntas hålla i sig. I maj bör det ha varit åtminstone två till tre månader sedan väg 27 senast saltades. Den extra kontrollen uppströms rotvältorna längs huvuddiket i område Syd visade inte på någon effekt av rotvältorna och stormfällningen.

4.3 Fortsatt uppföljning

De båda försöken (273 Anderstorp och 274 Bredaryd) har redan gett viktiga och intressanta resultat beträffande flöden av växthusgaser och vattenkemiska effekter efter spridning av aska på dikad och beskogad torvmark. Att fortsätta uppföljningen i försöken är angeläget. För den vattenkemiska uppföljningen handlar det om att bekräfta att de kortsiktiga effekterna verkligen var kortsiktiga, att följa utvecklingen av de mer långsiktiga effekterna för B, Ca, K, Li, Mn och Zn och för att fånga effekter som kan uppstå på längre sikt exempelvis till följd av ändrad näringsomsättning i torven. Även beträffande effekter på flöden av växthusgaser är det viktigt att fortsättningsvis följa och fastställa storleken och varaktigheten i tendensen till den ökande avgången av metan samt att även följa flödena av koldioxid på längre sikt. Tillförseln av askan påverkar troligen torven under många decennier. Slutligen är det viktigt att även fortsättningsvis mäta skogsproduktionen, för att kunna bekräfta och kvantifiera en förväntad ökad tillväxt och ackumulation av biomassa.

5 Litteraturreferenser

- [1] Alexandersson H, Karlström C and Larsson-McCann S; "Temperaturen och nederbörden i Sverige 1961 – 90: Referensnormaler", Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping 1991, 87 s.
- [2] Almqvist C; "Tillväxteffekter på tall (*Pinus sylvestris*) efter gödsling på dikad medel- och lågproduktiv torvmark", Institutet för skogsförbättring, Rapport 14, Uppsala 1990, 27 s.
- [3] Bjurström H, Ilskog E och Berg M; "Askor från bibränslen och blandbränslen – mängder och kvalitet", Statens Energimyndighet, Rapport nr ER 10:2003 Eskilstuna 2003, 74 s.
- [4] Clymo, R S; "Peat". In: Gore, A J P (ed) "Mires: Swamp, bog, fen and moor". Ecosystems of the world 4A, Elsevier, Amsterdam 1983, p. 159–224.
- [5] Egnell G, Nohrstedt H-Ö, Weslien J, Westling O. och Örlander G; "Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränsleuttag, asktillförsel och övrig näringskompensation", Skogsstyrelsen, Rapport 1, Skogsstyrelsens förlag, Jönköping 1998, 169 s.
- [6] Eriksson J; "Karaktärisering av vedaska", Vattenfall Research Bioenergi, U(B) 1992/48, 1993, 38 s.
- [7] Eriksson J och Börjesson P; "Vedaska i skogen", Vattenfall Research Bioenergi, U(B) 1991/46, 1991, 77 s.
- [8] Hånell B och Magnusson T; "An evaluation of land suitability for forest fertilization with biofuel ash on organic soils in Sweden", Forest Ecology and Management 209: 43–55, 2005.
- [9] Jönsson O och Nilsson C; "Karaktärisering av förgasningsaskor från skogsbränslen", NUTEK Rapport R 1996/27, Stockholm 1996, 31 s.
- [10] Klemetsson L, von Arnold K, Weslien P and Gundersen P; "Soil CN ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions", Global Change Biology 11: 1142–1147, 2005.
- [11] Jacobson S; "Fertilization to increase and sustain tree growth in coniferous stands in Sweden", Swedish University of Agricultural Sciences, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria 217, Uppsala 2001, 34 p. plus appendixes.
- [12] Jacobson S; "Addition of stabilized wood ashes to Swedish coniferous stands on mineral soils – effects on stem growth and needle nutrient concentrations", Silva Fennica 37(4): 437–450, 2003.
- [13] Jacobson S, Kukkola M., Mätkönen E and Tveite B; "Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands", Forest Ecology and Management 129: 41–51, 2000.
- [14] Lauhanen R, Moilanen M, Silfverberg K, Takamaa H and Issakainen J; "The profitability of wood-ash fertilization on drained peat-land Scots pine stands", Sou 48: 71–82, 1997. (På finska med engelsk sammanfattning)
- [15] Lundborg A och Nohrstedt H-Ö; "Effekter av askspridning i skogen – Askåterföring till skogsmark", NUTEK R 1996:13, 1996, 38 s. ISSN 1102-2574.

-
- [16] Lundström U S, Bain D C, Taylor A F S and van Hees P A W; "Effects of acidification and its mitigation with lime and wood ash on forest soil processes: a review", *Water Air and Soil Pollution Focus* 3: 5–28, 2003.
- [17] Magnusson T and Hånell B; "Aska till skog på torvmark – Ramprogram Askåterföring". NUTEK, Rapport 1996:85, NUTEK Förlag 1996, Stockholm 1996, 31 s. ISSN 1102-2574.
- [18] Marklund L-G; "Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige", Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för biometri, Rapport 45, Umeå 1988, 73 s.
- [19] Moilanen M; "Lannoituksen vaikutus männyn ravinnetilaan ja kasvuun pohjois-pohjanmaan ja kainuun ojitetuilla soilla (Effect of fertilization on the nutrient status and growth of Scots pine on drained peatlands in northern Ostrobothnia and Kainuu)", *Folia forestalia* 820, 1993, 37 s. (På finska med engelsk sammanfattning)
- [20] Moilanen M, Silfverberg K, Hökkä H and Issakainen J; "Wood ash as a fertilizer on drained mires – growth and foliar nutrients of Scots pine", *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2734–2742, 2005.
- [21] Näslund M; "Funktioner och tabeller för kubering av stående träd – tall, gran och björk i södra Sverige samt i hela landet", *Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut* 36: 1–81, Stockholm 1947.
- [22] Pavilainen E and Päivänen J; "Peatland Forestry – Ecology and principles", *Ecological Studies*, Vol. 111, Springer Verlag, Berlin 1995, 248 p.
- [23] Persson T, Wirén A and Andersson S; "Effects of liming on carbon and nitrogen mineralization in coniferous forests", *Water Air and Soil Pollution* 54: 351–364, 1991.
- [24] Persson T and Wirén A; "Effekter av skogsmarkskalkning på kväveomsättningen", I: Staaf H, Persson T and Bertills, U. (red.), "Skogsmarkskalkning", Naturvårdsverket, Rapport 4559, Stockholm 1996, s. 70–91.
- [25] Pettersson F; "Predictive functions for impact of nitrogen fertilization on growth over five years", *Skogforsk, Report* 3, Uppsala 1994, 56 p.
- [26] Ring E, Jacobson J and Nohrstedt H-Ö; "Soil-solution chemistry in a coniferous stand after adding wood ash and nitrogen", *Canadian Journal of Forest Research* 36: 153–163, 2006.
- [27] SAS Institute Inc.: "SAS/STATTM", Guide for personal computers, version 8, edition", Cary, NC: SAS Institute Inc., 1999, 3884 p.
- [28] Silfverberg K; "Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland", *Doctoral Thesis, The Finnish Forest Research Institute, Research papers* 588, 1996, 27 p., ISBN 951-40-1496-0.
- [29] Silfverberg K. and Huikari O; "Wood-ash fertilization on drained peatlands", *Folia Forestalia* no. 633, 1985, 25 p. (På finska med engelskt abstract.)

-
- [30] Silfverberg K and Moilanen M; "Ash fertilization as used on Finland's drained and forested mires", In: Högbom, L. & Nohrstedt, H.-Ö. (eds.) "Environmental consequences of recycling wood-ash to forests", SkogForsk, Report 2, Uppsala 2001, pp. 25–28.
 - [31] Skogsstyrelsen; "Rekommendationer vid uttag av skogsbränsle och kompensationsgödsling", Skogsstyrelsen, Meddelande 2-2001, Jönköping 2001, 16 s.
 - [32] Sverdrup H and Warfvinge P; "Past and future changes in soil acidity and implications for forest growth under different deposition scenarios", Ecological Bulletins 44: 335–351, Copenhagen 1995.
 - [33] Sverdrup H and Rosén K; "Long-term base cation mass balances for Swedish forests and the concept of sustainability", Forest Ecology and Management 110: 221–236, 1998.
 - [34] Tamm C-O; "Nitrogen in terrestrial ecosystems", Ecological Studies 81, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1991, 116 p. ISBN 3-540-51807-X.

Bilagor

A Halter i grundvattenprov från försök 274 Bredaryd

I bilaga A redovisas medelhalter ($n = 3$) i grundvattenprov från försök 274 Bredaryd från djupen 30 – 40 cm (bilaga A1), 60 – 70 cm (bilaga A2) och 90 – 100 cm (bilaga A3). Se vidare avsnitt 2.4.2 och 2.4.3 för beskrivning av provtagning och analys av data.

A.1 Grundvatten på 30 – 40 cm djup

Medelhalter i grundvattenprov från 30 – 40 cm djup (n = 3). Värden i fet stil följer av en asterisk visar signifikant skilda värden ($p < 0,05$) mellan område Nord (N) och Syd (S). Värden i kursiv stil visar skillnader där $0,05 < p < 0,10$.

Ämne	Område	20 dec. 2003 Före asktillförseln	3 jul. 2004 Före asktillförseln	17 dec. 2004 Efter asktillförseln
Al (mg l ⁻¹)	N S	0,30 0,26	0,37 0,30	0,24 0,26
As (µg l ⁻¹)	N S	1,6 1,8	2,1 2,1	1,3* 1,6
B (µg l ⁻¹)	N S	1,8 0,53	5,2* 2,6	14* 1,5
Br (mg l ⁻¹)	N S	0,05 0,05	0,10 0,10	0,098 0,050
Ca (mg l ⁻¹)	N S	1,4 1,2	0,83* 0,63	3,5* 0,68
Cd (µg l ⁻¹)	N S	0,13 0,080	0,10 0,10	0,40* 0,10
Co (µg l ⁻¹)	N S	0,27 0,13	0,27* 0,13	0,47* 0,10
Cr (µg l ⁻¹)	N S	1,5 1,5	1,6* 2,3	3,7 3,5
Cu (µg l ⁻¹)	N S	29 31	19 20	503 161
Fe (mg l ⁻¹)	N S	0,35 0,35	0,42 0,47	0,43 0,41
F ⁻ (mg l ⁻¹)	N S	0,14 0,10	0,11 0,12	0,072 0,050
oorg C (mg l ⁻¹)	N S	0,27* ^a 0,27	0,16 0,16	0,20 0,20
K (mg l ⁻¹)	N S	0,13 0,12	0,27 0,16	6,4* 0,098
Cl ⁻ (mg l ⁻¹)	N S	5,3 5,4	4,0 4,2	8,0* 3,8
Li (µg l ⁻¹)	N S	0,43 0,37	0,37 0,37	2,2* 0,23
Mg (mg l ⁻¹)	N S	1,4 1,4	1,0 0,87	2,5 0,44
Mn (µg l ⁻¹)	N S	3,4 1,2	3,0 2,1	63* 4,7
Mo (µg l ⁻¹)	N S	0,083 0,10	0,10 0,10	0,10 0,13
Na (mg l ⁻¹)	N S	4,3 4,9	3,5 3,7	5,2* 2,6
NH ₄ ⁺ -N (mg l ⁻¹)	N S	0,15 0,44	0,18 0,23	0,38 0,37
Ni (µg l ⁻¹)	N S	2,0 2,6	1,7 2,0	24 13
NO ₂ ⁻ -N (mg l ⁻¹)	N S	0,025 0,025	0,13 0,070	0,10 0,092
NO ₃ ⁻ -N (mg l ⁻¹)	N S	0,025 0,025	0,10* 0,025	0,038 0,025
P (µg l ⁻¹)	N S	30 34	48* 36	165* 36
Pb (µg l ⁻¹)	N S	9,0 7,8	10 8,1	6,3 7,4
PO ₄ ³⁻ -P (mg l ⁻¹)	N S	0,05 0,068	0,05 0,05	0,16 0,050
S (mg l ⁻¹)	N S	3,2 3,9	1,4 1,8	12* 2,6
Se (µg l ⁻¹)	N S	0,33 0,40	0,40 0,43	0,40 0,40
Si (mg l ⁻¹)	N S	0,47 0,37	0,70 0,56	0,22 0,27
SO ₄ ²⁻ -S (mg l ⁻¹)	N S	1,7 1,9	0,59 0,54	12* 0,41
tot-C (mg l ⁻¹)	N S	94 101	121 107	53* 90
TOC (mg l ⁻¹)	N S	93 101	121 107	53* 91
tot-N (mg l ⁻¹)	N S	1,5 1,9	2,1 1,9	1,4 1,8
V (µg l ⁻¹)	N S	1,5 1,3	2,1 1,9	0,90 1,2
Zn (µg l ⁻¹)	N S	51 59	28 37	186 139

^aDen signifikanta skillnaden är med stor sannolikhet slumpmässig. En stor andel av observationerna av oorg. C låg under detektionsgränsen.

A.2 Grundvatten på 60 – 70 cm djup

Medelhalter i grundvattenprov från 60 – 70 cm djup (n = 3). Värden i fet stil följer av en asterisk visar signifikant skilda värden ($p < 0,05$) mellan område Nord (N) och Syd (S). Värden i kursiv stil visar skillnader där $0,05 < p < 0,10$.

Ämne	Område	20 dec. 2003 Före asktillförseln	3 jul. 2004 Före asktillförseln	17 dec. 2004 Efter asktillförseln
Al (mg l ⁻¹)	N S	0,21 0,17	0,17 0,19	0,18 0,16
As (µg l ⁻¹)	N S	1,0 1,1	1,2 1,6	1,2 1,2
B (µg l ⁻¹)	N S	0,67 0,30	2,7* 1,4	4,8* 0,87
Br (mg l ⁻¹)	N S	0,05 0,05	0,11 0,075	0,05 0,05
Ca (mg l ⁻¹)	N S	1,2 1,0	0,76 0,65	1,8* 0,88
Cd (µg l ⁻¹)	N S	0,022 0,042	0,10 0,096	0,17 0,087
Co (µg l ⁻¹)	N S	0,070 0,068	0,12 0,11	0,13 0,11
Cr (µg l ⁻¹)	N S	1,1 1,0	1,5 1,8	5,7 6,6
Cu (µg l ⁻¹)	N S	31 23	37 12	1500 1400
Fe (mg l ⁻¹)	N S	0,26 0,69	0,31 0,80	0,28 0,69
F ⁻ (mg l ⁻¹)	N S	0,078 0,05	0,17 0,12	0,05 0,05
oorg C (mg l ⁻¹)	N S	0,27 0,28	0,16 0,15	0,2 0,2
K (mg l ⁻¹)	N S	0,20* 0,10	0,21* 0,096	1,1* 0,15
Cl ⁻ (mg l ⁻¹)	N S	6,1 5,8	6,9 6,0	5,8 5,1
Li (µg l ⁻¹)	N S	0,47 0,37	0,50 0,37	0,60* 0,27
Mg (mg l ⁻¹)	N S	1,2 1,2	1,2 1,1	0,85 0,60
Mn (µg l ⁻¹)	N S	2,8 3,2	1,8 3,3	42* 7,4
Mo (µg l ⁻¹)	N S	0,083 0,083	0,11 0,11	0,083 0,10
Na (mg l ⁻¹)	N S	4,2 3,7	3,8 3,5	3,4 2,8
NH ₄ ⁺ -N (mg l ⁻¹)	N S	0,31* 0,55	0,24 0,46	0,40 0,79
Ni (µg l ⁻¹)	N S	2,5 2,2	4,0 1,0	76 37
NO ₂ ⁻ -N (mg l ⁻¹)	N S	0,025 0,025	0,17* 0,092	0,073 0,077
NO ₃ ⁻ -N (mg l ⁻¹)	N S	0,025 0,025	0,11* 0,060	0,025 0,025
P (µg l ⁻¹)	N S	36 41	39 44	89* 39
Pb (µg l ⁻¹)	N S	6,1 4,9	4,1 5,3	7,6 6,1
PO ₄ ³⁻ -P (mg l ⁻¹)	N S	0,075 0,069	0,05 0,05	0,067 0,050
S (mg l ⁻¹)	N S	2,0 2,3	1,0 1,3	3,6* 2,6
Se (µg l ⁻¹)	N S	0,27 0,27	0,20 0,37	0,23 0,33
Si (mg l ⁻¹)	N S	0,35 0,42	0,51 0,54	0,30 0,31
SO ₄ ²⁻ -S (mg l ⁻¹)	N S	0,38 0,67	0,35 0,28	1,5* 0,40
tot-C (mg l ⁻¹)	N S	71 84	78 88	69 78
TOC (mg l ⁻¹)	N S	70 84	78 89	69 78
tot-N (mg l ⁻¹)	N S	1,8 2,2	1,8 2,3	1,8 2,1
V (µg l ⁻¹)	N S	0,47 0,67	0,77 1,2	0,43 0,57
Zn (µg l ⁻¹)	N S	53 40	59 21	420 380

A.3 Grundvatten på 90 – 100 cm djup

Medelhalter i grundvattenprov från 90 – 100 cm djup (n = 3). Värden i fet stil följer av en asterisk visar signifikant skilda värden ($p < 0,05$) mellan område Nord (N) och Syd (S). Värden i kursiv stil visar skillnader där $0,05 < p < 0,10$.

Ämne	Område	20 dec. 2003 Före asktillförseln	3 jul. 2004 Före asktillförseln	17 dec. 2004 Efter asktillförseln
Al (mg l ⁻¹)	N S	0,14 0,11	0,068 0,069	0,16 0,11
As (µg l ⁻¹)	N S	0,93 0,70	0,90 0,80	0,97 0,83
B (µg l ⁻¹)	N S	0,23 0,10	1,2* 0,5	2,0* 0,63
Br (mg l ⁻¹)	N S	0,05 0,05	0,050 0,11	0,07 0,11
Ca (mg l ⁻¹)	N S	1,2 1,1	0,69 0,72	1,3 1,1
Cd (µg l ⁻¹)	N S	0,012 0,013	0,027 0,054	0,10 0,051
Co (µg l ⁻¹)	N S	0,0093 0,037	0,031 0,072	0,081 0,074
Cr (µg l ⁻¹)	N S	0,90 0,73	1,4 1,7	2,3 6,8
Cu (µg l ⁻¹)	N S	19 21	11 34	31 710
Fe (mg l ⁻¹)	N S	0,30 0,88	0,32 0,95	0,33 0,71
F ⁻ (mg l ⁻¹)	N S	0,05 0,072	0,05* 0,18	0,05 0,05
oorg C (mg l ⁻¹)	N S	0,27 0,28	0,16 0,15	0,20 0,20
K (mg l ⁻¹)	N S	0,30 0,15	0,33 0,17	0,73* 0,26
Cl ⁻ (mg l ⁻¹)	N S	6,8 7,4	8,2 8,3	6,7 7,4
Li (µg l ⁻¹)	N S	0,43 0,37	0,53 0,43	0,53* 0,37
Mg (mg l ⁻¹)	N S	1,3 1,2	1,3 1,2	0,80 0,75
Mn (µg l ⁻¹)	N S	3,5 6,7	3,2 6,9	24* 9,2
Mo (µg l ⁻¹)	N S	0,10 0,10	0,10 0,10	0,045 0,080
Na (mg l ⁻¹)	N S	4,2 3,9	4,0 3,7	3,6 3,5
NH ₄ ⁺ -N (mg l ⁻¹)	N S	0,41 0,81	0,40 0,80	0,52* 1,1
Ni (µg l ⁻¹)	N S	1,5 2,4	0,93 12	4,2 22
NO ₂ ⁻ -N (mg l ⁻¹)	N S	0,025 0,039	0,060* 0,12	0,099 0,10
NO ₃ ⁻ -N (mg l ⁻¹)	N S	0,025 0,025	0,025 0,063	0,025 0,037
P (µg l ⁻¹)	N S	52 40	50 27	120 40
Pb (µg l ⁻¹)	N S	2,1 1,9	0,97 0,93	4,3 3,5
PO ₄ ³⁻ -P (mg l ⁻¹)	N S	0,070 0,05	0,05 0,05	0,078 0,05
S (mg l ⁻¹)	N S	1,8* 2,0	0,83* 1,0	2,6 2,6
Se (µg l ⁻¹)	N S	0,23 0,23	0,20 0,20	0,23 0,27
Si (mg l ⁻¹)	N S	0,30 0,33	0,46 0,49	0,33 0,39
SO ₄ ²⁻ -S (mg l ⁻¹)	N S	0,077 0,15	0,050 0,067	0,27 0,18
tot-C (mg l ⁻¹)	N S	67 66	71 65	73 67
TOC (mg l ⁻¹)	N S	67 67	71 65	73 67
tot-N (mg l ⁻¹)	N S	2,0 2,2	1,9 2,0	1,9 2,1
V (µg l ⁻¹)	N S	0,30 0,27	0,47 0,60	0,40* 0,30
Zn (µg l ⁻¹)	N S	36 36	18 14	32 190

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET



VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35