

Arbeidsnotat nr. 8/05

**Omsettelige grønne sertifikater under
autarki og handel:
Noen analytiske resultater**

av

**Eirik S. Amundsen
Gjermund Nese**

SNF-prosjekt nr. 3231:
Long-Run Environmental and Economic Efficiency in Competitive Power Markets:
Optimal Investments in Distributed Generation, Renewables and Network Capacity.
Prosjektet er finansiert av Norges forskningsråd
Programmet SAMSTEMT

SNF-prosjekt nr. 3555:
Energiøkonomi – markeder, nett og regulering
Prosjektet er finansiert av Statnett, Statoil, Gassco AS, Statkraft, NHH and SNF

SAMFUNNS- OG NÆRINGSLIVSFORSKNING AS
BERGEN, Februar 2005
ISSN 1503-2140

© Dette eksemplar er fremstilt etter avtale
med KOPINOR, Stenergate 1, 0050 Oslo.
Ytterligere eksemplarfremstilling uten avtale
og i strid med åndsverkloven er straffbart
og kan medføre erstatningsansvar.

***Omsettelige grønne sertifikater under autarki og handel:
Noen analytiske resultater***

av

Eirik S. Amundsen^{1,2} og Gjermund Nese²

Sammendrag:

En rekke land har planer om å øke andelen fornybar energi i sitt totale energiforbruk. Norge inngår i EU-systemet for handel med utslippstillatelse fra 2005, og skal i tillegg etablere et system for grønne sertifikater, som skal være felles med Sverige, fra 2006. Vi finner, ved bruk av en teoretisk modell, at grønne sertifikater fort kan vise seg å være et upresist instrument i reguleringen av produksjonen av grønn elektrisitet. Samtidig vil systemet for handel med utslippstillatelse i *kombinasjon* med grønne sertifikater kunne virke mot sin hensikt, dvs. redusere grønn elektrisitetsproduksjon. Resultatene gjelder både under autarki og ved internasjonal handel.

¹ Institutt for økonomi, Universitetet i Bergen, Herman Fossgate 6, 5007 Bergen, tel.: 55 58 92 05, fax.: 55 58 92 10, e-mail eirik.amundsen@econ.uib.no

² Samfunns- og næringslivsforskning (SNF), Breiviksveien 40, 5045 Bergen, tel.: 55 95 95 21, fax.: 55 9594 39, e-mail.: gjermund.nese@snf.no

1. Innledning³

En rekke land har planer om å øke andelen av fornybar energi i sitt totale energiforbruk. For eksempel er det et uttalt mål for EU å heve andelen av elektrisitet basert på fornybare energikilder ("grønn" elektrisitet) fra dagens 14% til 22% innen 2010 (se EU/COM, 2000). Tilsvarende mål eksisterer for USA (se for eksempel EPA, 2003). Inntil de senere år er produksjonen av grønn elektrisitet blitt stimulert gjennom ulike subsidieordninger som blant annet har omfattet investeringssubsidier, skattelettelser, og subsidier per produsert enhet. Med liberaliseringen av kraftmarkedene er imidlertid interessen i større grad blitt rettet mot å søke andre løsninger for subsidiesystemene. Et forslag som i særlig grad synes å få gjennomslag er systemer for såkalte omsettelige grønne sertifikater. Systemene kan ha ulik utforming i ulike land, men felles for dem er at de søker å erstatte direkte offentlige subsidier til fornybar energi med bruk av markedsmekanismen. Mer presist er formålet å skape et marked hvor ulike typer av grønn elektrisitet kan konkurrere på like vilkår slik at det offentlige slipper å bli direkte involvert i sektorens investeringsbeslutninger.

Siden 1998 har Nederland benyttet et system for såkalt "green labeling", som er et frivillig system for grønne sertifikater. Storbritannia og Sverige er eksempler på land med obligatoriske systemer som mer direkte benytter markedsmekanismen ved omsetningen av grønne sertifikater. I tillegg har også en rekke andre land utenfor EU vist interesse for å innføre slike systemer (for eksempel Australia, Kina, India og USA, se Giovinetto, 2003). England og Wales introduserte sitt system i 2002 og dette systemet går nå under betegnelsen *UK Renewables Obligation Certificate Market*. Sverige introduserte sitt system for "elcertifikat" i 2003, mens det er vedtatt at Norge skal innføre sitt system i 2006. Planen er at Sverige og Norge skal handle grønne sertifikater seg imellom allerede fra dette året av, se for eksempel OED (2004). NordPool startet forøvrig handel med grønne sertifikater for det svenske markedet i 2004.

Som for et hvilket som helst annet marked består markedet for grønne sertifikater av selgere og kjøpere. Selgerne er kraftprodusentene som mottar grønne sertifikater i en mengde som svarer til hvor meget grønn elektrisitet som blir lastet inn på nettet. Produsentene mottar på denne måten både engrosprisen og verdien av et grønt sertifikat for hver MWh som produsenten genererer av grønn elektrisitet. Kjøperne av grønne sertifikater er

³ Vi takker for finansiell støtte fra SNFs Energisatsingsprogram (finansiert av Gassco, Statkraft, Statnett og Statoil), Norges forskningsråd (Samstemt) og Nordisk Energiforskningsprogram (NEMIEC).

konsumenter/omsetningsselskaper som er pålagt av myndighetene å holde en bestemt andel (angitt ved det såkalte "prosentkravet") av grønne sertifikater i forhold til hvor meget som konsumeres av elektrisitet totalt (både grønn og "svart" elektrisitet). Etterspørselen etter grønne sertifikater er altså avledet direkte av etterspørselen etter elektrisitet. På bakgrunn av tilbud og etterspørsel dannes det en sertifikatpris som etableres mellom administrativt satte øvre og nedre prisgrenser.

Det er få erfaringer så langt med de nye markedene for grønne sertifikater. I England og Wales synes sertifikatprisene å ha stabilisert seg i området omkring 45 GBP/MWh og det ser ut til at det er generert en betydelig interesse for å investere i ny kapasitet for grønn elektrisitet (Platts, 2004). I Sverige er sertifikatprisen etablert på et høyere nivå som ligger tett på den administrativt satte øvre grense for sertifikatprisen. Så langt ser det ikke ut til at den nye ordningen har hatt stor effekt på investeringer i ny kapasitet for grønn elektrisitet (Stem, 2004).

Selv om erfaringene så langt er begrensede, vet vi likevel noe om hvordan slike markeder vil virke ut fra teoretiske og numeriske modeller. Disse modellene viser at markedene for grønne sertifikater har en del særlige trekk som gjør at de avviker fra andre markeder. Disse trekkene er blant annet relatert til effektene av å benytte virkemidlene som er knyttet til disse markedene dvs. justering av prosentkravet og justeringer av øvre og nedre grense for sertifikatprisen. For eksempel er det vist i Amundsen og Mortensen (2001) at en økning av prosentkravet ikke nødvendigvis fører til økt produksjon av grønn elektrisitet og at heller ikke en stramming av kravene for utslipp av CO₂ fører til dette når man anvender markedet for grønne sertifikater. I Amundsen mfl. (2004) studeres uheldige virkninger av volatilitet i vindkraftproduksjonen når man anvender markeder for grønne sertifikater og i Amundsen og Nese (2002) studeres uheldige virkninger av markedsrett knyttet til denne typen markeder. Ulike særtrekk er også analysert i et antall numeriske modeller bl.a. av Bye mfl. (2002), Bergman og Radetzki (2003), Nese (2003) og Unger og Ahlgren (2003).

Norge står nå overfor to viktige endringer relatert til produksjon og forbruk av ny fornybar energi. Den ene er at Norge inngår i EU-systemet for handel med utslippstillatelser (ETS-systemet) fra 2005 av og den andre er som nevnt at Norge skal etablere sitt marked for grønne sertifikater fra 2006 av og inngå i handel av grønne sertifikater med Sverige. Det synes rimelig å hevde at verken virkningene av at land handler med grønne sertifikater seg imellom

eller samspillet mellom markeder for grønne sertifikater og markeder for utslipp av CO₂ i særlig grad har vært gjenstand for analyse. I det følgende vil vi derfor ta opp en del spørsmål knyttet til dette. Spørsmålene vi stiller er enkle, for eksempel: Hvordan påvirkes produksjonen av grønn elektrisitet av at ett av landene som samhandler øker sitt prosentkrav for grønne sertifikater, eller av at prisen på utslippstillatelser for CO₂ øker? Svarene er imidlertid ikke like enkle å gi, og presise svar krever derfor at det gjennomføres en noe mer utførlig teknisk analyse. Analysen som følger er derfor preget en del av dette.⁴

Artikkelen er bygd opp på følgende måte. Vi tar først for oss en modell for et elektrisitetsmarked og et grønt sertifikatmarked under autarki og analyserer virkninger av den typen som er nevnt i forrige avsnitt. Deretter betrakter vi to land som har et felles marked for elektrisitet, men som ikke har et fellesmarked for grønne sertifikater. Til sist tar vi for oss tilfellet hvor det er felles markeder både for elektrisitet og for grønne sertifikater.

2. Modellen under autarki

For å analysere samspillet mellom elektrisitetsmarkedet og et marked for grønne sertifikater på lang sikt under autarki, anvender vi følgende symboler og funksjonelle sammenhenger

p = sluttbrukerpris på elektrisitet

s = pris på grønne sertifikater

q = engrospris på elektrisitet

x = totalt elektrisitetsforbruk

y = produksjon av svart elektrisitet

z = produksjon av grønn elektrisitet

α = krav for andel grønn elektrisitet av totalforbruk (“prosentkravet”)

β = utslippsbegrensning for CO₂

g^d = etterspørsel etter grønne sertifikater

g^s = tilbud av grønne sertifikater

$p(x)$: invers etterspørselsfunksjon for elektrisitet, hvor $(\partial p(x) / \partial x) = p' < 0$

⁴ Systemene for grønne sertifikater inkluderer ofte administrativt satte prisgrenser for sertifikatene, dvs. en minimums- og en maksimumspris. Disse prisgrensene er ikke ubetydelige, men har ikke vært gjenstand for analyse i denne sammenhengen. Se for eksempel Amundsen og Nese (2004) for en nærmere omtale av prisgrensenes betydning.

$c = c(y; \beta)$: sektorens kostnadsfunksjon⁵ for svart elektrisitet med utslippsbegrensning⁶. Det antas at $\frac{\partial c}{\partial y} > 0$, $\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \geq 0$ og $\frac{\partial^2 c}{\partial y \partial \beta} > 0$. Når $\beta = 0$, angir kostnadsfunksjonen tilfellet hvor det ikke er utslippsbegrensninger.

$h = h(z)$: sektorens kostnadsfunksjon for grønn elektrisitet, hvor $\frac{\partial h}{\partial z} > 0$ og $\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} > 0$.

2.1. Førsteordensbetingelser og likevekt

Produsentene leverer til et felles engrosmarked for elektrisitet og det etableres én engrospris. Omsetningsselskapene kjøper elektrisitet fra engrosmarkedet og sertifikater fra markedet for grønne sertifikater. Elektrisiteten selges til sluttbrukerne og det etableres én sluttbrukerpris for elektrisitet. Det antas at det råder frikonkurranse med mange produsenter av svart og grønn elektrisitet, mange omsetningsselskaper og mange konsumenter av elektrisitet. Alle aktører tar prisene for gitt.

Produsentene handler som om de i fellesskap maksimerer:

$$\Pi(y) = qy + [q + s]z - c(y; \beta) - h(z).$$

Førsteordensbetingelsen for produksjon av svart elektrisitet er:

$$q = \frac{\partial c(y, \beta)}{\partial y}.$$

⁵ Grafen for "sektorens kostnadsfunksjon" svarer til det man i engelskspråklig litteratur kaller "industry cost curve". Slike kurver fremkommer ved såkalt "vannrett addisjon" av enkeltprodusentenes kostnadskurver. Dette gjelder både for total kostnader og grensekostnader. Grunnen til at vi benytter hele sektorens kostnadsfunksjoner er at vi slipper å gå i detaljer om enkeltprodusentens tilpasning og derved slipper å anvende mer komplisert notasjon.

⁶ Kostnadsfunksjonen for svart elektrisitet med utslippsbegrensning kan utledes fra et standard kostnadsminimaliseringsproblem med en tilleggsranke for utslipp av CO₂. Denne funksjonen tar spesielt hensyn til at en gitt mengde elektrisitet kan produseres selv om utslippskravene skulle bli strammere. Dette er mulig ved i større grad å benytte renere brenselstyper og renere teknologi. En slik substitusjon medfører imidlertid høyere kostnader; kostnadsfunksjonen forskyves oppover.

Førsteordensbetingelsen for produksjon av grønn elektrisitet er:

$$q + s = \frac{\partial h(z)}{\partial z}.$$

For hver enhet elektrisitet som omsetningsselskapene kjøper i engrosmarkedet og selger videre til sluttbrukerne må de betale engrosprisen pluss en andel α av sertifikatprisen for grønne sertifikater. Distribusjonen antas for enkelhets skyld å være kostnadsfri. Med et stort antall omsetningsselskaper vil en likevekt i markedet (frikonkurranselikevekt) måtte innebære at:

$$p = q + \alpha s \quad .$$

Vi antar at mengden av grønne sertifikater er målt i samme enhet som mengden av grønn elektrisitet. Etterspørselen etter grønne sertifikater er da gitt ved $g^d = \alpha x$ og tilbudet av grønne sertifikater er gitt ved $g^s = z$.

Samlet sett er derfor likevekten i de to markedene karakterisert ved (likevektspriser og likevektsmengder er angitt ved stjerne):

$$1) \quad p(x^*) = q^* + \alpha s^* \quad .$$

$$2) \quad x^* = y^* + z^* = \frac{z^*}{\alpha} \quad .$$

$$3) \quad q^* = \frac{\partial c(y^*, \beta)}{\partial y} \quad .$$

$$4) \quad q^* + s^* = \frac{\partial h(z^*)}{\partial z} \quad .$$

Ved innsetting av 2), 3) og 4) i 1), finner vi at prisen i likevekt kan skrives som en lineærkombinasjon av grensekostnadene for svart og grønn elektrisitet:

$$5) \quad p(x^*) = (1 - \alpha) \frac{\partial c(y^*, \beta)}{\partial y} + \alpha \frac{\partial h(z^*)}{\partial z} \quad .$$

Fra 2) følger også at $z^* = \alpha x^*$ og $y^* = (1 - \alpha)x^*$.

2.2. Virkninger av prosentkravet som instrument for å fremme grønn elektrisitet

I sertifikatsystemene som er foreslått oppfattes prosentkravet som et styringsinstrument for å påvirke mengden av grønn elektrisitet i sluttforbruket. Fordi kravet til grønn elektrisitet fastsettes som en andel og ikke en mengde, er det ikke nødvendigvis slik at en økning i prosentkravet fører til en økning i produksjonen av grønn elektrisitet. Andelen kan godt øke med en redusert produksjon av grønn elektrisitet hvis bare etterspørselen og produksjonen av svart elektrisitet faller tilstrekkelig. En økning i prosentkravet vil imidlertid føre til en reduksjon i mengden av svart elektrisitet og dermed også i engrosprisen (se relasjon 3)). Etersom virkningen på produksjonen av grønn elektrisitet er ubestemt, vil også virkningen på totalproduksjon og konsum (og dermed også sluttbrukerpris) være ubestemt.

I det følgende studerer vi disse sammenhengene næyere⁷. For å studere virkningen på produksjonen av grønn elektrisitet av å øke prosentkravet ($\frac{dz^*}{d\alpha}$), kan vi sette inn for $x^* = \frac{z^*}{\alpha}$ og $y^* = \frac{(1-\alpha)z^*}{\alpha}$ i (5) ovenfor og derivere implisitt. Vi får da (idet vi for enkelhets skyld utelater stjernesymbolet):

$$\frac{dz}{d\alpha} = \frac{\alpha x + x \left[\frac{\partial p}{\partial x} - (1-\alpha) \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right]}{D}.$$

hvor

$$D = \left[\frac{\partial p}{\partial x} - (1-\alpha)^2 \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \alpha^2 \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right].$$

Inspeksjon av fortegn viser at nevneren er negativ, men telleren er ubestemt. Virkningen på produksjonen av grønn elektrisitet er altså ubestemt.

⁷ Resultatene i det følgende er en generalisering av resultater oppnådd tidligere i Amundsen og Mortensen (2001, 2002).

På tilsvarende måte kan vi finne uttrykk for virkningene på produksjonen av svart elektrisitet ved en økning i prosentkravet:

$$\frac{dy}{d\alpha} = \frac{(1-\alpha)s + x \left[\alpha \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial x} \right]}{D} < 0.$$

Inspeksjon av fortegn viser at teller er positiv mens nevner er negativ. Produksjonen av svart elektrisitet går altså ned når prosentkravet øker.

Når det gjelder virkning på totalkonsum finner vi:

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{s + x \left[\alpha \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} - (1-\alpha) \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right]}{D}.$$

Inspeksjon av fortegn viser at dette uttrykket generelt sett er ubestemt. Dersom imidlertid grensekostnaden for svart elektrisitet er konstant, dvs $\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = 0$, finner vi at $\frac{dx}{d\alpha} < 0$. En

økning i prosentkravet vil da alltid føre til en reduksjon av totalforbruket av elektrisitet. For produksjonen av grønn elektrisitet vil imidlertid virkningen fremdeles være ubestemt.

Uttrykkene avhenger også av nivå på verdien av α ⁸. For eksempel, for $\alpha = 0$ er $\frac{dz}{d\alpha} > 0$

mens $\frac{dx}{d\alpha}$ er ubestemt.

Samlet sett kan vi altså si at innføringen av et sertifikatsystem ikke nødvendigvis fører til en større produksjon av grønn elektrisitet, men det er sikkert at produksjon av svart elektrisitet reduseres. Videre er det ikke uten videre gitt hvordan totalforbruket påvirkes.

⁸Ved å forenkle funksjonsformene i modellen, for eksempel lineær- eller konstantelastisk etterspørsel og lineære grensekostnader, er det mulig å studere nøyere hvordan elektrisitetsforbruket endrer seg når prosentkravet øker fra 0 til 100 %; se Bye mfl. (2002) og Jensen og Skytte (2002). I Bruvoll og Bye (2004) pekes det spesielt på at elektrisitetsforbruket godt kan øke når det innføres et prosentkrav for grønn elektrisitet.

2.3. Virkninger av at utslippskravet for CO2 skjerpes

For å undersøke virkningen i likevekt på produksjonen av grønn elektrisitet av at CO2-kravet skjerpes, kan relasjonen gitt ved 5) deriveres implisitt med hensyn til β . Vi får da:

$$\frac{dz}{d\beta} = \frac{\alpha(1-\alpha)\frac{\partial^2 c}{\partial y \partial \beta}}{D} < 0$$

Med antakelsene vi har gjort om kryssvirkningen i grensekostnadsfunksjonen for svart elektrisitet ser vi at telleren er positiv mens nevneren er negativ. Totalvirkningen er altså negativ. Det er altså ikke slik at en skjerpelse av utslippskravet fører til en økning i produksjonen av grønn elektrisitet. Etersom $z^* = \alpha x^* = \alpha(1-\alpha)y^*$, må det også gjelde at produksjonen av svart elektrisitet og totalkonsum går ned når CO2 kravet skjerpes. Videre ser vi fra 4) at en reduksjon i produksjonen av grønn elektrisitet må innebære at summen av engros- og sertifikatpris faller. Vi kan imidlertid ikke uten videre si at både engrosprisen og sertifikatpris må falle.

Generelt vil det gjelde at alle positive skift i grensekostnadsfunksjonen for svart elektrisitet (for eksempel som følge av en økning i priser på faktorer som spesielt inngår i produksjonen av svart elektrisitet), vil føre til en reduksjon i produksjonen av grønn elektrisitet.

Det kan synes som et paradoks at en skjerpelse av utslippskravet faktisk fører til en reduksjon i produksjonen av grønn elektrisitet. En skjerpelse av utslippskravet medfører økt pris på utslippstillatelser og dette er ment å gi en fordel til produsentene av grønn elektrisitet. I samspill med systemet for grønne sertifikater vil imidlertid dette ikke være tilfellet, til tross for at begge systemene isolert sett jobber i retning av samme mål – en reduksjon av CO₂-utslippene. Årsaken til dette ligger i konstruksjonen av systemet for grønne sertifikater. Økt pris på utslippstillatelser medfører en økning i engrosprisen på elektrisitet. I sertifikatsystemet medfører dette at sertifikatprisen reduseres relativt mer enn økningen i engrosprisen (hvor mye mer er avhengig av størrelsen på prosentkravet). Den ekstra avlønningen til produsentene av grønn elektrisitet i et sertifikatsystem utgjøres av marginen mellom engrosprisen og sluttbrukerprisen. Når engrosprisen stiger som følge av økt pris på utslippstillatelser reduseres denne marginen som er gitt ved sertifikatprisen multiplisert med prosentkravet. For å se dette,

anta, som et eksempel, at marginen reduseres med 1 øre og at prosentkravet er på 20 %. I et slikt tilfelle vil prisen på sertifikater reduseres med $1/0.2 = 5$ øre. Avlønningen til produsentene av grønn elektrisitet, dvs. summen av engrospris og sertifikatpris, er dermed redusert. I likevekt vil effekten av et skjerpet utslippskrav følgelig være en reduksjon i både svart og grønn elektrisitetsproduksjon.

3. Handel med elektrisitet

Vi ser nå på hvordan et system med grønne sertifikater kan fungere i en åpen økonomi og utvider modellen til å representere simultant virkende markeder for elektrisitet og grønne sertifikater i to land, land A og land B. Variablene er de samme som under autarki, men med ett sett av variabler for hvert land. I tillegg introduserer vi ”handelsvariablene” m og n som representerer import av henholdsvis elektrisitet og grønne sertifikater. I fremstillingen nedenfor bruker vi fotskriften i , der $i=A,B$. Etterspørselen etter elektrisitet kan være ulik i de to landene, og den inverse etterspørselsfunksjonen er antatt gitt ved:

$$p_i(x_i), \text{ der } \frac{\partial p_i(x_i)}{\partial x_i} < 0.$$

Vi antar videre at teknologiene som benyttes for å produsere svart og grønn elektrisitet kan være forskjellig i de to landene. Dette kan lede til komparative fordeler/ulempen for hvert av landene i produksjonen av svart og grønn elektrisitet.

Kostnadsfunksjonen for svart elektrisitet i land i er gitt ved:⁹

$$c_i = c_i(y_i, \beta), \text{ der } \frac{\partial c_i}{\partial y_i} > 0, \frac{\partial^2 c_i}{\partial y_i^2} \geq 0 \text{ og } \frac{\partial^2 c_i}{\partial y_i \partial \beta} > 0.$$

⁹ Kryssvirkningene kan være ulike i de to landene fordi graden av ”svarthet” kan være forskjellig. Dersom prisen på utslippstillatelse øker vil landet med størst innslag svart elektrisitet få den største forskyvningen av grensekostnadskurven.

Kostnadsfunksjonen for grønn elektrisitet i land i er gitt ved:

$$h_i = h_i(z_i), \text{ der } \frac{\partial h_i}{\partial z_i} > 0, \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_i^2} > 0.$$

3.1. Førsteordensbetingelser og likevekt

Vi antar først at det kun kan handles med elektrisitet og ikke med grønne sertifikater. Det antas videre at all handel kan foregå uten noen form for transaksjonskostnader, og at det ikke eksisterer noen transmisjonsbegrensinger mellom landene. Vi kan dermed i dette tilfellet se på elektrisitetsmarkedet i land A og B som et fellesmarked med lik engrospris, dvs. $q_A = q_B = q_M$.

Import av elektrisitet oppstår når innenlandsk etterspørsel overstiger innenlandsk tilbud. Dessuten kan det bare importeres elektrisitet dersom det er overskuddstilbud i det andre landet. I likevekt vil følgelig det ene landets import av elektrisitet tilsvare det andre landets eksport, dvs. $m_A^* = -m_B^*$.

Det innses lett at optimeringsproblemene og førsteordensbetingelsene for aktørene i hvert av de to landene blir som under autarki (bortsett fra at import og eksport av elektrisitet eksplisitt må tas hensyn til). Likevekten i de to markedene for hvert av landene kan derfor uttrykkes som:

$$6) \quad p_i(x_i^*) = q_M^* + \alpha_i s_i^*.$$

$$7) \quad x_i^* = y_i^* + z_i^* + m_i^* = \frac{z_i^*}{\alpha_i}.$$

$$8) \quad q_M^* + s_i^* = \frac{\partial h_i(z_i^*)}{\partial z_i}.$$

$$9) \quad q_M^* = \frac{\partial c_i(y_i^*, \beta)}{\partial y_i}.$$

Ved innsetting av 8) og 9) i 6) finner vi at prisen i likevekt kan skrives som en lineærkombinasjon av grensekostnadene for svart og grønn elektrisitet:

$$10) \quad p_i(x_i^*) = (1 - \alpha_i) \frac{\partial c_i(y_i^*, \beta)}{\partial y_i} + \alpha_i \frac{\partial h_i(z_i^*)}{\partial z_i}.$$

3.2. Virkninger av prosentkravet som instrument for å fremme grønn elektrisitet

Vi går ut fra at prosentkravet kan være forskjellig i de to land og fokuserer på effekten av å øke prosentkravet i ett av landene. Mer presist ønsker vi å studere effekten på produksjon og konsum i begge land av å øke prosentkravet i land A.¹⁰

Ved å derivere 10) implisitt med hensyn på α_A finner vi at kun effekten på produksjonen av svart elektrisitet, samt produksjon av grønn elektrisitet og elektrisitetskonsumet i land B kan bestemmes entydig. Disse effektene finner vi av følgende uttrykk:

$$\frac{dY}{d\alpha_A} = \frac{\left\{ (1 - \alpha_A) s_A^* + x_A \left[\alpha_A \frac{\partial^2 h_A}{\partial z_A^2} - \frac{\partial p_A}{\partial x_A} \right] \right\} E_B}{D_A E_B + D_B E_A},$$

der $Y = y_A + y_B$, $D_i = \frac{\partial p_i}{\partial x_i} - (1 - \alpha_i)^2 \frac{\partial^2 c_i}{\partial y_i^2} - \alpha_i^2 \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_i^2} < 0$ for $i = A, B$ og

$$E_i = \left[\alpha_i^2 \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_i^2} - \frac{\partial p_i}{\partial x_i} \right] \frac{\partial^2 c_i}{\partial y_i^2}.$$

Inspeksjon av fortegn viser at telleren er positiv, mens nevneren er negativ. Effekten på den samlede produksjonen av svart elektrisitet i de to landene er dermed negativ.

Det kan videre vises at følgende sammenheng gjelder¹¹:

$$\text{sign} \frac{dy_A}{d\alpha_A} = \text{sign} \frac{dy_B}{d\alpha_A} = \text{sign} \frac{dm_A}{d\alpha_A} = \text{sign} - \frac{dx_B}{d\alpha_A} = \text{sign} - \frac{dz_B}{d\alpha_A}$$

¹⁰ Resultatene vil være parallelle om man ser på en økning av prosentkravet i land B.

¹¹ Beviset for dette kan fås ved å kontakte forfatterne.

Ettersom $\frac{\partial Y}{\partial \alpha_A} < 0$ må vi altså ha $\frac{\partial y_A}{\partial \alpha_A} < 0$ og $\frac{\partial y_B}{\partial \alpha_A} < 0$. Videre må det også gjelde at

$\frac{dx_B}{d\alpha_A} > 0$ og $\frac{dz_B}{d\alpha_A} > 0$, dvs. at en økning av prosentkravet i land A noe overraskende fører til

en økning av både elektrisitetskonsumet og produksjonen av grønn elektrisitet i land B. Øvrige effekter er ubestemte.¹²

Fra denne analysen merker vi oss spesielt at effekten på produksjonen av grønn elektrisitet i land A av en økning av prosentkravet i dette landet er usikker. Det er imidlertid sikkert at produksjonen av denne typen elektrisitet vil øke i land B. I tillegg øker konsumet av elektrisitet i land B, mens produksjonen av svart elektrisitet faller i begge land. Som forklart tidligere vil en økning i prosentkravet nødvendigvis føre til en reduksjon i engrosprisen på elektrisitet. For land A er effekten på produksjon og konsum den samme som under autarki. I denne tolandsmodellen med et felles elektrisitetsmarked vil imidlertid reduksjonen i engrosprisen også påvirke etterspørselen etter elektrisitet i land B. Den reduserte engrosprisen betyr at elektrisiteten blir billigere i land B som følge av økningen av prosentkravet i land A. Dette fører til økt konsum av elektrisitet i land B. For å oppfylle prosentkravet må da etterspørselen etter sertifikater i land B øke. Siden det ikke foregår noen handel med sertifikater må disse tilbys av innenlandske produsenter av grønn elektrisitet i land B. Dermed får vi det noe motintuitive resultat av økningen av prosentkravet i land A kan føre til redusert produksjon av grønn elektrisitet i dette landet, mens den øker i land B.

3.3. Virkninger av at utslippskravet for CO₂ skjerpes

Ved en skjerpelse av utslippskravet for CO₂ vil produksjonen av grønn kraft falle i begge land. Dette kan man innse ved å skrive 10) på formen:

$$p_i(x_i^*) = (1 - \alpha_i)q_M + \alpha_i \frac{\partial h_i(z_i^*)}{\partial z_i},$$

¹² Det kan ved hjelp av en numerisk modell basert på antakelsene som er gjort i artikkelen vises at det eksisterer likevektsløsninger der produksjonen av grønn elektrisitet og konsumet av elektrisitet i land A kan gå i begge retninger når prosentkravet i land A økes. Detaljer om dette er utelatt fra artikkelen, men kan fremskaffes ved å ta kontakt med forfatterne.

og totaldifferensiere denne. Vi finner da at:

$$11) \frac{\partial p_i}{\partial x_i} \frac{dx_i}{d\beta} - \alpha_i \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_i^2} \frac{dz_i}{d\beta} = (1 - \alpha_i) \frac{dq_M}{d\beta}.$$

Av 7) fremgår det at $z_i = \alpha_i x_i$. Vi kan derfor skrive:

$$12) \frac{1}{1 - \alpha_A} \left(\frac{\partial p_A}{\partial x_A} \frac{1}{\alpha_A} - \alpha_A \frac{\partial^2 h_A}{\partial z_A^2} \right) \frac{dz_A}{d\beta} = \frac{dq_M}{d\beta} = \frac{1}{1 - \alpha_B} \left(\frac{\partial p_B}{\partial x_B} \frac{1}{\alpha_B} - \alpha_B \frac{\partial^2 h_B}{\partial z_B^2} \right) \frac{dz_B}{d\beta}.$$

For å oppnå en selvmotsigelse anta at $\frac{dz_A}{d\beta} \geq 0$. Ved inspeksjon av fortegn i 12) ser vi at dette

impliserer $\frac{dz_B}{d\beta} \geq 0$, $\frac{dx_A}{d\beta} \geq 0$, $\frac{dx_B}{d\beta} \geq 0$, og $\frac{dq_M}{d\beta} \leq 0$. Av 9) fremgår det videre at $\frac{dq_M}{d\beta} \leq 0$

impliserer $\frac{dy_A}{d\beta} < 0$ og $\frac{dy_B}{d\beta} < 0$. Ved å benytte 7) og eliminere m_i , finner vi at:

$$13) (1 - \alpha_A) \frac{dx_A}{d\beta} + (1 - \alpha_B) \frac{dx_B}{d\beta} = \frac{dy_A}{d\beta} + \frac{dy_B}{d\beta}.$$

Ved inspeksjon av fortegn i 13) ser vi at venstresiden er ikke-negativ mens høyresiden er negativ, altså en selvmotsigelse. Konklusjonen blir derfor at produksjonen av grønn elektrisitet må gå ned i hvert av landene og at også elektrisitetskonsumet i hvert av landene må gå ned. Videre fremgår det av 13) at den totale produksjonen av svart elektrisitet vil gå ned og fra 12) at engrosprisen på elektrisitet vil gå opp. Intuisjonen bak reduksjonen i produksjon av grønn elektrisitet som følge av en skjerpelse av utslippskravet følger den som ble gitt for autarkitilfellet i avsnitt 2.2.

4. Handel med elektrisitet og grønne sertifikater

Vi ser nå på tilfellet der landene kan handle med både elektrisitet og med grønne sertifikater. Dette innebærer at både engrosprisen på elektrisitet og prisen på sertifikater vil være felles i de to landene. Notasjonsmessig betyr dette at s_A og s_B erstattes med s_M i objektfunksjonene

og førsteordensbetingelsene. Forøvrig er notasjonen den samme som i tilfellet med handel bare i elektrisitet.

4.1. Førsteordensbetingelser og likevekt

Grønne sertifikater vil bli importert hvis den innenlandske etterspørselen etter sertifikater overstiger det innenlandske tilbudet. I likevekt vil importen til det ene landet motsvares av en tilsvarende eksport fra det andre landet, dvs. $n_A^* = -n_B^*$. Handelen med sertifikater gjør at den relative andel grønn elektrisitet generert i et land kan være forskjellig fra prosentkravet (se likning 15). Likevekten kan da karakteriseres på følgende måte:

$$14) \quad p_i(x_i^*) = q_M^* + \alpha_i s_M^*.$$

$$15) \quad x_i^* = y_i^* + z_i^* + m_i^* = \frac{z_i^* + n_i^*}{\alpha_i}.$$

$$16) \quad q_M^* + s_M^* = \frac{\partial h_i(z_i^*)}{\partial z_i}.$$

$$17) \quad q_M^* = \frac{\partial c_i(y_i^*, \beta)}{\partial y_i}.$$

Ved innsetting av 14) og 15) i 12) finner vi igjen at prisen i likevekt kan skrives som en lineær kombinasjon av grensekostnadene for svart og grønn elektrisitet:

$$18) \quad p_i(x_i^*) = (1 - \alpha_i) \frac{\partial c_i(y_i^*, \beta)}{\partial y_i} + \alpha_i \frac{\partial h_i(z_i^*)}{\partial z_i}.$$

4.2. Virkninger av prosentkravet som instrument for å fremme grønn elektrisitet

Vi fokuserer igjen på effekten av å endre på prosentkravet. Analysen viser at det i dette tilfellet kun er mulig å entydig bestemme effekten på produksjonen av svart elektrisitet. Igjen er effekten en reduksjon i produksjonen av svart elektrisitet når prosentkravet økes, dvs. at vi har $\frac{dY}{d\alpha_A} < 0$. Dette kan innses ved å anta at det motsatte er tilfellet, altså at en økning av prosentkravet i land A, α_A , gir som resultat at totalproduksjonen av svart elektrisitet enten forblir uendret eller øker. Dette må innebære en økning i totalproduksjonen av grønn elektrisitet for at prosentkravene skal være oppfylt i de to landene. I likevekt må følgelig

konsumet av elektrisitet også øke i begge land, siden vi nå har et felles marked for både elektrisitet og grønne sertifikater. Konstant eller økt produksjon av svart elektrisitet betyr at engrosprisen, q_M , er henholdsvis uendret eller øker. Økt produksjon av grønn elektrisitet krever at prisen på grønn elektrisitet, $q_M + s_M$, stiger. Fra likning (14) ser vi at dette øker sluttbrukerprisen på elektrisitet i begge landene, noe som ikke er forenlig med en økning i konsumet av elektrisitet. Vi har dermed en selvmotsigelse som leder til resultatet at $\frac{dY}{d\alpha_A} < 0$.

Som i tilfellet med handel bare i elektrisitet kan det vises at følgende sammenheng gjelder:

$sign \frac{dy_A}{d\alpha_A} = sign \frac{dy_B}{d\alpha_A}$. Dette innebærer at produksjonen av svart elektrisitet reduseres i begge

land, altså at $\frac{dy_A}{d\alpha_A} < 0$ og $\frac{dy_B}{d\alpha_A} < 0$. Når det gjelder totalproduksjonen av grønn elektrisitet vil

effekten av en økning av prosentkravet i land A igjen være usikker. I og med at vi nå har et felles sertifikatmarked i de to landene vil følgende sammenheng kunne vises å gjelde:

$sign \frac{dz_A}{d\alpha_A} = sign \frac{dz_B}{d\alpha_A}$, dvs. at i motsetning til når det bare var handel i elektrisitet ser vi at vi

ved å åpne for handel i grønne sertifikater i tillegg ikke lenger får et entydig resultat om at produksjonen av grønn elektrisitet i land B vil øke som følge av økningen i α_A . Endringen i produksjonen av den miljøvennlige elektrisiteten må nå gå i samme retning i de to landene.¹³ Verdiene på alle øvrige variabler kan gå i begge retninger. Til slutt viser resultatene at også effekten på konsumet av elektrisitet i begge landene er usikker i dette tilfellet.

4.3. Virkninger av at utslippskravet for CO₂ skjerpes

En skjerpelse av utslippskravet for CO₂ fører i dette tilfellet til at produksjonen av grønn elektrisitet vil gå ned i begge land. For å se dette observer først fra 15) at:

$$19) \alpha_A \frac{dx_A}{d\beta} + \alpha_B \frac{dx_B}{d\beta} = \frac{dz_A}{d\beta} + \frac{dz_B}{d\beta} \text{ og}$$

$$20) (1 - \alpha_A) \frac{dx_A}{d\beta} + (1 - \alpha_B) \frac{dx_B}{d\beta} = \frac{dy_A}{d\beta} + \frac{dy_B}{d\beta}.$$

¹³ Beviset kan fås ved å kontakte forfatterne.

For å oppnå en selvmotsigelse anta at produksjonen av grønn elektrisitet i land A ikke reduseres, altså $\frac{dz_A}{d\beta} \geq 0$. Av 16) fremgår det at dersom ett av landenes produksjon av grønn kraft ikke reduseres vil heller ikke det andre landets produksjon av grønn kraft reduseres. Dette må gjelde ettersom begge land står overfor den samme endringen av $q_M + s_M$. Fra 19) ser vi at konsumet av elektrisitet i minst ett av landene da må forbli uendret eller stige. Anta det er land A som ikke reduserer sitt konsum av elektrisitet, altså $\frac{dx_A}{d\beta} \geq 0$. (Det er et parallelt bevis for tilfellet hvor land B ikke reduserer sitt elektrisitetskonsum). Ved å totaldifferensiere 18) (på tilsvarende måte som vi gjorde for å frembringe 12)) finner vi at:

$$21) \frac{1}{1-\alpha_A} \left(\frac{\partial p_A}{\partial x_A} \frac{dx_A}{d\beta} - \alpha_A \frac{\partial^2 h_A}{\partial z_A^2} \frac{dz_A}{d\beta} \right) = \frac{dq_M}{d\beta} = \frac{1}{1-\alpha_B} \left(\frac{\partial p_B}{\partial x_B} \frac{dx_B}{d\beta} - \alpha_B \frac{\partial^2 h_B}{\partial z_B^2} \frac{dz_B}{d\beta} \right).$$

Ettersom $\frac{dz_A}{d\beta} \geq 0$ og $\frac{dx_A}{d\beta} \geq 0$, ser vi av 21) at $\frac{dq_M}{d\beta} \leq 0$ som impliserer at $\frac{dy_A}{d\beta} < 0$ og $\frac{dy_B}{d\beta} < 0$. Høyresiden av 20) er derfor negativ, mens høyresiden av 19) er ikke negativ.

Dersom dette skal kunne la seg gjøre må $\frac{dx_B}{d\beta} < 0$ og i tillegg må $\alpha_A > \alpha_B$. Ettersom produksjonen av grønn elektrisitet er antatt ikke å falle og $\frac{dq_M}{d\beta} \leq 0$, må det gjelde at $\frac{ds_M}{d\beta} \geq 0$. Fra 12) ser vi at dersom konsumet av elektrisitet i land A skal kunne gå opp mens konsumet for land B skal kunne gå ned, må det gjelde at $\alpha_A < \alpha_B$. Dette motsier resultatet over om at $\alpha_A > \alpha_B$.

Konklusjonen er altså igjen at produksjonen av grønn elektrisitet vil gå ned i begge land som følge at utslippskravet for CO₂ skjerpes. Mekanismene som ligger bak dette resultatet er de samme som de var under autarki og under handel med bare elektrisitet. Likeledes vil totalproduksjonen av svart elektrisitet og totalkonsumet av elektrisitet reduseres. Engrosprisen for elektrisitet vil stige.

5. Konklusjoner

I denne artikkelen har vi fokusert på prosentkravets rolle i et system for grønne sertifikater. I sertifikatsystemene som er foreslått oppfattes prosentkravet som et styringsinstrument for å påvirke mengden grønn elektrisitet i sluttforbruket, og umiddelbart vil man forvente at en økning av prosentkravet gir en positiv effekt på produksjonen av grønn elektrisitet. Våre resultater har imidlertid vist at prosentkravets effekt på dette området er usikker. Analysen er basert på en statisk langsiktig teoretisk modell. Vi har utledet resultater basert på tre tenkte scenarier. Først antok vi at sertifikatsystemet ble innført i et autarki. Deretter så vi på tilfellet der systemet ble implementert i et land som handler elektrisitet med et annet land. Til slutt analyserte vi det scenariet som er ment å faktisk gjelde i Norge fra 1. januar 2006, nemlig et felles sertifikatsystem med Sverige der det kan handles med både elektrisitet og grønne sertifikater over landegrensene. Hovedresultatene fra analysen kan oppsummeres på denne måten:

- Effekten på grønn elektrisitetsproduksjon av en økning av prosentkravet er usikker. Det er derfor ikke slik at det generelt vil gjelde at en økning av prosentkravet fører til økt produksjon av grønn elektrisitet på lang sikt. Det som imidlertid vil være sikkert er at *andelen* grønn elektrisitet i totalkonsumet vil øke når prosentkravet økes. Disse resultatene gjelder både under autarki og når det kan handles med elektrisitet og sertifikater i en tolandsmodell.
- Effekten på produksjonen av svart elektrisitet vil alltid være negativ som følge av en økning av prosentkravet.
- Når det gjelder effekten på totalkonsumet av elektrisitet av en økning i prosentkravet så vil denne være ubestemt autarki. I et tilfelle der et land innfører grønne sertifikater og samtidig handler elektrisitet med et annet land vil effekten på totalkonsumet av elektrisitet av at dette landet øker prosentkravet være usikker i landet som har implementert sertifikatsystemet. Det vil imidlertid føre til en økning av både i elektrisitetskonsumet og produksjonen av grønn elektrisitet i landet som fungerer som handelspartner. Om det i tillegg åpnes for handel i sertifikater mellom disse landene vil derimot også disse to sistnevnte effektene være usikre.
- I et system der grønne sertifikater virker i kombinasjon med CO₂-utslippskrav vil et strengere utslippskrav føre til et press i retning av lavere sertifikatpris og dermed også lavere profitt for produsentene av grønn elektrisitet. En slik politikk vil dermed lede til

reduisert produksjon av grønn elektrisitet. Dette resultatet ble vist å gjelde både under autarki, ved handel i elektrisitet og ved handel i både elektrisitet og grønne sertifikater.

På bakgrunn av analysen i den artikkelen er det grunn til å uttrykke en viss skepsis i forhold til hvor effektivt et system med grønne sertifikater vil være til å sørge for en økning av produksjonen av grønn elektrisitet i Norge. Den usikre effekten på produksjonen av grønn elektrisitet av å øke prosentkravet under autarki har blitt vist i en rekke tidligere analyser. For Norges del er det imidlertid spesielt relevant å se på et system med grønne sertifikater som involverer flere land. Analysen som er gjort i denne artikkelen viser usikkerheten knyttet til effekten på grønn elektrisitetsproduksjon av endringer i prosentkravet videreføres, og til dels forsterkes, når man åpner for handel med et annet land. Dette er et moment som man bør ta i betraktning i forbindelsen med den nært forestående etableringen av et felles norsk-svensk sertifikatmarked. Samtidig inngår Norge i EU-systemet for handel med utslippstillatelser der det legges opp til markeder for utslipp av CO₂. I vår analyse har vi vist at etableringen av to parallelle systemer som er rettet mot samme målsetting – reduksjon av utslippene av drivhusgasser – kan gi uklare effekter på produksjonen av grønn elektrisitet. I modellen vår ble det vist at økt pris på CO₂-kvoter leder til reduksjon i produksjonen av grønn elektrisitet som følge av utformingen av systemet for grønne sertifikater og interaksjonen med systemet for utslippsbegrensninger. Det synes derfor naturlig å stille spørsmål om innføring av det norsk-svenske sertifikatsystemet faktisk kan virke mot sin hensikt, særlig når man ser det i sammenheng med innføringen av handel med utslippstillatelser.

I tillegg til de problemene som analysen vår har pekt på er det en rekke andre forhold som kan trekkes fram når det gjelder innføringen av grønne sertifikater i Norge. Spesielt gjelder dette systemets sårbarhet overfor produsenter med markedsrett. I Amundsen og Nese (2004) vises det at et system med grønne sertifikater kan bryte sammen og reduseres til et vanlig subsidiebasert system i tilfeller med markedsrett. Et annet moment er knyttet til innføring av grønn elektrisitetsproduksjon basert på vindmøller. Vindkraft er tenkt å utgjøre en vesentlig del av satsingen på miljøvennlig elektrisitetsproduksjon. Denne typen produksjon er imidlertid preget av volatilitet og dette kan tenkes å føre til store variasjoner i prisene på grønne sertifikater.

Empiriske erfaringer fra sertifikatsystemer i faktisk drift er så langt begrensede. I Sverige, som innførte sitt system 1. mai 2003, har vi som nevnt innledningsvis sett at sertifikatprisene

det første året har vært relativt høye. Handelsstatistikken viser at grønne sertifikater hyppig har blitt handlet til priser opp mot en maksimumsgrense spesifisert av svenske myndigheter.¹⁴ En mulig årsak til dette kan være markedsmakt på produsentsiden, jf. diskusjonen i Amundsen og Nese (2004).

¹⁴ Se <http://www.stem.se/>.

Litteratur

- Amundsen, E.S. and J.B. Mortensen (2001): "The Danish green certificate system: Some simple analytical results", *Energy Economics*, 23, 489-509.
- Amundsen, E.S. and G. Nese (2002): "Provision of renewable energy using green certificates: Market power and price limits", Working paper No. 25/02, Department of Economics, The University of Bergen.
- Amundsen, E.S., F. M. Baldursson and J.B. Mortensen (2003): "Price Volatility and Banking in Green Certificate Markets", Working paper No. 02/03, Department of Economics, The University of Bergen.
- Bergman, L. and M. Radetzki (2003): "Global klimatpolitik", SNS Förlag, Stockholm.
- Bruvoll, A.G., og Bye, T. (2004): "Trippel salto i reguleringspolitikken". Økonomisk Forum.
- Bye, T., O.J. Olsen og K. Skytte (2002): "Grønne sertifikater – design og funksjon", Rapport no. 2002/11. Statistisk Sentralbyrå.
- Hindsberger, M., M.H. Nybroe, H.F. Ravn og R. Schmidt (2003): "Co-existence of electricity, TEP, and TGC markets in the Baltic Sea Region", *Energy Policy*, 31, pp. 85-96.
- Nese, G. (2003): "Essays in Liberalized Energy Markets" Doctoral dissertation, Department of Economics, The University of Bergen.
- Olje- og Energidepartementet, OED, (2004): "Om forsyningsikkerheten for strøm mv.", *St.meld. nr. 18 (2003-2004)*.
- Platts (2004): "UK Renewables Certificates Market", McGraw-Hill
- Unger, T. and E.O. Ahlgren (2003): "Impacts of a common green certificate market on electricity and CO₂ emission markets in the Nordic countries" in T. Unger "Common energy and climate strategies for the Nordic countries – A model analysis", Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.