

**Göteborgs universitet**  
Miljövetarprogrammet och  
Naturvetenskaplig problemlösning  
Kurs Energisystem  
2002-01-10

**Biobränslebaserat energikombinat med  
koldioxidavskiljning**  
-En långsiktig möjlighet för Västra Götaland?

Petri Aasma   Mikael af Ekenstam   Julia Franzén   Hanna Jönsson

Handledare:  
Johan Swahn, Avd för Fysisk resursteori, Chalmers/GU

**Sammanfattning**

Det finns många alternativ för hur utsläppen av växthusgaser, främst koldioxid (CO<sub>2</sub>), till atmosfären kan minskas för att begränsa växthuseffekten. Det alternativ som diskuteras i rapporten producerar CO<sub>2</sub>-neutrala energibärare som el och vätgas samtidigt som det erbjuder en CO<sub>2</sub>-sänka. Biomassa, som återplanteras, används som bränsle i ett energikombinat för att producera vätgas vilket sedan används som drivmedel för transporter samt för produktion av el och fjärrvärme. Under processen avskiljs CO<sub>2</sub> som lagras permanent i geologiska formationer. Vissa steg i metoden är inte kommersiellt realiserbara idag men kommer troligen att bli det på sikt. I rapporten studeras hur energibehovet i regionen Västra Götaland till stor del skulle kunna täckas med hjälp av denna metod. Antaget att alla bensin- och dieseldrivna fordon i regionen skulle ersättas med vätgasdrivna fordon och att 30 % av dagens elbehov skulle täckas med energikombinatet, skulle 30 TWh biomassa av hög kvalitet krävas per år. Detta är en stor del av den uppskattade potentialen. Från biomassan skulle 9 Mton CO<sub>2</sub> kunna avskiljas och lagras. Två lämpliga akvifärer för lagring finns på rimligt avstånd, Arnagergrönsanden under Skåne och Danmark och Utsira-akvifären som sträcker sig över större delen av Nordsjön.

**Innehållsförteckning**

1. Inledning	3
2. Energiförbrukning drivet med biomassa som primärt bränsle	4
2.1. Produktion av vätgas från biomassa	4
2.2. Vätgas som fordonsbränsle	5
2.3. Elproduktion	6
2.4. Värme till fjärrvärmenätet	6
2.5. Omvandlingseffektiviteter	7
3. Dimensionering av energikombinatet	7
3.1. Antaganden	7
3.2. Hur mycket bränsle krävs och hur mycket CO <sub>2</sub> avskiljs?	8
3.3. Överskottsvärme	8
3.4. Tillgång på biobränsle	8
4. Transport och lagring av CO <sub>2</sub>	9
4.1. Lagring	9
4.1.1. Arnagergrönsanden	10
4.1.2. Utsira-akvifären	11
4.2. Transport	12
5. Slutsats	12
6. Diskussion	12
Referenser	14

## 1. Inledning

För att tillgodose samhällets energibehov används idag i stor utsträckning fossila bränslen som vid förbränning bland annat bildar stora mängder koldioxid, CO<sub>2</sub>. Förhöjda halter av CO<sub>2</sub> i atmosfären leder till en ökad växthuseffekt, vilket medför en ökning av jordens temperatur. Klimatförändringen beskrivs ofta som vår tids viktigaste miljöfråga, vilket har lett till omfattande forskning. Osäkerheterna, angående i vilken utsträckning antropogena utsläpp av växthusgaser påverkar klimatet samt vilka effekter ett förändrat klimat kan medföra, är dock fortfarande stora.[1]

Vägen till en stabilisering av CO<sub>2</sub>-koncentrationen kan utformas på många sätt. Energieffektivisering och övergång till förnybara energikällor är två viktiga faktorer. En annan metod att minska utsläppen är att avskilja och lagra CO<sub>2</sub> som frigörs vid förbränning av fossila bränslen och detta har under senare tid erhållit ett ökat intresse. Denna typ av åtgärd bedrivs redan kommersiellt om än i liten skala [2]. Huvudsakligen befinner den sig dock fortfarande på forskningsstadiet men kan bli ett storskaligt alternativ när kraven på minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp ökar och andra alternativ inte är tillräckliga [2]. På samma sätt som CO<sub>2</sub> kan avskiljas från fossila bränslen kan avskiljning från biomassa göras. Om CO<sub>2</sub> avskiljs och lagras kommer energiutvinning från biomassa inte bara att vara CO<sub>2</sub>-neutral utan även att vara en kolsänka, under förutsättning att biomassan återplanteras. Om detta sätt att använda biomassa skulle komma att tillämpas i stor skala skulle det alltså vara möjligt att både ersätta fossila bränslen, och därmed minska CO<sub>2</sub>-utsläppen, samt att få ett nettouttag av CO<sub>2</sub> från atmosfären.[1,3]

Syftet med det här projektet är att undersöka en metod för att, i Västra Götalands län, sköta energiförsörjningen på ett sätt så att den fungerar som en kolsänka. Detta kan göras genom att anlägga ett eller flera biobränslebaserade energikombinat med CO<sub>2</sub>-avskiljning. Ett energikombinat är en anläggning där en kombination av energibärare produceras. I det energikombinat som studeras i detta arbete produceras el och värme via vätgas, H<sub>2</sub>, samtidigt som en del av vätgasen används som drivmedel inom transportsektorn. En kolsänka av detta slag förutsätter att CO<sub>2</sub> kan lagras permanent och vi undersöker därför lagringskapacitet och transportmöjligheter. I de beräkningar som redovisas utgår vi från Västra Götalands energianvändning och antar att den är lika stor som idag. Vidare antar vi att kärnkraften är avvecklad samt att vätgasdrivna fordon är så konkurrenskraftiga att de kan ersätta bensin- och dieseldrivna fordon.

Rapporten inleds med en principiell beskrivning av energikombinatet och de olika stegen i processen från biomassa till el-, värme- och drivmedelsproduktion. Energi-kombinatets dimensionering bestäms av energibehovet i Västra Götaland och vi utför beräkningar av hur mycket biobränsle som krävs samt hur stor mängd CO<sub>2</sub> som kan avskiljas och därmed behöver lagras. Därefter diskuteras framtida biobränslepotentialer. Möjligheterna att transportera CO<sub>2</sub> och lagra den i geologiska formationer och djuphavet redovisas och avslutningsvis förs en diskussion kring våra slutsatser.

## 2. Energiförbundet drivet med biomassa som primärt bränsle

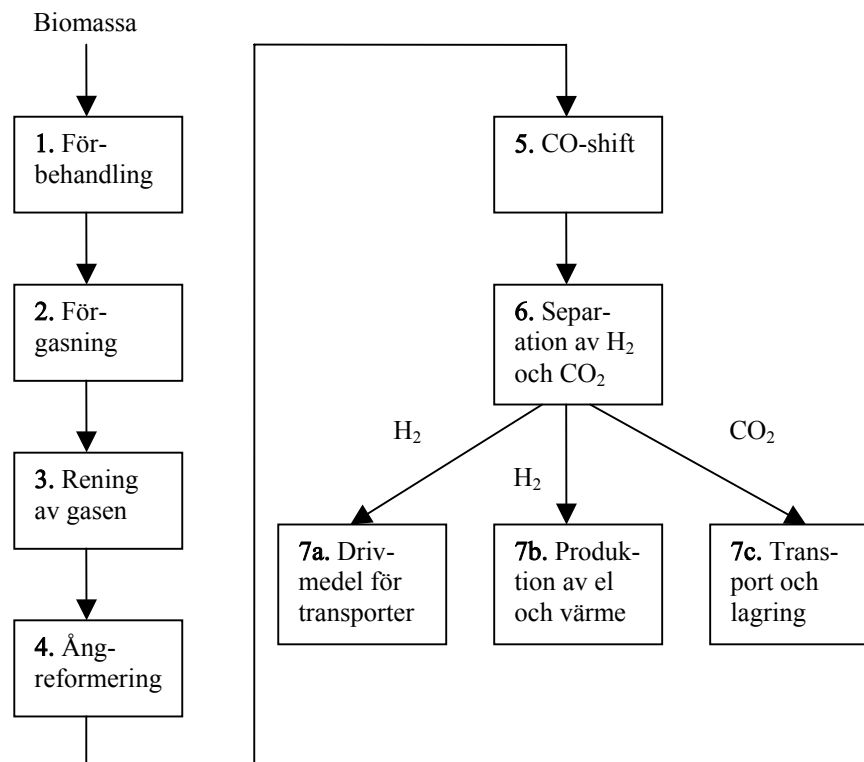
Det finns idag exempel på kraftvärmeverk, bland annat i Värnamo[4], som drivs med biomassa. Biobränslebaserade energianläggningar som utöver el och värme producerar drivmedel för transportsektorn existerar ännu inte i stor skala. Det finns flera tillvägagångssätt att utforma ett energiförbundet för att erhålla drivmedel, el samt värme till fjärrvärm nätet samtidigt som man avskiljer CO<sub>2</sub>. Vi har valt att utgå från den metod som visas i figur 1, där vätgas produceras från förgasad biomassa. Vätgas används dels som bränsle i transportsektorn och dels för produktion av el och värme i en kombicykel eller i bränsleceller. All avskiljning av CO<sub>2</sub> från biomassan sker under den process då vätgas produceras.

### 2.1. Produktion av vätgas från biomassa

Ångreformerings av kolvätgas är den mest effektiva, ekonomiska och oftast använda metoden för att producera vätgas [5]. Nästan uteslutande är det naturgas som används idag men samma teknik kan användas med biomassa som bränsle. Problemet är då att förgasningen kräver en biomassa som har låg fukthalt och är relativt fri från föroreningar som alkalimetaller och svavelföreningar för att tillräckligt hög temperatur skall uppnås samtidigt som processen inte får störas genom att till exempel katalysatorer smutsas ned<sup>6</sup>. Av dessa skäl är det uteslutet att använda exempelvis sorterat avfall som bränsle i processen, då dagens föroreningshalter är för höga. Mer lämpliga bränslen är energigrödor som salix eller avverkningsrester.

Processen då vätgas produceras visas i figur 1. De olika stegen är [6]

1. Förbehandling - Biomassan torkas för att fukthalten skall minskas. Den finfördelas för att lättare kunna förgasas. Dessutom sker det en viss rengöring av biomassan.
  2. Förgasning - Biomassan upphettas till den förgasas.
  3. Rening av gasen - Gasen genomgår olika steg för att rensas.
  4. Ångreformerings - Metan och andra kolvätgas i gasen får reagera med vattenånga så att syntesgas, som i huvudsak består av CO och H<sub>2</sub>, bildas. Detta steg är mycket endotermt (energiåtgivande) och kräver därför höga temperaturer, över 800°C.
  5. CO-shift - För att få bort CO i syntesgasen låter man den reagera med vattenånga så att CO<sub>2</sub> och ytterligare H<sub>2</sub> bildas. Detta är ett exotermt (energiåtgivande) steg vilket innebär att reaktionen kan ske vid låga temperaturer.
  6. Separation av H<sub>2</sub> och CO<sub>2</sub> - Pressure Swing Adsorption (PSA) är en fysisk adsorptionsmetod som kan separera H<sub>2</sub> och CO<sub>2</sub>. Resultatet blir två koncentrerade strömmar av H<sub>2</sub> och CO<sub>2</sub>, något som är viktigt om H<sub>2</sub> skall användas i vissa typer av bränsleceller. För att CO<sub>2</sub> ska kunna transporteras måste den komprimeras, vilket kräver relativt stora mängder el.
- 7a. Drivmedel för transporter (H<sub>2</sub>)
  - 7b. Produktion av el och värme (H<sub>2</sub>)
  - 7c. Transport och lagring (CO<sub>2</sub>)



Figur 1: Schematisering över energikombinat som producerar vätgas från biomassa med avskiljning av CO<sub>2</sub>. Vätgasen används dels som drivmedel för **transportsektorn** och dels för **produktion av el och värme**. Efter avskiljningen transporteras CO<sub>2</sub> till lämplig lokal för permanent lagring.

## 2.2. Vätgas som fordonbränsle

Vätgas kan lagras och transporteras som gas, vätska eller bundet till andra ämnen i vätgasrika kemiska föreningar eller till metaller i form av metallhydrider. Transporten kan ske i pipeline, med lastbil, tåg eller fartyg. För stora och medelstora flöden på mer än 0.5 TWh per år, har transport i pipeline funnits vara det bästa alternativet ur ekonomisk synpunkt [7]. En infrastruktur för distributionen av vätgas måste till största delen ske genom nybyggnation.

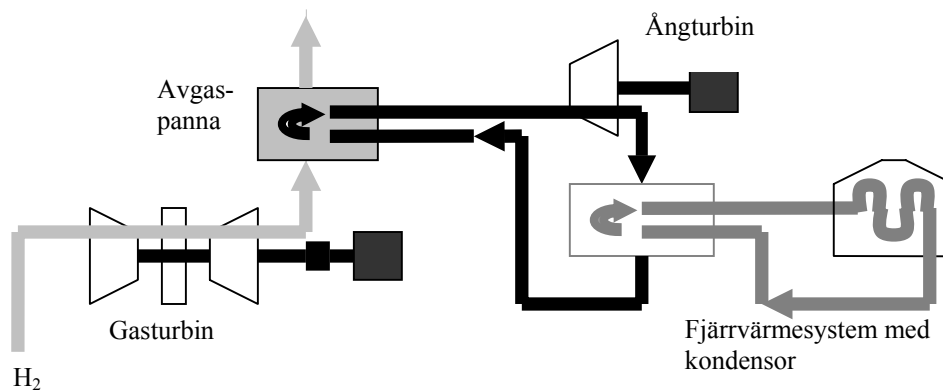
Energiinnehållet i vätgas är nästan tre gånger så stort som för bensin per massenhet. Dess lägre energidensitet gör dock att vätgas måste komprimeras kraftigt för att tillräcklig bränslemängd skall kunna lagras i fordonet. Vätgas kan antingen användas i bränsleceller eller i en anpassad förbränningsmotor för att driva fordon. Bränslecellen bör helst vara av typen med låg arbetstemperatur (50-80°C) för att uppnå hög flexibilitet vid användandet och minska påfrestningarna på bilen. Ett alternativ är så kallade PEM (Proton Exchange Membrane)-bränsleceller [8]. Varken bränsleceller eller förbränningsmotorer drivna med vätgas existerar som kommersiella tekniker men forskning och utveckling pågår.

Verkningsgraden för bränsleceller i fordon bör kunna bli mer än dubbelt så stor som i dagens Ottomotorer, alltså omkring 40-50 % [8].

### 2.3. Elproduktion

Om el skall genereras från vätgas finns det två metoder som framstår som bättre än andra; med hjälp av gasturbin eller med hjälp av bränsleceller. Ingendera metoden är kommersiellt gångbar idag men det bedrivs forskning inom både områdena. Jämfört med naturgas har vätgas högre flamhastighet och lägre energidensitet, vilket gör att man inte kan driva traditionella gasturbiner med vätgas. Ett japanskt projekt har dock som mål att ta fram en kommersiell anläggning inom 30 år [9].

I ett kraftvärmeverk med kombicykel är en gasturbin och en ångturbin kombinerade för produktion av elkraft och värme, se figur 2. I gasturbinen är rökgaserna från bränslet arbetsmedium och får turbinen att rotera. De heta avgaserna från gasturbinen värmer sedan vatten till ånga som driver ångturbinen. Var för sig kan dessa turbiner uppnå 30-40 % elverkningsgrad medan elutbytet i en så kallad kombicykel med naturgas som bränsle stiger till 50-55 %. I en kombicykel som drivs med vätgas antas minst samma verkningsgrad kunna uppnås. Används i stället vätgasen som bränsle i högtemperatur-bränsleceller kan troligtvis verkningsgraden bli upp till 70 %.[10]



Figur 2: Vätgasbaserat kraftvärmeverk med kombicykel.

### 2.4. Värme till fjärrvärmenätet

Vid produktionen av vätgas bildas det ingen överskottsvärme som kan användas i fjärrvärmenätet. Det är istället så att det måste tillsättas en betydande mängd el till processen för att den skall fungera [6]. Vid elproduktionen däremot blir den del av det tillförda bränslets energiinnehåll som inte omvandlas till el förluster i form av värme. I ett kraftvärmeverk kan detta tillvaratas och värme kan levereras till fjärrvärmenätet. Den totala verkningsgraden stiger då till cirka 90 %. Även när högtemperatur-bränsleceller används vid elproduktionen kan överskottsvärmen, som måste ledas bort från bränslecellen, överföras till fjärrvärmenätet.

## 2.5. Omvandlingseffektiviteter

På vägen från biomassa till drivmedel, el och värme sker det en rad omvandlingsförluster som påverkar hur mycket primärt bränsle i form av biobränsle som måste användas i processen. Den termiska effektiviteten,  $\eta_{te}$ , vid omvandling från biomassa till vätgas definieras som

$$\eta_{te} = \frac{E_{H_2}}{E_{bio} + \frac{E_{el}}{\eta_{el}} + \frac{E_{värme}}{\eta_{värme}}},$$

där  $E_{bio}$  är energin i primärt bränsle,  $E_{el}$  är tillsatt mängd el utifrån och  $E_{värme}$  är tillsatt mängd värme utifrån. För omvandlingen från biomassa till vätgas är den termiska effektiviteten ungefär 65 % [6]. För elproduktion får vi ytterligare en omvandlingsfaktor att ta hänsyn till. Från biomassa till el via kombicykeln blir då den termiska effektiviteten ungefär  $0.65 \cdot 0.55 \approx 35$  %. Används istället bränsleceller blir den termiska effektiviteten  $0.65 \cdot 0.70 \approx 45$  %. Dagens biobränslebaserade kraftvärmeverk med kombicykel utan CO<sub>2</sub>-avskiljning har en termisk effektivitet på drygt 30 % [4].

## 3. Dimensionering av energikombinatet

Vi har valt att dimensionera energikombinatet så att i första hand behovet av el och drivmedel säkerställs i Västra Götaland. Därutöver produceras värme som kan användas i fjärrvärmenätet. Mängden avskild CO<sub>2</sub> är direkt beroende av hur mycket biobränslen som används, vilket i sin tur avgörs av energibehov samt energisystemets effektivitet. En faktor som begränsar energitillförseln är tillgången på biobränsle.

### 3.1. Antaganden

Som tidigare nämnts grundas beräkningarna på en energianvändning som ligger på dagens nivå. År 1999 var elanvändningen drygt 20 TWh<sub>el</sub> i Västra Götaland [11]. Den största andelen el tillfördes från kärnkraft och vattenkraft, 50 % vardera, och endast en bråkdel var lokalproducerad [12]. Vid den tidpunkt det föreslagna energikombinatet skall tas i bruk antar vi att kärnkraften har avvecklats samt att vattenkraftens bidrag till eltillförseln har förblivit konstant. Eftersom förutsättningarna för vindkraft är goda vid västkusten antar vi att 20 % av elbehovet i länet kan täckas med vindkraft. Återstående 30 % eller 6 TWh<sub>el</sub> skall täckas med el från biobränslebaserade kraftvärmeverk med CO<sub>2</sub>-avskiljning. Dessutom tillkommer cirka 1 TWh<sub>el</sub> som krävs för att komprimera avskild CO<sub>2</sub> under ett år [5]. Verkningsgraden för elproduktion beror på om kombicykel eller bränsleceller används. Vi har valt att utgå från kombicykeln, det vill säga den teknik som har lägre verkningsgrad, eftersom vi antar att den blir kommersiell tidigare.

Av de 91 TWh i Sverige som används i transportsektorn svarar bensen och dieselfordon för 83 % [13] och det är dessa som antas kunna ersättas med vätgasfordon. Då 17 % av Sveriges fordon är registrerade i Västra Götaland [14] antar vi att 13 TWh bensen och diesel skall ersättas med vätgas. Verkningsgraden i en bil som drivs med vätgas är mer än dubbelt så hög som i konventionella fordon, därför räknar vi med att behovet av vätgas

kommer att vara 6.5 TWh per år. Vi antar att energiåtgången för transport av avskiljd CO<sub>2</sub> är försumbar i sammanhanget.

### ***3.2. Hur mycket bränsle krävs och hur mycket CO<sub>2</sub> avskiljs?***

Då verkningsgraden för elproduktion är 35 % i det energikombinat som vi har studerat och det behövs 7 TWh<sub>el</sub> innebär det en åtgång av biobränsle motsvarande 20 TWh varje år. Med ett drivmedelsbehov på 6.5 TWh och en verkningsgrad för vätgasproduktion från biobränsle på 65 %, krävs varje år 10 TWh biobränsle för att förse bilarna i Västra Götaland med bränsle.

Om hela drivmedelsbehovet och 30 % av elbehovet i länet skall täckas med biobränsle krävs följaktligen 30 TWh biobränsle om året. När en megajoule biobränsle förbrukas bildas 96 g CO<sub>2</sub> [15]. Ett energikombinat där 30 TWh biomassa förgasas bidrar till utsläpp av 10 Mton CO<sub>2</sub> varje år. Under antagande att 85-90 % av CO<sub>2</sub> kan avskiljas blir lagringsbehovet cirka 9 Mton CO<sub>2</sub> per år [6]. Denna mängd kan jämföras med Sveriges totala utsläpp av CO<sub>2</sub> som är ungefär 60 Mton per år [2].

### ***3.3. Överskottsvärme***

Vid produktionen av 7 TWh<sub>el</sub> bildas överskottsvärme som kan levereras till fjärrvärmenät i Västra Götaland. Med en elverkningsgrad på 55 % och en total verkningsgrad på 90 % i kraftvärmeverket alstras 4.6 TWh värme. Detta kan jämföras med dagens 3.5 TWh som varje år levereras i fjärrvärmenätet för Göteborgs stad [12]. Idag kommer mycket av fjärrvärmen från raffinaderier. Deras bidrag kommer ersättas med fjärrvärme från biobränslebaserade energikombinat. Problem med för stor mängd överskottsvärme från energikombinat i Göteborg kan undvikas genom utlokalisering av delar av energiproduktionen i regionen.

### ***3.4. Tillgång på biobränsle***

Av Sveriges totala energitillförsel på cirka 615 TWh per år, kommer 94 TWh från biobränsle som huvudsakligen används inom skogsindustrin, fjärrvärmeverken, småhussektorn och till elproduktion [13]. Om man jämför denna siffra med de 30 TWh bioenergi som krävs för att täcka Västra Götalands drivmedelsbehov samt 30 % av dess elbehov, inser man att det skulle bli en snedfördelning av användningen av biomassa i landet. Den avgörande faktorn för om Västra Götalands biobränslebehov går att täcka är därför hur stor potentialen att utöka biobränsleuttaget är.

Bioenergin är idag i huvudsak baserad på restprodukter från trädbränslen (biobränslen som inte genomgått någon kemisk process, till exempel ved, bark, spån och energiskog), returlutar (mellanprodukter vid kemisk massatillverkning), vissa typer av avfall och biogas från bland annat rötning av slam.[16] Den största delen biobränsle utgörs av trädbränsle och returlutar, som främst används inom skogsindustrin. Det möjliga uttaget av restprodukter för bioenergi är mycket större än dagens uttag men det råder delade meningar om hur stor potentialen är. Anledningen till att man kommer till olika slutsatser beror bland annat på olika syn på vad som begränsar tillgångarna. Det kan till exempel gälla vad man betraktar som biobränsle, tillväxtbegränsningar, ekologiska begränsningar vad gäller näringsbalanser och biologisk mångfald samt tekniska och ekonomiska

begränsningar. Sammantaget kan man dock säga att bedömningarna av potentialen omkring år 2020 varierar mellan 120 och 220 TWh för alla typer av biobränsle [16]. I vårt fall tror vi dock att avverkningsrester från trädbränsle samt energigrödor är de bränslen som är mest intressanta och den sammanlagda framtida potentialen för dessa uppskattas till 123-135 TWh år 2015 [17].

#### **4. Transport och lagring av CO<sub>2</sub>**

För att CO<sub>2</sub> skall kunna transporteras till lagringsplatsen måste den efter avskiljningen komprimeras och torkas [5]. Transporten kan ske med pipeline, fartyg eller tåg. Redan idag lagras CO<sub>2</sub>, bland annat i Sleipnerfältet i Nordsjön [2]. De huvudsakliga lokalerna för lagring är i geologiska formationer, till exempel akvifärer (grundvattenförande berglager) och olje- och gasfält eller i djuphavet. Lagringen bör vara permanent och platsen bör ligga inom rimligt avstånd från energikombinatet för att undvika alltför långa och kostsamma transporter. Då det ej finns några lämpliga lagringsplatser i Västra Götaland utvärderas istället områden utanför regionen.

##### **4.1 Lagring**

För att vara lämplig som lagringsutrymme bör en akvifär ha hög lagringskapacitet per volymsenhet, befinna sig vid rätt djup, vara stor nog att rymma de mängder CO<sub>2</sub> som kan bli aktuella samtidigt som injicerad CO<sub>2</sub> lätt skall kunna spridas och fördelas i lokalen. Den överliggande bergarten bör ha en geologisk struktur som gör den så tät som möjligt för att förhindra läckage. Vid lagring i akvifärer bör CO<sub>2</sub> inte finnas i gasform av säkerhetsskäl men också av utrymmesskäl, eftersom gasfickor kan bildas i akvifären. På djup mellan 1000-2000 meter ligger de mest lämpliga lokalerna eftersom temperatur och tryck är tillräckligt stora för att CO<sub>2</sub> skall vara i vätskeform. Vid lagring under 2000 meter ökar kostnaderna för borrhinar. På dessa djup förändras också berggrundens egenskaper så att lagringskapaciteten minskar och det blir dessutom svårare att injicera CO<sub>2</sub>. [18] Vid lagring i akvifärer kan läckage uppstå om de överliggande bergarterna har områden med låg täthet eller har flera sprickor eller större förkastning där större mängder CO<sub>2</sub> kan läcka ut. Detta problem kan minimeras med undersökningar av det område där injektion av CO<sub>2</sub> skall ske samt det område som den lagrade CO<sub>2</sub> upptar i akvifären. Lagring i akvifärer under havsbotten har bedömts som permanent och säker enligt modeller som gjorts. Det skulle ta mer än 10 000 år innan små mängder CO<sub>2</sub> når upp till havsbotten. Om en spricka uppstår 8000 meter från injektionsplatsen skulle det i värsta fall ta 500 år innan CO<sub>2</sub> når sprickan och under de efterföljande 1500 åren skulle 20 % av all CO<sub>2</sub> kunna läcka ut. [19]

Gas- och oljefält kan också användas som lagringslokaler då deras struktur är väldigt lik den hos akvifärer. I oljefält som är i bruk kan det finnas en praktisk nytta med CO<sub>2</sub> eftersom utvinningen ökar när man pumpar ner CO<sub>2</sub> i tomrummet efter tidigare uttagen olja. [2]

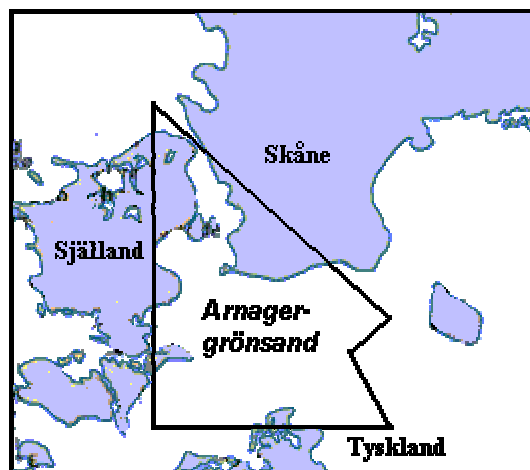
Två metoder är aktuella vid lagring i djuphavet, dispersion vid intermedialt djup (cirka 1500 meter) eller injektion på djup under 3000 meter [20]. På 3000 meters djup är densiteten för CO<sub>2</sub> större än vattnets och CO<sub>2</sub> lägger sig därför på botten. Vid djup runt 1500 meter måste CO<sub>2</sub> blandas på lämpligt sätt med havsvattnet för att den inte skall stiga

upp till havsytan alltför snabbt [2]. För att nå dessa djup måste man frakta CO<sub>2</sub> upp till Norska havet. Där sker injektionen i den Norska bassängen som ligger ungefär 2000-2500 km från Göteborg. Vid lagring i havet kan störningar i miljön för det marina livet uppstå. Det sker såväl en direkt påverkan på organismerna som en indirekt genom pH-förändringar. Vid bottenlagring kan det ta väldigt lång tid för den bottenlevande floran och faunan att återhämta sig.[21]

Utifrån Västra Götalands perspektiv är det främst två lokaler som är intressanta för lagring. I båda fallen rör det sig om akvifärer. Det ena akvifären ligger delvis inom Sveriges gränser och kallas Arnagergrönsanden, se figur 3. Det andra alternativet är Utsira-akvifären i Nordsjön, se figur 4. Djuphavslagring är inte intressant, då transportavståndet till de aktuella djupen är betydligt större än till de två akvifärerna.

#### 4.1.1. Arnagergrönsanden

Arnagergrönsanden är en sandsten som bildades mellan yngre och äldre krita (70-140 miljoner år sedan). Denna sandsten är 10000 km<sup>2</sup> i utsträckning, tjockleken är 30-60 meter och den ligger på 1000-1500 meters djup. Där är temperaturen omkring 35-40°C.



Figur 3. Arnagergrönsandens utbredning. [18]

Då denna formation inte är homogen i hela sin utsträckning är det svårt att beräkna den exakta lagringsvolymen som finns till förfogande. Dock har uppskattningar gjorts som visar på en lagringskapacitet mellan 70 Mton och 3,5 Gton CO<sub>2</sub> på det område som ligger inom svenskt territorium. Den stora osäkerheten beror på stora variationer i de geologiska egenskaperna och det krävs därför utförligare undersökningar för att fastställa den totala lagringspotentialen i denna akvifär.[18] Den årliga CO<sub>2</sub>-produktionen från energikombinatet är 9 Mton CO<sub>2</sub>. Beroende på hur stor lagringspotentialen är, kan i det pessimistiska fallet injektion endast ske i 8 år och i det mer gynnsamma fallet räcker lagringsutrymmet i 390 år. Injektion kan ske genom att lämpliga platser väljs ut och hål borrar ned till akvifären. Därefter pumpas CO<sub>2</sub> ned till lagringsutrymmet där den sprider sig och börjar fylla ut akvifären.

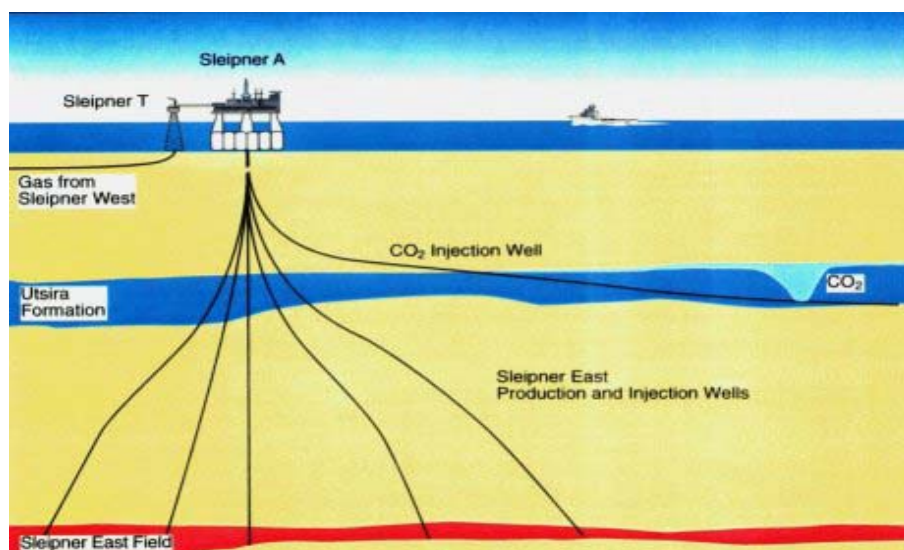
#### 4.1.2. Utsira-akvifären

Utsira-akvifären består av en sand som är mättad med saltvatten. Hela akvifären är belägen på cirka 1000 meter under havsbotten och har en tjocklek på 200-300 meter över en yta av 26000 km<sup>2</sup>. Utsira-akvifären är så omfattande att den kan rymma CO<sub>2</sub>-utsläpp från alla Europas kraftverk under många hundra år [2]. Från Göteborg är avståndet till akvifären cirka 500 km.



Figur 4. Utsira-akvifärens utsträckning.

För att injicera CO<sub>2</sub> behövs en stationär plattform, som har samma huvudsakliga utformning som dagens oljeplattformar. Det finns idag 70 plattformsinstitutioner på den norska kontinentalsockeln som skulle kunna användas vid CO<sub>2</sub>-injektion [22]. I dagsläget pumpas redan 1 Mton CO<sub>2</sub> årligen ned i denna akvifär av Statoil, vilket kan ses i figur 5 [20]. Denna CO<sub>2</sub> har avskiljts från utvunnen naturgas.



Figur 5. CO<sub>2</sub>-injektion vid Sleipnerfältet. [20]

#### **4.2. Transport**

Då det finns ett befintligt naturgasnät mellan Skåne och Göteborg skulle i framtiden detta nät kunna användas för att transportera CO<sub>2</sub> till Arnagergrönsanden. Kapaciteten är begränsad till 6 Mton CO<sub>2</sub>/år om ledningen endast används för CO<sub>2</sub>transport [23]. Transporten kan även ske med tankfartyg, som fylls på i Göteborgs hamn med CO<sub>2</sub> från pipelines kopplade till energikombinatet. De fartyg som används skulle kunna vara väldigt lika dagens fartyg som fraktar LPG (gasol). Om fartygen rymmer upp till 30 000 ton CO<sub>2</sub>, skulle det innebära att ungefär ett fartyg i denna storleksklass blir lastat dagligen i Göteborg. Tåg anses inte vara intressant vid transport till Skåne då det är dyrare än både pipeline och fartyg [18]. För transport till Utsira-akvifären är tankfartyg den enda rimliga metoden.

#### **5. Slutsatser**

Även om många av de tekniska komponenterna i energikombinatet med CO<sub>2</sub>-avskiljning befinner sig på utvecklingsstadiet just nu är det troligt att de kan bli kommersiellt gångbara på sikt. Ett problem är att tillgången på biomassa av tillräckligt hög kvalitet är begränsad i Sverige och det råder tvivel om Västra Götaland skulle kunna få tillgång till de 30 TWh som krävs varje år. Förutsatt att tillräckligt med biobränsle finns att tillgå är de tekniska möjligheterna att lagra all CO<sub>2</sub> som avskiljs goda. Om inte Arnagergrönsanden visar sig ha tillräckligt stor lagringskapacitet är kapaciteten mer än tillräcklig i Utsira-akvifären. Metoder för att transportera CO<sub>2</sub> finns och det blir ekonomiska faktorer som kommer att avgöra vilken metod som används.

#### **6. Diskussion**

Hur framtidens energisystem och energianvändning kommer att se ut är väldigt svårt att förutsäga. Utvecklingen av energisystemet bestäms framförallt av de tre faktorerna teknik, ekonomi och politik. FNs klimatkonvention har satt upp långsiktiga målsättningar att halterna av växthusgaser i atmosfären, däribland CO<sub>2</sub>, skall stabiliseras på en nivå som inte medför en "farlig" mänsklig påverkan på klimatsystemet. Detta innebär förmodligen kraftiga begränsningar av CO<sub>2</sub>-utsläppen. För Sverige har en halvering på sikt rekommenderats [24]. De krav som ställs i Kyotoprotokollet är dock måttliga och det finns åtgärder som är billigare än CO<sub>2</sub>-avskiljning och lagring. Men om dessa åtgärder visar sig vara otillräckliga eller inte tillämpas i tillräcklig stor utsträckning, kan det uppstå en ohållbar situation där halten av växthusgaser i atmosfären måste minskas kraftigt. I en sådan situation skulle det vara intressant att använda det alternativ som denna studie behandlar, som både klarar energiförsörjningen och samtidigt fungerar som en CO<sub>2</sub>-sänka. En annan faktor som kan göra CO<sub>2</sub>-avskiljning konkurrenskraftig är höjda CO<sub>2</sub>-skatter. Eftersom energikombinatet fungerar som en CO<sub>2</sub>-sänka skulle man kunna få betalt för att avskilja och lagra CO<sub>2</sub>. Med tillräckligt höga CO<sub>2</sub>-skatter skulle man till och med, paradoxalt nog, kunna tjäna pengar på att producera drivmedel och el utan att ens behöva sälja det [1].

De tekniska möjligheterna och geologiska förutsättningarna för lagring av CO<sub>2</sub> finns. I ett globalt perspektiv innebär CO<sub>2</sub>-lagring en miljövinst. Eventuella negativa miljöeffekter blir lokala. Om Arnagergrönsandens kapacitet, att lagra den CO<sub>2</sub> som produceras, visar

sig vara tillräckligt stor bedöms det inte finnas några tekniska hinder för lagring. Fördelen med denna lokal är att lagringen sker inom svenskt territorium och blir därmed en inrikesfråga. Lagring i Utsira-akvifären innebär att vi får föra bi- eller multilaterala förhandlingar i de fall injektionsplatserna hamnar inom ett eller flera länders ekonomiska zoner. Sverige har ratificerat Londonkonventionen från 1972 som i 1996 års protokoll säger att endast dumpning av ”godkända” ämnen får ske från plattformar och fartyg. Försiktighetsprincipen förutsätter dessutom att de miljöeffekter som kan uppstå utreds, vilket kan visa sig vara svårt på grund av komplexiteten i havets ekologi. Dock kan försiktighetsprincipen användas till lagringens fördel om de åtgärder som görs internationellt för att minska CO<sub>2</sub>-utsläppen inte visar sig räcka till.

Den uppskattade potentialen av biomassa i Sverige är visserligen tillräcklig för att kunna tillgodose Västra Götalands behov, men det skulle krävas en stor del av tillgången och det skulle resultera i en obalans av biobränsleanvändningen i landet. Vid en sådan stor ökning av biobränsleanvändningen i Västra Götaland skulle regionen troligtvis inte kunna vara självförsörjande och man skulle vara tvungen att transportera biobränsle från andra delar av Sverige. Enligt en rapport från Naturvårdsverket kommer det vid en kraftigt ökad biobränsleanvändning i landet att finnas ett biobränsleöverskott på sikt i framför allt nedre Norrland, Dalarna, Värmland och Småland. Man skulle alltså kunna transportera biobränsle från dessa områden.[16] En möjlighet är att importera biobränsle exempelvis från plantager i tropikerna. Vid en kraftig ökning av biobränsleanvändningen i landet är det möjligt att efterfrågan skulle överskrida tillgången. Detta skulle antagligen leda till ökade priser för biomassa.

En aspekt av tillgången på biomassa är att det är en råvara som även andra sektorer än energisektorn efterfrågar, exempelvis skogsindustrin. Det är dessutom inte bara biomassa som råvara som efterfrågas utan jordbruks- och skogsmark skall även vara tillgängligt för friluftsliv, rekreation och naturupplevelser, samtidigt som den biologiska mångfalden måste bevaras. Storskalig plantering av energiskog påverkar även landskapsbilden.

En moraliskt aspekt av det hela är att ett biobränslebaserat energikombinat med CO<sub>2</sub>-avskiljning i Västra Götaland skulle kunna ta ut samma mängd CO<sub>2</sub> ur atmosfären som tidigare släppts ut. Även om den faktiska mängden utsläppt CO<sub>2</sub> kan tas bort, kan man inte undvika klimateffekterna som utsläppen redan har orsakat. Förutsatt konstant energianvändning skulle det ta 62 år av CO<sub>2</sub>-avskiljning med denna metod innan den mängd CO<sub>2</sub> som släppts ut under 1900-talet kan tas bort från atmosfären.

## Referenser

---

- [1] Azar, C., Lindgren, K. och Persson, T., *Carbon sequestration from fossil fuels and biomass - long-term potentials*, Chalmers tekniska högskola, Institutionen för fysik och teknisk fysik, Avdelningen för fysisk resursteori, 2001
- [2] Lyngfelt, A. *Koldioxid kan slutlagras i jorden*, Forskning och Framsteg 2001:7, s. 39-43
- [3] Obersteiner, M., Azar, C., Kauppi, P., Möllersten, K., Moreira, J., Nilsson, S., Read, P., Riahi, K., Schlamadinger, B., Yamagata, Y., Yan, J., van Ypersele, J-P., *Managing climate risk*, Science, vol. 785, 2001
- [4] Ståhl, K. *Biomass IGCC overview and the Värnamo Power Plant* Proceedings of the 9<sup>th</sup> european convention on bioenergy, vol. 3, s. 276-285, 1996
- [5] af Ekenstam, M., Franzén, J. och Persson, M. *Pre-combustion decarbonisation of fossil fuels*, Projektarbete, Göteborgs universitet, Institutionen för fysik och teknisk fysik, 1999
- [6] Katofsky, R.E, *The production of fluid fuels from biomass*, PU/CEES Report No. 279, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, Princeton, NJ, USA, 1993
- [7] Adolfsson, B., Björck, P.O., Filipsson, E. och Grahn, M., *Distribution av vätgas – en studie över möjligheter av ett rikstäckande distributionsnät för den svenska transportsektorn*, Projektarbete, Göteborgs universitet, Institutionen för fysik och teknisk fysik, 1999
- [8] Sidén, G. *Vätgas och bränsleceller ger kraft till bilen*, Energimagasinet 2000:3, Teknikförlaget TFAB, 2000
- [9] WE-NET hemsida, <http://www.ena.or.jp/WE-NET>, 2002-01-07
- [10] Holmlid, L., Chalmers tekniska högskola, Institutionen för fysikalisk kemi, Personlig kommunikation, 2002-01-08
- [11] Statistiska centralbyrån, [http://www.scb.se/sm/EN11SM0101\\_tabeller21.asp](http://www.scb.se/sm/EN11SM0101_tabeller21.asp), 2001-12-29
- [12] Bengtsson, L., Hedman, R. och Thulin, S., *En studie av alternativ för utveckling mot en hållbar energiförsörjning i Göteborg*, Projektarbete, <http://www.goteborg2050.nu>, 2001-12-01
- [13] Statens Energimyndighet, *Energiläget 2000*, Ordförandet Bertil Örtenstrand AB, 2000
- [14] Statens Institut för Kommunikationsanalys, [http://www.sika-institute.se/statistik\\_fr.html](http://www.sika-institute.se/statistik_fr.html), 2001-12-29
- [15] Naturvårdsverket, <http://www.environ.se/dokument/fororen/klimat/vaxthus.html>, 2001-12-07
- [16] Kretsloppsdelegationens rapport 1998:20, *Biomassa – en nyckelresurs*, 1998
- [17] Gustavsson, L. och Börjesson, P., *CO<sub>2</sub> mitigation cost – Bioenergy systems and natural gas systems with decarbonization*, Energy Policy, vol. 26, no. 9, s. 699-713, 1998
- [18] Vattenfall, *Technology and cost options in Sweden for capture and disposal of carbon dioxide generated by combustion of fossil fuels producing power, heat and/or automotive fuels*, Vattenfall, 1997
- [19] Hanisch, C. *The pros and cons of carbon dioxide dumping*, Environmental Science & Technology / News, Jan. 1, s. 20-24, 1998

- [20] IEA, *Ocean storage of CO<sub>2</sub>*, ©1999, [www.ieagreen.org.uk](http://www.ieagreen.org.uk) , 2001-12-15
- [21] Shirayama, Y. *Biodiversity and biological impact of ocean disposal of carbon dioxide*, Waste Management, Vol. 17, No. 5/6, s.381-384, 1997
- [22] Holt, T. och Lindeberg, E. *Offshore gas power with CO<sub>2</sub> removal supplied from a plant located on an abandoned platform*, IKU Petroleum Research, Trondheim, 2000
- [23] Holmquist, L., Göteborg Energi, [lars.holmquist@goteborgenergi.se](mailto:lars.holmquist@goteborgenergi.se), Personlig kommunikation, 2002-01-04
- [24] Azar, C. och Lindgren, K. *Energiläget 2050*, Chalmers tekniska högskola, Avdelningen för fysisk resursteori, <http://www.frt.fy.chalmers.se/Energir.pdf>, 2001-12-29