



Distribution av väte

— en studie över möjligheter av ett rikstäckande distributionsnät
för den svenska transportsektorn

Björn Adolfsson

Per-Olof Björck

Erik Filipsson

Maria Grahm

10p projektarbete fjärde terminen, maj 1999

Naturvetenskaplig Problemlösning

Göteborgs universitet/Chalmers Tekniska Högskola

Institutionen för Fysik och Teknisk fysik

Examinatorer: Peter Apell, Jöran Bergh, Mats Öblad

Huvudhandledare: Christian Azar, miljö

Bihandledare: Ola Gröndalen, fysik

Bihandledare: Mikael Patriksson, Fredrik Altenstedt, matematik

Abstract

The greenhouse effect is considered one of the most serious global hazards to the environment and the Kyoto agreement stipulates that emissions of greenhouse gases must be reduced. A global reduction of CO₂ emissions involves considerable changes in present energy systems. A transition to CO₂ neutral energy sources would make hydrogen, with its several advantages, a potential energy carrier. However, increased use of hydrogen would necessitate an extensive distribution system.

The purpose of this project is to analyse and evaluate a feasible hydrogen distribution infrastructure regarding economic and technical aspects. We have collected information from the literature, interviewed experts and applied models to optimize the relevant parameters.

The distribution system considered is to supply the Swedish transport sector, which is a potential market for introducing hydrogen as fuel, as it today is a contributor to CO₂ emissions. The transport sector consumes approximately 100 TWh per year. We assume a conversion from conventional combustion engines to twice as energy efficient fuel cell vehicles which would reduce the need to 50 TWh of hydrogen per year. Under the assumption that this amount of hydrogen is provided to the southern part of Sweden, alternative ways of distributing gaseous or liquid hydrogen is considered in separate or combined systems where pipelines, trucks and rail cars are the means of transport.

By surveying the fuel demanding areas and using the minimum spanning tree method, the shortest route by node is computed. The flow at each node is then calculated where rates greater than 6 TWh/year are said to be a large flow and rates between 6 TWh/year and 0.5 TWh/year are considered medium. Finally rates below 0.5 TWh/year are said to be the small flow to supply the end consumers.

On the basis of the above results and the specific character of the means of transport the most cost effective way of distributing hydrogen are calculated in order to find the optimum distribution system. The models and methods used show that for large and medium flows, distribution by gaseous hydrogen in pipelines is the most practicable way. With a 30 year length of life, the total cost for the large and medium flow is 3.6 billion SEK/year and the transmission cost is 0.07 SEK/kWh. For the complex small flow, the transmission cost fluctuates due to flow and route. For a case study of 15 districts in the county of Dalarna the costs for the means of transport accounts for a total cost of 287 million SEK/year and a distribution cost of 0.14 SEK/kWh.

It is concluded that pipeline is the most cost effective way of hydrogen distribution for the large and medium flow and is in addition economically competitive to electricity transmission via power lines. However, a different situation pertains for smaller flows where the distribution cost is strongly influenced by the geographic location of the outlet.

Sammanfattning

För att efterleva FN-nationernas avtal om reduktion av utsläpp av växthusgaser som till exempel koldioxid krävs en övergång till koldioxidneutrala energikällor vilket innebär en övergripande omställning av de nuvarande energisystemen där väte kan bli en betydande energibärare.

I detta projekt undersöks möjligheter för en infrastruktur med alternativa distributionssätt för väte utifrån ekonomiska och tekniska aspekter. Distributionssystemet som behandlas skall täcka behovet för den svenska transportsektorn vilken är en potentiell marknad för introduktion av väte samt en idag bidragande faktor till koldioxidutsläpp.

Med antagande om ett konstant inflöde av vätgas till Skåne behandlas distribution via pipeline, lastbil och godståg samt dess förutsättningar. Genom att kartlägga energibehovet för respektive län och använda "the minimum spanning tree"-metoden är den kortaste sträckan mellan områdena beräknade.

Metoderna som används visar att för större flöden är distribution av vätgas via pipeline det minst kostsamma alternativet. Med en livslängd på 30 år är den totala kostnaden för det stora och mellanstora flödet 3,6 miljarder SEK/år och transmissionskostnaden 0,07 SEK/kWh. För det komplexa lilla flödet varierar transmissionskostnaderna beroende på flöde och sträcka. I en fallstudie för Dalarna med 15 utvalda orter är de olika distributionsalternativens kostnader redovisade där den totala kostnaden är 287 miljoner SEK/år och distributionskostnaden är 0,14 SEK/kWh.

Innehåll

1	Inledning	4
2	Metod	4
2.1	Pipeline	5
2.1.1	Gasflöde i rör	5
2.1.2	Materialstandard och dimensionering	5
2.1.3	Kostnader för pipeline	6
2.1.4	Drifts- och investeringskostnad av kompressorer	7
2.2	Kompressionsanläggning	8
2.3	Förvätskningsanläggning	8
2.4	Lastbil	9
2.5	Tåg	9
3	Resultat	9
3.1	Den optimala vägsträckan	9
3.2	Städernas behov och flöde	10
3.3	Distribution i det stora och mellanstora flödet	11
3.4	Lilla nätets omfattning och flöde	11
3.5	Distributionskostnad per energimängd	13
4	Slutsats och diskussion	14
4.1	Lastbil eller tågtransport med väte	14
4.2	Forskning på vätedistribution	15
4.3	Framtida uppgifter	15
4.3.1	Normverk och livscykelanalys	15
4.3.2	Jämförelse med eldistribution i högspänningsledningar	15
4.3.3	Vätedistribution med båt	15
4.3.4	Kostnadsberäkning av det lilla distributionsnätet	16

1 Inledning

Växthuseffekten betraktas av många som ett av de potentiellt mest allvarliga globala miljöproblemen. I december 1997 förhandlade världens FN-nationer fram Kyoto-avtalet. Enligt detta avtal ska i-länderna minska sina utsläpp av sex växthusgaser, framför allt CO₂, till år 2010. På längre sikt kommer ännu kraftfullare reduktioner att bli nödvändiga inom i-länderna, medan u-länderna åtminstone måste begränsa sina utsläpp, som idag ligger på en mycket låg nivå jämfört med i-länderna. En övergripande begränsning av koldioxidutsläppen innebär stora förändringar av energisystemet. Det handlar dels om en övergång till CO₂-neutrala energikällor som till exempel förnyelsebar energi, kärnkraft eller fossila bränslen med CO₂-avskiljning och dels om ökad energieffektivitet. Vid övergång till ett nytt energisystem kan väte bli en betydande energibärare vilket gör ett omfattande distributionsnät nödvändigt.

I denna rapport undersöks möjligheter för en infrastruktur med alternativa distributionssätt för väte utifrån ekonomiska och tekniska aspekter. Distributionssystemet ska täcka behovet för den svenska transportsektorn vilken är en potentiell marknad för introduktion av väte och en idag bidragande faktor till CO₂-utsläpp. Information från forskning och expertis som berör väte och dess distribution har sammanställts för att optimera relevanta parametrar i distributionssystemet.

För transportsektorn, som förbrukar cirka 100 TWh/år, antas en omställning från konventionella förbränningsmotorer till dubbelt så energieffektiva fordon med bränsleceller. Detta reducerar behovet till 50 TWh/år vilket motsvarar 5,7 GW eller $1,4 \cdot 10^9$ kg H₂/år. Utgångspunkten är att ovan nämnda mängd kommer till Malmö och ska sedan länsvis fördelas enligt dagens bensin- och dieselförbrukning. Flygbränsle är här ej inräknat.

Genom att kartlägga Sveriges energibehov ges en geografisk bild hur distributionsbehovet är fördelat över de olika regionerna. Därefter beräknas den kortaste sträckan mellan utvalda städer.

De tillstånd för väte som behandlas är gas och flytande. Väte i gasform kan distribueras i pipeline under mark eller i tryckkärl som lastas på godståg eller lastbil. Distribution av flytande väte sker med bulkcontainers på lastbil, tåg eller båt. Energiinnehållet för väte i flytande form är mycket större per volymenhet än gasform, vilket gör det fördelaktigt ur transportsynpunkt, medan själva förvätskningen är mycket energikrävande. Mängden flytande väte som kan levereras med lastbil är 45 m³ [1]. Samma mängd antas kunna transporteras per vagn på ett godståg. För transmission via pipeline begränsas maxtrycket till 80 bar. Tyngdpunkten i projektet ligger på distribution via pipeline på grund av vätets speciella egenskaper som behandlas i avsnittet Pipeline.

De ekonomiska beräkningsmodellerna innefattar data såsom rörliga och fasta kostnader med hänsyn tagen för investeringars årliga räntebortfall, så kallad annuitet, för respektive transportsätt. Räntesatsen sätts till 5%.

Genom att utgå från resultat och transportmedlens beskaffenheter beräknas de mest kostnadseffektiva distributionsalternativen.

2 Metod

I detta arbete undersöks hur transportsektorns, se Appendix 1, årliga behov av 50 TWh i form av väte kan distribueras i Sverige. Först beräknas den optimala vägsträckan och därefter flödena som definieras utifrån tre kvantiteter. Det mest kostnadseffektiva distributionssättet utvärderas för de utvalda delsträckorna.

Behovet av transportbränsle i Sverige är procentuellt fördelat mellan länen enligt Appendix 2. Då bränsleförbrukningen i varje län är känd bestämmer vi efter befolkningsmängden [2] vilka städer som huvudsakligen ska få leverans av vätgas.

Vägsträckan optimeras med "the minimum spanning tree"-metoden [3] som utförs med hjälp av ett matlabprogram, se Appendix 3. Metoden sammanbinder alla utvalda städer i ett nät över Sverige med den kortaste vägsträckan. Flödet till varje stad erhålls genom att addera den mängd staden behöver för sin egen förbrukning och hur mycket som ska passera genom staden. Det stora flödet definieras utifrån ett ingångsflöde större än eller lika med 6 TWh per år. Mellanflödet definieras utifrån ett årligt ingångsflöde mindre än 6 TWh men större än 0,5 TWh.

Kostnaden för det lilla flödet som förbinder det mellanstora distributionsnätet med ändstationerna undersöks inte för alla län. På grund av specifika förhållanden som befolkningstäthet och avstånd blir det inte möjligt att erhålla en generell modell för alla län. I stället utförs fallstudier för Dalarnas, Kronobergs och Norrlands län, som alla är godtyckliga regioner med små flöden. Här uppstår efter en övergång från mellanstort flöde till litet flöde en brytning mellan de olika distributionsalternativen, se vidare i avsnitt Resultat. Varje delsträcka mellan utvalda orter inom ett län utvärderas och kostnaden för distributionen minimeras.

De distributionsalternativ som kan bli aktuella genomgår en ekonomisk och teknisk undersökning i följande studier.

2.1 Pipeline

För att kunna befatta sig med beräkningar för gastransmissioner i pipeline måste man ha viss kunskap i fluiddynamik. Dessutom måste vätslets speciella egenskaper beaktas vid val av rörmaterial och dimensionering. Därefter kan drifts- och investeringskostnader fastställas.

2.1.1 Gasflöde i rör

Den inre friktion som uppstår hos en gas i en rörledning ger upphov till strömningsförluster. Vid strömning i rör utvecklas olika hastighetsfördelningar i gasen på grund av gasens viskositet och rörets skrovlighet och diameter. Som karakteristiskt tal vid friktion hos rörströmmar används Reynolds tal. Storleken på Reynolds tal avgör direkt flödets karaktär [4]. Det kan dels handla om att gasen flyter fram i olika cylindriska skal med inbördes lika hastighet, ett så kallat laminärt flöde och dels ett turbulent flöde, se figur 1.

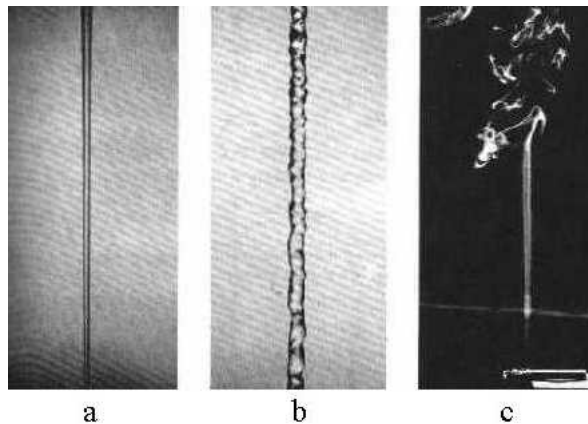


Fig. 1 Ett laminärt flöde (a) och ett turbulent flöde (b). Cigarettroken längst till höger (c) är ett exempel på både laminärt och turbulent flöde.

Nästan alla flöden i rörledningar uppträder i turbulent form eftersom det laminära flödet är svårt att uppnå och upprätthålla. Det aktuella vätgasflödet är turbulent och därför måste beräkningar utföras med formler specifikt gällande för turbulent flöde [5].

2.1.2 Materialstandard och dimensionering

Det finns många vätesystem runt om i världen där tillämpningsområdet oftast är inom kemikalieindustrin. Det finns dock ännu inga direkta normer för design, konstruktion och säkerhet utanför industriområden. Tidigare erfarenhet inom området är oftast riktlinjen vid konstruktion [6] [28].

Eftersom inga direkta normer finns kan det inte heller fastställas exakt vilket sorts material som en rörledning skall bestå av. De normer som finns att tillgå är gällande för naturgasledningar och blir därför det som ligger närmast att tillämpa och används här för dimensioneringen.

För att tillmötesgå krav på material och dimensionsbehov måste vätgasens speciella egenskaper betänkas. Vid förhållanden med tryck över 50 bar är vätslets benägenhet till försprödning av material tillsammans med vätslets benägenhet att diffundera genom material de viktigaste fenomenen att beakta [7]. Det är då

atomärt väte diffunderar in i metallstrukturen och ansamlas i trånga utrymmen, där det bildas vätgasmolekyler, som försprödningsproblem kan uppstå [28]. Bland de system vi har studerat genom litteratur och fältstudier har dock inga problem med vätgasförsprödning rapporterats.

Vid Air Liquides vätgaspipeline i Beneluxområdet, se Appendix 4, är arbetstrycket mellan 60 och 80 bar och rörledningen är av varierande diameter. Av driftserfarenhet och testresultat rekommenderas användning av olegerat kolstål med materialbeteckning ASTM A 106 [7]. Vid användning i vätgaspipeline bör dock materialet undergå särskilda specifikationer angående dess kemiska sammansättning och tillverkning, se Appendix 5. Av erfarenhet har stålmaterial med låga halter av kol och mangan utmärkt sig som minst känsligt för materialförsprödning [8]. Ett material som uppfyller högre kvalitetskrav än i Benelux-exemplet är det som används i naturgasledningen mellan Malmö och Göteborg med materialbeteckningen L415MB [28].

Utifrån rörledningens längd samt gasens transmissionshastighet och tryck kan lämpligast rördiameter väljas med avseende på kompressorernas energiåtgång. För att ett flöde ska uppstå i en rörledning krävs ett tryckfall längs ledningen. För vätskor finns det väl vedertagna beräkningsformler men för gaser är situationen en annan. Vätskor kan antas ha konstant densitet, de är inkompressibla, medan densiteten för en gas ändras med trycket. Beräkningarna grundas ofta på storheter som gasens tryck, densitet, viskositet, kompressibilitet och temperatur samt rörmaterialets skrovlighet, längd och tvärsnittsarea.

Problemet med att på förhand uppskatta transmissionskostnader är omfattande i och med de många påverkande faktorerna. Utifrån approximationer beskrivs kostnaderna för vätgastransport i rörledningar enligt optimeringskurvorna i figur 2 [9].

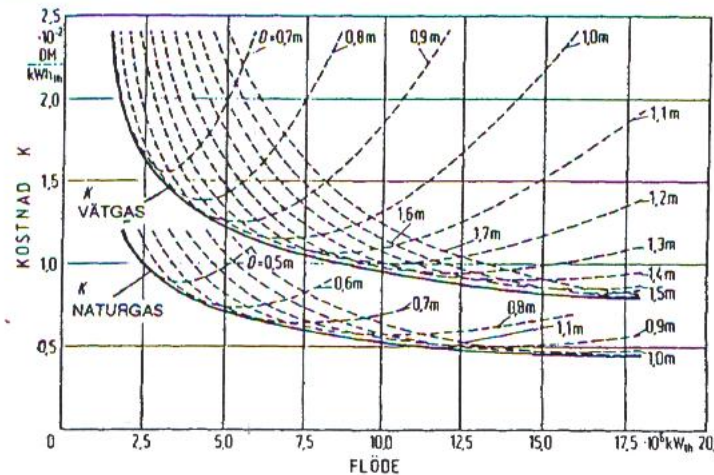


Fig. 2 Grafen visar kostnaderna för vätgastransport i rörledningar i förhållande till flödet. I grafen är inlagt exempel på kostnader för olika rördiametrar [9].

Dessa kurvor bygger på kostnader för kompressordrift i området under 100 bar och för 2 000 km ledning. Ingen investeringskostnad för rör och kompressorer är inräknad. Avläsning i diagrammet ger att det flöde som skulle behöva passera södra Sverige för att täcka det antagna behovet av vätgas på 5,7 GW kräver en 0,9 m rördiameter för lägsta transmissionskostnad. Denna rörledningsdiameter antas för pipeline längs det stora flödet.

Då man vet vilken sorts material som är lämpligt samt dess diameter kan man i föreskrivna normverk få parametrar för det rekommenderade materialet. Vid dimensionering av rörtjocklek tillämpas EN-standarder och sprängämnesinspektionens föreskrifter gällande för naturgasledningar [10]. Med inre övertryck på 80 bar återges godstjockleken enligt normverk, se Appendix 5.

2.1.3 Kostnader för pipeline

Kostnader för distribution i pipeline är framför allt investeringskostnaden vid rördragningen men också den årliga drifts- och underhållskostnaden.

Det finns fastställda svenska normer vid byggande av naturgaspipeline där man av säkerhetsskäl till exempel har dubbelmantlade rör under trafikerade vägar och förstärkningar över rören där traktorer brukar

jordbruksmark [28]. Det finns inga normer framtagna för vätgaspipeline men investeringskostnaden påverkas av rördiameter och material men framför allt av hur komplicerad väg som ska grävas och återställas. Det blir dyrare om man behöver spränga, om det är sättningsbenägenhet eller vattenövertryck i marken, om det ska köra fordon över eller om det är stadsmiljö, då återställning av markytan alltid är mer kostsam [28]. Generellt är materialkostnaden för pipeline en liten del av totalkostnaden [29]. Det är allt runt omkring för att uppfylla säkerhetskraven och att återställa marken som kostar vid nybyggnad. Som allmän tumregel för rörläggning uppskattas den totala kostnaden till 10 000 SEK/m [28] [30]. Att bygga en pipeline anpassad för vätgasdistribution kan kosta mer än till exempel en pipeline för naturgas. Uppskattningsvis är kostnaden 30-60% dyrare [11] [12] [13]. Merkostnaden beror på att man behöver stål som inte påverkas av vätgasen, man har högre krav på svetsfogarna och diametern bör vara 20% större för att behålla samma energiflöde [14]. Antagandet är därför att kostnaden för rörläggningen för det stora flödet blir 15 000 SEK/m. För det mellanstora flödet antas efter numerisk analys en diameter på 0,4 m och en kostnad på 14 000 SEK/m och 13 000 SEK/m för det lilla flödet med en diameter på 0,1 m. Livslängden på ett pipelinesystem antas vara 30 år. De annuitiserade kapitalkostnaderna beräknas för att ge en rättvis bild av den årliga kostnaden enligt

$$A_c = I \frac{1 - \frac{1}{1+r}}{1 - \left(\frac{1}{1+r}\right)^{n+1}}$$

där A_c är den sökta annuitiserade kostnaden, I är investeringskostnaden, r är räntesatsen 0,05 och n är antal avskrivningsår.

Underhållskostnaderna inkluderar både förebyggande åtgärder och reparationer. För att undvika korrosion används ett katodskydd på 3V och 4A [29]. Systemet delas upp i segment som separat mäter tryck och flöde för att detektera läckage. Man övervakar även systemet genom att flyga över det en gång per månad och genom att fotvandera längs rörledningen. Då eftersöks bland annat färgförändringar i vegetationen som avslöjar läckage och kontroll utförs så att ingen gräver eller bygger i närheten av ledningen. Det finns obemannade kontrollstationer utplacerade längs distributionsvägen. Vid glesbefolkade områden är de placerade på ca 20 kilometers avstånd, men i tätbebyggda områden på ca 1 kilometers avstånd [29]. Mest underhåll krävs där trycket tas ner eller där rören har krökningar. Magnetrontgen görs även inuti de svenska naturgasrören genom att så kallade intelligenta piggar åker med i gasen och inspekterar rörens insida [28]. Underhållskostnaden jämföras med det svenska naturgasnätet och sätts till 100 000 SEK/år och km.

2.1.4 Drifts- och investeringskostnad av kompressorer

För att beräkna drifts- och investeringskostnaden måste först tryckfallet beräknas så att kompressorernas effekt kan fastställas. Med en given rördiameter och därmed tvärsnittsarea kan följande uttryck [13] användas för att beräkna det tryckfall som infinner sig längs en rörsektion med längden L och massflödet $\dot{m}$

$$P_1^2 - P_2^2 = \lambda \left(\frac{\dot{m}}{A} \right)^2 \frac{R T L}{M d} \quad (1)$$

där P_1 är ingående tryck i Pa, P_2 är utgående tryck i Pa, R är gaskonstanten 8,31 J/mol K, T är temperaturen 273 K, A är tvärsnittsarean i m^2 , M är molmassan 0,002 kg/mol, d är rörets diameter i m och λ är den dimensionslösa förlustkoefficienten för rårör som vid turbulent flöde beskrivs av

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{k}{d} + 1,14 \quad (2)$$

där k är koefficienten för rörets skrovlighet [5]. Tryckfallet beror också av hur stort gasuttag man gör i respektive stad. Samtliga tryckfall i de 26 sektionerna beräknas, se Appendix 6.

En kompressor placeras vid varje utvald stad för att kompensera tryckfallet vilket ger ett enhetligt tryck på 80 bar inför varje ny vägsträcka. Från de städer där rörledningen förgrenar sig placeras en kompressor för varje grenrör. Utifrån tryckfallet och vätgasflödet kan kompressorstationerna dimensioneras enligt den empiriskt framtagna formeln [14]

$$P_{komp} = Q \frac{P_{atm}}{T_{atm}} \frac{T_{H_2}}{\eta_{komp}} Z \frac{N g}{g-1} \left(\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{g-1}{N g}} - 1 \right) \quad (3)$$

där P_{komp} är kompressoreffekt i W, Q är vätgasflödet i normalkubikmeter [Nm^3/s], P_{atm} är atmosfärstrycket 101 300 N/m², T_{atm} är utomhustemperaturen 298 K, T_{H_2} är vätgastemperaturen vid ingångstrycket 273 K, η_{komp} är kompressorns effektivitet 55%, Z är kompressionstalet för vätgas 1, N är antalet kompressionssteg och g är kvoten mellan värmekapaciteterna konstant volym C_v och konstant tryck C_p . Som tumregel gäller att man kan öka trycket med en faktor 4 för varje kompressionssteg [14]. Effekten för varje kompressor beräknas, se Appendix 6.

Investeringskostnaden för kompressorn beror av den framräknade kompressoreffekten enligt

$$K_{inv} = 69000 P_{komp}^{0.7} \quad (4)$$

där K_{inv} är investeringskostnaden i SEK och P_{komp} är kompressoreffekt i kW [9].

2.2 Kompressionsanläggning

För att distribuera komprimerad gas behövs en kompressoranläggning som komprimerar gasen från 80 bar till 200 bar ner i tryckkär för vidare transport via lastbil. Kostnaderna för komprimeringen av gasen består av investeringskostnaden för kompressorn enligt ekvation (4) och driftskostnaderna. Driftskostnaderna beräknas inte enligt ekvation (3) ovan som avser en kompressor i ett pipelinesystem där man har stora flöden utan enligt nedanstående formel [15],

$$W = R_{H_2} T Z \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (5)$$

där W är det isothermiska komprimeringsarbetet i J/kg, R_{H_2} är vätgaskonstanten 4 124 J/K·kg, T är temperaturen 273 K, P_1 är starttrycket $8,0 \cdot 10^6$ Pa, P_2 är det önskade trycket $2,0 \cdot 10^7$ Pa och Z är korrektionsfaktorn

$$Z = \frac{K(P_1) + K(P_2)}{2K(P_1)} \quad (6)$$

där $K(P)$ är

$$K(P) = 1 + \frac{P [\text{Pa}]}{1,50 \cdot 10^8 [\text{Pa}]} \quad (7)$$

Energien för att komprimera vätgas från 80 bar till 200 bar är 1,07 MJ/kg vilket motsvarar 0,297 kWh/kg. Eftersom elpriset är satt till 0,60 SEK/kWh fås driftskostnaden 0,178 SEK/kg komprimerad vätgas.

2.3 Förvätskningsanläggning

Distribution på lastbil eller med godståg blir effektivast om man kyler ner vätgasen till -253°C , då vätgas övergår till flytande väte, LH_2 . Denna process utförs i en förvätskningsanläggning.

Väte har vid vissa temperaturer en negativ Joule-Thomson koefficient vilket medför att gasen vid expansion inte avkyls utan uppvärms [16]. Gränsen går vid cirka 80 K då gasen istället kyls vid en expansion. Förvätskningsanläggningen i Ingolstadt kyler 2000 Nm^3 vätgas per timma i en trestegsprocess. Först kyls vätgasen ner från ca 293 K till 80 K med hjälp av flytande kväve. Därefter låter man gasen expandera i turbiner till temperaturen 30 K. I det sista steget låter man gasen passera en så kallad Joule Thomson ventil, där expansionen blir extra kraftig och det flytande vätet, med temperaturen 20 K, samlas upp i en LH_2 -tank [17].

Investeringskostnaderna för denna förvätskningsanläggning är 115 miljoner SEK [31]. Denna anläggning producerar 4 400 kg LH_2 /dygn och har en livslängd på 15 år. För att räkna ut investeringskostnaden för en anläggning med större kapacitet används formeln [15],

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \right)^{0,7} \quad (8)$$

där I_1 är den sökta investeringskostnaden i SEK, I_2 är referensinvesteringskostnaden i SEK, $\dot{m}_1$ och $\dot{m}_2$ är kapaciteten för respektive anläggningar i kg/dygn. Driftskostnaderna är framför allt energin som går åt för att genomföra nedkylningen och är 0,95 kWh/liter LH₂ vilket motsvarar 13,8 kWh/kg väte.

2.4 Lastbil

Utöver investeringskostnaden för lastbilen beror distributionskostnaderna för lastbilsleverans på drift, underhåll och personalkostnader. En lastbil av bulktyp som är säkerhetsutrustad för farligt gods och kan transportera 3,1 ton LH₂, kostar cirka 4 miljoner SEK, för 45 m³ släp med 20 års livslängd och dragbil som byts ut efter 10 år [1] [18] [31].

När det gäller distribution av farligt gods används Åkeriförbundets riktlinjer till transportföretag där kostnaderna för drift, underhåll, personal och investering motsvarar 20 SEK/km [32].

Ovan nämnda kostnader gäller för distribution av flytande väte. När det gäller leveranser med komprimerad väte på lastbil finns säkerhetsnormer för maximal storlek på tryckkärl. Explosionsrisken vid en vältolycka anses vara större vid komprimerad gas än vid farligt gods i flytande form, vilket gör att gasen måste levereras i 50 liters tryckkärl. Ett flak med vätgasflaskor består av 144 sammankopplade 50 litersflaskor med ett gemensamt uttag. Varje flaska rymmer 9 Nm³, vilket motsvarar 117 kg H₂ per lastbilsleverans [33]. Tomvikten för flaskorna blir dock cirka 7 ton vilket är en stor nackdel [8]. Kostnaderna för lastbilsleveranser antas fortfarande vara 20 SEK/km.

2.5 Tåg

Vid tågdistribution finns ingen investeringskostnad eftersom transporter på järnväg är en tjänst man köper. Kostnaden för distribution av farligt gods på järnväg beror på avståndet och hur många dygn man behöver hyra en 45 m³ bulkvagn. Hyrkostnaden är 300 SEK/vagn och dygn. Distributionskostnaden per vagn och avstånd är 95 SEK/km inom radien 40 km, 24 SEK/km inom 300 km, 18 SEK/km inom 500 km och 15 SEK/km för längre avstånd än 500 km [34]. En vagn med bulkcontainer lastar 3,1 ton LH₂.

3 Resultat

3.1 Den optimala vägsträckan

De 27 utvalda städerna är markerade i figur 3. De streckade linjerna motsvarar de möjliga distributionsvägarna som är alternativen för den datorbaserade "the minimum spanning tree"-metoden [3]. De heldragna linjerna visar datorns val av nät där de kraftigare linjerna motsvarar det stora flödet och de tunnare grå linjerna motsvarar det mellanstora nätet. Detta distributionsnät sammanbinder de utvalda städerna med kortast möjliga vägsträcka. Längden av varje delsträcka i det stora och mellanstora flödet redovisas i tabell 1. Total längd av stora flödet är 1 402 km och för mellanflödet 1 737 km.

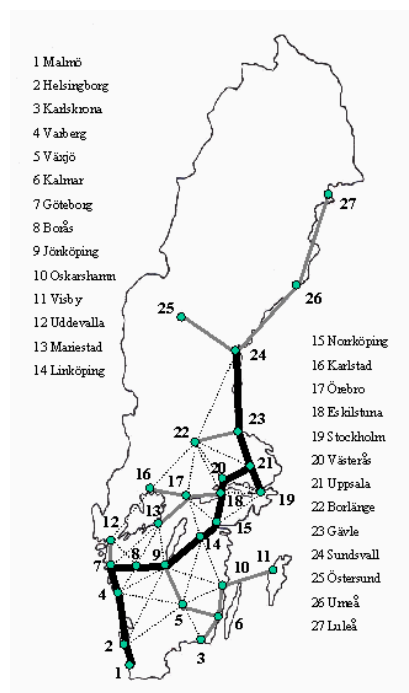


Fig. 3 Utvalda städer i Sveriges respektive län. De streckade linjerna är möjliga vägsträckor, de kraftiga heldragna linjerna är resultat av stora flödet och de tunna heldragna linjerna är resultat av det mellanstora flödet.

3.2 Städernas behov och flöde

Av de 50 TWh vätgas som transportsektorn förser med förbrukas 4,5 TWh i Malmöregionen och de övriga 45,5 TWh fördelas genom 26 distributionssektioner enligt tabell 1.

Sektion	AVSTÅND	UTTAG	FLODE	
	[km]	[TWh/år]	[kg/s]	[TWh/år]
Umeå - Luleå	275	2,0	1,8	2,0
Sundsvall-Umeå	292	1,5	3,2	3,5
Sundsvall-Östersund	192	1,0	0,9	1,0
Gävle-Sundsvall	236	2,0	6,0	6,5
Gävle-Borlänge	116	2,0	1,8	2,0
Uppsala-Gävle	111	2,0	9,7	10,5
Uppsala-Stockholm	72	6,0	5,5	6,0
Västerås-Uppsala	86	1,5	16,6	18,0
Eskilstuna-Västerås	44	1,5	18,0	19,5
Eskilstuna-Örebro	82	1,5	3,7	4,0
Örebro-Karlstad	119	2,0	1,8	2,0
Örebro-Mariestad	118	0,5	0,5	0,5
Norrköping-Eskilstuna	110	1,5	23,0	25,0
Linköping-Norrköping	39	1,25	24,2	26,25
Jönköping-Linköping	130	1,25	25,3	27,5
Jönköping-Växjö	120	1,5	4,1	4,5
Växjö-Kalmar	109	1,25	2,8	3,0
Kalmar-Karlskrona	91	1,0	0,9	1,0
Kalmar-Oskarshamn	76	0,25	0,7	0,75
Oskarshamn-Visby	175	0,5	0,5	0,5
Borås-Jönköping	91	2,0	31,3	34,0
Göteborg-Borås	71	1,5	32,7	35,5
Göteborg-Uddevalla	88	1,0	0,9	1,0
Varberg-Göteborg	78	6,0	39,1	42,5
Helsingborg-Varberg	154	2,0	41,0	44,5
Malmö-Helsingborg	64	1,0	41,9	45,5
SUMMA :	3139	45,5		

Tabell 1. Tabellen visar samtliga uttag uteder stora och mellanstora flödet, avståndet mellan de 27 städerna och flödet genom respektive stad.

3.3 Distribution i det stora och mellanstora flödet

Beräkningar ger att pipeline är det mest ekonomiska distributionsmedlet längs både stora och mellanstora flödet. Den totala läggningskostnaden blir då 2,8 miljarder SEK/år och underhållskostnaden 315 miljoner SEK/år enligt tabell 2.

PIPELINEKOSTNADER					
Sektion	FLÖDE	RÖRDIM.	Investeringskostnad		Underhåll
	[TWh/år]	S / M / L	[miljarder kr]	[miljoner kr/år]	[miljoner kr/år]
			inköp	annuitetskostn.	
Umeå - Luleå	2	M	3.9	240	28
Sundsvall-Umeå	3.5	M	4.1	250	29
Sundsvall-Östersund	1	M	2.7	160	19
Gävle-Sundsvall	6.5	S	3.5	220	24
Gävle-Borlänge	2	M	1.6	99	12
Uppsala-Gävle	10.5	S	1.7	100	11
Uppsala-Stockholm	6	S	1.1	66	7.2
Västerås-Uppsala	18	S	1.3	79	8.6
Eskilstuna-Västerås	19.5	S	6.6	40	4.4
Eskilstuna-Örebro	4	M	1.1	70	8.2
Örebro-Karlstad	2	M	1.7	100	12
Örebro-Mariestad	0.5	M	1.7	100	12
Norrköping-Eskilstuna	25	S	1.7	100	11
Linköping-Norrköping	26.3	S	5.9	36	3.9
Jönköping-Linköping	27.5	S	2	120	13
Jönköping-Växjö	4.5	M	1.7	100	12
Växjö-Kalmar	3	M	1.5	93	11
Kalmar-Karlskrona	1	M	1.3	78	9.1
Kalmar-Oskarshamn	0.8	M	1.1	65	7.6
Oskarshamn-Visby	0.5	M	2.5	150	18
Borås-Jönköping	34	S	1.4	83	9.1
Göteborg-Borås	35.5	S	1.1	65	7.1
Göteborg-Uddevalla	1	M	1.2	75	8.8
Varberg-Göteborg	42.5	S	1.2	71	7.8
Helsingborg-Varberg	44.5	S	2.3	140	15
Malmö-Helsingborg	45.5	S	9.6	59	6.4
		Summa:	65.5	2759	315.2

Tabell 2. Tabellen visar kostnader för att lägga pipeline längs de 26 aktuella sektionerna av distributionen och den årliga kostnaden av underhåll på rörledningarna.

För att upprätthålla ett tillräckligt flöde och ett lämpligt mottagartryck placeras 26 kompressorstationer ut som kompenserar för tryckfall orsakade av förgreningar, rörledningsförluster samt uttag av gas.

Beroende på storleken av tryckfallet vid de utvalda städerna anpassas kompressorernas effekter för att återställa trycket till 80 bar. Det troliga är att kompressorerna drivs av bränsleceller eller gasturbiner som i sin tur drivs av vätgas som tas direkt från rörledningen. För att komma runt problemet med att information om effektivitet och investeringskostnader för bränsleceller samt gasturbiner saknas har vi valt att ta fram elkostnaden för varje kompressor.

Elkostnader för kompressorarbete sammanfattas tillsammans med kompressorernas investeringskostnader i Appendix 6. För att få en uppfattning om energiåtgången kan nämnas att av de 50 TWh vätgas som transporteras i det stora och mellanstora nätet krävs 0,8 TWh för att driva kompressorerna vilket motsvarar 1,7% av det totala energiinnehållet av vätgasinflödet.

3.4 Lilla nätets omfattning och flöde

På grund av stora variationer i det lilla flödet måste man undersöka varje län för sig. Beroende på avstånd, flöde och orternas placering i förhållande till varandra kommer olika transportsätt att bli ekonomiskt fördelaktiga. Vid små flöden finns brytpunkter mellan transport av vätgas i pipeline, transport av komprimerad vätgas i tryckkärl och transport av flytande väte i lastbil eller tåg. Den stora kostnaden för att transportera flytande väte beror till stor del på höga förvätskningskostnader och därför blir även vätgas i tryckkärl aktuellt på vissa korta sträckor. Vid övergången från mellanstort flöde till litet flöde minskas rördiametern från

0,4 m till 0,1 m vilket ger en tryckhöjning nog för att driva distributionen genom lilla flödet utan kompressorer. Exempel har beräknats på Kronobergs, Dalarnas och Norrbottens län. Dalarna har valts som exempel för att visa hur det kan se ut.

Det totala flödet till Dalarna är 1,8 kg/s och flödet till de olika orterna beräknas beroende av befolkningsfördelningen i länet. På kartan, figur 4, kommer den mellanstora rörledningen in från öst och täcker därmed Falun och Borlänges behov.



Fig. 4 Dalarna läns knutpunkt är Borlänge som får hela länets förbrukning från Gävle. Falun får sitt behov från det mellanstora nätet, men de övriga tretton orterna får sin leverans från Borlänge genom det lilla nätet.

Orterna norr om Borlänge ligger på en lång rad och flödet norrut blir dyrt att förvätska därför kan pipeline motiveras utom på de sista delsträckorna mellan Mora–Älvdalen och Mora–Orsa där det blir billigast att köra vätgas i tryckkärl. Dessa orter förses genom ett flöde av endast 0,05 kg/s vardera. Vid så pass begränsat flöde blir alternativ till pipeline aktuellt. Figur 5 visar kostnader för olika distributionssätt beroende av transportsträcka.

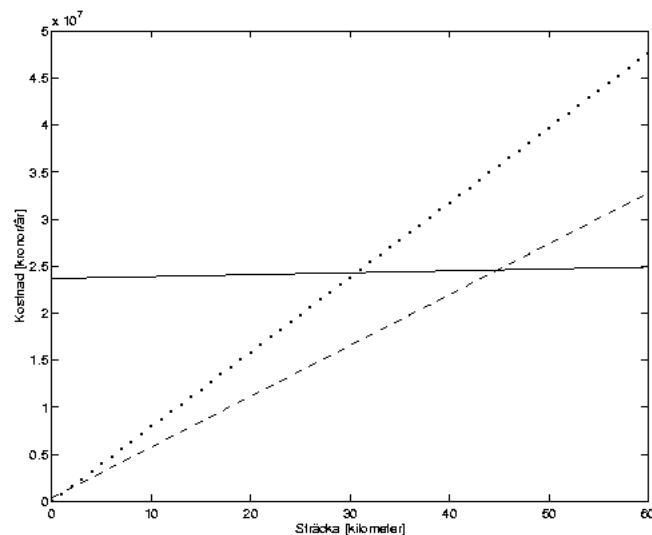


Fig. 5 Grafen visar kostnader för tre transportalternativ av ett vätgasflöde på 0,05 kg/s. Streckad linje representerar lastbilstransport av vätgas i tryckkärl, heldragen linje transport av flytande väte och prickad linje pipeline.

Vid det specifika exemplet då flödet är 0,05 kg/s gäller att på en begränsad sträcka av maximalt 1,5 kilometer är pipeline det mest kostnadseffektiva alternativet. För en sträcka av 1,5–45 km sker transporten

i tryckkärl per lastbil. Vid längre sträckor än 45 km, blir pipeline och lastbilstransport med komprimerad gas så dyrt jämfört med nedkylningskostnaden att flytande väte per tåg eller lastbil blir det mest fördelaktiga alternativet.

Västerut, från Borlänge, krävs ett flöde på 0,12 kg/s för att täcka Vansbro och Malungs behov. Det billigaste alternativet är att kyla ner vätgasen till flytande form och transportera den med lastbilar. Mot söder lönar sig pipeline av samma anledning som norrut. I tabell 3 redovisas distributionskostnaden för några sträckor inom länet. Den totala kostnaden för det lilla flödet med de 15 valda orterna blir 287 miljoner SEK/år, se Appendix 6.

Totalkostnad för sträckor i Dalarna					
	Avstånd	Flöde	Pipeline	Flytande väte på lastbil	Vätgas i tryckkärl på lastbil
	[km]	[kg/s]	[miljoner kr/år]	[miljoner kr/år]	[miljoner kr/år]
Hedemora - Avesta	10	0,15	9	61	17
Borlänge - Vansbro - Malung	140	0,12	126	56	158
Borlänge - Ludvika - Smedjebacken	182	0,25	87	105	241
Mora - Älvdalen	40	0,05	36	24	22
Mora - Orsa	16	0,05	15	23	9

Tabell 3. Tabellen visar distributionskostnaden för sex delsträckor inom Dalarna län. De fetmarkerade siffrorna visar det kostnadseffektivaste distributionsalternativet. För uppgifter om resterande delsträckor, se Appendix 6.

I Kronobergs län med avstånd mindre än 55 km och flöden mellan 0,16–0,50 kg/s blir pipeline det mest ekonomiska alternativet på alla delsträckor. I Norrbotten med längre avstånd och flöden på mellan 0,12–0,20 kg/s kommer det att på sträckan Boden–Gällivare–Kiruna bli mest lönsamt att kyla ner vätet till flytande form och transportera det med tåg.

3.5 Distributionskostnad per energimängd

Kostnaden för de olika distributionsalternativen per energimängd har beräknats och kostnaden för vätgasdistributionen i pipeline genom det stora och mellanstora flödet är 3,6 miljarder SEK/år. Utslaget per kWh blir denna kostnad 0,07 SEK/kWh.

I exemplet med 15 orter i Dalarna blir distributionskostnaden för det lilla flödet 0,14 SEK/kWh. I Kronobergs län blir totalkostnad för hela länet 220 miljoner SEK/år vilket ger distributionskostnaden 0,15 SEK/kWh. I Norrbotten blir totalkostnaden för hela länet också 220 miljoner SEK/år vilket ger distributionskostnaden 0,11 SEK/kWh.

Kostnadsexempel per energimängd för olika distributionsposter är sammanställda i tabell 4.

Distributionskostnad per levererad energimängd		
Utgiftspost	SEK / kWh	Förutsättning
Stora och mellanstora flödet i pipeline	0,07	
Förvätskning av vätgas	0,22	tretegsmetoden
Komprimering av vätgas	0,005	80 bar till 200 bar
Annuitiserad kostnad, förvätskningsanläggning	0,047	flöde = 0,05 kg/s
Annuitiserad kostnad, kompressoranläggning	0,002	flöde = 0,05 kg/s
Transport av komprimerad vätgas med lastbil	0,10	avstånd = 10 km
Transport av flytande väte med tåg	0,005	avstånd = 10 km

Tabell 4. Tabellen visar distributionskostnaden per energimängd på de olika posterna inom distributionsalternativen för det lilla flödet 0,05 kg/s. För totalkostnad skall distributionskostnaden för det stora och mellanstora flödet, 0,07 SEK/kWh, adderas.

Det väte som transporteras genom det lilla flödet får en kostsammare transmission i och med det lägre flödet. Då gasen behöver komprimeras åtgår en kostnad på 0,005 SEK/kWh och vid förvätskning 0,22 SEK/kWh. Dessutom tillkommer, vid ett flöde på 0,05 kg/s, en kostnad på 0,002 SEK/kWh för avbetalning på investeringen av kompressoranläggning och 0,047 SEK/kWh för avbetalning på investeringen av förvätskningsanläggning. Det är därmed mer kostsamt att förvätska än att komprimera vätgas. Däremot är det ekonomiska förhållandet det omvända vid transporten av komprimerad vätgas respektive flytande väte. På en sträcka av 10 km kostar transporten av komprimerad vätgas på lastbil 0,10 SEK/kWh och för flytande väte per tåg 0,005 SEK/kWh.

Exakta utslaget på hur lilla flödet påverkar hela distributionssystemets kostnad, och därmed den totala transmissionsavgiften per levererad kWh, går inte att uttala sig om eftersom omfattningen av det kostsamma lilla flödet inte rymms i denna rapport.

Det är emellertid tydligt att priset på leveransen av väte starkt påverkas av uttagets geografiska placering och dess anknnytning till andra flöden.

4 Slutsats och diskussion

För det svenska distributionsnätet av väte, från importen i Malmö och ut till Sveriges tankstationer, blir det kostnadseffektivast att distribuera det stora och mellanstora flödet med pipeline. Distributionskostnaden för att transportera väte i detta pipelinesystem blir 0,07 SEK/kWh vilket är lägre än nätpriset för el i dagsläget.

För det komplexa lilla nätet kan ändå generellt sägas att kombinationen av små flöden och långa sträckor gör att kostnaden för flytande väte på lastbil eller tåg blir lägre än för pipeline. För små flöden och korta sträckor är leveranser med gas i tryckkärl på lastbil eller tåg det billigaste. Exakta gränsvärden kan inte uppges eftersom båda parametrarna kan varieras men som riktlinje handlar små flöden om storleksordningen omkring 0.15 kg/s och mindre. De tre länen vi detaljstuderat gav distributionskostnaden 0,14 SEK/kWh i Dalarna, 0,15 SEK/kWh i Kronoberg och 0,11 SEK/kWh i Norrbotten län.

Denna slutsats, både distributionskostnaden och val av distributionsalternativ, baseras på det flöde som varje delsträcka får efter "the spanning tree"-metoden, se figur 3. Det vägnät som uppstår vid datoroptimeringen bygger på att vägsträckor inte får bildas mellan vissa städer, när det till exempel finns en sjö emellan. Det kan dock nämnas att exakt samma vägnät uppstår om alla vägkombinationer tillåts.

Slutsatsen bygger också på våra kostnadsuppskattningar. En annan situation kan uppkomma om olika parametrar ändras. Kostnaden för pipeline kan till exempel variera kraftigt mellan regionerna. Från mellansverige och uppåt förändras de geologiska egenskaperna vilket gör det nödvändigt att spränga för rörläggning i mycket större utsträckning jämfört med den referens vi använt. Det kan då vara av intresse att veta att även om investeringskostnaden för pipeline fördubblas påverkas inte avgörandet av distributionsalternativ för det stora och mellanstora flödet. Som exempel kan nämnas att förvätskning till flytande väte i Umeå inklusive lastbilsleverans mellan Umeå och Luleå kostar 793 miljoner SEK/år. För att på samma sträcka komma upp i denna årliga kostnad för pipeline, hamnar läggingskostnaden på 45 000 SEK/m.

En annan anledning till ökning av investeringskostnaden för pipeline kan uppstå genom materialval. Om rostfritt material används istället för de vanligare ferritiska alternativen blir materialkostnaden cirka tio gånger högre [28]. Detta ger en ökning av totalkostnaden med 36% för pipeline med våra uppskattningar. Underhållskostnaden för katodskydd mot korrosion blir dock reducerad.

Om kostnaden för pipeline skulle öka till den grad att det skulle bli ekonomiskt fördelaktigt med flytande väte leder detta till, genom att förvätskningsprocessen kräver cirka en tredjedel av energiinnehållet, att importen av vätgas måste öka. Det finns då anledning att ur energi- och resurssynpunkt överväga om väte är ett hållbart alternativ. Detta leder till att betänka hur gångbart ett sådant system som här behandlats egentligen är. Ett alternativ kan då vara framställning av etanol eller metanol ur till exempel biomassa för transportsektorns behov och istället använda vätgasen för att täcka elsektorns behov genom storskaliga elproduktionsanläggningar.

I arbetet antas att vätgas produceras utomlands och importeras till södra Sverige. En stor del av dagens vätgasproduktion görs genom ångreformerings av naturgas eller kolväten. Med denna metod släpps dock koldioxid ut i atmosfären om inte en koldioxidavskiljning tillämpas [19]. Det är möjligt och kanske mer önskvärt att det i framtiden finns svenska alternativ för vätgasproduktion. Vägas kan till exempel utvinna ur biomassa eller vid elektrolys av vatten med hjälp av vatten- eller vindkraft. Om den svenska vätgasproduktionen utvecklas kommer det att leda till ett större intresse för lokala produktionsanläggningar. Eventuellt kommer varje tankstation att tillverka sin egen vätgas. Det finns då inget behov av ett rikstäckande distributionsnät.

4.1 Lastbil eller tågtransport med väte

Kostnaden skiljer sig inte mycket när det gäller distribution av flytande väte på lastbil eller tåg. Lastbil är något billigare än tåg på kortare sträckor.

Om valet står mellan tåg eller lastbil är en aspekt vid lastbilsdistribution den ökade mängden av tunga transporter på vägnätet. En annan aspekt är att väte klassas som farligt gods och därför bör distribueras på järnväg. Som ett led i denna riktning kan nämnas SJ:s kampanj för att få leverera flygbränsle till Arlanda.

De dagliga 40 lastbilstransporter som idag går genom centrala Stockholm skulle SJ kunna ersätta med två direkttåg för att få en säkrare och miljövänligare distribution [20].

Vid aspekter på vätgas relaterat till miljö och säkerhet, se Appendix 7.

4.2 Forskning på vätedistribution

Att distribuera väte i nanofibrer är fortfarande på forskningsstadiet men kan få stor betydelse i framtiden. Väteatomerna packas tätt i nanofibrer av kol och forskarna tror att bilar kommer att kunna köra 500 mil på en full tank med 60 kg väte. De tror också när en storskalig produktion är igång att en biltank skulle kosta runt 60 kronor [21].

Det finns också en italiensk forskning om distribution av flytande väte i pipeline som kan bli av intresse i framtiden, eftersom energiinnehållet i flytande väte blir mycket större per volymenhet än i pipelinedistribution av väte i gasform, se Appendix 5. Dessutom hävdar forskarna att distributionsförlusterna endast skulle bli några promille [22].

4.3 Framtida uppgifter

Frågeställningar och beräkningar som inte ryms i detta arbete skulle kunna vara av intresse att studera närmare i framtida uppgifter.

4.3.1 Normverk och livscykelanalys

I dagsläget finns inget normverk för vätgasdistribution och därmed uppstår problem vid dimensioneringen av rörledningen samt val av material.

Det skulle även vara intressant med en jämförande livscykelanalys mellan pipeline- respektive lastbilsdistribution av väte. Detta skulle vara till hjälp vid en total energijämförelse då man inte bara tittar på hur mycket energi det går åt för att distribuera vätgasen utan också hur mycket energi det till exempel går åt för att tillverka lastbilen, rörmaterialet och att lägga rörledningarna. Liknande jämförelse kan göras ur resurs- och utsläppssynpunkt.

4.3.2 Jämförelse med eldistribution i högspänningsledningar

Det kan vara intressant att jämföra energiförlusterna i en högspänningsledning, eftersom både väte och el är energibärare och det är möjligt att omvandla energin mellan dem. Väte är dock lagringsbart vilket inte elenergi är [13].

Ett antagande kunde då vara att vätgasen omvandlas till el i Malmö, eller kommer som el från omvandling utomlands, och distribueras till de utvalda städerna där elen omvandlas tillbaka till vätgas igen. Varje omvandling kostar dock eftersom det är tekniska förluster i elektrolysen som producerar vätgas likaväl som i bränslecellsprocessen, alternativt förbränning i gasturbiner, som producerar el.

Det finns ändå en möjlighet att detta skulle kunna vara det kostnadseffektivaste alternativet, då denna kombination av energibärare visade sig vara det bästa alternativet i en studie för energidistribution från Nordafrika till Ruhrområdet i Tyskland [23].

4.3.3 Vätedistribution med båt

Möjligheter finns för distribution av väte med båt från Malmö till Sveriges kuststäder. Från varje kuststad skulle i så fall ett nytt distributionsnät konstrueras. Distributionsnätet som undersöks i denna rapport bygger på flödet genom varje utvald stad. Om båtleveranser skulle genomföras förändras inte bara distributionsnätet runt kuststaden utan även storleken på alla flöden genom de utvalda städerna. Att kompensera för alla omfördelningar och beräkna ett nytt distributionsnät på land för varje båttransport blir för komplext för att rymmas i denna rapport.

4.3.4 Kostnadsberäkning av det lilla distributionsnätet

En fullständig utvärdering av kostnaden för distributionen ända fram till tankstationerna har inte varit möjlig inom ramen för denna studie. Varje län består av ett unikt antal städer och distributionssträckor. I varje stad är tankstationerna dessutom olika utplacerade. I vissa städer ligger de på rad utefter en genomfartsled och i andra städer är de annorlunda placerade. När tankstationer ligger på rad kan uttag göras direkt från rörledningen inom staden men om de ligger utspridda måste en ny utvärdering göras av möjligheter för distributionen inom staden.

Referenser

- [1] J M Ogden *Developing an Infrastructure for Hydrogen Vehicles*, Princeton University, 1998
- [2] <http://www.scb.se/scbswe/borhtml/folk98sw.htm>, Statistiska centralbyrån, 990301
- [3] C H Papadimitriou, K Steiglitz *Combinatorial Optimization, Algorithms and Complexity*, Prentice-Hall inc, New Jersey, 1982
- [4] B Algers *Pumphandboken: svensk pumpmarknad*, Euro Contact Publ, Göteborg, 1979
- [5] J Vincent-Genod *Fundamentals of pipeline engineering*, Gulf Publishing Company, 1984
- [6] M Mohitpour, C L Pierce, R Hooper *The Design Engineering of Cross-Country Hydrogen Pipelines*, International Journal of Hydrogen Technology, Vol 110 s. 203-207, 1988
- [7] Arbetsdokument för Air Liquide, *H₂-pipeline, Pipe Material Specification* Patrick Matthey, Air Liquide, Yeochon Pipeline, doc nr A50017, Frankrike, 1999
- [8] M Mohitpour, C L Pierce, P Graham *Design Basis Developed for H₂-pipeline*, Oil and Gas Journal, Vol 88 nr 22 s. 83-94, 1990
- [9] C-J Winter, J Nitsch *Hydrogen as an Energy Carrier*, Springer Verlag, 1988
- [10] Normverk för naturgaspipeline, Vattenfall AB, 1999
- [11] Y Yürüm *Hydrogen Energy System*, Kluwer Academic Publishers, 1995
- [12] C J Österberg *Vätgas - en framtida energibärare*, Energiforskningsnämnden rapport nr 25, Stockholm, 1987
- [13] F Öney, T N Veziroglu, Z Dülger *Evaluation of Pipeline Transportation of Hydrogen and Natural Gas Mixtures*, International Journal of Hydrogen Technology, Vol 19 nr 10 s. 813-822, 1994
- [14] J M Ogden, E Dennis, J W Strohbehn *Hydrogen Energy Systems Studies*, Princeton University, 1995
- [15] <http://www.hyweb.de/Knowlegde/w-i-energie-eng2.html> HyWeb, 990518
- [16] O Gröndalen *Väte - Framtidens Energibärare*, Elforsk Rapport 98:19, 1998
- [17] Linde AG *Reports on Science and Technology*, Weisbaden, Tyskland, nr 54, 1994
- [18] M Specht, F Staiss, A Bandi, T Weimer *Comparison of the Renewable Transportation Fuels, Liquid Hydrogen and Methanol, with Gasoline - Energetic and Economic Aspects*, Stuttgart University, Published by International Association for Hydrogen Energy, vol. 23 nr 5 s. 387-396, 1998
- [19] M af Ekenstam, J Franzén, M Persson *Pre-combustion decarbonisation of fossil fuels in the electricity sector*, Göteborgs universitet, 1999
- [20] <http://www.sjgods.sj.se/farligt/pipeline.html>, Statens Järnvägar, 990516
- [21] N Andersson *NyTeknik*, <http://www.nyteknik.se/arkiv97/97-14/97-14-tank.html>, 990127
- [22] V Bulckaen *Energy Losses in the Transport in 4.000 km Pipelines of Liquid Hydrogen and Oxygen Derived from the Splitting of Water and of Liquid Methane*, International Journal of Hydrogen Technology, Vol 17 nr 8 s. 613-622, 1992
- [23] G Kaske, P Schmidt and K W Kanngiesser *Comparison Between High-Voltage Direct-Current Transmission and Hydrogen Transport*, Germany, Published by International Association for Hydrogen Energy, vol.16 nr 2 s. 105-114, 1991
- [24] <http://www.stem.se> Energimyndigheten i Eskilstuna, 990521

- [25] <http://www.spi.se/olje/oljelevlan.htm>, Svenska Petroleum Institutets, 990515
- [26] C Nordling, J Österman *Physics Handbook*, Studentlitteratur, 1996
- [27] H E B Andersson *Trafik och Miljö, forskare skriver om kunskapsläge och forskningsbehov*, Kommunikationsforskningsberedningen, Studentlitteratur, 1997

Personliga kommunikationer

- [28] Samtal med Anders Hellström, driftschef, Vattenfall Naturgas AB, 990414
- [29] Samtal med Andreas L Kegl, Operation engineer, Air Liquide Technische Gase GmbH, Marl, Tyskland, 990421
- [30] Samtal med Bror-Arne Gustafson, lektor på Termo- och fluiddynamik, Chalmers, 990427
- [31] Samtal med Michael Bracha, Linde Industrial Gases Division, Ingolstadt, Tyskland, 990505
- [32] Samtal med Ulf Lindholm, VD Transportkonsulten, Göteborg, 990506
- [33] Samtal med Jesper Hess, AGA Göteborgs distriktkontor, 990430
- [34] Samtal med Johan Modén, Statens Järnvägar
- [35] Samtal med Jan Karlsson, Process Engineer och Sven-Olof Boquist, Maintenance Engineer, Hydro Polymers AB, Stenungsund, 990415
- [36] Samtal med Wolfgang Weise, ansvarig för vätgasstationen i Hamburg, 990420
- [37] Samtal med Lars Bjerke, Flygfältsbyrå, Göteborg, 990503
- [38] Samtal med Per-Inge Holmström och Thomas Christensson, EKA Chemicals AB, Bohus, 990331
- [39] Samtal med Bertil Holmström, dept of Physical Chemistry, Chalmers, 990506
- [40] Samtal med Joakim Pettersson, Volvo Teknikpark, Chalmers, 990312
- [41] Samtal med Kjell Eriksson, Tibnor AB, Stockholm, 990519

Appendix 1

Utdrag ur rapporten "Energiförsörjningen i Sverige, Läget 1997, Prognos 1998-2000" 990301 [24].

Transportsektorn

Transportsektorn kan delas upp i fyra delsektorer: vägtrafik, luftfart, bantrafik, samt inrikes och utrikes sjöfart. Delsektoreernas andel av transportsektorns totala energianvändning uppgick år 1997 till respektive 72%, 10%, 2%, samt 16%.

Transportsektorns inrikes energianvändning, som huvudsakligen består av oljeprodukterna bensin, diesel och flygbränsle, väntas öka med sammanlagt 1,7% under perioden 1998-2000. Prognosen för transportsektorns energianvändning utgår från statistik över levererade bränslemängder.

Vägtrafiken utgörs huvudsakligen av privatbilism, kollektivtrafik och godstransporter med lastbil. Bränsleanvändningen inom vägtrafiken består därför främst av bensin och diesel. På senare år har även naturgas börjat användas för fordonsdrift, liksom etanol, rapsmetylester (RME) och biogas. Eftersom statistik över användningen av dessa s k alternativa drivmedel (d v s etanol, RME och biogas) saknas, redovisas endast användningen av naturgas. De alternativa drivmedlen utgör uppskattningsvis runt 0,1% av transportsektorns totala energianvändning. Utöver fordon som drivs med alternativa drivmedel finns det dessutom ett antal elbilar i drift inom olika försöksprojekt. Bensinanvändningen minskade i genomsnitt med 1,6% per år mellan 1995-1997. Den nedåtgående trenden bedöms fortsätta även under 1998 och 1999. Under år 2000 väntas dock bensinanvändningen öka igen. Anledningen till att bensinanvändningen har minskat under senare år är bl a att den privata konsumtionen har legat på en relativt låg nivå under hela 1990-talet. Dessutom har ett antal nya bussbolag introducerats på marknaden, vilka håller låga biljettpreiser på längre resor och därmed konkurrerar med såväl privatbilism som tågtrafik. En trend som kan få genomslag på användningen på längre sikt är den ökande andelen dieseldieselbilar i Sverige. Antalet dieseldieselbilar ökade i genomsnitt med 15% per år mellan 1995-1997, men utgör än så länge endast 3,5% av det totala antalet personbilar.

Dieselanvändningen har i genomsnitt ökat med närmare 3% per år mellan 1991-1997. Tillgänglig statistik tyder på att användningen under 1998 kommer att öka med 7,5%. Den uppåtgående trenden väntas fortsätta även under perioden 1999-2000, dock i betydligt långsammare takt jämfört med 1998. Dieselanvändningen styrs i hög grad av industriproduktionens utveckling, vilken bedöms växa långsammare mellan 1999-2000 jämfört med åren 1997 och 1998. Den ökande dieselanvändningen kan huvudsakligen förklaras av att lastbilens godstransportarbete har ökat från år till år sedan 1992.

Luftfartens bränsleanvändning utgörs av flyg- och jetbensin, samt motor- och flygfotogen, och går under beteckningen flygbränsle. Flygbränsleanvändningens framtida utveckling baseras på Luftfartsverkets prognos över det totala antalet landningar i Sverige, samt på förväntad utveckling av den privata konsumtionen. Flygbränsleanvändningens årliga tillväxt har varit relativt låg under hela 1990-talet. Användningen bedöms öka med runt 1% per år under perioden 1998-2000.

Bantrafikens elanvändning, vilken inkluderar tåg-, tunnelbane- och spårvägstrafik, har under 1990-talet legat mellan 2,4-2,5 TWh per år. Bantrafiken står inför flera förändringar de närmaste åren. Dels tas bland annat Arlandabanan och Öresundsbron i drift, dels avregleras marknaden för godstransporter på järnväg. Sammantaget bedöms dessa förändringar leda till att elanvändningen inom transportsektorn ökar något mellan 1998-2000.

Inom inrikes och utrikes sjöfart är det främst Eo1 och Eo2-5 (d v s tunn- respektive tjockolja) som används, samt i viss mån även diesel.

Slutlig energianvändning, transporter

		1997	Utv %	1998	Utv %	1999	Utv %	2000
Bensin	1000 m ³	5576	-2,3	5445	-0,5	5420	0,6	5450
Diesel	1000 m ³	2511	7,5	2700	2,2	2760	2,2	2820
Eo 1	1000 m ³	74	24,3	92	1,1	93	1,1	94
Eo 2-5	1000 m ³	33	18,2	39	-2,6	38	-2,6	37
Flygbränsle	1000 m ³	1066	0,4	1070	0,9	1080	1,4	1095
Naturgas	Milj m ³	7	0,0	7	10,0	8	5,2	8
El	GWh	2440	3,5	2525	0,6	2540	0,8	2560
Summa	TJ	314157	1,3	318 087	0,6	319 860	1,1	323 538
Summa	TWh	87,3	1,3	88,4	0,6	88,9	1,1	89,9
varav oljor	TJ	305 101	1,2	308 725	0,5	310 417	1,2	314 007
	TWh	84,8	1,2	85,8	0,5	86,2	1,2	87,2
	MToe	7,29	1,2	7,37	0,5	7,41	1,2	7,50

Koldioxidhalten

Koldioxidutsläpp är på väg uppåt igen. Sveriges riksdag har tagit beslut om Sveriges klimatpolitik enligt ett betänkande från jordbruksutskottet: "...utskottet ansluter sig till miljöministerns bedömning [i klimatpropositionen 1992/93:179] vad gäller mål och utformning av en nationell strategi. Koldioxidutsläppen från fossila utsläpp bör således i enlighet med klimatkonventionen stabiliseras år 2000 till 1990 års nivå för att därefter minska..." (1992/93 JoU 19.). Enligt SCB uppgick de totala koldioxidutsläppen år 1990 till drygt 59 miljoner ton. Om år 1990 varit ett normalt år i temperaturhänseende skulle utsläppen ha uppgått till 62 miljoner ton (Ds 1994:121).

I tabellen redovisas som jämförelse även SCB:s utsläppsuppgifter för år 1990.

Olika sektors totala koldioxidutsläpp, år 1990, 1997 och prognos för åren 1998-2000, miljoner ton

	1990	1990	1997	1998	1999	2000
	SCB					
Elproduktion	6,9	7,3	3,0	2,7	2,8	2,8
Värmeproduktion	5,1	5,2	5,5	5,5		
Industri, förbränning	13,7	12,3	12,3	12,2	12,3	12,6
Bostäder och service m m	9,4	11,5	10,0	9,7	9,8	9,7
Transporter	25,7	21,1	22,8	23,1	23,2	23,5
Summa	55,7	52,2	53,2	52,9	53,5	54,1
Industriprocesser	3,6	-	-	-		-
Totalt	59,3	-	-	-		-

Av tabellen framgår att SCB:s och Energimyndighetens utsläppsberäkningar skiljer sig åt. En del av skillnaden kan hänföras till att SCB räknar in utsläppen från utrikes sjöfart i transportsektorn, medan de däremot inte inkluderas i myndighetens beräkningar. Dessutom hänför SCB en större mängd dieselolja till transportsektorn. Exempelvis räknar SCB jord- och skogsbrukets användning av dieselolja i arbetsfordon till transportsektorn, medan den räknas till bostads- och servicesektorn i Energimyndighetens beräkningar.

Koldioxidutsläppen beräknas öka med 0,9 miljoner ton eller 1,7% under perioden 1997-2000. Jämfört med myndighetens beräkningar för år 1990 ökar utsläppen med sammanlagt 3,6% till år 2000. Under 1998 bedöms utsläppen från elproduktionen, industrisektorn, samt bostads- och servicesektorn att minska jämfört med år 1997. Utsläppen från värme- och transportsektorn ökar däremot något. Sammantaget bedöms utsläppen minska under 1998 jämfört med 1997. Under perioden 1999-2000 väntas utsläppen öka igen dels beroende på att medeltemperaturen antas vara normal, dels på antagandena om den ekonomiska utvecklingen.

Utsläppen från elproduktionen är jämförelsevis små, vilket beror på att endast en liten del av elproduktionen baseras på fossila bränslen. Enligt tabellen förväntas utsläppen från elproduktionen under 1998 minska jämfört med år 1997, vilket beror på att år 1998 var varmare än år 1997 och därmed minskar produktionen inom kraftvärmens. Utsläppen bedöms öka något under 1999, men sedan ligga kvar på samma nivå år 2000.

Utsläppsökningen mellan åren 1998-1999 kan i huvudsak förklaras av att åren 1999-2000 antas vara normala med avseende på temperaturen. Utsläppsberäkningarna baseras på antagandet om att behovet av ytterligare kraft kommer att täckas av importerad el. Eventuella utsläpp som uppkommer i det exporterande landet ingår därmed inte i dessa beräkningar.

Koldioxidutsläppen från värmeproduktionen kommer under perioden 1997-2000 att vara som störst under åren 1999-2000. Jämfört med år 1998 antas dessa år vara normala med avseende på temperaturen, d v s kallare än år 1998. Ökningen med 0,3 miljoner ton till 5,5 miljoner ton beror bl a på att oljeanvändningen inom värmeproduktionen ökar.

Industrisektorns utsläpp av koldioxid minskade något under 1998, men bedöms öka under åren 1999-2000 p g a att användningen av kol och olja ökar snabbare än användningen av biobränsle.

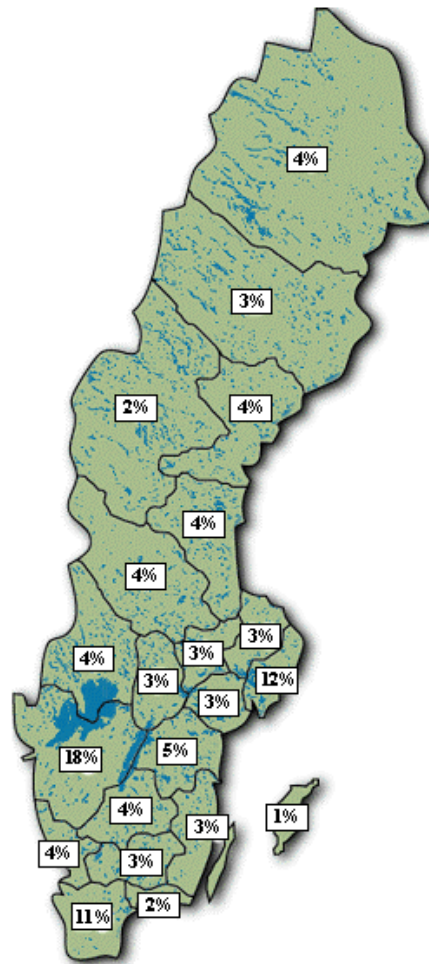
Beroende på att år 1998 var varmare än normalt minskade koldioxidutsläppen från bostads- och servicesektorn jämfört med föregående år. Användningen av kol och olja minskade under 1998 jämfört med år 1997, samtidigt som användning av fjärrvärme ökade relativt mycket. Detta är främsta anledningen till att utsläppen bedöms ligga på en förhållandevis oförändrad nivå mellan åren 1998-2000. Jämfört med år 1990 minskar dock utsläppen, vilket kan förklaras med att anslutningen till fjärrvärmenätet ökar.

När det gäller transportsektorn bedöms utsläppen öka med 0,7 miljoner ton, eller 3,1%, mellan åren 1997-2000. År 2000 väntas transportsektorn stå för 43,4% av de totala koldioxidutsläppen, vilket är en ökning med 0,7 miljoner ton jämfört med år 1997.

Appendix 2

Oljeleveranser 1997, länsvis fördelning [25]
Leveranser till slutliga förbrukare, 1000 m³

Län	Bensin	Diesel	Andel av Sveriges förbrukning
Stockholms län	856,2	295,7	12%
Uppsala län	181,7	72,3	3%
Södermanlands län	172,3	83,4	3%
Östergötlands län	256,9	149,4	5%
Jönköpings län	210,2	129,1	4%
Kronobergs län	129,1	92,5	3%
Kalmar län	160,2	105,3	3%
Gotlands län	44,2	27,0	1%
Blekinge län	101,8	55,4	2%
Skåne län	677,2	386,0	11%
Hallands län	190,2	139,9	4%
Västra Götaland	955,6	559,7	18%
Värmlands län	193,4	131,7	4%
Örebro län	168,3	98,7	3%
Västmanlands län	169,3	82,9	3%
Dalarnas län	208,3	126,4	4%
Gävleborgs län	198,0	128,1	4%
Västernorrlands län	187,6	131,2	4%
Jämtlands län	109,1	81,8	2%
Västerbottens län	161,8	135,5	3%
Norrbottens län	175,6	157,5	4%
Hela riket	5576,7	3231,6	100%



Procentuell fördelning av dagens diesel- och bensinförbrukning mellan Sveriges län.

Appendix 3

"The minimum spanning tree"-metoden [3]

Detta matlabprogram ger det kortaste möjliga avståndet från en delmängd av städer till en annan delmängd av städer. För varje ny vägdragnings som blir klar läggs den senast tillkomna staden över i den andra delmängden. Detta sammanbinder alla utvalda städer i ett nät över Sverige med den optimalt kortaste totala vägräckan.

De stora matriserna som matas in i början av programmet anger mellan vilka städer det är tekniskt möjligt att distribuera mellan (1 eller 0) och vägvärdständer mellan städerna i km. Städerna är skrivna i ordningen Malmö, Helsingborg, Karlskrona, Varberg, Växjö, Kalmar, Göteborg, Borås, Jönköping, Oskarshamn, Visby, Uddevalla, Mariestad, Linköping, Norrköping, Karlstad, Örebro, Eskilstuna, Stockholm, Västerås, Uppsala, Borlänge, Gävle, Sundsvall, Östersund, Umeå och Luleå.

```

bagar=[0 10000000000000000000000000000000;
10011000100000000000000000000000;
00000100000000000000000000000000;
01001011100000000000000000000000;
01010100110001000000000000000000;
00101000010000000000000000000000;
00010001000110000000000000000000;
00010010100110000000000000000000;
01011001010011000000000000000000;
00001100101001000000000000000000;
00000000010000000000000000000000;
00000011000010010000000000000000;
00000011100100001000000000000000;
000000000000000000011101101010100000;
00000000000000000001010110000000;
000000000000000001001011000000;
000000000000000000111011100000;
000000000000000000011011010000;
000000000000000000011011011000;
000000000000000000011011011000;
0000000000000000000111010000;
000000000000000000010101100000;
000000000000000001001011000000;
00000000000000000011101110000;
0000000000000000000110110000;
000000000000000000000110110;
000000000000000000000001000;
0000000000000000000000001001;
000000000000000000000000010];
avst=[0 64 208 206 200 284 280 295 282 329 0 372 413 414 456 539 490 565 621 583 669 667 718 962 1047 1254 1529;
64 0 219 154 186 277 227 242 237 314 0 313 368 367 408 484 446 524 580 541 627 625 700 920 998 1212 1487;
208 219 0 299 105 91 377 318 224 167 0 413 355 309 351 482 405 505 517 500 569 582 649 877 988 1169 1444;
206 154 299 0 180 311 78 91 174 305 0 166 241 305 347 333 355 438 513 448 482 530 599 828 860 1119 1394;
200 186 105 180 0 109 280 210 120 116 0 309 251 236 278 378 327 388 441 420 480 504 571 799 884 1091 1366;
284 277 91 311 109 0 378 324 216 76 0 405 347 236 265 466 354 390 413 482 530 564 795 931 1087 1362;
280 227 377 78 280 378 0 71 160 344 0 88 180 290 332 255 299 382 495 392 478 468 543 771 813 1063 1338;
295 242 318 91 210 324 71 0 91 274 0 118 153 219 258 274 258 340 423 350 443 439 504 737 835 1028 1312;
282 237 224 174 120 216 160 91 0 182 0 189 131 130 167 258 208 278 330 387 385 452 680 765 972 1247;
329 314 167 305 116 76 344 274 182 0 175 373 313 170 180 400 287 290 348 330 411 454 487 717 857 1011 1286;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 175 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
372 313 413 166 309 405 88 118 189 373 0 0 143 318 347 195 263 345 459 356 442 413 507 735 758 1027 1302;
413 368 355 241 251 347 180 153 131 313 0 143 0 183 211 127 118 201 317 214 295 266 365 592 695 884 1159;
414 367 309 305 236 236 290 219 130 170 0 318 183 0 39 230 117 150 208 189 260 296 342 573 695 865 1140;
456 408 351 347 278 265 332 258 167 180 0 347 211 39 0 231 118 110 165 150 218 266 300 531 667 823 1098;
539 484 482 333 378 466 255 274 258 400 0 195 127 230 231 0 119 200 310 210 296 218 333 547 563 840 1125;
490 446 405 355 327 354 299 258 208 287 0 263 118 117 118 119 0 82 198 95 176 179 244 473 587 764 1039;
565 524 505 438 388 390 382 340 278 290 0 345 201 150 110 200 82 0 110 44 117 172 195 422 558 720 1006;
621 580 517 513 441 430 495 423 339 348 0 459 317 208 165 310 198 110 0 115 72 222 183 414 572 714 989;
583 541 500 448 420 413 392 350 300 330 0 356 214 189 150 210 95 44 115 0 86 132 151 378 516 676 949;
669 627 569 482 480 483 478 443 387 411 0 442 295 260 218 296 176 117 72 86 0 159 111 349 500 642 917;
667 625 582 530 504 530 468 439 385 454 0 413 266 296 266 218 179 172 222 132 159 0 116 330 395 622 897;
718 700 649 599 571 564 543 504 452 487 0 507 365 342 300 333 244 195 183 151 111 116 0 236 390 531 803;
962 920 877 828 799 795 771 737 680 717 0 735 592 573 531 547 473 422 414 378 349 330 236 0 192 292 567;
1047 998 988 860 884 931 813 835 765 857 0 758 695 695 667 563 587 558 572 516 500 395 390 192 0 391 666;
1254 1212 1169 1119 1091 1087 1063 1028 972 1011 0 1027 884 865 823 840 764 720 714 676 642 622 531 292 391 0 275;
1529 1487 1444 1394 1366 1362 1338 1312 1247 1286 0 1302 1159 1140 1098 1125 1039 1006 989 949 917 897 803 567 666 275 0];
sa=27;
tree=bagar*0;
av=avst;
av=av+10000000*(avst==0);
con=1;
uncon=2*sa;
while size(uncon)~=0
themin = 100000000;
for i = con,
for j = uncon,
if bagar(i,j)==1
if themin>av(i,j)
themin=av(i,j);
kand=[i,j];
end

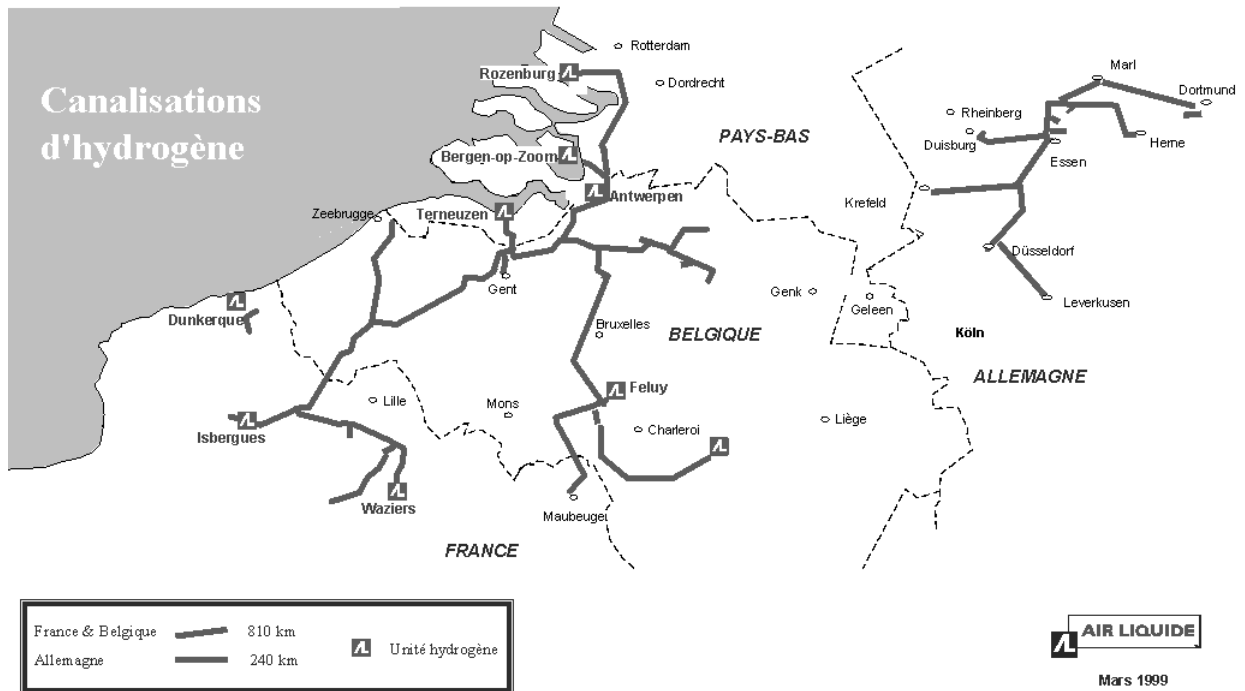
```

```

end
end
end
tree(kand(1),kand(2))=1;
con=[con kand(2)];
uncon=uncon(find(uncon =kand(2)));
end
span;
tree=tree+tree';
for i=1:sa,
for j=i+1:sa,
if tree(i,j)==1,
disp(sprintf('Bygg mellan stad %i och %i',i,j));
end;
end;
end;
Bygg mellan stad 1 och 2
Bygg mellan stad 2 och 4
Bygg mellan stad 3 och 6
Bygg mellan stad 4 och 7
Bygg mellan stad 5 och 6
Bygg mellan stad 5 och 9
Bygg mellan stad 6 och 10
Bygg mellan stad 7 och 8
Bygg mellan stad 7 och 12
Bygg mellan stad 8 och 9
Bygg mellan stad 9 och 14
Bygg mellan stad 10 och 11
Bygg mellan stad 13 och 17
Bygg mellan stad 14 och 15
Bygg mellan stad 15 och 18
Bygg mellan stad 16 och 17
Bygg mellan stad 17 och 18
Bygg mellan stad 18 och 20
Bygg mellan stad 19 och 21
Bygg mellan stad 20 och 21
Bygg mellan stad 21 och 23
Bygg mellan stad 22 och 23
Bygg mellan stad 23 och 24
Bygg mellan stad 24 och 25
Bygg mellan stad 24 och 26
Bygg mellan stad 26 och 27
end;

```

Appendix 4



Illustrationen visar befintligt vätgasdistributionsnät i Benelux- och Ruhrområdet.

Appendix 5

Godstjocklek och materialspecifikation för pipeline

Termomekaniskt behandlat olegerat kolstål av materialstandarden L415MB är det rörmaterial som används i naturgasledningen mellan Malmö och Göteborg och har bättre kvalitetskrav än det som används för Air Liquides vätgassystem i Beneluxländerna. Därav kan detta material motiveras som ett godtagbart referensmaterial. För att undvika försvagning av metallen bör materialet ha en homogen struktur och vara fri från ytdefekter. Materialet rekommenderas också undergå särskilda specifikationer angående dess kemiska sammansättning enligt,

(C+Mn/6)	≤	0,43%
S=P	≤	0,05%
Cr	≤	0,15%
Mo	≤	0,05%
Co	≤	0,05%
Ni	≤	0,30%
Cu	≤	0,20%

för applikationer gällande förhållanden där temperaturen är mellan -20°C och 100°C samt tryck ≥ 10 bar [28] [7].

Enligt normverk för EN-standarder och SÄIFS, (sprängämnesinspektionens föreskrifter), beräknas rör-godstjockleken med avseende på inre övertryck enligt formeln

$$T_{min} = \frac{dP D}{20 \sigma_p z}$$

där T_{min} (mm) är godstjockleken, dP är beräkningstrycket (N/mm^2), D är ytterdiameter (mm), z är svetsfaktorn och σ_p (N/mm^2) är ringspänningen som beror på sträckgränsvärdet R_{t05} (N/mm^2) och beräkningsfaktorn f_0 enligt $\sigma_p \leq f_0 \cdot R_{t05}$. För den geografiskt beroende beräkningsfaktorn $f_0=0,72$ gäller värdet för längre sträckor på landsbygd och i tätorter. Värdet på $R_{t05}=415$ gäller materialstandard för L415MB. Svetsfaktorn $z=1$. För minsta godtagbara nominell godstjocklek hänvisas vidare till normverket.

Egenskaper väte, metan, propan [26]

		H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Densitet (273 K)	kg/m ³	0,09	0,72	2,02
Viskositet	10 ⁻⁶ Ns/m ²	8,4	10,0	7,4
Smältpunkt	K	13,8	89	83
Kokpunkt	K	20,26	111,7	229
Energiinnehåll	kWh/kg	34,5	14,3	
Energiinnehåll	MJ/kg	124	50	

Fysikaliska data väte vid 1,013 bar [17]

Densitet flytande H ₂ (20,3 K)	kg/m ³	70,79
Densitet gas H ₂ (20,3 K)	kg/m ³	1,34
Densitet gas H ₂ (273 K)	kg/m ³	0,09
Energiinnehåll H ₂	kWh/kg	34,5
Energiinnehåll flytande H ₂	kWh/m ³	2442
Energiinnehåll gas H ₂	kWh/m ³	3,1

Appendix 6

PIPELINEKOMPRESSORER									
Sträckning	Rördim.	Tryckfall			Kompressoreffekt		Eldrift	Investeringskostnad	
	S / M / L	[bar]			[kW]		[miljoner kr/år]	[miljoner kr/år]	
		transport	uttag i region	förlust i gren	station 1	station 2		inköp	annuitetskostn.15 år
Umeå - Luleå	M	1.1	allt						
Sundsvall-Umeå	M	3.9	33.3		2000		11	14	1.3
Sundsvall-Östersund	M	0.2	allt						
Gävle-Sundsvall	S	11.7	21.6	28.1	3000	700	19	26	2.3
Gävle-Borlänge	M	0.5	allt						
Uppsala-Gävle	S	0.2	30.6	5.3	5600	300	31	33	3
Uppsala-Stockholm	S	2.8	allt		400		2.1	4.6	0.4
Västerås-Uppsala	S	0.5	33.5	53.7	9400	9800	100	85	7.8
Eskilstuna-Västerås	S	0.3	6.2		2700		14	17	1.6
Eskilstuna-Örebro	M	0.14	41.1	50	2300	800	16	23	2.1
Örebro-Karlstad	M	0.5	allt						
Örebro-Mariestad	M	0.03	allt						
Norrköping-Eskilstuna	S	1.1	17.2	15.7	8500	1500	53	50	4.6
Linköping-Norrköping	S	0.4	3.9		2400		13	16	1.5
Jönköping-Linköping	S	1.6	3.4		3000		16	19	1.7
Jönköping-Växjö	M	2.6	27.1		2300		12	16	1.4
Växjö-Kalmar	M	1.1	53.5	60.3	1700	1700	18	25	2.3
Kalmar-Karlskrona	M	0.1	allt						
Kalmar-Oskarshamn	M	0.05	22.9		500		2.6	5.3	0.4
Oskarshamn-Visby	M								
Borås-Jönköping	S	1.7	5.1	28.1	4200	3200	39	43	4
Göteborg-Borås	S	1.5	3.4		3700		19	22	2
Göteborg-Uddevalla	M	0.1	allt						
Varberg-Göteborg	S	2.3	11.9	71.9	11700	3300	79	69	6.3
Helsingborg-Varberg	S	5.1	3.4		8200		43	38	3.5
Malmö-Helsingborg	S	2.2	1.7		3900		20	23	2.1
						Summa:	507.7	528.9	48.3

Tabellen visar tryckfall och kostnader för att äga och driva erfoderliga kompressorstationer. Eftersom tryckfallet beror på en sträckas längd beräknas kompressorns effektivitet *efter* varje delsträcka men utför arbete på gasen i *nästa* delsträcka. De sträckor som når ändstationer har i tabellen därför ingen kompressorkostnad.

DISTRIBUTIONSKOSTNAD AV FLYTANDE VÄTE								
Sträckning	Uttag	Avstånd	Lastbilskostnad	Antal	Lastbilskostn.	Tågst.	Antal	Tågst.
	[kg/s]	[km]	[kr/lastbil]	[lastbilar/år]	[miljoner kr/år]	[kr/vagn]	[vagnar/år]	[miljoner kr/år]
Borlänge-Ludvika	0,17	84	3360	1729	5,81	4032	1729	6,97
Borlänge-Smedjebacken	0,08	98	3920	814	3,19	4704	814	3,83
Borlänge-Säter	0,07	10	400	712	0,28	1900	712	1,35
Borlänge-Hedemora	0,10	26	1040	1017	1,06	4940	1017	5,03
Borlänge-Avesta	0,15	36	1440	1526	2,20	6840	1526	10,44
Borlänge-Vansbro	0,05	95	3800	509	1,93	4560	509	2,32
Borlänge-Malung	0,07	140	5600	712	3,99	6720	712	4,79
Borlänge-Gagnef	0,07	26	1040	712	0,74	4940	712	3,52
Borlänge-Leksand	0,10	41	1640	1017	1,67	1968	1017	2,00
Borlänge-Rättvik	0,07	55	2200	712	1,57	2640	712	1,88
Borlänge-Mora	0,13	89	3560	1322	4,71	4272	1322	5,65
Borlänge-Älvdalen	0,05	129	5160	509	2,62	6192	509	3,15
Borlänge-Orsa	0,05	105	4200	509	2,14	5040	509	2,56
Mora-Älvdalen	0,05	40	1600	509	0,81	1920	509	0,98
Mora-Orsa	0,05	16	640	509	0,33	768	509	0,39
Hedemora-Avesta	0,15	10	400	1526	0,61	1900	1526	2,90

Tabellen visar hur tåg- och lastbilsdistributionskostnaderna har beräknats. Orternas behov antas förvätskas i Borlänge för distribution utefter en hel vägslinga. Varje enskild lastbil kör dock bara till en ort vilket innebär att antalet lastbilar respektive tågagnar beräknas för varje ort och distributionskostnaden för hela vägslingan sammanställs sedan i tabell ihop med förvätskningskostnaden på nästa sida. Några delsträckor i slutet av en vägslinga studeras separat eftersom det kan bli kostnadseffektivast att kombinera pipeline på det större flödet nära Borlänge med lastbil- eller tågleverans på det mindre flödet långt från Borlänge.

PIPELINE						
			Kostnader för sträckor i Dalarna			
Sträckning	Uttag	Avstånd	Investeringskostnad	Annuitisering (30 år)	Underhåll	Totalkostn./år
	[kg/s]	[km]	[miljarder kr]	[miljoner kr/år]	[miljoner kr/år]	[miljoner kr/år]
Borlänge-Ludvika	0,17	84	1,10	67,0	8,4	75
Ludvika-Smedjebacken	0,08	14	0,18	11,0	1,4	12
Borlänge-Säter	0,07	10	0,13	7,9	1,0	9
Säter-Hedemora	0,10	16	0,21	13,0	1,6	15
Hedemora-Avesta	0,15	10	0,13	7,9	1,0	9
Borlänge-Vansbro	0,05	95	1,20	75,0	9,5	85
Vansbro-Malung	0,07	45	0,59	36,0	4,5	41
Borlänge-Gagnef	0,07	26	0,34	21,0	2,6	24
Gagnef-Leksand	0,10	15	0,20	12,0	1,5	14
Leksand-Rättvik	0,07	14	0,18	11,0	1,4	12
Rättvik-Mora	0,13	34	0,44	27,0	3,4	30
Mora-Älvdalen	0,05	40	0,52	32,0	4,0	36
Mora-Orsa	0,05	16	0,21	13,0	1,6	15
Summa	1,16	419,00	5,43	333,80	41,9	(200) 376

Tabellen visar totalkostnaden för pipeline på delsträckorna i Dalarna. Det lilla flödet kräver inga kompressorer eftersom det transporteras genom självtryck. De fetmarkerade sträckorna adderas för totalkostnaden av lilla flödet i Dalarna län.

FÖRVÄTSKNING AV VÄTGAS OCH DISTRIBUTION AV FLYTANDE VÄTE							
Sträckning	Flöde	LH2 anläggning	Annuitisering (15 år)	Drift LH2	Tåg	Lastbil	Totalkostn./år
	[kg/s]	[miljoner kr]	[miljoner kr/år]	[miljoner kr/år]	[milj kr/år]	[milj kr/år]	[miljoner kr/år]
Borlänge-Ludvika-Smedjebacken	0,25	350,3	30,8	65,3	10,8	9,0	105
Borlänge-Säter-Hedemora-Avesta	0,32	416,3	36,6	83,6	16,8	3,5	124
Borlänge-Vansbro-Malung	0,12	209,5	18,4	31,3	7,1	5,9	56
Borl.-Gagnef-Leksand-Rättvik-Mora	0,47	544,9	47,9	122,7	13,0	8,7	179
Mora-Älvdalen	0,05	113,5	10,0	13,1	1,0	0,8	24
Mora-Orsa	0,05	113,5	10,0	13,1	0,4	0,3	23
Hedemora-Avesta	0,15	245,0	21,5	39,2	2,9	0,6	61

Tabellen visar förvätsknings- och distributionskostnader för hela vägslingor och för vissa delsträckor i Dalarna. Den fetmarkerade sträckan adderas för totalkostnaden av lilla flödet i Dalarna län.

KOMPRIMERING AV VÄTGAS OCH DISTRIBUTION AV TRYCKKÄRL							
Sträckning	Flöde	Komprimeringsanl.	Annuitisering (15 år)	Drift kompr.	Tåg	Lastbil	Totalkostn./år
	[kg/s]	[miljoner kr]	[miljoner kr/år]	[miljoner kr/år]	[milj kr/år]	[milj kr/år]	[miljoner kr/år]
Borlänge-Ludvika-Smedjebacken	0,25	6,43	0,56	1,4	286,2	238,5	240
Borlänge-Säter-Hedemora-Avesta	0,32	7,64	0,67	1,8	445,5	93,8	96
Borlänge-Vansbro-Malung	0,12	3,85	0,34	0,7	188,2	156,9	158
Borl.-Gagnef-Leksand-Rättvik-Mora	0,42	9,24	0,81	2,4	345,8	230,1	233
Mora-Älvdalen	0,05	2,08	0,18	0,3	25,9	21,6	22
Mora-Orsa	0,05	2,08	0,18	0,3	41,0	8,6	9
Hedemora-Avesta	0,15	4,50	0,40	0,8	76,8	16,2	17

Tabellen visar komprimerings- och distributionskostnader för hela vägslingor och vissa delsträckor i Dalarna. De fetmarkerade sträckorna adderas för totalkostnaden av lilla flödet i Dalarna län.

Appendix 7

Miljö

Effekterna av införandet av ett energisystem, delvis baserat på vätgas, beror på flera omständigheter. En omställning av energisystemet kan ske genom en mer eller mindre tidsödande reformation. Att uppskatta hur mycket en viss sänkning av utsläpp av växthusgaser påverkar halten växthusgaser i atmosfären beror på den globala utvecklingen och naturens egen, inte helt välkända, förmåga att återföra växthusgaserna till ett hållbart kretslopp.

Sveriges koldioxidutsläpp var 1997, 53 miljoner ton, varav transportsektorn stod för nästan hälften. Prognosen för år 2000 är en ökning till 54 miljoner ton, se Appendix 1. För att stabilisera koldioxidhalten i atmosfären på nuvarande nivå behöver utsläppen från fossila bränslen upphöra inom 100 år. Vi kan under denna hundraårsperiod ha ett genomsnittligt årligt utsläpp på ungefär 40% av dagens nivå [27].

Förutom koldioxid avger dagens förbränning av fossila bränslen i luft och hög temperatur oacceptabla mängder kväveoxider som är direkt relaterade till förorening.

Statliga styrmedel i form av räntefria lån och koldioxidskatter kan påskynda minskandet av fossila bränslen och därmed ge en bättre koldioxidbalans i miljön.

När det gäller växthuseffekten kan man ha synpunkter på att det vid användning av bränsleceller bildas vattenånga som, uppe i atmosfären, också är en växthusgas. Det kan då vara av intresse att veta att även om all energianvändning i världen skulle omsättas via väte och vattenånga så skulle det i dagsläget innebära endast 1/20 000 del av förångningen av vatten i världen, i det naturliga systemet [16].

Säkerhet vid hantering av väte

När det gäller hälsorisker med användning av väte är det framför allt läckage av flytande väte samt konsekvenser av brand och explosioner som bör beaktas.

Vätgas kännetecknas av att den är lättantändlig, lättflyktig och behöver en mycket liten tändenergi. Vätgas är explosivt tillsammans med syre i en blandning på mellan 4 och 74 volymprocent [35]. När man jämför väte med andra bränslen kan vissa data se mer riskabla ut som till exempel att tändenergin i luft endast är 0,02 mJ när bensingas och metan ligger på 0,24 respektive 0,29 mJ. En svag elektrostatisk urladdning innehåller emellertid minst 10 mJ energi och kan antända de flesta gaser [16].

En vätgasflamma har en nästan osynlig låga vilket gör den till en riskfaktor eftersom den är svår att upptäcka. Läckande flytande väte kan ge köldskador på både vävnader och metaller.

Det finns dock faktorer som gör att riskerna med väte är mindre än för alternativa bränslen. Väteflammans värmestrålning är låg jämfört med andra bränslens flammor. Gasen är inte toxisk och sprids snabbt, med en hastighet av 20 m/s, uppåt i luft. Utanför inneslutna volymer är det omöjligt att få till stånd någon detonation i luftblandning med en flamma eller gnista [16].

Åtgärder för att minimera riskerna är att vissa byggnadsdelar i vätgasproduktionen ska tåla detonation, regelbundna kontroller av rörsystem ska genomföras och att systemet alltid övervakas från kontrollrum. All utrustning som finns i närheten av vätgasen som till exempel personsökare, elkablar och armatur måste dessutom vara EX-klassad för att inte kunna ge ifrån sig gnistor [35].