

Hydrogen som energibærer

Energi- og utslippsregnskap for utvalgte energikjeder

En rapport utarbeidet for SFT og Enova SF

**Einar Jordanger, Steffen Møller-Holst,
Ola Maurstad, Dag A. Brevik**

Oktober 2002

www.energy.sintef.no

**SINTEF****SINTEF Energiforskning AS**

Postadresse: 7465 Trondheim
Resepsjon: Sem Sælands vei 11
Telefon: 73 59 72 00
Telefaks: 73 59 72 50

www.energy.sintef.no

Foretaksregisteret:
NO 939 350 675 MVA

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

Hydrogen som energibærer

Energi- og utslippsregnskap for utvalgte energikjeder

SAKSBEARBEIDER(E)

Einar Jordanger

Steffen Møller-Holst

Dag A. Brevik

Ola Maurstad

OPPDRAGSGIVER(E)

Enova SF og SFT

TR NR.	DATO	OPPDRAGSGIVER(E)S REF.	PROSJEKTNR.
TR A5713	2002-10-29	Magnar Førde og Terje Kronen	12X253
ELEKTRONISK ARKIVKODE		PROSJEKTANSVARLIG (NAVN, SIGN.)	GRADERING
		Mona Mølnvik	Åpen
ISBN NR.	RAPPORTTYPE	FORSKNINGSSJEF (NAVN, SIGN.)	OPPLAG SIDER
82-594-2373-1	-	Petter Støa	10 96
AVDELING	BESØKSADRESSE	LOKAL TELEFAKS	
Energisystemer	Sem Sælands vei 11	73 59 72 50	

RESULTAT (sammendrag)

Hydrogen blir av mange sett på som en sentral energibærer i det framtidige energisystemet. Hydrogen gir ingen utslipp hos sluttbruker. Hydrogen kan framstilles fra ulike kilder, og anvendes til ulike formål både stasjonært og innen samferdsel. Sentrale miljøer har ulik oppfatning om energieffektiviteten og miljøgevinsten ved å ta i bruk hydrogen. Denne uenigheten kan skyldes at konsekvensene gjennom alle ledd i energikjedene ikke er tilstrekkelig belyst. Det er også uenighet om når og hvor man bør introdusere hydrogen i energisystemet.

Målet med denne studien var å framskaffe et energi- og utslippsregnskap for hydrogen i noen utvalgte energikjeder, og sammenligne disse med alternative kjeder. Resultatene fra studien kan bidra til å hjelpe myndighetene i deres arbeid for å tilstrebe en fornuftig virkemiddelbruk med hensyn på innføring av hydrogen i det norske energisystemet.

Selv om energieffektivitet og utslipp er to av de viktigste faktorene som må vurderes når ulike energikjeder sammenlignes, må det presiseres at andre viktige aspekter som f.eks. kostnader, andre miljøkonsekvenser, tilgjengelighet av aktuell energikilde og personsikkerhet ikke er behandlet.

Resultatene viser at energieffektivitet og utslipp varierer betydelig for ulike energikjeder, avhengig av hvilken energikilde som velges. Dessuten påvirkes energieffektivitet og utslipp også av hvor i energikjeden konverteringen foregår. Sentral kontra lokal konvertering til hydrogen avgjør i første rekke hvor realistisk CO₂-håndtering er (kostnader), og hvor mye av den utnyttbare varmen som kan nyttiggjøres.

For stasjonært forbruk viser det seg at energikjedene med hydrogen gir lavere energieffektivitet i forhold til de referansekjedene som bør brukes som sammenligningsgrunnlag (samme energikilde). For utslippene er det mer avgjørende hvilken energikilde og konverteringsteknologi som velges enn om hydrogen er med i kjeden.

For samferdsel har hydrogen som energibærer den fordel at utslippene er null og dermed ikke gir lokal luftforurensning. Denne fordelen må ses i sammenheng med energieffektiviteten og eventuelle utslipp tidligere i energikjeden. For flere av hydrogenkjedene er energieffektiviteten høyere enn for sammenlignbare kjeder, og ved produksjon av hydrogen fra fornybar energi eller naturgass med CO₂-håndtering er utslippene null eller lave.

STIKKORD

EGENVALGTE	Hydrogen	Energikjeder
	Energieffektivitet	Utslippsregnskap

SAMMENDRAG

Introduksjon

Hydrogen blir av mange sett på som en sentral energibærer i det framtidige energisystemet i Norge. Hydrogen gir ingen utslipp hos sluttbruker. Hydrogen kan framstilles fra ulike kilder, og anvendes til ulike formål både stasjonært og innen samferdsel. Sentrale miljøer har ulik oppfatning om energieffektiviteten og miljøgevinsten ved å ta i bruk hydrogen. Denne uenigheten kan skyldes at konsekvensene av alle ledd i en energikjede ikke er tilstrekkelig belyst. Det er også uenighet om når og hvor man bør introdusere hydrogen i energisystemet.

Målsetting

Målet med denne studien var å framskaffe et energi- og utslippsregnskap (for NO_x og CO₂) for hydrogen i noen utvalgte energikjeder som kan bidra til å hjelpe myndighetene i deres arbeid for å tilstrebe en fornuftig virkemiddelbruk med hensyn på innføring av hydrogen i det norske energisystemet.

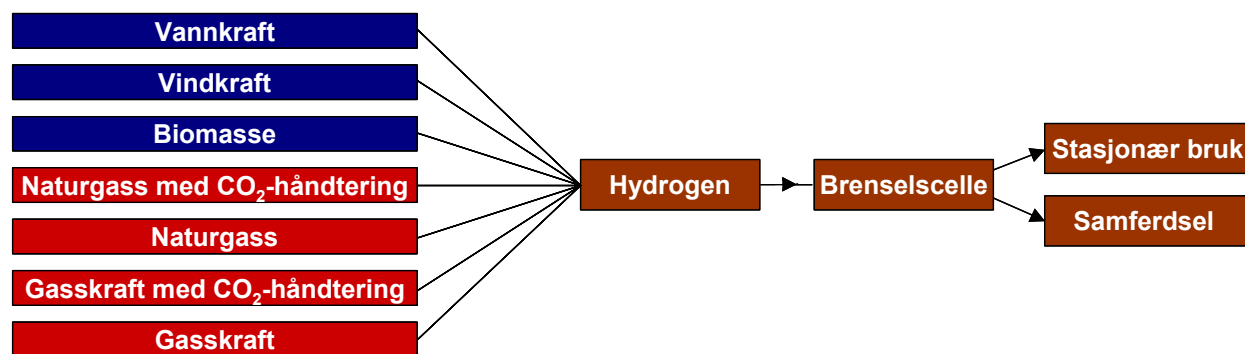
Energikjeder

Alle ledd i energikjeden fra kilde til sluttbruk tas med i energi- og utslippsregnskapet:

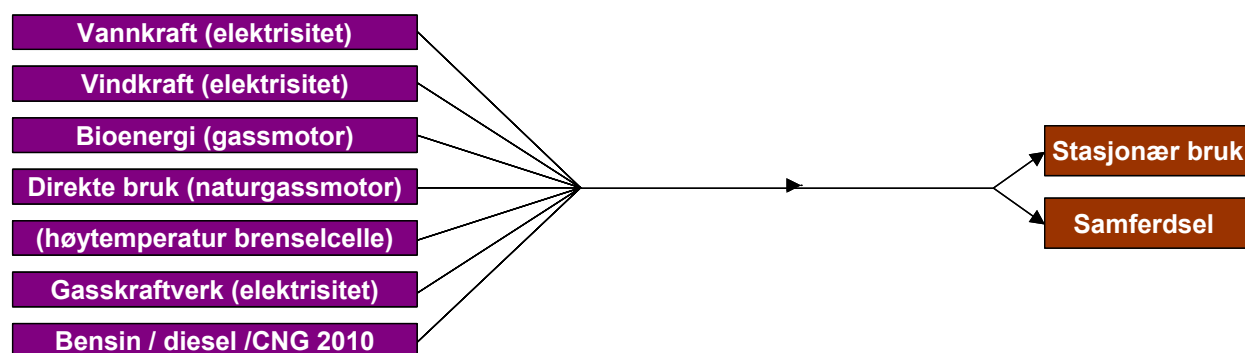
- Kilde
- Lagring/transport av kilden
- Konvertering til energibærer
- Lagring/transport av energibæreren
- Sluttbruk

Alle energikjeder starter med en kilde og avsluttes med sluttbruk, mens de tre andre elementene i kjeden kan opptre eventuelt flere ganger og i ulik rekkefølge. Det er tatt utgangspunkt i norske forhold, de valgte energikilder og sluttbruk er aktuelle i Norge. Energi brukes til mekanisk arbeid, lys eller nyttbar varme. I dette prosjektet er både stasjonær bruk av energi og energibruk i transportsektoren vurdert.

Alle energikjeder som inneholder hydrogen et sted i kjeden sammenlignes med minst en referanse-energi- og utslippsregnskap basert på tradisjonell energibærer, se figuren på neste side.



Referansekjeder:



Oversikt over energikjeder

Hydrogen som energibærer

Hydrogen (H) finnes i store mengder bundet til oksygen og/eller karbon, i hhv vann og ulike hydrokarboner. Hydrogen i fri gassform (H_2) reagerer når det kommer i kontakt med oksygen og danner vann (H_2O). Dette er grunnen til at hydrogen ikke finnes i fri form, og derfor må ren hydrogen holdes atskilt fra oksygen under lagring og transport.

Hydrogengass har svært spesielle egenskaper. Den volumetriske energitettheten (kWh/m^3) er svært lav, selv ved høye trykk, mens energiinnholdet per vektenhet for hydrogen er ca 3 ganger høyere enn i bensin og diesel. Hydrogenmolekylet er svært lite og diffunderer derfor lett gjennom andre materialer. En stor utfordring er derfor knyttet til lagring og transport av hydrogen.

I denne rapporten er det valgt å se på hydrogen produsert enten ved å spalte vann vha elektrisitet (elektrolyse), eller ved å varme opp hydrokarboner sammen med vann(damp) og eventuelt luft eller oksygen (reforming).

I sluttbrukleddet brukes hydrogen som føde i brenselceller, der energien i drivstoffet effektivt konverteres til elektrisitet med varme som biprodukt. Avfallsproduktet er rent vann. Høy renhet på hydrogenet er vanligvis påkrevd for å unngå skade på brenselcellen (reduert ytelse eller forkortet levetid).

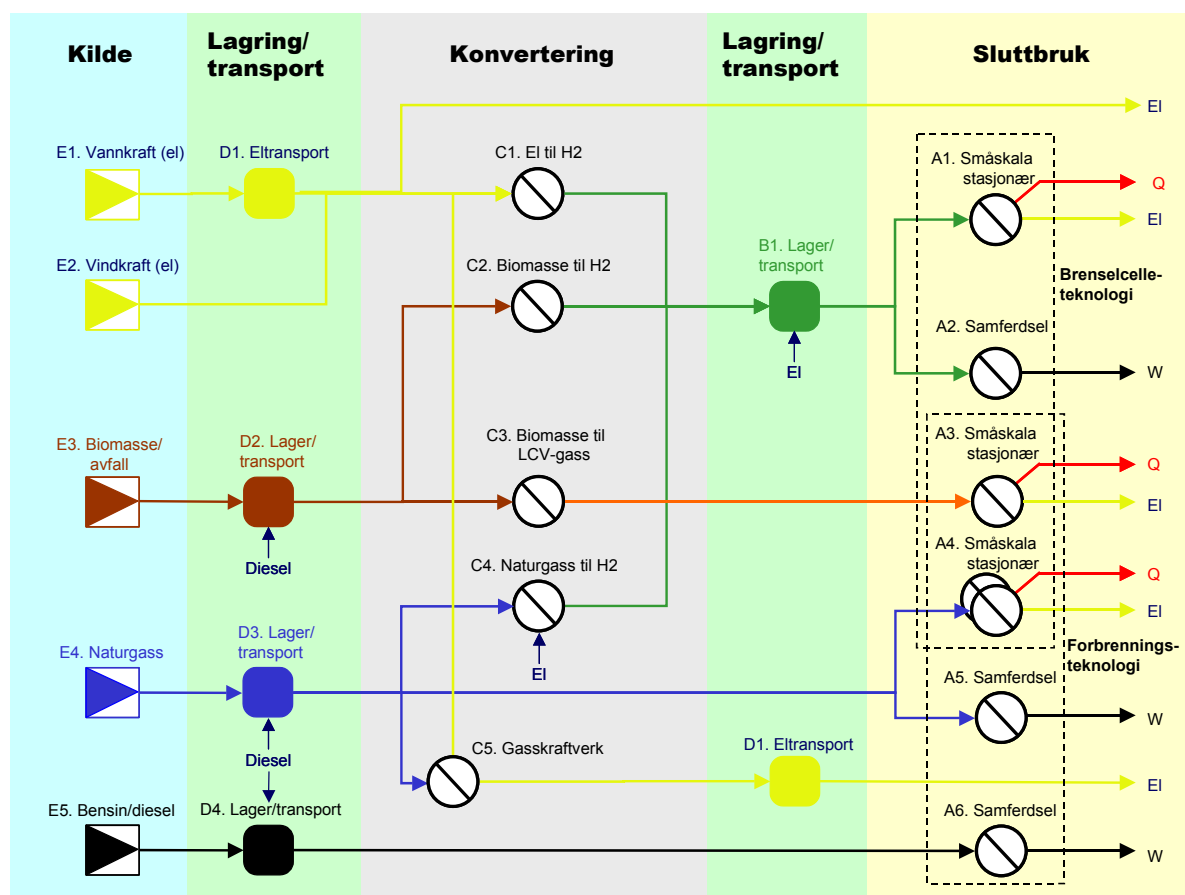
Andre energikilder/-bærere

I denne studien har vi tatt utgangspunkt i tilgang på energi i form av elektrisitet fra hhv vannkraft og vindkraft, biomasse og naturgass. Disse energikildene og -bærerne brukes på ulike måter, enten som energitilskudd i en konverteringsprosess (elektrisitet til elektrolyse av vann for å produsere hydrogen), som en energibærer der hensikten først og fremst er transport eller distribusjon av energi (f eks elektrisitet eller naturgass) eller direkte til sluttbruk (f eks elektrisitet og naturgass). Referansedrivstoffene for våre hydrogenkjeder innenfor samferdselssektoren er bensin, diesel og naturgass for personbil og diesel og naturgass for ferge drift-eksempelet.

Metodikk og forutsetninger

Energiflyten for en kjede kan forstås som et regnskap der man bokfører all energi som går inn i kjeden fra kilden, energi som tilføres underveis i kjeden (f eks elektrisitet og diesel) og all nyttig energi i form av el, arbeid og varme. Når energiflyten er kjent kan kjedevirkningsgraden beregnes. En kjedevirkningsgrad forstås som summen av nyttig energi dividert med total input av energi til kjeden. Utslippene for en kjede er de samlede utslippene fra alle komponentene i kjeden.

Figuren nedenfor viser kjedene som er vurdert i denne studien.



Forbehold

Selv om energieffektivitet og utslipp er to av de viktigste faktorene som må vurderes når ulike energikjeder sammenlignes, må det presiseres at andre viktige aspekter som f.eks. kostnader, andre miljøkonsekvenser, tilgjengelighet av aktuell energikilde og personsikkerhet ikke er behandlet. Resultatene kan altså kun brukes når man sammenligner energikjeder og samtidig fokuserer på disse to faktorene. Direkte sammenligning av energieffektivitet for kjeder basert på ulike energikilder uten å ta hensyn til tilgjengelighet av kilden og dens karakter kan også føre galt avsted.

Resultatene kan altså ikke brukes til å hevde at en energikjede er bedre enn en annen, uten å måtte vurdere andre faktorer som nevnt ovenfor. Tidsperspektivet for denne studien har vært rundt 2010, på lengre sikt vil teknologiutvikling endre utslipps- og energibildet. Dessuten kan en energikjede som kommer ugunstig ut i resultatene som presenteres nedenfor, være den optimale kjeden i andre sammenhenger der lokale forhold og spesielle forutsetninger avviker fra de som er lagt til grunn her.

Resultater

I hovedtrekk viser studien at

- Energieffektivitet og utslipp varierer betydelig for ulike energikjeder, avhengig av hvilken energikilde som velges.
- Energieffektivitet og utslipp påvirkes også av hvor i energikjeden konverteringen foregår.
- Sentral kontra lokal konvertering til hydrogen avgjør i første rekke hvor realistisk CO₂-håndtering er (kostnader), og hvor mye av den utnyttbare varmen som kan nyttiggjøres.
- For stasjonært forbruk viser det seg at energikjedene med hydrogen gir lavere energieffektivitet i forhold til de referansekjedene som bør brukes som sammenligningsgrunnlag (samme energikilde), og for utslippene er det mer avgjørende hvilken energikilde og konverteringsteknologi som velges enn om hydrogen er med i kjeden.
- For samferdsel har hydrogen som energibærer den fordel at utslippene er null og dermed ikke gir lokal luftforurensning. Denne fordel må ses i sammenheng med energieffektiviteten og eventuelle utslipp tidligere i energikjeden. For flere av hydrogenkjedene er energieffektiviteten høyere enn for sammenlignbare kjeder, og ved produksjon av hydrogen fra fornybar energi eller naturgass med CO₂-håndtering er utslippene null eller lave.

Mer detaljert presenteres resultatene for energikjeder for stasjonært forbruk:

Elektrisitet fra vannkraft eller vindkraft (elektrolyse)

- Produksjon av hydrogen ved elektrolyse der elektrisiteten kommer fra vannkraft eller vindkraft gir null utslipp hvis konverteringen til hydrogen foregår lokalt, og kun et svært lite utslipp ved sentral elektrolyse ettersom kun transport av hydrogen (f.eks. med vogntog) til sluttbruker gir et lite bidrag.

- Produksjon av elektrisitet (og varme) vha hydrogen produsert ved elektrolyse er ineffektivt. Med andre ord: har man elektrisitet tilgjengelig, og trenger el og varme lokalt, går mye tapt hvis man går veien om hydrogen. Døgn og/eller sesongvariasjoner på tilgang av elektrisitet (f eks fra vindmøller) kan eventuelt forsvare introduksjon av hydrogen, men da primært som et egnet, miljøvennlig lagringsmedium.
- Elektrolyse vil føre til økt forbruk av elektrisitet som i dagens situasjon er en knapphetsressurs

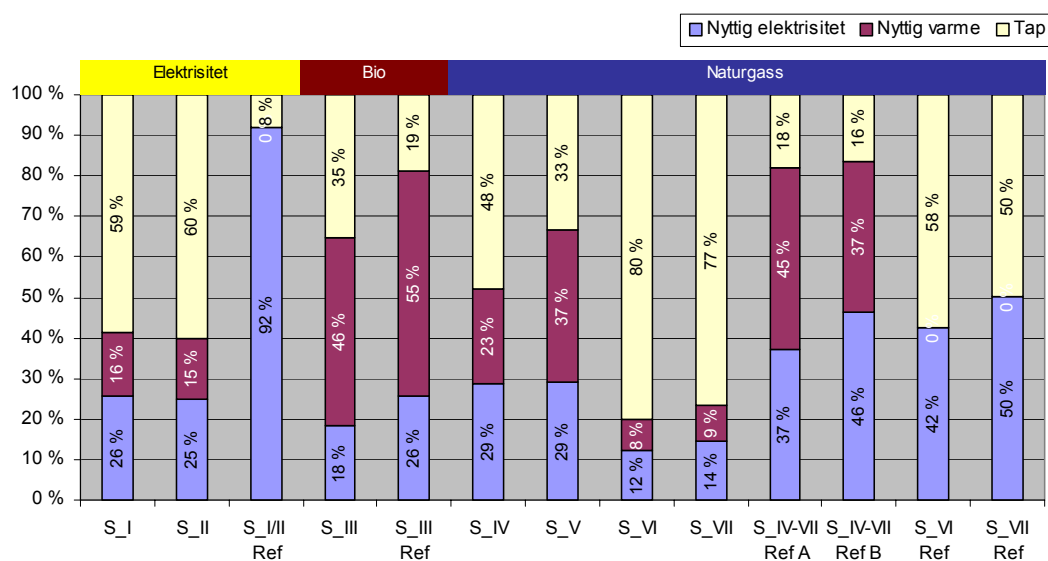
Biomasse

- Med utgangspunkt i biomasse er det mer energieffektivt å utnytte LCV-gassen direkte i gassmotor enn å rense gassen for å skille ut ren hydrogen som kan brukes i brenselceller (PEMFC).
- Da biomasse anses som en fornybar ressurs vil alle kjeder basert på biomasse være CO₂-nøytrale. Utslipp av NO_x ved forbrenning av LCV-gass i gassmotor er imidlertid betydelig.

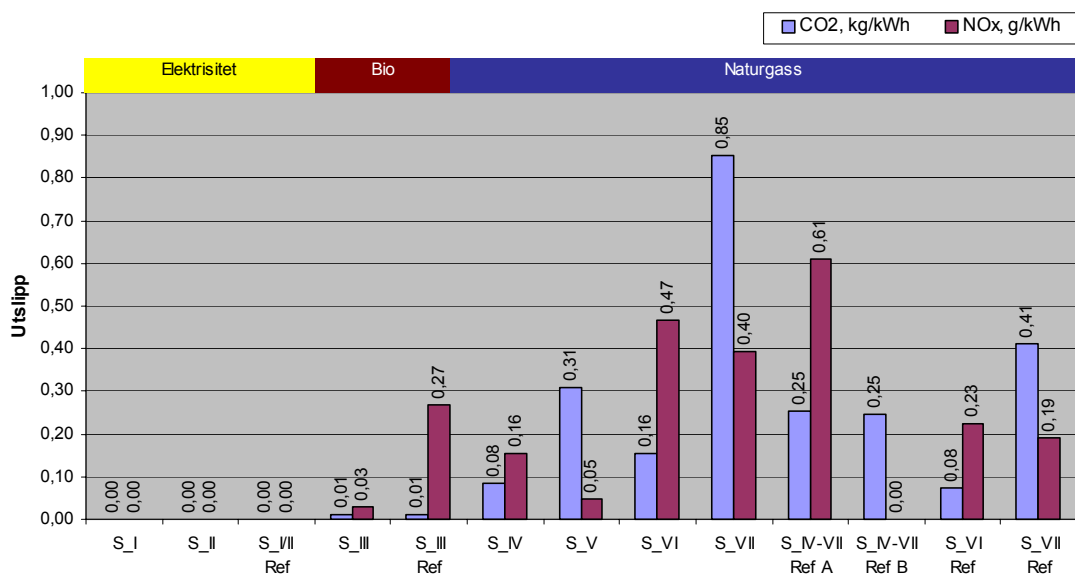
Naturgass

- Naturgass gir høyest energieffektivitet for stasjonære applikasjoner når den utnyttes i høytemperatur brenselcelle eller i gassmotor.
- Gassmotorer gir generelt høye NO_x-utslipp, mens både gassmotorer og høytemperatur brenselcelle gir normale CO₂-utslipp.
- Studien inkluderer ikke kogenereringsanlegg med gassturbin som ville gitt omtrent samme effektivitet som, og lavere NO_x-utslipp enn gassmotor.
- Hydrogenproduksjon fra naturgass (reforming) gir brukbar energieffektivitet, forutsatt at varmen kan utnyttes, og lave utslipp forutsatt at reformeringen foregår i store, sentrale anlegg.
- Lokal reformering uten CO₂-innfanging gir enklere distribusjon av hydrogen og er mer realistisk mht å utnytte varmen, men gir altså høyere utslipp.
- Hvis hovedhensikten er mest mulig elkraftproduksjon vil gasskraftverk gi høyest utbytte.

Figurene på neste side viser hhv energieffektivitet og utslipp for energikjedene som er analysert for stasjonært forbruk, i grafisk form.



Energieffektivitet for energikjeder for stasjonært forbruk.



Utslipp for energikjeder for stasjonært forbruk.

Forklaring av kodene i figurene:

S_I	H ₂ fra vannkraft	S_IV	Reformering (sentralt) m/ CO ₂ -håndtering
S_II	H ₂ fra vindkraft	S_V	LNG-reformering lokalt
S_III Ref	El fra vannkraft	S_VI	Elektrolyse med el fra GK, CO ₂ -håndtering
		S_VII	Elektrolyse med el fra GK (gasskraftverk)
S_III	H ₂ fra biomasse	S_IV-VII Ref A	Naturgassmotor
S_III Ref	Gassmotor (LCV)	S_IV-VII Ref B	SOFC brenselcelle
		S_VI Ref	El fra Gasskraftverk (GK), CO ₂ -håndtering
		S_VII Ref	El fra Gasskraftverk (GK)

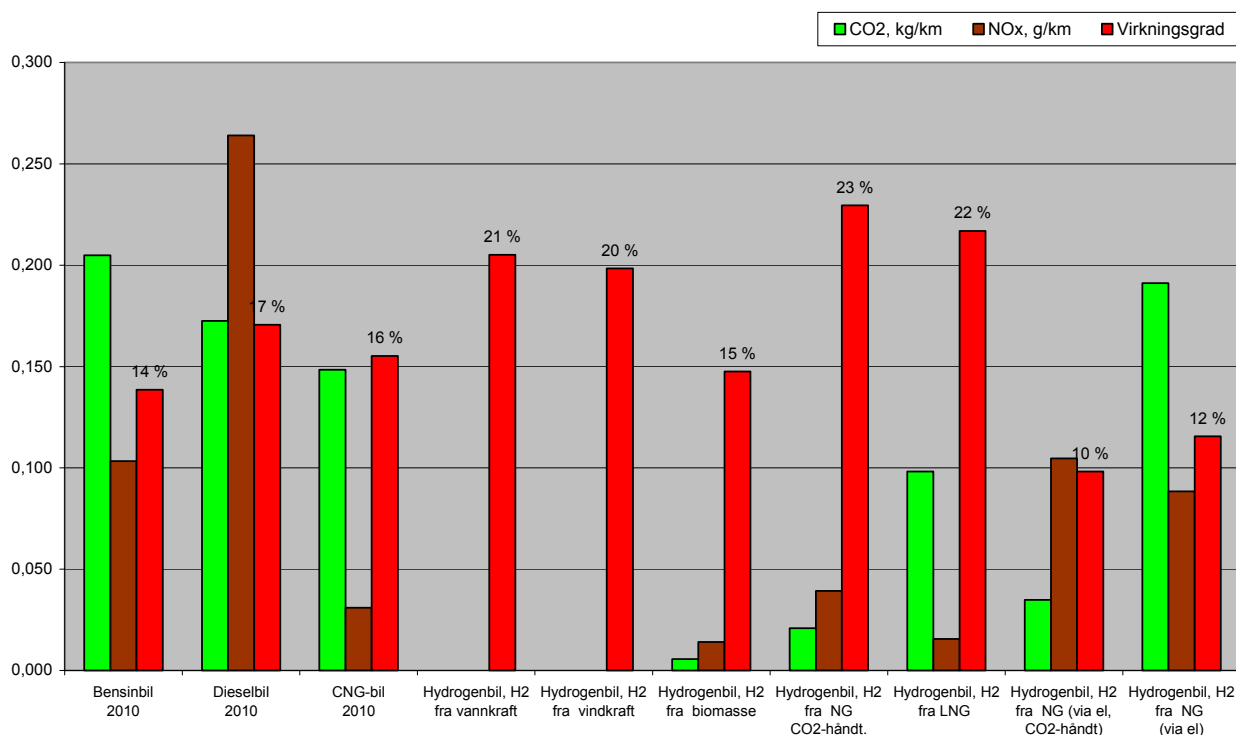
Mer detaljerte resultater for energikjeder for samferdselsformål (personbil):

Hydrogendrevne brenselcellebiler er et interessant alternativ til dagens konvensjonelle teknologi. Prototyper finnes, men det vil enda gå noen år før de lanseres for det åpne markedet.

Sammenligningen med bensin-, diesel- og naturgassdrevne biler er derfor gjort basert på de ytelser som er ventet i år 2010. Kjøretøyer med svært varierende driftssyklus egner seg spesielt godt for brenselcelleteknologi ettersom denne har spesielt gunstig virkningsgrad ved lav belastning. Det kan derfor antas at busser med brenselceller beregnet for bykjøring også vil oppnå fordeler som resultatene for personbil med blandet by- og landeveiskjøring viser.

For tyngre kjøretøy beregnet for langtransport har det ikke vært mulig å skaffe underlagsdata som trengs for kjedeberegninger. Pga høy og jevn ytelse vil de store fordelene som oppnås pga mer variert driftssyklus ikke gjelde for denne type kjøretøyer.

Her er energieffektivitet og utslipp presentert i samme figur:



Energieffektivitet og utslipp for energikjeder for samferdsel.

- Resultatene viser at hydrogendrevne personbiler med brenselcelleteknologi gir den høyeste effektiviteten (>20 %) hvis hydrogen er produsert ved vannelektrolyse (elektrisitet fra vann- eller vindkraft) eller reformering (naturgass).
- Totalt sett er brenselcellebiler drevet på hydrogen fra fornybar elektrisitet den beste løsningen. Elektrisitet er imidlertid en knapphetsressurs.

- Hydrogenproduksjon fra gasskraft uten CO₂-håndtering gir om lag like store CO₂-utslipp som en forventet utvikling av bensin- og dieserbiler, mens reformering av naturgass uten CO₂-håndtering vil redusere utslippene om lag 40 %.
- Hydrogen produsert ved elektrolyse der elektrisiteten er generert ved gasskraftverk gir lav virkningsgrad (12 %) og ingen gevinst i CO₂-utslipp sammenliknet med bensin og dieserbiler.
- Hydrogen produsert fra biomasse har en virkningsgrad i samme størrelsesorden som konvensjonell teknologi. Biomasse er pr definisjon CO₂ nøytral, men et lite utslipp kan tilskrives nødvendig transport.
- En brenselcellebil vil ikke slippe ut NO_x, men produksjon av hydrogen og nødvendig transport gjør likevel at flere av hydrogenkjedene har NO_x utslipp i samme størrelsesorden som en naturgassbil (CNG). Det vil likevel være en betydelig reduksjon sammenlignet med diesel og bensin. Hvis hydrogenet kommer fra elektrolyse basert på gasskraft vil NO_x utslippet være som for bensin, men lavere enn for diesel.
- En hydrogenbil bidrar ikke til lokal luftforurensning. I områder med lokal luftforurensning vil bruk av hydrogen gi en betydelig miljøgevinst. Men reduksjonen i lokal luftforurensning må ses i sammenheng med utslipp av CO₂ og NO_x tidligere i energikjeden.

Se **Error! Reference source not found.** for resultatene for fergedrift-eksempelet som ble tatt med rett før ferdigstillelsen av denne rapporten.

INNHALDSFORTEGNELSE

	Side
1 INNLEDNING.....	13
1.1 Prosjektets motivasjon og målsetting.....	13
1.2 Kort om prosjektet og publisering av resultater.....	13
1.3 Om energikjeder og studiens omfang.....	13
1.4 Valg av teknologi.....	15
1.5 Om rapporten.....	16
2 HYDROGEN SOM ENERGIBÆRER.....	18
2.1 Produksjon av hydrogen.....	18
2.1.1 Hydrogen fra vann vha elektrolyse.....	18
2.1.2 Hydrogen fra hydrokarboner (biomasse og naturgass).....	19
2.2 Lagring og transport av hydrogen.....	20
2.2.1 Komprimert hydrogen.....	20
2.2.2 Flytende hydrogen.....	21
2.2.3 Metallhydrid.....	21
2.3 Brenselceller for hydrogen.....	21
2.4 Forbrenningsmotorer for hydrogen.....	22
3 TRADISJONELLE ENERGIKILDER/-BÆRERE.....	24
3.1 Kilde/råstoff.....	24
3.2 Konvertering.....	24
3.2.1 Biomasse til LCV-gass.....	24
3.2.2 Gasskraftverk.....	24
3.3 Lagring/Transport.....	25
3.3.1 Ledningsbundet transport av energibærere.....	25
3.3.2 Bulktransport av energikilder/-bærere.....	25
3.4 Sluttbruk.....	26
3.4.1 Kraftvarmeverk.....	26
3.4.2 Høytemperatur brenselceller.....	26
3.4.3 Forbrenningsmotorer for bensin, diesel og naturgass - utslipp.....	27
4 UTVALGTE ENERGIKJEDER.....	29
4.1 Småskala stasjonære anvendelser.....	30
4.1.1 Elektrisitet fra vannkraft eller vindkraft.....	31
4.1.2 Biomasse/avfall.....	32
4.1.3 Naturgass.....	34

4.2	Samferdsel – Personbil.....	38
4.2.1	Elektrisitet fra vannkraft eller vindkraft.....	41
4.2.2	Biomasse/avfall	42
4.2.3	Naturgass.....	43
4.2.4	Bensin/Diesel/CNG (referanse).....	45
4.3	Samferdsel – Ferge.....	46
4.3.1	Diesel-elektrisk framdrift	47
4.3.2	Naturgass-elektrisk framdrift	47
4.3.3	Hydrogenfergene	47
5	ENERGI- OG UTSLIPPSREGNSKAP.....	48
5.1	Beregningsmetodikk	48
5.2	Overordnede forutsetninger	49
6	RESULTATER	50
6.1	Energikjeder for stasjonært forbruk	51
6.2	Energikjeder for samferdselsformål.....	54
6.2.1	Personbil.....	54
6.2.2	Fergedrift.....	56
7	REFERANSER	57
7.1	Litteratur og internettreferanser	57
7.2	Nyttige Internettadresser	59
8	VEDLEGG	60
8.1	Hydrogen, karakteristiske egenskaper	60
8.1.1	Hydrogenlagring.....	62
8.1.2	Trykktanker	63
8.1.3	Flytende hydrogen.....	63
8.1.4	Metallhydrid	63
8.2	Akronymer og definisjoner	64
8.2.1	Akronymer og enheter.....	64
8.2.2	Definisjoner	65
8.3	Faktaark.....	66
8.3.1	Kilde	67
8.3.2	Lagring og transport av energikilde	70
8.3.3	Konvertering.....	74
8.3.4	Lagring og transport av energibærer	82
8.3.5	Sluttbruk	87
8.4	Brenselcelletyper.....	93
8.5	Beregning av bulktransport av energibærere på vogntog	94