



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

En studie av den gassdrevne forbrenningsmotoren og dens potensiale

A Study of the Gas-Powered Internal Combustion
Engine and Its Potential

Morten Ansgar Pettersen
Maskin, prosess- og produktutvikling

Forord

Dette er min avsluttende masteroppgave på sivilingeniørlinjen Maskin-, Prosess- og Produktutvikling ved fakultetet for realfag og teknologi (REALTEK) ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Arbeidsomfanget på masteroppgaven er beregnet til rundt 950 timer. Jeg har tidligere gjennomført en 3-årig ingeniørgrad innen maskinfag ved Høgskolen i Østfold, en grad jeg påbegynte grunnet min interesse for maskiner, særlig kjøretøy.

Oppgaven skulle originalt omhandle ombygging av eksisterende dieselmotorer for tyngre kjøretøy til biogassdrevne motorer. Ryktet var at det eksisterte bedrifter i Norge som bedrev slik virksomhet. Etter en tid måtte jeg imidlertid gi slipp på denne vinklingen av oppgaven. Alle bedriftene virket å ha forsvunnet eller gått konkurs, og de jeg fikk tak i hadde aldri påbegynt en faktisk motorombygging. I samarbeid med veileder ble det dermed besluttet å fokusere på biogassmotorens teknologi og potensiale i samarbeid med kjøretøyfabrikanten Scania.

Masteroppgaven inneholder informasjon om gassdrevne kjøretøy med et spesielt fokus på gassmotorer fra Scania. Det har vært et mål å gi rapporten en pedagogisk oppbygging.

Rapporten innleder med å gi en oversikt over prosjektmålsettinger, kunnskap og historikk om biogass og teori om gassdrevne kjøretøy. Deretter følger resultatet av en studie av en gassmotor fra Scania, med tilhørende gassystem. Oppgaven avsluttes med diskusjon og konklusjon.

Leseren bør ha forkunnskaper på maskiningeniør nivå. Rapporten vil også kunne være en informasjonskilde for kommende ingeniørstudenter med interesse for gassmotorer.

Oppgaven har vært lærerik og jeg har alltid hatt interesse for den klassiske forbrenningsmotoren. Det var motiverende å se at biogass kan være et alternativ som kan gi stempelmotoren «evig liv».

Jeg vil rette en stor takk til veileder førsteamanuensis Geir Terjesen for god oppfølging og veiledning gjennom hele semesteret. Videre vil jeg takke tekniker Geir Storbråten/Scania, som har fulgt meg opp med raske tilbakemeldinger og informasjon om Scanias produkter og tekniske komponenter. Takk til tekniker Roger Grimstad/Scania for informasjon om kjøretøy- og verkstedsikkerhet, samt generell informasjon rundt det norske biogassmarkedet. Til slutt vil jeg takke Martin Hostad og Niklas Bye Andersen for hjelp med norske ord på diverse kjøretøykomponenter.

Fredrikstad, 15/05-2023

Morten A. Pettersen

Morten A. Pettersen

Sammendrag

Denne masteroppgaven er skrevet som en avsluttende del av sivilingeniørstudiet Maskin- prosess- og produktutvikling ved Fakultet for Real FAG og Teknologi (REALTEK) hos Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU). Fakultetet ønsket å øke sin kunnskap om forbrenningsmotorer og unike systemer i kjøretøy som går på biogass og valgte derfor å initiere denne masteroppgaven i vårsemesteret 2023.

Rapportens mål er å samle detaljert informasjon om gassmotorer som opererer på biogass, da dette fremstår som en spennende miljøvennlig teknologi med interessant potensiale. Dette er gjort ved hjelp av litteratursøk og innhenting av informasjon fra ressurspersoner. Det har pågått et fast samarbeid med ressurspersoner hos Norsk Scania AS. For at man skal få et godt utbytte av rapporten forutsettes det at leseren har en teknisk eller ingeniørfaglig bakgrunn.

Rapporten gjennomgår kort de prosesser som er aktuelle for produksjon av biogass. Den tar også for seg det norske potensialet for produksjon av biogass, og hvilke energimengder som kan hentes ut dersom det er vilje og forutsetninger for det. Videre gis det teorigrunnlag som er relevant for forståelsen av gass-relaterte motor- og kjøretøysystemer. Til slutt er det utført en studie av en 13-liter gassdrevet ottomotor fra Scania, med tilhørende gassystem. Studiet gir en detaljert gjennomgang av gasstankene som benyttes til å lagre både flytende og komprimert gass i kjøretøyet, samt motoren og dens komponenter, systemer og virkemåte.

Det er et lovende potensiale for biogassproduksjon i Norge. Det kan potensielt, dersom det er vilje til det, produseres 11,3 TWh årlig i fremtiden. Teknologien for gassdrevne kjøretøy fremstår som moden og godt egnet for tungtransport. Den gassdrevne forbrenningsmotoren har vært kjent siden før første verdenskrig, noe som har gitt god tid til utvikling av forbrenningsteknologien. Motoren fra Scania har elektronisk styrt tenning som regulerer forbrenningen i hvert stempel individuelt, EGR og et effektivt gassystem som regulerer gasstrykk- og forsyning løpende etter motorens behov.

Utfordringene ligger i begrenset rekkevidde forbundet med lagring av gassen i kjøretøyet. Biogass tar henholdsvis 1,7 til 5 ganger større plass enn diesel, avhengig av om gassen er flytende eller komprimert. Flytende gass må også holdes under $-161,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, noe som byr på problemer dersom kjøretøyet står ubrukt over tid. Ved bruk av kjøretøy fra Scania har komprimert gass i dag en maksimal rekkevidde på ca. 664 km per fylling, mens flytende gass har en maksimal rekkevidde på 1597 km per fylling. Det er også foreløpig knyttet utfordringer til nettverket av fyllestasjoner, da det inntil videre ikke finnes fyllestasjoner nord for Trondheim. Dette ventes løst for flytende gass innen 2026.

Av litteratur som har vært nyttig for utarbeidelsen av rapporten, anbefales følgende bøker:

- *Natural Gas and Renewable Methane for Powertrains* av Richard Van Basshuysen.
- *Motorteknikk* av Leif Lundby m.fl.

Abstract

This master's thesis has been written as the final part of the civil engineering study Machine- Process- and Product Development under the Faculty of Science and Technology (REALTEK) at the Norwegian University of Life Sciences (NMBU). The faculty wanted to increase their knowledge of internal combustion engines and the unique systems associated with vehicles that run on biogas. For this reason, they chose to initiate this master's thesis in the spring semester 2023.

The aim of the report is to gather detailed information about gas engines that operate on biogas, as this appears to be an exciting, environmentally friendly technology with interesting potential. This has been done using standard literature search and by obtaining information from resource personnel. There has been ongoing collaboration with personnel at Norsk Scania AS. To get the most out of the report, the reader should have a technical or engineering background.

The report briefly reviews the processes that are relevant for the production of biogas. It also considers the Norwegian potential for biogas production, and the amounts of energy that can be extracted, as long as there is a will and the conditions for it are met. Further, the report supplies the theoretical basic knowledge needed for the understanding of gas-related engine- and vehicle systems. As the final part of the report, a study has been done on a 13-litre gas-powered otto engine from Scania, along with its associated gas system. The study provides a detailed review of the gas tanks used to store both liquid and compressed gas in the vehicle, as well as the engine and its components, systems, and operation.

There is a promising potential for biogas production in Norway. Potentially, if there is a will to do so, 11.3 TWh can be produced annually in the future. The technology used in gas-powered vehicles appears mature and well suited for heavy transport. The gas-powered combustion engine has been known since before the First World War, which has given plenty of time for the development of the combustion technology. The engine supplied by Scania has electronically controlled ignition that regulates combustion individually for each combustion chamber, EGR and an efficient gas system that regulates gas pressure and supply continuously, according to the needs of the engine.

The challenge is located in the limited range, due to challenges associated with gas storage within the vehicle. Biogas requires 1.7 to 5 times the volume of diesel, depending on whether the gas is liquid or compressed. Liquefied gas must also be kept below $-161.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, which can be problematic if the vehicle is left unused for longer periods of time. When using vehicles from Scania, compressed gas has a maximum range of approx. 664 km per full tank, while liquid gas has a maximum range of 1597 km on a full tank. There are also challenges with regards to the filling station network, as there are currently no filling stations north of Trondheim. For liquefied gas, this is expected to be resolved by 2026.

Regarding literature that has been useful for the creation of the report, the following books can be recommended:

- *Natural Gas and Renewable Methane for Powertrains* by Richard Van Basshuysen.
- *Motorteknikk* by Leif Lundby et.al.

Innhold

Forord.....	2
Sammendrag.....	3
Abstract.....	4
Innhold.....	5
1. Symbol- og begrepslister.....	7
2. Innledning.....	8
2.1 Bakgrunn.....	8
2.2 Prosjekt målsettinger.....	9
2.2.1 Hovedmål.....	9
2.2.2 Delmål.....	9
2.3 Metode for innhenting av informasjon.....	9
2.4 Kvalitetssikring.....	9
2.5 Tidlige begrensninger for arbeidet.....	9
3. Biogass.....	10
3.1 Historikk.....	10
3.1.1 Naturgass.....	10
3.1.2 Kjøretøy med gass som drivmiddel.....	11
3.2 Aktuelle drivstoff.....	14
3.2.1 Hva er biogass?.....	15
3.3 Produksjon av biogass.....	15
3.3.1 Prosesstrinn.....	16
3.3.2 Aktuelle substrater.....	17
3.4 Potensiale for biogass i Norge.....	18
3.5 Biogass som drivstoff.....	19
3.6 Fyllestasjoner.....	20
4. Teori vedrørende gasskjøretøy.....	21
4.1 På hvilke kjøretøy er gass aktuelt i dag?.....	21
4.2 Forbrenningsteori.....	22
4.2.1 Ottoprosessen.....	22
4.2.2 Motorens luftbehov og drivstoffmiks.....	22
4.2.3 Bankefasthet og kompresjonsgrad.....	23
4.2.4 Unormal forbrenning.....	24
4.2.5 Utslipp av klimagasser.....	25

4.2.6 Katalysator	26
4.2.7 Lambdasensoren	28
4.2.8 EGR (Exhaust Gas Recirculation)	29
4.3 Lagring av gass i kjøretøyene	30
4.3.1 Tanktyper	30
4.3.2 Ventilsystemer for CNG	31
4.4 Sikkerhetsaspekter	31
4.4.1 Standarder og regelverk	31
4.4.2 Sikkerhet i kjøretøyet	32
4.4.3 Verkstedsbesøk og service	33
4.4.4 Fylling av CNG-kjøretøy	35
4.4.5 Fylling av LNG-kjøretøy	36
4.5 Økonomi	37
4.5.1 Økonomi og subsidier ved kjøp av tyngre biogass-kjøretøy	37
4.5.2 Kostnader ved bruk av gass som drivstoff	38
5. Resultater: Studie av Scantias gasskjøretøy	39
5.1 Systemoversikt	40
5.2 Gass-systemet	43
5.2.1 CNG-tanker	43
5.2.2 LNG-tanker	46
5.2.3 Gasspanelet	53
5.2.4 Drivstoffgalleri og injektorer	54
5.3 Gassmotoren	55
5.3.1 Krefter og moment	56
5.3.2 Designgrunnlag og endringer	57
5.3.3 Motorens blandingsforhold	58
5.3.4 Styreenheter	59
5.3.5 Tenningsystem	63
5.3.6 EGR	65
6. Diskusjon	66
6.1 Biogasspotensiale i Norge	66
6.2 Gassmotoren, lagring av gass og forbedringspotensiale	66
6.3 Økonomisk vurdering	67
7. Konklusjon	68
7.1 Anbefalinger og videre arbeid	68
Referanser	69

1. Symbol- og begrepslister

Tabell 1: Liste over symboler benyttet i rapporten.

Symbol	Forklaring	Enhet
λ	Luftfaktor	N/A

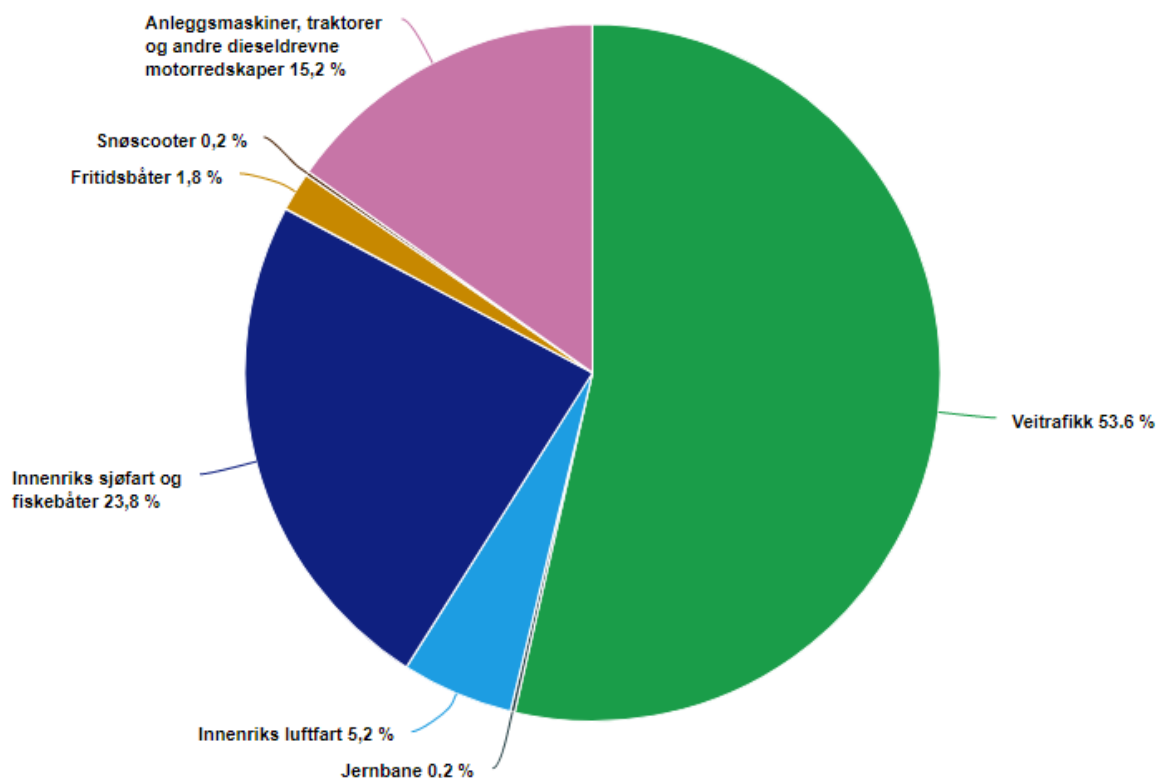
Tabell 2: Liste over utvalgt terminologi benyttet i rapporten.

Begrep	Forklaring
Anaerob prosess	Kjemisk prosess uten tilgang på oksygen
Substrat	Biologisk masse av variabelt opphav som benyttes for produksjon av biogass
Biogassreaktor	Tank eller anlegg som produserer biogass
EGR	Exhaust Gas Recirculation, system som resirkulerer avgasser tilbake til motoren
Bi-fuel	Kjøretøy som skifter mellom to drivstoff, avhengig av behov
Dual-fuel	Kjøretøy som klargjør motor med en drivstofftype, før den veksler til en annen
Ottoprosess	Idealprosess for bensin- og gassmotorer
Motorbank	En form for ukontrollert antenning av
Oktantall	Tall som gir en indikasjon på bankefastheten til et drivstoff
Bankefasthet	Drivstoffets evne til å motstå selvtenning
Støkiometrisk blanding	Blanding av luft og drivstoff, der det vil være en komplett forbrenning av både luft og drivstoff.
Oksidasjon	Kjemisk prosess der minst ett atom øker oksidasjonstallet sitt
Reduksjon	Kjemisk prosess der minst ett atom senker oksidasjonstallet sitt
Boil-off	Flytende biogass lagret i tank som fordamper og øker trykket i tanken
Standby-tid	Tiden før boil-off oppstår i en tank for flytende gass
ECU	Engine Control Unit, elektronisk styreenhet for motor

2. Innledning

2.1 Bakgrunn

Det grønne skiftet er i dag et sentralt tema. Klimagassutslippene må ned og det er stor uenighet om hva som må til for å nå 1,5 graders målet i Paris-avtalen. Dette innebærer for Norges del en forpliktelse til å redusere utslipp av klimagasser med 50% innen 2030, sammenlignet med nivået i 1990 (Engedal & Bothner, 2021). Veitrafikken er i dag en stor del av utslippet til transportsektoren. Figur 1 viser andel norske klimagassutslipp fordelt på transportkilder, der veitrafikken har 53,6% av det totale utslippet.



Figur 1: Kakediagram som viser andel norske klimagassutslipp fordelt på ulike transportkilder. Utslippet til veitrafikk var på 8,4 millioner tonn karbondioksid-ekvivalenter. (Engedal & Bothner, 2021)

Næringstransport har en del av skylden i dette utslippet, og i 2021 ble Grønt Landtransportprogram iverksatt. Det er et offentlig-privat samarbeid for å realisere det grønne skiftet i den landbaserte næringstransporten. Formålet med prosjektet er å bidra til å realisere vedtatte nasjonale klimamål og stimulere næringslivet til et bredt teknologiskifte (Norsk Handelsorganisasjon, 2023). Dette har økt interessen i forskning på alternative drivstoff, og ett av disse feltene er bruk av biogass til å drive kjøretøy. Sammenlignet med bensin-kjøretøy kan dagens naturgass-drevne biler gi en reduksjon i utslipp av drivhusgasser på 15%. Ved bruk av biogass er derimot utslippene redusert med så mye som 90% (Norsk Scania AS, 2023). Dette kan være meget interessant dersom det viser seg å være skalerbart. Det er også et etablert marked for gasskjøretøy utenfor Norge, da det i 2019 var 1,4 millioner kjøretøy som gikk på naturgass i Europa (Natural Gas Vehicle Association Europe, 2019).

REALTEK ved NMBU ønsker derfor å øke kunnskapen om forbrenningsmotorer som går på gass, og har initiert denne masteroppgaven. Av tidligere arbeid på feltet som har vært relevant for utarbeiding av rapporten, er det verdt å nevne boken «Natural Gas and Renewable Methane for Powertrains», av

Richard Van Basshuysen. Denne gir en god innføring i diverse typer teknologi relatert til gassdrevne kjøretøy.

2.2 Prosjekt målsettinger

2.2.1 Hovedmål

Det skal innhentes informasjon og kunnskap vedrørende gassmotorer, med fokus på rene gassmotorer. Det er ønskelig med et «state of the art»-eksempel på oppdatert teknologi. For dette gjøres det en studie av en utvalgt gassmotor produsert av Scania. I tillegg er det ønskelig med en oversikt over produksjonsprosesser og brukspotensiale når det gjelder biogass som drivstoff.

2.2.2 Delmål

Delmålene gir de mål som til sammen vil utgjøre hovedmålet:

- Gjøre kort rede for naturgassens historie, og tidligere bruk av naturgass som driftsmiddel i kjøretøy.
- Gi en kort gjennomgang av produksjonsprosesser og brukspotensialet for biogass.
- Redegjøre for gassmotorens typiske oppbygning og virkemåte.
- Gjøre en studie av en gassmotor fra Norsk Scania AS for å gi et innblikk i hvilken teknologi som er «state of the art» for øyeblikket.

2.3 Metode for innhenting av informasjon

Rapporten har benyttet litteraturstudier for innhenting av informasjon. Studiet av systemet fra Scania er utført ved innhenting av data fra ressurspersoner i Scania AS. Det er benyttet e-post, fysiske møter, i tillegg til bruk av utleverte powerpointserier med faginformatjon.

2.4 Kvalitetssikring

Rapporten er kontrollert og språkvasket. Referanser, begreps- og symbol-lister, figurnummer, tabellnummer og sidetall er kontrollert. Kildene som er benyttet er kontrollert og vurdert med et kildekritisk tankesett.

2.5 Tidlige begrensninger for arbeidet

- Flere steder i verden brukes gass som sekundær-drivstoff i biler. Det finnes flere måter å gjøre dette på, men den mest vanlige er bensin/CNG hybrider for personbiler, og noe diesel/CNG for tungtransport. Disse nevnes kort, men studeres ikke i dybden da rene biogassmotorer er oppgavens hovedfokus.
- LNG-tankene gjennomgås grunnleggende med detaljer og informasjon, men utvalgte subsystemer er ikke gjennomgått. Dette er av tidsmessige hensyn, da LNG-tanken er en komplisert konstruksjon.

3. Biogass

3.1 Historikk

Før vi fordyper oss i emnene gass og kjøretøyteknikk, er det nyttig å se litt på hvor teknologien begynte. Dette avsnittet gir en kort oversikt over historikken bak naturgass, og veien til bruk av dette i kjøretøy.

3.1.1 Naturgass

Naturgass var kjent allerede i gamle Kina, men har sjeldent vært brukt pga. problematisk transport. Det var først ved utviklingen av ordentlige rørsystemer ved hjelp av sveiseteknikk at det i USA ble økonomisk lønnsomt å transportere gass over avstand. Dette kom så sent som mot slutten av 1920-tallet. På daværende tidspunkt hadde det allerede eksistert et marked for gass i flere tiår. Bruken bestod av belysning, varme, matlaging og strømproduksjon. Ved slutten av første verdenskrig hadde det tyske riket alene over 1400 gassverk som produserte og sendte gass til byer. (Basshuysen, 2016)

Dette var da gass av typen kullgass, også kjent som syntetisk naturgass eller på engelsk, city-gas/town-gas. Kullgassens nøyaktige oppbygning varierer avhengig av hvilken type kull som brennes og produksjonsprosessen, men består i hovedsak av hydrogen, metan, nitrogen og karbon-monoksid. Kullgass ble i begynnelsen brukt for belysning, noe som ga samfunnet mulighet til å koble arbeidsdagen fra dag- og nattskyklusen. I løpet av 1920- og 1930-tallet ble det vanligere med elektrisk belysning. Dette påvirket derimot ikke bruken av kullgass, som fortsatte å øke pga. bruk til matlaging og varme. (Basshuysen, 2016)

En annen type syntetisk gass som ble brukt en periode, er tregass. Denne gassen er spesielt kjent for bruk i bilmotorer under andre verdenskrig (se figur 2). Den produseres ved fyring av «knott», små biter med godt tørket ved. Dette produserer hydrogen, karbonmonoksid, metan og andre hydrokarboner (Universitetet i Oslo, 2023).



Figur 2: Kjøretøy ombygget til kjøring på tregass (Norsk Scania AS, 2023).

På 50-tallet ble gassindustrien truet med forandring, grunnet utviklingen av elektrisitet i private hjem. I denne perioden ble også mineralolje vesentlig billigere, noe som også bidro til forandring. Mens disse endringene pågikk, ble det derimot oppdaget større gassfelt rundt om i Europa. På 50-tallet ble det oppdaget større felter i Nederland, Russland, nord i Italia og i Nord-Afrika. Tidlig på 60-tallet ble det også oppdaget gassreserver i Nordsjøen, noe vi i Norge vet godt. Nå gjorde naturgassen sitt inntog for alvor. Dette skyldtes to ting; for det første har naturgass, sammenlignet med kullgass, høyere

brennverdi. Dette gir mer energi til forbrukeren per kilogram gass brennt. Det andre er at naturgass er mye renere å brenne. Dette er fordi naturgass ikke inneholder karbonmonoksid, som er et giftig stoff. Disse to tingene, kombinert med at naturgassen var billig å ta opp når den ble hentet fra gassfelter, gjorde at den tok over mesteparten av gassmarkedet. (Basshuysen, 2016)

3.1.2 Kjøretøy med gass som drivmiddel

Kjøretøy som drives av naturgass er lite kjent blant folk flest. For mange fremstår dette som ny teknologi, og historikken på feltet har nesten gått ubemerket hen. Dette er nok i stor grad fordi teknologien som helhet har blitt ansett som en nisje, i møtet med bensin og diesel som har vært vesentlig mer lønnsomme. Flytende drivstoff har hatt den dominante posisjonen i markedet av praktiske årsaker, da det både er lettere å produsere, transportere og benytte. Man ser derimot perioder gjennom historien der interessen tar seg opp. Dette skyldes som regel en eller flere endringer i samfunnet, ofte økonomiske av natur (Basshuysen, 2016).

Første fase av gasskjøretøyets historie var tiden før første verdenskrig. I bilmarkedets etableringsperiode så man kjøretøy som gikk på både elektrisitet, bensin og damp. Bensinbilen kom seirende ut og ble det normale go-to alternativet, med forbrenningsmotoren som hovedårsak. Denne løsningen fortsatte å stabilisere seg som det dominante kjøretøyet på markedet, og ble etter første verdenskrig del av bilbransjen. Bransjen i seg selv inkluderte på daværende tidspunkt petroleumsnæringene, kjøp og salg av kjøretøy, reparasjons- og serviceyrket, media og ikke minst politiske interesser. Dette resulterte i at det allerede da var vanskelig å få inn et kjøretøy med alternativt drivstoff på markedet. (Basshuysen, 2016)

Under oppbygningen til andre verdenskrig ønsket Tyskland å være mest mulig selvforsynt. Dette innebar blant annet å spare det de kunne av ressurser til bygging av krigsmaskinen, og i den forbindelse meldte alternative drivstoff seg som en mulighet for å spare petroleumsprodukter. Kullgass var en av disse, og ble fra 1934 eksperimentert med for å drive kommersiell transport. Dette inkluderte busser, søppelbiler og feiebiler, som ble bygget om til bruk av komprimert gass. Gassen ble lagret på tanker under trykk på ca. 200 bar. Figur 3 viser en gassdrevet buss fra byen Ulm i 1942. (Basshuysen, 2016)

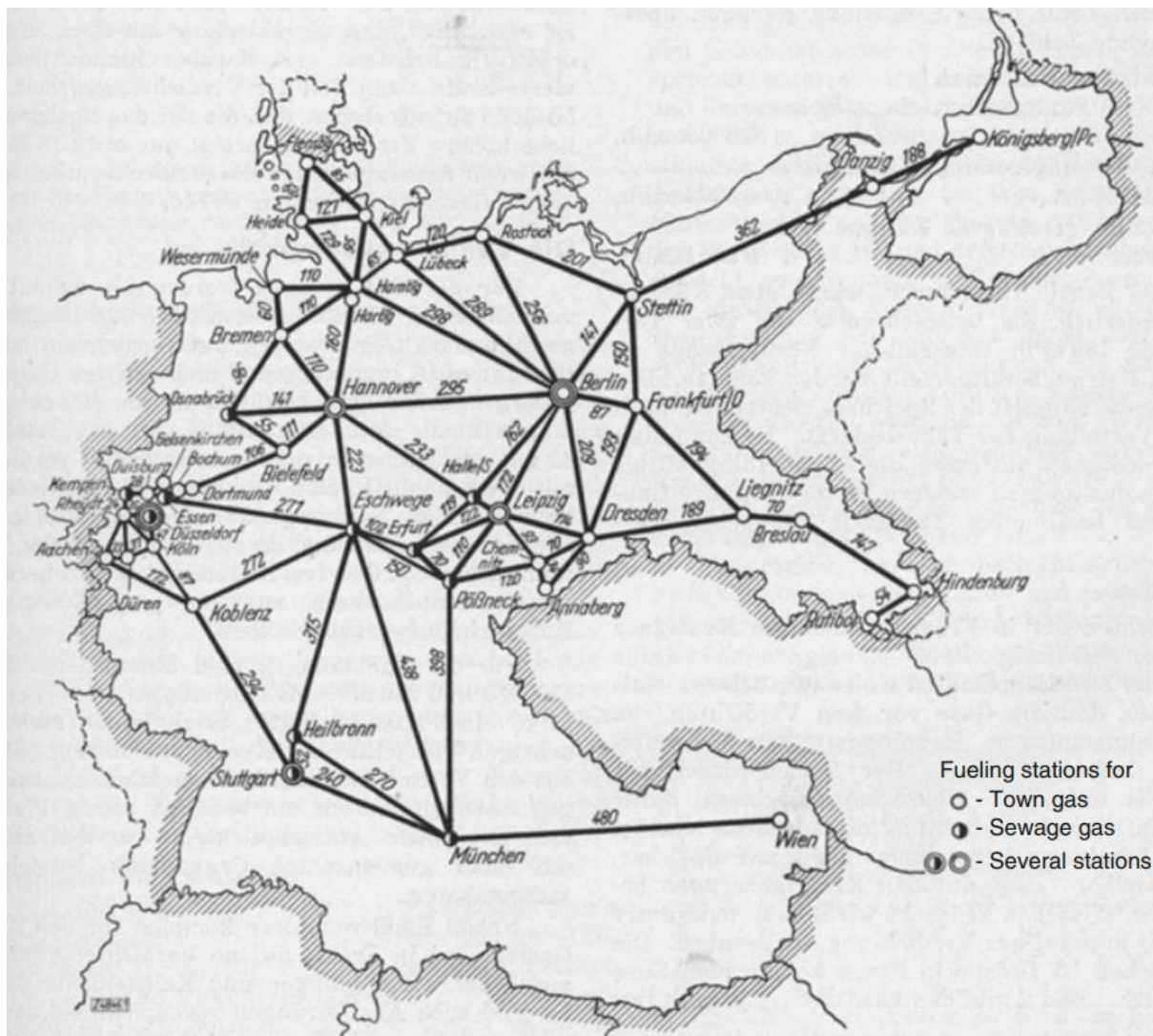


Figur 3: Offentlig buss i byen Ulm fra 1942. Tanken på taket er en lavtrykkstank med kullgass. (Basshuysen, 2016)

I begynnelsen var kjøretøyene drevet av utskiftbare gasssylindere, men dette viste seg å være tungvint. Ikke minst var det også kjedelig, da det måtte gjøres jevnlig under daglig drift. Dette resulterte i utbygging av et nettverk av fyllestasjoner for gass. I 1938 hadde det tyske riket mer enn 50 fyllestasjoner (se figur 4), der de fleste hadde kullgass og 10 stasjoner hadde biogass. (Basshuysen, 2016)

Denne utviklingen ledet til mer forskning rundt gassbruk til drift av kjøretøy. Det var likevel i hovedsak større kjøretøy som kunne benytte teknologien, da gasstankene var dårlig designet, tunge og krevde mye plass. Dette utelukket bruk til privat transport. Det kan også

nevnes at Nazi-tyskland hadde investert tungt i hydrogenfabrikker siden midten av 1930-tallet, og myndighetene var derfor lite interessert i å støtte gass-teknologien. (Basshuysen, 2016)



Figur 4: Fyllestasjoner for gass under det tyske riket, 1938. Tallene gir avstanden mellom stasjonene. (Basshuysen, 2016)

Fra 1942 ble det benyttet tilhengere med gasstanker for å øke rekkevidden til bussene. Rekkevidden på tak-tankene var oppgitt til 13 km, og en tilhenger økte dette til 25 km. Den første byen som eksperimenterte ordentlig med denne bruken av gass for å drive bussvirksomheten var Wiesbaden, og i 1942 og 1943 spredte det seg til flere byer, deriblant Hamburg, München og Berlin. Uten gass-teknologien ville bussene sluttet å gå, da det mot slutten av krigen var mangel på drivstoff. Tyskland var for øvrig ikke alene om å benytte gassdrevne busser, da flere okkuperte land også tok i bruk samme teknologi. Til og med Storbritannia tok i bruk gass for å drive bussene sine. (Basshuysen, 2016)

Etter krigen var drivstoff og ressurser fremdeles vanskelig å oppdrive. Gasskjøretøyene ble brukt i denne perioden, men etter hvert som petroleum-tilgangen normaliserte seg (1950-tallet) forsvant de gradvis til fordel for bensindrift. (Basshuysen, 2016)

Det neste som påvirket teknologikursen var oljekrisene. Den første oljekrisen kom i 1973 og var et resultat av at OPEC (Organization for the Petroleum Exporting Countries) strupet oljeproduksjonen som svar på Yom Kippur Krigen. Dette førte til økte priser på olje, og den mest merkbare konsekvensen av krisen var at de vestlige landene innså hvor sårbart energisystemet var. Illusjonen av at det alltid

ville være billig olje tilgjengelig uten begrensninger, ble knust for folk flest. Den neste oljekrisen kom i 1979 og 1980, og forsterket inntrykket av den første. (Basshuysen, 2016)

Dette hadde to konsekvenser som dannet grunnlaget for situasjonen vi ser i samfunnet i dag. For det første dannet det grunnlaget for miljøbevegelsene, og en endring i verdier fra forbrukerens side. For det andre reagerte flere land ved å sette i gang forskningsprosjekter i regi (og finansiert av) myndighetene. Mange av disse dreide seg om teknologi for logistikk ifm. naturgass. Gasskjøretøy fikk da spesiell oppmerksomhet fordi de ga muligheten for å frakoble seg den typiske olje-avhengigheten landene nå fryktet. New Zealand er et eksempel på en nasjon som var meget avhengig av oljeimport fra landene i Midtøsten. På 70-tallet startet myndighetene der et omfattende forskningsprogram med fokus på energi, der kjernen i programmet var «The Compressed Natural Gas Vehicle Program». Målet var å utnytte New Zealands naturgassreserver, da logistikksystemet deres for gass allerede på 70-tallet kunne supplere de mest befolkede områdene uten problemer. (Basshuysen, 2016)

New Zealand valgte å håndtere den tekniske utfordringen ved å bygge om bensinmotorer til gass. Det begynte med import av italiensk-produserte konverteringspakker for kjøretøy, men disse måtte tilpasses lokale forhold (temperaturer, gassblandinger o.l.). Over tid ble det derfor mer og mer vanlig å produsere delene lokalt. Midt på 80-tallet hadde det etablert seg et solid nettverk av verksteder som var sertifisert for å konvertere bensinbiler til gassdrift, og landet hadde rundt 370 fyllestasjoner for naturgass. Figur 5 viser en slik fyllestasjon. Utviklingen var drevet av subsidier fra myndighetene, både for konstruksjon av fyllestasjonene og for konverteringene av kjøretøy. Gassprodusentene benyttet også drivstoffkuponger for å tiltrekke kunder. Ved slutten av 1985 var det ca. 120 000 naturgassdrevne kjøretøy på veiene i New Zealand. Dette var 11% av den totale kjøreparken, og en prosentandel som ingen andre i verden hadde oppnådd før dem. (Basshuysen, 2016)



Figur 5: Fyllestasjon for naturgass på New Zealand, 1979. (Basshuysen, 2016)

Suksessen tok en brå vending i 1985. Oljeprisene sank gradvis på begynnelsen av 80-tallet, noe som gjorde ombygging av biler mindre økonomisk lønnsomt. Videre hadde New Zealand et regjeringsskifte,

som i resulterte i at staten fjernet subsidiene til bransjen. Service- og reparasjonsevnene var heller ikke like godt utviklet som logistikknettverket for gassen og ombyggingene, slik at kunder slet med å få reparert selv små tekniske feil på kjøretøyene sine. Resultatet av disse tre faktorene var at antall ombygde biler falt som en stein fra 1985 til 1990. I 2012 var det totalt 65 kjøretøy på New Zealand som var drevet av naturgass, noe som viser at ingen ting gjenstår av «The CNG Vehicle Program». (Basshuysen, 2016)

Det finnes andre land som bruker kjøretøy for naturgass. Iran, Pakistan, Argentina, Brasil og India er eksempler på land der naturgassdrevne kjøretøy er populære. Tall fra 2012 viser at Iran hadde rundt 3 millioner kjøretøy i drift på daværende tidspunkt, Pakistan hadde 2,9 millioner, og Argentina 2,14 millioner. For Pakistan er tallene nokså imponerende, da det ikke er så stor grad av motorisering der. 2,9 millioner kjøretøy utgjorde ca. to tredjedeler av kjøretøyparken. (Basshuysen, 2016)

Eksemplene over, fra det tredje riket og frem til nå, viser at det er fullt mulig å innføre kjøretøy med naturgass, dersom staten bestemmer seg for å satse på det og det er økonomisk lønnsomt.

3.2 Aktuelle drivstoff

Det finnes mange metoder for å drive et kjøretøy. Når det gjelder tung transport er det fire reelle alternativer:

- Biogass
- HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), en variant av biodiesel.
- FAME (Fatty Acid Methyl Ester), en variant av biodiesel.
- Etanol

Alle disse er forbundet med reduserte utslipp av karbondioksid, tallene er vist på figur 6.



Figur 6: Figur som viser potensialet for å spare CO2 sammenlignet med diesel, vist i antall prosent-reduksjon (Norsk Scania AS, 2023).

Etanol er lite aktuelt. Teknologien er i markedet allerede, men drivstoffet er for dyrt å produsere. Det er derfor lite skalerbart, og vil ikke kunne løse problemer på en global skala (Grimstad, 2023). Vi sitter dermed igjen med biodiesel, eller biogass. Begge disse kan gi utslippsreduksjoner på nærmere 90%, sammenlignet med dagens fossile kjøretøy (Norsk Scania AS, 2023).

3.2.1 Hva er biogass?

Biogass er en gassblanding som dannes ved nedbrytning av organisk materiale. Blandingen inneholder i hovedsak metan (CH_4) og karbondioksid (CO_2) (Rosvold, 2020). Gassblandingen produseres fra flere typer avfall, deriblant avfall fra husholdninger, slam fra renselanlegg, kloakk fra industri m.m. Karbondioksid som slippes ut når biogass forbrennes kommer allerede fra atmosfæren, da dette er CO_2 som er hentet fra kretsløpet av planter, dyr o.l. (Rosvold, 2020). Videre kan biogass benyttes i to former:

- CNG/CBG er en forkortelse for komprimert naturgass/biogass (Compressed Natural Gas/Compressed Bio Gas). Naturgass/biogass er en kompressibel gassblanding, og komprimeres til 200 bar ved 15°C ihht. europeiske forskrifter. I Amerika brukes det 248 bar ved 21°C . CNG og CBG er som drivstoff helt like. (Basshuysen, 2016)
- LNG/LBG er kort for flytende naturgass (Liquified Natural Gas/Liquified Bio Gas). Når CNG kjøles ned til under $-161,4^\circ\text{C}$, går det over i flytende form. Volumet reduseres da til $1/600$. Dette er fordelaktig med tanke på mengde gass som kan lagres i et kjøretøy, men innebærer samtidig at drivstofftanken må holdes kjølig. Hvis temperaturen stiger over $-161,4^\circ\text{C}$ vil drivstoffet igjen gå over i gassform og utvide seg. Tanken vil da kunne eksplodere. De fleste biler som benytter LNG i dag er utstyrt med nødventiler som vil slippe ut gass for å lette trykket i tanken dersom temperaturen blir for høy. (Hofstad, LNG, 2020)

I Norge er det for øyeblikket ingen krav for rapportering av hvor gassen på en fyllestasjon kommer fra. Dette vil si at både naturgass fra gassfelt i Nordsjøen og biogass fra norske biogassanlegg fylles i samme tanker for bruk til transport. Det er derfor ikke nødvendigvis ren naturgass eller biogass som fylles på tanken i kjøretøyet, men en blanding av de to. (Norsk Scania AS, 2023)

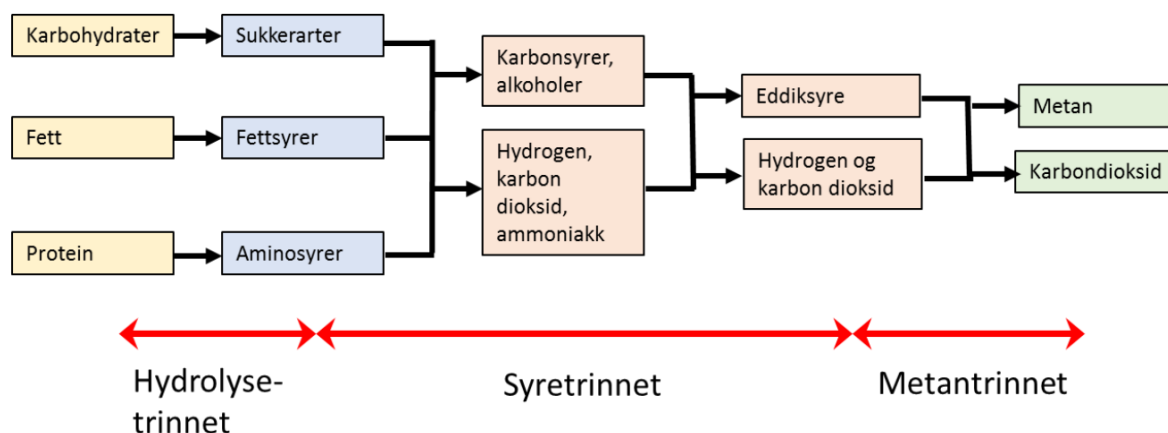
For enkelhets skyld brukes derfor begrepet CNG om komprimert gass og LNG om flytende gass videre i denne rapporten, selv om dette også vil omfatte biogass-variantene. Dette gjøres fordi CNG/CBG, og LNG/LBG i praksis er helt like. Den eneste forskjellen på de to variantene er hvordan de er produsert. Det er dermed lite poeng i å skille de to ved bruk i motorteknikken i påfølgende kapitler.

3.3 Produksjon av biogass

Enkelt forklart foregår produksjon i et biogassanlegg ved å omsette nedbrytbart organisk materiale (substrat). Biogassen er en blanding av metan og karbondioksid, i tillegg til mindre mengder hydrogensulfid og ammoniakk. Dette innebærer en såkalt anaerobisk nedbrytning, dvs. nedbrytning uten tilgang på oksygen. Dersom det er materialer i substratet som ikke er nedbrytbare, eller som ikke benyttes av de biologiske reaksjonene i anlegget, vil disse bli igjen i bioresten (materialet som er igjen etter biogassproduksjonen). (Morken, Briseid, Hovland, Lyng, & Kvande, 2017)

3.3.1 Prosesstrinn

Denne delen gir en kort oversikt over biogass-prosessen sine tre hovedtrinn. Produksjonsprosessen for biogass består av hydrolysetrinnet, syretrinet og metantrinet. Disse er vist på figur 7.



Figur 7: Flytskjema som viser oversikten over hovedprosessene i en biogassprosess (Morken, Briseid, Hovland, Lyng, & Kvande, 2017).

Nedbrytningen begynner med hydrolysetrinnet. Substratet inneholder normalt store molekyler som proteiner, fett og karbohydrater. Disse stoffene er for store til å omdannes til biogass direkte, og må hydrolyseres (deles opp) til mindre molekyler som aminosyrer, sukkerarter og fettsyrer. Spaltingen skjer ved hjelp av enzymer. (Morken, Briseid, Hovland, Lyng, & Kvande, 2017)

Sukker, alkoholer og aminosyrer brytes videre ned til organiske syrer, i det vi kaller syretrinet. Eksempler på vanlige organiske syrer er eddiksyre, maursyre og melkesyre, for å nevne noen. Noen av disse er stoffer vi finner illeluktende, da vi har utviklet oss til å gjenkjenne dårlig mat som er delvis nedbrutt av bakterier. Det foregår også anaerobe oksidasjoner ved at fettsyrer, alkoholer og utvalgte aminosyrer omdannes til acetat og karbondioksid. Dette gir samtidig en frigjøring av hydrogen som er viktig, da dette må «spises opp» i det påfølgende metantrinet. Gjøres ikke dette blir hydrogeninnholdet for høyt, og prosessen stopper opp. (Morken, Briseid, Hovland, Lyng, & Kvande, 2017)

Metan lages normalt ved at eddiksyrespisende organismer spalter acetat, og danner metan som et biprodukt. Alternativt kan det dannes ved at karbondioksid og hydrogen bindes, noe som gir metan og vann. Det bør også nevnes at organismene i metantrinet er mer følsomme for oksygen, pH-variasjoner, saltkonsentrasjoner, tungmetaller og organiske forurensninger enn mikroorganismene fra de to foregående trinnene. (Morken, Briseid, Hovland, Lyng, & Kvande, 2017)

Selv om organismene i metantrinnet er mer følsomme enn organismene i de andre trinnene, må alle ha noen bestemte miljøforutsetninger.

- Temperatur er viktig for alle trinnene i prosessen. Biogass produseres ved mesofile eller termofile betingelser. Førstnevnte foregår ved 20-45 °C, mens den andre innebærer 45-70 °C. Metan kan dannes ved lavere temperaturer, men prosessen vil da foregå vesentlig saktere.
- pH skal i hovedsak være nøytral (6,5-7,5). Hydrolyse- og syretrinnet har organismer som er mer tolerante for lavere pH.
- Mikroorganismer har behov for sporelementer og vitaminer. Behovet varierer mellom de ulike organismene, men de metandannende organismene i biogassprosessene har vist et behov for jern, sink, nikkel, kobber og molybden. Noen har også hatt et behov for wolfram og selen. Mange råstoff mangler utvalgte av de nevnte sporelementene. Husdyrgjødsel er ofte rikt på mineraler, og tilsetning av dette kan være en sikring mot slike begrensninger i prosessen.
- Alt liv har behov for nitrogen. Substratet i en biogassprosess må derfor inneholde dette, men ikke for mye ettersom det vil gi kunne gi en for høy konsentrasjon av ammoniakk.
- Til slutt må det sørges for at det ikke hopper seg opp «kortere fettsyrer». Dette er fettsyrer som dannes ved nedbrytning av karbonrikt materiale. Dersom denne nedbrytningen skjer for raskt kan det medføre en opphopning av disse fettsyrene, som igjen kan senke pH-verdien slik at prosessen «går sur».

Dette er kun en oversikt over de mest generelle forutsetningene for biogassprosessen. Miljøforutsetningene avhenger av substrat, hvilke organismer som benyttes, og ikke minst hvilken fart man vil at reaksjonen skal gå i. Det viser samtidig at biogassprosessen er en særdeles sammensatt prosess, der alle leddene må gå med «samme fart». Substratets sammensetning, valg av teknologi og måten man driver prosessen er avgjørende for resultatet. (Morken, Briseid, Hovland, Lyng, & Kvande, 2017)

3.3.2 Aktuelle substrater

Som vi så i forrige kapittel er substratet av stor betydning, da dette inneholder de stoffene organismene trenger for å danne sluttproduktet. Det er flere typer substrat som er aktuelle for bruk til produksjon av biogass. Disse inkluderer husdyrgjødsel, avfall fra planteproduksjon, matavfall, fiskeavfall og fiskeensilasje, samt avløps slam, for å nevne noen. Valg av substrat avhenger naturligvis av næringsinnholdet, men også av andel tørrstoff, konsentrasjon av organisk materiale, og hydraulisk oppholdstid. (Morken, Briseid, Hovland, Lyng, & Kvande, 2017)

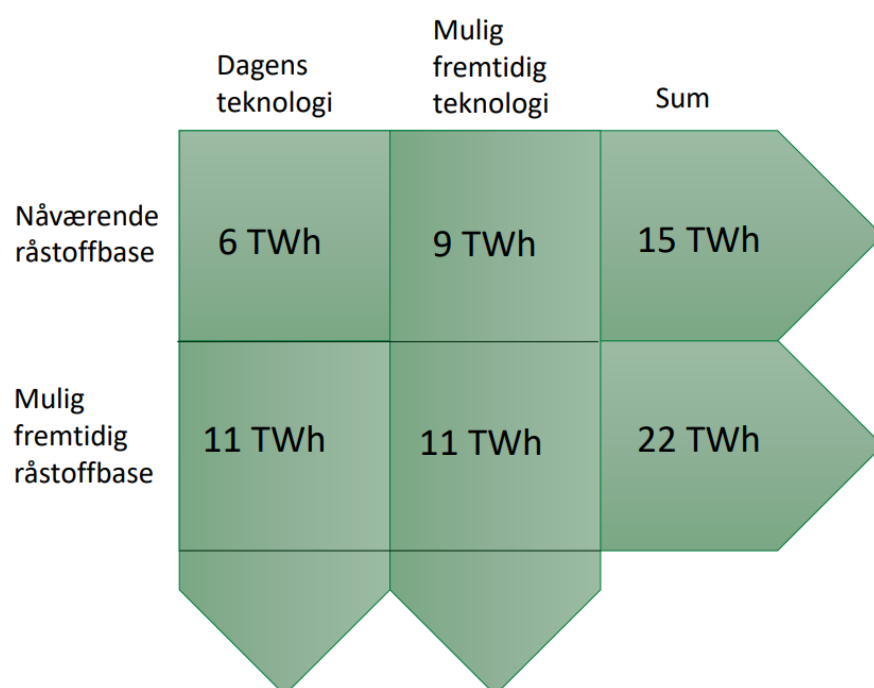
Andel tørrstoff er viktig for pumpe-mekanismen som benyttes for å føre substratet inn i biogassreaktoren, eventuelle røreverk i reaktoren og i noen tilfeller varmevekslere. Noen typer pumper har øvre toleranse på 10% tørrstoff, mens andre har høyere. Det er har vært brukt forbehandlingsmetoder med damp for å øke flyteegenskapene til substratet, og det er rapportert tørrstoffinnhold på helt opp mot 18% (Morken, Briseid, Hovland, Lyng, & Kvande, 2017).

Den hydrauliske oppholdstiden oppgis i døgn og er den tiden substratet har til å reagere i reaktoren før det pumpes videre. For lav oppholdstid kan føre til utvasking av mikroorganismer fra tanken, som igjen gir opphør av produksjonen. For lang oppholdstid vil gi lang produksjonstid og senke biogassreaktorens effektivitet. Som eksempel har mange husdyrgjødselanlegg hydraulisk oppholdstid på 25-30 døgn. (Morken, Briseid, Hovland, Lyng, & Kvande, 2017)

3.4 Potensiale for biogass i Norge

I 2019 ble det rapportert av SSB (Statistisk Sentralbyrå) at Norge produserte biogass til en energiverdi av 1 TWh. SSB har bekreftet at denne informasjonen er feil, grunnet tall som i stor grad var basert på beregninger pga. manglende datagrunnlag og dårlig innrapportering. I realiteten ble det produsert 0,7 TWh med biogass i Norge i 2021 (Norwaste, 2022).

Ferske tall viser imidlertid at det er et langt større potensiale for produksjon. Den nåværende mengden råstoff for biogassproduksjon, med dagens teknologi, gir Norge et teoretisk biogasspotensial på rundt 5,5 TWh årlig. Mesteparten av potensialet for denne økningen finnes i husdyrgjødsel og halm fra landbruket, fiskeslam fra havbruksnæringen og matavfall fra husholdning og næring. (Lyng & Berntsen, 2023)



Figur 8: Oversikt over det norske potensialet for biogassproduksjon, avhengig av teknologi (Lyng & Berntsen, 2023).

Fremtidig potensiale er vanskeligere å beregne. Dette kan gjøres ved å vurdere ambisjoner og utbyggingsplaner i de bransjene som genererer avfallet. Dersom havnæringen oppnår sine vekstambisjoner antas det et teoretisk biogasspotensial på 11,3 TWh. Dette er medregnet mål om å redusere matsvinn med 50%, noe som vil redusere tilgang til matavfall (Lyng & Berntsen, 2023). Til sammenligning er Norges største vindkraftverk per 2022 Øyfjellet vindpark i Vefsn kommune. Med sine 72 vindturbiner og 400 MW samlet produksjonskapasitet har dette anlegget en forventet årlig produksjon på 1,3 TWh (Hofstad, Vindkraftverk, 2023).

I tillegg kan begge disse tallene, både nåværende potensiale og fremtidig, kunne endres avhengig av teknologiutvikling. Figur 8 viser mulighetene for både nåværende- og fremtidig produksjonspotensiale (Lyng & Berntsen, 2023).

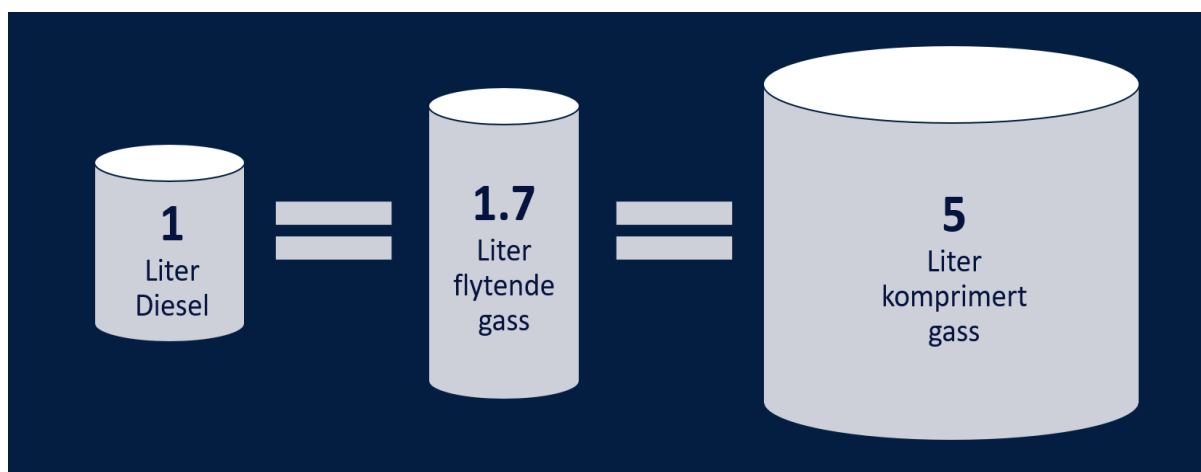
3.5 Biogass som drivstoff

Når biogass benyttes som drivstoff, er det metanet (CH_4) som er energibæreren. Det reagerer med oksygenmolekyler (O_2) og slipper ut vann (H_2O) og karbondioksid (CO_2). Dette gir reaksjonsligningen 3.1 (Avfall Norge, 2017):



Kvaliteten på biogass som skal benyttes i kjøretøy er viktig for både funksjon, pålitelighet, levetid, ytelse og for at utslippskravene skal oppfylles. Gassen må derfor «oppgraderes» etter produksjon i en biogassreaktor. Dette reguleres som regel av standarder. Norge har ingen egne standarder for produksjon av biogass til kjøretøy, og benytter seg derfor av Svensk Standard (SS 155438). Denne angir laveste tillatte energi-innhold, og den maksimale fukten som gassen kan inneholde. Naturgass reguleres av den internasjonale standarden ISO 15403 (Norsk Scania AS, 2023).

Fuktinnholdet er viktig for at gassen skal kunne benyttes i kjøretøy. Ved trykkreduksjon i en gasstank med CNG, kan temperaturen synke så lavt som til $-80\text{ }^\circ\text{C}$. Dersom gassen inneholder fuktighet vil dette kunne gi isdannelse. Ved høyt trykk og lav temperatur vil fuktighet også kunne danne metanhydrat. Dette er et svært brennbart stoff med krystallinsk struktur og kan se ut som is. Stoffet smelter ved økende temperatur, men vil kunne etterlate restprodukter som gir forurensing i drivstoff-systemet (Norsk Scania AS, 2023).



Figur 9: Figur som viser ekvivalent energi-innhold til en liter diesel (Norsk Scania AS, 2023).

Det er også viktig å være klar over at en liter CNG eller LNG ikke inneholder like mye energi som en liter diesel. Figur 9 viser hvor mye energi flytende og komprimert gass inneholder i forhold til diesel.

3.6 Fyllestasjoner

Det var i 2019 kartlagt totalt 3583 fyllestasjoner for CNG og 210 for LNG i Europa. Av disse var 21 CNG-stasjoner og 1 LNG-stasjon i Norge. I ledelsen over antall fyllestasjoner finner vi Italia, med 1284 CNG stasjoner og 50 for LNG. Tyskland er like bak, med 849 stasjoner for CNG, mens Spania har nest flest LNG-stasjoner med 41 stykker (Natural Gas Vehicle Association Europe, 2019).

I 2023 viser kartlegging gjort av Biogass Norge 7 LNG-stasjoner i landet. De 21 fyllestasjonene for CNG står uendret. Kartet viser imidlertid også at det er 18 stasjoner planlagt eller under utbygging. Disse 18 stasjonene er både CNG- og LNG-stasjoner, men det er foreløpig ukjent hvilke av stasjonene som skal tilby hvilke former for gass (Biogass Norge, 2023).

I dag eksisterer det ikke fyllestasjoner for gass nord for Trondheim, hverken for CNG eller LNG. Det er derimot planlagt tre LNG-stasjoner med forventet åpning i september 2025. Disse er plassert i Narvik, Tromsø og Alta. Dette vil øke LNG-rekkevidden i Norge betraktelig (Biogass Norge, 2023).

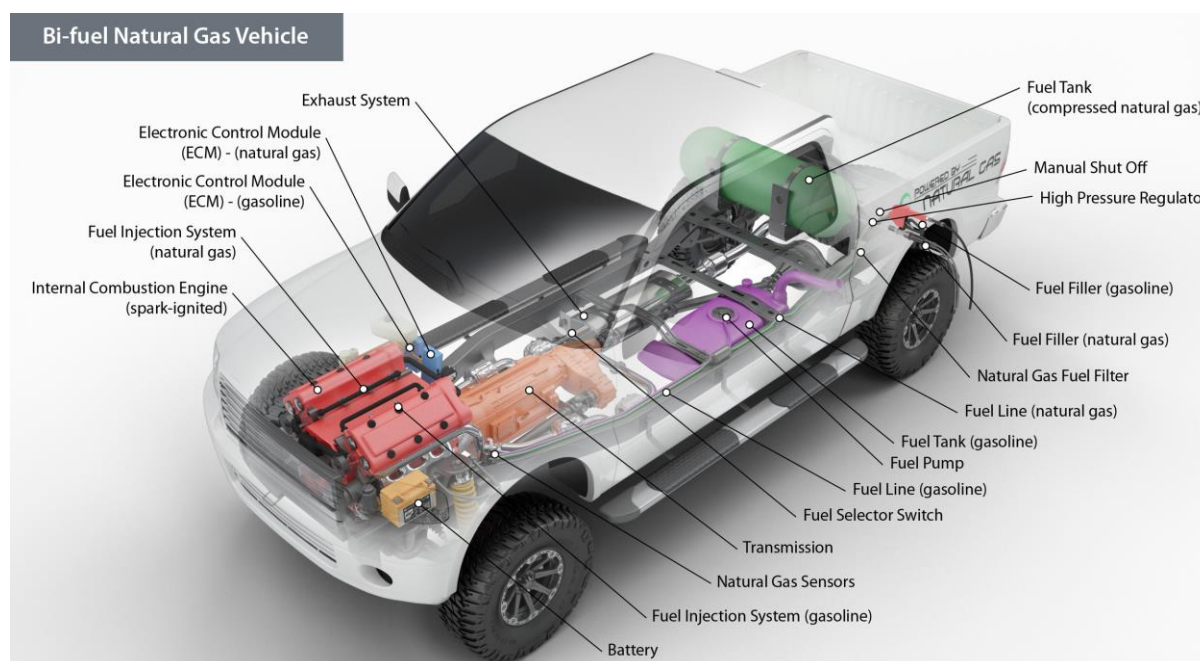
4. Teori vedrørende gasskjøretøy

Dette kapittelet gjennomgår noe grunnleggende teori som angår gassdrevne kjøretøy.

4.1 På hvilke kjøretøy er gass aktuelt i dag?

For å kunne bruke gass til å drive et kjøretøy må man først og fremst ha et sted å lagre gassen. Dette i seg selv setter noen begrensninger på bruken av CNG og LNG i biler, da tankene tar plass. Jo større rekkevidde man er avhengig av, jo større må kjøretøyet være. Ut ifra informasjonen i avsnitt 3.5 vet vi at 1 liter diesel tilsvarer ca. 1,7 liter LNG, eller 5 liter CNG. Dersom vi antar en tank på 50 liter diesel i et kjøretøy, må vi ha en 250 liter tank for å kunne bruke CNG under 200 bar. Ved bruk av LNG vil det «bare» være behov for en 85 liter tank, men dette er fremdeles en økning på 70 % volum.

Av dette ser vi at det i personbiler er lite aktuelt med rene gassmotorer av plass-messige hensyn. Det finnes likevel flere steder i verden der det bruker såkalte «bi-fuel» motorer. Figur 10 viser et eksempel på et kjøretøy med en slik løsning. Disse bruker som oftest både bensin og CNG, og benytter CNG ved bykjøring. Tanken bak denne typen hybrider er nokså lik den bak el-hybridene vi er vant med i Norge.



Figur 10: Fremstilling av et typisk bi-fuel kjøretøy som drives på både bensin og CNG. (U.S. Department of Energy, 2023)

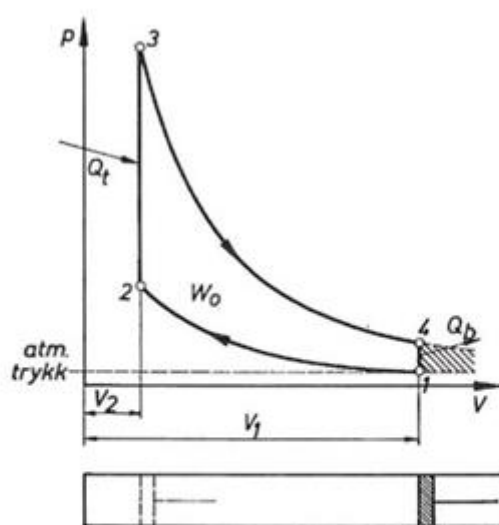
Den siste typen gassmotor som benyttes er «dual-fuel» løsningen. Denne typen kjøretøy drives på både gass og diesel. Forskjellen er derimot at mens bi-fuel-variantene kjører på begge typer drivstoff avhengig av behov, bruker dual-fuel-typen diesel for å starte og varme motoren og tenningsystem. Når motoren så er klar, går kjøretøyet over til å bli et rent gasskjøretøy.

4.2 Forbrenningsteori

Dette kapitlet tar for seg noen viktige punkter med grunnleggende forbrenningslære.

4.2.1 Ottoprosessen

Ottoprosessen benyttes i ottomotorer og kjennetegnes ved forløpet vist på figur 11. En ottomotor kan identifiseres ved at brenselet er til stede i motorens sylinder når tenningen inntreffer. Dette innebærer en rask forbrenning, der stempelet ikke får tid til å bevege seg nevneverdig mens selve forbrenningen pågår. Ved beregninger kan man derfor «realistisk» forutsette varmetilførsel under konstant volum når man snakker om ottomotorer. Dette er hjelpsomt ved regning på prosesser, avgasser osv. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)



Otto prosessen.

- 1–2: Adiabatisk kompresjon
- 2–3: Forbrenning (varmetilførsel) under konstant volum
- 3–4: Adiabatisk ekspansjon
- 4–1: Gassutveksling (varmebortførsel) under konstant volum

Figur 11: Illustrasjon av ottoprosessen. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

4.2.2 Motorens luftbehov og drivstoffmiks

Det viktigste for en forbrenningsmotor ved siden av drivstoff, er luft. Vanlig forbrenningsteori gir noen måter å måle luftbehov på.

λ , eller lambda som den greske bokstaven heter, beskriver i forbrenningsteorien noe som kalles luftfaktor. Luftfaktoren representerer det blandingsforholdet som er mellom luft og drivstoff i en forbrenning. Ligning 4.1 viser beregningsmetoden for luftfaktor:

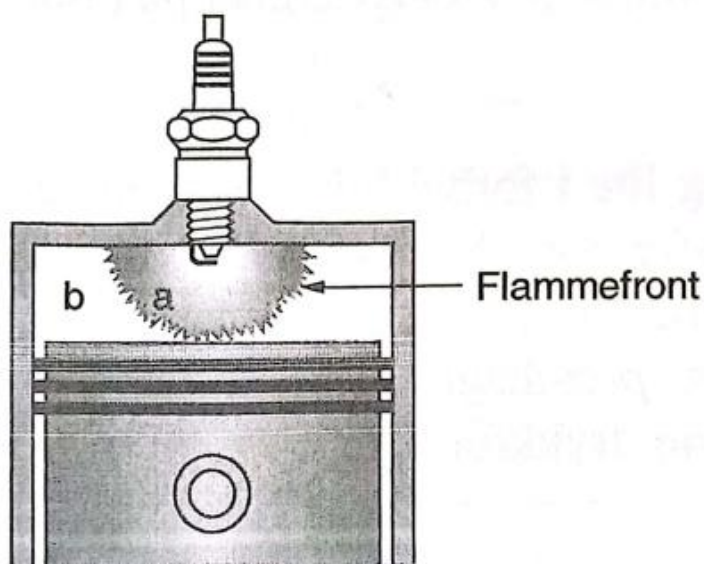
$$\text{Luftfaktor } \lambda = \frac{\text{Virkelig blandingsforhold}}{\text{Teoretisk blandingsforhold}} \quad (4.1)$$

Det teoretiske blandingsforholdet er det blandingsforholdet som gir nøyaktig så mye luft og drivstoff at alle molekylene i blandingen reagerer med hverandre. Dette teoretiske blandingsforholdet kalles støkiometrisk blandingsforhold. Ved bruk av metangass i motorer er det to typer drivstoffmiks som er aktuelle; Støkiometrisk ($\lambda=1$) eller mager. Blandingsforholdet mellom luft og drivstoff varierer i magre gassblandinger, men kan være så høyt som $\lambda = 1,7$ (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002).

Støkiometrisk forbrenning innebærer altså at det er likt forhold mellom luft og drivstoff i sylindere ved forbrenning. Denne typen forbrenning gir en lavere effektivitet for motoren som helhet enn om man benytter mager blanding. Det gir derimot en høyere drivstoffeffektivitet, da det sløses mindre drivstoff. En typisk sidevirkning av dette er at motoren får en høy temperatur. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

4.2.3 Bankefasthet og kompresjonsgrad

For at en forbrenningsmotor skal fungere er det flere faktorer som må være på plass. En av de viktigste tingene er at forbrenningen må skje kontrollert. Ladningen i sylindere må antenne på ønsket tidspunkt, og en for tidlig/for sen antenning kan være et kritisk problem. Det vil ofte føre til at forbrenningstakten kolliderer med svingningstakten til stempelet, noe som skaper sjokkbølger. Disse vibrasjonene vil utsette interne komponenter i motoren for større belastninger enn de er designet for. Stemplene og lagre er særlig utsatt for skader (Hofstad, Bankefasthet, 2023). Når selvtenning skjer i en ottomotor, får vi det man kaller motorbank (evt. banking). På bakgrunn av dette er det nyttig å ha et mål på hvor lettantennelig et drivstoff er, eller rettere sagt, hvor stor evne stoffet har til å motstå selvtenning. Som mål på dette brukes *oktantall*. Jo høyere oktantal et stoff har, jo mer *bankefast* er altså stoffet (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002). Naturgass har et oktantal rundt 130, mot bensin som i Norge har ca. 95 eller 98, avhengig av type (Hagman, 2002). Det finnes to typer oktantal, Research Octane Number (RON) og Motor Octane Number (MON). I Norge bruker vi RON ved salg av bensin.



Figur 12: Illustrasjon av flammefront og forbrenning av ladning i en ottomotor. a er forbrant ladning, og b viser uforbrant ladning. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

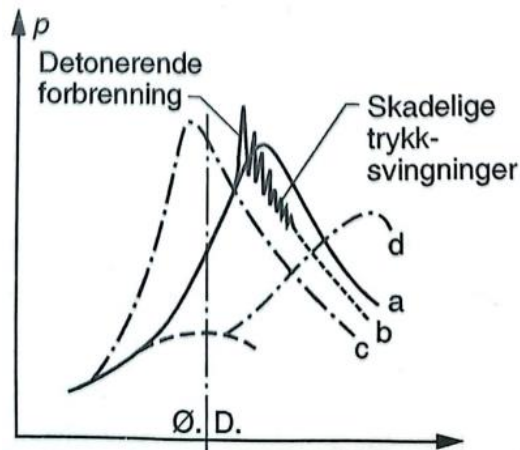
Naturgass er i prinsippet veldig bankefast. Dersom man derimot blander inn propan eller butan, noe som er vanlig i utvalgte gassblandinger rundt om i verden, vil drivstoffet likevel kunne selvtenne. Man må da bruke kontrollerende midler for styre forbrenningen i motoren (Basshuysen, 2016).

Kompresjonsgraden er en annen viktig faktor i ottomotorer som i stor grad bestemmer motorens funksjon og effektivitet. Jo høyere kompresjonsgrad motoren har, jo mer effektiv er den. Dette innebærer mer kraft og lavere forbruk av drivstoff, fordi motorens termiske virkningsgrad øker i takt med kompresjonsgraden. Man kan

derimot ikke ha for høy kompresjonsgrad i en ottomotor. For å få klarhet i årsaken til dette må vi først forstå et fenomen som kalles *detonerende forbrenning*. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002). Dette er en form for unormal forbrenning som kan finne sted i en motorsylinder under bestemte forhold.

4.2.4 Unormal forbrenning

Den ønskede forbrenningsformen i en ottomotor innebærer at drivstoffblandingen antennes av en gnist fra tennpluggen. Man vil deretter få en flammefront som beveger seg progressivt gjennom blandingen. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002). Figur 12 på forrige side viser en illustrasjon av forbrenningen slik den skal foregå. Dette kapitlet tar for seg noen typer unormal forbrenning som kan oppstå.



Figur 13: Trykk-diagram som viser unormale forbrenningsprosesser i ottomotorer.

a viser normalt trykkforløp, b viser detonert forbrenning, c viser trykkforløpet ved overflatetenning og d viser for sen tenning. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

Detonerende forbrenning er et fenomen som finner sted når kompresjonsgraden i motoren er for høy. Når drivstoffet komprimeres for mye og temperaturen når et bestemt punkt, vil det kunne skje en selvtenning. Graf b på figur 13 viser hva som skjer dersom man får en slik forbrenning. I tillegg til slag-lignende påkjenninger ser vi at trykket går over maksimalverdi, som innebærer belastninger større enn det motoren tåler. Man får i tillegg tap av effekt i motoren, da mer energi går tapt i form av varme. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

Overflatetenning, også kjent som glødetenning, innebærer at tenningen ikke innledes kun fra gnisten, men også fra et annet punkt i forbrenningskammeret.

Dette kan være en lomme med drivstoff som antennes av en overopphetet avgassventil, eller glødende avleiringer av for eksempel sot. Overflatetenning identifiseres ofte ved at motoren ikke umiddelbart slutter å gå når man skrur av tenningen, dersom den like før har vært hardt belastet (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002).

For tidlig tenning er den siste varianten av unormal forbrenning, og gir reduksjon av både effektiv virkningsgrad, spesifikt arbeid og akseleffekt. Forbrenningen gir best resultat når den detonerer nærmest mulig stampelets øvre dødpunkt. For tidlig tenning skyver dermed tenningen bort fra dødpunktet og reduserer arbeidsflaten (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002).

4.2.5 Utslipp av klimagasser

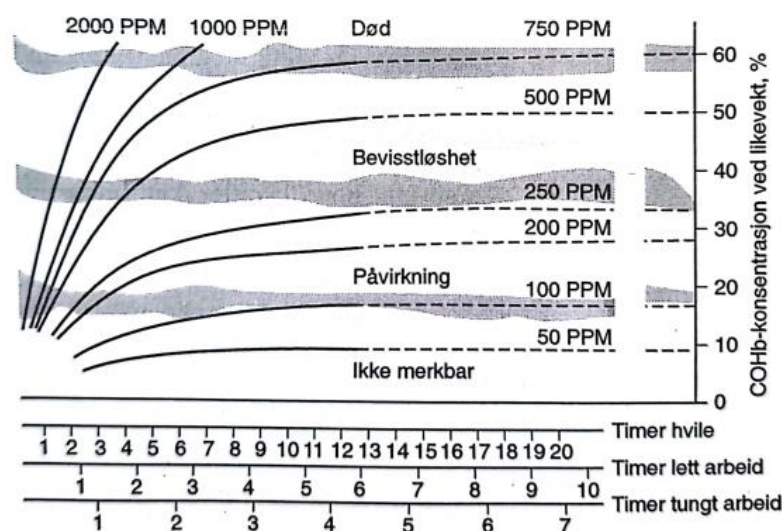
Som kjent slippes det ut noen skadelige avgasser ved bruk av forbrenningsmotorer. Utslippene avhenger av mye, fra motortype til hvilket drivstoff som benyttes. Dette kapitlet gir oversikt over de viktigste skadelige stoffene som slippes ut ved bruk av ottomotorer.

Først og fremst er det hensiktsmessig å se på årsaken til at vi vil forhindre utslipp til å begynne med. Det er tre forurensingsgrupper vi bør være klar over her, *global* forurensing, *regional* forurensing og *lokal* forurensing. Den første er den mest kjente og innebærer utslipp av drivhusgasser globalt. CO_2 er gassen de fleste forbinder dette med, da det er den *drivhusgassen* vi slipper ut mest av. Det dannes ca. 3 kg CO_2 per kg brensel som brukes i et kjøretøy (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002). Regional forurensing gir oss sur nedbør. Dette er et resultat av SO_2 og NO_x , som slippes ut av industri, oljefyring, varmekraftverk og kjøretøy. Kjøretøy i Norge er i dag utstyrt med katalysator (katalytisk omformer), så bilparken her til lands har nok lavere (men fremdeles betydelige) utslipp av NO_x enn andre land. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

Den siste gruppen, lokal forurensing, inkluderer utslipp fra industri, private husholdninger pga. olje- og vedfyring, utslipp fra kjøretøy og bruk av piggdekk. Dette er gruppen vi er mest opptatt av i dette kapitlet. Avgassene fra en motor inkluderer følgende skadelige stoffer:

- Karbonmonoksid (CO)
- Hydrokarboner (HC)
- Nitrogenoksid (NO_x)

For å forstå de skadelige effektene disse har på menneskets helse, må vi først se på hvordan lungene tar opp oksygen. Kroppen tar til seg oksygen ved hjelp av stoffet hemoglobin (Hb). Dette stoffet har en affinitet for O_2 , og danner O_2Hb . Deretter fraktes oksygenet med blodet dit det er behov for det. Denne prosessen blir sårbar dersom man skulle puste inn gasser med stoffer som hemoglobin



Figur 14: Sammenheng mellom karbonmonoksid i innåndingsluft, COHb i blodet og tid under påvirkning. Andel CO måles i parts per million (ppm). 1% av innåndingsluften = 10 000 ppm. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

prioriterer høyt. Hemoglobin har ca. 200 ganger større affinitet for karbonmonoksid enn for oksygen (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002). Man får dermed redusert evne til å ta opp oksygen. Dette er årsaken til at man trenger direkte avslag av avgasser dersom motorer skal gå innendørs. Figur 14 viser sammenhengen mellom andel CO i innåndingsluft og påvirkningen dette har på mennesker. Hvor mye hemoglobin som hemmes av CO er avhengig av CO-konsentrasjonen i lufta. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

Hydrokarboner (også benevnt HC) omfatter alle brensel-molekylene som unnslipper forbrenningsprosessen. Det er også noen stoffer som danner nye hydrokarboner (dvs. unngår oksidasjon). Dette avhenger av hvilket brensel som benyttes, men noen eksempler er

H_2 , C_2H_2 eller C_2H_4 . Flere av disse stoffene er kreftfremkallende. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

Nitrogenoksid (NO_x) er fellesbetegnelsen på NO og NO_2 . Disse to gassene er de nitrøse gassene vi er opptatt av ifbm. luftforurensing fra kjøretøy. I likhet med CO har NO en stor affinitet for hemoglobin, og danner raskt $NOHb$ dersom gassen er tilgjengelig i innåndingsluft. Man skulle forvente at dette var like skadelig for oksygenopptaket som med CO , men virkningene av NO er forbausende moderate. Nitrogendioksid har på sin side klare biologiske skadevirkninger. NO_2 løses i fuktigheten i slimhinnene og danner salpetersyre. Syra er sterkt irriterende og gir hoste, opphovning av slimhinner og væskedannelse i lungene. Den kan også øke risikoen for lungesykdommer. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

4.2.6 Katalysator

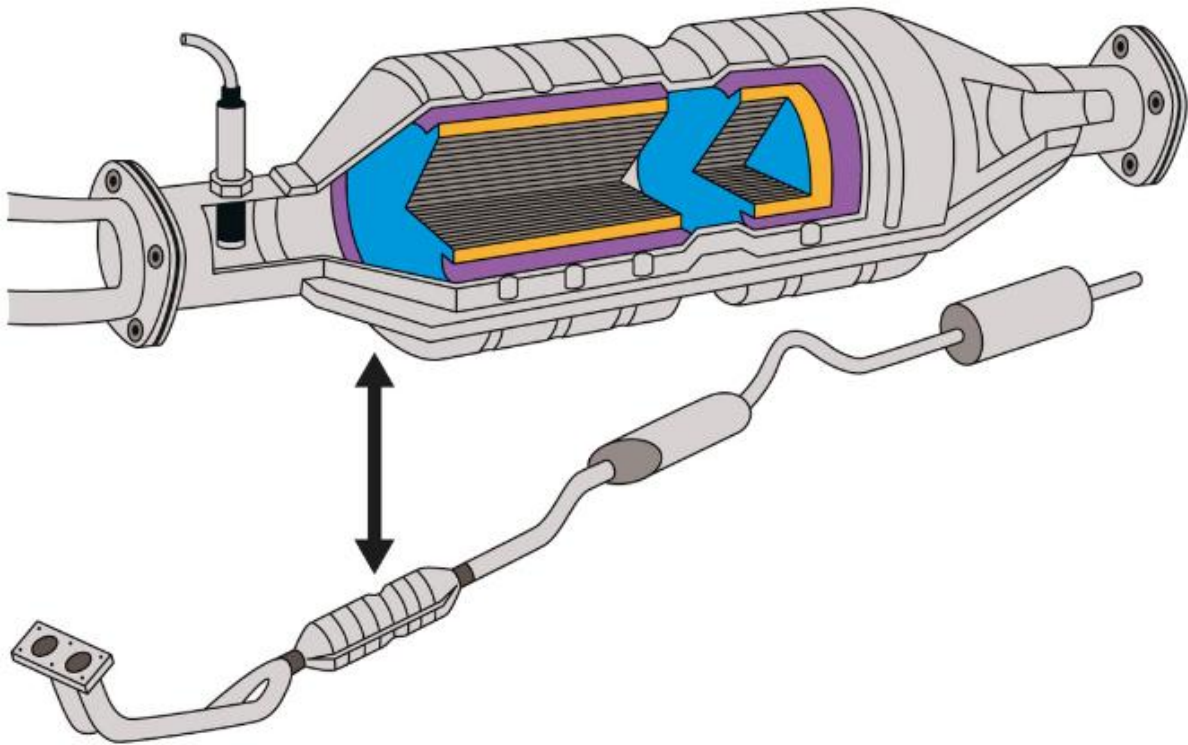
En katalysator i et kjøretøy er i prinsippet et system for rensing av avgasser. De monteres i eksosanlegget og «katalyserer» gassene fra forbrenningen i motoren, slik at skadelige stoffer ikke formes slik de ville gjort ved utslipp direkte til luft. Det er påbudt med katalysator på biler i Norge for kjøretøy laget i 1989 eller senere. (Wikse, 2023)

Ordet katalysator brukes egentlig om et kjemisk stoff som øker reaksjonshastigheten mellom andre stoffer uten selv å delta i reaksjonen. Likevel brukes det ofte om selve utstyrsenheten. Andre ord som benyttes for katalysatorinnretningen er katalytisk konverter, katalytisk omformer, katalytisk etterbrenner og katalytisk reaktor (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002). Denne rapporten vil konsekvent bruke katalysator for å beskrive utstyrsenheten.

En katalysator består som regel av en keramisk blokk med aluminiumoksid (Al_2O_3). Blokka har tynne kanaler som maksimerer flaten som kommer i kontakt med avgassene fra motoren. Disse kanalene er belagt med små mengder av edelmetallene platina, rhodium og palladium. Dette er årsaken til at man sluttet med blyholdig bensin, da bly gjør disse metallene katalytisk inaktive (Wikse, 2023). Det finnes flere typer katalysatorer, men den vanligste er treveiskatalysatoren. Årsaken til at det finnes mange varianter er naturlig nok at både drivstofftype og blandingsforhold bestemmer hvilke avgasser som kan katalyseres, samt hvilken effektivitet dette vil ha. For oversikts skyld kan vi nevne noen eksempler.

En oksidasjonskatalysator oksiderer hydrokarboner (HC) og karbonmonoksider (CO) til karbondioksid (CO_2). Den kan kun brukes av motorer som benytter mager blanding. (Wikse, 2023)

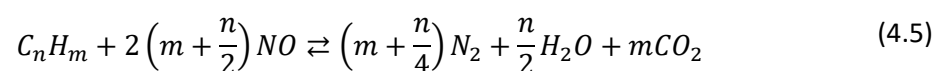
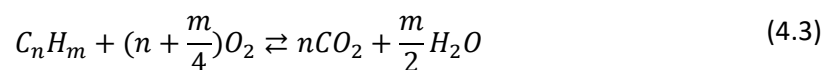
Dobbeltkatalysatoren består av to keramiske blokker plassert etter hverandre, med lufttilførsel mellom dem. En blokk reduserer nitrogenoksidene, og den andre oksiderer hydrokarboner og karbonmonoksider. Denne typen katalysator har en reduksjonsgrad på 70-80% ifht nitrogenoksidene, mens hydrokarbonene og karbonmonoksidene fjernes nesten fullstendig. (Wikse, 2023)



Figur 15: Illustrasjonsbilde av en treveis katalysator. Sensoren i fremre (venstre) del av konstruksjonen er lambda-sonden. (Wikse, 2023)

Treveiskatalysatoren (også kalt tregasskatalysator, se figur 15) reduserer utslippene av alle de tre avgassene NO_x , HC og CO , med om lag 94% (Wikse, 2023). Disse tallene er avhengige av lambda-forholdet (luftfaktoren), og for at denne katalysatoren skal være en ideell løsning kreves det at motoren er støkiometrisk ($\lambda = 1$). (Wikse, 2023)

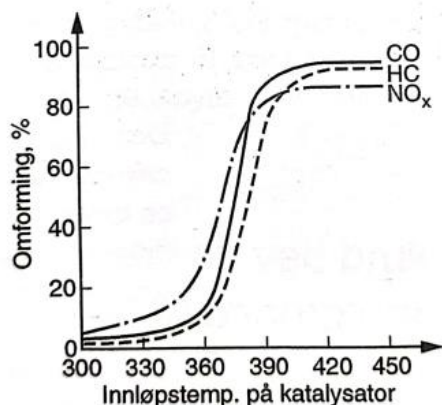
Behandling av NO er typisk vanskeligere enn behandling av HC og CO . Årsaken til dette ser vi av de kjemiske ligningene for reaksjonene i katalysatoren. Vi ser dette av reaksjonsligningene 4.1 – 4.4. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)



Prosessene i ligning 4.2 og 4.3 er oksidasjoner av karbonmonoksid og hydrokarboner. Disse prosessene er kun avhengige av tilgang på oksygen for å kunne reagere. Dette er lett synlig på ligningene, da det kun legges til et oksygenatom. Ligningen 4.4 er derimot reduksjoner av NO . Disse

avhenger av fjerning av oksygen fra NO -molekylet (derav reduksjon). Kjemisk sett er slike reaksjoner vanskeligere å realisere. Det kan brukes platina for å gjennomføre reaksjonen, men man er avhengig av et oksygenfattig (helst oksygenfritt) miljø i katalysatoren. Ligning 4.5 viser en alternativ reduksjon, der man bruker hydrokarboner for å redusere NO . (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

Til slutt bør det nevnes at en katalysator kun får virkning når den har nådd en bestemt temperatur.

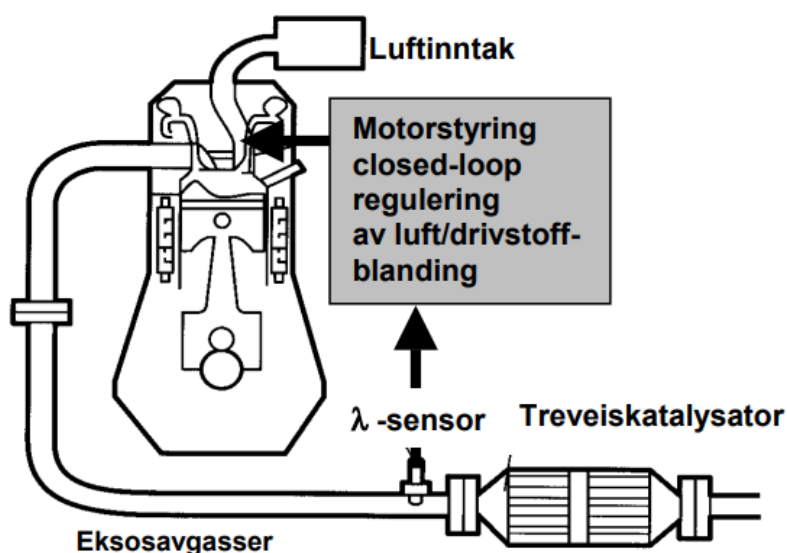


Man sier at katalysatoren «tenner» når den passerer ca. 350 °C (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002). Figur 16 viser effektiviteten på katalysatoren som funksjon av avgassens temperatur. Her ser vi at virkningsgraden øker drastisk fra 360-390 °C. Dersom temperaturen skulle stige over 800-1000 °C vil dette være skadelig for omformerer og senke levetiden, og temperaturer på over 1400 °C vil kunne ødelegge den fullstendig. Levetiden til en katalysator settes ofte til minimum 100 000 km (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002).

Figur 16: Effektivitet som funksjon av avgassens temperatur for katalytisk omformer. (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002)

4.2.7 Lambdasensoren

For at katalysatoren skal fungere optimalt må først og fremst blandingsforholdet mellom luft og bensin holdes innenfor et bestemt, avgrenset område. For å oppnå dette må oksygenivået i forbrenningen kontrolleres av styreenheten til motoren. Ved å måle oksygeninnholdet i avgassene kan styreenheten regulere luftinntak og drivstoffmengde slik at blandingsforholdet blir riktig (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002). Figur 17 viser ett eksempel på en typisk utforming av et system med lambdasensor.

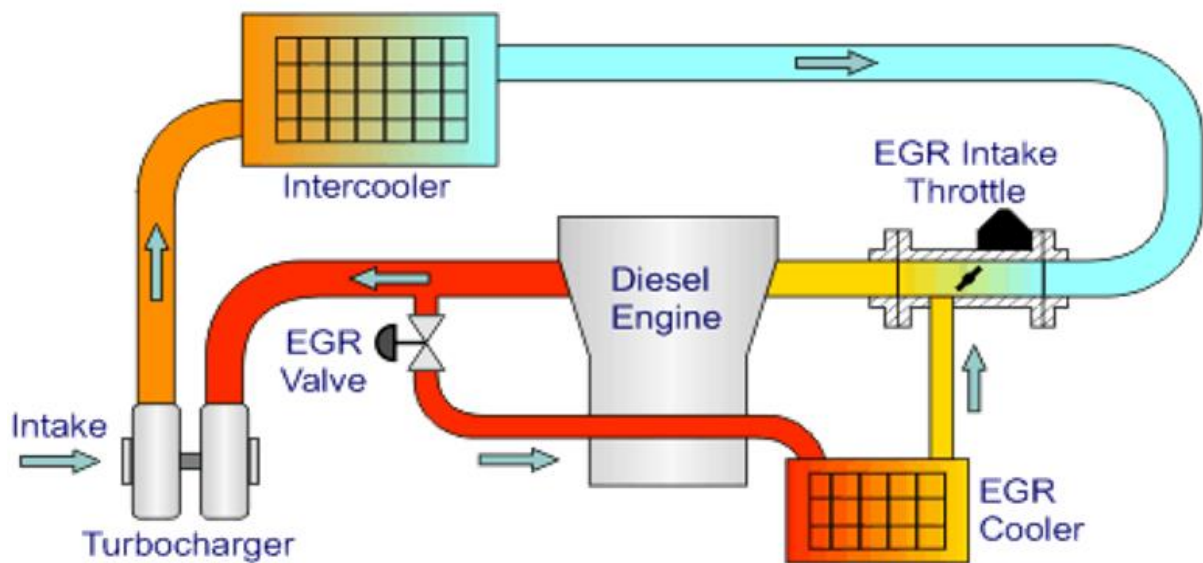


Figur 17: Illustrasjonsbilde av en ottomotor med closed-loop lambda-regulering og treveis katalysator. (Hagman, 2002)

4.2.8 EGR (Exhaust Gas Recirculation)

Resirkulasjon av avgasser er en teknologi som kan hjelpe til med å løse utvalgte utfordringer med både utslipp og forbrenning i motoren. Fra tidligere avsnitt (kap. 4.2.5) har vi sett at NO_x er vanskeligere å fjerne fra avgassene til motoren da dette krever en kjemisk reduksjon ved fjerning av oksygen fra molekylet. Dette krever et oksygenfattig miljø, som ikke er like enkelt å skape som et oksygenrikt miljø (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002).

Et alternativ til dette er å benytte EGR (Eksos Gass Resirkulering). Dette innebærer at motoren sender en del av avgassene i eksosen tilbake til forbrenningen, via en EGR-ventil (Basshuysen, 2016). Figur 18 viser et system med ytre resirkulasjon, benyttet på en dieselmotor. Løsningene som brukes på gassmotorer er av samme type som ved diesel.



Figur 18: Illustrasjonstegning av EGR på en diesel-motor (Norsk Scania AS, 2023).

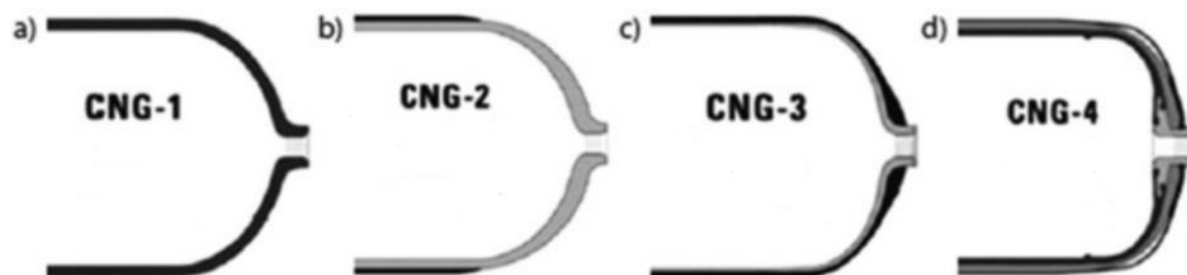
EGR kan foregå på to måter, ved enten indre eller ytre resirkulasjon. Indre resirkulasjon innebærer at avgass suges tilbake forbi avgassventilen mens denne er åpen i overlappingsperioden. I slike systemer reguleres mengden avgass i forbrenningen ved hjelp av ventilstyring. Denne metoden gir både redusert NO_x -dannelse og redusert forbruk av drivstoff når motoren arbeider ved delast (Lundby, Moen, & Myklebostad, 2002). Ytre resirkulasjon skjer ved en egen, dedikert EGR-ventil som tar ut avgasser fra eksosen etter forbrenning. Avgassene kjøles, før de slippes tilbake i forbrenningen sammen med ny luft og drivstoff (Norsk Scania AS, 2023).

EGR er nyttig for å senke temperaturen i forbrenningen til motoren, og følgelig temperaturen på avgassene. Det er også et generelt virkemiddel for å unngå banking (detonerende forbrenning). EGR har god effekt i gassdrevne ottomotorer. (Norsk Scania AS, 2023).

4.3 Lagring av gass i kjøretøyene

4.3.1 Tanktyper

Det er fire tanktyper som er brukt på CNG- drevne kjøretøy i dag, alle med sine fordeler og ulemper. Forskjellene er hovedsakelig hvilke materialer som brukes. Alternativene er enten å lage tanken i metall, metall med kompositt-deler, metall trukket i kompositt, eller plastikk trukket i kompositt. (Basshuysen, 2016)



Figur 19: Illustrasjon av de fire vanligste tanktypene i CNG-kjøretøy. F.v. Tank i full-metall, metalltank med en kompositt-sylinder, metalltank med komposittkledning, og plastikk tank med komposittkledning. (Basshuysen, 2016).

Den første typen, tanker av full-metall (Figur 19, a), lages som regel i varmebehandlet stål. Disse tankene tåler belastninger godt, både fra gassen og eventuelle ytre krefter, f.eks. ved en kollisjon. Nedsidene er høy vekt og en risiko for korrosjon, som må holdes øye med. Tankene kan veie så mye som en kg per liter. (Basshuysen, 2016)

For å løse problemene til tanker i rent metall, ble det utviklet tanker av plast (Figur 19, d) forsterket med fibermaterialer (ofte karbon- eller glassfiber). Prisen på disse er vesentlig høyere, spesielt ved bruk av karbonfiber, men de veier mindre og er ikke utsatt for korrosjon. Fiber-materialer har gode mekaniske egenskaper ved bruk i sylindrerformede tanker med trykk innenfra. Vekten på denne typen tank kan komme så langt ned som 0,35 kg/l (Basshuysen, 2016). Disse tankene har også noen problemer, der to av dem er viktige momenter som bør nevnes. Det ene er at plast ofte vil utsettes for «gjennomtrengning». Dette innebærer at man får diffusjon av metanet i gassen, som binder seg til plasten i den indre delen av tanken. Gjennomtrengningen vil bestemme i hvilke bruksområder tankene kan ha, da raske trykkfall kan føre til at metanet i plasten ekspanderer. Dette vil kunne gi brudd i tanken og er et fenomen som kalles «liner buckling» på engelsk (Basshuysen, 2016). Med riktig materialvalg kan dette problemet unngås. Det andre potensielle problemet er at tankene må skjermes for permanent UV-stråling. Dette er mindre problematisk når tankene monteres under kjøretøyet, men på kjøretøy som f.eks. personbiler med lasteplan er tankene ofte montert mellom kabinen og lasteplanet. De har da et UV-deksel over tankene, og dette må ikke fjernes. Kunden som kjøper kjøretøyet må informeres om dette, og tankprodusenten må ha gode rutiner for lagring av tankene før levering (Basshuysen, 2016).

Den tredje tanktypen (Figur 19, c) har en indre tank av metall (oftest aluminium) som så er trukket i fiberkompositt. De samme egenskapene som er gitt for kompositten i plast-tankene (type d) er aktuelle i disse. Indre tanker av metall er dyrere enn plastikk-alternativet og benyttes derfor mer i busser og næringskjøretøy enn i personbiler (Basshuysen, 2016).

Den siste typen tank (figur 19, b), er tanker av rent metall, oftest stål, som igjen har et lag av kompositt som dekker deler av tanken. Disse er utsatt for korrosjon, spesielt i områder hvor det samler seg fukt (Basshuysen, 2016).

4.3.2 Ventilsystemer for CNG

Det finnes mange varianter av ventilsystemer for bruk på gasstanker til kjøretøy. Dette kapittelet tar for seg en av de vanligere kombinasjonene for tanker med CNG. Et eksempel er vist på figur 20.



Figur 20: Seksjonsnutt av et eksternt ventilsystem på en CNG tank (Basshuysen, 2016).

Det viktigste med konstruksjonen som inneholder de nødvendige ventilene (ventilsettet) er sikkerhetsaspektet. Alle tiltakene som sikrer tanken mot eksplosjon, sitter her. Det er i denne forbindelse to ventiltyper som er svært viktige å nevne; T-PRD (Thermal-triggered Pressure Relief Device) og P-PRD (Pressure-triggered Pressure Relief Device).

En vanlig konstruksjonsmetode for termisk aktiverte ventiler er f.eks. eutektisk, smeltbart loddetinn, eller kuler av glass fylt med en form for væske. For å vise funksjonen kan vi ta kule-varianten som eksempel. Når væsken i glasskula blir for varm, vil den ekspandere og knuse kula. Dette løser en avstengningsenhet i ventilen, og åpner for utslipp av gass fra tanken. Slike løsninger kan naturligvis ikke stenges igjen når de først er åpnet, og er nødventiler. Temperaturgrensen for aktivering er vanligvis rundt 110 °C) (Basshuysen, 2016).

P-PRD (Pressure-triggered Pressure Relief Device) er en lignende løsning, som reagerer på trykk i stedet for temperatur. Ventilsettene er ellers utstyrt med en manuell avstengningsventil, og en elektrisk magnetventil for åpning og lukking av tanken etter behov. Den elektriske magnetventilen styres av motorens styreenhet (Basshuysen, 2016).

4.4 Sikkerhetsaspekter

4.4.1 Standarder og regelverk

Det er per i dag ingen standarder og regelverk for gassdrevne kjøretøy i Norge. Dette inkluderer også servicearbeid på verksted. Bransjen har etterlyst retningslinjer fra staten ved flere anledninger, men foreløpig er det uklart om teknologien er noe norske myndigheter vil satse på. Dette leder til begrenset forskning og utbygging, da bedriftene ikke tør å investere tungt før de vet om teknologien er trygg å satse på. (Grimstad, 2023)

Norge har heller ikke noen egne forskrifter om hvordan sikkerheten skal ivaretas ved konstruksjon av deler for bruk i gasskjøretøy. Vi har derfor tatt inn de europeiske standardene og følger disse.

Noen viktige standarder som angår naturgass i kjøretøy i Europa, inkluderer:

- ECE R110 (lagring av naturgass i kjøretøyer, bestemmer blant annet at CNG skal ha 200 bar ved 15 grader celsius. Foreløpig har standarden ikke noen føringer for LNG-deler, men dette er ventet å komme snart (Norsk Scania AS, 2023).
- ISO 11439: Gass-sylindere
- ISO 14469 Del 1-3: Bestemmelser om kobling for fylling av drivstoff for CNG kjøretøy.
- ISO 15500 Del 1-19: Bestemmelser gjeldende komponenter til drivstoff-systemet i CNG-kjøretøy (De delene som er i kontakt med naturgass).
- Euro 6 standarden, med tittelen «Emissions from heavy-duty vehicles».

4.4.2 Sikkerhet i kjøretøyet

Ved bruk av gass i kjøretøy er man ofte mest opptatt av sikkerhet. Mens bensin og diesel ligger på tanken frem til du har bruk for den, er gass en mer uforutsigbar form for energi. Potensielle endringer i trykk og temperatur gjør at man må ha respekt for kreftene dette kan medføre.

Komprimert gass lagres ved 200 bar i kjøretøy. Dette virker kanskje ikke voldsomt, men noen bilder og ulykker gir oss et inntrykk av kreftene som er i sving. Figur 21 viser et bilde fra en ulykke i Sverige. Det oppstod en skade på tanken, og ved belastning under fylling sprakk den. Den påfølgende sjokkbølgen fra gassens ekspansjon gjorde store skader på kjøretøyet, og vrengte stålfelgen foran tanken. Det gikk imidlertid bra med føreren, som var på andre siden av kjøretøyet (Norsk Scania AS, 2023). Det samme gjelder LNG, der det er temperaturen som må tas hensyn til. Flytende LNG vil ved temperaturer under $-164\text{ }^{\circ}\text{C}$ forårsake alvorlig kroppsskade dersom man skulle få det på seg.



Figur 21: Ulykke i Sverige, der en CNG-tank fikk en skade og sprakk. Kreftene fra gassens ekspansjon vrengte felgen (Norsk Scania AS, 2023).

Den 29 januar 2010 skjedde det en gassulykke ved Nynäsvägen i Stockholm, Sverige. To personer forsøkte å fylle et kjøretøy med CNG som ikke var laget for det. Munnstykket på fyllestasjonen var ikke kompatibel med tanken, men mannen benyttet en overgang som ikke var godkjent. Dette resulterte i

en eksplosjon. Sikkerhetssystemet på stasjonen fungerte som det skulle, og ulykken forårsaket ikke lekkasje eller skader på det faste anlegget. Begge personene som forsøkte fyllingen ble derimot alvorlig skadd (Norsk Scania AS, 2023).

Det er ikke farligere å kjøre med gass enn med andre drivstoff. Det viktige er at man tar forholdsregler:

- Alle individuelle komponenter må sertifiseres. Normalt gjøres dette av delens produsent.
- Deretter må hele kjøretøyet sertifiseres, i en helhetlig sammenheng.
- I Europa gjøres sertifiseringen ved å følge standarden ECE R110. Dette er en europeisk standard, men den godtas i de fleste land. Merk at denne standarden foreløpig ikke inneholder føringer for LNG-relaterte deler (Norsk Scania AS, 2023).
- Man må også være oppmerksom ved reparasjoner, ved å kun benytte seg av godkjente reservedeler.

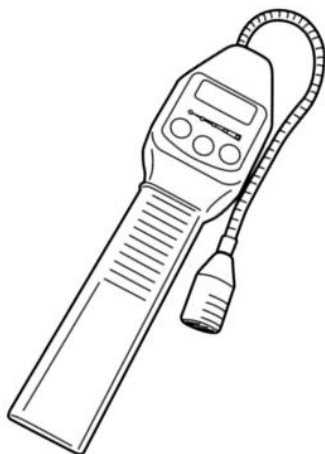
4.4.3 Verkstedsbesøk og service

Et annet område der det må tas hensyn til gass i kjøretøy er når bilen skal på verksted. Norske myndigheter har ikke gitt føringer for håndtering av gassdrevne kjøretøy. Rutinene som gjennomgås i dette kapitlet er derfor rutiner som er bestemt av Scania, for deres drift.

Det er flere egenskaper ved gass som man bør være klar over når man skal håndtere kjøretøyene, tømme tanker, skifte komponenter o.l., deriblant at:

- Biogass som drivstoff er svært brannfarlig og er brennbar fra 5-16% innblanding i luft.
- Gassen kan antennes av varme flater med temperatur på over 600 °C, eller av statisk elektrisitet fra personer.
- Mer enn 50 % blanding av metan i luft øker faren for kvelning.
- Metan er lettere enn luft, og stiger ved lekkasje.
- Dersom metan antenner, er flammen mer eller mindre usynlig.
- Når komprimert gass strømmer raskt fra gasstanker forårsaker trykkfallet at gassen blir svært kald. Dette kan forårsake frostskafer.
- Selv om eksplosjonsfaren ved gassutslipp er nokså lav, kan det ved f.eks. en åpen sikring og antenning av gassen, oppstå en flamme på 10 meter.

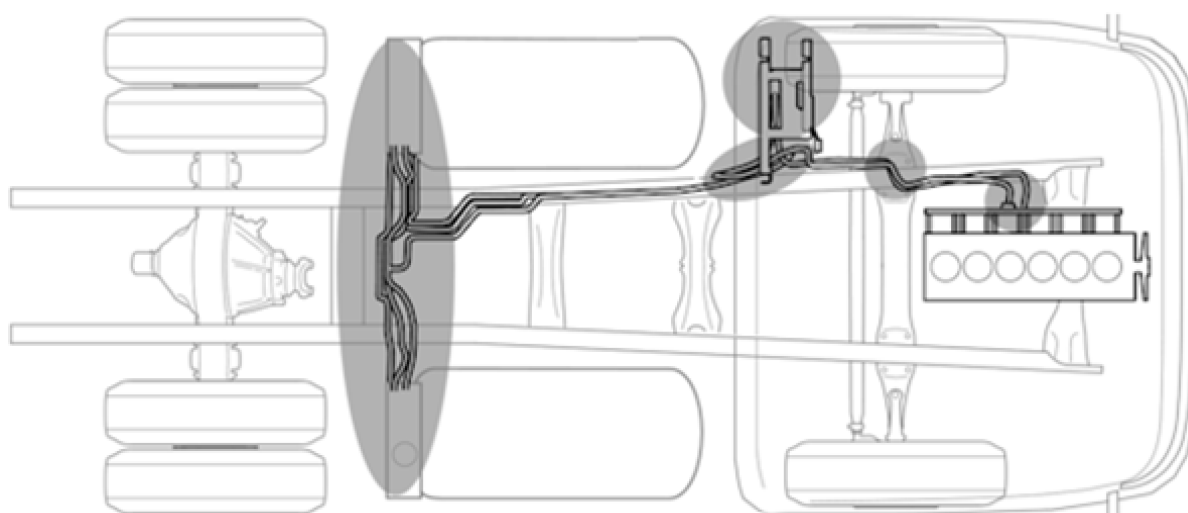
Dette gir behov for gode rutiner ved verkstedsbesøk. Alle kjøretøy skal inspiseres før de tas inn i verkstedhall. Tankene skal sjekkes for skader, og det skal gås over kjøretøyet med en sertifisert gassdetektor. Figur 22 viser gassdetektoren som benyttes. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 22: Illustrasjonsbilde av gassdetektoren som Scania benytter for lekkasjesøk (Norsk Scania AS, 2023).

Gassdetektoren holdes så nær som mulig mot det området som skal sjekkes for gasslekkasje. Detektoren holdes deretter stille, og verdiene vil stabilisere seg før den gir en avlesning. Ved en eventuell lekkasje vil enheten vise en kraftig økning av verdiene på skjermen. Dersom målte verdier overstiger 0,2 % av såkalt LEL (Lower Explosive Limit), eller 100 ppm (parts per million), skal det brukes lekkasjespray for å finne lekkasjen. Ved påføring av lekkasjespray (eller i nødstilfelle, såpevann) vil det komme bobler ved lekkasjen. Ved bobling må søket gjøres på nytt for å bekrefte verdiene. Dersom bobling ikke forekommer er lekkasjen tillatt (Norsk Scania AS, 2023). Figur 23 viser et eksempel på de områdene der lekkasjer kan forekomme. I tillegg til disse områdene må naturligvis tankene inspiseres for skader, merker o.l.

Ved for store lekkasjer må kjøretøyet enten håndteres utendørs, eller i bygninger med åpent tak. Et alternativ er å tømme tankene og alle systemene i kjøretøyet for gass. Verkstedsledelsen må alltid gjøre en individuell vurdering av hvert kjøretøy, og ta de forholdsregler som ansees nødvendig (Norsk Scania AS, 2023).



Figur 23: Illustrasjon av områdene som skal sjekkes med gassdetektor. De markerte områdene viser samtlige skjøter og koblinger i områder der lekkasje kan oppstå (Norsk Scania AS, 2023).

Når kjøretøyet så er erklært lekkasjefritt og tas inn i verkstedhallen skal det sikres at gass ikke lekker ut i hallen mens kjøretøyet står plassert der. Dette skal gjøres med alle gassdrevne kjøretøy, men er spesielt viktig for LNG-drevne kjøretøy da dette over tid vil få boil-off, spesielt dersom kjøretøyet står utover 5-7 dager. Kjøretøyet kobles med avtrekkslange, som så kobles på korresponderende sikkerhetsventil avhengig av kjøretøytype. Slangen trekkes ut av hallen, og kobles på en gassbrenner. All gass som tømmes eller lekker fra kjøretøy skal brennes, av miljøhensyn. Scania har en egen gassbrenner de selger til sine verksteder (Grimstad, 2023).

Siden statisk elektrisitet kan antenne metangass, skal kjøretøyet jordes før arbeid påbegynnes. Det skal også merkes godt i verkstedet at kjøretøyet går på gass, da verkstedet kan ha alle typer kjøretøy inne. Minimumskravet til merking er fire skilt rundt kjøretøyet, og ett skilt på utsiden av verkstedsporten. Skiltene er merket tydelig og annonserer at det er et gasskjøretøy til stede og at dette innebærer potensiell eksplosjonsfare (Grimstad, 2023).

Til sist er det gjort en vurdering av arbeidsklær. Det bør benyttes antistatisk bekledning ved arbeid med gass. Ved arbeid som kan gi kontakt med kald gass anbefales det å:

- Håndtere flytende naturgass slik at det ikke renner, spruter eller lekker.
- Beskytte øyne ved bruk av vernebriller eller hjelm med visir.
- Bruke overdel med lange armer for å beskytte hud.
- Bruke bukser som ikke er brettet i bena, og som rekker nedover skoene. Dette gjør at det ikke kan samles væske i klærne.
- Bruk av antistatiske vernesko, som er beregnet for kontakt med kryogenisk væske.

Scania har hatt flere interne dialoger med vurdering av påbud om slik bekledning, og hvilket arbeid som skal utløse hvilke påbud. Resultatet er foreløpig av disse punktene kun er *anbefalinger* fra Scania. Det finner dermed ingen direkte påbud om verneutstyr, og hvert verksted bestemmer selv hva de vil håndheve (Grimstad, 2023).

4.4.4 Fylling av CNG-kjøretøy

Fylling av gass er både lik og ulik fylling av vanlige fossile drivstoff. Fylletidene er som oftest de samme, men på grunn av drivstoffets form må fylling skje med en viss respekt for de krefter og temperaturer som er i sving.

CNG-kjøretøy har to alternativer for fylling. Den første (og vanligste) er fylling på en offentlig CNG-stasjon. Dette innebærer å koble munnstykket til påfyllingskoblingen på kjøretøyet (se figur 24), hvorpå fyllingen starter automatisk. Gass komprimeres av stasjonen og fylles på tanken. Når prosessen er ferdig, slippes trykket i ledningen ut, og føreren kobler fra munnstykket. Fylletiden på denne metoden er tilnærmet lik fylling av bensen eller diesel. (Natural Gas Vehicle Association Europe, 2023)



Figur 24: Fylling av et CBG-drevet kjøretøy (Norsk Scania AS, 2023).

Den andre metoden for fylling er «over natten» løsninger, som skjer ved fylling på stasjoner som er montert i hjemmet eller ved bedrifter som har flåter med kjøretøy. Fyllerutinen er den samme, men fyllingen tar lenger tid (Natural Gas Vehicle Association Europe, 2023).

4.4.5 Fylling av LNG-kjøretøy

LNG-drevne kjøretøy fylles ved bruk av standardiserte munnstykker og koblinger. Fyllerutinen består av å jorde kjøretøyet, for så å rense munnstykket og koblingen grundig med en antistatisk klut. Noen kjøretøy er i tillegg designet slik at det skal kobles ventilasjonsledninger til stasjonen. Når munnstykket er tilkoblet tanken (se figur 25) trykker sjåføren på knappen for å starte fyllerutinen. Knappen er som regel en «dødmannsknapp», og må holdes inne mens fylling pågår. (Natural Gas Vehicle Association Europe, 2023)



Figur 25: Fylling av et LBG-drevet kjøretøy (Norsk Scania AS, 2023).

Når tanken er full stopper fyllingen automatisk. Fyllekabelen kan så kobles fra, og munnstykket/påfyllingskoblingen på tanken renses. Fylletiden er tilnærmet lik fylletiden for dieselskjøretøy (Natural Gas Vehicle Association Europe, 2023).

Ved fylling av LNG skal det brukes heldekkende verneutstyr. Dette inkluderer hjelm med visir, støvler, bukser, genser/jakke med lange armer, og hansker beregnet på bruk ved fylling av LNG (Norsk Scania AS, 2023).

4.5 Økonomi

4.5.1 Økonomi og subsidier ved kjøp av tyngre biogass-kjøretøy

Økonomi er et viktig punkt for å satse på biogassdrevne kjøretøy. I Norge satses det ikke på biogass i samme grad som på elektriske kjøretøy. Ved innkjøp av elektrisk lastebil i dag kan man søke støtte hos Enova. Denne støtten beregnes individuelt for hvert enkelt kjøretøy, og man kan få dekket en viss prosentandel av differansen i pris i forhold til et nytt, sammenlignbart fossilkjøretøy. Støtten er begrenset til maksimalt 40% av merkostnadene (Enova, 2023). I tillegg er det ytterligere fordeler, f.eks. at tunge el-kjøretøy får lov til å benytte seg av to tonn ekstra tillatt nyttelast fordi de er el-drevne. For biogass-kjøretøy er dette tallet null (Grimstad, 2023). Videre kan bedrifter med tunge elektriske kjøretøy få støtte til lade-systemer, selv om disse midlene er utsatt for stor konkurranse (Enova, 2023).

For tunge biogassdrevne kjøretøy eksisterer det i dag en støtteordning der man i likhet med ordningen for tunge elektriske kjøretøy får dekket inntil 40% av merkostnaden. Dette er oppad begrenset til 210 000 kr for kjøretøy med flytende gass, og 180 000 for komprimert gass (Enova, 2023). For å se på hvor mye dette utgjør må det sammenlignes med gjeldende priser.

Prisene på lastebiler varierer i stor grad, avhengig av behov for ekstrautstyr, innredning o.l. Det er derfor mest hensiktsmessig å sammenligne prisene med lignende diesel-alternativer, heller enn bestemte summer. En lastebil drevet med CNG koster hos Scania omtrent 220 000 til 240 000 kroner mer enn et ekvivalent dieselkjøretøy. Dersom man skal ha et kjøretøy som drives av LNG, koster dette ytterligere 150 000 kroner (Norsk Scania AS, 2023).

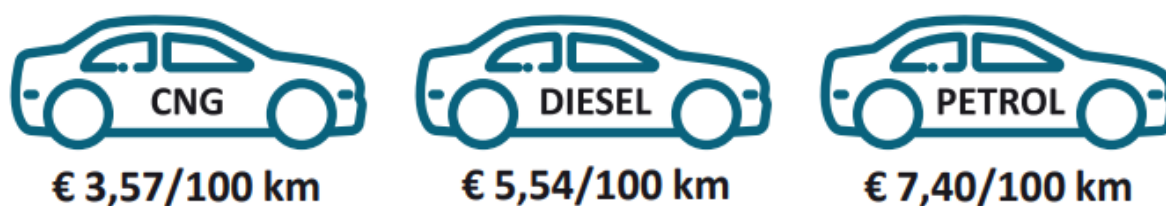
Dette innebærer at en CNG-drevet lastebil med en merkostnad på 240 000 kr vil kunne søke om inntil 96 000 kr i støtte, mens en LNG-drevet lastebil med 390 000 kr i merkostnad vil kunne motta maksimalt 156 000 kr. En trekkvogn med dieseldrift kan koste rundt 2 000 000 kroner (avhenger veldig av utstyr, kan fort koste alt fra 1,8 til 2,4 millioner kroner) (Knold, 2023).

Den 3/5-2023 annonserte Enova at de med en måneds varsel trekker støtten til tunge biogasskjøretøy. Dette innebærer at kjøretøy bestilt etter 31 mai 2023 kl. 12.00 ikke vil kunne få støtte (Enova, 2023).

4.5.2 Kostnader ved bruk av gass som drivstoff

Et viktig element når man vurderer kjøp av et gassdrevet kjøretøy er prisen på drivstoff. Kostnader ved bruk av gass varierer avhengig av kvalitet på gassen og hvor i verden man befinner seg. De siste årene har gassprisen variert kraftig i perioder, noe som vil ha påvirket kjørekostnadene. Den norske valutaen er dessuten på et rekordlavt nivå per mai 2023, og vil således kunne gi et ufullstendig inntrykk av den situasjonen som har vært vanlig tidligere..

NGVA EU (Natural Gas Vehicle Association Europe) estimerte i sin årlige katalog utgitt i 2019 kjørekostnadene på komprimert gass, diesel og bensin. Beregningen var basert på de gjennomsnittlige drivstoffprisene i Europa gjennom 2018, og resulterte i prisene vist på figur 26.



Figur 26: Illustrasjon med prisnivåene for drivstoff i Europa. Prisene er basert på gjennomsnittlige priser gjennom 2018, og gjelder personbiler. (Natural Gas Vehicle Association Europe, 2019)

For å ta høyde for at den norske kronen er rekordlav kan det være hensiktsmessig å benytte valutakursen fra 2018 for norske kroner (NOK) og euro (EUR), slik at beregningene kan settes i bedre perspektiv. Ifølge Norges bank (Norges Bank, 2023) var gjennomsnittskursen i 2018:

- 9,6 NOK pr. EUR

Omregnet til norske kroner gir dette en pris pr. 100 km på:

- $3,57 \text{ EUR} * 9,6 \text{ NOK} = 34,27 \text{ NOK}/100 \text{ km}$ for CNG
- $5,54 \text{ EUR} * 9,6 \text{ NOK} = 53,18 \text{ NOK}/100 \text{ km}$ for diesel
- $7,40 \text{ EUR} * 9,6 \text{ NOK} = 71 \text{ NOK}/100 \text{ km}$ for bensin

Dette viser en rimelig trend sett opp mot diesel og bensindrift i 2018. Merk at dette er tall for personbiler med CNG drift. Vi trenger altså et estimat på tungtrafikk i tillegg. Ved å se på statistikk fra SSB for drivstofforbruk og utslipp per kjørte kilometer i varierende kjøresituasjoner får vi tall for å regne ut gjennomsnittlig drivstofforbruket til lastebil-seksjonen ved variert kjøring. Dette gir et gjennomsnittlig drivstofforbruk på 3,7 liter diesel per mil (Statistisk Sentralbyrå, 2016) for gen gjennomsnittlige dieseldrevne lastebilen. For å estimere forbruket til en gassdrevet trekkvogn fra Scania, kan vi benytte oss av forbruket som er antatt ved beregning av rekkeviddene (kap. 5.2.1.3 og 5.2.2.4). Dette forbruket er på 2,7 kg gass per mil. Prisene for gass var den 9 mai 2023 25,95 NOK/kg for LNG og 24,43 NOK/kg for CNG (Gasum, 2023). Dette gir følgende regnestykker:

- $25,95 \text{ kr/kg} * 2,7 \text{ kg}/100 \text{ km} = 70 \text{ NOK per } 100 \text{ km}$
- $24,43 \text{ kr/kg} * 2,7 \text{ kg}/100 \text{ km} = 66 \text{ NOK per } 100 \text{ km}$

Når vi så forutsetter prisen på lastebildiesel på 18,73 NOK/l (Circle K, 2023) og et forbruk på 3,7 liter diesel per 100 km får vi:

- $18,73 \text{ kr/kg} * 3,7 \text{ l}/100 \text{ km} = 69,3 \text{ NOK per } 100 \text{ km}$

Dette viser at prisene per i dag er ca. like for diesel og gass. Det bekreftes også av Scania, da det ifølge dem er ca. like dyrt eller litt dyrere for gass enn diesel (Grimstad, 2023).

5. Resultater: Studie av Scantias gasskjøretøy

Det er hensiktsmessig å ta for seg et eksempel på et eksisterende gasskjøretøy. Dette vil gi innsikt i mer konkrete systemer som faktisk er i bruk, slik at rapporten ikke er rent teoretisk. Som eksempel på et gasdrevet kjøretøy tar rapporten for seg Scantias biogassdrevne lastebiler. Trekkvognene fra Scania bestilles til spesifisering for kunden, avhengig av behov og ønsker. Det er derfor ingen bestemt utforming på et gasskjøretøy og rapporten fokuserer ikke på en bestemt modell. Det legges derfor vekt på forskjellen mellom drift på CNG og LNG, og hvordan disse systemene fungerer.



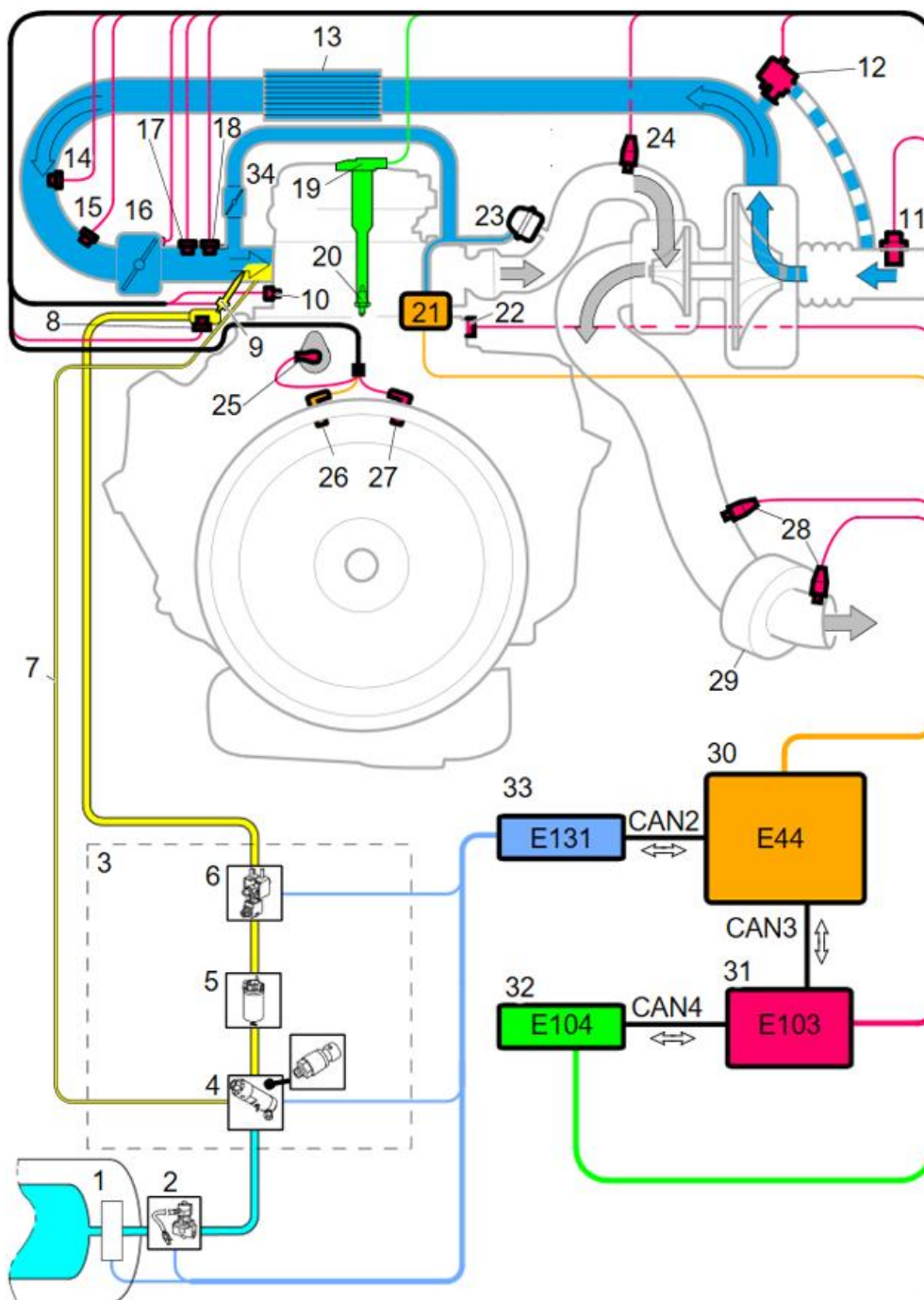
Figur 27: LNG-drevet lastebil fra Scania, presentert av tekniker Geir Storbråten (Technical Trainer, Scania).

Motoren i trekkvognene er den samme, uavhengig av drivstoffets form under lagring. Både CNG- og LNG-systemer konverterer gassen til samme lavtrykk før forbrenning. Den eneste forskjellen på de to variantene er dermed hvordan gassen lagres før bruk. Det er derfor hensiktsmessig å velge en motor, og bryte denne ned i detalj. Rapporten ser på motor-modellen OC13 101. Dette er en gasdrevet, 13-liter, 6-sylindret rekkemotor med 410 hestekrefter og 2000 Nm dreiemoment. (Norsk Scania AS, 2023)

Dette kapittelet har tre deler. Den første er en systemoversikt, som viser gass- og motorsystemet slik det henger sammen. Den andre delen er en grundig gjennomgang av gass-systemet, inklusive tanker og tank-systemer, trykkregulering av gassen og til slutt innsprøytning i motoren. Til slutt er det en del om motoren, som tar for seg de delene av motoren som er spesiell for gass-drift. (Norsk Scania AS, 2023)

5.1 Systemoversikt

En motor er en ansamling av mange systemer som arbeider sammen for å gjøre jobben de er ment for. Således kan det være vanskelig å få oversikt over hvordan alt henger sammen. Det er derfor hensiktsmessig med et oversiktsbilde av systemet før det går inn i detaljer. Dette kapitlet gir en enkel oversikt over hele motor-systemet. Figur 28 viser en forenklet skisse av systemets funksjoner. Merk at ikke alle numrene på figuren er relevante for kapitlet.



Figur 28: Illustrasjonsbilde av systemene til motoren. Merk at avbildede sensorer har fargede linjer som korresponderer med hvilken styreenhet de kommuniserer med. (Norsk Scania AS, 2023)

Nummereringen følger progresjonen i motoren og tar for seg de enheter, sensorer osv. som er relevante. Den går fra gasstanken til forbrenningen (pkt. 1-10), så fra luftinntaket til forbrenningen (pkt. 11-20), og deretter fra forbrenning og ut gjennom eksos-systemet (pkt. 21-29, samt pkt. 34). De siste fire elementene er de fire kontrollenhetene, som styrer systemer, sensorer og samarbeidet mellom disse (Norsk Scania AS, 2023).

- Punkt 1 er gasstanken. Dette er lagringspunktet for gassen, enten den er komprimert eller flytende. Systemet fungerer på samme måte uavhengig av om kjøretøyet har en eller flere tanker med gass. Dersom gassen er flytende (LNG) blir den varmet opp slik at den går over i gassform før den forlater tanken. Utgående gasstrykk for LNG-systemer er maksimalt 16 bar, mens CNG holder ca. 200 bar ved full tank.
- Punkt 2 viser plasseringen til en solenoidventil (høytrykk) som kontrollerer gasstilførselen til gasspanelet. Gasstilførselen skrur på når sensorene på svinghjulet og kam-akslene (pkt. 25-27) oppdager bevegelse. Ventilen er lukket når motoren er avslått.
- Punkt 3 viser gasspanelet. Gasspanelet er en kombi-enhet som trykk-regulerer gassen og filtrerer den før den sendes videre til motoren. Enheten inneholder trykkregulatoren som regulerer gasstrykket til drivstoffet (pkt. 4), drivstoff-filteret som filtrerer bort partikler og fuktighet fra gassen (pkt. 5), og solenoidventilen som regulerer gasstilførselen til motoren (pkt. 6).
- Punkt 7 viser referanselinjen til gassregulatoren. Denne måler lufttrykket like etter spjeldet, og rapporterer dette til regulatoren. Regulatoren trykksetter dermed drivstoffet til 7,3 bar over dette trykket. Dette gjør at gassen alltid har riktig trykk ved innsprøytning i forkammeret.
- Punkt 8 er en kombinert sensor som rapporterer drivstofftrykket og temperatur til styreenheten E103 (Otto Control System, OCS E103, pkt. 31). Dette forklares nærmere senere i kapitlet.
- Injektorene (pkt. 9) sprøyter gassen inn i forkammeret for blanding med luft før forbrenning.
- Bankesensoren (pkt. 10) lytter etter motorbank, og gir beskjed om dette til riktig styreenhet. Styreenheten som kontrollerer tenning (E104, pkt. 32) styrer tenningstidspunkt- og posisjon individuelt for alle sylindrene.

Videre ser vi på luftinntaket til motoren:

- Punkt 11 viser posisjonen til massestrømmåleren. Denne måler luftstrømmen og temperaturen til luften i inntaket, før den sender dette til E103 (pkt. 31).
- Dumpventilen (pkt. 12) beskytter turboen fra overtrykk, noe som kan skade eller i verste fall ødelegge den. Slikt overtrykk kan oppstå når spjeldet lukkes.
- Når luften kommer igjennom turboen og presses inn i systemet blir den ekstremt varm. Varm luft har lav tetthet, og dermed et lavt oksygeninnhold mtp. volum. Inntaket har derfor en luftkjøler (også kalt mellomkjøler, pkt. 13) som kjøler luften. Dette øker oksygeninnholdet og lar motoren forbrenne mer drivstoff per ladning. Innenfor luftkjøleren er det plassert en temperatursensor (pkt. 14) som registrerer luft-temperaturen etter kjøling, og en trykk-måler som avleser lufttrykk (pkt. 15).
- Punkt 16 viser gass-spjeldet. Spjeldet regulerer mengden luft som får tilgang til motoren gjennom luftinntaket, og således motorens pådrag.
- Etter spjeldet er det plassert et nytt sett med temperatur- og trykksensorer (pkt. 17 og 18).
- Punkt 19 og 20 viser motorens tennspoler og tennplugg.

Dette leder oss til eksos-siden av forbrenningen.

- Ventilblokk (pkt. 21) brukes til å styre wastegate-ventilen (pkt. 23) og EGR-ventilen (pkt. 34).

- Punkt 22 viser plasseringen av sensoren som måler temperaturen på kjølevæsken til motoren.
- Ved punkt 24 er det plassert en sensor som måler avgassenes temperatur før de når turboen. Denne informasjonen rapporteres til styreenheten E103 og brukes til å regulere forbrenningen i motoren.
- Det er plassert tre sensorer på motorblokka. Punkt 25 viser plasseringen til sensoren som sporer posisjonen til kamakselen. De to andre sensorene (pkt. 26 og 27) viser rotasjonshastigheten til svinghjulet. Disse sensorene benyttes blant annet til å bestemme når gasstilførselen til motoren skrur på (se beskrivelsen av pkt. 2).
- Motoren har to lambdasonder (pkt. 28), en før katalysatoren som gjør hovedjobben, og en etter som sjekker oksygenivået for å kontrollere at den første fungerer som den skal. Punkt 29 viser katalysatoren.

Til slutt har vi styreenhetene. Disse er kontrollmoduler, som styrer sine respektive områder. Det gis her en kort oversikt, se kap. 5.3.4 for utfyllende informasjon.

Styreenhetene er som følger:

- ECU (Engine Control Unit), EMO2-E44 (pkt. 30). EMO står for «Engine Management Otto», og styrer grunnleggende funksjoner. Dette innebærer de funksjonene den styrte i den originale dieselmotoren som motordesignet er bygget på.
- Ekstra ECU, OCS1-E103 (pkt. 31). OCS står for «Otto Control System». Denne enheten tar for seg de motorfunksjonene som er spesielle for ottomotoren, altså de som er nye etter omstruktureringen fra diesel- til ottomotor.
- ICM (Ignition Control Module), E104 (pkt. 32). Dette er kontrollenheten som styrer alle tenningsrelaterte funksjoner. Den analyserer også forbrenningen og informerer OCS E-103 om eventuelle avvik og behov for justering.
- Gas supply Control System, GCS E131 (pkt. 33). Denne enheten styrer alle gassrelaterte funksjoner. Dette innebærer de funksjonene som har å gjøre med gasstilførsel, regulering av trykk og sikkerhetsfunksjoner på tankene.

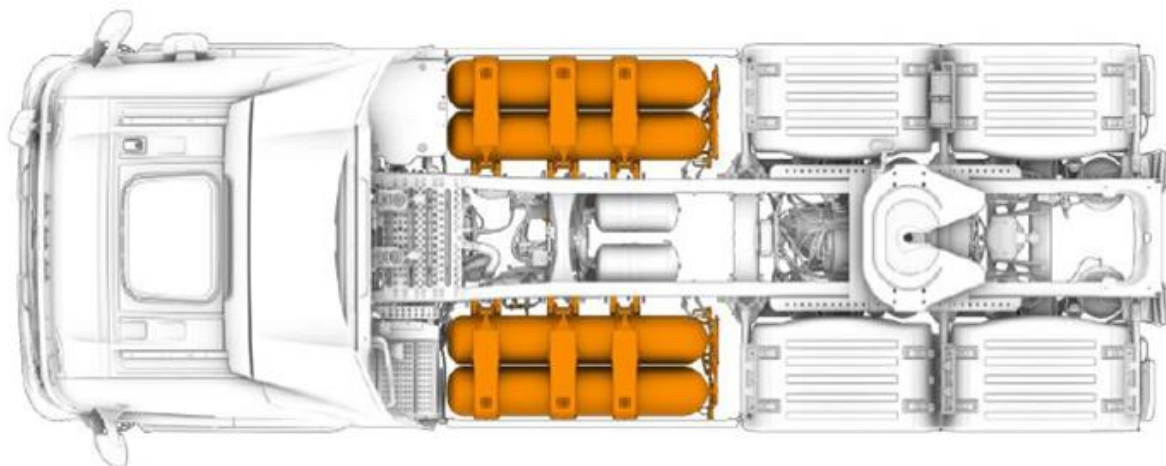
5.2 Gass-systemet

Gass-systemet består av tre deler. Den første delen er tankene der gassen lagres, enten komprimert eller flytende. Begge deler gir sine utfordringer og fordeler. Vi ser her på Scania's løsninger på lagring av CNG og LNG i kjøretøyene sine. Fra tankene beveger gassen seg videre til en utstyrsmodul som kalles gasspanelet. Dette er en enhet som regulerer gassens trykk og filtrerer den for fukt og partikler, før den sendes til drivstoffgalleriet og injektorene. Denne delen av rapporten tar for seg funksjon og oppbygning av disse delene. (Norsk Scania AS, 2023)

5.2.1 CNG-tanker

5.2.1.1 Tankplassering og kombinasjon

Tanker som holder komprimert gass plasseres typisk mellom for- og bakhjulene på trekkvogna. Figur 29 viser et eksempel. Kombinasjon av tanker avhenger av hva kunden har behov for ved bestilling. Merk at akselavstanden på trekkvogna vil øke i takt med lengden til tankene. Det er derfor ikke ønskelig å ha større tanker enn man har behov for. Behovet kommer igjen an på hva kjøretøyet skal brukes til.

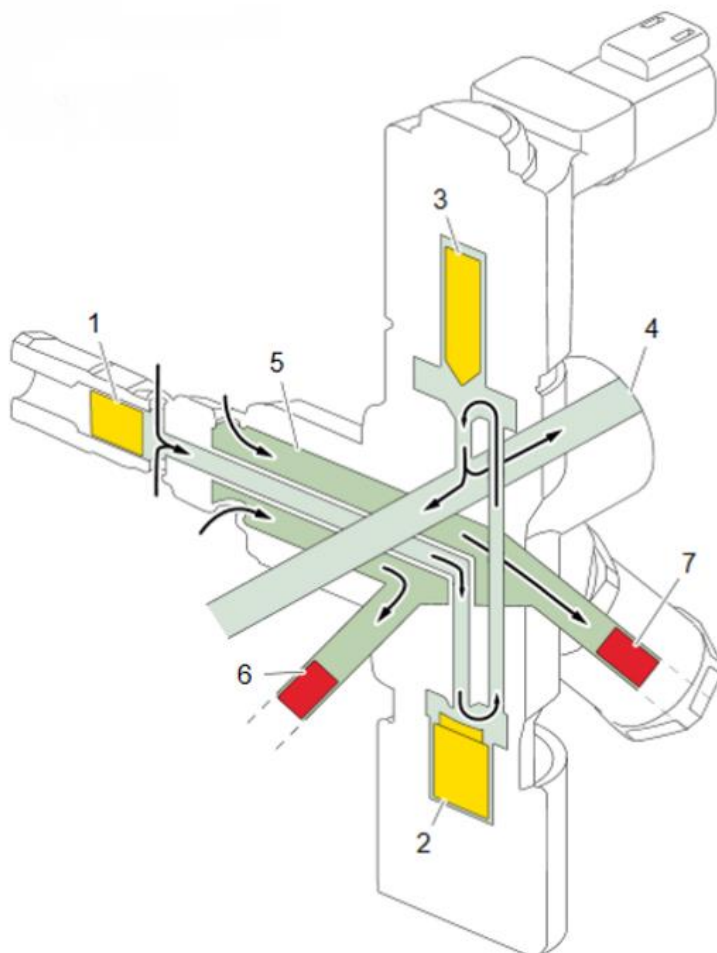


Figur 29: Illustrasjonsbilde av plasseringen til CNG tanker på en trekkvogn. Merk at akselavstanden øker i takt med lengden av tankene (Norsk Scania AS, 2023).

CNG-tankene til Scania lages i stål, uten skjøter. Tankenes egenvekt bør derfor tas hensyn til. En typisk kombinasjon av CNG-tanker er 8x118 liter. Denne kombinasjonen gir tankene en egenvekt på 1164 kg. Gassen vil ved fulle tanker veie 179 kg. (Norsk Scania AS, 2023)

5.2.1.2 CNG-tankens ventilsystem

For å koble gasstankene til drivstofflinjen (som tar gassen videre mot motoren) brukes et sett med ventiler (Se figur 30). Denne sitter på hver enkelt tank, og regulerer gasstilførsel- og uttak. Enheten har totalt fem ventiler, som alle har sine oppgaver. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 30: Illustrasjonsbilde som viser innsiden av ventilen med nummererte komponenter (Norsk Scania AS, 2023).

Gassen i ventilsettet går gjennom ventilen på tanken og passerer to andre ventiler før den slippes ut i røret som leder gass mot motoren. Den første ventilen (pkt. 1, figur 30) sitter i gasstanken. Dersom trykket synker ved denne ventilen, sammenlignet med inntaket, er det en lekkasje i gass-systemet. Ventilen vil da stenge for å begrense gasstilførselen. Den manuelle stengeventilen (pkt. 2, figur 30) stenger systemet helt, og bestemmer om tanken kan gi eller motta gass. (Norsk Scania AS, 2023)

Den tredje ventilen (pkt. 3, figur 30) er en solenoidventil. Denne kontrollerer også om gass kan flyte til eller fra tanken. Solenoidventilen er elektrisk og åpner på kommando fra motorens ECU (Engine Control Unit). Både denne ventilen og den manuelle stengeventilen må være i åpen posisjon for at tanken skal kunne gi gass til systemet (pkt. 4, figur 30). Merk at tanken kan fylles selv om solenoidventilen er lukket. (Norsk Scania AS, 2023)

Tanken er koblet til et ekstra uttak (pkt. 5, figur 30) som gir gassen en konstant tilgang til sikkerhetsventilene (pkt. 6 og 7, figur 30). En av sikkerhetsventilene åpnes dersom trykket i tanken overgår 350 bar, mens den andre er termisk aktivert ved temperaturer over 110 °C. Dette er T-PRD (Thermal-activated Pressure Relief Device) og P-PRD (Pressure-activated Pressure Relief Device)

ventilene som ble nevnt i kjøretøykapittelet (kap. 4.3.2). Disse vil forhindre at tanken eksploderer ved overtrykk, brann o.l. Sikkerhetsventilene kan ikke resettes når de har aktivert, og må skiftes ut. De kan således defineres som nødventiler. Figur 31 viser ventilsettet slik det ser ut montert på tanken. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 31: Bilde av ventilsettet på en CNG tank (Norsk Scania AS, 2023).

5.2.1.3 Rekkevidde ved CNG-drift

Det er også interessant å vurdere hvor langt et kjøretøy går på en fylling. Svaret kommer naturligvis an på hvilken tank-konfigurasjon som kjøretøyet har, men gjennomsnittlig når et vogntog om lag 10 km på ca. 2,7 kg gass. Tabell 3 viser en oversikt over de vanligste tank-konfigurasjonene ved bruk av CNG, og rekkevidden på disse ved et slikt forbruk. Bruk av CNG til kjøring av et kjøretøy fra Scania gir ca. 1 kWh per 200g gass. 640 liter CNG veier omtrent 100 kg. (Norsk Scania AS, 2023)

Tabell 3: Oversikt over tankkombinasjoner, volumet disse inneholder og estimert rekkevidde (Norsk Scania AS, 2023).

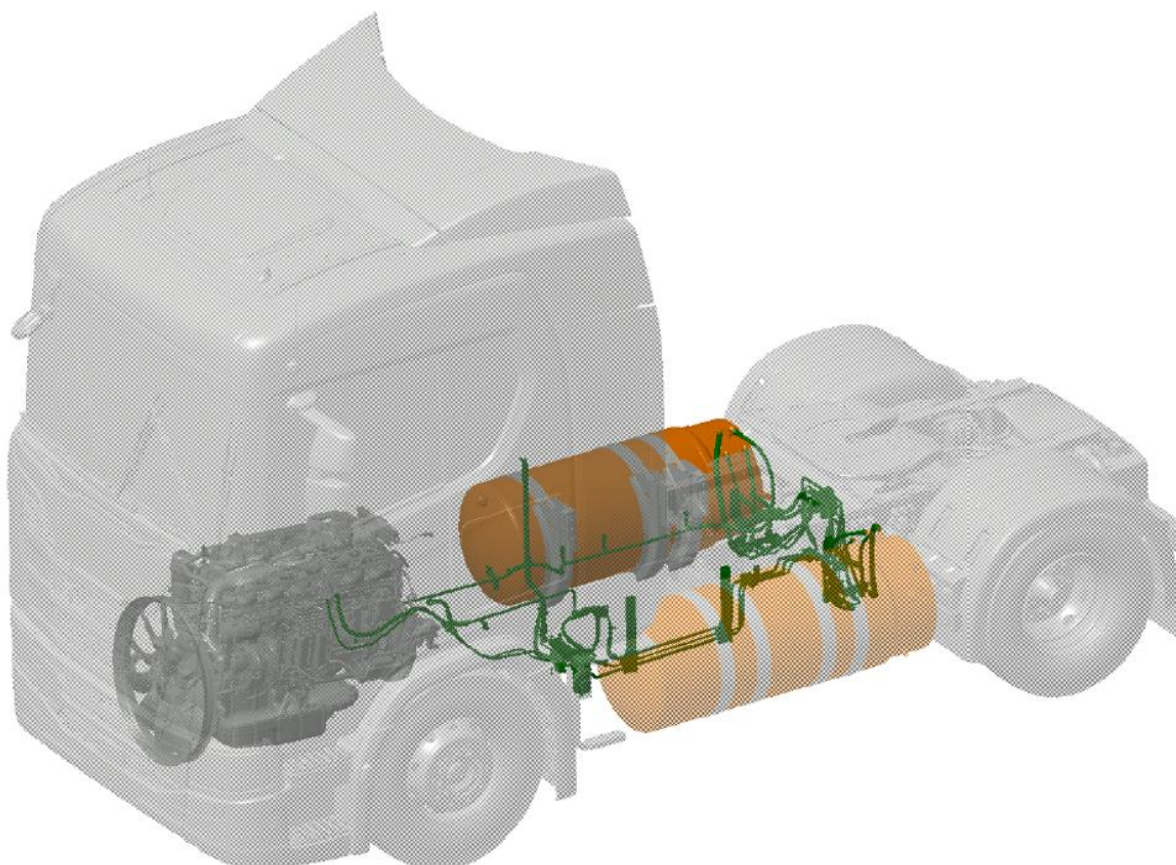
*Estimert drivstofforbruk antas å være 2,7 kg/10 km.

Kombinasjon	Volum (Liter)	Estimert rekkevidde (km)*
8x80	640	450
4x80 + 4x95	700	493
8x95	760	535
4x80 + 4x118	792	557
4x95 + 4x118	852	600
8x118	944	664

5.2.2 LNG-tanker

5.2.2.1 Tankplassering og kombinasjon

LNG-tanker plasseres som regel på samme sted som CNG-tanker. På samme måte som med CNG-tankene begrenses også størrelsen på tankene av ønsket akselavstand. Figur 32 viser plasseringen av LNG-tanker på Scantias kjøretøy.



Figur 32: Illustrasjon av den vanligste plasseringen av LNG-tanker på tyngre kjøretøy (Norsk Scania AS, 2023).

Noen vanlige kombinasjoner er en enkel 406 liter tank, en enkel 550 liter, tankkombinasjon med 550 liter og en 352 liter, eller to 550 liter tanker. Mulighetene varierer avhengig av andre systemer, og avtales med kunden ved bestilling. (Norsk Scania AS, 2023)

5.2.2.2 Tankens konstruksjon

En tank med LNG vil alltid være under oppvarming. Den er ikke utstyrt med aktiv kjøling, og siden det er umulig å isolere et legeme fullstendig vil den flytende gassen i tanken over tid varme seg og øke tanktrykket. Denne typen ventilering av gass til atmosfære kalles boil-off, og er uønsket da det gir tap av drivstoff. Tanken er derfor isolert etter beste evne. (Norsk Scania AS, 2023)

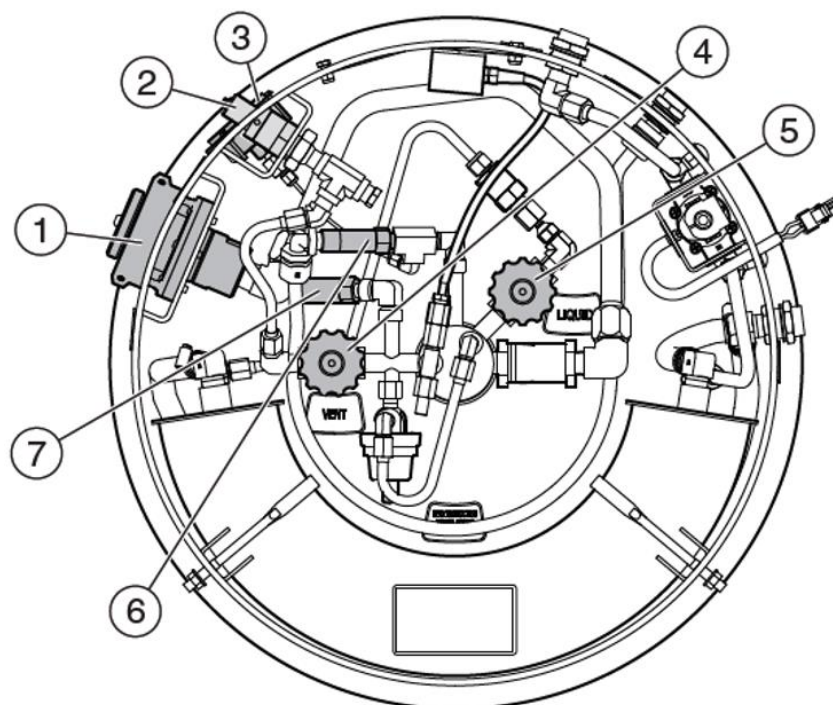


Figur 33: Tank produsert av Chart Industries, med et utsnitt som viser tankens superisolasjon (Norsk Scania AS, 2023).

For å holde på kryogenisk drivstoff uten aktiv kjøling må tanken isoleres særdeles godt. Konstruksjonen er laget i rustfritt stål og består av en indre og en ytre tank, samt støttestruktur mellom disse. Rustfritt stål er valgt fordi det er sterkt nok til å tåle belastningene tanken gir, samtidig som det håndterer de lave temperaturene tanken utsettes for ved bruk til kryogenisk væske. Den indre tanken er pakket i isolasjon, og omgitt av vakuum. Den ytre tanken sitter utenpå dette systemet. Et slikt system kalles superisolasjon, fordi vakuum leder varme svært dårlig. Figur 33 viser en utstillingstank som gir et innblikk i denne konstruksjonsteknikken. Systemet gir den høyeste termiske effektiviteten som så langt er kjent. En tank kan derfor stå inaktiv i 5-7 døgn før den primære overtrykksventilen (se kap. 5.2.2.3) begynner å slippe ut gass for å holde tanktrykket nede. (Norsk Scania AS, 2023)

5.2.2.3 Tankens ventilsystem

Denne delen tar for seg en grunnleggende gjennomgang av LNG-tankens ventilsystem og nødvendige funksjoner. LNG-tanker er mer kompliserte enn sin CNG-motpart, og kapittelet tar ikke for seg hvert eneste undersystem. Scania benytter to tankløsninger for LNG-drevne kjøretøy. Den ene løsningen er produsert av Chart Industries, og den andre av SAG. Denne rapporten ser på tanken fra Chart Industries, da begge løsningene bygger på samme prinsipper. Figur 34 viser et nummerert illustrasjonsbilde av ventilsystemet til den Chart-produserte tanken.



Figur 34: Oversikt over LNG-tanken fra Chart (Norsk Scania AS, 2023).

Punkt 1 viser påfyllingsdysa. Alle drivstoffsystemer for LNG skal ha en kryogenisk påfyllingstilkobling. Funksjonen til påfyllingstilkoblingen er å gi et tilkoblingspunkt til drivstoffstasjonen for å håndtere overføring av kryogenisk væske. Koblingen har en avstengningsanordning for å forhindre drivstofflekkasje når den er frakoblet. Alle drivstofftilkoblinger må også være utstyrt med en forseglet hette for å forhindre at vann eller rusk kommer inn i drivstofftanken. Koblingen har ellers en fyllkapasitet på 190 liter/min. (Norsk Scania AS, 2023)

Punkt 2 viser plasseringen av den automatiske kjøleregulatoren. Dette er en trykkreduksjonsventil laget i bronse som er åpen ved trykk over et bestemt nivå, og lukket dersom trykket er under. Hensikten er å slippe inn damp i drivstoffledningen når kjøretøyet kjører, noe som kjøler ned væsken og hjelper til med å senke tanktrykket til et ønsket nivå for å forhindre boil-off. Ventilen assisteres av en intern tilbakeslagsventil i drivstoffledningen med et forhåndsinnstilt trykk på 0,1 bar for å lette dampstrømmen. Kontrollerens innstillingsnivå er fastsatt ved produksjon, og kan ikke reguleres. Strømmen gjennom regulatoren er ikke rettet, ventilen er åpen så lenge trykket i drivstoffrøret er over det innstilte nivået. (Norsk Scania AS, 2023)

Manometeret (trykkmåleren, pkt. 3) sitter på utsiden av tanken og gir brukeren av kjøretøyet oversikt over tanktrykket, noe som er nyttig for generell kontroll eller ved fylling av tanken. (Norsk Scania AS, 2023)

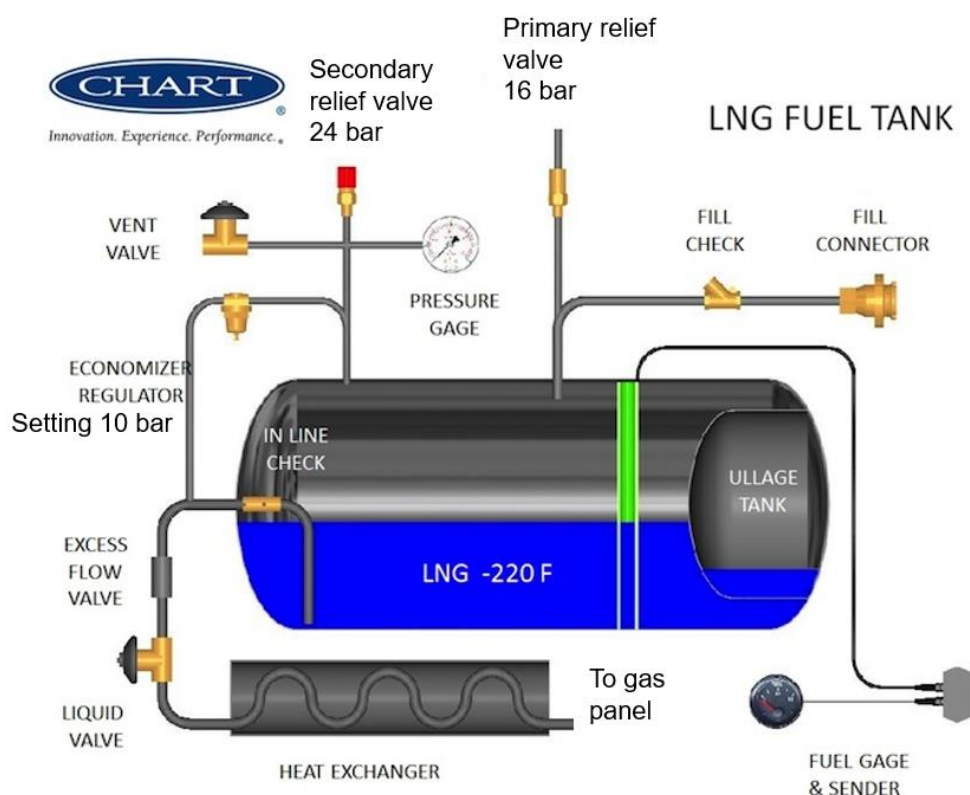
Den manuelle stoppeventilen for damp tilbakeføring (lufteventilen, pkt. 4) er en manuell ventil konstruert i bronse. Hensikten til ventilen er å stenge av røret for damp tilbakeføring under service og vedlikehold. Denne skal være lukket under drift av kjøretøyet, og åpnes kun ved fylling av LNG på tanken. (Norsk Scania AS, 2023)

Den manuelle stoppeventilen for drivstoffet (pkt. 5) er nettopp det, en manuell bronseventil hvis funksjon er å stenge av drivstoffledningen under service og vedlikehold. Stengeventilen er koblet til væskesugeledningen i bunnen av tanken (røret som trekker opp flytende gass fra tanken), og damp tilbakeføringsrøret på toppen av tanken via trykkregulatoren. Drivstoffstengeventilen er åpen under normal drift av kjøretøyet. (Norsk Scania AS, 2023)

Den primære overtrykksventilen (pkt. 6) er en kryogen trykkavlastningsventil. Den er laget i messing og åpner seg dersom tankens trykk overgår det maksimalt tillatte arbeidstrykket. Dette trykket er 16 bar. Ved åpning av ventilen slippes det ut gass i atmosfære, for å unngå at tanken eksploderer. Ventilen er koblet til den øverste påfyllingsledningen og gir dermed ekstra beskyttelse mot overtrykk i tanken. (Norsk Scania AS, 2023)

Den sekundære overtrykksventilen (pkt. 7) er en kryogen reduksjonsventil av lik utforming som den primære. Denne er satt til å utløse ved 1,5 ganger tankens maksimalt tillatte arbeidstrykk (24 bar). Dette er også en ren nødventil, som vil luften ut til atmosfære for å forhindre en katastrofal tanksvikt. En forutsetning for dette vil være dersom det er svikt i den primære overtrykksventilen eller evt. en ledning. Ventilen er koblet til damp tilbakeføringsledningen og gir en sekundær avlastningskanal til tanken. Den er beskyttet mot inntrengning av rusk og vann av en rød plast hette og må aldri kobles til noen form for rør. Den sekundære overtrykksventilen fungerer som tankens siste forsvarslinje, så skulle den røde plast hetten mangle, bør kjøretøyet umiddelbart tas ut av drift og det primære avlastningssystemet kontrolleres. Den røde plast hetten skal beskytte mot vann og forhindre at den overtrykksventilen fryser. (Norsk Scania AS, 2023)

Nå som vi har en grunnleggende forståelse av de viktigste ventilene, kan vi se på resten av funksjonene i tanken. Figur 35 viser en illustrasjon av systemet i en litt mer oversiktlig form.



Figur 35: Illustrasjon av LNG-systemet fra Chart Industries (Norsk Scania AS, 2023).

De fleste punktene på figur 35 er forklart tidligere i kapittelet. Disse inkluderer påfyllingskoblingen (Fill Connector), kjølerregulatoren (Economizer Regulator), manometeret (Pressure Gage), den manuelle damp tilbakeføringskoblingen (Vent Valve), den manuelle stoppeventilen for drivstoff (Liquid Valve), samt den primære og sekundære overtrykksventilen (Primary og secondary relief valve). Systemkomponentene som gjenstår er drivstoffmåleren, ekspansjonstanken, og varmeveksleren. (Norsk Scania AS, 2023)

Alle LNG-drivstofftanker er utstyrt med en elektronisk drivstoffnivåmåler. Systemet består som oftest av to deler: drivstoffsensoren og en panelmontert drivstoffmåler. Drivstoffsensoren er montert på drivstofftanken og fungerer ved å konvertere det elektroniske signalet fra tankens interne drivstoffnivåsonde til et signal som er kompatibelt med den panelmonterte måleren. Det er en lukket elektronikkemhet, og den kan ikke justeres uten videre. Sensoren registrerer den nøyaktige massen av mengden drivstoff i tanken, og påvirkes ikke av drivstoffets tilstand, trykk eller temperatur. Den er også designet for å dempe virkningen av akselerasjon, bremsing, svinging og bakker. Det kan være noe variasjon på måleren under slike forhold, men ikke verre enn det er med bensin- eller dieselekvivalenter. Drivstoffmåleren er en standardmåler som er kalibrert til sensoren. Den viser et drivstoffnivå som varierer fra tom til full, og har en nøyaktighet på $\pm 1/16$ tank. (Norsk Scania AS, 2023)

Videre har systemet noe som kalles en ekspansjonstank (se figur 36). Ekspansjonstanken har en liten åpning, relativ til hovedpåfyllingsledningen. Når hovedtanken er full etter tanking, er det fortsatt en liten strømning (typisk 4-8 l/min) til ekspansjonstanken. Rask økning i trykk eller reduksjon i strømning under fylling indikerer at tanken er full og stasjonens påfyllingsventil bør stenges. Selv om det er mulig å fortsette fylling av ekspansjonstanken med mer væske, er denne tanken der for å tillate drivstoffutvidelse og standby-tid (tiden før det oppstår boil-off). Hvis ekspansjonstanken er helt fylt, vil holdetiden være null og den primære reduksjonsventilen åpner nesten umiddelbart etter fylling. Dersom fyllingen avbrytes av en rask økning i trykk/reduksjon i strømning når ekspansjonstanken er tom, har tanken rundt en ukes standby-tid selv om kjøretøyet ikke kjøres. På de fleste faste bensinstasjoner overvåkes og utføres disse funksjonene automatisk slik at sjåføren kun trenger å koble til og fra drivstoffslangen og trykke på startknappen. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 36: Bilde av ekspansjonstanken i en LNG-tank (Norsk Scania AS, 2023).

Til slutt har alle LNG-brenselssystemer behov for en varmeveksler. Funksjonen til varmeveksleren er å fordampe det kryogene, flytende drivstoffet slik at det kan transporteres som en varm gass til motoren. Varmeveksleren er montert inne i huset til integrerte tanker (se figur 37). Den mottar varmen fra motorens kjølesystem og er koblet til motorens vannkappe via fleksible kjølevæskeledninger. Merk at varmeveksleren ikke påvirker trykket til drivstoffet; den øker kun temperaturen og konverterer drivstoffet fra væske til gass. Herfra sendes gassen videre mot gasspanelet. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 37: Bilde av den U-formede varmeveksleren på en Chart Industries tank (Norsk Scania AS, 2023).

5.2.2.4 Rekkevidde ved LNG-drift

LNG har overlegen rekkevidde ifht. CNG. Dette er på grunn av volumreduksjonen når gassen går over i flytende form, da flytende gass har 1/600 volum sammenlignet med normalen. Ved bruk av kryogenisk væske kan man vanligvis lagre tre ganger så mye gass på samme volum som hvis det var komprimert gass. Tabell 4 viser en oversikt over tank-kombinasjoner, og volum/rekkevidde forbundet med denne. (Norsk Scania AS, 2023)

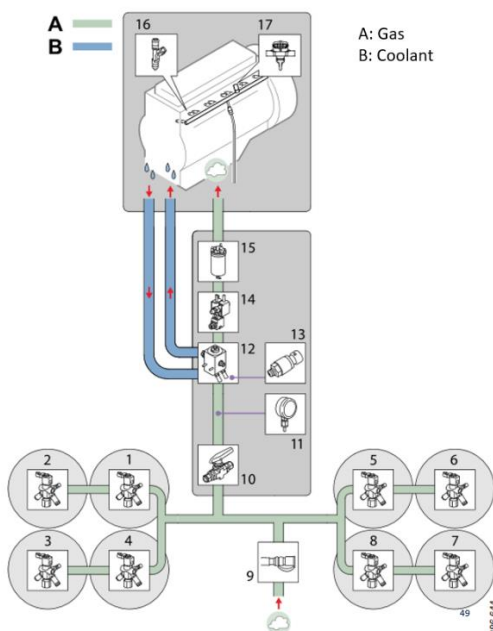
Tabell 4: Oversikt over tankkombinasjoner, volumet disse inneholder og estimert rekkevidde (Norsk Scania AS, 2023).

*Estimert drivstofforbruk antas å være 2,7 kg/10 km.

Kombinasjon	Volum (Liter)	Estimert rekkevidde (km)*
406	406	589
406 + 187	593	861
406 + 352	758	1101
233 + 233	466	677
550	550	799
550 + 352	902	1310
550 + 550	1100	1597

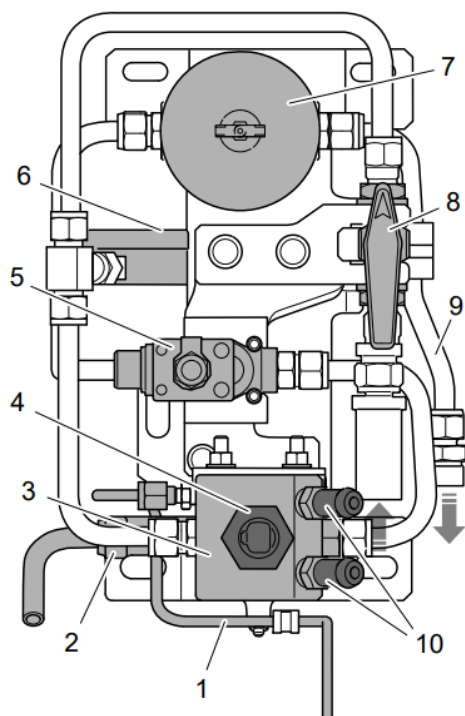
5.2.3 Gasspanelet

For å gjøre gassen klar for bruk i motoren må den ha riktig trykk og form. Denne jobben gjøres av gasspanelet (pkt. 10-15, figur 38). Dette gjelder uavhengig av om kjøretøyet har tanker med komprimert eller flytende gass.



Figur 38: Illustrasjonsskjema som viser gass-systemet på et CNG-kjøretøy, fra tankene, til gasspanelet og videre mot motoren (Norsk Scania AS, 2023).

Gasspanelet er en viktig del av gass-systemet på kjøretøyet. Dette er en utstyrsenhet som utfører en rekke kritiske oppgaver, f.eks. kontroll og justering av gasstrykk, filtrering fukt og partikler fra gassen, og avstengning av gass fra motoren når kjøretøyet skrus av. Figur 39 viser en illustrasjon av gasspanelet. For å forstå gasspanelet kan vi begynne med det viktigste elementet, gassregulatoren (pkt. 3). Denne regulerer gass-trykket før gassen skal videre mot motoren. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 39: Nummerert illustrasjon av gasspanelet (Norsk Scania AS, 2023).

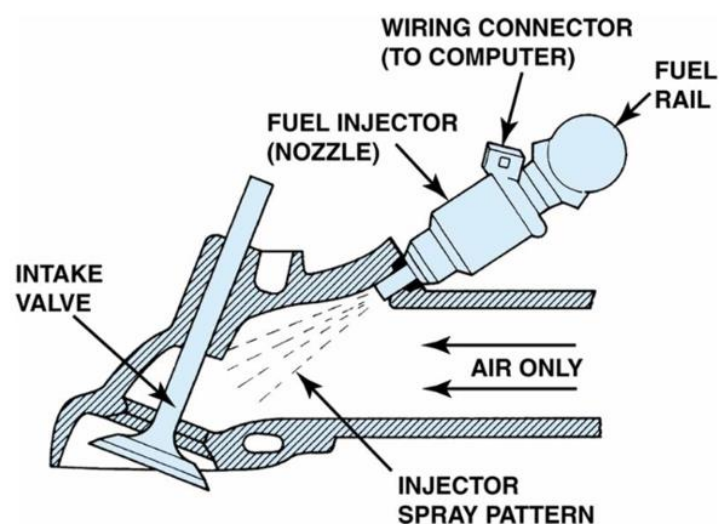
Hvor høyt eller lavt gasstrykket må være når gassen ankommer motoren, avhenger av motorens pådrag og belastning. Det er derfor viktig at drivstoffet har riktig trykk. Dette oppnås ved hjelp av en referanselinje (pkt. 1) som måler lufttrykket i luftinntaket etter spjeldet, og sender det videre til gassregulatoren som et referansemål. Differensialtrykket, altså forskjellen på referansetrykket og drivstofftrykket, skal være på 7,3 bar når gassen kommer ut av regulatoren. Eventuelt overtrykk ventileres via en trykkventil (pkt. 2). Systemet er også utstyrt med en trykksensor (pkt. 4) som måler gassregulatorens innkommende trykk, og sender dette videre til styreenheten E131 (Gas Supply Controller, GSC). (Norsk Scania AS, 2023)

Punkt 5 er en magnetventil (solenoidventil) som åpner og stenger gasstrømmen til motoren. Dette gjøres på kommando fra styreenhetene for tenning og gassfunksjoner (henholdsvis E44, styreenheten for tenning, og GSC). Denne ventilen brukes også for å diagnostisere eventuelle systemlekkasjer. Manometeret (pkt. 6) brukes for å kontrollere trykket i høytrykksdelen av systemet før man påbegynner arbeid, og drivstoff-filteret (pkt. 7) forhindrer at partikler, olje og fukt kommer videre inn i motoren. (Norsk Scania AS, 2023)

Punkt 8 viser plasseringen til den manuelle avstengingsventilen i gasspanelet. Denne benyttes til å stenge gasstilførselen til motoren ved service og vedlikehold. Motoren skal være i gang ved avstengning av denne ventilen, slik at systemet blir trykkløst frem til motoren før arbeid påbegynnes. Punkt 9 viser den utgående gassledningen. Trykket i denne kan være fra omtrent 5,5 – 8,5 bar. Trykknivået avhenger i hovedsak av motorens belastning. I punkt 10 ser vi koblingene til rørene for kjølevæske. (Norsk Scania AS, 2023)

5.2.4 Drivstoffgalleri og injektorer

Drivstoff-injektorene styrer innsprøyting av gass som skal til sylindren. Disse er plassert i drivstoffmanifoldet, og er seriekoblet via drivstoffgalleriet (eng: fuel rail). Hver sylinder har to injektorer som gir gass på forskjellige tidspunkter etter beskjed fra en egen ECU (Engine Control Unit, enhet E103, vist ved punkt 31 på figur 28 i kap. 5.1). Gassen slippes ut i forkammeret, som ligger i forkant av selve sylinderrømmet (se fig 40). Dette gjør at blandingen av gass og luft starter før ladningen kommer inn i sylindren. Fordi gassen blandes både i forkammer og i sylinder under kompresjonen, er resultatet en «jevner», mer homogen blanding, og derfor en bedre forbrenning. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 40: Figur som viser injeksjon av gass i forkammeret (Norsk Scania AS, 2023).

5.3 Gassmotoren

Først og fremst er det (som nevnt i tidligere kapitler) viktig å være klar over at en gassmotor er en gassmotor, uavhengig av om kjøretøyet går på CNG, CBG, LNG eller LBG. Den eneste forskjellen på systemer med komprimert gass og de med flytende, er at den flytende gassen varmes opp før den går inn i motoren, slik at den går over i gassform. Det er altså kun lagringen av gass i kjøretøyet, med tilhørende systemer, som er forskjellig. Alle gassmotorene Scania tilbyr kan derfor brukes med både CNG og LNG.



Figur 41: Scanias OC13 101 gassmotor (Norsk Scania AS, 2023).

Scania designet sine gassdrevne motorer med grunnlag i den tradisjonelle dieselmotoren. En gassmotor er imidlertid forskjellig fra en dieselmotor på flere områder. Den mest grunnleggende og vesentlige forskjellen er at gassmotoren bruker en ottoprosess. Dieselmotoren bruker derimot selvantenningsprinsippet. Det er færre enn *40 deler* som skiller det originale dieselmotor-designet fra gassmotoren. (Norsk Scania AS, 2023)

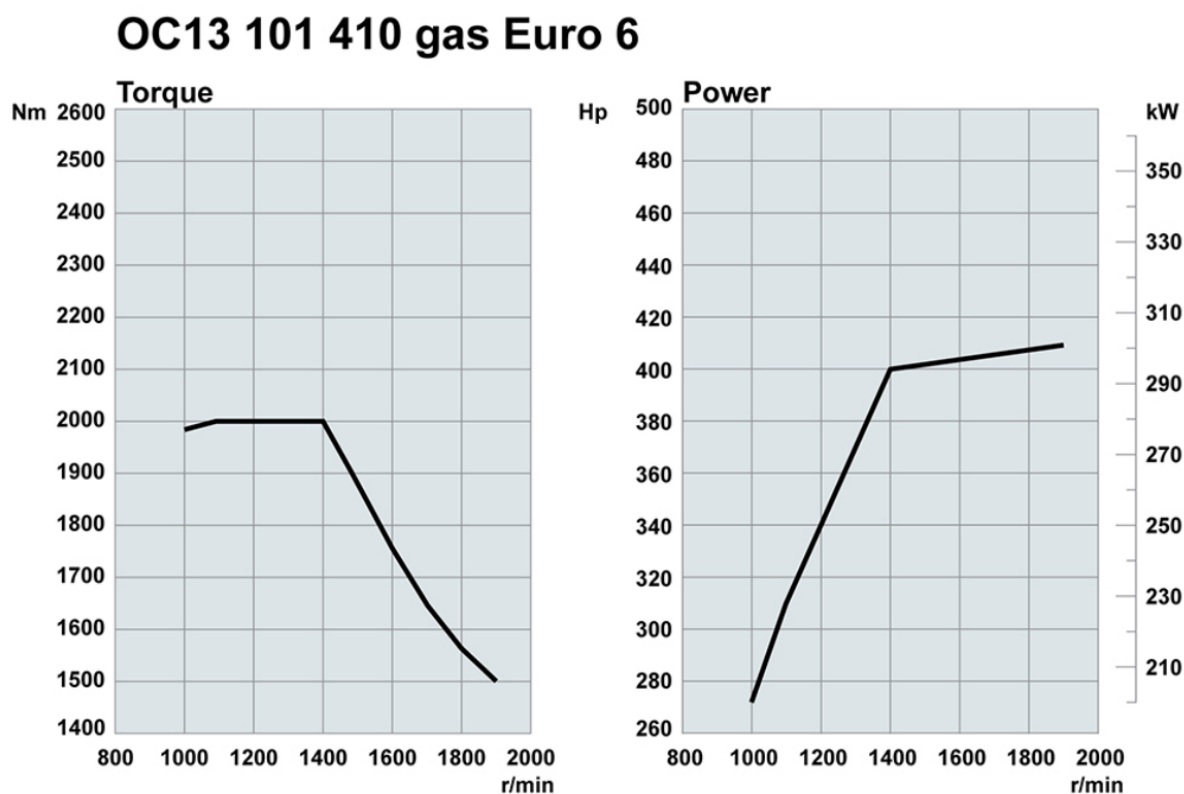
5.3.1 Krefter og moment

Denne rapporten ser på motor-modellen OC13 101. Dette er Scantias gassdrevne, 13-liter, 6-sylindrede rekkemotor med 410 hestekrefter og 2000 Nm dreiemoment. Det er også foreløpig den sterkeste gassmotoren som Scania tilbyr. En sterkere variant av 13-literen er like rundt hjørnet, og vil gi 460 hk.

Da gassmotoren ofte sammenlignes mot sin dieseldrevne motpart, er det hensiktsmessig å se på hvilke motorer av denne typen som er på markedet. Scania har følgende fem alternativer for ekvivalente motorvalg (altså rekkeseksere med 13-liter slagvolum):

- 370 hk, 1900 Nm
- 410 hk, 2150 Nm
- 450 hk, 2350 Nm
- 500 hk, 2350 Nm
- 540 hk, 2700 Nm

Vi ser her at selv om ytelsen til OC13 101 er i nedre del av lista, er den absolutt konkurransedyktig, og ytelsen tilsvarer vanlige diesel-alternativer (Scania AS, 2023). Figur 42 viser en mer detaljert oversikt over gassmotorens effekt og dreiemoment.



Figur 42: Effekt og dreiemoment for OC13 101, målt ved omdreininger (Norsk Scania AS, 2023).

5.3.2 Designgrunnlag og endringer

Scania designet som nevnt tidligere sine gassmotorer med grunnlag i de eksisterende dieselmotorene. Dette innebar et bestemt tankesett mtp. deler da det er lønnsomt å bruke så mange eksisterende deler som mulig, både fordi det er økonomisk å bruke de samme delene ifht. produksjonskostnader, men også fordi dette gir en større tilgjengelighet på deler for kunden. Det er færre enn 40 komponenter som skiller gassmotoren fra diesel-ekvivalenten. (Norsk Scania AS, 2023)

Endringene innebærer i hovedsak følgende punkter:

- Ny kompresjonsgrad.
- Nye stempelhoder.
- Inntaks- og eksosventiler er redesignet.
- En ekstra styreenhet, som kontrollerer gasstilførselen fra gass-systemet.
- Endring (og endringer for festeanordninger) til tennplugg, da diesel-motoren hadde selvantennning.
- Nytt drivstoffgalleri og injektorer for innsprøyting av gass.
- Nytt gass-spjeld.

Forbrenningstemperaturen i motoren er fra 400-700 grader, noe som er varmere enn diesel-varianten. I tillegg er kompresjonsgraden på dieselmotoren ca. 18:1, mens gassmotoren kun trenger fra 09:1 til 12,6:1. Forbrenningstrykket er også annerledes, da dette er mellom 180 og 200 bar i dieselmotoren, men kun 80-140 bar i gassmotoren. Dette gjorde det ønskelig å redesigne utvalgte interne motorkomponenter. De som er verdt å nevne i denne rapporten, er inntaks- og eksosventilene, og stempelhodene. (Norsk Scania AS, 2023)

Stempelhodene i gassmotoren er lettere enn diesel-varianten, da de ikke må motstå samme trykk og belastning. De er samtidig bedre rustet til å håndtere varme, da gassmotorens avgasser kan bli så varme som 900 °C uten bruk av EGR. Det samme gjelder inntaks- og eksosventilene. Figur 43 viser et tverrsnitt av de gamle og de nye eksosventilene. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 43: F.v.: Tverrsnitt av gamle diesel- og nye gass-eksosventiler (Norsk Scania AS, 2023).

Det er også gjort endringer på turboen og wastegate-ventilen, for at disse skal tåle høyere temperatur. (Norsk Scania AS, 2023)

5.3.3 Motorens blandingsforhold

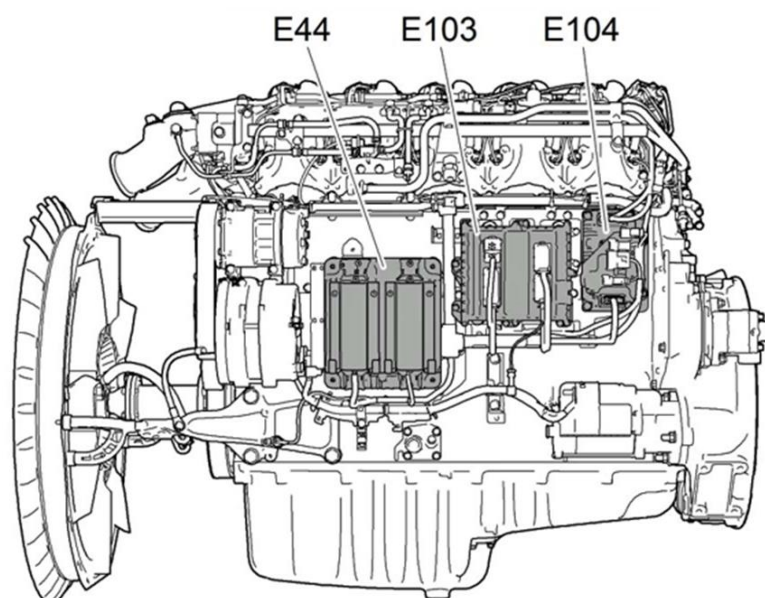
Motorens luftinntak reguleres av gass-spjeldet. Dette er plassert i luftinntaket, og overvåkes av styreenheten E103 (Otto Control System, OCS. Beskrevet i detalj i kap. 5.3.4.2). E103 kontrollerer injeksjon av drivstoff, tenning, utslipp av avgasser og diagnostikk. Avhengig av mengden luft som slippes inn av spjeldet vil altså denne styreenheten til enhver tid forsøke å gi motoren et støkiometrisk blandingsforhold for mest komplett forbrenning av drivstoffet. For ren metan er forholdet mellom luft og drivstoff ca. 17:1. (Norsk Scania AS, 2023)

Gassmotoren er, som nevnt i systemoversikten (kap. 5.1) utstyrt med to lambdasensorer. Den første er plassert rett bak turbinen i turboen, mens den andre sitter på lyddemperen i eksosanlegget (dvs. bak katalysatoren). Sensoren bak turboen tar opp oksygeninnholdet i avgassene, og rapporterer dette til E103. Den andre lambdasensoren sjekker nivået kun for å sikre at den første sensoren gjør jobben sin og fungerer som den skal. Dersom den første sensoren feiler vil nummer to ta over slik at motoren fortsetter å gå som den skal. Man vil da få beskjed om feil på systemet. Ellers er støkiometrisk blanding et stabilt alternativ ved gassdrift, ettersom denne gassmotoren kan drives i luftfaktorintervallet $\lambda = 0,8-1,6$. Dette gir god margin for å håndtere eventuelle feilforbrenninger eller momentvariasjoner. (Norsk Scania AS, 2023)

Lambdasensoren er ellers avhengig av en relativt høy temperatur for å fungere, noe som gjør det hensiktsmessig å varme den opp elektronisk ved oppstart av motoren. Det er derimot en forsinkelse programmert inn, slik at den skal varme seg i takt med resten av eksosanlegget. Dersom sensoren varmes for fort, vil den kunne pådra seg skader. Mens oppvarmingen pågår jobber motoren basert på en forhåndsinnstilt modus, som ikke påvirker driften. (Norsk Scania AS, 2023)

5.3.4 Styreenheter

Etter gjennomgang av motorens komponenter, er det nyttig å se på styreenhetene. Dette er de fire sentralene i kjøretøyet som bestemmer når hvilke komponenter skal gjøre hva, og som tolker innkommende informasjon fra sensorene. Motoren har tre styreenheter, E44, E103 og E104. Disse er vist på figur 44.



Figur 44: Figur som viser plasseringen av de tre styreenhetene, her på en 9-liter motor (Norsk Scania AS, 2023).

E44 er kontrollsystemet for ottomotoren (navngitt Engine Management Otto, eller EMO). Denne enheten er motorens primære styreenhet, og håndterer grunnleggende funksjoner av samme type som den ville gjort på dieselmotoren. Dette inkluderer f.eks. starteren, regulering av oljetrykk, kompressoren til aircondition, o.l.

E103 er en ekstra styreenhet (navngitt Otto Control System, eller OCS) som styrer alle de ekstra motorfunksjonene som er unike for gassmotoren.

E104 er kontrollenheten for tenningsystemet (Ignition Control Module, eller ICM). Denne styrer tenningsfunksjonene, og analyserer forbrenningen i motoren. Informasjonen fra analysene sendes til E103.

Den siste styreenheten er E131. Denne sitter ikke på motoren, men på rammen til kjøretøyet. Denne har fått navnet Gas Supply Controller (GSC), og kontrollerer tilførselen av gass til motoren.

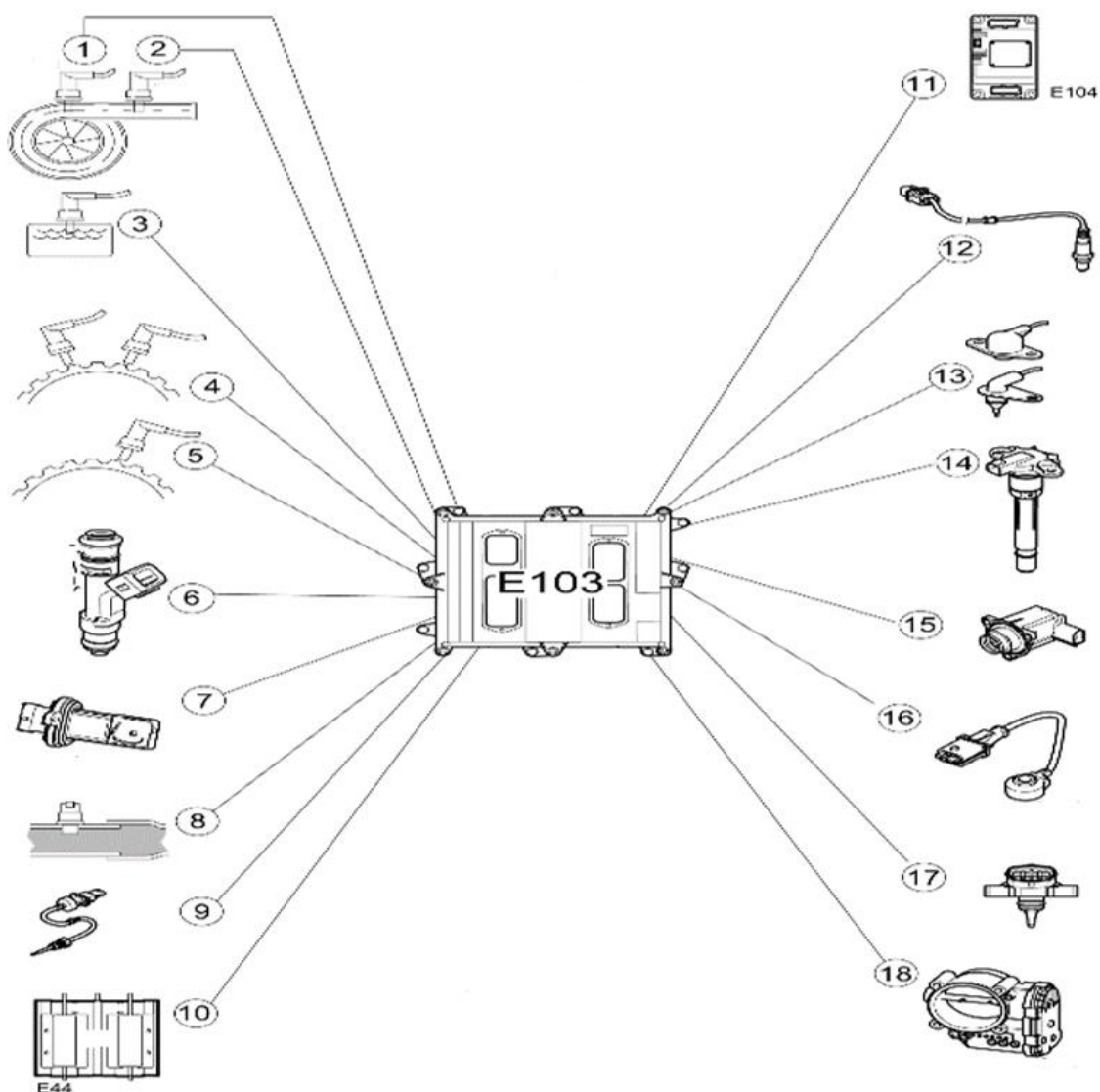
5.3.4.1 E44 – Engine Management Otto (EMO)

E44 er den primære ECU-enheten (Engine Control Unit), og styrer motorens mest generelle funksjoner. I OC13 101 gassmotoren håndterer denne enheten de funksjonene som er felles mellom gassmotoren og dens diesel-motpart. Denne styreenheten er av de fire enhetene den minst interessante for denne rapporten. (Norsk Scania AS, 2023)

Viktigst av alt snakker E44 med motorkontrolleren (E103) og E131. I tillegg styrer den oljesystemet på motoren, ved å lese av temperatur og oljenivå. Den kontrollerer også generatorer, starteren, koblingspolen til kompressoren for aircondition-anlegget, hydraulikk-pumpen, radiatorviften o.l. (Norsk Scania AS, 2023)

5.3.4.2 E103 – Otto Control System (OCS)

E103 er en ekstra ECU, eller motorkontroller. Den styrer de gass-spesifikke funksjonene i motoren, og snakker med både tenningsmodulen (E104) og primær ECU (E44). (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 45: Oversikt over hvilke enheter som kommuniserer med E103-modulen (Norsk Scania AS, 2023).

Nøkkelen til jobben E103 gjør er (som nevnt i tidligere kapitler) lambdasensorene. Disse gir E103 muligheten til å regulere forbrenningene etter behov, og holde høyest mulig effektivitet. Den har kontakt med de fleste sensorene som ble nevnt i systemoversikten (kap. 5.1), og styrer mesteparten av de gassrelaterte operasjonene. (Norsk Scania AS, 2023)

Ved gjennomgang av figur 45 har E103 ansvaret for intet mindre enn 18 komponenter:

- Den leser av og kontrollerer temperatur og trykk fra sensorene som er plassert etter gass-spjeldet (pkt. 1 og 2).
- Sensoren for kjølevæsken til motoren (pkt. 3).
- Rotasjonssensorene på svinghjulet (pkt. 4).
- Posisjonssensoren for kamakselen (pkt. 5).
- Drivstoffinjektorene som pumper gass inn i forkammeret (pkt. 6).
- Massestrømsensoren som måler luftstrømmen i luftinntaket (pkt. 7).

- Sensorene som måler trykket og temperaturen i eksosen (pkt. 8 og 9).
- Begge lambdasensorene (pkt. 12).
- Sensorene som måler trykk og temperatur på luften mellom mellomkjøleren og gass-spjeldet (pkt. 13).
- Tennspolene i tenningsmekanismen (pkt. 14).
- Dumpventilen (pkt. 15).
- De tre bankesensorene (pkt. 16).
- Sensoren som måler drivstofftrykket (pkt. 17).
- Gass-spjeldet som bestemmer hvor mye luft som slippes inn i forkamrene i motoren (18).

I tillegg til disse komponentene kommuniserer styreenheten med styreenhetene E44 (pkt. 10) og E104 (pkt. 11), altså kontrollerene for generelle motorfunksjoner og tenning. (Norsk Scania AS, 2023)

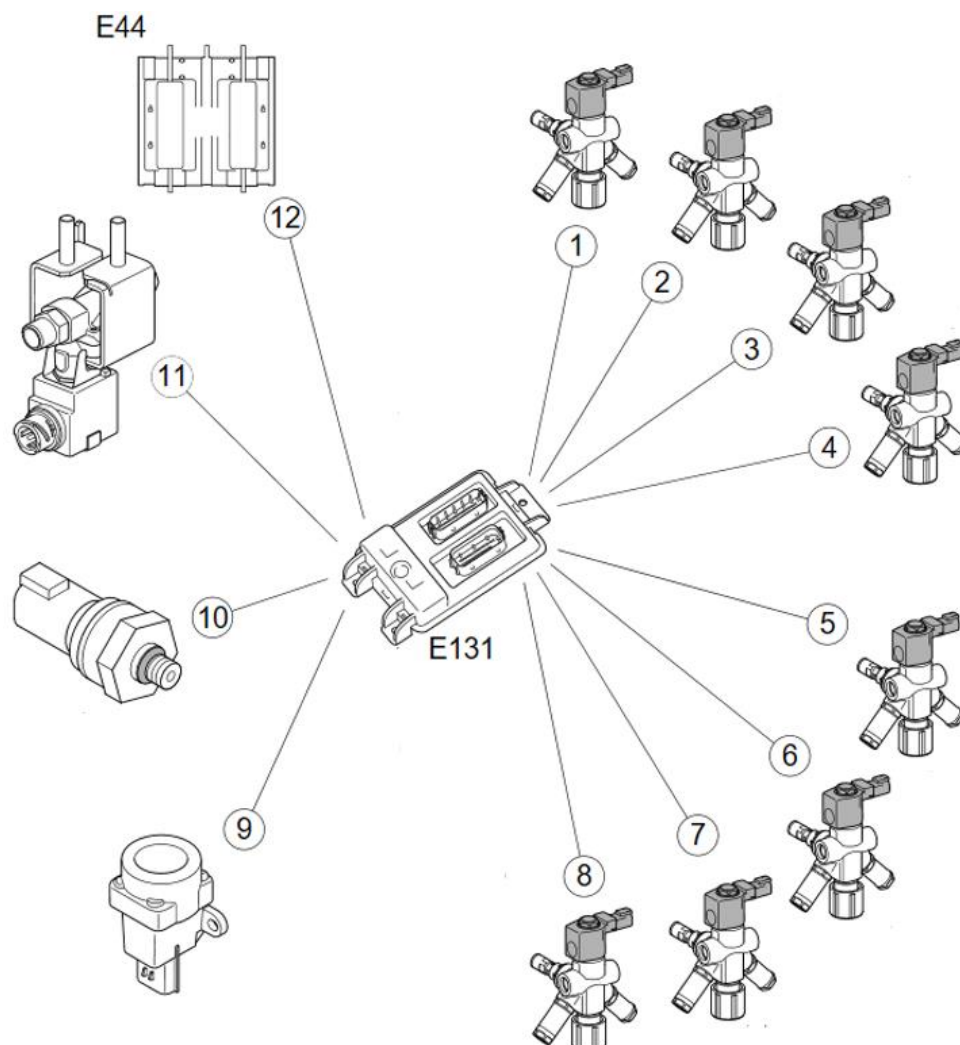
5.3.4.3 E104 – Ignition Control Module (ICM)

Kontrollenheten for tenningsystemet, tenningsmodulen E104, styrer i hovedsak bare tennspolene. Motorkontrolleren (E103) sender et signal til tenningsmodulen og ber om gnist fra tennpluggen ved behov. Tenningsmodulen produserer så en spenning på minst 360 volt som sendes til tennspolen. Tennspolene sitter i sylinderhodet, i samme enhet som tennpluggen (se kapittel 5.3.5). (Norsk Scania AS, 2023)

Tenningsmodulen får separate signaler fra motorkontrolleren for samtlige sylindere, og styrer antenningen i hver sylinder individuelt. Den leser også signaler fra sensoren som sjekker posisjonen til kamakselen, noe som brukes til diagnostisering av motoren ved eventuelle problemer. Modulen analyserer forbrenningen løpende og sender informasjon om eventuelle mistenkeligheter som feiltennering, redusert effektivitet o.l. til E103. (Norsk Scania AS, 2023)

5.3.4.4 E131 – Gas Supply Controller (GSC)

Styreenheten E131 (Gas supply Controller, GSC) styrer alle funksjonene som er knyttet til gassystemet. Dette innebærer å kontrollere gasstilførsel til motoren, rapportere informasjon til E44, samt å motta informasjon om forbrenningen fra E103 via E44 for å regulere gasstrykket. Figur 46 viser en nummerert figur over hvilke komponenter E131 kommuniserer med. (Norsk Scania AS, 2023)

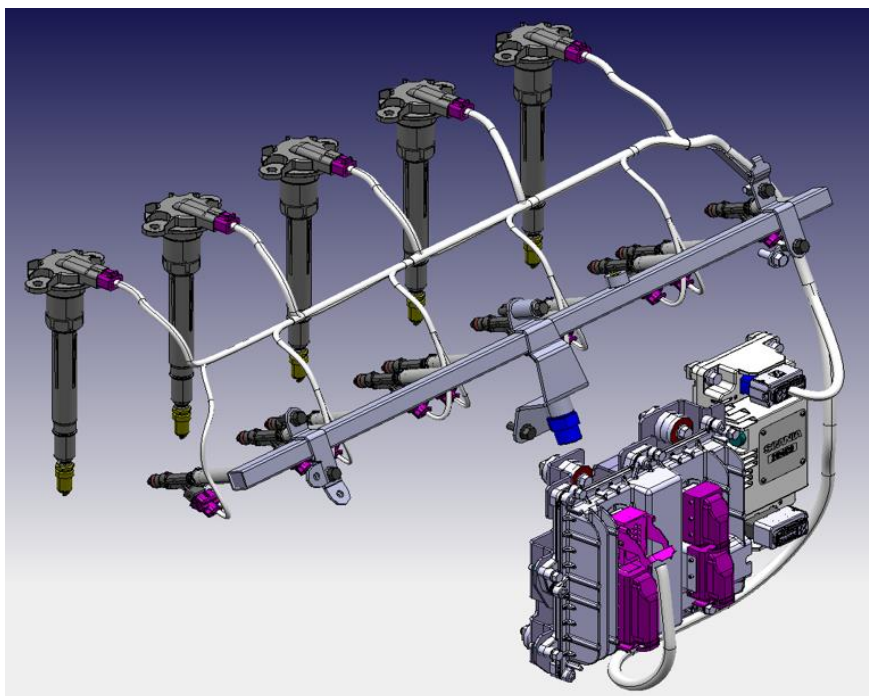


Figur 46: Nummerert figur som viser hvilke komponenter som er tilkoblet Gas Supply Controlleren. Dette systemet er et kjøretøy med CNG-tanker (Norsk Scania AS, 2023).

Punktene 1-8 er i dette tilfellet ventilsettene på CNG-tankene, nærmere bestemt de elektriske solenoidventilene som åpner og stenger gasstilførselen fra tankene. Ved kjøretøy som benytter LNG vil det være samme system, men kun to ventiler til de to tankene. Punkt 9 viser kollisjonssensoren, som ved kollisjon gir signal til GSC slik at gasstilførselen stenges av. Punkt 10 er høytrykksensoren som sender informasjon om gasstrykk i gasspanelet, og punkt 11 er lavtrykksventilen (solenoidventil) som åpner og stenger gasstilførselen til motoren. (Norsk Scania AS, 2023)

5.3.5 Tenningsystem

Tidligere har vi sett at tenningsystemet har en egen styreenhet, E44 (ICM). Dette kapittelet ser grunnleggende på sammensetningen av tennplugger og tennspoler, og funksjonen av disse. Figur 47 viser et illustrasjonsbilde av tenningsystemet, drivstoffgalleriet og tilhørende dyser og styreenheter.



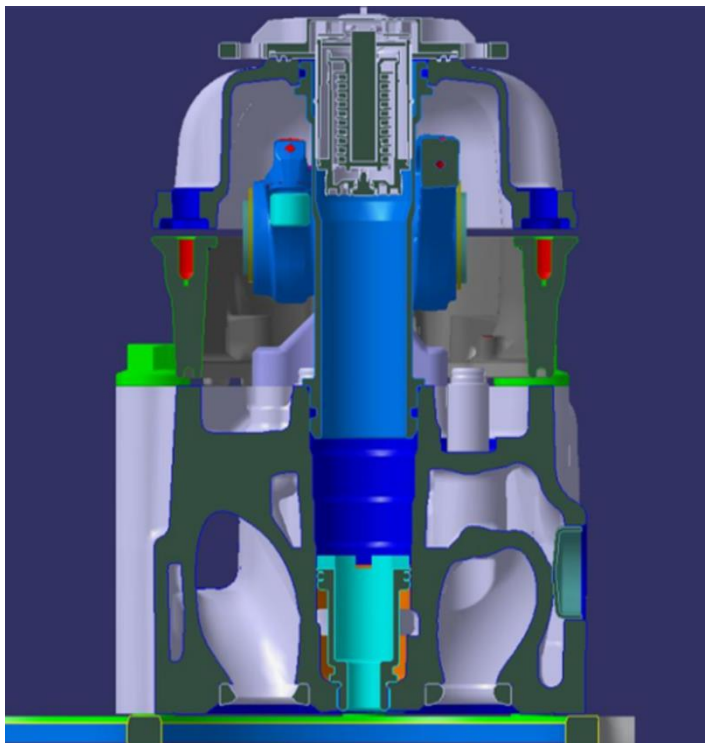
Figur 47: Illustrasjon av tenningsystem og drivstoffgalleri med injektorer. Systemet er likt på 9-liter- og 13-liter-motorene. Dette bildet er av en fem-sylindret 9-liter motor (Norsk Scania AS, 2023).

Til tenning av sylindrene i motoren benyttes noe som kalles «Capacitive Discharge Ignition» (CDI), eller «kapasitivt tenningsystem». CDI bruker en eller flere kondensatorer for å lagre energi som deretter tilføres tennpluggen via en tennspole for å generere en gnist når tenning skal inntreffe. Tenningsystemet inkluderer kondensatorer (vanligvis 400 Volt, men kan rangere fra 300-500 Volt) for lagring av energi, en transformator for å konvertere 12 Volt likestrøm til høyspenning, ladeelektronikk som raskt kan lade opp kondensatorene, en bryter som kobler kondensatoren til tennspolen i tenningsøyeblikket, og tennspoler med lav induktans. Bryteren kan være mekanisk eller transistorbasert, men vanligvis brukes sistnevnte. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 48: Illustrasjon av den nye sammensetningen av tennspole og tennplugg. Designet er laget spesielt av plasshensyn (Norsk Scania AS, 2023).

Tennspoler og tennplugg var ikke del av den originale motoren når designet ble påbegynt, og måtte innføres i motorsystemet på en så kompakt måte som mulig. Løsningen var konstruksjonen på figur 48. Tennspolen kobles sammen med tennpluggen via en forlenger. Denne gir en stabil, driftssikker og



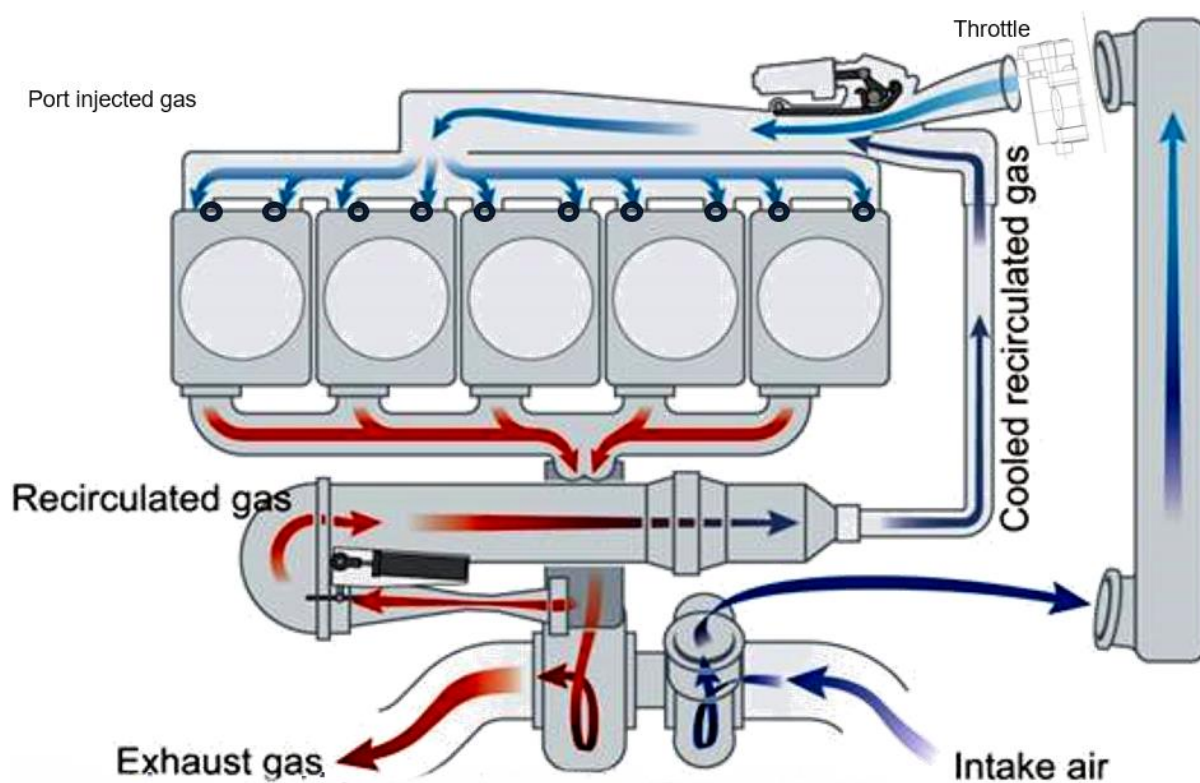
Figur 49: Tverrsnitt av et sylinderhode med tennspole, forlenger og buss (sete) til tennpluggen (Norsk Scania AS, 2023).

integreert kobling mellom spole og plugg, samtidig som det gir et godt utgangspunkt for kjøling. Konstruksjonen inneholder også en løsning for å oppdage eventuelle feiltenner i sylindere. Dette gjøres ved at det sendes en spenning over et tomrom i tennpluggen. Dersom forbrenningen skjer slik den skal, vil det registreres en elektrisk strøm. Et slikt system i dag påbudt iht. Euro 6 standarden. (Norsk Scania AS, 2023)

Figur 49 viser et tverrsnitt av sylinderhodet på en enkel sylinder. I toppen sitter tennspolen, festet i forlengeren. I bunnen av forlengeren sitter bussen, som holder tennpluggen på plass. Bussen er omgitt av kjølevæske, som holder tennpluggen på ca. 80 °C. Dette er lavt nok til at det utvider tennpluggenes levetid. Det er også nyttig ifm. fortenning. (Norsk Scania AS, 2023)

5.3.6 EGR

Gassmotorene til Scania benytter seg av de samme EGR-systemene som sine diesel-motparter. Det er maksimalt 20% av innholdet i forbrenningskammeret som kan bestå av avgasser i gassmotoren. Figur 50 viser en illustrasjon av et EGR system i en gassmotor. Det er liten til ingen forskjell på denne og vanlige EGR-systemer. Det kan nevnes at rør-systemet til EGR-loopen er noe justert i forhold til dieselmotoren, da gass-versjonen får en lavere EGR-strøm og dette kunne gjennomføres på en mer effektiv måte. (Norsk Scania AS, 2023)



Figur 50: Illustrasjon av et EGR-system i en fem-sylindret gassmotor (Norsk Scania AS, 2023).

6. Diskusjon

6.1 Biogasspotensiale i Norge

Potensialet for biogass er stort, og det bør absolutt vurderes. Et nåværende potensiale på 5,5 TWh er stort nok, tatt i betraktning at Norges største vindpark produserer 1,3 TWh. Dersom det fremtidige potensialet på 11,3 TWh årlig skulle vise seg å være korrekt innebærer dette nok energi til å dekke produksjonen til over 8 slike vindkraftverk. Denne produksjonen vil i tillegg kunne gjøres uten noen form for inngrep i natur og landskap. Det bør også huskes på at biogass kan benyttes i de samme tekniske systemene som naturgass. Dette gir muligheten til å fortsette bruk av utstyr som man ellers må bygge om for å benytte strøm- eller flytende drivstoff.

Imidlertid er det behov for et nasjonalt mål dersom dette skal være oppnåelig. Politikerne må gå foran med beslutninger og trygge rammevilkår, da det per nå er for stor usikkerhet rundt biogassens fremtid i Norge. Ting som at staten ikke gir føringer for hvilken tilstedeværelse som er ønsket for biogass i den norske energimiksen, eller at Enova nylig annonserte at de med en måneds varsel trekker all støtte til kjøp av biogassdrevne lastebiler, gir markedet uklare signaler på om biogass faktisk er noe å satse på. Dersom dette løses, vil biogassen ha et solid grunnlag i Norge.

6.2 Gassmotoren, lagring av gass og forbedringspotensiale

Gassmotoren har vært til stede i kjøretøy like lenge som bensin, og har vært viktig i flere situasjoner gjennom historien. Interessen har vært variabel og avhengig av tidsperiode, men kjøretøyene er både benyttet og forsket på i en slik grad at teknologien nå er svært moden. Motoren fra Scania har en høy effektivitet sammenlignet med sin dieseldrevne motpart, er drivstoffeffektiv og gir nok krefter til å drive tyngre kjøretøy.

Det neste viktige som bør nevnes er sikkerheten. Gasskjøretøyet i dag er helhetlig dimensjonert og designet for å ivareta sikkerheten til både føreren og de rundt. T-PRD- og P-PRD-ventilene på tankene sørger for at trykkøkninger og brann ikke er problematisk i forhold til lagring av gass i tanker over tid. Tankene er også plassert mellom akslene, på et sted der de er enkelt tilgjengelige for skade-inspeksjon ved fylling, men samtidig ikke er utsatt ved en potensiell kollisjon. Videre er det standarder som regulerer alle deler og systemer som har med gass å gjøre, noe som sikrer at tanker, ventiler o.l. er dimensjonert for belastningene de påføres. I fraværet av norske myndigheter har bransjen selv tatt grep for å sikre trygge rutiner for verkstedsbesøk og fylling. Pålegg av verneutstyr, sikkerhetsrutiner og oppmerksom behandling av kjøretøy når de skal tas inn til service gir en nokså lav risiko for ulykker og skader ifm. gasskjøretøy.

Forbedringspotensiale vil det alltid være i enhver teknologi. I gassmotorens tilfelle kan det være potensiale for å hente ut mer krefter ved effektiv elektronisk styring av forbrenningsprosesser og bruk av EGR. Motoren fra Scania er allerede effektiv på dette, men ytterligere forbedringer bør være mulige. Slike forbedringer vil være velkommen i markedet. Tyngre kjøretøy har behov for krefter dersom de trekker tungt og kjører mer krevende ruter, og selv om 410 hestekrefter er nok til å gjøre jobben, har dieselmotorene noen kraftigere motoralternativer. Den kommende 13-liter gassmotoren med 460 hk kan løse denne utfordringen.

Utover dette er det opplagte forbedringsområdet lagring av gass i kjøretøyet. Rekkevidden ved komprimert gass (CNG) er meget begrenset. Det er dog også begrenset hvor mye man kan gjøre med lagring av komprimert gass, da det egentlig bare er to løsninger: enten øke trykket, eller å utvide størrelsen på tankene. Begge disse innebærer problemer, da en økning av trykk vil øke faren dersom noe skulle gå galt og plassen til tanker er begrenset, selv på tunge kjøretøy. Løsningen er antakelig

allerede funnet, i form av LNG-drevne kjøretøy. Denne teknologien er fremdeles relativt ny på kjøretøy, og det vil være rimelig å anta at forskning vil avdekke stort potensiale for forbedringer på dette feltet. Større effektivitet i isolasjon og/eller kjøling av LNG-tankene vil gi lengre standby-tid før det oppstår boil-off, og økt brukserfaring og fartstid for bransjen vil kunne gi metoder for å utnytte plassen til tanker i kjøretøyene på bedre måter.

6.3 Økonomisk vurdering

Økonomien er en viktig, om ikke den viktigste, faktoren når man skal vurdere innkjøp av en biogassdrevet lastebil. Gass prisene har naturligvis en påvirkning på dette. Som nevnt tidligere er det misnøye i biogass-bransjen pga. fraværende føringer fra staten. Dette påvirker spesielt det økonomiske, da det må investeres for å få fart i teknologien, og ingen har lyst til å ta det første skrittet med mindre man vet at myndighetene ønsker en utvikling på feltet. Det er ukjent hvor stor påvirkning det vil ha på bransjen at Enova har trukket støtten sin. Summene man kan få i støtte er absolutt verdt å søke om, men ved kjøp av en eller to lastebiler til mellom 2 000 000 og 2 400 000 kroner per, er det tvilsomt at 100 000 kroner per kjøretøy til eller fra er et avgjørende element. Likevel er det utvilsomt med på å gjøre kjøretøyene mindre attraktive.

Videre er biogassen helt lik naturgassen i oppbygning og bruksområder. Den er dermed direkte koblet til gassprisene, og har blitt påvirket av gass-situasjonen ifm. krigen mellom Russland og Ukraina. Det vil være en stor grad av avhengighet til energi-situasjonen i Europa (og verden generelt). Dette vil også være medvirkende til om biogass blir for dyrt for veitransport eller ikke.

7. Konklusjon

Denne rapporten inneholder informasjon som er hentet inn fra litteraturstudier, og fra Norsk Scania AS. Informasjonen omhandler produksjon av- og potensialet for biogass i Norge. Videre tar rapporten for seg tunge biogassdrevne kjøretøy og de tekniske gassrelaterte systemene i disse.

Det er gitt en kort innføring i de viktigste prinsippene vedrørende produksjonsmetoder samt produksjonsprosesser og brukspotensiale for biogass, etterfulgt av et grunnlag i kjøretøyteori og gjennomgang av deler som er relevante for å forstå gassmotorens virkemåte og lagring av biogass i kjøretøy. Det er så utført et detaljstudie av en gassmotor fra Scania, der alle motorens komponenter er beskrevet og forklart i detalj. Dette arbeidet inkluderer også hele gass-systemet, med fullstendig gjennomgang av tanker for lagring av både komprimert og flytende gass. Rapporten gir også en grunnleggende gjennomgang av sikkerhetstiltak, både av det som er innbygget i teknologien og tiltak og rutiner bestemt av Norsk Scania AS for å sikre arbeid på verksted.

Samtlige delmål som ble fastsatt ved prosjektstart er oppfylt:

- Det er gjort kort rede for naturgassens historie, og tidligere bruk av naturgass som driftsmiddel i kjøretøy.
- Rapporten gir en kort gjennomgang av produksjonsprosesser og brukspotensialet for biogass.
- Det er redegjort for gassmotorens typiske oppbygning og virkemåte.
- Det er utført en studie av en gassmotor fra Norsk Scania AS for å gi et innblikk i hvilken teknologi som er «state of the art» for øyeblikket.

7.1 Anbefalinger og videre arbeid

Det er mye videre arbeid som kan anbefales ifm. temaene som er hevet i denne rapporten. Følgende punkter belyser noen av de mest interessante:

- Det kunne være av interesse å gå dypere i motorens forbrenningsprosess for å gjøre beregninger av effektiviteten på forbrenningen i motoren og tester på innholdet i avgassene.
- LNG-tankene inneholder flere systemer og designaspekter enn det tiden tillot gjennomgang av i denne rapporten. Det kan være interessant å se på systemene som bestemmer av- og på funksjonene til fyllestasjonens pumpefunksjon. Dette skal være påtenkt ved konstruksjon av LNG-tanken på kjøretøyet, men tiden tillot dessverre ikke nærmere undersøkelse. Konstruksjonen av munnstykket for fylling av LNG kan også være av interesse i denne sammenheng.
- Det kan være interessant å se på materialvalget som er gjort for å håndtere gassmotorens høye temperaturer. En stor del av forskjellene på Scantias diesel- og gassmotor varianter er utskifting av deler som i gassmotoren må tåle høyere temperaturer.
- Det kan være av interesse å undersøke det faktiske gassforbruket for tunge kjøretøy, for å se hvor riktig rekkeviddene oppgitt i denne rapporten er.
- Til slutt vil det være hensiktsmessig å gjøre en studie på et tungt kjøretøy fra en annen leverandør, for å vurdere likheter og forskjeller mellom disse. Det vil i så fall være nyttig med et eksempel til på et LNG-drevet kjøretøy.

Referanser

- Avfall Norge. (2017, Mai 18). *Biogass - Verdifullt, effektivt og med dobbel klimanytte*. Hentet fra Avfallnorge.no: <https://avfallnorge.no/bransjen/nyheter/biogass-verdifullt-effektivt-og-kliman%C3%B8ytralt>
- Basshuysen, R. V. (2016). *Natural Gas and Renewable Methane for Powertrains* (1st ed.. utg.). Cham: Springer International Publishing.
- Biogass Norge. (2023, April 14). *Kart over fyllestasjoner for biogass i Norge*. Hentet fra Biogass Norge: <https://biogassnorge.no/kart-over-fyllestasjoner/>
- Circle K. (2023, Mai 9). *Drivstoffpriser*. Hentet fra Circlek.no: <https://www.circlek.no/bedrift/drivstoff/drivstoffpriser>
- Engedal, M. I., & Bothner, T. M. (2021, November 17). *Transportutslipp påvirkes av korona, elbiler og biodrivstoff*. Hentet fra Statistisk Sentralbyrå: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/forurensning-og-klima/artikler/transportutslipp-pavirkes-av-korona-elbiler-og-biodrivstoff>
- Enova. (2023, Mai 5). *Bedriftslading for tunge kjøretøy*. Hentet fra Enova.no: <https://www.enova.no/bedrift/landtransport/bedriftslading-for-tunge-kjoretoy/>
- Enova. (2023, April 10). *Biogasskjøretøy*. Hentet fra Enova.no: <https://www.enova.no/bedrift/landtransport/biogasskjoretoy/>
- Enova. (2023, Mai 3). *Elvarebilsalget slår alle rekorder - Enova runder av støtten*. Hentet fra kommunikasjon.ntb.no: <https://kommunikasjon.ntb.no/embedded/release/elvarebilsalget-slar-alle-rekorder-enova-runder-av-stotten?publisherId=17848299&releaseId=17965806&lang=no>
- Enova. (2023, Mai 5). *Tunge Elektriske kjøretøy*. Hentet fra Enova.no: <https://www.enova.no/bedrift/landtransport/tunge-elektriske-kjoretoy/>
- Gasum. (2023, Mai 9). *Fyllestasjoner for gass*. Hentet fra Gasum.com: <https://www.gasum.com/no/baerekraftig-transport/tungtransport/fyllestasjoner-for-gass/?stationTypes=CNG%2CCNG%2CLNG>
- Grimstad, R. (2023, Mars 16). Sikkerhet og generell info om biogass-kjøretøy. (M. A. Pettersen, Intervjuer)
- Hagman, R. (2002). *Rene og effektive naturgassmotorer for tunge kjøretøy*. Oslo: Transportøkonomisk Institutt.
- Hofstad, K. (2020, april 2). *LNG*. Hentet Februar 14, 2023 fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/LNG>
- Hofstad, K. (2023, April 10). *Bankefasthet*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/bankefasthet>
- Hofstad, K. (2023, Januar 25). *Vindkraftverk*. Hentet fra Snl.no: <https://snl.no/vindkraftverk>
- Knold, M. (2023, Mai 8). Priser på kjøretøy og fremtiden til biogass. (M. A. Pettersen, Intervjuer)
- Lundby, L., Moen, J., & Myklebostad, I. (2002). *Motorteknikk*. Oslo: Gyldendal Norsk Forlag.

- Lyng, K.-A., & Berntsen, I. (2023). *Mulighetsrommet for produksjon av biogass i Norge*. Oslo: Norsus.
- Morken, J., Briseid, T., Hovland, J., Lyng, K.-A., & Kvande, I. (2017). *Veileder for biogassanlegg - Mulighetsstudie, planlegging og drift*. Ås/Oslo: NMBU.
- Natural Gas Vehicle Association Europe. (2019, August 1). *NGVA Europe Vehicle Catalogue*. Hentet fra Natural Gas Vehicle Association Europe: <https://www.ngva.eu/medias/ngva-europe-releases-2019-natural-gas-vehicle-catalogue/>
- Natural Gas Vehicle Association Europe. (2023, April 20). *Gas as a transport fuel*. Hentet fra ngva.eu: <https://www.ngva.eu/gas-as-vehicle-fuel/>
- Norges Bank. (2023, Mai 10). *Valuttakurser*. Hentet fra Norges-bank.no: <https://www.norges-bank.no/tema/Statistikk/Valutakurser>
- Norsk Handelsorganisasjon. (2023, Mars 9). *Om Grønt Landtransportprogram*. Hentet fra NHO.no: <https://www.nho.no/samarbeid/gront-landtransportprogram/artikler/om-gront-landtransportprogram/>
- Norsk Scania AS. (2023, Januar 19). Powerpoint-serie v/ Geir Storbråten. Oslo, Viken, Norge: Scania AS.
- Norwaste. (2022). *Biogasstatistikk 2021*. Oslo: Biogass Norge.
- Rosvold, K. A. (2020, Oktober 14). *Biogass*. Hentet fra Snl.no: <https://snl.no/biogass>
- Scania AS. (2023, April 20). *Motorserie*. Hentet fra Scania.com: <https://www.scania.com/no/no/home/products/trucks/motorserie.html>
- Statistisk Sentralbyrå. (2016). *Drivstofforbruk og utslipp for kjøretøygrupper*. Hentet fra ssb.no: <https://www.ssb.no/318322/drivstofforbruk-og-utslipp-per-kjorte-kilometer-for-et-utvalg-av-trafikksituasjoner-og-kjoretoygrupper.2016.g-km>
- U.S. Department of Energy. (2023, April 14). *Natural Gas Vehicles*. Hentet fra Energi Efficiency & Renewable Energy: https://afdc.energy.gov/vehicles/natural_gas.html
- Universitetet i Oslo. (2023, Mars 24). *Biodrivstoff*. Hentet fra UIO.no: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/b/biodrivstoff.html>
- Wikse, K. A. (2023, April 4). *Katalysator*. Hentet fra Store Norske Leksikon: https://snl.no/katalysator_-_bil



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway