

Beregnet til
Miljødirektoratet

Dokumenttype
Rapport

Dato
2022-11-07; sist revidert 2022-11-25

MILJØDIREKTORATET

UTSLIPP FRA

GASSKJØRETØY

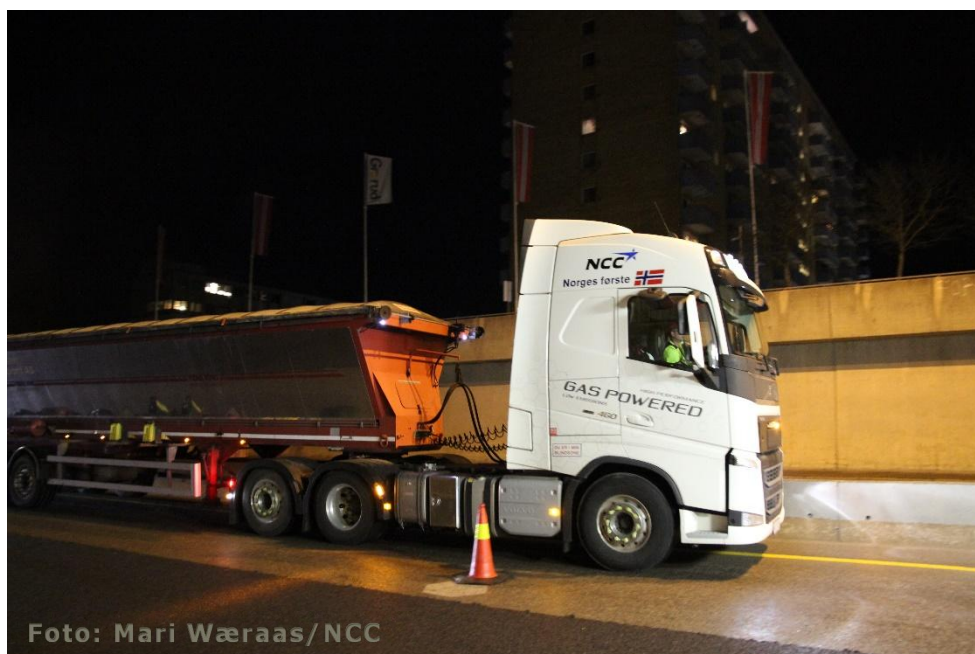


Foto: Mari Wæraas/NCC

Revisjon	03
Dato	2022-11-07; sist revidert 2022-12-06
Utført av	Hanne Weggeberg, Solveig Johannessen Gilleberg, Jenny Viken
Kontrollert av	Heidi Ødegård Berg
Godkjent av	Alexandra Griesfeller
Beskrivelse	Litteraturgjennomgang om utslipp til luft fra tunge gasskjøretøy, med mål om oppdatert kunnskaps- grunnlag for å kunne vurdere konsekvensen for luft- kvaliteten av tiltak rettet mot å øke andelen gass- kjøretøy

Miljødirektoratets referanse: M-2409|2022

Forsideillustrasjon: Mari Wæraas/NCC

FORORD

Rambøll har gjennomført prosjektet *Vurdering av utslipp til luft fra tunge gasskjøretøy sammenlignet med tunge dieselkjøretøy* på oppdrag for Miljødirektoratet. Oppdraget har gått ut på å foreta en kunnskapsoppdatering på utslipp til luft av ulike komponenter som har betydning for lokal luftkvalitet fra tunge gasskjøretøy sammenlignet med tunge dieselkjøretøy.

I Stortingsmelding 13 (2020-2021) *Klimaplan for 2021-2030* står det at Norge i henhold til Parisavtalen har forpliktet seg til å redusere utslippene av klimagasser med minst 50, og opp mot 55 % innen år 2030 sammenlignet med 1990-nivåene. Ved behandlingen av Innst. 2 S (2021-2022) den 2.12.21 fattet Stortinget et anmodningsvedtak (vedtak 35. nr. 8) der regjeringen bes om å utrede og legge frem forslag om hvordan man kan likestille gassdrevne (GA)-kjøretøy som kjører på biogass med el- og hydrogendrevne biler i bomringene snarest mulig, og i løpet av 2022. Som en oppfølging av anmodningsvedtaket og med henvisning til Norges klimaforpliktelser, har Samferdselsdepartementet gitt Statens vegvesen oppdrag om å utrede og utarbeide en løsning for redusert bompengetakst eller fritak for bompenger for gassdrevne tunge kjøretøy. I vurderingen av konsekvenser ble det bedt om å samarbeide med Miljødirektoratet.

Gassdrivstoff omfatter i denne studien metangass av fossil og fornybar opprinnelse. Bruk av gassdrivstoff i transport medfører lavere utslipp blant annet av karbondioksid sammenlignet med fossil bensin og diesel, men kan være forbundet med utslipp av flere mulig helseskadelige stoffer enn fossilt drivstoff. Som del av vurderingen av tiltak rettet mot bompenger for tunge gasskjøretøy, har Miljødirektoratet behov for bistand med å skaffe kunnskap om mulige konsekvenser for lokal luftkvalitet av økning av andelen gassdrevne i forhold til dieselkjøretøy. Forbrenning av gass medfører, i likhet med fossil bensin og diesel, utslipp til luft av luftforurensning som kan resultere i skadelige helseeffekter og redusert luftkvalitet lokalt. Relevante utslippskomponenter forbundet med forbrenning av gass inkluderer partikler/svevestøv (PM), nitrogenoksider (NO_x), hydrokarboner og andre organiske komponenter.

Rambøll har utarbeidet en rapport på oppdrag for Miljødirektoratet. Rapporten er utarbeidet av prosjektmedarbeiderne med ekspertise innen drivstoff for kjøretøy, lokal luftforurensning og helse, og aktuelt regelverk og ressurser i Norge og andre land og regioner. Vi vil gjerne takke kolleger for støtte, og Miljødirektoratet for god dialog i prosjektet og nyttige tilbakemeldinger til arbeidet med rapporten.

Innhold

SAMMENDRAG	4
ENGLISH SUMMARY	6
FORKORTELSER OG DEFINISJONER	8
1. INNLEDNING	10
2. METODIKK	11
2.1 Relevante ressurser og søkestrategi	11
3. RESULTATER OG VURDERINGER	12
3.1 Oppsummering av innhentet litteratur og omfang	12
3.2 Utslipp til luft ved bruk av gassdrivstoff i tunge kjøretøy	13
3.2.1 Regulerte utslipp	13
3.2.2 Utslipp av uregulerte toksiske komponenter	16
3.3 Motorteknologi og etterbehandlingssystemer	17
3.4 Kjøreforhold og utslippstester	18
3.5 Euro VII-kjøretøy og utslipp	19
3.6 Biogass som drivstoff i tunge kjøretøy	19
3.7 Variabilitet i utslipp og usikkerheter	19
4. KONKLUSJON	20
REFERANSER	21

VEDLEGG

Vedlegg 1. Oversikt over studier og sammenstilling av utslippsfaktorer

SAMMENDRAG

Insentiver rettet mot økt bruk av gassdrivstoff er aktuelt på grunn av lavere direkte utslipp, det vil si fra eksos, av karbondioksid og partikkelmasse sammenlignet med diesel. Det er imidlertid behov for mer kunnskap om mulige konsekvenser for den lokale luftkvaliteten av en økning i andelen tunge gasskjøretøy. Som grunnlag for å kunne vurdere mulige konsekvenser har Miljødirektoratet derfor behov for å få oppdatert kunnskap om forskjellen i utslipp til luft av aktuelle stoffer som kan gi helseskader mellom gassdrivstoff og diesel i tunge kjøretøy. Arbeidet har bestått i systematiske søk etter og analyse av relevant faglitteratur som omhandler utslipp til luft av regulerte komponenter fra tunge gasskjøretøy. Utslippstall fra forskningslitteraturen er sammenstilt, som grunnlag for konklusjoner om virkningen av å øke andelen tunge gasskjøretøy og anbefalinger om tiltak.

Utslippskomponenter som er undersøkt i studien inkluderer NO_x, partikler/svevestøv (PM₁₀, PM_{2,5} og partikkelantall), CO, og organiske forbindelser, primært flyktige organiske forbindelser (VOC) og totale hydrokarboner (THC). Fokus for oppdraget er på lastebiler, ettersom det først og fremst er disse som vil påvirkes av bompengetiltak. I henhold til oppdragsspesifikasjonene er studier som undersøker Euro VI, og kommende Euro VII-kjøretøy prioritert.

Totalt ble 123 kilder gjennomgått. 19 studier omhandlet kjøretøy som var Euro VI-klassifisert, men kun tre studier inkluderte undersøkelser av utslipp fra Euro VI- lastebiler som bruker gassdrivstoff sammenstilt med referansekjøretøy som bruker diesel. Fem studier undersøkte utslipp fra gassdrevne busser som overholdt Euro VI- eller EEV (*Enhanced Environmentally friendly Vehicle*)-standarden sammenlignet med tilsvarende dieselbusser. Resterende kilder inneholder informasjon som kan være av betydning for vurderinger av mulige påvirkninger av tunge gasskjøretøy på lokal luftkvalitet, som studier som undersøker betydningen av ulike kjøreforhold og testbetingelser i andre typer kjøretøy.

Euro VI-standardene for tunge kjøretøy inneholder utslippsgrenser for komponentene NO_x, CO, THC, NMHC (totale hydrokarboner med unntak av metan), metan, ammoniakk og partikler, som partikkelmasse (PM) og partikkelantall (PN). Av de regulerte utslippskomponentene, viser tilgjengelige studier på Euro VI-lastebiler gjennomgående lavere utslipp av partikkelmasse, men både økning og reduksjon i utslippene av NO_x og CO for lastebiler og søppelbiler som bruker gassdrivstoff sammenlignet med dieselkjøretøy. Utslippene varierer betydelig etter forhold som type kjøretøy, motorteknologi og kjøreforhold. For THC ble det påvist høyere utslipp i gass- sammenlignet med dieselkjøretøy. En økning i utslipp av hydrokarboner kan indikere økte utslipp av toksiske forbindelser fra tunge gasskjøretøy, men det presiseres at resultatene er basert på kun én studie med få testkjøretøy.

Utslipp av svevestøv som partikkelmasse (PM) er vesentlig lavere for kjøretøy som bruker gassdrivstoff sammenlignet med dieselkjøretøy. Flere studier, blant annet studier som inkluderte Euro VI-lastebil, har imidlertid påvist høyere partikkelantall (PN) i utslippet under enkelte kjøreforhold som kjøring i urbane områder. Analyser av partikkelfordeling har vist høyere andel små partikler, som ultrafine partikler og nanopartikler, i eksos fra gasskjøretøy. Små partikler kan trenge dypere ned i luftveiene, og utgjør dermed større helserisiko.

Enkelte studier har undersøkt utslipp av toksiske, uregulerte komponenter. En studie som inkluderte tunge Euro VI-kjøretøy påviste lavere utslipp av aldehyder og totalt PAH i kjøretøy som brukte CNG sammenlignet med dieselkjøretøy, men høyere innhold av flyktige PAH i utslippet. Forhøyede utslipp av karbonyler i gasskjøretøy særlig ved kaldstart og lave kjørehastigheter ble funnet i en studie utført på lastebiler, søppelbiler og buss; studien var utført i USA med kjøretøy ikke klassifisert etter Euro VI-standarder.

Utslippene varierer sterkt med kjøreforhold, med vesentlig høyere utslipp ved kjøring under lave hastigheter, lav temperatur og høy grad av akselerasjon og oppbremsing. For å kunne sammenstille

resultater fra ulike studier og sertifisere kjøretøy i henhold til utslippskrav, er det utviklet standardiserte kjøretester. I regulering, inkludert sertifisering i henhold til Euro-standardene, testes tunge kjøretøy etter testsyklusen *World Harmonized Test Cycle* (WHTC). Flere undersøkelser har imidlertid påvist vesentlige avvik i utslippsfaktorene mellom standardiserte utslippstester og ved kjøring under reelle forhold. Enkelte studier viser for eksempel høyere utslipp av nitrogenoksider og partikkelantall fra tunge gasskjøretøy sammenlignet med dieselskjøretøy ved kjøring under urbane forhold; en økning i andelen tunge gasskjøretøy kan dermed muligens medføre økte utslipp av disse komponentene i byer og større tettsteder, der befolkningstettheten er høy slik at flere mennesker eksponeres. Ettersom utslippene fra kjøretøy er høyst variable avhengig av forhold som type kjøretøy, motorteknologi, etterbehandlingssystemer, i tillegg til kjøreforhold og testsyklus, er det vanskelig å trekke klare konklusjoner om forskjeller i utslipp mellom lastebiler som bruker gassdrivstoff og diesel.

Innføring av Euro VII-utslippsstandarder med strengere krav og utslippsgrenser for ulike typer kjøretøy er under planlegging. Per i dag foreligger lite publisert forskningslitteratur som har undersøkt utslipp fra kjøretøy i henhold til framtidige Euro VII-krav. Forsknings- og utviklingsarbeid pågår for å komme fram til motorteknologi og etterbehandlingssystemer for å overholde de nye utslippsgrensene.

Vurdering av betydningen av bruk av biogass som drivstoff på utslipp til luft og lokal luftforurensning inngikk i prosjektet. Rå-biogass inneholder urenheter, men gjennomgår prosessering og konverteres til drivstoffprodukt som har samme spesifikasjon som drivstoffprodukt basert på naturgass. I utgangspunktet har gassdrivstoff til bruk i transportsektoren samme utslipp til luft fra eksos, uavhengig av opprinnelse.

Type kjøretøy, motorteknologi og etterbehandlingssystem er avgjørende for utslipp til luft fra kjøretøy. Kjøretøy er avhengige av eksosbehandling for å kunne overholde Euro VI-utslippsgrensene. Den mest utbredte teknologien for lastebiler som bruker gassdrivstoff er i dag støkiometriske SI (*spark ignition*)-motorer utstyrt med en kombinasjon av *Three-Way Catalyst* (TWC) og *Exhaust Gas Recirculation* (EGR), som reduserer utslippene av NO_x, CO og hydrokarboner.

ENGLISH SUMMARY

Incentives to increase the use of gas fuels are relevant due to lower direct (exhaust) emissions of carbon dioxide and particle mass compared to diesel. However, there is a need for more knowledge on possible consequences of increasing the heavy-duty gas vehicle share for local air quality. As basis to be able to assess possible consequences of measured to increase gas vehicle shares, the Environment Agency needs updated knowledge on the difference in emissions to air of compounds that pose a health risk between gas fuels and diesel in heavy-duty vehicles. The work has consisted in systematic searches for and analysis of relevant scientific literature on emissions to air of regulated component from heavy-duty gas vehicles. Emission numbers from the research literature were compiled, as basis for concluding on the effects of increasing the shares of heavy-duty gas vehicles and recommendations of measures.

Emission components examined in the study include NO_x, particles/particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5} and particle number), CO, and organic compounds, primarily volatile organic compounds (VOCs) and total hydrocarbons (THC). Focus for the assignment is on trucks, since these primarily will be affected by road tax changes. In accordance with the specifications for the assignment, studies on Euro VI, and upcoming Euro VII, vehicles are prioritized.

A total of 123 literature sources were reviewed, 19 studies included Euro VI classified vehicles, but only three studies included investigations of emissions from Euro VI trucks that used gas fuels compared to reference diesel vehicles. Five studies investigated emissions from gas-fueled buses that met the Euro VI or EEV (Enhanced Environmentally friendly Vehicle) standard compared to corresponding diesel buses. Remaining sources contain information that might be of relevance for assessments of possible impacts of heavy-duty gas vehicles on air quality, such as studies that investigate the significance of different driving conditions and test specifications in other types of vehicles.

The Euro VI standards for heavy-duty vehicles include emission limits for the components NO_x, CO, THC, NMHC (total hydrocarbons with the exception of methane), methane, ammonia and particles, as particulate mass (PM) and particle number (PN). Of the regulated emission components, available studies on Euro VI trucks show overall lower particle mass emissions, but both increased and decreased emissions of NO_x and CO for trucks and refuse haulers that use gas fuels compared to diesel vehicles. The emissions vary considerably depending on factors such as vehicle type, engine technology and driving conditions. For THCs, higher emissions were found in gas compared to diesel vehicles. Increased hydrocarbon emissions can indicate increased emissions of toxic compounds from heavy gas vehicles, but it must be kept in mind that the results are based on only one study with few test vehicles.

Emissions of particulate matter as particle mass (PM) are considerably lower for vehicles that use gas fuels compared to diesel vehicles. Several studies, including studies on Euro VI trucks, have, on the other hand, shown higher particle numbers (PN) in the emissions during certain driving conditions such as driving in urban areas. Analyses of particle size distributions have found higher shares of smaller particles, such as ultrafine particles and nanoparticles, in exhaust from gas vehicles. Smaller particles can penetrate deeper into the airways and consequently pose a greater health risk.

Certain studies have investigated emissions of toxic, unregulated components. One study that included heavy Euro VI vehicles found lower emissions of aldehydes and total PAHs in vehicles using CNG compared to diesel vehicles, but higher contents of volatile PAHs in the emission. Increased emissions of carbonyls in gas vehicles especially during cold start and low driving velocities were found in a study conducted on trucks, refuse haulers and bus; the study was conducted in the US with vehicles not classified according to Euro standards.

Emissions strongly depend on driving conditions, with significantly higher emissions during driving at low speeds, low temperature and frequent acceleration and braking. To be able to compare results

from different studies and certify vehicles in accordance with emission regulations, standardized driving tests have been developed. In regulation, including certification in accordance with Euro standards, heavy-duty vehicles are tested using the test cycle World Harmonized Test Cycle (WHTC). However, several investigations have shown considerable deviations in emission factors between standardized emission tests and driving during real-world conditions. For instance, certain studies show higher emissions of nitrogen oxides and particle number from heavy-duty gas vehicles compared to diesel vehicles during driving in urban conditions; increased shares of heavy-duty gas vehicles can thereby possibly lead to increased emissions of these components in cities and densely populated areas, resulting in higher exposure. Since emissions from vehicles are highly variable depending on factors such as vehicle type, engine technology, aftertreatment systems, in addition to driving conditions and test cycle, it is difficult to draw clear conclusions on differences in emissions between trucks that use gas fuels and diesel.

The introduction of Euro VII emission standards with stricter regulations and emission limits for different types of vehicles is in planning. To date little published research is available that has investigated emissions from vehicles in accordance with future Euro VII regulations. Research and development is ongoing to arrive at engine technologies and aftertreatment systems that comply with the new emission limits.

Assessment of the implications of use of biogas as fuels on emissions to air and local air pollution was part of the project. Raw biogas contains impurities, but is processed and converted to fuel product with the same specifications as fuels based on natural gas. Basically, gas fuels in use in the transportation sector have the same emissions to air from exhaust, independent of its origin.

Type of vehicle, engine technology and aftertreatment system are crucial for emissions to air from vehicles. Vehicles are dependent on exhaust treatment to comply with the Euro VI emission limits. The most commonly used technology for trucks that use gas fuels today are stoichiometric SI (spark ignition) engines equipped with a combination of Three-Way Catalyst (TWC) and Exhaust Gas Recirculation (EGR), that reduce emissions of NO_x , CO and hydrocarbons.

FORKORTELSER OG DEFINISJONER

Aerosoler: Aggregererte partikler i fast- eller væskeform som er suspendert i gass (vanligvis luft)

BC: Svart karbon (*Black Carbon*); sotlignende partikler som dannes ved forbrenning, både av drivstoff og fra naturlige kilder som skogbranner

Biodrivstoff: Energikilder som er fremstilt fra organisk materiale, inkludert fast biomasse, flytende biodrivstoff og biogass

Biogass: Blanding av gasser som produseres ved anaerob nedbrytning av organisk materiale som landbruks- og annet biologisk avfall, plantemateriale og gjødsel. Betegner i rapporten biogass som er rensset for CO₂ og komprimert eller flytendegjort slik at den kan anvendes som drivstoff.

CH₄: Metan

CBG: Komprimert biogass (*Compressed Biogas*)

CNG: Komprimert naturgass (*Compressed Natural Gas*)

CO: Karbonmonoksid

Diesel: Petroleumsbasert drivstoff; betegner petroleumsfraksjonen utvunnet fra råolje som har kokepunkt i området 180–380 °C

DOC: *Diesel Oxidation Catalyst*; etterbehandlingssystem for eksosgass. Inneholder palladium og/eller platina, som reduserer karbonmonoksid, hydrokarboner og partikler i utslippet til karbondioksid og vann

DPF: *Diesel Particulate Filter*; etterbehandlingssystem for eksosgass, bestående av filter som fjerner sotpartikler

Dual fuel-kjøretøy: Kjøretøy som bruker en blanding av to ulike typer drivstoff; for eksempel kan tunge kjøretøy benytte gass som primært drivstoff, med pilot-injeksjon av diesel for å initiere forbrenningen

EC: Elementært karbon (*Elementary Carbon*); dannes i all hovedsak ved forbrenning, både fra forbrenning av drivstoff og vedfyring, og fra naturlige kilder som skogbranner

EGR: *Exhaust Gas Recirculation*; etterbehandlingssystem i bensin- og dieselmotorer for utslippsreduksjon av nitrogenoksider. EGR fungerer ved å sende regulert mengde eksos tilbake til motorens luftinntak for å kontrollere intensiteten og temperaturen i forbrenningen

Euroklasser: Utslippsstandarder for kjøretøy, spesifisert i EU-direktiver og -reguleringer. Euro VI-kravene for tunge kjøretøy er spesifisert i *Regulation (EC) No 595/2009*

Forurensningsforskriften: *Forskrift om begrensning av forurensning* (Klima- og miljødepartementet, 2004; sist endret 2022-06-03)

Gassdrivstoff: Drivstoff som foreligger i gassform. Refererer i studien til *naturgass* og/eller *biogass* (se oppført)

Gasskjøretøy: Kjøretøy som bruker gassdrivstoff som hoved-drivstoff. Enkelte kjøretøy kan bruke to ulike typer drivstoff (*dual-fuel*)

HC: Hydrokarboner

HDV: Tunge kjøretøy (*Heavy-Duty Vehicles*)

Lastebiler: Kjøretøy som benyttes til frakt av gods, inkludert semitrailere og vogntog. Defineres i studien som lastebiler med totalvekt på over 3500 kg og/eller lengde på over 5,5 meter, inkludert kjøretøygruppene N2 og N3 (lastebiler med totalvekt på henholdsvis 3500-12 000 kg, og over 12 000 kg)

LBG: Flytende biogass (*Liquid Bio Gas*). Omtales også som bio-LNG

Lean burn-motorer: Motorer der forholdstallet mellom luft og drivstoff er høyere enn støkiometrisk (se *Støkiometriske motorer*), som medfører mer effektiv forbrenning men også høyere temperatur, slik at utslippene av nitrogenoksider blir høyere enn ved støkiometrisk forbrenning

LNG: Flytende naturgass (*Liquid Natural Gas*)

Naturgass: Fossilt drivstoff, dannet ved nedbrytning av organisk materiale under anaerobe forhold. Består av en blanding av enkle hydrokarboner, i all hovedsak metan, med en viss prosentandel gasser som nitrogen og karbondioksid

NEDC: *New European Driving Cycle*; standardisert kjøresyklus utviklet for å representere typiske kjøreforhold på europeiske veger. Brukt til å måle drivstofforbruk og utslipp fra kjøretøy iht. Direktiv 70/220/EEC (opphevet av Regulation (EC) No. 715/2007); sist oppdatert i 1997

NMHC/NMVOC: Summen av alle hydrokarboner/flyktige organiske forbindelser med unntak av metan

NO_x: Nitrogenoksider

O₃: Ozon

OC: Organisk karbon (*Organic Carbon*); dannes ved prosesser som ufullstendig forbrenning av drivstoff, vedfyring eller naturlige kilder som skogbranner, slitasje f.eks. av bildekk, og biologisk materiale som sporer og pollen

PM: Se *svevestøv*

SCR: *Selective Catalytic Reduction*; etterbehandlingssystem for eksosgass som reduserer utslippene av nitrogenoksider, ved påspraying av urea slik at ammoniakk reduserer nitrogenoksider til nitrogengass og vann

SO₂: Svoveldioksid

Støkiometriske motorer: Motorer der forholdstallet luft-drivstoff er akkurat tilstrekkelig til at alt tilgjengelig drivstoff forbrenner. Støkiometrisk forbrenning medfører lavere utslipp av nitrogenoksider, men høyere karbonmonoksid-utslipp

Svevestøv: Også kalt *partikulært materiale* (*Particulate Matter*; PM); de partikulære bestanddelene i aerosoler, som kan være luftbårne over lenger tid og transporteres over lengre avstander

TC: Total karbon; summen av elementært (EC), uorganisk og organisk karbon (OC)

Tunge kjøretøy: Benyttes i studien som betegnelse på kjøretøy med totalvekt på over 3500 kg og/eller lengde på over 5,5 meter. Tunge kjøretøy inkluderer busser og lastebiler, dvs. kjøretøygruppene N2 og N3 (lastebiler med totalvekt på henholdsvis 3500-12 000 kg, og over 12 000 kg), M2 og M3 (busser med tillatt totalvekt på henholdsvis under og over 5000 kg), og vogntog (trekkbil med tilhenger)

TWC: *Three-Way Catalyst*; katalysator-etterbehandlingssystem for eksosgass som reduserer utslippene til luft av nitrogenoksider, karbonmonoksid og hydrokarboner. Fungerer ved kjemisk reduksjon av nitrogenoksider til nitrogengass, og oksidasjon av karbonmonoksid og hydrokarboner til karbondioksid.

VOC: Flyktige organiske forbindelser («volatile organic compounds»); organiske stoffer som lett fordampes ved romtemperatur (i forurensningsforskriften kap. 9 definert som organiske forbindelser som ved 293,15 K har et damptrykk på 0,01 kPa eller mer; Klima- og miljødepartementet, 2004)

WLTP: *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*; global, harmonisert sertifiseringsstandard for måling av drivstofforbruk og utslipp fra personbiler og lette varebiler. Utviklet av en ekspertgruppe i regi av *The World Forum for Harmonisation of Vehicle Regulations*, en arbeidsgruppe tilhørende *The United Nations Economic Commission for Europe* (UNECE). Innført som standard i EU for måling av drivstofforbruk og CO₂-utslipp 1.9.2017 for nye personbiler (1.9.2018 for alle personbiler)

1. INNLEDNING

Lastebiler utgjør kun 1,6 % av kjøretøyene registrert i Norge i år 2021 (Statistisk sentralbyrå, 2022), men utslippene til luft per kjørte kilometer er langt høyere for tunge kjøretøy sammenlignet med for personbiler, som det framgår for eksempel av utslippsfaktorer for ulike typer kjøretøy i HBEFA-databasen (INFRAS, 2022). Det presiseres at utenlandskregistrerte kjøretøy ikke er inkludert i statistikken. De senere årene har andelen tunge kjøretøy som bruker gassdrivstoff økt flere steder i verden, blant annet innen kjøretøygruppene lastebiler, bybusser og søppelbiler (Thiruvengadam et al., 2018). I Norge benytter 0,8 % av lastebilene gassdrivstoff, mens tilsvarende tall for busser er 5,2 %. Gass benyttes i Norge som drivstoff også blant annet i fartøy og anleggskjøretøy. De aller fleste gassdrevne både lastebiler og busser registrert i Norge i dag er Euro VI-klassifisert. Euro-klassifiseringen angir utslippsstandards for kjøretøy; for tunge kjøretøy er reguleringene for Euro VI-kjøretøy spesifisert i *Regulation No. 595/2009* (European Commission, 2009), som oppdateres jevnlig gjennom tillegg (sist endret 01.09.2020). Kommende Euro VII-reguleringer vil inneholde enda strengere krav og utslippsgrenser for kjøretøy.

Gassdrivstoff kan være av fossil (naturgass) eller fornybar (biogass) opprinnelse. Naturgass eller biogass prosesseres for å fjerne urenheter og konvertere til ferdig drivstoffprodukt. For å frakte og lagre drivstoffet kan gassen komprimeres til ca. 200 bar; dette betegnes som CNG (*Compressed Natural Gas*). Gassdrivstoffet kan også nedkjøles til ca. 160 °C til flytende gass, da kalt LNG (*Liquidified Natural Gas*).

Målet med oppdraget er å innhente oppdatert informasjon om forskjellen i utslipp til luft av komponenter som har betydning for lokal luftkvalitet mellom gass og diesel som drivstoff i tunge kjøretøy, med fokus på lastebiler som kjøretøygruppe. Av lastebiler er både lette (totalvekt på mellom 3500 og 12 000 kg) og tunge lastebiler (totalvekt over 12 000 kg) samt vogntog (trekkbil med tilhenger) inkludert i studien.

Oppdraget konsentreres om Euro VI og kommende Euro VII-kjøretøy, som spesifisert av Miljødirektoratet i oppdragsbeskrivelsen. Forskjellene i utslipp til luft fra innsamlet litteratur skal rapporteres per km eller per enhet drivstoff. Betydningen av vekt, lengde eller kjøretøyklasse ønskes inkludert i studien, samt effekten av faktorer som rensesystemer, temperatur og kjøremønster. Utslippskomponenter som skal inngå i studien skal minimum inkludere regulerte forbindelser som svevestøv (PM_{10} , $PM_{2,5}$) og nitrogenoksider (NO_x)/nitrogendioksid (NO_2), og om mulig også partikkelantall, polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH), flyktige organiske forbindelser (VOC) og andre relevante komponenter. Fokus for oppdraget er på kjøretøygrupper som vil påvirkes av bompengetiltak, det vil si veigående lastebiler. Studier på andre kjøretøysegmenter som busser er omtalt kortfattet for å få inkludert informasjon og funn som er relevante for tunge kjøretøy generelt. Det presiseres at prosjektet ikke omfatter kartlegging av toksikologiske studier og vurdering av resulterende helseeffekter.

2. METODIKK

Prosjektet er blitt gjennomført i tre faser: Den første prosjektfasen besto av en kartlegging og utarbeidelse av detaljert prosjektbeskrivelse. I fase 2 ble det foretatt systematiske søk etter og analyse av relevante kilder, mens i fase 3 ble funn om forskjeller i utslipp mellom tunge gass- og dieselskjøretøy sammenstilt og sluttrapport ferdigstilt.

2.1 Relevante ressurser og søkestrategi

Databasen som brukes for beregning av utslipp fra vegtrafikk i Norge, HBEFA (*The Handbook Emission Factors for Road Transport*; INFRAS, 2022), ble gjennomgått for uthenting av utslippsfaktorer for tunge kjøretøy som bruker henholdsvis diesel- og gassdrivstoff. Utslippsfaktorene i HBEFA er i henhold til informasjonen for veitrafikk i *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook* (EEA, 2019), som inneholder retningslinjer for utslippsberegninger inkludert for vegtrafikk for EU-landene. Den siste foreliggende air pollutant emission inventory guidebook ble utgitt i 2019; kap. 1.A.3.b.i-iv *Road transport* ble oppdatert i oktober 2020.

HBEFA-databasen inneholder utslippsfaktorer blant annet for tunge kjøretøy (*Heavy-Duty Vehicles*; HDV) for CNG og LNG som drivstoff, inndelt etter vektclasser for kjøretøyene. Utslippsfaktorene er spesifikk etter faktorer som by-/landområde, trafikksituasjon, veikategori og kjørehastighet, og vektas i henhold til sammensetningen av den norske kjøretøyparken etter tall levert fra Statistisk sentralbyrå. Imidlertid vanskeliggjøres en sammenligning av utslippsfaktorer med tilsvarende kjøretøy for eksempel for fossil Euro-VI i HBEFA av at inndelingen i vektclasser ikke er entydig for de ulike drivstoff-kategoriene.

Hovedkilden til relevant informasjon om utslipp fra gasskjøretøy og utslippsfaktorer i studien er fagrapporter, fagfellevurderte tidsskriftsartikler, fagbøker og bokkapitler. Det ble foretatt søk etter aktuelle rapporter og utredninger foretatt i Norge og for relevante departementer og institusjoner i andre land, som f.eks. EU, amerikanske USEPA og britiske Defra. Ved utvelgelse av publikasjoner til å inkludere i studien ble det lagt vekt på relevans: Det ble valgt ut artikler og rapporter som inkluderte utslippskomponenter som utgjør risiko for menneskers helse, og som sammenligner utslipp fra tunge kjøretøy med gassdrivstoff og diesel. Nyere publikasjoner ble prioritert fremfor eldre, og lastebiler som oppfyller Euro VI-kravene ble prioritert. Studier som involverte busser, eller lastebiler som ikke var Euro VI-klassifisert, ble inkludert dersom resultatene ble vurdert å være av betydning for prosjektet og ha overføringsverdi til Euro VI-lastebiler.

Det ble foretatt søk i aktuelle databaser for vitenskapelige publikasjoner, i hovedsak Web of Science og Google Scholar. Relevante søkeord inkluderer «natural gas», «biogas», «LNG», «CNG», «CBG», «LBG», «diesel», «heavy-duty vehicles», «urban bus», «coach», «regulated emissions», «air pollution», «air quality», «transportation», «Euro VI», «Euro VII», i relevante kombinasjoner. Nyere publikasjoner ble prioritert fremfor eldre.

2.2 Gjennomgang av studier og sammenstilling av resultater

Kartlegging og litteraturgjennomgang inkluderer referanse, angivelse av metodikk for måling eller beregning, parametere av betydning for utslippene, og usikkerheter forbundet med studiene. Tilgjengelig informasjon om utslipp fra tunge gasskjøretøy ble sammenlignet med utslipp fra tilsvarende kjøretøy som bruker diesel som referanse. Utslippsfaktorer er oppgitt i gram per kjørte kilometer (g/km; hovedsakelig for veggående kjøretøy) eller gram per kilogram drivstoff (g/kg).

3. RESULTATER OG VURDERINGER

3.1 Oppsummering av innhentet litteratur og omfang

Det totale omfanget av publisert vitenskapelig litteratur innen feltet er forholdsvis stort; for eksempel gir kombinasjonen av søkeord «natural gas heavy-duty vehicles euro vi» over 21 100 treff i Google Scholar.

Totalt 123 studier er gjennomgått, bestående av fagrapporter, artikler publisert i fagfellelvurderte tidsskrifter og fagbøker/bokkapitler. Det ble funnet flest studier som omhandler utslipp fra personbiler og bybusser. Få studier er tilgjengelige som undersøker utslipp til luft fra kjøretøy som oppfyller kommende Euro VII-standarder. Antall artikler gjennomgått i studien innenfor de ulike hovedkategoriene for kjøretøy og Euro-klasse er oppført i Tabell 1.

Tabell 1: Antall artikler og rapporter gjennomgått i prosjektet, fordelt på kategori kjøretøy, Euro-klasse og publiseringsår. Kategorien «tunge kjøretøy» refererer i tabellen til lastebiler med totalvekt på over 3500 kg (kjøretøygruppene N2 og N3), inkludert kjøretøytyper som vogntog og søppelbiler

	2003-2010	2011-2016	2017-2022	Totalt
<i>EEV</i>	0	2	1	3
Buss	0	2	1	
<i>Euro I</i>	1	0	0	1
Buss	1	0	0	
<i>Euro II</i>	1	0	0	1
Buss	1	0	0	
<i>Euro III</i>	0	3	0	3
Buss	0	3	0	
<i>Euro IV</i>	0	6	0	6
Buss	0	4	0	
Tunge kjøretøy	0	1	0	
Personbil	0	1	0	
<i>Euro V</i>	0	5	2	7
Buss	0	3	1	
Tunge kjøretøy	0	1	1	
<i>Euro VI</i>	0	3	16	19
Buss	0	0	2	
Tunge kjøretøy	0	2	6	
Lette varebiler	0	0	1	
Personbil	0	1	7	
<i>Euro VII</i>	0	0	2	2
Tunge kjøretøy	0	0	2	
<i>Ikke Euro-klassifisert/ikke angitt</i>	12	29	40	81
Buss	3	5	1	
Tunge kjøretøy	2	12	23	
Lette varebiler	0	0	2	
Ikke spesifisert	4	7	11	
Ikke-veigående	0	0	1	
Personbil	3	2	1	
Totalt	14	48	61	123*

**Enkelte studier inkluderer flere typer kjøretøy og Euro-klasser; noen av artiklene er derfor inkludert mer enn en gang i oversikten

Tabell 1 viser at et høyt antall studier ikke inneholder informasjon om Euro-klassifisering: Årsaken til dette er at undersøkelsene er foretatt på kjøretøy i USA eller andre deler av verden der andre utslippsstandarder gjelder.

3.2 Utslipp til luft ved bruk av gassdrivstoff i tunge kjøretøy

I det følgende er resultater fra et utvalg av studiene gjennomgått i prosjektet presentert. I omtalen av studiene er det lagt vekt på hovedfunn som gjelder utslipp fra lastebiler som oppfyller Euro VI-kravene, og på momenter og forutsetninger som har betydning for utslippene. Data fra rapporter og artikler som er gjennomgått og analysert er oppført i Vedlegg, som foreligger som et separat dokument i Excel-filformat. Annen informasjon fra studier som er relevant for oppdraget, som *review*-artikler innen temaet, er også inkludert i Excel-filen.

3.2.1 Regulerte utslipp

Euro VI-reguleringene for tunge kjøretøy inneholder utslippsgrenser for komponentene NO_x, CO, THC (totale hydrokarboner), NMHC (totale hydrokarboner med unntak av metan), metan, ammoniakk og partikler (European Commission, 2009). NMHC, metan og ammoniakk er ikke inkludert i prosjektet ettersom disse primært har betydning for klimaeffekter og ikke lokal luftkvalitet. Euro VI-spesifikasjonene inneholder utslippsgrenser for partikkelantall (PN) og partikkelmasse (PM). For eksempel er utslippsgrensene for NO_x på 400 mg/kWh for tunge Euro VI-kjøretøy med kompresjonsmotorer (CI), testet i henhold til WHSC (*World Harmonized Stationary Cycle*); andre utslippsgrenser gjelder for kjøretøy med CI-motorer testet med WHTC (*World Harmonized Transient Cycle*), og for PI (*Positive Ignition*)-kjøretøy testet med WHSC. Den norske forurensningsforskriften (Klima- og miljødepartementet, 2004; sist endret 01.07.2022) § 7-9 inneholder grenseverdier for uteluft for svoveldioksid (SO₂), NO_x, NO₂, svevestøv (PM₁₀ og PM_{2,5}), bly, benzen og CO, samt målsetningsverdier for arsen, kadmium, nikkel og benzo(a)pyren (§ 7-10).

Tabell 2 viser en oversikt over studier identifisert i prosjektet som har testet utslipp av regulerte komponenter fra Euro VI-lastebiler som bruker gassdrivstoff sammenstilt med dieselskjøretøy. Generelt er det publisert forholdsvis få studier som har undersøkt forskjeller i utslipp mellom gassdrivstoff og diesel i lastebiler, mens det foreligger langt flere tilsvarende undersøkelser for busser.

3.2.1.1 Nitrogenoksider

Studiene som er gjennomgått i prosjektet viser at tunge kjøretøy som bruker gassdrivstoff kan ha både høyere og lavere utslipp av NO_x sammenlignet med tilsvarende dieselskjøretøy. Forskjeller i utslipp mellom gass- og dieselskjøretøy avhenger i stor grad av faktorer som type kjøretøy (lastebil, søppelbil, buss), type gassdrivstoff (CNG, LNG), etterbehandlingssystem og testmetode.

I rapporten *Emissions testing of two Euro VI LNG heavy-duty vehicles in the Netherlands: tank-to-wheel emissions* (Vermeulen m.fl., 2017) ble utslipp fra to semi-trailere som brukte LNG som drivstoff, og som oppfylte Euro VI-kravene, sammenlignet med dieselskjøretøy. Rapporten er utarbeidet av TNO på oppdrag for det nederlandske *Ministry of Infrastructure and Water Management*. En oppfølgings-rapport utgitt to år senere inkluderer oppdaterte data fra enda en lastebil med nyere teknologi, med diesel-LNG *dual fuel*-motor (Vermeulen, 2019). Kjøretøyet brukte LNG som primært og diesel som sekundært drivstoff; bruken av diesel vanskeliggjør tolkningen av utslippsresultater for kjøretøyet med hensyn på sammenstilling mellom LNG og diesel. Tester ble foretatt under reelle kjøreforhold, med en test-rute som dekket både urbane, landlige og motorvei-strekninger.

Som det framgår av Tabell 2, var NO_x-utslippene høyere for to av de tre testede LNG-kjøretøyene sammenlignet med diesel-lastebilene for den kombinerte kjøresyklusen, men resultatene var ikke statistisk signifikante.

To rapporter fra SGC (*Svenskt Gastekniskt Center*) undersøkte utslipp av både regulerte og uregulerte komponenter fra fire tunge kjøretøy (Willner, 2013; Willner & Danielsson, 2014): To EEV (*Enhanced Environmental friendly Vehicle*)-klassifiserte busser som brukte CNG som drivstoff (en med

Tabell 2: Studier som har undersøkt regulerte utslippskomponenter i utslipp fra Euro VI-klassifiserte lastebiler med gassdrivstoff og diesel. Tabellen angir hvorvidt utslippene av hver av komponentene var høyere eller lavere for gasskjøretøy (G) sammenlignet med dieselskjøretøy (D)

Komponent					Kjøretøy, drivstoff, testsyklus	Referanser
NO _x	CO	THC	PM	PN		
					Euro VI LNG lastebiler; reelle kjøreforhold (ISC)	(Vermeulen, 2019; Vermeulen m.fl., 2017)
G > D ¹	-	-	-	G > D ⁴	- Urban driving	
G > D ²	-	-	-	G > D ⁵	- Rural driving	
G = D	-	-	-	G > D ⁶	- Motorway driving	
G = D ³	-	-	-	G > D ⁷	- Test total	
					Euro VI CNG søppelbil; WHVC	(Willner, 2013; Willner & Danielsson, 2014)*
G < D	G > D	-	G < D	G < D	- kaldstart	
G < D	G < D	G > D	G < D	G < D	- varmstart	
-	-	-	-	G > D	Euro VI tunge kjøretøy, CNG/LNG; lab. (WHVC, ISC), on-road (ISC)	(Giechaskiel, 2018)**

1 Statistisk signifikant for to av tre testede LNG-kjøretøy

2 Statistisk signifikant for ett av tre testede LNG-kjøretøy; G < D for ett av LNG-kjøretøyene (ikke statistisk signifikant)

3 G > D for to av tre testede LNG-kjøretøy, men forskjellene ikke statistisk signifikante

4 Statistisk signifikant for ett av LNG-kjøretøyene, ikke signifikant for det andre LNG-kjøretøyet. G < D for *dual fuel*-kjøretøyet, men endringen ikke statistisk signifikant

5 Statistisk signifikant økning for det ene LNG-kjøretøyet. G < D for det andre LNG-kjøretøyet og *dual fuel*-kjøretøyet, men endringen ikke statistisk signifikant

6 Statistisk signifikant for *dual fuel*-kjøretøyet. Økningen ikke statistisk signifikant for det ene LNG-kjøretøyet; G < D for det andre LNG-kjøretøyet, men ikke statistisk signifikant

7 Statistisk signifikant for to av kjøretøyene (*dual fuel* og ett LNG), ikke signifikant for det andre LNG-kjøretøyet

*Informasjon om standardavvik og statistisk signifikansnivå ikke tilgjengelig. Sammenstilling gjort iht. Euro V-sertifisert dieselreferansekjøretøy

**Resultatene er ikke entydige, og varierer bl.a. iht. testbetingelser (kald-/varmstart, urban/rural/motorway-syklus). Utslipptallene er sammenstilt fra flere ulike studier med ulike typer kjøretøy og testforutsetninger

stoikiometrisk og en med *lean burn*-motor), en Euro V diesel/naturgass *dual fuel*-lastebil med SCR (*Selective Catalytic Reduction*) og DOC (*Diesel Oxidation Catalyst*) etterbehandlingssystemer, og en Euro VI CNG-søppelbil med EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) og TWC (*Three-Way Catalyst*). Utslippstestene ble foretatt med *World Harmonized Vehicle Cycle* (WHVC). Resultatene fra utslippsmålingene av NO_x for søppelbilen viste gjennomsnittlige utslippsfaktorer på 0,48 g/kWh og 0,13 g/kWh for WHVC ved henholdsvis kald- og varmstart (kald versus varm motor ved oppstart); ved kaldstart oversteg utslippene dermed gjeldende utslippsgrense for NO_x for tunge Euro VI-kjøretøy på 0,46 g/kWh (Willner & Danielsson, 2014). Diesel-referansekjøretøyet hadde langt høyere NO_x-utslipp, på 4,84 og 3,97 g/kWh for henholdsvis kald- og varmstart (Willner, 2013; se Tabell 2); resultatene for NO_x fra rapportene utarbeidet av SGC står dermed i motsetning til resultatene fra TNO-rapportene. De ulike resultatene mellom studier tyder på at det er betydelig variabilitet i utslippstall, avhengig av faktorer som type kjøretøy, drivstoffbruk og motorteknologi. Diesel-referansekjøretøyet var imidlertid kun sertifisert i henhold til Euro V, ettersom resultatene fra Euro VI-kjøretøyet testet i 2014-rapporten ble sammenstilt med referansen fra hovedrapporten fra 2013. Utslippsgrensene for Euro VI-kjøretøy er mye lavere enn for Euro V, og det er derfor vanskelig å konkludere om forskjellen mellom gass- og dieseldrivstoff ut fra SGC-rapportene. Euro V *dual fuel*-lastebilen i SGC-rapporten fra 2013 hadde også høye utslipp av NO_x, på gjennomsnittlig 5,79 og 4,47 g/kWh for henholdsvis kald- og varmstart ved *dual fuel*-modus; de høye utslippene kan muli-

gens forklares av bruk av diesel. Studien bekrefter altså at tunge gasskjøretøy typegodkjent i henhold til Euro VI har betydelig lavere NO_x-utslipp enn Euro V-kjøretøy. Det presiseres at det ikke foreligger data om standardavvik og statistisk signifikans i SGC-rapportene.

3.2.1.2 Karbonmonoksid

I TNO-rapportene som omhandler utslippstester av Euro VI LNG-lastebiler i Nederland (Vermeulen, 2019; Vermeulen et al., 2017) ble utslipp også av CO målt, men CO-utslippene for LNG-lastebilene er ikke sammenstilt med tilsvarende utslipp i diesel-kjøretøy. De totale utslippsfaktorene for CO under testene av LNG *dual fuel*-lastebilen overholdt gjeldende utslippsgrense for tunge Euro VI-kjøretøy i Regulation 595/2009 på 4,0 g/kWh (for PI; *positive ignition*-motorer testet med WHTC) for testsyklusene totalt, men for delstrekningene under testene som foregikk under urbane forhold oversteg CO-utslippene utslippsgrensen, med utslippsfaktor på opptil 7,3 g/kWh (Vermeulen, 2019).

Rapportene utarbeidet av SGC angir høyere utslipp av CO ved WHVC-testing av Euro VI-klassifisert CNG-søppelbil sammenlignet med diesel-referansekjøretøy ved kaldstart, og høyere CO-utslipp ved varmstart (Willner, 2013; Willner & Danielsson, 2014; se Tabell 2). Som diskutert i kap.

3.2.1.1, er imidlertid dieselskjøretøyet Euro V- og ikke Euro VI-klassifisert.

3.2.1.3 Hydrokarboner

SGC-rapportene oppgir vesentlig høyere utslipp av totale hydrokarboner (THC) fra gasskjøretøy (CNG-søppelbil; 0,05 g/kWh) sammenlignet med for diesel-referansekjøretøy (0,01 g/kWh) ved varmstart. Noe av hydrokarbon-utslippet fra gasskjøretøyet skyldes utslipp av uforbrent metan, men kun 0,01 g/kWh, mens 0,04 g/kWh utgjøres av andre forbindelser (NMHC; *non-methane hydrocarbons*). Utslippet fra både diesel- og CNG-kjøretøyet er imidlertid vel under utslippsgrensen for THC i Regulation 595/2009 (European Commission, 2009) på 0,16 g/kWh (gjeldende for WHTC-test for kompresjonsmotorer). Ved kaldstart var imidlertid utslippene av hydrokarboner fra CNG-søppelbilen langt høyere, gjennomsnittlig på 0,06 g/kWh for NMHC og 0,27 g/kWh for metan.

Som tidligere presisert, vanskeliggjøres sammenstillingen med referansekjøretøy av at diesel-lastebilen kun er Euro V-klassifisert. Indikasjoner på høyere utslipp av hydrokarboner fra tunge gasskjøretøy sammenlignet med diesel er imidlertid viktig å ta hensyn til ved vurdering av mulige konsekvenser for lokal luftforurensning, ettersom dette kan tilsi økte utslipp av diverse toksiske komponenter.

3.2.1.4 Partikler

Et viktig funn i TNO-rapportene som undersøkte utslipp til luft fra Euro VI LNG-lastebiler, er at partikkelantallet (PN) i utslippet er høyere for enkelte av LNG-kjøretøyene for deler av testsyklusene sammenlignet med tilsvarende dieselskjøretøy (Vermeulen, 2019; Vermeulen et al., 2017); se framstilt i Tabell 2. For testsyklusen totalt var økningen i PN statistisk signifikant for det ene av de testede LNG-kjøretøyene.

Utslipp av partikkelmasse (PM) ble undersøkt i SGC-rapportene (Willner, 2013; Willner & Danielsson, 2014). Euro VI CNG-søppelbilen viste langt lavere PM-utslipp (0,006 g/kWh ved WHVC for både kald- og varmstart) sammenlignet med diesel-referansekjøretøyet (0,063 g/kWh ved kaldstart og 0,046 g/kWh ved varmstart; Tabell 2). Utslippsgrensen for PM for tunge Euro VI-kjøretøy er på 0,01 g/kWh. Mens TNO-rapportene viste høyere PN-utslipp for enkelte av gasskjøretøyene sammenlignet med dieselskjøretøy (Vermeulen, 2019; Vermeulen et al., 2017), rapporterte SGC-rapportene redusert partikkelantall-utslipp for Euro VI CNG-søppelbil sammenlignet med diesel-referanse. Størrelsesfordeling av partiklene i utslippet fra de undersøkte kjøretøyene ble også undersøkt: Resultatene viser at partikkelantallet i alle de undersøkte størrelsesfraksjonene (cut-points mellom 0,03 og 6,56 µm) var lavere for CNG- enn for dieselskjøretøyet.

Giechaskiel (2018) sammenstilte og undersøkte resultatene fra flere studier som har målt partikkelutslipp fra et større antall Euro VI-klassifiserte tunge kjøretøy som brukte CNG, LNG og diesel,

inkludert lastebiler, søppelbiler og busser, ved bruk av både laboratorie-tester (WHVC/ICS) og under reelle kjøreforhold (*on-road* ICS). PN-utslippene fra studiene varierte fra 3.3×10^{11} til 4.5×10^{12} partikler per kilometer (p/km) for tunge CNG- og LNG-kjøretøy, og tilsvarende fra 8×10^9 til 7×10^{11} p/km for dieselskjøretøy. PN-utslippet fra gasskjøretøy viser en tendens til å være særlig høye ved kaldstart og under urbane forhold sammenlignet med dieselskjøretøy. I tillegg poengterer studien at resultatene viser at en betydelig andel av PN-resultatene består av partikler mindre enn 23 nm; utslippsgrensen for PN for tunge Euro VI-kjøretøy i Regulation 595/2009 omfatter kun partikler større enn 23 nm.

De minste partiklene, betegnet ultrafine partikler og nanopartikler, kan trenge dypere ned i luftveiene og dermed utgjøre større helserisiko. Resultatene fra Giechaskiel (2018) er variable, og vanskelige å sammenstille på grunn av faktorer nevnt i studien som ulikheter i typer kjøretøy og testforhold, men illustrerer betydningen av å ta hensyn til partikkelantall i utslipp fra tunge gasskjøretøy ved vurdering av mulig påvirkning på lokal luftkvalitet og helseeffekter. Partikkelantallet og størrelsesfordelingen av partikler bør undersøkes nærmere i tunge gasskjøretøy, slik at det oppnås bedre kunnskapsgrunnlag for vurdering av betydningen for luftkvalitet.

3.2.2 Utslipp av uregulerte toksiske komponenter

Euro-standardene inneholder ikke utslippsgrenser for toksiske komponenter som polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH), polyklorete bifenyl (PCB), aldehyder, BTEX (betegnelse på benzene, toluene, ethylbenzene and xylene) og metaller/grunnstoffer som bly, kadmium og kvikksølv; slike utslippskomponenter omtales derfor som uregulerte. Det foreligger forholdsvis få studier som har undersøkt utslipp av ulike uregulerte komponenter fra gasskjøretøy sammenlignet med referansekjøretøy med fossilt drivstoff, og det er derfor vanskelig å konkludere vedrørende forskjeller i utslipp av toksiske komponenter mellom tunge gass- og dieselskjøretøy.

SGC-rapportene *Testing of unregulated emissions from heavy duty natural gas vehicles* del 1 (Willner, 2013) og del 2 (Willner & Danielsson, 2014) omfatter målinger av flere uregulerte forbindelser og stoffgrupper for de testede tunge kjøretøyene (to EEV-klassifiserte CNG-busser, en Euro V CNG-lastebil, en Euro VI CNG-søppelbil, og en Euro V diesel-lastebil). Som det framgår av rapportene, var totale utslipp av aldehyder langt høyere for diesel-referansekjøretøyet enn for den Euro VI-klassifiserte CNG-søppelbilen, både ved testing under kald- og varmstart. Det samme var tilfelle for total mengde PAH, med utslipp på 1238 ng/km ved kaldstart og 898 ng/km ved varmstart for CNG-søppelbilen, sammenlignet med tilsvarende tall på 3997 og 2277 ng/km for diesel-lastebilen. For flyktige PAH er imidlertid utslippene høyere fra CNG-søppelbilen enn for diesel-referansekjøretøyet. Resultatene er lovende med hensyn på utslipp av toksiske komponenter fra tunge gasskjøretøy, men, som tidligere presisert, er det problematisk å sammenstille utslippene fra gasskjøretøy fra en søppelbil med diesel-lastebil som kun er Euro V-klassifisert, og basert på kun et fåtall kjøretøy. Funnene må derfor tolkes med forsiktighet.

Thiruvengadam m.fl. (2016) undersøkte en rekke uregulerte utslippskomponenter i lastebiler, søppelbiler og buss som brukte gassdrivstoff og sammenlignet med dieselskjøretøy. Naturgass-kjøretøyene var utstyrt med TWC (*Three-Way Catalyst*)-etterbehandlingssystem, og en *dual fuel*-lastebil med DPF (*Diesel Particulate Filter*) og SCR (*Selective Catalytic Reduction*) var også inkludert. Testmetoder ble brukt som representerte reelle utslippsforhold for de ulike typene kjøretøy (UDDS). Utslipp av karbonyler indikerer ufullstendig forbrenning av drivstoff, og forventes i utgangspunktet å være høyere for høyoktan-drivstoff som naturgass. For gasskjøretøy var utslippene av karbonyler, og spesifikt formaldehyd, høyest ved kaldstart og kjøring ved lave hastigheter og dermed lave eksstemperaturer. For gasskjøretøy kan det forventes noe BTEX-utslipp ved overskudd av smørolje; i studien var imidlertid nivåene av BTEX i utslippet under deteksjonsgrensene. Gasskjøretøy med støkiometriske motorer utstyrt med TWC ble påvist å ha en del utslipp av ammoniakk. Resultatene er imidlertid fra kun én studie, foretatt med kjøretøy og tester i henhold til amerikanske standarder og regelverk. Studien er derfor forbundet med betydelig usikkerhet, og overføringsverdien til norske og europeiske forhold er usikker. Resultatene gir likevel en indikasjon på at utslipp

av uregulerte forbindelser som karbonyler og ammoniakk bør tas hensyn til ved vurderinger av mulige konsekvenser for lokal luftkvalitet ved bruk av gasskjøretøy.

Meyer m.fl. (2011) undersøkte utslipp til luft fra kjøretøy blant annet med gassdrivstoff, ut fra et livssyklus-perspektiv. *Total Fuel Cycle* (TFC)-analysen foretatt i studien tydet på at utslippene av NO_x, CO, PM₁₀ og svoveloksider er lavere for gassdrivstoff (CNG og LNG) sammenlignet med referanse-diesel (ULDS), mens utslippene av flyktige organiske forbindelser (VOC) er høyere for CNG og LNG. Det presiseres at studien, i tillegg til å være utført som en livssyklus-analyse og ikke i form av utslippsmålinger direkte, er eldre og omhandler amerikanske kjøretøytyper og drivstoff-standarder.

3.3 Motorteknologi og etterbehandlingssystemer

Graden av utslipp til luft av ulike komponenter fra kjøretøy som bruker gassdrivstoff avhenger av forhold som type kjøretøy, motorteknologi og rensesystem. Gassdrivstoff har høyt motor-oktantall, typisk på ca. 130, og er derfor egnet til bruk i gnisttennings- (SI; *spark ignition*)-motorer, i motsetning til motorer som bruker kompresjonsantennelse (CI; *compression ignition*). Teknologien som er mest utbredt i bruk i dag for tunge gasskjøretøy er støkiometriske SI-motorer; støkiometriske motorer vil si at forholdstallet mellom luft og drivstoff er akkurat tilstrekkelig til at alt tilgjengelig drivstoff forbrenner. I *lean burn*-motorer derimot, er forholdstallet luft-drivstoff høyere enn støkiometrisk; dette gir mer effektiv forbrenning, men medfører også høyere temperatur i eksosen, noe som resulterer i høyere NO_x-utslipp (Karavalakis et al., 2016; Yoon et al., 2013). Støkiometriske motorer medfører på den annen side noe høyere CO-utslipp enn ved *lean burn*-teknologi (Yoon et al., 2013).

Mens diesel består av for det meste langkjedede hydrokarboner og aromater, består gassdrivstoff i all hovedsak av metan, med mindre prosentandeler andre hydrokarboner som etan og propan, og gasser som nitrogen og karbondioksid. Forbrenning av gassdrivstoff resulterer derfor naturlig i mindre partikkelmasse-utslipp sammenlignet med diesel (Karavalakis et al., 2016; Thiruvengadam et al., 2018). Tunge gasskjøretøy er imidlertid avhengige av etterbehandlingssystem for å kunne overholde utslippskravene for Euro VI-kjøretøy: Gasskjøretøy med støkiometriske SI-motorer er i dag utstyrt med en kombinasjon av katalysator (TWC; *Three-Way Catalyst*) og avgass-tilbakeføringssystem (EGR; *Exhaust Gas Recirculation*) for å redusere utslippene av NO_x, CO og hydrokarboner (Thiruvengadam et al., 2018). Tilsvarende tunge dieselskjøretøy bruker typisk en kombinasjon av EGR, DOC (*Diesel Oxidation Catalysts*), DPF (*Diesel Particulate Filter*) og SCR.

En tidlig studie utført av Hesterberg m.fl. (2008) viste klart at etterbehandlingssystemer for eksos er avgjørende for å kontrollere utslippene til luft fra gasskjøretøy: I studien ble data sammenstilt fra flere tidligere rapporter som sammenlignet utslipp fra ulike typer kjøretøy som brukte CNG (busser, søppelbiler, personbiler) med dieselskjøretøy. Arbeidene omfattet både laboratorietester (*chassis dynamometer*) og tester under reelle kjøreforhold. For busser, som det forelå klart mest data for, viste studien sammenlignbare utslipp av NO_x ved bruk av CNG og diesel uten rensesystem, lavere utslipp av PM, men vesentlig høyere utslipp av CO, THC, VOC og karbonylforbindelser som formaldehyd og acetaldehyd. Utslippene ble vesentlig redusert for CNG-busser med rensesystem bestående av oksidasjonskatalysator eller TWC (*Three-Way Catalyst*), og forskjellene ubetydelige for de fleste undersøkte komponentene mellom CNG- og dieselskjøretøyene.

Bruken av gassdrivstoff er særlig utbredt i bybusser, og det foreligger derfor et større antall studier i forskningslitteraturen som undersøker utslipp fra gassdrevne busser sammenlignet med fossil diesel. Funn fra studier utført på busser er derfor omtalt i denne rapporten, for resultater som anses å være relevante også for lastebiler. Hesterberg m.fl. (2008)-studien for eksempel er eldre og foretatt hovedsakelig for busser i USA med annet regelverk og typer kjøretøy og teknologi; resultatene er derfor ikke direkte overførbare til forhold i Norge i dag, men illustrerer tydelig at utslippene av flere komponenter i utgangspunktet er forhøyede fra gasskjøretøy og dermed behovet for eksosbehandling.

I en studie gjennomført av *The California Air Resources Board* (CARB) ble det vist at en oksidasjons-katalysator resulterte i statistisk signifikante reduksjoner i utslipp av PM, HC, NMHC og CO; for toksiske formaldehyd var utslippsreduksjonen på over 95 % (Ayala et al., 2003). Yoon m.fl. (2014) påviste betydelige utslippsreduksjoner ved bruk av TWC i CNG-busser for VOC, karbonylforbindelser, PAH, EC og OC, og sporelementer.

I en studie foretatt av Hajbabaei m.fl. (2013) ble utslipp blant annet av uregulerte komponenter undersøkt i busser som gikk på naturgass. Utslippene ble ikke sammenstilt med diesel-referansekjøretøy; hensikten med studien var å undersøke effekten av ulike typer motorer, etterbehandlingssystem og sammensetning av gassdrivstoffet på utslippene. Resultatene viste at *lean burn*-busser med gassdrivstoff med lavere metaninnhold hadde høyere NO_x-utslipp, men lavere utslipp av THC og formaldehyd. I busser med støkiometriske motorer og utstyrt med TWC var utslippene av NO_x og THC lavere enn i *lean burn*-busser, mens utslippene av CO og ammoniakk var høyere.

3.4 Kjøreforhold og utslippstester

Forhold som kjørehastighet, oppbremsing og akselerasjon og temperatur har stor betydning for utslippene fra kjøretøy. Ulike definerte testsykluser er utviklet for uttesting av motortyper og kjøretøy, slik at resultatene fra for eksempel utslippsmålinger fra ulike studier kan sammenlignes og kjøretøy sertifiseres etter standardiserte forhold. *World Harmonized Transient Cycle* (WHTC) er den globale standard-testen, inkludert for sertifisering for tunge kjøretøy i henhold til Euro VI. *Worldwide Harmonized Vehicle Cycle* (WHVC) ble utviklet ved bruk av samme datasett som WHTC, men WHVC benyttes ikke til regulatorisk testing av kjøretøy.

Et viktig moment ved utslippstesting av kjøretøy er observerte avvik mellom standardiserte laboratorietester og testing under reelle kjøreforhold (*real-world*, eller *real-driving emissions testing*). Det framgår for eksempel fra TNO-rapportene som undersøkte utslipp til luft fra Euro VI LNG-lastebiler at kjøring under ulike reelle forhold har vesentlig betydning for utslippene: Utslippene er klart høyest under *urban driving*-delene av kjøresyklusene, sammenlignet med *rural driving*, *motorway driving* og for total-syklusen (Vermeulen, 2019; Vermeulen et al., 2017). Resultatene virker rimelige, ettersom det i byområder er mye kø, kjøring under lave hastigheter og utstrakt bremsing og akselerasjon, noe som resulterer i økte utslipp per kjørte kilometer. Et viktig funn i rapportene er at utslippene av NO_x og partikkelantall (PN) fra enkelte av LNG- og *dual fuel*-kjøretøyene var høyere enn for tilsvarende dieselskjøretøy ved kjøring under urbane forhold: Dette tilsier at en økning i andelen tunge gasskjøretøy muligens kan medføre høyere utslipp av NO_x og PN i byer og større tettsteder, der befolkningstettheten er høy slik at flere mennesker eksponeres. En større studie foretatt med tunge kjøretøy i Kina med ulike typer drivstoff underbygger at utslippene typisk var høyere på urbane veger der kjørehastighetene er lavere enn i suburbane og landlige områder (Zheng et al., 2022).

En studie som undersøkte forskjellene i utslipp mellom CNG- og bensinbiler under reelle forhold fant at effekten av CNG relativt til bensin og diesel på utslipp av NO_x, CO og partikkelantall varierte betydelig med ulike *real world*-testprotokoller (Dimaratos et al., 2020). Studien ble foretatt på personbiler, men viser betydningen av testbetingelser på utslippstallene for ulike typer drivstoff.

For å ta hensyn til betydningen av utslipp under reelle forhold og avvikene som ofte påvises mellom laboratorietester og *real world*-kjøresykluser, er det i EU innført såkalt krav om konformitet: Kravet innebærer at konformitetsfaktoren, altså forholdstallet mellom RDE (*real driving emissions*)-tester og laboratorietester, ikke skal være større enn 1,5. I TNO-rapporten *Emissions testing of two Euro VI LNG heavy-duty vehicles in the Netherlands: tank-to-wheel emissions* (Vermeulen et al., 2017) ble utslipp av regulerte komponenter testet iht. konformitet. Konformitetskravene ble overholdt for de testede regulerte komponentene NO_x, CO og THC med god margin for de to testede LNG-lastebilene.

3.5 Euro VII-kjøretøy og utslipp

Euro VII-utslippsstandarder med strengere krav og utslippsgrenser for ulike typer kjøretøy er under planlegging, som del av *European Green Deal* (European Commission, 2022). Per i dag er standardene lagt ut på offentlig høring; det foreligger derfor lite forskningslitteratur som rapporterer utslipp fra kjøretøy vurdert i henhold til kommende Euro VII-krav.

I en nylig studie ble en eksisterende Euro VI-lastebil testet i henhold til Euro VII-krav (Ximinis et al., 2022). Testkjøretøyet fikk påmontert et EGH (Exhaust Gas Heater)-system, i tillegg til eksisterende etterbehandlingssystem bestående av en kombinasjon av DEF (*Diesel Exhaust Fluid*), CRT (*Continuous Regenerating Trap*), SCR (*Selective Catalytic Converter*) og ATEG (*Automotive Thermoelectric Generator*). Systemet ble testet under tre ulike turtall: 1000 rpm (≈ 55 km/t), 1250 rpm (≈ 65 km/t) og 1500 rpm (≈ 80 km/t), som representerer typiske kjørehastigheter under reelle forhold. Studien viser at påmontering av EGH-etterbehandlingssystem til tunge kjøretøy kan være en aktuell strategi for å komme under de strengere Euro VII NO_x-utslippskravene, men at EGR samtidig medfører høyere drivstofforbruk.

Det presiseres at studien ikke har undersøkt tunge kjøretøy som bruker gassdrivstoff spesifikt. Videre forskning og utvikling vil være nødvendig for å komme fram til motorteknologi og kombinasjoner av etterbehandlingssystemer for å overholde de kommende Euro VII-utslippsgrensene blant annet for tunge gasskjøretøy. Per i dag foreligger ikke forskningsresultater for å kunne vurdere mulige effekter på utslipp og lokal luftkvalitet av fremtidig innføring av Euro VII-krav.

3.6 Biogass som drivstoff i tunge kjøretøy

Det er ikke funnet studier som spesifikt undersøker mulige forskjeller i utslipp ved bruk av biogass sammenlignet med tilsvarende naturgass-drivstoff. Artikler som Thiruvengadam m.fl. (2018) og Karavalakis m.fl. (2016) tar opp betydningen av forskjeller i drivstoffsammensetning og innhold av urenheter som hydrogensulfid i gassdrivstoff og risiko for degradering av motorer og komponenter, og hevder at det er behov for mer kunnskap om temaet. Det er imidlertid usikkert hvorvidt slike problemstillinger er relevante for norske og europeiske forhold og drivstoffstandarder. Rå-biogass gjennomgår oppgradering, slik at urenheter som svovelforbindelser samt vann fjernes og den kjemiske sammensetningen til ferdig biogassbasert drivstoff essensielt er den samme som for naturgassbasert drivstoff (Anderson, 2015). Utslippene til luft ved bruk av biogass som drivstoff anses derfor i all hovedsak som de samme som ved bruk av naturgass.

3.7 Variabilitet i utslipp og usikkerheter

Utslippstall funnet i litteraturen for kjøretøy er generelt forbundet med stor variabilitet og usikkerheter. Som omtalt i kap. 3.3, har etterbehandlingssystemer avgjørende betydning for eksosutslippene fra kjøretøy. Studiene viser også at utslippene varierer betydelig med testforhold og type testsyklus (kap. 3.4). Andre årsaker til de observerte variasjonene er relatert til faktorer som drivstoffsammensetning, type kjøretøy, kjøretøyklasse og motorteknologi, og testforhold.

Det er også betydelige usikkerheter i oppgitte utslippsfaktorer forårsaket av manglende data fra en del av studiene: Flere av de gjennomgåtte artiklene rapporterer utslippstall kun i form av grafer, uten å oppgi rådataene for gjennomsnittlige utslipp og standardavvik. Manuell avlesning fra grafer medfører naturligvis unøyaktigheter i tallene. I flere av studiene er få testkjøretøy benyttet i testene. Som en konsekvens av variabiliteten i og usikkerhetene forbundet med rapporterte utslippsdata i forskningslitteraturen, kan tilgjengelig informasjon kun anses som indikasjoner på betydningen for lokal luftkvalitet og mulige helseeffekter av tiltak rettet mot økning i andelen tunge gasskjøretøy.

4. KONKLUSJON

Forholdsvis få studier er tilgjengelige som undersøker utslipp fra lastebiler som bruker gassdrivstoff; flere studier er utført på gassdrevne busser. Ettersom tilgjengelige studier har undersøkt utslipp under ulike testforhold, vanskeliggjøres sammenstilling av resultater fra ulike studier. Sammen med forhold som forholdsvis få aktuelle studier, ofte få testede kjøretøy i undersøkelsene, og stor variabilitet i resultatene, er det vanskelig å trekke klare konklusjoner om forskjellen i utslipp mellom lastebiler som bruker gassdrivstoff og tilsvarende dieselskjøretøy. Av størst betydning for lokal luftkvalitet med dagens tunge gasskjøretøy og eksosrensesystemer anses å være mulige økte utslipp av små partikler, nitrogenoksider (NO_x), hydrokarboner og enkelte toksiske forbindelser, særlig ved kjøring i byområder. Per i dag foreligger lite forskningslitteratur publisert som har studert utslipp fra kjøretøy i henhold til kommende Euro VII-krav. Videre forskning og utvikling trengs for å komme fram til motorteknologi og etterbehandlingssystemer for å overholde de kommende Euro VII-utslippsgrensene for eksempel for tunge gasskjøretøy.

Av utslippskomponenter som er regulert i henhold til Euro-standardene, viser foreliggende studier både økte og reduserte utslipp av NO_x og karbonmonoksid (CO) for Euro VI-klassifiserte lastebiler som bruker gass sammenlignet med ved bruk av diesel. Økning i utslipp av totale hydrokarboner ble observert i tilgjengelig studie på tunge gasskjøretøy, selv om utslippene var vel under gjeldende utslippsgrense i henhold til Euro VI-spesifikasjonene for tunge kjøretøy. Resultatene er basert på kun én studie og derfor forbundet med vesentlig usikkerhet, men mulige økninger i utslipp av hydrokarboner er viktig å poengtere ettersom dette kan indikere høyere utslipp av toksiske forbindelser fra gasskjøretøy.

Utslipp av partikkelmasse (PM) er gjennomgående vesentlig lavere for tunge kjøretøy som bruker gass sammenlignet med dieselskjøretøy. Flere studier har imidlertid vist høyere partikkelantall (PN) i utslippet fra gasskjøretøy, og en størrelsesfordeling som viser høyere innhold av små partikler i utslippet. Ultrafine partikler og nanopartikler kan trenge dypere ned i luftveiene og dermed utgjøre større helserisiko. Mulige økte utslipp av NO_x og PN i byområder, der befolkningstettheten er høyest, er et viktig hensyn ved vurdering av mulige konsekvenser av å øke andelen tunge gasskjøretøy. Særlig partikkelantallet og størrelsesfordelingen av partikler i eksosutslippet bør undersøkes nærmere i tunge gasskjøretøy, slik at det oppnås bedre kunnskapsgrunnlag for vurdering av mulige konsekvenser for luftkvalitet.

Av uregulerte komponenter, det vil si diverse toksiske forbindelser og stoffgrupper som ikke er regulert med utslippsgrenser i Euro VI-standardene, foreligger forholdsvis få studier som har undersøkt utslipp fra gasskjøretøy. Lavere utslipp av aldehyder og totale polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH) ble funnet i Euro VI-gasskjøretøy sammenlignet med diesel-referansekjøretøy, men resultatene er usikre ettersom de er basert på kun én studie. Samme studie fant at innholdet av flyktige PAH var høyere i utslipp fra gass- enn i dieselskjøretøy. En studie utført på lastebiler, søppelbiler og buss i USA fant forhøyede utslipp av karbonyler særlig ved kaldstart og lave kjørehastigheter fra gasskjøretøy. Resultatene fra slike studier gir en indikasjon på at utslipp av uregulerte forbindelser som karbonyler og ammoniakk bør tas hensyn til ved vurderinger av mulige konsekvenser for lokal luftkvalitet ved bruk av gasskjøretøy.

I likhet med dieselskjøretøy, er tunge gasskjøretøy avhengige av etterbehandlingssystem for eksosgass for å overholde Euro VI-standardene. Den mest utbredte teknologien for tunge lastebiler som bruker gass i dag er en kombinasjon av katalysator (TWC) og avgass-tilbakeføringssystem (EGR) for å redusere utslippene av NO_x , CO og hydrokarboner. Kjøreforhold som kjørehastighet, temperatur og grad av akselerasjon og oppbremsing har stor betydning for utslippene inkludert for kjøretøy. Tunge kjøretøy reguleres etter den standardiserte testsyklusen WHTC. Studier påviser imidlertid avvik i utslipp mellom standardiserte utslippstester og ved kjøring under reelle forhold; nye kjøretøy må i dag derfor overholde et krav om konformitet mellom laboratorie- og *real life*-tester.

REFERANSER

- Anderson, L. G. (2015). Effects of using renewable fuels on vehicle emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 162–172. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.03.011>
- Aosaf, M. R., Wang, Y., & Du, K. (2022). Comparison of the emission factors of air pollutants from gasoline, CNG, LPG and diesel fueled vehicles at idle speed. *Environmental Pollution*, 305, 119296. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.119296>
- Ayala, A., Gebel, M. E., Okamoto, R. A., Rieger, P. L., Kado, N. Y., Cotter, C., & Verma, N. (2003). Oxidation Catalyst Effect on CNG Transit Bus Emissions. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2003-01-1900>
- Dimaratos, A., Toumasatos, Z., Triantafyllopoulos, G., Kontses, A., & Samaras, Z. (2020). Real-world gaseous and particle emissions of a Bi-fuel gasoline/CNG Euro 6 passenger car. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 82, 102307. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2020.102307>
- European Commission. (2009). *Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2009 on type-approval of motor vehicles and engines with respect to emissions from heavy duty vehicles (Euro VI)*. Sist oppdatert: 2020-09-01. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02009R0595-20200901>
- European Commission. (2022). *European vehicle emissions standards – Euro 7 for cars, vans, lorries and buses*. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12313-European-vehicle-emissions-standards-Euro-7-for-cars-vans-lorries-and-buses_en
- European Environment Agency (EEA). (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019*. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- Giechaskiel, B. (2018). Solid Particle Number Emission Factors of Euro VI Heavy-Duty Vehicles on the Road and in the Laboratory. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2018, Vol. 15, Page 304, 15(2), 304. <https://doi.org/10.3390/IJERPH15020304>
- Hajbabaie, M., Karavalakis, G., Johnson, K. C., Lee, L., & Durbin, T. D. (2013). Impact of natural gas fuel composition on criteria, toxic, and particle emissions from transit buses equipped with lean burn and stoichiometric engines. *Energy*, 62, 425–434. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.09.040>
- Hesterberg, T. W., Lapin, C. A., & Bunn, W. B. (2008). A comparison of emissions from vehicles fueled with diesel or compressed natural gas. *Environmental Science and Technology*, 42(17), 6437–6445. https://doi.org/10.1021/ES071718I/SUPPL_FILE/ES071718I-FILE005.PDF
- INFRAS. (2022). *The Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA)*. <http://www.hbefa.net/e/index.html>
- Karavalakis, G., Hajbabaie, M., Jiang, Y., Yang, J., Johnson, K. C., Cocker, D. R., & Durbin, T. D. (2016). Regulated, greenhouse gas, and particulate emissions from lean-burn and stoichiometric natural gas heavy-duty vehicles on different fuel compositions. *Fuel*, 175, 146–156. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236116001551>
- Klima- og miljødepartementet. (2004). *Forskrift om begrensnig av forurensning (forurensningsforskriften) FOR 2004-06-01*. Sist endret: 01.07.2022. For-2004-06-01-931. <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20040601-0931.html#map040>
- Meyer, P. E., Green, E. H., Corbett, J. J., Mas, C., & Winebrake, J. J. (2011). Total Fuel-Cycle Analysis of Heavy-Duty Vehicles Using Biofuels and Natural Gas-Based Alternative Fuels. <http://dx.doi.org/10.3155/1047-3289.61.3.285>, 61(3), 285–294. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.61.3.285>
- Statistisk sentralbyrå. (2022). *Bilparken*. Sist oppdatert: 25. mars 2022. <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/bilparken>
- Thiruvengadam, A., Besch, M., Carder, D., Oshinuga, A., Pasek, R., Hogo, H., & Gautam, M. (2016). Unregulated greenhouse gas and ammonia emissions from current technology heavy-duty vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 66(11), 1045–1060. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1158751>
- Thiruvengadam, A., Besch, M., Padmanaban, V., Pradhan, S., & Demirgok, B. (2018). Natural gas vehicles in heavy-duty transportation-A review. *Energy Policy*, 122, 253–259.

- <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.052>
- Vermeulen, R. J. (2019). *Emissions testing of a Euro VI LNG-diesel dual fuel truck in the Netherlands. TNO report, TNO 2019 R10193. Date: 8 April 2019.*
- Vermeulen, R. J., Verbeek, R., van Goethem, S., & Smokers, R. T. M. (2017). *Emissions testing of two Euro VI LNG heavy-duty vehicles in the Netherlands: Tank-to-wheel emissions. Report, TNO 2017 R11336. Date: 10 November 2017.*
<https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A4b1cb389-868b-4a0c-91e2-81599242db5c>
- Willner, K. (2013). *Testing of unregulated emissions from heavy duty natural gas vehicles. Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC), SGC Report 2013:289.*
- Willner, K., & Danielsson, D. (2014). *Testing of unregulated emissions from heavy duty natural gas vehicles. Part 2. Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC), SGC Report 2014:297.*
- Ximinis, J., Massaguer, A., & Massaguer, E. (2022). NO_x Emissions below the Prospective EURO VII Limit on a Retrofitted Heavy-Duty Vehicle. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 1189, 12(3), 1189. <https://doi.org/10.3390/APP12031189>
- Yoon, S., Collins, J., Thiruvengadam, A., Gautam, M., Herner, J., & Ayala, A. (2013). Criteria pollutant and greenhouse gas emissions from CNG transit buses equipped with three-way catalysts compared to lean-burn engines and oxidation catalyst technologies. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 63(8), 926–933.
<https://doi.org/10.1080/10962247.2013.800170>
- Yoon, S., Hu, S., Kado, N. Y., Thiruvengadam, A., Collins, J. F., Gautam, M., Herner, J. D., & Ayala, A. (2014). Chemical and toxicological properties of emissions from CNG transit buses equipped with three-way catalysts compared to lean-burn engines and oxidation catalyst technologies. *Atmospheric Environment*, 83, 220–228.
<https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2013.11.003>
- Zheng, F., Zhang, H., Yin, H., Fu, M., Jiang, H., Li, J., & Ding, Y. (2022). Evaluation of real-world emissions of China V heavy-duty vehicles fueled by diesel, CNG and LNG on various road types. *Chemosphere*, 303(Pt 2), 135137–135137.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135137>

VEDLEGG 1
OVERSIKT OVER STUDIER OG SAMMENSTILLING AV
UTSLIPPSFAKTORER

Vedlegget består av et separat dokument i Excel-filformat som inneholder informasjon fra de innhentede kildene og sammenstilling av utslippsfaktorer for gass- sammenlignet med dieseldrivstoff i tunge kjøretøy. Hovedkildene inkludert i studien er artikler publisert i vitenskapelige tidsskrifter, fagrapporter, fagbøker og bokkapitler.

Sammenstillingen inkluderer følgende informasjon om hver av kildene:

- Publiseringsår
- Forfattere
- Tittel
- Type litteratur (artikkel, rapport, bok, bokkapittel etc.)
- Notatfelt; informasjon om publikasjonen av betydning for studien, kortfattet oppsummering av publikasjonens innhold
- Drivstofftype og -blanding
- Type og spesifikasjoner for kjøretøy
- Motorklasse, motortype
- Testmetodikk/-syklus
- Utslippsfaktorer for ulike typer utslippskomponenter (utslippsfaktor, standardavvik, enhet) med kommentarer