

SINTEF 2020:00985 - Åpen

Trafikksikkerhet for automatiserte kjøretøy

SmartFeeder: Erfaringer fra norske piloter med selvkjørende minibusser

Forfattere

Gunnar Deinboll Jensen

Terje Moen



Rapport

Trafikksikkerhet for automatiserte kjøretøy

SmartFeeder: Erfaringer fra norske piloter med selvkjørende minibusser

EMNEORD:
Trafikksikkerhet
Transport
Automatiserte kjøretøy
Autonome kjøretøy
Selvkjørende kjøretøy

VERSJON
1.3

DATO
2020-12-11

FORFATTER(E)
Gunnar Deinboll Jensen
Terje Moen

Foto forside:
IEEE Spektrum 2020
Noah Berger 2018

OPPDRAGSGIVER(E)
Jernbanedirektoratet

OPPDRAGSGIVERS REF.
Ragnhild Wahl

SINTEF 2020:00985
Åpen

PROSJEKTNR
102015052

ANTALL SIDER
82

SAMMENDRAG

Vi presenterer her resultater fra fem norske pilotprosjekt i perioden 2018-2020 med automatiserte minibusser. Deretter settes resultatene inn i en bredere kontekst med oppdatert kunnskap fra litteraturundersøkelser (*State-of-the-art*). Denne delen gir innblikk i status på teknologi og trafikksikkerhet innen utvikling av automatiserte privatbiler og tilsvarende selvkjørende busser internasjonalt. Resultatene fra omfattende pilotering i Norge med selvkjørende minibusser viser at det tross betydelig eksponering i trafikk, ikke har vært alvorlige hendelser. Det har det heller ikke vært internasjonalt med denne typen selvkjørende minibusser med sikkerhetsoperatør ombord. Det er fremdeles svakheter ved teknologien. Både funksjonelle og trafikksikkerhetsmessige svakheter er avdekket i de norske pilotene og med tilsvarende minibusser internasjonalt. Det kommer også frem av ulykker med kjøretøy på SAE nivå 2-4 (Tesla, Uber, Google, AGV) som det er redegjort for i denne rapporten. Evnen til å gjenkjenne objekter, forutse uventede situasjoner og samhandle med andre myke trafikanter og kjøretøy bør forbedres. For å kompensere for disse svakhetene kan det i en overgangsfase være fornuftig å etablere et kontrollrom for overvåking og eventuelt gripe inn. Automatisering har skapt nye typer ulykker, men automatiserte kjøretøy kjører ikke i ruset tilstand, er ikke uoppmerksomme, søvnige, aggressive og de følger trafikkregler til punkt og prikke dersom trafikkreglene digitaliseres. Selv om de forårsaker noen nye ulykker, vil det skje en stadig forbedring av teknologien. Pågående utvikling innen kunstig intelligens (AI) og lærende systemer vil være viktig for å heve dagens automatiserte kjøretøy opp på et høyere nivå som tillater høyere hastigheter og bruk i alle typer trafikkmiljø. Automatiserte kjøretøy tar lærdom

UTARBEIDET AV
Gunnar Deinboll Jensen

SIGNATUR


KONTROLLERT AV
Trond Foss

SIGNATUR


GODKJENT AV
Terje Reitaas

SIGNATUR


RAPPORTNR
SINTEF
2020:00985

ISBN
978-82-14-06562-6

GRADERING
Åpen

GRADERING DENNE SIDE
Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1.0	2020-10-12	Endelig versjon til publisering
1.1	2020-10-30	Revidert utgave basert på innspill fra prosjektgruppen
1.2		Intern arbeidsversjon
1.3	2020-11-12	Revidert versjon til publisering

Forord

SINTEF har utført en studie omkring trafikkikkerhet for automatiserte kjøretøy, innenfor rammen av *SmartFeeder*-prosjektet 2017-2020 med Jernbanedirektoratet som prosjekteier og med delfinansiering fra Norges Forskningsråd.

Det skjer stadig en økende automatisering av vegtrafikk, men det er gjort få studier omkring trafikkikkerhet for høyt automatiserte kjøretøy, ofte betegnet i media og i faglitteraturen som Autonome kjøretøy eller Selvkjørende kjøretøy. Denne rapporten redegjør for resultater og diskuterer sikkerhetsmessige erfaringer fra 5 pilotprosjekter med utprøving av selvkjørende minibusser i Norge. I innstilling fra transport- og kommunikasjonskomiteen om *Lov om utprøving av selvkjørende kjøretøy* (Stortinget Innst. 32 L (2017–2018) står det:

Loven og tilhørende forskrift skal blant annet sikre at slik utprøving skjer gradvis, i takt med teknologiutviklingen og innenfor rammer som ivaretar trafikkikkerhet og personvern.

Formålet er å avdekke hvilke effekter selvkjørende kjøretøy kan ha for trafikkikkerhet, effektivitet i trafikkavviklingen, mobilitet og miljø.

Det er gjort få studier omkring sikkerhetseffekter av automatiserte kjøretøy. Slik sett gir denne rapporten et viktig bidrag til å fylle kunnskapshull og gi den kunnskapsbyggingen Stortinget ønsket ved innføring av lov om utprøving av selvkjørende kjøretøy.

Vi vil gjerne takke våre prosjektpartnere: Applied Autonomy, Forus PRT, Acando/CGI, Jernbanedirektoratet, Statens vegvesen og ITS Norge for godt samarbeid. Vi vil også takke våre samarbeidspiloter som fortløpende har delt erfaringer og data med prosjektgruppen: Foruspiloten (Kolumbus), Fornebupiloten (OBOS), Gjøvikpiloten (Gjøvik kommune), Kongsbergpiloten (Brakar og Kongsberg kommune) og Ruterpiloten i Oslo (Ruter). Dette har gitt vesentlige bidrag til å gjøre sikkerhetsdata fra pilotprosjektene tilgjengelig for oss. Dette gjelder også EasyMile som er produsent av selvkjørende minibusser og som har gitt oss tilgang til datalogg fra bussenes egne systemer.

Rapporten er utarbeidet av seniorforsker Gunnar Deinboll Jenssen og seniorrådgiver Terje Moen. Seniorforsker Petter Arnesen og Erlend Dahl har bidratt med statistiske analyser av datamaterialet fra de norske pilotstudiene. Alle fra SINTEF Community, avdeling Mobilitet og samfunnsøkonomi. Seniorrådgiver Trond Foss har kvalitetssikret rapporten.

Trondheim 14. desember 2020



Terje Reitaas

Innholdsfortegnelse

Figurliste	5
Oversikt over tabeller	6
1 Innledning	15
1.1 Smartfeeder prosjektet.....	15
2 Automatisering av kjøretøy og kjøreoppgaver	17
2.1 SAE J3016 og sikkerhet ved øket grad av automatisering	17
2.2 *	19
2.3 Trafikksikkerhet som målbar enhet	21
2.4 Automatisering som trafikksikkerhetstiltak.....	22
3 SmartFeeder: Fem storskala pilotprosjekter i blandet trafikk på offentlig veg	27
3.1 Om pilotprosjektene i Norge	27
3.1.1 Forus	28
3.1.2 Fornebu.....	28
3.1.3 Gjøvik	29
3.1.4 Kongsberg	30
3.1.5 Ruter, Oslo	31
3.2 Data fra pilotene	32
3.3 Kjøring i automatisert modus	33
3.4 Hendelser knyttet til trafikksikkerhet	35
3.4.1 EasyMile EZ10	35
3.4.2 Navya Arma	36
3.4.3 Hendelsene oppsummert	37
3.5 Erfaringer og utfordringer	38
3.6 Erfaring med infrastruktur	39
4 Hendelser og ulykker med automatiserte kjøretøy internasjonalt	40
4.1 SAE nivå 2 - Tesla Autopilot	44
4.2 SAE nivå 3 - Uber kjøretøy	50
4.3 SAE nivå 4 – Google-Waymo kjøretøy	51
4.4 Hva kan vi lære av 14 års erfaring med Robottraller (AGV) i norske sykehus?	52
5 Perspektiv på trafikksikkerhet for automatiserte kjøretøy	55
5.1 Hva kan vi lære av automatisering innen andre transportformer?.....	55
5.1.1 Jernbane/metro.....	55

5.1.2	Ubemannede fartøy (over og under vann).....	55
5.1.3	Automatisering innen luftfart.....	56
5.2	Å kjøre blir vanskeligere og samtidig enklere	56
5.3	Vi må vie oppmerksomhet til den hybride situasjonen vi har i dag	57
5.4	Hva skjer på veiene når selvkjørende biler skal samhandle med mennesker?	57
5.5	Hvilken sikkerhet kan vi forvente på lang sikt?.....	58
5.6	Tillit er grunnleggende	58
5.7	Både mennesker og teknologien må lære hverandre å kjenne.....	59
6	Oppsummering: Det samlede risikobildet for automatiserte kjøretøy	60
6.1	Ulykkesbildet.....	60
6.2	Potensielle konsekvenser av automatisert vegtrafikk	62
6.3	Erfaringer fra SmartFeeder-pilotene	64
7	Diskusjon.....	64
7.1	Sikkerhet for selvkjørende minibusser under utprøving i Norge.....	64
7.2	Sikkerhet for automatiserte kjøretøy på SAE nivå 2 - 3	66
8	Konklusjoner	70
9	Råd og anbefalinger.....	72
10	Referanser.....	74
A	Appendix 1	79
	Begreper	79
	Forkortelser	81

Figurliste

Figur 1. Automatiseringsnivå definert av UNECE. https://www.unece.org/fileadmin/DAM/Corrected_5_Levels_of_Driving_Automation.pdf	17
Figur 2. Forenklet beskrivelse av SAE nivå for grad av autonomi. <i>IEEE Spectrum (2020)</i>	18
Figur 3. Aktiv og passiv sikkerhet i kjøretøy som har påvirket trafiksikkerheten. Kilde Bosch.	22
Figur 4. Framtidens sikkerhetstiltak.	22
Figur 5. Femte generasjon sensorsystemer fra Waymo. Kilde Waymo (2020).	23
Figur 6. Teknologier og sensorer som inngår i høyt automatiserte kjøretøy. Illustrasjon: <i>Robotics and Automation (2017)</i> . Modifisert av SINTEF (2020).	24
Figur 7. Typiske sensorer i selvkjørende elektriske minibusser (University of Denver 2019).	25
Figur 8. System for situasjonsforståelse i en høyt automatisert minibus. (Ainsalu et al 2018)	26
Figur 9. Pilotprosjekt som samarbeider om kunnskapsbygging med SmartFeeder prosjektet	27
Figur 10. Norges første automatiserte buss på Forus	28
Figur 11. Strekningen på Forus (kilde: Forus PRT)	28

<i>Figur 12. Buss på Fornebu.....</i>	29
<i>Figur 13. Strekningen på Fornebu</i>	29
<i>Figur 14. Bussen på Gjøvik.....</i>	29
<i>Figur 15. Rute i Gjøvik.....</i>	30
<i>Figur 16. Buss på Kongsberg, Brakar Linje 450</i>	31
<i>Figur 17. Komplette bilde av rutene på Kongsberg</i>	31
<i>Figur 18. Buss brukt av Ruter i Oslo.....</i>	31
<i>Figur 19. Ruter-piloten del 1 (Akershusstranda), Linje 35</i>	32
<i>Figur 20. Ruter-piloten del 2, Linje 85B</i>	32
<i>Figur 21. Antall ganger per km operatøren valgte manuell modus, Kongsberg.....</i>	33
<i>Figur 22. %-vis utkjørt distanse der bussene ble kjørt manuelt på Kongsberg.....</i>	34
<i>Figur 23. Antall oppbremsinger over 0,1 G per km. Rødt kryss er bremsing i manuell modus</i>	34
<i>Figur 24. Antall oppbremsinger over 0,2 G per km. Rødt kryss er bremsing i manuell modus</i>	35
<i>Figur 25. Antall byer med automatiserte kjøretøy per land, per 2017 (Bloomberg 2017)</i>	41
<i>Figur 26. Beredskapsindeks for autonome kjøretøy.</i>	41
<i>Figur 27. Ledende aktører innen utvikling av automatiserte kjøretøy</i>	42
<i>Figur 28. Kilde: California Department of Motor Vehicles publisert i Nikkei Asia 2019</i>	43
<i>Figur 29. Bilde av Tesla X etter kollisjon feiebil. Kilde: YouTube CNTV Kina (2016)</i>	44
<i>Figur 30. Bilde fra Tesla X kamera sekundet før kollisjon med stillestående feiebil.</i>	44
<i>Figur 31. Bilde av den type semitrailer (t.v.) som var involvert i dødsulykken med Tesla på autopilot i Florida 2016, Illustrasjon av ulykkessituasjonen (t.h.). Kilde New York times.</i>	45
<i>Figur 32. Bilde av Tesla S modell etter dødsulykken i Florida 2016, der taket ble flerret av i kollisjon med semitrailer.</i>	45
<i>Figur 33. Bilde av Tesla modell 3 etter kollisjon med semitrailer i Florida som gjorde omfattende skade på taket. Foto National Transportation Safety Board</i>	46
<i>Figur 34. Krysset der ulykken fant sted, sett nordfra. Utkjørselen der semitraileren kom fra ses til høyre i bildet. Kilde Google Maps.....</i>	46
<i>Figur 35. Bilde av Tesla X og andre kjøretøy etter Teslafører på Autopilot kjørte inn i enden på en barriere.</i>	47
<i>Figur 36. En Tesla på autopilot braste inn i en lastebil på tvers av kjørebanelen i Taiwan, mai 2020</i>	48
<i>Figur 37. Ulykke forårsaket av umotivert stans. Kilde: Adressa mars 2020.....</i>	48
<i>Figur 38. Bilde fra Ubers kamera sekundet før kvinnen blir kjørt ned og drept. Øverst til venstre er bilde av Ubers modifiserte Volvo. Bilde NTSB</i>	50
<i>Figur 39. TransCar LTC2 Automated Guided Vehicle System (AGV) fra Swisslog med og uten last.</i>	53
<i>Figur 40. Illustrasjon av ulykkessituasjon med AGV.</i>	54
<i>Figur 41. The Yerkes–Dodson Law. Illustrasjon av SINTEF</i>	57
<i>Figur 42. Teoretisk risikonivå og AV-er som lærer av sine feil (SINTEF).....</i>	62
<i>Figur 43. Modenhetsnivå for byggesteiner i realiseringen av automatiserte kjøretøy</i>	68
<i>Figur 44. Utfordringer med tolkning av en fotgjengers intensjon i utvikling av kunstig intelligens (AI) for selvkjørende kjøretøy. Kilde NVIDIA</i>	69

Oversikt over tabeller

<i>Tabell 1. De 5 pilotene i SmartFeeder. Status per november 2019.....</i>	27
<i>Tabell 2. Oversikt over datasettet i SmartFeeder.....</i>	32
<i>Tabell 3. Ulike typer hendelser som ble analysert</i>	35
<i>Tabell 4. Hendelser registrert på Forus.....</i>	36
<i>Tabell 5. Hendelser registrert på Fornebu.....</i>	36

<i>Tabell 6. Hendelser registrert på Kongsberg</i>	36
<i>Tabell 7. Antall bråbrems registrert i Oslo</i>	36
<i>Tabell 8. "Operator-reported issues", manuelle registreringer, Oslo</i>	36
<i>Tabell 9. Alle hendelser oppsummert på 4 av 5 piloter</i>	37
<i>Tabell 10. Nødstoppp oppsummert på 4 av 5 piloter</i>	37
<i>Tabell 11. Manuelle overtakinger på 4 av de 5 pilotene</i>	38
<i>Tabell 12. Dødsulykker med kjøretøy på nivå SAE nivå 2 og 3 (Jenssen 2019).</i>	51
<i>Tabell 13. Utdrag av ulykker og hendelser med automatiserte kjøretøy i California. Data fra DMV.</i>	52
<i>Tabell 14. Ulykkesårsak for automatiske kjøretøy på SAE nivå 2 til 4</i>	61
<i>Tabell 15. Oppsummering av sikkerhetsrelaterte barrierer mot innføring av automatiserte kjøretøy</i>	71

Sammendrag

Hva vet vi om trafikksikkerhet for automatiserte kjøretøy?

Til tross for omfattende utprøving av høyt automatiserte kjøretøy på offentlige veier er det bare registrert seks dødsulykker internasjonalt og ingen på norske veier. Samtidig må vi minne om at dette er kjøretøy med ulik grad av automatisering og de mest avanserte kjører fortsatt i lave hastigheter. De kjører i lave hastigheter på grunn av myndighetenes lover og reguleringer eller selvpålagt forsiktighet, nettopp med hensyn til trafikksikkerheten. På den annen side foregår det meste av utprøvingen i kompleks bytrafikk som er det mest utfordrende trafikkmiljø for automatisering av kjøreoppgaven.

Trafikkulykker inntreffer heldigvis relativt sjelden for den enkelte bilfører og derfor brukes gjerne skaderisiko som antall drepte eller skadde pr mill. personkilometer for en gruppe førere som mål for å gi pålitelige tall for skaderisiko. Ulykkesfrekvens for en strekning uttrykkes vanligvis i antall politirapporterte personskadeulykker per million vognkilometer. Utfordringen med å etablere pålitelige estimat for skaderisiko ved innføring av ny teknologi i transportsektoren er at vi gjerne ikke har tilstrekkelig eksponering eller gode tall for eksponering (personkilometer) med den nye teknologien. I tillegg er teknologien i stadig endring. Det kan både forbedre risikobildet og innføre ny risiko tilknyttet endringer ved teknologien.

Sikkerhetsvurderinger av automatiserte kjøretøy må knyttes opp mot hvor avansert og omfattende automatiseringen er. SAE (Society for Automotive Engineers) har inndelt automatiserte kjøretøy i fem nivåer. På nivå 1 og 2 er det føreren som gjør alle taktiske valg, men systemet tar gradvis over kjøreoppgaven. Med de mest avanserte støttesystemene får føreren etter hvert en rolle som operatør. Likevel så må føreren på nivå 1 og 2 alltid være klar til å ta over kontroll og gå tilbake til rollen som aktiv fører hvis systemet svikter eller gjør feil. På nivå 3 har føreren i større grad rollen som operatør, men må gripe inn ved systemsvikt eller hvis systemet av ulike årsaker ikke kan håndtere trafikksituasjonen, f.eks. på grunn av skitne sensorer, værforhold eller trafikkreguleringer kjøretøyet ennå ikke takler på egen hånd. På nivå 4 og 5 har føreren ikke lenger noen rolle i kjøretøyet og kjøretøyet er derfor vanligvis ikke utstyrt for manuell føring av kjøretøyet fra en person som befinner seg inne i kjøretøyet. På nivå 4 kan kjøretøyet brukes innenfor bestemte vegmiljø, f.eks. veier som er spesielt tilrettelagt for automatisert kjøring, men de fleste SAE 4 systemer trenger ikke noe i tillegg til eksisterende infrastruktur (som vegkantutstyr) men at pilotområder er "enkle", som f.eks. veier med lav hastighet eller oversiktlige kryss. På nivå 4 er det ennå ikke privatbiler i salg, men Waymo er som den første leverandøren gitt tillatelse til å starte en taxi tjeneste i Phoenix Arizona med kjøretøy på nivå 4, helt ubemannet og uten sikkerhetsoperatør ombord. Det er flere leverandører av selvkjørende minibusser på tilnærmet nivå 4 og som driver med pilotering og utvikling for SAE nivå 4. I norske pilotprosjekter er det så langt krav om at en sikkerhetsoperatør (bussvert) skal være til stede, se mer om dette i kapittel **Error! Reference source not found.** På nivå 5 skal systemet kunne styre kjøretøyet under alle forhold uten noen begrensinger.

Vi forholder oss til definisjoner av automatiseringsnivå gitt i SAE J3016 i denne rapporten selv om det er etablert andre definisjoner av automatiseringsnivå blant annet av UNECE, se mer om dette i kapittel 2.1.

Automatiserte biler, busser og lastebiler skal gjøre trafikken tryggere. Rent teoretisk vil en kraftig reduksjon av førerfeil (misforståelser, soving bak rattet, distraksjon, ruskjøring, risikotaking, høy hastighet osv.) gi en betydelig nedgang i dagens nivå for antall drepte og hardt skadde i trafikken (Victor et. al 2017; Fagnant og Knockelman 2015). Samtidig hevder skeptikere at høyt automatiserte kjøretøy vil forårsake nye typer ulykker på grunn av feil ved teknologien, feil ved programvaren som tolker trafikkbildet rundt det selvkjørende kjøretøyet og på grunn av ulykker tilknyttet samhandling med andre trafikanter og kjøretøy (Dixit, Chand & Nair 2016. Moyer 2017).

Erfaringer fra piloter i Norge med selvkjørende minibusser (maks. 12 passasjerer), viser at det hverken har vært dødsulykker, ulykker med personskade eller politirapporterte ulykker. Slik sett er det forsikringsulykker og rapporterte hendelser som kan si noe om sikkerhetsnivået. Merk! For å unngå for mange endringer og omreguleringer av strekningen benytter kjøretøyene i alle pilotene seg av «halv-manuell» modus i alle kryss med vikeplikt og andre trange passasjer, noe som krever manuelle operasjoner. **Kjøretøyene ville derfor ikke klart å gjennomføre ruten uten operatør om bord** på stadiet vi er nå.

På Foruspiloten er det ikke registrert ulykker eller alvorlige hendelser. På Fornebu rygget en varebil på den automatiserte bussen som sto stille. Det ga mindre materielle skader. På Gjøvik har det vært mekaniske problemer med tre havarier der differensialen sviktet. På Kongsberg har det også vært materielle problemer med fire havarier av differensialen (foran og bak på begge busser). I Oslo (Ruter) er det rapportert påkjørsel av taxi under kjøring i manuell modus med mindre materielle skader. Taxien er tildelt skyld i uhellet. I flere av pilotene har bussoperatørene rapportert om uheldige forbikjøringer utført av andre bilister. Dette kan forventes så lenge de automatiserte minibussene går i svært lave hastigheter. Disse farlige forbikjøringene har likevel ennå ikke resultert i trafikkulykker.

Andre erfaringer knyttet direkte til sikkerhet er at sensorene på bussen kan gi utslag som medfører tilsynelatende *umotivert stans* som kommer overraskende på passasjerer og trafikanter (gående, syklende, bilførere). For det første er bussene avhengig av god internettkobling, gjerne via mobilnettet, for å kunne kjøre i automatisert modus. Det betyr at for eksempel at dårlig mobildekning kan resultere i at bussen stopper. Syklister som passerer for nær bussen gir også bråstopp, selv om det egentlig ikke er fare for kollisjon. På samme måte kan vegetasjon, brøytekanter som kommer inn på vegen pga. lysmaster og trær nær vegen medføre at bussen stopper. Snø, sterk nedbør og tåke gir også utfordringer for bussens sensorer. Lysmaster i seg selv er ikke noe problem om ruta kan legges litt ut fra vegkanten. De flytter seg ikke, og de er der under oppkjøring av ruta. Problemet er at man ikke får ryddet vegen for snø med tilstrekkelig klaring til den oppkjørte ruta. Til tross for dette har for eksempel piloten på Kongsberg hatt overraskende bra regularitet på vinterføre.

Vi må forvente at det settes søkelys på ulykker med automatiserte kjøretøy en stund framover, - også når vi får ulykker i Norge. Nyheten om den første ulykken med høyt automatisert minibuss (SAE Nivå 4) i Las Vegas, spredte seg raskt i media verden over. Ulykken skyldtes at et vogntog rygget på minibussen som stod i ro da den ble påkjørt. Den automatiserte bussen var ikke skyld i ulykken, men den var heller ikke programmert til å unngå ulykke der andre gjør feil, for eksempel ved å kjøre framover eller bakover hvis det er mulig eller å varsle med hornet.

Vi vil sannsynligvis ha en hybrid situasjon i de kommende tiår med en blanding av førerstyrte og ubemannede, høyt automatiserte kjøretøy. Samspill mellom konvensjonelle og høyt automatiserte kjøretøy vil være en utfordring sikkerhetsmessig. Blant annet fordi automatiserte kjøretøy følger det digitale regelverket til punkt og prikke, og dermed kan oppføre seg uventet i forhold til trafikkkulturen på stedet (forventingsbrudd).

I samhandling med andre trafikanter har automatiserte kjøretøy foreløpig fire klare svakheter

- 1) De er dårlige på fletting, innkjøring på motorveg, tolkning av vikeplikt
- 2) De kjenner ikke egen utstrekning (høyde/bredde)
- 3) De mangler evne til å varsle, forhandle om og kommunisere egne intensjoner
- 4) De mangler evne til å vike for utrykningskjøretøy

For å kompensere for noen av disse svakhetene kan det i en overgangsfase være fornuftig å ta ut sikkerhetsoperatøren fra kjøretøyet og å etablere et kontrollrom for overvåkning og eventuell fjernstyring av ubemannede og høyt automatiserte kjøretøy på veg.

Utvikling innen sensorer, kunstig intelligens (AI) og lærende systemer (*deep learning*) vil være viktig for å heve dagens automatiserte kjøretøy opp på et høyere nivå som tillater høyere hastigheter og bruk i alle typer trafikkmiljø. Erfaringer fra piloter gir her verdifull input til forbedringer. Automatiserte kjøretøy tar lærdom av hver hendelse og kan dele det med andre automatisert kjøretøy. Slik kan alle automatiserte kjøretøy bli bedre rustet til å håndtere uventede situasjoner på en sikker måte. De selvkjørende minibussene i de norske pilotene har imidlertid ikke noen form for maskinlæring ennå.

Det samlede ulykkesbildet viser at vi må forvente enkelte nye typer ulykker med høyt automatiserte kjøretøy, men langt færre enn med manuelle kjøretøy.

Summary

What do we know about traffic safety for automated vehicles?

Despite extensive testing of highly automated vehicles on public roads, only six fatal accidents have been recorded internationally and none on Norwegian roads. At the same time, we must remember that these are vehicles with varying degrees of automation and the most advanced ones are still driving at low speeds, because of laws, regulations or self-imposed safety precautions by suppliers and service providers. Yet, we have to keep in mind, that so far most of the testing is taking place in complex urban traffic which is the most challenging traffic environment for automation of the driving task.

Traffic fatalities on Norwegian roads have had a positive trend since 1970. If we assume that today's traffic volume is 3.4 times higher today, then we would have 1,900 fatalities in traffic given the same accident risk as in 1970. A large part of this decline can be attributed to new vehicle technology. Active and passive safety systems such as seat belt reminders, ABS brakes, airbags, and anti-skid (ESP).

Fortunately, traffic accidents occur relatively rarely for the individual driver, and consequently injury risk is often used as the number of killed or injured per million person kilometres for a group of drivers as the goal of providing reliable figures for injury risk. Accident frequency for a road section is usually expressed as the number of police-reported personal injury accidents per million vehicle kilometres.

Establishing reliable estimates of injury risk is a challenge with new technology in the transport sector since we often do not have enough exposure data or person kilometres with the new technology in respective automated modes. In addition, technology is constantly changing. This can both improve safety and introduce new risk factors associated with changes or "*improvements*" in technology. Increased automation of the driving task is expected to produce a number of positive effects. Optimize traffic flow, reduce fuel consumption, increase mobility for the elderly and, not least, increase traffic safety by reducing driver errors (Pink et al-2015).

If we are to say something about the safety of automated vehicles, it is important to know how advanced and comprehensive the automation is. SAE (Society for Automotive Engineers) has divided automated vehicles into five levels. At level 0 it is purely manual control. At level 1 and 2, the driver makes all tactical choices, but the system can be ordered to take over the driving task. At level 3 the driver still must monitor the automated driving and act if necessary but gets more the role of an operator observing automated driving. At the most advanced Level 4-5 the driver is out of the loop except when deciding destination. Nevertheless, the level 1 and 2 drivers must always be ready to take control and return to the role of active driver if the system fails. At level 3, the driver has completely assumed the role of operator, but must intervene in system failure. At levels 4 and 5, the driver no longer has a role in the vehicle. Level 4 includes driving within specific road environments, but at level 5 without any restrictions.

At the same time, sceptics claim highly automated (autonomous) and self-driving vehicles will cause new types of accidents due to technology failures in hardware and software that interprets the traffic picture round the self-driving vehicle and due to accidents associated with other road users (Dixit, Chand & Nair 2016). Moyer 2017).

Self-driving cars and buses and trucks are expected to make traffic safer. In theory, a major reduction in driver error (misunderstanding, steering wheel distortion, distraction, intoxication, risk taking, high speed, etc.) will significantly reduce the current level of the number of killed and severely injured in traffic.

Experience from pilots in Norway with automated shuttle buses (max. 12 passengers) shows that there have been neither fatal nor police-reported accidents. Hence, insurance reported accidents and reported incidents

by the operators can tell us something about the level of safety. Note! In order to avoid too many changes to the traffic regulations on the test route the buses in all pilots utilise «half-manual» mode in all junctions with priority (yield/right of way) and narrow streets which demands manual operation. Hence, the buses would not manage to navigate the route without a safety operator on-board at the development stage we are now.

There were no insurance accidents or serious incidents on the Forus pilot. At Fornebu, a van backed up into the shuttle bus that had stopped. It caused minor material damage. At Gjøvik there has been mechanical problems; three incidents with differential failure. At Kongsberg there were also material problems with four breakdowns of the differential (front and rear of both buses). In Oslo (Ruter): a taxi ran into the shuttle bus while it was driving in manual mode, resulting in minor material damage. The taxi caused the incident. The safety officers onboard the self-driving minibuses have reported potentially hazardous overtakings, performed by private cars, in several of the pilots. This is to be expected as long as the highly automated minibuses drive at very low speeds. Yet, potentially dangerous overtaking has not resulted in traffic accidents, so far. Other experiences related directly or indirectly to safety are that all buses depend on good internet connection in order to operate autonomously. This implies that unmotivated stops may occur. Such stops may represent risks as it can come as a surprise to ordinary road users. Yet, no incidents are reported due to unmotivated stops. The noticeable shape and unusual design of automated pilot buses may have encouraged other road users to be cautious. Vegetation, and snowplough edges that come into the road during winter caused by streetlight masts and trees near the roadside, can interfere with the sensors on the automated vehicle. Cyclists passing near the bus, violating the safety zone around the bus, cause frequent abrupt stops. Snow, heavy rainfall, and fog present challenges for the bus sensors. Nevertheless, the pilot at Kongsberg has had surprisingly good regularity on winter days. We must expect that there will be a great focus on accidents with automated vehicles for a while, - also when we get accidents in Norway. The news of the first automated shuttle bus accident (SAE Level 4) in Las Vegas rapidly spread in media worldwide. The accident was caused by a truck backing up into the highly automated shuttle bus which was at a standstill when it was hit. The automated bus was not responsible for the accident but did not have a software to avoid accidents where others make mistakes, by driving forward or honking to alert.

In coming decades, we are likely to have a hybrid situation with a mix of ordinary driver controlled and unmanned, highly automated vehicles. Interaction between non-automated vehicles and highly automated will be a safety challenge. Partly because automated vehicles behave unexpectedly (expectation breach) and partly because they follow rules and regulations strictly and maybe too strict in relation to the traffic culture in general.

In situations of interaction with other road users, automated vehicles currently have four clear weaknesses:

- 1) They are poor at merging, entering highways, expecting lane changes and in interpretation of yield situations (left turns etc)
- 2) They do not know their own size (height / width)
- 3) They lack the ability to notify, negotiate and communicate their own intentions
- 4) They lack the ability to give way to emergency vehicles

To compensate for some of these weaknesses, it may be sensible, in a transitional phase, to establish a control room for monitoring and possible remote control of unmanned and highly automated road vehicles.

Developments in sensors, artificial intelligence (AI) and deep learning will be important in raising today's automated vehicles to a higher level that allows higher speeds and use in all types of traffic environments. Experiences from pilots reported here provide valuable input for improvements. Automated vehicles take lessons from each event and can share it with other automated vehicles. In this way, all automated vehicles can be better equipped to handle unexpected situations safely. Note! The self-driving buses in the Norwegian

pilots do not have any machine learning yet. The overall accident picture shows that we must expect some new types of accidents with highly automated vehicles, but less than with manual vehicles.

1 Innledning

Det er i dag to trender innen utvikling av selvkjørende kjøretøy for persontransport:

- a) Utvikling av automatiserte personbiler (privat mobilitet).
- b) Utvikling av automatiserte minibusser og busser (kollektiv mobilitet).

Begge utviklingsløpene har som mål å utvikle høyt automatiserte kjøretøy, men de har ulikt fokus og er på ulike utviklingsnivå. Vi presenterer først resultater fra fem norske pilotprosjekt med automatiserte minibusser med inntil 12 passasjerer i kapittel 3.

Deretter settes resultatene inn i en bredere kontekst med oppdatert kunnskap fra litteraturundersøkelser (*State-of-the-art*). Denne delen gir innblikk i status på teknologi og trafiksikkerhet innen utvikling av automatiserte privatbiler. På noen områder er utviklingen av automatiserte kjøretøy for privat mobilitet kommet lengre enn innen kollektiv mobilitet. Hendelser og ulykker med automatiserte og såkalte autonome kjøretøy innen markedet for privat mobilitet, kan gi en pekepinn på hvordan utviklingen kan bli for høyt automatiserte minibusser og busser.

Automatisering skjer innen mange transportområder og det er nyttig å se hva vegtransport kan lære av automatisering innen luftfart, sjøtransport og jernbane/metro i et sikkerhets perspektiv.

Vi ser nærmere på det i kapittel 5.

Hensikten med denne rapporten er å rapportere trafiksikkerhetsresultater fra SmartFeeder prosjektet. Automatiserte kjøretøy kan endre, påvirke og forme vår fremtidige mobilitet og livskvalitet. De viktigste suksesskriteriene og potensialet for høyere nivåer av automatisert kjøring er at det er stort potensiale for å bedre mobilitet, bedre miljøet og **redusere ulykker forårsaket av menneskelige feil**. Høyt automatiserte kjøretøy kjører ikke i ruset tilstand, det har ikke en fører som kan sovne bak rattet eller som med viten og vilje bryter fartsgrenser og andre trafikkregler.

Vi vil her undersøke og sammenstille kunnskap om hendelser og ulykker som kan si noe om:

- risiko med dagens teknologiske nivå på automatiserte kjøretøy,
- risiko i samspill med ikke automatisert kjøretøy basert på erfaringer nasjonalt fra de første pilotprosjektene med selvkjørende minibusser i Norge
- risiko i samspill med ikke automatisert kjøretøy basert på erfaringer internasjonalt

1.1 Smartfeeder prosjektet

Prosjektet SmartFeeder har ikke hatt som mål å utvikle tekniske løsninger knyttet til automatiserte kjøretøy, men har hatt søkelys på hvordan automatiserte kjøretøy kan inngå i og bidra til forbedring av kollektivtilbudet og medvirke til en grønn omstilling hos de reisende. Brukeraksept og krav til sikkerhet og trygghet kan påvirke innføring av automatisert mobilitet positivt eller negativt. Sett på den bakgrunn er det

interessant å undersøke hvilke uønskede hendelser og ulykker vi kjenner til med autopilot på SAE nivå 2 og høyere nivå av automatisering (SAE nivå 3-5), i den grad det finnes kunnskap om det.



Figur 1. Fokusområder for forsknings og kunnskapsutvikling i SmartFeeder prosjektet

Fokus har vært på hvordan automatiserte busser kan inngå som en tilbringertjeneste innen kollektiv mobilitet, verdiskaping og hvilke barrierer (showstoppere) det kan være som hindrer ønsket utvikling innenfor et grønt skifte.

Selv om målet for SmartFeeder prosjektet ikke er å utvikle tekniske løsninger, kan resultatene gi kunnskap som kan bidra til utvikling av teknologi, sensorer, styringssystemer med mere. Det kan på sikt gi enda mer funksjonelle, trygge og sikre tjenestetilbud med selvkjørende minibusser.

Merk at det i rapporten er viet en del oppmerksomhet rundt ulykker med Tesla Autopilot. Dette fokuset kan virke ubalansert, men er inkludert fordi:

- Det er mye vi kan lære av Teslaulykkene på et lavere automatiseringsnivå (SAE nivå 2)
- Andre bilmerker med automatisering som ligner på Tesla sin autopilot har regulert og begrenset bruksområdet for denne typen autopilot
- Tesla benytter et annet sett av sensorer enn andre bilmerker
- Navnet på funksjonen (Autopilot) kan ha effekt på tillit og ulykker med systemet

Det er klart at Tesla sin Autopilot og andre sikkerhetssystemer tilknyttet førerstøtte i Tesla også redder Tesla førere ut av trafikkfarlige situasjoner, men det finnes det mindre dokumentasjon på.

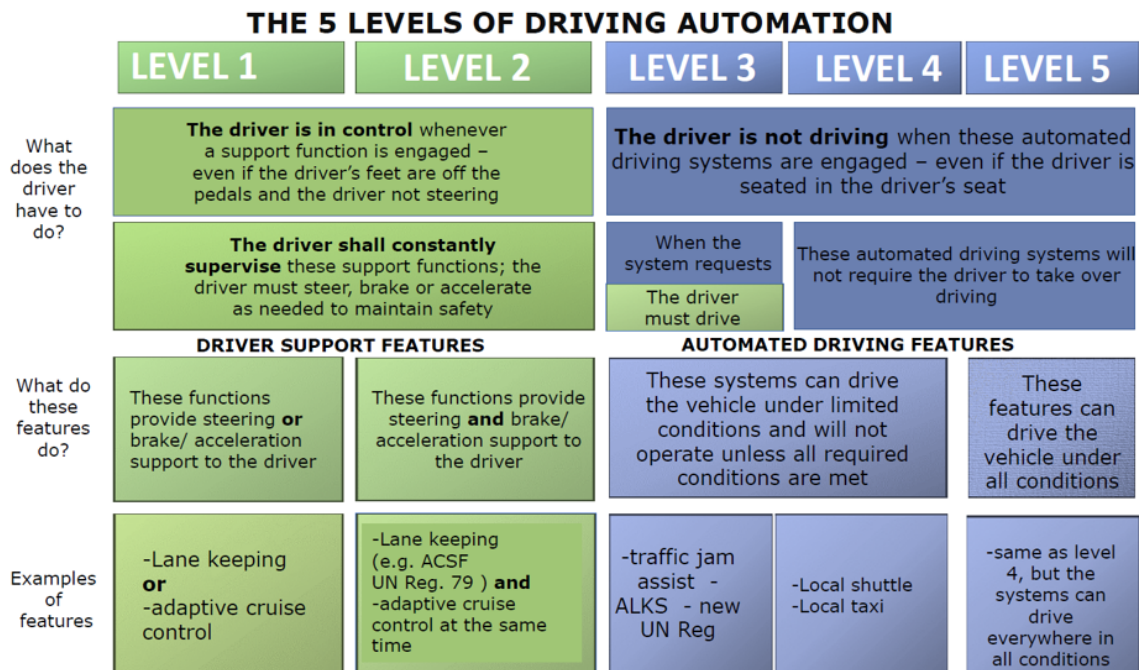
Automatisert vegtransport er et nytt og ungt fagfelt. Det er derfor behov for å definere og forklare en del sentrale begreper og forkortelser som brukes. Noen begreper er vel etablert, andre er i ferd med å forsvinne. For eksempel er det nå sjelden å se begrepet *førerløse kjøretøy* brukt om høyt automatiserte kjøretøy. Det referer til et kjøretøy hensatt/parkert uten håndbrekk eller parkeringsfunksjon aktivert, som triller av gårde på egenhånd. Det er med andre ord ingen automatisering med i bildet, men kun en tilstand forårsaket av forglemmelse og førerfeil. Innen automatisert sjøtransport, lufttransport og metro er derimot begrepet *ubemannet* godt etablert. Det refererer imidlertid til skip, fly osv. som midlertidig er styrt og kontrollert av fra en kontrollsentral eller skipet, flyets automatiserte funksjoner uten behov for menneskelig kontroll i flyet fartøyet eller toget.

For ytterligere diskusjon av begreper innen ulike transportformer anbefaler vi å lese en litteraturstudie (Vagia et al. 2016) omkring bruk av begrepene automatisering og autonomi, og en diskusjon om nivåer av automatisering og autonomi (Bård Myhre et al 2019), samt den internasjonale standarden av Society for Automotive Engineers (SAE J3016). Vi viser også til SINTEF-rapporten Automatisert kjøring på veg som bygger på SAE J3016 (Foss, 2017). En oversikt over sentrale begrep og forkortelser er gitt i Annex 1.

2 Automatisering av kjøretøy og kjøreoppgaver

2.1 SAE J3016 og sikkerhet ved øket grad av automatisering

Skal vi si noe om sikkerheten til automatiserte kjøretøy er det viktig å vite hvor avansert og omfattende automatiseringen er. Vi har valgt å referere til en inndeling av automatiseringsnivå basert på SAE J3016 som er den mest kjente og mest brukte i dag. Det er imidlertid viktig å merke seg at det som vil bli lagt til grunn for framtidige lovgivning i Norge (og bortimot 60 andre land) er inndelingen og definisjonene og øvrig regelverk som utarbeides i UNECE/WP29 (Avtalen fra 1958 om tekniske krav til kjøretøy) og trafikkregler i UNECE/WP1 (Wienkonvensjonen om vegtrafikk). Det arbeidet er naturlig nok basert på SAE J3016 som var de første standarden som definerte dette, men UNECE har brukt deler av den og lagt til andre momenter som blant annet type veg (UNECE, 2018).



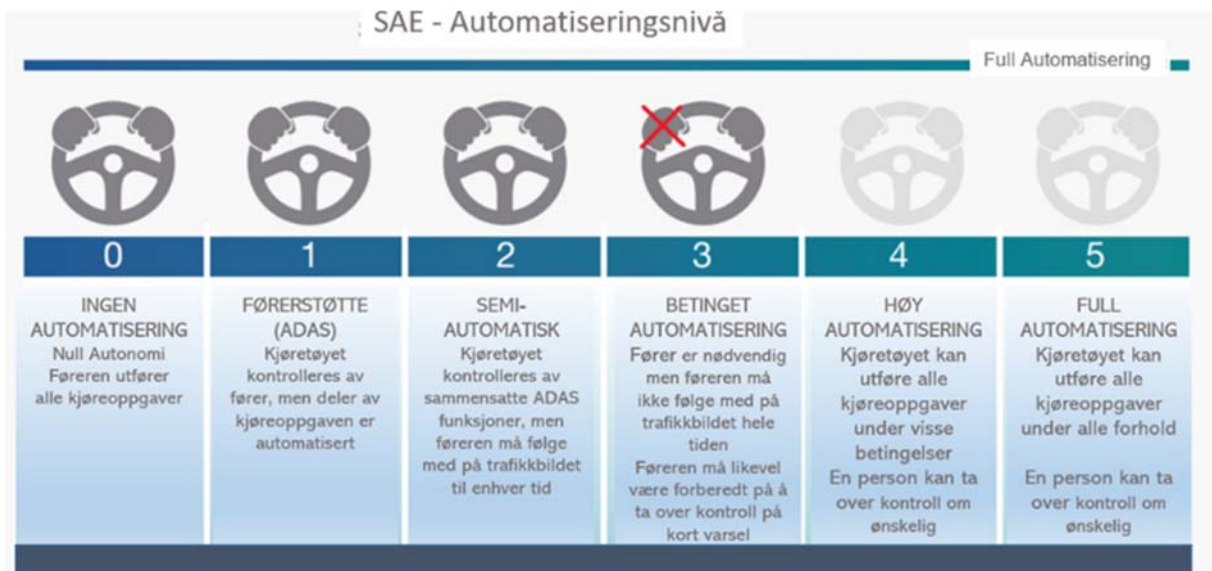
Figur 2. Automatiseringsnivå definert av UNECE.

https://www.unece.org/fileadmin/DAM/Corrected_5_Levels_of_Driving_Automation.pdf

Merk! UNECE har en strengere definisjon av nivå 4 enn SAE! Blant annet ved at systemet ikke på noe tidspunkt vil kreve at føreren tar over kontroll på dette nivået. I SAE er dette bare betingelse ved nivå 5. Forskjellen mellom SAE og UNECE går blant annet på at kjøretøy på Nivå 4 innen UNECE sin logikk ikke skal operere på gater og veger den ikke kan trygt ferdes på uten en sikkerhetsoperatør eller fører, mens SAE åpner for at en fører eller sikkerhetsoperatør kan ta over når ønskelig eller når systemet krever det på nivå 4. På nivå 1-3 er mennesket sikkerhetsmessig fallback, mens på nivå 4-5 er systemet fallback. For ytterligere beskrivelse av UNECE sine 5 nivå se UNECE 2018 ECE/TRANS/WP.29/1140

SAE (*Society for Automotive Engineers*) J3016 (2018) deler inn graden av automatisering av kjøretøy i seks nivåer (0-5). En forenklet oversikt over de forskjellige nivåene kan ses i *Figur 3*.

- På nivå 1 og 2 er det føreren som gjør alle taktiske valg, men systemet tar gradvis over kjøreoppgaven og føreren får en rolle som operatør. Føreren må være klar til å ta over kontroll og gå tilbake til rollen som aktiv fører hvis systemet svikter eller gjør feil. Dette er illustrert med begge hender på rattet.
- På nivå 3 har føreren helt og holdent tatt rollen som operatør, men må gripe inn ved system svikt, illustrert med en hånd på rattet.
- På nivå 4 og 5 har føreren ikke lenger noen rolle i kjøretøyet. På nivå 4 kan kjøretøyet brukes innenfor bestemte vegmiljø, f.eks. veger som er spesielt utstyrt med vegkantutstyr for automatisert kjøring. På nivå 5 skal systemet kunne styre kjøretøyet under alle forhold uten noen områdebegrensinger.



Figur 3. Forenklet beskrivelse av SAE nivå for grad av autonomi. *IEEE Spectrum* (2020).

I figuren over står det at en person kan ta over kontroll om ønskelig på nivå 4 og 5. Dette kan f.eks. være en person utenfor kjøretøyet som kan fjernstyre kjøretøyet til en sikker stillstand eller en person i kjøretøyet dersom denne personen har kunnskap og tillatelse til å føre kjøretøyet og dersom kjøretøyet er utstyrt med fører sete og nødvendige styreinnetninger. Dette er imidlertid vist som en opsjon i SAE J3016 og det normale vil derfor være at et reservesystem tar over kontrollen av kjøretøyet.

Avansert førerstøtte finner vi primært på nivå 1 og 2, men enklere former for førerstøtte slik som automatgir, og servostyring finnes også på nivå 0. Kun veteranbiler er uten slik enklere førerstøtte i dag. Semi-automatiske systemer finner vi i kjøretøy blant annet fra Tesla (Autopilot), Volvo (Pilot assist), BMW (Personal CoPilot), Mercedes (Drive Pilot) og Cadillac (Super Cruise). Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) finner vi også på nivå 3 der to eller flere slike førerstøttesystemer muliggjør betinget automatisering der kjøretøyet er selvkjørende i lengre perioder og i større grad enn på nivå 2. Det selges foreløpig ikke kjøretøy på nivå 3, men flere selskaper har piloter med kjøretøy i vegtrafikk på nivå 3.

På nivå 4 er det ikke privatbiler i salg, men Waymo er som den første leverandøren gitt tillatelse til å starte en taxitjeneste i Phoenix Arizona med kjøretøy på nivå 4, helt ubemannet og uten sikkerhetsoperatør ombord. Det er flere leverandører av selvkjørende minibusser på tilnærmet nivå 4 og som driver med pilotering og utvikling for SAE nivå 4. I norske pilotprosjekt er det krav om at en sikkerhetsoperatør (bussvert) skal være til stede, se mer om dette i kapittel **Error! Reference source not found.** Denne personen kan trykke på en stoppknapp og ta over styring når nødvendig. Forsikringsbransjen anser da operatøren som ansvarlig forsikringstaker gjennom operatørselskapet som tegner avtalen. Mange av kjøretøyene på nivå 4 baserer seg på *Fixed route Automation* (automatiserte busser og taxitjenester). Det innebærer at kjøretøyet lærer å kjøre en bestemt rute. Nye ruter kan kun kjøres etter en tilsvarende læringsprosess der systemet lærer seg å gjenkjenne vegmiljøet fra A til B på ruten med de kryssene, gangfeltene og andre reguleringer som finnes.

Det er foreløpig ingen kjøretøy på markedet på nivå 5. Flere selskaper har imidlertid ambisjoner om å utvikle kjøretøy på det øverste nivået (full automatisering) og har pilotprosjekt med kjøretøy på nivå 4 med mål om å videreutvikle til nivå 5. På nivå 5 er det i prinsippet fri ferdsel på alle deler av vegsystemet, der kjøretøyet leser det umiddelbare trafikkbildet og samhandler med andre trafikanter på en sikker og effektiv måte. Alt passasjerer må gjøre er å velge destinasjon for reisen. Det diskuteres hvorvidt kjøretøy på nivå 5 bør kunne inngå i en flåtestyring der et operatørselskap kan kommunisere med passasjerer og eventuelt fjernstyre slike kjøretøy fra et kontrollrom. Google-Waymo har prøveprosjekt i California med selvkjørende taxi på nivå 4 der passasjerer kan kontakte og snakke med operatørselskapet. Det er nyttig for eksempel når det autonome kjøretøyet kjører forbi destinasjonen fordi det ikke finner en lovlig plass å stoppe på, og dermed må kjøre flere km forbi, snu og vende tilbake på motsatt side av gaten. De autonome kjøretøyene vil foreløpig ikke dobbeltparkere og sette på blinklys eller nødblink for å slippe av passasjerer, slik vanlige førere kan gjøre.

2.2 *

I Norge er uttesting av selvkjørende kjøretøy regulert i "Lov om utprøving av selvkjørende kjøretøy" (LOV-207-12-15-112; (Samferdselsdepartementet, 2017)).

§ 2. Virkeområde

- *Loven gjelder utprøving av selvkjørende kjøretøy uten ansvarlig fører og selvkjørende kjøretøy med ansvarlig fører som ikke befinner seg på tradisjonell førerplass.*

§ 6. Ansvarlig for utprøvingen

- *Det skal i søknaden og tillatelsen utpekes en fysisk person som skal være ansvarlig for at utprøvingen gjennomføres etter gjeldende bestemmelser og i henhold til fastsatte vilkår, herunder må vedkommende særlig påse at sikkerheten er ivaretatt under kjøring hvor utprøvingen med selvkjørende kjøretøy skjer uten en ansvarlig fører.*

Loven beskriver rollen "ansvarlig for utprøving" som en fysisk person som skal påse at sikkerheten er ivaretatt ved utprøving av selvkjørende kjøretøy uten en ansvarlig fører. Vegdirektoratet har utarbeidet forskriften "Forskrift om utprøving av selvkjørende motorvogn" som utfyller ovenfornevnte lov. Forskriften åpner for at man kan operere et selvkjørende kjøretøy helt uten en ansvarlig fører eller operatør:

§ 2. Virkeområde

- *Denne forskriften gjelder utprøving av selvkjørende kjøretøy, jf. lov om utprøving av selvkjørende kjøretøy § 2, for kjøretøy som anses som motorvogn.*
- *Forskriften omfatter utprøving av motorvogn med fører på tradisjonell førerplass utrustet med et teknisk system som automatisk fører motorvognen hvor føreren under kjøringen helt eller delvis ikke lenger skal anses som ansvarlig fører.*
- *Forskriften omfatter også utprøving av motorvogner som kjører helt uten en ansvarlig fører, eller med ansvarlig fører på annet enn tradisjonell førerplass.*

Med utgangspunkt i loven, vil ansvarlig for utprøving kunne la det selvkjørende kjøretøyet operere helt uten menneskelig inngripen under hele kjøringen på SAE nivå 5, eller på hele eller deler av kjøringen på SAE nivå 3 og 4. Dette betinger at man kan dokumentere rent sikkerhetsmessig at kjøretøyet er i stand til det.

Med utgangspunkt i en sikkerhetsvurdering, så ble ingen av kjøretøyene som ble benyttet i SmartFeeder-pilotene opererte helt uten en fysisk person om bord i kjøretøyet. I SmartFeeder-pilotene ble det benyttet operatører. I denne rapporten omtales rollen til bussvertene som ansvarlig operatør. Dersom ansvarlig operatør hele tiden må være forberedt på å overta styringen av bussen for å oppnå en tilstand med minimal risiko (Minimal Risk Condition, MRC, jfr SAE J3016), ansees ikke bussen å oppfylle kravene til SAE nivå 4, men oppfyller kravene til SAE nivå 3.

Kjøretøyene var fra produsenten designet for å kunne operere på SAE nivå 4. De tekniske sidene ved kjøretøytutviklingen ligger utenfor SmartFeeder-prosjektets ramme. Målsettingen har vært å se på hvordan passasjerene opplevde en tjeneste med bruk av autonome shuttlebusser. En viktig observasjon for passasjerene var at bussen manglet sjåfør, ratt og pedaler, noe som er høyst relevant for et SAE nivå 4 kjøretøy.

Kjøretøyene var også prototyper, der graden av ferdigstilling varierte i løpet av prosjektperioden. Det er ukjent hvilke tester produsentene på forhånd hadde utført på det autonome systemet, men pilotene i SmartFeeder hadde som hensikt å bidra til at disse prototypene ble testet og videreutviklet. Testen på Kongsberg ble også en første test av EasyMile EZ10 under krevende norske vinterforhold. Vi omtaler derfor SAE-nivåene som benyttes i Norge til SAE nivå 4, da dette er nivået det automatiserte kjøretøyet ifølge leverandøren er designet for å operere på. Når vi bruker begrepet prototyper her så må vi huske at det er snakk om serieproduserte kjøretøy (som finnes i hundretall). De har funksjonalitet som er under utvikling. Kjøretøysleverandører tester løsningene sine gjennom simulatorer, testbaner, miljølabber og gjennom ulike piloter. SmartFeeder har ikke hatt tilgang på testprosessene eller resultat av disse.

Regulatorisk gjøres det et sterkt skille mellom førerstøttesystemer (ADAS/nivå 2) og automatiske systemer (ADS/nivå 3-5). Rapporten omhandler: «Trafikksikkerhet for automatiserte kjøretøy» og «Erfaringer fra norske piloter med selvkjørende minibusser». Det er viktig å merke seg at ulykker med ADAS-førerstøttesystemer (Tesla ulykker), er strengt tatt ulykker med førerstøtte der bare enkelte føreroppgaver er automatisert og hvor føreren selv velger når disse skal aktiveres. Det er viktig å skille mellom førerstøttesystem der bare en eller to føreroppgaver er automatisert (gass, brems, styring) og automatisering av hele kjøreoppgaven. Publikum kan få et feilaktig inntrykk av et førerstøttesystemer kan ta over alle oppgavene til fører. Dette er tema i en rapport fra *Dutch Safety Board 2019 Who is in Control? Road safety and automation in road traffic* (Dutch Safety Board (2019)).

Vi velger likevel å ta med en del erfaringer fra ulykker med førerstøttesystem på lavere SAE nivå i denne rapporten for å gi et helhetlig perspektiv på hvordan føreraktivert automatisering av deloppgaver kan forårsake ulykker. Førerstøttesystem som historisk sett er forløpere til automatisering av hele kjøreoppgaven.

Ved vurdering av sikkerhet for selvkjørende minibusser er viktig å skille mellom showcase og pilotprosjekt. I løpet av perioden 2016/2017 er selvkjørende minibusser på tilnærmet SAE nivå 4 demonstrert på 23 steder i Norge. Totalt har mer enn 21.000 passasjerer prøvd teknologien i såkalte showcase. Showcase kjennetegnes ved at de gjennomføres uten at reisen dekker et reelt mobilitetsbehov. En showcase har heller ikke som mål å endre reisevaner, gi miljøgevinster, gi billettinntekter, forbedre kollektivtilbudet eller forbedre trafikksikkerheten.

Showcase foregår ofte på lukket område og har begrenset varighet (1-2 dager). Det første showcaset i Norge med selvkjørende minibusser var i Trondheim i august 2009 som ledd i EU prosjektet CityMobil der SINTEF var en FoU-partner. Et pilotprosjekt har lengre varighet enn en showcase. Pilotprosjekt kan i tillegg ha som mål å teste teknologien i mest mulig realistisk bruk. Om de er godt planlagt kan de dekke et reelt reisebehov, skape billettinntekter og gi verdifull innsikt i brukeraksept og driftsforhold. Pilotprosjekter på offentlig veg i vanlig trafikk kan gi indiksjoner på trafikksikkerhet tilknyttet høyt automatiserte kjøretøy.

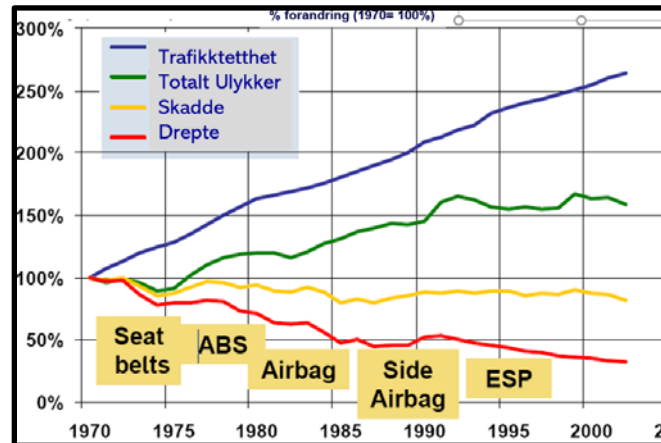
Det er viktig å merke seg at for å unngå for mange endringer og omreguleringer av strekningen benytter kjøretøyene i alle pilotene seg av «halv-manuell» modus i alle kryss med vikeplikt og andre trange passasjer, noe som krever manuelle operasjoner. **Kjøretøyene ville derfor ikke klart å gjennomføre ruten uten operatør om bord** på stadiet vi er nå. Noen tilpasser i stort omfang med varselskilt (Forus PRT - Stavanger) og noen i mindre omfang med skilt, men i større grad med trafikkreguleringer (Applied Autonomy - Kongsberg).

Halv-automatisk modus (Stop&Go) i alle kryss uten forkjøringsveg ble etter et års tid noe forbedret og fikk betegnelsen YIELD-Function (bare for EasyMile). Da trengte ikke bussen stoppe helt, men går i gangfart inn i krysset. Operatøren må fortsatt manuelt aktivere en knapp for å få den til å akselere igjen.

Dette er akkurat det samme for bussene som prøves andre steder i verden på det som omtales som «nivå4», men de som skriver om det har ikke satt seg inn i detaljene. Til slutt har mange forskningsrapporter gjengitt fra hverandre og en «falsk» sannhet har blitt etablert.

2.3 Trafikksikkerhet som målbar enhet

Antall drepte i den norske trafikken har ligget mellom 106 og 110 de tre siste årene, med ytterligere rundt 600 alvorlige og meget alvorlige skader (SSB 2018). Trafikksikkerheten har forbedret seg drastisk siden 1970-tallet, da antall drepte i den norske vegtrafikken var i størrelsesorden 560 per år. Hvis vi legger til grunn at dagens trafikkmengde er 3,4 ganger høyere, ville risikonivået fra 1970 gitt over 1.900 årlige dødsfall. En stor del av denne nedgangen kan tilskrives ny kjøretøyteknologi i form av aktive og passive sikkerhetssystemer som setebelte påminnere, ABS bremses, airbag og antiskrens (Jenssen, 2010), se *Figur 4*. Bygging av flere trafikksikre veger, utbedring av ulykkespunkter og forbedret føreropplæring har også medvirket til nedgangen. I løpet av de siste årene har imidlertid forbedringen i trafikksikkerhet stagnert. Analyser av dødsulykkene viser at 33% av alle som omkom i en bil i 2019 ikke har brukt sikkerhetsbelte. Mange av disse ville ha reddet livet om de hadde brukt sikkerhetsbelte. Det viser at det er et kontinuerlig behov for holdningsskapende arbeid innenfor utdanning, kampanjer, kontroller og sanksjoner så lenge det er mennesker og menneskelige feil i årsakskjeden til ulykker.



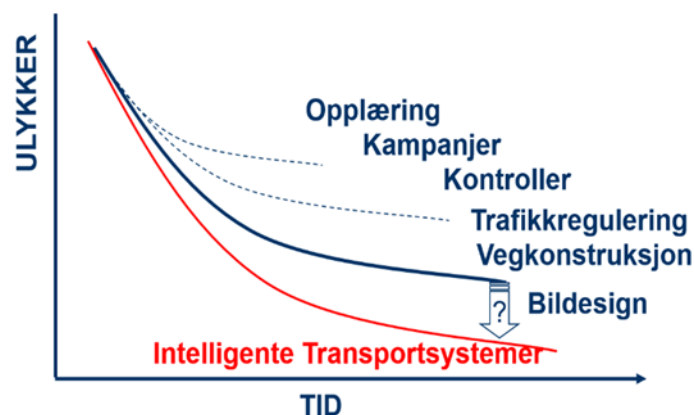
Figur 4. Aktiv og passiv sikkerhet i kjøretøy som har påvirket trafiksikkerheten. Kilde Bosch.

Trafiksikkerhet måles ofte som skaderisiko som er antall drepte eller skadde pr mill. personkilometer for en gruppe trafikanter. Kontroll på eksponering i trafikk blir da en viktig input til beregning av skaderisiko.

Utfordringen med å etablere pålitelige estimat for skaderisiko ved innføring av ny teknologi i transportsektoren er at vi gjerne ikke har tilstrekkelig eksponering eller gode tall for eksponering (vognkilometer) med den nye teknologien. I tillegg er teknologien i stadig endring. Forbedringer i teknologien kan både redusere risiko og innføre ny risiko tilknyttet endringer ved teknologien.

2.4 Automatisering som trafiksikkerhetstiltak

Selv om trafikkdøden er på et historisk lavt nivå i Norge, så er situasjonen internasjonalt en helt annen. Der sliter de fleste land med svært høy andel årlig drepte i trafikken. I møte med denne bekymringsfulle situasjonen, har både norske og europeiske myndigheter kunngjort ambisjonen om "null dødsfall" på veiene innen år 2050. Forventningen er at innovasjon – og særlig automatisering – vil gi et bidrag i form av avanserte førerstøttesystemer (ADAS), samvirkende intelligente transportsystemer (C-ITS) og økende automatisering av kjøreoppgaven.



Figur 5. Framtidens sikkerhetstiltak.

Det er viktig å innse at moderne biler utstyrt med ADAS teknisk sett ikke er sammenlignbare med tidligere utgaver av teknologien som var på markedet for bare noen tiår siden. Nye biler kan allerede ta over en rekke oppgaver fra sjåføren, eksempelvis styring, bremsing og akselerasjon. ADAS utfører disse handlingene på

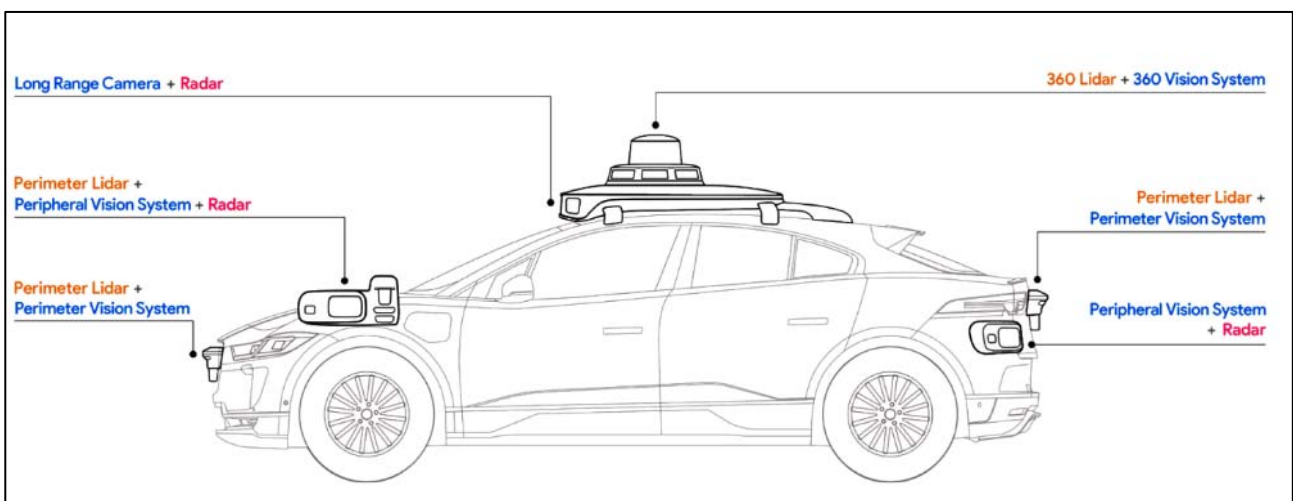
grunnlag av egne systemobservasjoner og egne systembeslutninger, koordinert med algoritmer. Kjøretøy av denne typen er utstyrt med så mye maskinvare og programvare at de ofte kalles datamaskiner på hjul, men fortsatt med et menneske i kontroll-loopen. Dette faktum har vidtrekkende konsekvenser for førere, andre trafikanter og infrastrukturen. Det innebærer en grunnleggende endring i bilens karakter: en transformasjon som for enhver innovasjon ikke bare gir fremgang, men også nye sikkerhetsutfordringer.

Ytterligere automatisering av kjøree oppgaven forventes å gi en rekke positive effekter som optimalisert trafikkavvikling, redusert drivstofforbruk, økt mobilitet for eldre og ikke minst økt trafikksikkerhet ved å redusere førerfeil (Pink et.al., 2015). Kritikere av høyt automatiserte kjøretøy hevder imidlertid at slike kjøretøy vil forårsake nye typer ulykker på grunn av feil ved teknologien, feil ved programvaren som tolker trafikkbildet rundt det automatiserte kjøretøyet og på grunn av ulykker tilknyttet samhandling med andre trafikanter (Dixit, et al., 2016; Moyer, 2017).

Bedrifter som jobber med utvikling av automatiserte kjøretøy kan ikke bare teste teknologien sin på enhver offentlig vei. Gitt at de nasjonale lovene og forskriftene som tillater test av selvkjørende kjøretøy er på plass, må lokale myndigheter godkjenne piloter før automatiserte kjøretøy får operere på vegger og gater. Unntaket er Tesla, Daimler, Cadillac og andre selskaper som tester betaversjoner av halvautomatiserte kjøretøy på SAE nivå 2-3 (SAE 2018) uten behov for formell tillatelse som høyt automatiserte kjøretøy er underlagt. I henhold til lov i California skal alle selskaper som benytter automatiserte kjøretøy levere årlige egenrapporter om hendelser. Dette er grunnen til at Uber og mange andre selskaper har flyttet testing av sine selvkjørende drosjer til Arizona og andre stater som har en mer liberal holdning (ingen regulering og rapportering).

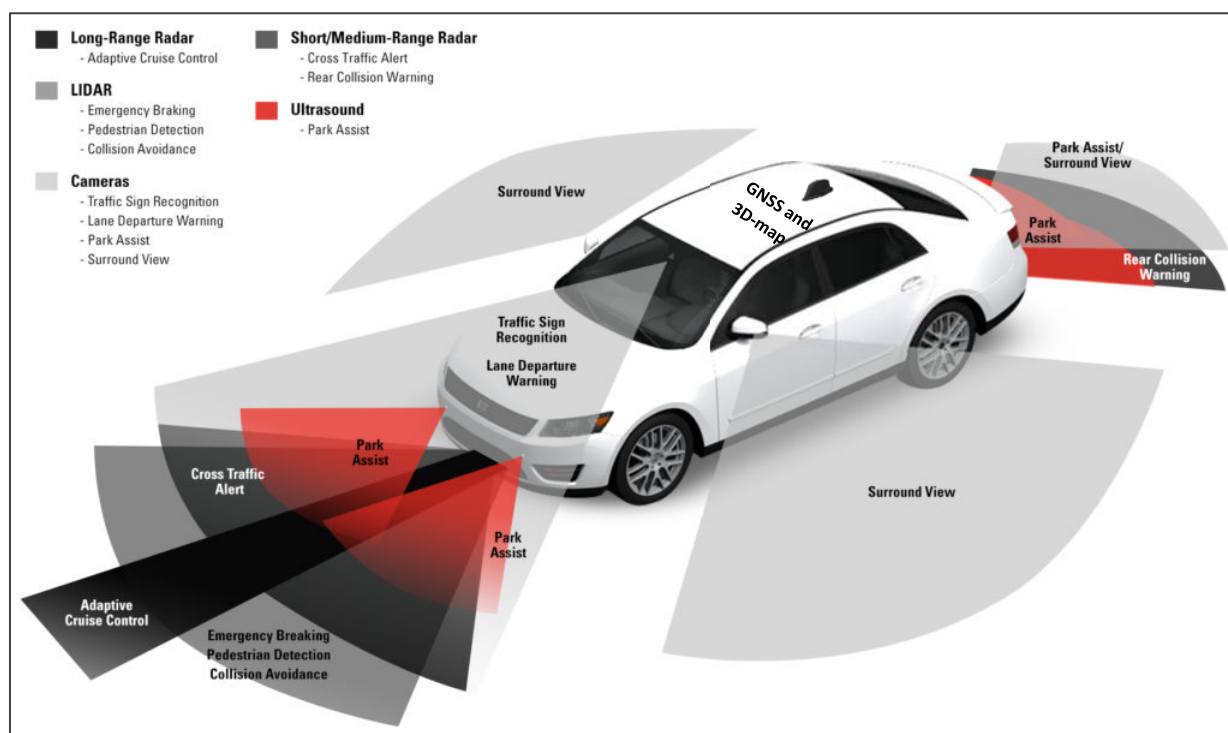
Google-Waymo Cars har operert i USA (ubemannet, men med en sikkerhets-sjåfør i bilen som kan ta kontroll) og har pr. 2019 kjørt 2.208.199 km med en ulykkesfrekvens på 1,36 politi anmeldte hendelser pr. millioner km. Det vil si en ulykkesfrekvens på 1/3 av tilsvarende bemannet biltrafikk. Det er registret nye typer ulykker som skyldes sensorfeil, mangelfull programvare og aggresjon mot autonome kjøretøy fordi de sinker normal trafikk (Teoh et al. 2017). Overtagelsestiden for den menneskelige sjåføren varierer fra 2 til 26 sekunder (Eriksson et al. 2017).

Google-Waymo sine kjøretøy har et meget avansert sett av sensorer, jfr. *Figur 6*.



Figur 6. Femte generasjon sensorsystemer fra Waymo. Kilde Waymo (2020).

I tillegg til Lidar-er og Radar-er som vist i *Figur 7*, så benytter utviklere av AV-er ofte ultralydsensorer for deteksjon av objekter nær kjøretøyet samt GNSS (inkludert GPS) og 3D kart for nøyaktig posisjonering, se *Figur 7*. GNSS er global dekning av satellittbasert geo-lokalisering som inkluderer tjenester fra GPS, GLONASS, Galileo, Beidou. Treghetsnavigasjon og odometer brukes i tillegg av en rekke leverandører for å øke nøyaktighet i posisjonering.



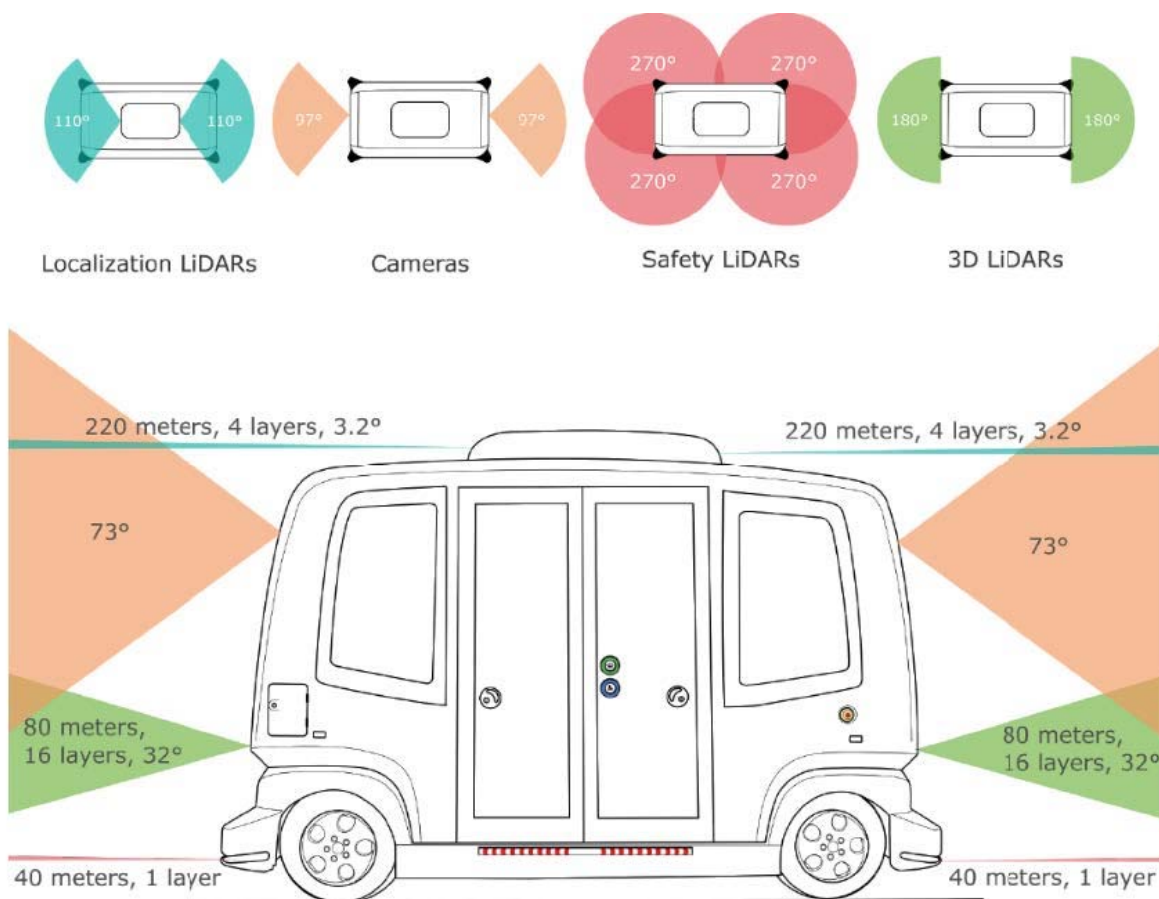
Figur 7. Teknologier og sensorer som inngår i høyt automatiserte kjøretøy. Illustrasjon: Robotics and Automation (2017). Modifisert av SINTEF (2020).

Selvkjørende kjøretøy innenfor privatbilsegmentet designes for å håndtere alle uventede situasjoner og hindringer. Sensorikk og programvare til automatiserte kjøretøy fra leverandører som Google-Waymo og GM Cruise er ledende innen utvikling av selvkjørende personbiler og *robo-taxies*. De er informert om hvordan de skal håndtere en rekke trafikksituasjoner basert på erfaring fra virkelig trafikk, samt forberedt til å håndtere nye situasjoner.

Vi har ingen fullgod dokumentasjon på sensorene og hva de bruker av sensorinformasjon på selvkjørende minibussene brukt i de norske pilotprosjektene. Dette fordi det er snakk om serieproduserte prototyper som kan ha ulik modenhet, der de har kompensert for mangler ved sikkerhetskritiske funksjoner ved å ha en sikkerhetsvert om bord. Det er slik sett serieproduserte prototyper og ulike versjoner av prototyper. Prototypene er i varierende grad supplert med sensorer fra andre leverandører.

Typiske sensorkomponenter i selvkjørende elektriske minibusser er vist i *Figur 8*. Det er høyt plasserte kamera i front og bak på minibussen. Ulike Lidar sensorer som dekker hele området rundt kjøretøyet, er plassert i ulike høyder rundt om på kjøretøyet. Hjulsensorer på hvert hjul angir nøyaktig utkjørt distanse (odometer), og hjelper satellitt navigasjonssystemet (GNSS) når det er dårlig dekning, for eksempel i

nærheten av høye bygg. Data fra alle sensorene sendes til en eller flere datamaskiner som sørger for at bussen kan operere sikkert i relativt komplekse trafikforhold.



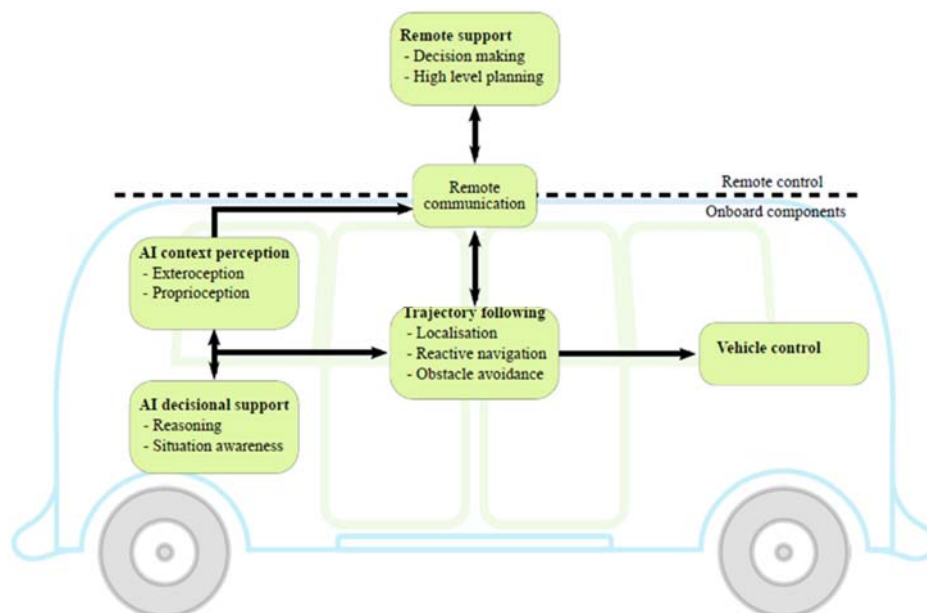
Figur 8. Typiske sensorer i selvkjørende elektriske minibusser (University of Denver 2019).

De selvkjørende kjøretøyene må hele tiden tolke input fra sensorer for å forstå omgivelsen og hvor de er i vegsystemet.

Figur 9 beskriver de viktigste komponentene som er nødvendig for sikker ferdsel med selvkjørende minibusser. Komponentene kan inkludere kunstig intelligens (AI) for persepsjon og beslutningstøtte. Etter det vi kjenner til er det trent AI modeller som lastes ned på kjøretøy, disse er deterministiske i forhold til det de er trent for og kan feile om det ikke er trent for den trafikksituasjonen de settes i. Sensor input må bli riktig tolket i den spesifikke konteksten for at riktige beslutninger kan tas. Slik tolkning av sensordata er brukt til å følge en predefinert rute, oppdage hindringer og reaktiv styring basert på avvik fra rute eller å kjøre rundt en hindring. Det krever også komponenter for bestemmelse av lokalisering og estimering av nåværende posisjon til kjøretøyet på vegen. På et grunnleggende nivå innebærer det også komponenter for kontroll av akselerasjon og styring. Selv om en arbeidsstasjon for fjernstyring på strategisk nivå av ruteplanlegging og beslutningstøtte bør være tilgjengelig, så bør det meste av automatiseringen skje basert på sensorer og kontrollkomponenter om bord i kjøretøyet.

For piloter med et lite antall kjøretøy er det overkommelig å fjernstyre alle kjøretøy, men etter hvert som antall kjøretøy og ruter (linjer) øker, krever det en mer avansert kontrollsentral for å sikre stabil, effektiv og sikker trafikkavvikling med selvkjørende minibusser. Fjernstyrte funksjoner kan inkludere skybasert

programmering, og støtte i form av kunstig intelligens (AI) som gitt tilgang til store databaser for tolkning og klassifisering av sensor input og bilder fra kamera på bussen (Ainsalu et al. 2018).



Figur 9. System for situasjonsforståelse i en høyt automatisert minibuss. (Ainsalu et al 2018)

De automatiserte minibussene har pr dato ikke like stor erfaringsdatabase og evne til å håndtere nye situasjoner som eksempelvis Google-Waymo, men kompenserer for det med å lære seg en rute/linje svært godt. Eksempelvis trenger de ikke lære seg av- og påkjøring til motorveg hvis det ikke er en situasjon de vil møte på den ruten de daglig kjører. Mange av disse kjøretøyene klarer imidlertid ikke å kjøre rundt et hinder eller passere før hinderet i deres forhåndsdefinerte spor/linje er flyttet eller blitt fjernet. Det kan imidlertid utføres fjernstyrt fra en kontrollsentral. Vi må huske at SW i disse kjøretøyene ennå ikke er selvlærende. En kjøretøysleverandør må ha konfigurasjonskontroll på systemet, men kan samle inn data til offline trening av modeller som kommer i neste SW-versjon.

I det følgende kapittelet gjøres det rede for karakteristika og sikkerhetsmessige erfaringer fra fem norske pilotprosjekt med selvkjørende minibusser.

3 SmartFeeder: Fem storskala pilotprosjekter i blandet trafikk på offentlig veg

3.1 Om pilotprosjektene i Norge

Den norske loven om utprøving av selvkjørende kjøretøy trådte i kraft januar 2018 og siden da har det vært fem storskala pilotprosjekter i blandet trafikk på offentlig veg i et bredt spekter av veg og gatemiljø (*Figur 10*). Det er testet selvkjørende minibusser på SAE nivå 4 i Stavanger, Kongsberg, Gjøvik, Fornebu og Oslo. Norge er et av landene som er best tilrettelagt for automatiserte kjøretøy ifølge en rapport fra rådgivningsselskaper (KPMG, 2019). Lovgivningen, en høy andel elbiler, et godt teknologimiljø og flere pilotprosjekter trekkes fram som noen av grunnene.



Figur 10. Pilotprosjekt som samarbeider om kunnskapsbygging med SmartFeeder prosjektet

De automatiserte minibussene kjører med opptil seks passasjerer og har en operatør om bord for å overvåke og overta kontrollen om nødvendig (gjelder i testfasen). Bussene kjører med en hastighet på inntil 15 km/t. Disse pilotene benytter en fast kjørerute (fixed route autonomy). De følger en rute med predefinerte veipunkter og behandler en begrenset mengde sensordata langs ruten. Selv om alle pilotene er innrettet som en tilbringertjeneste til det øvrige kollektivtransportsystemet (first/last-mile-tjeneste) har de hatt noe ulikt fokus med hensyn til vektlegging av teknologiutprøving, brukerksept og forretningsutvikling. *Tabell 1* viser en oppsummering av de 5 pilotene i SmartFeeder.

Tabell 1. De 5 pilotene i SmartFeeder. Status per november 2019.

Pilot	Type buss	Periode	Antall passasjerer	Eksponering (kj. km)	Politi-rapp. Ulykke	Forsikringsulykker	Lengde på rute (km)	Annet
Forus	EasyMile EZ10 1. gen	Jun-des 2018	6 000	5 000	0	0	1,2	
Fornebu	EasyMile EZ10 2. gen	Jun-aug 2018	10 000	3 440	0	1	1	Motparten hadde skyld
Gjøvik	EasyMile EZ10 2. gen	Jul-sep 2018	449	161	0	0	0,8	Ringrute
Kongsberg	EasyMile EZ10 2. gen	Fra okt 2018	2 093	4 072	0	0	2,5	
Akershusstranda i Oslo	Navya Arma	Fra mai 2019	22 000	9 310	0	0	1	

*) Lengde på rute er fra endeholdeplass til endeholdeplass

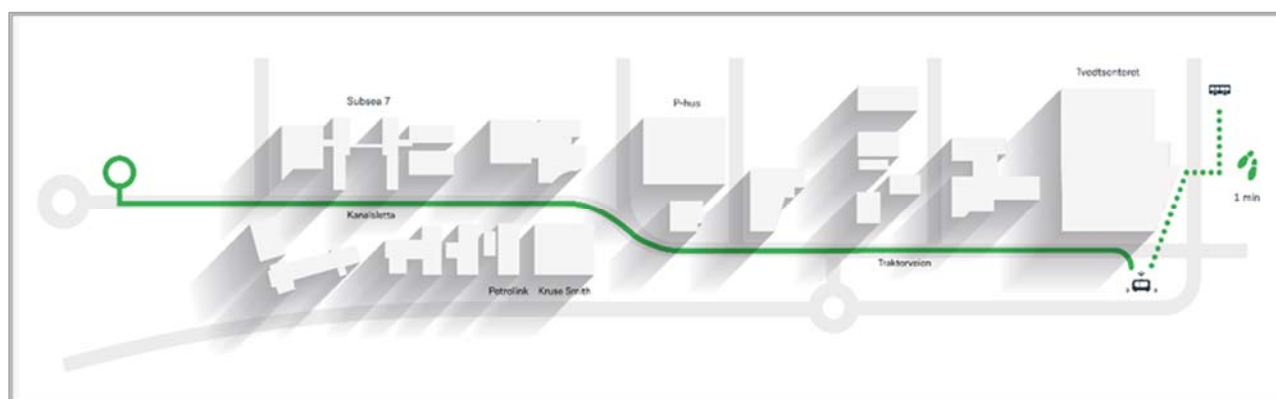
I de følgende underkapitlene følger en beskrivelse av de fem pilotene.

3.1.1 Forus

På Forus i Stavanger var kollektivselskapet Kolombus først ut med å prøve automatisert buss på offentlig vei. Det ble benyttet en selvkjørende minibuss fra EasyMile EZ10 (1. generasjon). Dette er den første norske storskala piloten med automatisert minibuss i blandet trafikk. Piloten kobler arbeidsplasser til kollektivtilbudet og var operativ i perioden juni – desember 2018. Den trafikerte en linje på 1,2 km i Forus næringspark, i et område med ca. 3.500 antatte. Totalt ble det kjørt 5.000 km med 6.000 passasjerer.



Figur 11. Norges første automatiserte buss på Forus



Figur 12. Strekningen på Forus (kilde: Forus PRT)

3.1.2 Fornebu

På Fornebu opererte to busser av typen EasyMile EZ10 (2. generasjon) som fraktet badegjester langs en strekning på 1 km fra Fornebu senter ned til badeplassen. Tjenesten ble kalt for "Badebussen". Bussene tilbakela totalt 3.440 km og fraktet ca. 10.000 passasjerer. Maksimal hastighet var 12 kilometer i timen. I en oppsummering av Ruter rapporterte vertene som satt i bussene at de møtte «trafikkfarlige» situasjoner daglig, men det dreide seg i hovedsak om forbijøringer utført av andre bilister, forklarte Ruter i etterkant.



Figur 13. Buss på Fornebu



Figur 14. Strekningen på Fornebu

3.1.3 Gjøvik

Gjøvik-piloten med EasyMile EZ10 (2. generasjon, se Figur 15) var i sentrum av byen. Her har erfaringene vært blandet, særlig på grunn av tekniske utfordringer. Bussene slet særlig med bakker og drivverket (differensialen) røk tre ganger i testperioden som varte i to måneder fra juli - september 2018. De tekniske utfordringene resulterte i kun 18 dager med drift. Det ble totalt kjørt 161 km med 449 passasjerer. Negativ omtale i lokalpressen bidro trolig også til lave passasjertall.



Figur 15. Bussen på Gjøvik



Figur 16. Rute i Gjøvik

3.1.4 Kongsberg

På Kongsberg har to selvkjørende busser av typen EasyMile EZ10 (2. generasjon) blitt testet ut i tre faser, se *Figur 17*. Bussene betjener en strekning mellom jernbanestasjonen, sentrum, USN og Teknologiparken, - en rute på 2,5 km fra ende til ende, som utgjør en strekning på 4,4 km når man regner tur og retur, da retur går gjennom Gågata. Kort beskrivelse av de tre fasene:

- 900m runde på Nymoen (sentrum) fra Knutepunktet. Oppstart 13.okt 2018 (pilot)
 - 2km runde fra Knutepunktet rundt Kongsberg Rådhus. Oppstart 3.des 2018. (pilot)
 - 4,4km runde fra Knutepunktet til Teknologiparken. Oppstart 23.april 2019. (rutekjøring 450)
-
- Fase 1 "Pilot": oktober 2018 – 22. april 2019,
 - Fase 2, Brakar linje 450: fra 23. april 2019

Det ble det totalt kjørt 4.072 km (data per november 2019), med 3016 passasjerer (data per november 2019). Dette er første storskala pilot med automatisert vinterkjøring, og blant de mest komplekse pilotene med automatisert kjøretøy i ordinær bussrute i verdensammenheng. Brukertilfredsheten er høy.



Figur 17. Buss på Kongsberg, Brakar Linje 450



Figur 18. Komplette bilder av rutene på Kongsberg

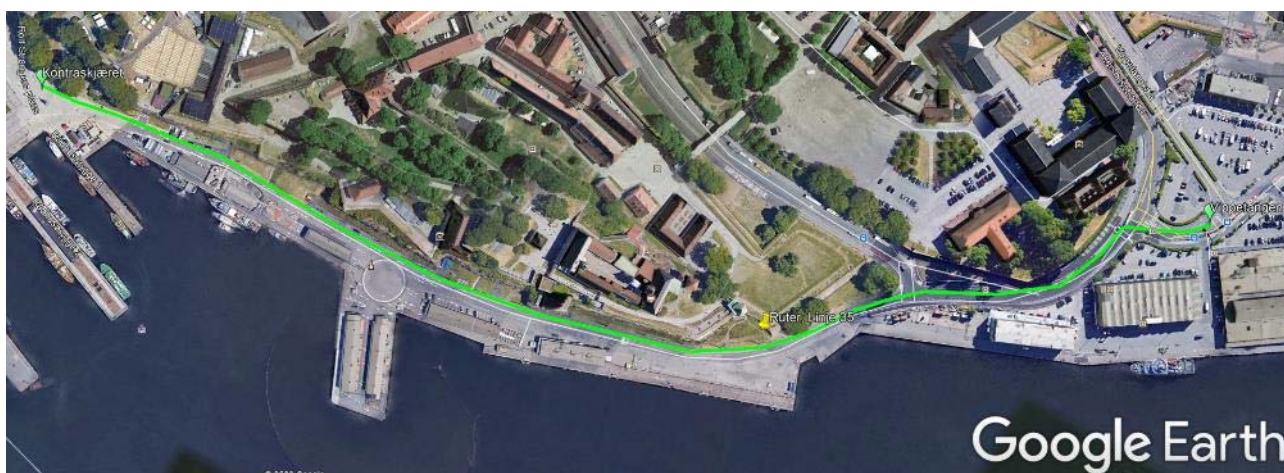
3.1.5 Ruter, Oslo

Ruter er i ferd med å etablere en flåte med selvkjørende minibusser av type Navya Arma som del av kollektivtilbudet i Oslo, se *Figur 19*. Etableringen har skjedd i to deler:

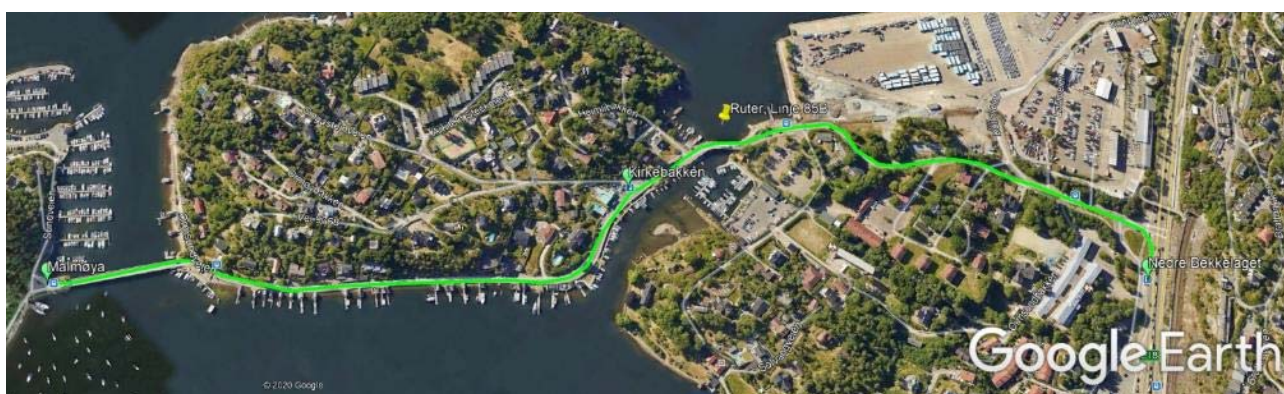
- Del 1: fra mai 2019, to busser på linje 35 Akershusstranda (Kontraskjæret - Vippetangen) 9.300 utkjørte km med 22.000 passasjerer pr desember 2019
- Del 2, fra desember 2019, tre busser på rute 85B Ormøya (Malmøya - Mosseveien)



Figur 19. Buss brukt av Ruter i Oslo



Figur 20. Ruter-piloten del 1 (Akershusstranda), Linje 35



Figur 21. Ruter-piloten del 2, Linje 85B

3.2 Data fra pilotene

I SmartFeeder er det samlet inn data fra alle de fem pilotene. Totalt har de selvkjørende minibussene i pilotene kjørt nesten 22.000 km, med omtrent 40.500 passasjerer i både sommer- og vinterforhold. For å få tilgang til data fra de selvkjørende bussene ble det tidlig i prosjektet laget en skriftlig fortrolighetsavtale med EasyMile i Frankrike. Dette fordi dette ansees som sensitive data fra produsentens ståsted. Ruter-piloten kom i gang for sent til at det ble mulig å gjøre omfattende datainnsamling innenfor rammene av prosjektet. En forutsetning for at datafangst skulle være mulig var også at kjøretøyet som ble benyttet var av typen EasyMile EZ10 2. generasjon. Kun disse hadde mulighet for å eksportere data for analyse. Detaljerte data fra de selvkjørende bussene ble derfor kun samlet inn fra tre av pilotene; Fornebu, Kongsberg og Gjøvik. Data fra Forus var ikke tilgjengelig på digital form fordi de benyttet EasyMile EZ10 1. generasjon som ikke støttet dette. Totalt ble det samlet inn 9 135 688 GPS-datapunkter fra kjøretøyene på Fornebu, Kongsberg og Gjøvik og som ble sendt til SINTEF for analyse. Oversikt over datasettet er vist i Tabell 2.

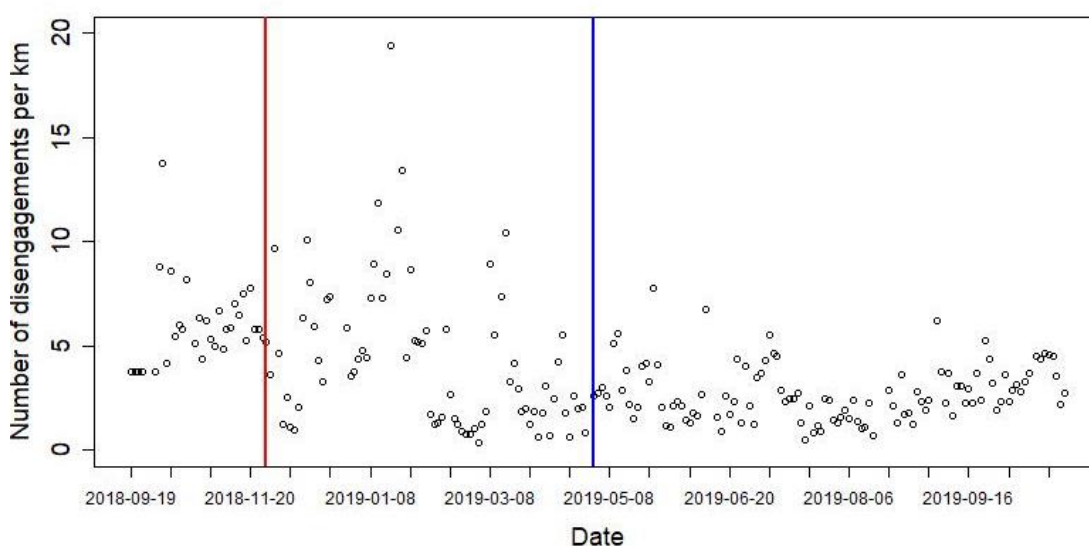
Tabell 2. Oversikt over datasettet i SmartFeeder

	Kongsberg	Gjøvik	Fornebu
Dato fra	19.09.2018	26.07.2018	15.06.2018
Dato til	18.10.2019	10.09.2018	02.09.2018
Dager med data	235 av 395	12 av 51	116 av 120

Datapunkter (totalt)	5 213 259	199 430	3 722 999
Antall turer	10 693	510	3 963

3.3 Kjøring i automatisert modus

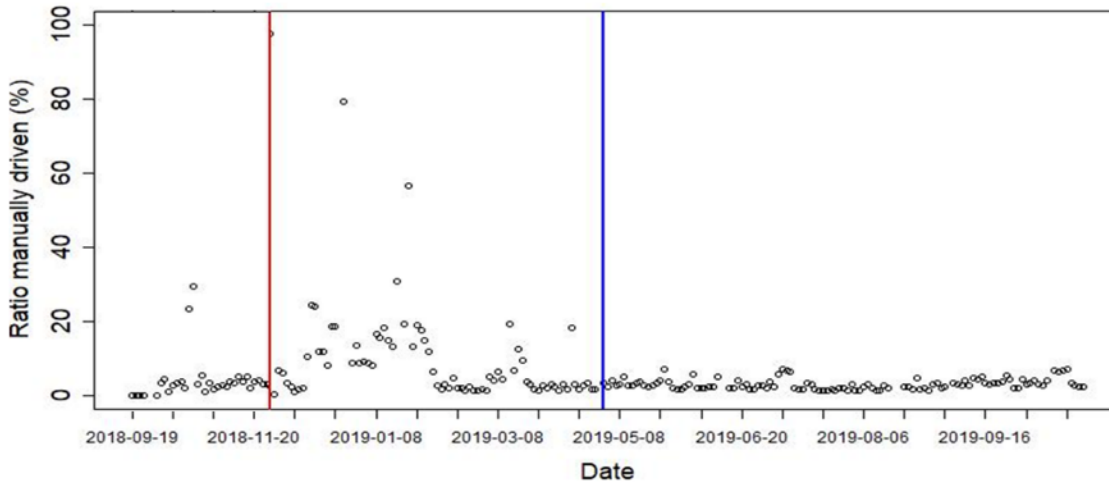
Målet med alle pilotene var å teste bussene i automatisert modus. Det var likevel av og til nødvendig å kjøre bussen manuelt med bruk av joystick. Den vanligste årsaken til dette var når bussen skulle kjøres til og fra parkeringsplassen der den stod lagret når den ikke var i bruk. Av og til var det også nødvendig å kjøre buss manuelt når den kjørte i rute. Figur 22 viser antall ganger operatøren valgte manuell modus (manuell overstyring) på Kongsberg. Den røde og blå vertikale linjen viser de ulike fasene i piloten. Til venstre for den røde linje var innkjøringsdelen av fase 1. Her ser man at det var betydelig flere ganger valgt manuell overstyring enn for tilsvarende periode senere i utprøvingen (Fase 2). Mellom den røde og den blå var det i tillegg vinter, noe som resulterte i flere ganger valg av manuell modus. Til høyre for den blå var etter at Brakar kjørte i gang linje 450 i fase 2. I fase 2 er det ca. 3 manuelle overstyringer per km mot ca. 6 i fase 1.



Figur 22. Antall ganger per km operatøren valgte manuell modus, Kongsberg

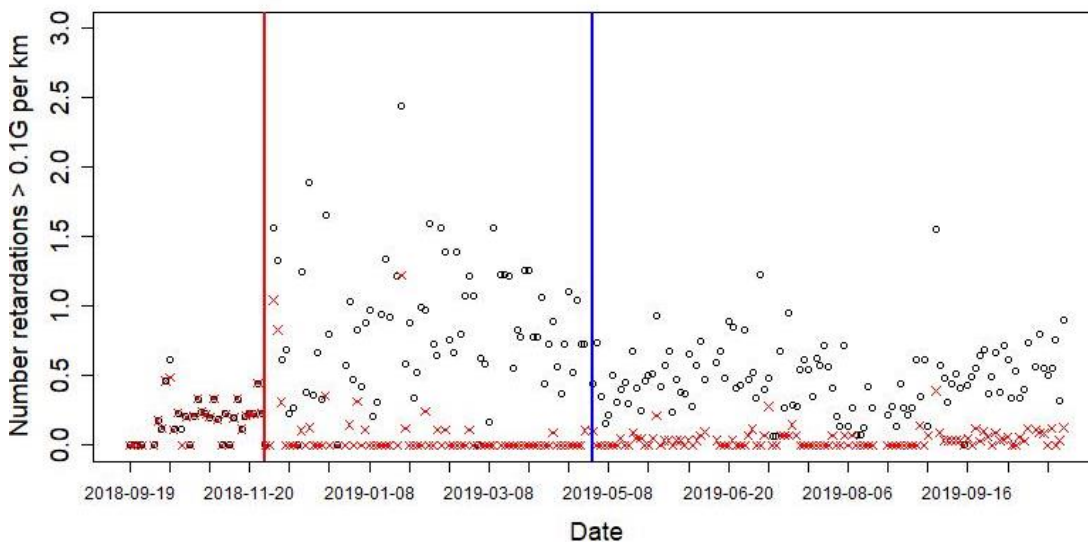
Figur 23 viser en oversikt over %-vis av tiden der bussen ble kjørt manuelt på Kongsberg. Mellom den røde og den blå var det som tidligere nevnt vinter, noe som resulterte i flere km kjørt i manuell modus. I fase 2 (til høyre for blå strek på figuren) ble kjøretøyet kjørt manuelt i overkant av 3% av utkjørt distanse. Kjøretøyene

ble kjørt ca. like langt i manuell modus i starten av uttestingen som mot slutten, med unntak av noen dager i starten av uttestingen der det ble kjørt lengere i manuell modus.

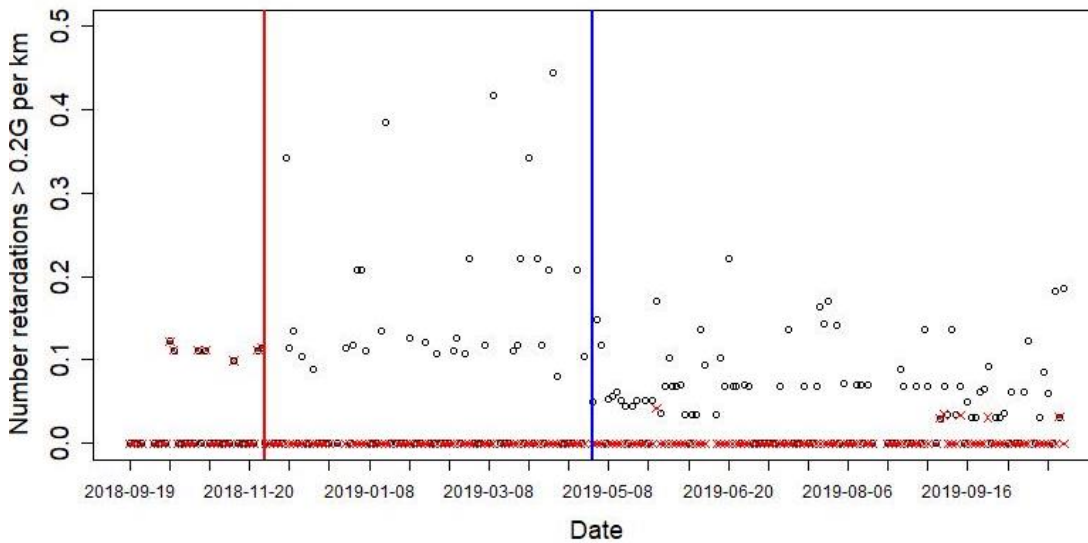


Figur 23. %-vis utkjørt distanse der bussene ble kjørt manuelt på Kongsberg

Figur 24 og Figur 25 vise antall oppbremsinger per km, med henholdsvis 0,1 G og 0,2 G retardasjon. 0,2 G ansees som en kraftig oppbremsing, mens 0,1 G er en moderat oppbremsing. Røde kryss på figurene er bråbrems i manuell modus. Figurene viser at det ble bremsset betydelig mer i manuell modus i tidlig fase av uttestingen. Perioden mellom rød og blå strek viser vinterperioden, og her var det betydelig flere oppbremsinger, primært i automatisk modus, men også enkelte dager i manuell modus.



Figur 24. Antall oppbremsinger over 0,1 G per km. Rødt kryss er bremsing i manuell modus



Figur 25. Antall oppbremsinger over 0,2 G per km. Rødt kryss er bremsing i manuell modus

3.4 Hendelser knyttet til trafiksikkerhet

De selvkjørende bussene logger ulike typer hendelser. Dette kan være alt fra at en sensor detekterer noe som gjør at bussen for eksempel stanser, eller at operatøren trykker en stoppknapp. De ulike produsentene har ulik definisjon på hendelser. Nedenfor følger en oversikt over hendelser som registreres i EasyMile EZ10 og i Navya Arma.

3.4.1 EasyMile EZ10

Tabell 3 gir en oversikt over ulike typer hendelser som registreres i EasyMile EZ10.

Tabell 3. Ulike typer hendelser som ble analysert

Hendelse type	Forklaring
obstacle emergency stop	Lidar detekterer noe
button emergency stop	Rød stoppknapp på veggen. Brukes også når man forlater kjøretøyet
soft stop	Bremseknapp på operatørskjerm (for annen trafikk)
manual switch	Fysisk bryter autonom/manuell kjøring

Tabell 4, Tabell 5 og Tabell 6 gir en oppsummering av hendelsene på henholdsvis Forus, Fornebu og Kongsberg. Tabellene viser at antall hendelser er ulikt fordelt på de ulike pilotene. Dette skyldes primært ulik kompleksitet i trafikkforholdene som bussene kjørte i. Kongsberg-piloten hadde høyest kompleksitet og kjørte i tillegg også på vinterføre. Fornebu-piloten hadde lavest kompleksitet.

Tabell 4. Hendelser registrert på Forus

Hendelse type	Antall	Antall per km	km per hendelse
obstacle emergency stop	199	0,040	25,1
button emergency stop	8	0,002	625,0
soft stop	378	0,076	13,2
manual switch	104	0,021	48,1
Totalt	689	0,138	7,3

Tabell 5. Hendelser registrert på Fornebu

Hendelse type	Antall	Antall per km	km per hendelse
obstacle emergency stop	77	0,022	44,7
button emergency stop	58	0,017	59,3
soft stop	84	0,024	41,0
manual switch	34	0,010	101,2
Totalt	253	0,074	13,6

Tabell 6. Hendelser registrert på Kongsberg

Hendelse type	Antall	Antall per km	km per hendelse
Obstacle emergency stop	97	0,024	42,0
button emergency stop	47	0,012	86,6
soft stop ¹⁾	2529	0,621	1,6
manual switch	1993	0,489	2,0
Totalt	4666	1,146	0,9

¹⁾ Inkludert vikeplikt (Yield) i kryss

3.4.2 Navya Arma

Navya Arma registrerer hendelser på en annen måte enn EasyMile. Tabell 7 viser antall bråbrems uten at man vet om oppbremsingen skyldes at en sensor har registrert noe, eller om det er operatøren som har trykket på stoppknappen. I alle tilfelle kan man se på dette som en "emergency stop". Tabell 8 gir en oversikt over henholdsvis hendelsestype og antall hendelser som registreres manuelt av operatøren. "Switched to manual mode" betyr at operatøren overtar bussen manuelt.

Tabell 7. Antall bråbrems registrert i Oslo

Hendelse	Antall	Antall per km	km per hendelse
Severe braking	1442	0,155	6,5

Tabell 8. "Operator-reported issues", manuelle registreringer, Oslo

Hendelse	Antall	Antall per km	km per hendelse
Intentional disturbance	828	0,089	11,2
Switched to manual mode	634	0,068	14,7

Parking on road	317	0,034	29,4
Risky overtaking	285	0,031	32,7
Shuttle was reset	95	0,010	98,0
Other infrastructure	39	0,004	238,7
Potential collision	33	0,004	282,1
Passenger fall	15	0,002	620,7
Totalt	2246	0,241	4,1

3.4.3 Hendelsene oppsummert

Tabellene nedenfor gir en oversikt over hendelser på fire av de fem pilotene. Merk at EasyMile og Navya har forskjellige navn på hendelsene.

Merk! Observerte forskjeller skyldes at det er veldig forskjellige piloter. Fornebu er den enkleste, Kongsberg den mest komplekse, som inkluderer vinter. Om man har flere nødstopper ett sted enn et annet, så er det naturlig pga. flere "konflikter" uten at det nødvendigvis er trafikkfarlig. Vi vet heller ikke om dette var en "demo"-tur der noen framprovoserte hendelser for å vise at bussene stopper for alle fotgjengere og syklistene. På Kongsberg er vikeplikt i kryss (Yield) inkludert i "Soft stop". Her måtte operatøren assistere kjøretøyet manuelt.

Hendelser generelt oppstod for hver 13,6 km opp til en per 0,9 km, se *Tabell 9*. Fra et teknologiperspektiv er den mest alvorlige typen hendelser "Emergency stop" og "Severe braking", se *Tabell 10*. Her gjorde hindringer som ble oppdaget av sensorene at bussen stoppet brått, altså en nødstopper. Dette skjedde mellom hver 28,3 km helt opp til en for hver 6,5 km (for Navya), se *Tabell 10*. Navyas "Severe braking" kan også inkludere manuell "nødstopper", det kan forklare en høyere verdi. Manuell "nødstopper" kan benyttes ved manuell parkering av kjøretøyet. Dataene fra pilottesting viser også at operatøren overtar kjøretøyet manuelt for hver 2 til 100 km, se *Tabell 11*.

Tabell 9. Alle hendelser oppsummert på 4 av 5 piloter

Pilot	Hendelse type	Antall	Kjørte km	Antall per km	km per hendelse
Forus	Alle	689	5 000	0,138	7,3
Fornebu	Alle	253	3 440	0,074	13,6
Kongsberg	Alle	4 666	4 072	1,146	0,9
Ruter	Alle	1 976	9 310	0,212	4,7

Tabell 10. Nødstopper oppsummert på 4 av 5 piloter

Pilot	Hendelse type	Antall	Kjørte km	Antall per km	km per hendelse
Forus	Emergency stop	207	5 000	0,041	24,2
Fornebu	Emergency stop	135	3 440	0,039	25,5

Kongsberg	Emergency stop	144	4 072	0,035	28,3
Ruter	Severe braking	1 442	9 310	0,155	6,5

Tabell 11. Manuelle overtakinger på 4 av de 5 pilotene

Pilot	Hendelse type	Antall	Kjørte km	Antall per km	km per hendelse
Forus	Manual switch	104	5 000	0,021	48,1
Fornebu	Manual switch	34	3 440	0,010	101,2
Kongsberg	Manual switch	1 993	4 072	0,489	2,0
Ruter	Manual switch	534	9 310	0,057	17,4

3.5 Erfaringer og utfordringer

Pilotene ble pålagt å rapportere hendelser og ulykker. Ingen personer ble skadet, og bare mindre tekniske problemer og funksjonsfeil er rapportert. Funn fra pilotene avdekket følgende utfordringer:

- Snø, kraftig nedbør og tåke er utfordrende for sensorene
- Vegetasjon langs ruten til bussen er utfordrende for sensorene
- Lyktestolper og trær nær veg kan føre til at brøytekanter kommer inn på vegen og forstyrrer sensorene
- Bussene kjører i nøyaktig samme "spor", og slitasken på veien er betydelig langs bussenes spor
- Syklister som kjører nær bussen gjør at bussene stopper brått
- På ujevne veier er komforten dårligere sammenlignet med vanlige busser

Flere av disse problemene er relatert til den forhåndsdefinerte sikkerhetssonen som omgir den selvkjørende bussen, noe som fører til bråstopp når sikkerhetssonen krenkes. Det var på forhånd knyttet stor spenning til hvordan vintervær, føreforhold og ekstremvær ville påvirke stabil drift og sikkerhet. Kongsbergpiloten hadde utfordringer med høye brøytekanter. Brøytekanter og nedfall av snøklumper førte i noen tilfeller til stans. Brøytekanter kom også inn på vegen pga. at ploegen måtte kjøre rundt hindringer som trær og lyktestolper i vegkanten. Det gjorde også tverrgående brøytekanter etter brøytebil i kryss når brøytebilen nettopp har kjørt gjennom krysset. I slike tilfeller gikk operatør ut og ryddet linjen med spade. Den predefinerte linjen bussen følger har et område på 30cm til hver side som er definert som stoppsone. Alle objekter som kommer innenfor denne stoppsonen, fører til bussen foretar en full stopp. Mellom 30 cm og 60 cm til hver side er definert som bremsesone. Objekter som kommer innenfor denne sonen fører til at bussen kjører veldig sakte. Brøytekanter påvirker oppkjørt linje, spesielt der det er trær og lyktestolper i vegkanten. Snø innenfor bremsesone og stoppsone påvirker bussens fremdrift slik som beskrevet. I slike tilfeller må operatøren manuelt styre bussen inntil det er mulig å følge den predefinerte linjen igjen. Manuell overtakelse av kontroll skjer i slike tilfeller der brøytekanter forstyrrer, om kjøretøy er feilparkert i den predefinerte linjen til bussen, eller om det er andre uventede hindringer.

Stavanger er kjent for mye vind. Foruspiloten erfarte driftsperioder med sideveis regn og kombinasjon av regn og sterk vind skapte problemer for sensor systemene, med midlertidig bortfall av sensordata og dermed midlertidig stans. Bussene er programmert til å gå til en sikker tilstand (fallback) ved vesentlig bortfall av sensor input. Sikker tilstand er definert som full stans.

Ved søknad om testing/pilotering ble det foretatt en obligatorisk risikovurdering av tilretteleggerne. De viktigste risikofaktorene som ble oppført var knyttet til personskade som følge av et brått stopp der passasjerer inne i bussen er uforberedt og kan bli skadet av å falle. Risikoreduserende tiltak som å senke hastigheten, begrense antall passasjerer, installere (påby) sikkerhetsbelter, flere skilt og justeringer i vegmiljøet ved å fjerne hindringer og vegetasjon ble identifisert.

I tillegg til funnene listet opp ovenfor er det sikkerhetsutfordringer som kan løses ved at de høyt automatiserte bussene kommuniserer kjøretøyets intensjon, til syklistene, fotgjengere og andre trafikanter i umiddelbar nærhet. Slik teknologien fungerer i dag er det behov for å rydde områder der bussene opererer, for eksempel ved å fjerne gateparkering og rydde vegens sideområder for trær og stolper nær vegkant.

Andre erfaringer knyttet direkte eller indirekte til sikkerhet er at alle bussene er avhengig av god internett-tilkobling for å kunne kjøre automatisert. Det betyr at det kan oppstå stans pga. manglende internett-tilkobling. I slike tilfeller vil kjøretøyet fortsette frem til nærmeste stoppunkt som kan være en holdeplass eller en annen sikker plass og stoppe. Dette kan komme overraskende på vanlige trafikanter. På EZ10ene så utfører kjøretøyet en bestemt kjøreoppgave før den stopper hvis internett faller ut eller blir dårlig, så nødstopp blir det ikke. Stoppene kan legges der det er holdeplasser eller andre steder der det ikke er til stor hinder for trafikken. EZ10 venter da på ny kjøreoppgave fra kontrollsentret før det kjører videre, altså får internett igjen.

Intervjuer med operatører på Fornebu tyder på at de har ulik terskel for når de griper inn manuelt. En operatør synes hastigheten til bussen var for høy i forkant av en fotgjengerovergang og valgte av og til å bremse ned hastigheten manuelt for å vise hensyn. Likeledes ved kjøring i kryss og inn på veg, så valgte operatøren en "mykere" tilnærming i møte med kryssende trafikk. Slik ulik tolkning av trafikkbildet gir også utslag på datagrunnlaget for manuell oppbremsing og inngripen.

Syklister som passerer nær bussen gir bråstopp. Værforhold og forhold knyttet til infrastrukturen kan gi utfordringer for bussens sensorer, les mer om dette i kap. 3.6. Likevel har for eksempel piloten på Kongsberg hatt overaskende bra regularitet på vinterføre. Under piloten opererte de i lave hastigheter inntil 16 km/t.

3.6 Erfaring med infrastruktur

Alle de selvkjørende minibussene som ble benyttet i de norske pilotene er avhengig av en digital infrastruktur for å kunne operere. De selvkjørende minibussene måtte kobles opp mot en sentral dataservert både for å kunne starte og for å kunne fortsette å kjøre. Kommunikasjon skjedde via 4G på mobilnettet. Dersom kommunikasjonen ble avbrutt stanset bussen etter en stund. Ifølge leverandøren av selvkjørende minibusser er dette en sikkerhetsanordning.

Selvkjørende minibusser for persontransport kan ha problemer med høyde på plattform ved avstigning på busstopp. En løsning er å omprogrammere bussens heve/senke ordning slik at høyden bedre tilpasses busstoppens høyde. Det er imidlertid en mer langsiktig løsning at høyden på busstoppen har en standard høyde som alle produsentene av selvkjørende minibusser kan tilpasse sine kjøretøy for. Plassering av lyktestolper nær vegen gjør at bussens sensorer kan detektere dem som hindringer. Det samme gjelder trær som står nær vegen. Likeledes kan lyktestolper komme i vegen for snøbrøyting om vinteren, slik at brøytekanten kommer for mye inn på vegen. Brøytekanten kan dermed registreres som en hindring. Dette er også et problem i forbindelse med brøyting av fortau.

Løsningen er om mulig å plassere lyktestolpene lengere bort fra vegen og fortauet ved bygging av ny veg. Det samme gjelder beplantning. En løsning der dette er et problem er at bussens "spor" omprogrammeres om vinteren, slik at bussens sidevegs plassering flyttes nærmere midten på vegen, altså lengere til venstre sett i kjøreretningen, så lenge ikke dette medfører et nytt problem med møtende trafikk som kommer for nærme.

Snø, sterk nedbør og tåke gir utfordringer for bussens Lidar. Dette fører til alt fra ujevn kjørehastighet til eventuell full stopp. Dette kan løses med bruk av flere sensorer, blant annet kamera og radar.

Som nevnt innledningsvis er det relevant å følge utvikling og trafiksikkerhet innen selvkjørende kjøretøy for privat mobilitet. Hendelser og ulykker med automatiserte og såkalte autonome kjøretøy innen markedet for privat mobilitet er på noen områder kommet lengre enn innen kollektiv mobilitet og det kan gi en pekepinn på hvordan utviklingen kan bli for høyt automatiserte og selvkjørende minibusser, evt. hvilke feil som ikke bør gjentas. Målet for det private automatiserte bilsegmentet er å operere tryggere enn menneskelige sjåfører under virkelige forhold. Dette inkluderer å kunne håndtere alle slags hindringer og samhandling med andre trafikanter i alle slags vær- og trafikkforhold og i høy hastighet. Her må en huske på at strategien for automatisering av privatbilen (med unntak av Waymo) går gjennom førerassistanse på høyhastighetsbiler med fare for å bli sløv (SAE nivå 3), mens automatisering av kollektiv mobilitet bygger på systemer som er bygd uten ratt og pedaler og som derfor kjører sakte til systemet blir godt nok for SAE nivå 4 uten sikkerhetsoperatør om bord i kjøretøyet.

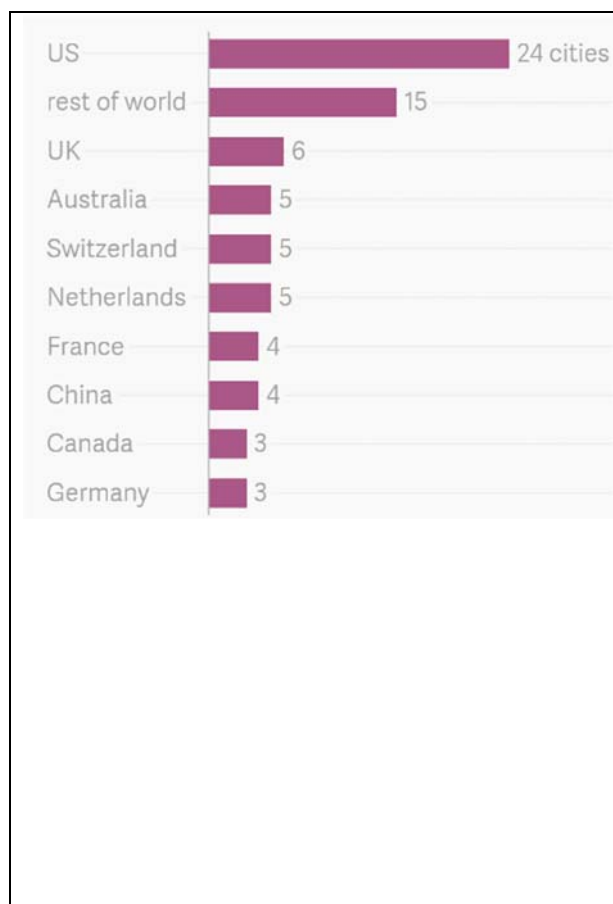
I de følgende delkapitlene redegjør vi for internasjonale erfaringer med automatiserte kjøretøy både innen personbilssegmentet og for det kollektive segmentet med søkelys på selvkjørende minibusser. Erfaringer er inndelt etter automatiseringsnivå, fra SAE nivå 2 til SAE nivå 4. For å gi antakelser om hvordan samspillet med myke trafikanter kan bli i et langtids perspektiv, ser vi nærmere på erfaringer med Robottraller (AGV) på SAE nivå 4 etter 14 års drift i sykehusmiljø.

4 Hendelser og ulykker med automatiserte kjøretøy internasjonalt

Skal vi kunne si noe om sikkerheten må vi vite noe om eksponering i trafikken. De siste 10 årene har autonome kjøretøy blitt testet ut mange steder både nasjonalt og internasjonalt. Hva er egentlig erfaringene?

Fra 2017 har det vært utprøving av automatiserte kjøretøy på offentlig veg verden over. Siden den gang er antallet byer der utprøving foregår blitt mer enn tredoblet og stadig flere byer og vegstrekninger for testing legges til (Bloomberg 2017). De siste årene er ulike automatiserte kjøretøy blitt testet i flere amerikanske delstater. Akkurat nå er det 65 selskaper som kjører pilottesting bare i California (Department of Motor Vehicles, California Januar 2020).

Ifølge Bloomberg (2019) pågår testing i minst 53 byer, jfr. Figur 26. San Francisco, Austin, Nashville, Washington, Paris, Helsinki og London er allerede i gang med prosjekter. Ytterligere 18 byer, som Los Angeles, Tel Aviv, Buenos Aires og Sao Paulo gjør forundersøkelser eller vurderer konsekvenser av automatiserte kjøretøy. The Autonomous Vehicles Readiness Index (Figur 27) er et redskap for å måle hvor forberedt 25 land er til å innføre autonome kjøretøy. Landene måles på 4 faktorer 1) politikk og lovgivning, 2) teknologi og innovasjon, 3) infrastruktur, 4) brukeraksept.



Figur 26. Antall byer med automatiserte kjøretøy per land, per 2017 (Bloomberg 2017)



Figur 27. Beredskapsindeks for autonome kjøretøy. (KPMG 2019)

Juridiske rammer for regulering av pilottesting er etter hvert etablert i flere land, f.eks. Singapore, Nederland, Norge og Storbritannia (KPMG, 2019). Videre har Euro NCAP designet et sett testprosedyrer for testing av automatiserte kjøretøy på SAE nivå 2 (NCAP 2019). Det amerikanske transportdepartementet (US DOT) har utviklet et rammeverk (NHTSA 2018) for testing av automatiserte kjøretøy med søkelys på feil oppførsel, strategier for håndtering av teknisk svikt og feilfrie systemer.

En rapport fra Navigant Research rangerer de 20 ledende selskapene innen utvikling av automatiserte kjøretøy med utgangspunkt i strategi og gjennomføringsevne. Målet er å gi bransjedeltakerne en objektiv vurdering av selskapenes relative styrker og svakheter i det globale automatiserte kjøretøy markedet. Studien viser at de ledende aktørene er Waymo, GM Cruise og Ford. Kinesiske Baidu kommer på en 4 plass. Uber er satt tilbake etter dødsulykken med et av deres kjøretøy og havner lang nede på listen (Navigant 2020). Det samme gjør Tesla som bare har kjøretøy på SAE nivå 2 og som også har vært rammet av flere dødsulykker med deres kjøretøy. Navya som utvikler de selvkjørende minibussene som deltar i norske pilotprosjekt er rangert som nummer 14. Den andre aktøren Eazymile er ikke vurdert.



Figur 28. Ledende aktører innen utvikling av automatiserte kjøretøy

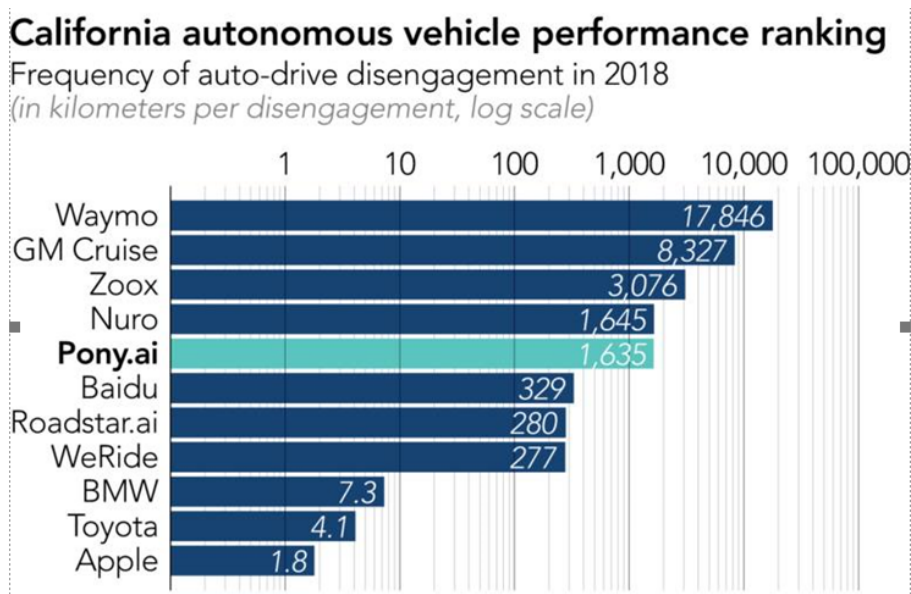
De fleste aktørene har fortsatt en sikkerhetsperson i kjøretøyet samtidig som de tar betalt for å transportere folk. Flere av aktørene driver også med frakt av gods og matvarer. Bare Waymo og GM driver utprøving uten sikkerhetsperson om bord som kan ta over kontroll av kjøretøyet. Helt selvkjørende tjenester regner Navigant ikke som aktuelt før i 2021. Tesla har tidligere annonsert at de vil ha helt selvkjørende kjøretøy innen 2020, men nå har Tesla gründer Elon Musk moderert utsagnet og påpeker at det er noen små hinder igjen før de kan lansere helt selvkjørende kjøretøy. Tesla lanserte riktignok *Full Self Driving* (FSD) i 100 kjøretøy i november 2020, men det er en FSD versjon der føreren fortsatt må gripe inn av og til. Det vil si at den er selvkjørende på nivå 3. Når, eller hvis Tesla lykkes med å utvikle en komplett FSD software, vil de i prinsippet kunne spre det til alle Tesla kjøretøy verden over. Tesla sin styrke i dette kappløpet er at de opparbeider en stor database med erfaringsdata fra sin kjøretøyflåte verden over. Daglig sendes video og sensor data til databasen om alle større og mindre hendelser med Tesla kjøretøy. Hendelsene tagges geografisk med type hendelse slik at alle Tesla kan dra nytte av lærdommen. Tesla har utviklet egen software og hardware system.

Waymo, som av mange anses å ha kommet lengst i utviklingen av selvkjørende kjøretøy på SAE nivå 4-5, har ikke like variert omfattende datagrunnlag for sin selvkjørende software. De har hovedsakelig data fra kjøring på tørre og brede veger i California, med lite interaksjon med myke trafikanter. Det har endret seg de siste årene etter hvert som de har utvidet med testområder i Arizona og Pittsburg med forsteder, boliggate og myke trafikanter.

Figur 29 nedenfor, viser hendelser der sikkerhetsfører har overtatt kontroll av kjøretøyet (frekvens pr. km log skala) for de firmaene som har færrest slike overtakelser av kontroll med sine kjøretøy. Dette er en rangering blant firma som er innvilget tillatelse til å teste selvkjørende kjøretøy på SAE nivå 4 på offentlig veg i California. Som oversikten viser kjører Waymo sine kjøretøy i snitt ca. 17 km mellom hver gang

sikkerhetsføreren i bilen ser det som nødvendig å ta over kontroll og GM Cruise ca. 8 km. Oversikten er fra 2018. Det vil si på det tidspunkt pilotene i Norge startet opp.

Merk at figuren viser selvrapporterte hendelser fra hvert enkelt firma som de er lovpålagt å rapportere for å få tillatelse til testing i California. Waymo og GM Cruise har langt færre overtakelser av manuell kontroll enn konkurrentene. Pony.AI (etablert 2016) og Baidu er nye kinesiske firma som ikke startet testing i California før i 2017. De tester sine kjøretøy i USA så lenge kinesisk lov ennå ikke tillater testing på offentlig veg.



Figur 29. Kilde: California Department of Motor Vehicles publisert i Nikkei Asia 2019

Det er ikke uten videre enkelt eller rettferdig å sammenligne kjørte km pr overtakelse av kontroll i de norske pilotene med data for det samme med personbiler i California. Det er mange grunner til det. For det første er de norske resultatene fra piloter i blandet bytrafikk (Kongsberg, Oslo, Gjøvik), næringspark (Stavanger) og nyetablert boligområde (Fornebu). Alle på ruter/linjer med stor andel myke trafikanter. I California foregår testingen i hovedsak på motorveg og store brede samlegater med få kryss og liten andel myke trafikanter. Hovedsakelig i utkanten av San Fransico (Silicon Valley). Det er stort sett på tørre veger under gode lys og værforhold. Til sammenligning er den norske piloten på Kongsberg et permanent tilbud som også i pilotfasen ble gjennomført under vinterlige forhold.

Hvilken opplæring sikkerhetsføreren om bord har fått kan variere. Det er ingen enhetlig krav til slik opplæring av safety officers i California og heller ikke av operatører i norske piloter. Det betyr at kriterier for når sikkerhetsføreren finner det nødvendig å gripe inn kan variere fra selskap til selskap og pilot til pilot. Vi vet ut fra intervjuer i de norske pilotene at operatørene ofte har personlige kriterier og forståelse for når det er nødvendig å gripe inn.

Det er også viktig å merke seg at hverken EasyMile eller Navya sine selvkjørende busser på SAE nivå 4 er sertifisert for å kjøre gjennom kryss i selvkjørende modus. Det betyr at antall kryss i de norske pilotene vil påvirke antall overtakelser av kontroll, det vil si utkoplinger. Det er det EasyMile kaller *manual switch* og Navya kaller *switch to manual mode* i sin logg fra kjøretøyet.

Fra et rent teknisk synspunkt er automatiserte kjøretøy rent teknisk allerede i stand til å overta de fleste kjøreoppgaver i trafikk. Nåværende serieproduksjonskjøretøy med optimalisert sensor-, datakraft- og chassis-teknologi muliggjør førerstøttesystemer med økende ytelse. Utviklingen har først vært automatisert kontroll i lengderetningen, deretter automatisert sideveis kontroll av kjøretøy (*auto steering*). Tesla med sin Autopilot har muliggjort automatisert kjøring i høye hastigheter.

Det finnes i hovedsak ulykkesdata og rapporter etter omfattende ulykkesutredninger med automatiserte kjøretøy på SAE nivå 2-3 fra produsenter og utviklere; Tesla og Uber.

4.1 SAE nivå 2 - Tesla Autopilot

I det følgende kapittelet er det satt søkelys på ulykker med Tesla Autopilot. Det er klart at Tesla sin Autopilot og andre sikkerhetssystemer tilknyttet førerstøtte i Tesla også redder Tesla-førere ut av trafikkfarlige situasjoner, men det finnes det mindre dokumentasjon på.

Det er relativt stor forekomst av medieoppslag og rapporter fra ulykker med automatiserte kjøretøy fra Tesla på SAE nivå 2, stort sett med Tesla sin "*Autopilot*". Det har vært flere påkjørsler av kryssende trailere, parkerte biler, midtdeler og rekkverk på motorveg. Selv om også Mercedes og Cadillac har lignende autopilotssystemer er det ikke tilsvarende ulykkesomtale av disse i media eller vitenskapelige journaler.

Kollisjon med feiebil

Den første rapporterte dødsulykken med Tesla på Autopilot er fra Kina i 2016. En video av ulykken sett fra kamera i Teslaen som kolliderte, viser at Teslaen i høy hastighet kjørte inn i en feiebil på vegskulderen med deler av kjøretøyet stikkende ut i venstre kjørefelt. Teslaen på Autopilot gjør ingen tegn til å bremse før ulykken inntreffer. Mulig årsak er at Autopiloten ikke gjenkjenner hva objektet er og/eller at en feiebil halvveis ut i eget kjørefelt ikke er et objekt det er programmert til å stoppe for. Høy hastighet kan ha medvirket at Teslaen ikke greide å bremse før kollisjonen inntraff, selv om Autopiloten i siste liten gjenkjenner objektet som et parkert kjøretøy.

Rapport om lignende kollisjoner med Tesla uten dødelig utgang var i forkant av ulykken blant annet rapportert fra Sveits. Alle med saktegående eller parkerte kjøretøy mot venstre vegkant.



Figur 30. Bilde av Tesla X etter kollisjon feiebil.
Kilde: YouTube CNTV Kina (2016)



Figur 31. Bilde fra Tesla X kamera sekundet før kollisjon med stillestående feiebil.

Autopiloten er en videreutvikling av adaptiv cruisekontroll (ACC). ACC systemet er god til å følge og tilpasse seg bevegelige objekter, men ikke stillestående. Det kan bremse ned, men har ikke en nødbremsfunksjon. Systemet baserer seg derfor på at føreren skal ta over og bremse om nødvendig i nødsituasjoner. I tillegg er et *lane keeping* system integrert i Tesla sin autopilot slik at kjøretøyet kan følge trafikken og vegen automatisk i lengderetningen og sidevegs.

Kollisjon med vogntog etter blinding

En dødsulykke med Tesla Autopilot etter kollisjon med trailer i et kryss er grundig dokumentert av den amerikanske havarikommisjonen, se Figur 32.



Figur 32. Bilde av den type semitrailer (t.v.) som var involvert i dødsulykken med Tesla på autopilot i Florida 2016, Illustrasjon av ulykkesituasjonen (t.h.). Kilde New York times.

Hverken fører eller bil greide å se vogntoget tidsnok til å gripe inn. Radaren så sannsynligvis klar veg videre under hengeren på vogntoget og videosystemet ble satt ut av spill da den kritthvite siden av hengeren skapte blinding, såkalt *white-out*. Teslaen hadde før ulykken heller ikke noe informasjon om høyde på eget kjøretøy. Uten det kunne programvaren akseptere en lav åpning selv om den ikke er høy nok til at bilen kan passere.



Figur 33. Bilde av Tesla S modell etter dødsulykken i Florida 2016, der taket ble flerret av i kollisjon med semitrailer.

Kryssulykke med vogntog

En tilsvarende dødsulykke fant sted i Florida 1. mars 2019. En foreløpig rapport fra National Transportation Safety Board (NTSB) viser at ulykken skjedde i et kryss der en semitrailer kjørte ut fra en gårdsvei og krysset foran en Tesla i Autopilot modus. Autopiloten ble slått på 10 sekunder før ulykken. Bilder fra kamera i Teslaen og fra overvåkningskamera viser at semitraileren krysset veien sakte og at Teslaen traff semitraileren på venstre side. Taket ble flerret av og Teslaen fortsatte under semitraileren og stoppet opp først noen hundre meter lenger framme i midtrabatten. Føreren av Teslaen døde umiddelbart. Føreren av semitraileren var uskadd. Det var gode siktforhold når ulykken inntraff.



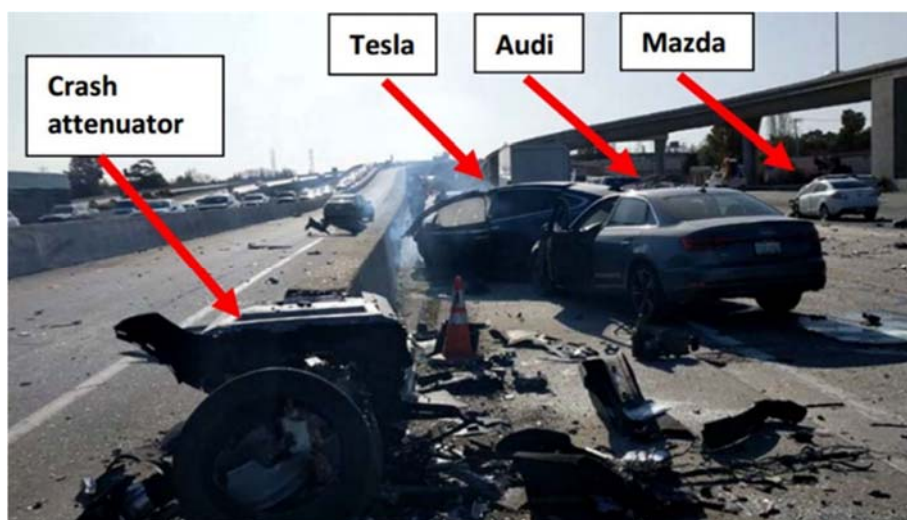
Figur 34. Bilde av Tesla modell 3 etter kollisjon med semitrailer i Florida som gjorde omfattende skade på taket. Foto National Transportation Safety Board



Figur 35. Krysset der ulykken fant sted, sett nordfra. Utkjørselen der semitraileren kom fra ses til høyre i bildet. Kilde Google Maps

Påkjørsel av rekkverk på motorveg

I mars 2018 skjenet plutselig en Tesla X på autopilot inn et defekt endepunkt på en barriere ved en avkjøringsrampe på en motorveg i Silicon Vally CA. Føreren hadde i forkant av dødsulykken klaget til familien over at bilen ofte skjenet over mot rampen akkurat dette stedet. Føreren døde momentant og Teslaen tok fyr i sammenstøtet. Flere kjøretøy var involvert i ulykken se Figur 36.



Figur 36. Bilde av Tesla X og andre kjøretøy etter Teslafører på Autopilot kjørte inn i enden på en barriere.

Etter ulykken med Tesla autopilot i Florida (2016) bestilte amerikanske myndigheter (The National Highway Traffic Safety Administration/ NHTSA) en studie av Virginia Institute of Technology som viste at Tesla har 40% mindre ulykker etter innføring av Autopilot. NHTSA har fått sterk kritikk etter at et forsknings- og konsulentfirma kalt Quality Control Systems (QCS) gjorde nye analyser.

Alvorlige metodefeil ble avdekket nesten to år etter den opprinnelige rapporten, etter at QCS saksøkte NHTSA for å få tilgang til datagrunnlaget. QCS kom med en ny analyse basert på tilgang til rådata som lå til grunn for NHTSA sitt opprinnelige funn. I sin rapport fremhever QCS mangler i NHTSA's metodikk, alvorlige nok til fullstendig å diskreditere resultatet på 40 prosent (QCS 2019). NHTSA's rådata viser at flertallet av Tesla-kjøretøyene led av manglende data eller andre problemer i datasettet som gjorde det umulig å si om aktiveringen av Autopilot (Autosteer) økte eller reduserte kollisjonsraten. Når QCS satte søkelys på 5.714 kjøretøy hvis data ikke led av disse problemene, fant de ut at aktiveringen av Autosteer faktisk økte kollisjonsraten med 59 prosent.

Selv om NHTSA sin rapport av 2017 ikke finner tekniske feil ved *Automatic Emergency Braking* systemet (AEB) eller Autopiloten så påpeker de at AEB er en *collision avoidance* teknologi designet for å unngå ulykker med påkjøring bakfra og som ikke er designet for å virke pålitelig i alle kollisjonssituasjoner deriblant situasjoner med kryssende trafikk.

Andre ulykker

Dødsulykkene med Tesla Autopilot er kanskje bare toppen av isfjellet. Det er rapportert en rekke mindre alvorlige og alvorlige ulykker med Tesla Autopilot. Nylig braste en Tesla inn i en lastebil som hadde veltet på en motorvei i Taiwan. Hverken bilen eller den 53 år gamle sjåføren skal ha oppfattet lastebilen før det var for sent. Ifølge taiwanske medier (gjengitt i Nettavisen) skal bilen, en Tesla Model 3, ha kjørt på autopilot i rundt 110 km/t – før den braste inn i lastebilen. Sjåføren, som åpenbart hadde søkelys på noe annet enn veien, sier at han sto på bremsen så fort han så den veltede lastebilen – ettersom bilen ikke reagerte på hindringen. En person som stod i kjørefeltet 100 meter foran den veltede lastebilen, måtte hoppe unna for Teslaen som braste inn i lastebilen.



Figur 37. En Tesla på autopilot braste inn i en lastebil på tvers av kjørebanelen i Taiwan, mai 2020

Den gule rammen i bildet over (*Figur 37*) viser en støvsky bak Teslaen i det føreren griper inn og forgjeves forsøker bremse/avverge ulykken. Lastebilsjåføren står i vegkanten og vinker for å varsle, men må hoppe unna når Teslaen kommer. Lastebilsjåføren ses øverst til høyre i den gule rammen. Føreren av Teslaen kom fra det uten skader. Det er foreløpig ikke gitt ut noen offisiell rapport som konkluderer den direkte årsaken til ulykken. Men det skal ifølge flere kilder være klart at bilen kjørte på autopilot.

Uønskede hendelser og ulykker med Tesla sin førerassistanse dukker fra tid til annen også opp i norske medier. Det er ikke bare påkjørsel av stasjonære objekter, men ulykker som skyldes umotivert stans. Det er situasjoner hvor autopiloten til Tesla reagerer på skilt eller objekter som ikke er relevant, såkalt falske positive feil.

Kjedekollisjon på E6 etter at Tesla på autopilot bråbremset

Tre biler er involvert i kollisjonen i Verdal fredag ettermiddag.



Figur 38. Ulykke forårsaket av umotivert stans. Kilde: Adressa mars 2020

Politiet melder at de foreløpige undersøkelsene tyder på at Teslaen på Autopilot i nordgående retning tilsynelatende registrerte en hindring i veien, men dette var en lastebil i sørgående retning. Dette betegnes gjerne som fantombremsing. Dette førte til at den automatisk satte inn full brems, eller hvert fall etter en kraftig nedbremsing. Dermed ble Teslaen påkjørt av en bil bakfra, og bilen som kjørte på Teslaen ble igjen

påkjørt bakfra av en lastebil. Det ser ut til at Autopiloten gjorde at Teslaen bråstoppet. Sjøføren rakk ikke å gripe inn og gjenvinne kontroll før ulykken var et faktum. Ingen ble skadet i ulykken.

Endringer i funksjonalitet

Som følge av flere mindre og større ulykker knyttet til automatiserte kjøretøy på SAE nivå 2, har EU og alle 58 nasjoner som er med i UNECE 1958-avtalen valgt å begrense funksjonene. Også land som ikke er med på avtalen bruker regelverket. Det er nesten bare USA som ikke følger UNECE regelverket.

Sent i fjor fikk Tesla-eiere en ny programvareoppdatering som begrenser Teslas autopilot betydelig. Funksjonene som ble begrenset er:

- *Auto Lane Change*: begrenset til bruk på motorveg klasse A.
- *Auto Lane Change*: Ved aktivering og indikatoren påslått, vil bilen vente minst ett og et halvt sekund før den starter filskifte, og venter inntil fem sekunder før den avbryter hvis filskifte ikke har vært mulig å starte.
- *Autosteer*: Hvor langt rattet kan vris mens du bruker Autosteer reduseres, og kan påvirke kjøretøyets evne til å manøvrere kurver eller holde seg innenfor kjørefeltet, noe som krever at fører handler.
- *Autosteer*: Krav om at fører får en påminnelse om å holde i rattet hvis hendene er borte fra rattet i 15 sekunder
- *Summon*: Krav om at du befinner deg innenfor seks meters avstand fra bilen for å fungere.

Endringene vil kreve raskere feltskifte, kortere avstand til kjøretøyet ved fjernstyrt parkering (*Summon*) og begrense hvor langt du kan vri rattet på Autosteer. Autosteer begrenses også nå til en kontekst som er mer i tråd med systemets *Operational Design Domain* (ODD). Teslas Autopilot har vært i bruk på europeiske veger i snart 4 år og ble godkjent etter eldre regler, men måtte nå endres for å overholde den nye UNECE R79-forskriften om førerassistansesystemer (UNECE 2020). Oppdateringen påvirker bare kjøretøyene Model S og Model X; Modell 3 overholder allerede kravene.

I henhold til informasjon fra de norske representantene i UNECE hadde den første utgavene av filskift-funksjonen «bugs» som gjorde at filskift ble anbefalt ved møtende trafikk. Tesla hevder at bilen tross anbefaling i displayet ikke ville ha utført filskift. Filskift-funksjon var ikke regulert tidligere, dvs. det fantes ingen «eldre» regler å godkjenne dette etter.

UN-ECE Regulation 79 tok i utgangspunktet for seg styresystemer, men har i senere endringer også tatt inn førerstøttesystem som griper inn i styrefunksjonen. Tiden som er definert for å starte filskift og hvor lange blinker kan «be» om å få plass i sidefilen ble begrenset av flere årsaker, f.eks. hindre at andre kjøretøy i sidefil ikke må bremse, holde fører aktiv, ikke «trygle» for lenge om å få skifte fil. Tidsbegrensingene er til ny revisjon i WP29/GRVA. Den er på 5 sekunder, men det drøftes om den skal endres til 7 sekund. Reguleringen har ingen krav til styreutslag, men krav om maksimal lateral akselerasjon (3,0 m/ss). Førere som kommer raskt inn i sving vil da tidligere merke at bilen bremser. Dette klager Tesla-førere på. Tesla (gjennom AVERE) har gjennom flere forsøk kommet med endringsforslag til R79 for å øke tillatt verdi for lateral akselerasjon. Dette forslaget har Norge argumentert imot da det vinterstid ikke er tilstrekkelig friksjon som støtter dette. En Tesla har ennå ikke noe system som estimerer tilgjengelig friksjon.

Videre er det krav i UN-ECE Regulation 79 om at systemet (ACSF) varsler etter 15s og til slutt skrur seg av for å holde fører aktiv, da det er et nivå 2 ADAS.

På fjernstyrt parkering er det satt en begrensning på 6 meter for å sikre at føreren kan observere bevegelsene.

Den danske bilorganisasjonen FDM oppdaget nylig (februar 2020) at nødbremssystemet (AEB) ikke alltid virket da en ny Volvo V60 ble testet mot en barriere. Nødbremsesystemet skal bremse automatisk for andre biler, fotgjengere og syklister. Det har senere vist seg at alle nye Volvo-biler produsert fra 21. januar 2019 og fram til i dag kan ha den samme feilen. Volvo har tatt ansvar og tilbakekalt 750 000 biler av denne typen.

Endringen i regelverket (UN ECE R79-forskriften) er initiert etter at flere organisasjoner og forskningsrapporter har dokumentert sikkerhetsmessige svakheter ved systemer for førerassistanse (ADAS) på SAE nivå 2 eller lavere (Dutch Safety Board 2019; Dunn N., Dingus T. And Soccolich M.S. 2019).

4.2 SAE nivå 3 - Uber kjøretøy

Det er rapportert få hendelser og ulykker med høyt automatiserte kjøretøy på SAE nivå 3, rett og slett fordi det er få som tester og utvikler kjøretøy for dette nivået. Uber har hatt minst en feltskifteulykke og en dødsulykke med kjøretøy på SAE nivå 3.



*Figur 39. Bilde fra Ubers kamera sekundet før kvinnen blir kjørt ned og drept.
Øverst til venstre er bilde av Ubers modifiserte Volvo. Bilde NTSB*

Dødsulykken med Uber skjedde i Arizona. En kvinne som krysset veien utenom et gangfelt, ble påkjørt av en automatisert Uber-bil. Uber ble ikke dømt for ulykken, men en offentlig rapport slo fast at Ubers programvare ikke hadde tatt høyde for at personer kan krysse veien uten at det er en overgang der. Programvaren prøvde å gjenkjenne objektet, men greide ikke å identifisere det som en fotgjenger før det var under 2 sekund igjen. Programvaren kunne heller ikke initiere nødstop. Uber hadde slått av det automatiske bremsesystemet (AEB), for å minimere unødig stans og øke kjørekomfort. Sikkerhetspersonen som satt i bilen, var opptatt med andre ting og oppdaget fotgjengeren først når det var for sent å gripe inn.

Tabell 12. Dødsulykker med kjøretøy på nivå SAE nivå 2 og 3 (Jenssen 2019).

System	År	Land	Antall	Kjøretøy	Beskrivelse	Ulykke
Uber (SAE 3)	2018	USA	1	Uber (Volvo XC90)	Objekt gjenkjenning sviktet	Fotgjenger døde
Tesla-Autopilot (SAE 2)	2016	Kina	1	Model S	Kolliderte med parkert bil	Fører døde
	2016	USA	1	Model S	Kjørte under semitrailer	Fører døde
	2018	USA	1	Model X	Kjørte på enden av barriere	Fører døde
	2019	USA	1	Model 3	Kjørte under semitrailer	Fører døde
	2019	USA	1	Model 3	Kjørefelt assistanse sviktet	Fører døde
Totalt	4 års periode	2 land	6	-		5 førere 1 fotgjenger

4.3 SAE nivå 4 – Google-Waymo kjøretøy

Det er foreløpig begrenset eksponeringsdata for kjøring på SAE nivå 4. Data fra perioden 2009 til slutten av 2015 samlet inn fra Google-biler (Teoh & Kidd, 2017) viser at det var tre politirapporterte ulykker i California etter å ha kjørt 2 208 199 km. Det gir en ulykkesfrekvens på 1,36 politirapporterte ulykker pr. millioner km. Dette er 1/3 av politirapporterte ulykker med vanlige menneskestyrte personbiler i samme område

Samspill med vanlige manuelle kjøretøy kan også være en utfordring for automatiserte kjøretøy på SAE nivå 4-5. Google har registrert 21 trafikkulykker i perioden 2012-2017 med sine automatiserte kjøretøy. Nitten av disse var påkjøring-bakfra-ulykker ved trafikksignalanlegg der de selv ikke ble tildelt skyld. Årsaken er at vanlige trafikanter ofte forventer at bilen foran kjører på gult signal. For å løse problemene omkring denne dilemmaen tok Google i 2016 patent på en løsning som beregner kjøretøyets avstand til lyskryss, egen hastighet og tid det vil ta å passere krysset. På det grunnlaget kan Google sine automatiserte kjøretøy nå kjøre på gult signal, mer i tråd med andre ikke-automatiserte trafikanters forventninger. De to andre ulykkene var ulike. I den ene ble Google-bilen påkjørt sidevegs i trafikksignalanlegg av et kjøretøy som kjørte i høy hastighet på rødt signal. Vi må skille mellom ulykker som kunne ha vært avverget og de som ikke er mulig å avverge enten det er fører eller datamaskin bak rattet. Når Google-bilen blir påkjørt i høy hastighet fra siden av en bil som kjører på rødt, så er det en ulykke hverken datamaskinen eller en dyktig fører hadde greid å avverge på grunn av sikthindringer, den andre bilens hastighet og tid til kollisjon. Den andre ulykken skjedde ved feltskifte der Google-bilen måtte kjøre utenom noen sandsekker ved et sluk etter flom. Google-bilen kolliderte med en buss i lav hastighet og ble tildelt skyld. Når Google-bilen har kollidert ved feltskifte i lav hastighet og der det ikke er sikthindringer, må det imidlertid stilles spørsmål om sensorene og programvaren i det høyt automatiserte kjøretøyet er utilstrekkelig og bør forbedres.

Takket være myndighetene i California (DMV, 2020) vet vi ganske mye om ulykker og hendelser på SAE nivå 4. Tabell 3 viser et utdrag av informasjon om ulykker hentet ut fra registeret til California DMV for 2019 (DMV, 2020).

Tabell 13. Utdrag av ulykker og hendelser med automatiserte kjøretøy i California. Data fra DMV.

2019	Company	Action Movement preceding accident	Others	Contact point	Damage	Injury	Weather	Visibility	Type of collision
Jan	GM Cruise	AV-left turn Manual mode	Scooter Attempting to pass	Contact front left side	Fender radar and wheel	Scooter declined treatment	Clear dry	Dark no streetlights	Side swipe
Jan	GM Cruise	AV Straight AV mode	Car Right turn	Rear corner	Rear bumper	No	Clear dry	Daylight	Rear end
Jan	Aurora	Stopping Manual mode	Car Straight	Rear bumper	Sensor and side quarter panel	No	Clear dry	Daylight	Rear end
Jan	Waymo	Stopped yielding to check for cross traffic Manual Mode	Car Right turn	Rear left	Rear bumper	No	Clear dry	Daylight	Rear end
Feb	Waymo	Yielding in autonomous mode 4 m/h in the slip-lane	Straight	Rear	Rear bumper	Sore neck Headache	Cloudy Dry	Daylight	Rear end
Feb	Waymo	Changing lanes 45 m/h to avoid crash	Straight	Side swipe	Side of AV	No	Clear dry	Daylight	Side swipe
Feb		Changing lanes				No			Side swipe
Feb	GM Cruise	Straight				No			Rear end
Feb	Lyft	stopped	Straight						Rear end
Feb	Lyft	Straight Manual mode	Stopped				Rain Wet		Head on
Feb	GM Cruise	Straight AV mode	Out from parking			no	Rain wet	Night	Rear end
Feb	Lyft	Manual	Backing up	Parked		No			Backing up

Vi ser av tabellen at Google-Waymo ikke lenger har påkjøring-bakfra-ulykker i lysregulerte kryss, men de har fremdeles problemer med påkjøring-bakfra-ulykker i andre trafikksituasjoner som ved påkjøring til motorveg og ved venstresving i kryss.

Andre selskaper som GM Cruise, Lyft, Aurora osv. som tester kjøretøy på SAE nivå 4, har fortsatt en del ulykker med påkjøring bakfra i lyskryss ved venstresving og på rette veier og gater. Dette er ulykker i samspill med vanlige kjøretøy, der den andre parten misforstår eller blir utålmodig i samspill med høyt automatiserte kjøretøy. En del av disse ulykkene kunne vært unngått om de automatiserte kjøretøyene kjørte raskere og mer likt andre kjøretøy. Andre hendelser med høyt automatiserte kjøretøy som er verd å merke seg, er at de foreløpig har problemer med innkjøring på motorveg. De har foreløpig bare indikert at de vil inn i en luke med å sette på blinklys, men de har ikke lært seg en atferd (*nudging*) der de også legger seg litt ut for å se om kjøretøy på motorvegen slakker av og gir de prioritet. Passasjerer i slike kjøretøy opplever også tidvis at de kjører lange strekninger fram og tilbake fordi et automatisert kjøretøy ikke dobbelparkerer for å slippe de av, men leter etter en lovlig parkering eller lomme til det. Det går ikke ut over sikkerheten at det høyt automatiserte kjøretøyet tar en omvei/lengre rute, men det kan påvirke brukeraksept.

4.4 Hva kan vi lære av 14 års erfaring med Robottraller (AGV) i norske sykehus?

På konferanser, workshops og i faglige fora der sikkerhet for høyt automatiserte kjøretøy diskuteres, stilles det ofte spørsmål om hvordan sikkerheten for automatiserte kjøretøy vil bli på lang sikt. Et godt eksempel på hvordan sikkerheten for samspillet mellom automatiserte kjøretøy på SAE nivå 4-5 kan bli, har vi fra erfaringer med avanserte robottraller (AGV) i samspill med "myke trafikanter" over en periode på inntil 14 år på norske sykehus. Det er mange likhetstrekk ved hvordan selvkjørende roboter i sykehus fungerer og selvkjørende minibusser i de norske pilotene, men de opererer i et miljø der de fleste andre trafikanter har lært de å kjenne. Det vil si sykehusansatte som går sykler eller bruker sparkesykler i deres nærhet. Besøkende som møter på de vil selvsagt ofte få sitt første møte med denne typen høyt automatiserte roboter på sykehuset.

Selvkjørende AGV-er brukt til varetransport i norske sykehus opererer på SAE nivå 4. Dette er såkalt *fixed-route* autonomi der de følger preprogrammerte ruter innenfor sykehusområdet. De tilbakelegger til sammen mer enn 8000 km pr dag i korridorer og heiser på hospitalet der de er i tett kontakt med pasienter, personalet og besøkende. For å sikre pålitelig, rask og sikker transportavvikling kan AGV-ene snakke til folk de møter, varsle om sitt nærvær og varsle om intensjoner. Erfaringene med de selvkjørende AGV-ene som ferdes blant ansatte, pasienter og besøkende ved St. Olavs hospital i Trondheim og A-hus i Akershus viser:

- En ulykke med personskade på 14 år
- Et par kritiske hendelser
- Kollisjon med objekter av og til (paller)

Disse AGV-ene kjører foreløpig i lave hastigheter (5-7 km/t) og snakker med folk i nærheten for å varsle om at de kommer, be folk passe seg/gi plass, samt be om prioritet til å bruke heis. De kommuniserer med omgivelsene gjennom predefinerte talemeldinger tilpasset ulike konfliktsituasjoner som kan oppstå. Ved St. Olav Hospital snakker de til og med på lokal dialekt som er trøndersk. Dette samspillet fungerer godt både for de som ferdes daglig i miljøet (ansatte) og besøkende som har lært seg å samhandle med de selvkjørende AGV-ene.



Figur 40. TransCar LTC2 Automated Guided Vehicle System (AGV) fra Swisslog med og uten last.

Den eneste registrerte personskade ulykken ved St. Olavs på 14 år skjedde når en vaktmester i trappetige ble kjørt ned. AGV-ene kjører predefinerte ruter med og uten last. Uten last har de en høyde på 40 cm, men med last har de en høyde på inntil 1.5 meter. Sensorene har brukbar rekkevidde i bredden (horisontalt), men begrenset rekkevidde i høyden (vertikalt). I tillegg har de ingen informasjon om sin egen høyde med last. Dermed kan AGV-en se fri bane mellom bena på en trappetige og kjøre rett fram samtidig som den høye kassen med last river ned trappetigen.



Figur 41. Illustrasjon av ulykkesituasjon med AGV.

Videre er det registrert et par kritiske situasjoner med AGV (i løpet av 14 år) der de har vært til hinder for pasienter i sykeseng eller i rullestol, med akutt behov for behandling. Dette er situasjoner:

- a) der AGV-en har blitt stående eller gått tom for strøm i gangarealet mellom akutten og operasjonsstuer
- b) der AGV-en har lagt beslag på heis som fødende i rullestol har akutt behov for å bruke

Dette er ulykkesituasjoner og kritiske hendelser med likhetstrekk til ulykker og mulig kritiske hendelser som kan oppstå med kjøretøy på nivå 2-3 (Tesla og Uber ulykke) og på nivå 4 der automatiserte kjøretøy kan sperre vegen for utrykningskjøretøy. Teknologi og C-ITS løsninger for å håndtere samspillet mellom automatiserte kjøretøy på nivå 4 og utrykningskjøretøy er en funksjon som ble definert og spesifisert allerede i *Prometheus*-programmet i 1985. Det er imidlertid først i 2019 at Google-Waymo som det første selskapet prøver å lage fornuftige algoritmer for å løse dette samspillet på en trygg og effektiv måte.

Med mer enn 10 AGV-er i drift ved St Olavs hospital, er det behov for et bemannet kontrollsentral med personell som kan gripe inn når det er en kollisjon eller låst situasjon. Systematisk rapportering av hendelser med AGV-operasjonene er per i dag mangelfulle.

Andre erfaringer

- Paller kasser eller lignende plassert i eller nær ruten til en AGV er utfordrende for sensorene
- AGVene kjører i nøyaktig samme "spor", og gulvslitasjen godt synlig og betydelig langs AGVenes spor
- Sparkesyklister som kjører nær AGVene gjør at AGVene stopper brått

5 Perspektiv på trafiksikkerhet for automatiserte kjøretøy

5.1 Hva kan vi lære av automatisering innen andre transportformer?

Autonom, høyt automatisert, og ubemannet transport utvikles innen jernbane/metro, autonom vegtransport, autonome fartøy (skip/båter/ferger/ubåter på overflaten og under) og innen luftfart (fly/droner). I det følgende gis et generelt og kort sammendrag av sikkerhetsmessig status innen jernbane, vei, sjø og luft og relevante utfordringer som hittil er identifisert innen prosjektene SmartFeeder og Sarepta (Johnsen et al 2018 og Johnsen et. al 2020).

5.1.1 Jernbane/metro

Ubemannet metrovirksomhet har vært i drift siden 1980, kontrollert fra sentrale kontrollrom. Det eksisterer i dag minst 48 ubemannede metrolinjer som til sammen utgjør 674 km med bane (UITP, 2013). Disse ubemannede metrolinjene finner vi i København, Barcelona, Dubai, Kobe, Lille, Nürnberg, Paris, Singapore, Taipei, Tokyo, Toulouse og Vancouver. Det er hittil rapportert to ulykker med ubemannet metro. Begge i Japan. Vi vet foreløpig lite om disse ulykkene. Denne typen automatisert transport har likevel en imponerende sikkerhetshistorikk (Wang et al. 2016). Det operative designrommet (ODD) til ubemannet metro støtter sikkerhet i og med at skinnene er plassert på eleverte baner eller under bakken isolert fra annen trafikk. I tillegg er det på stasjonsområdet vegger mot sporet med dører som bare åpnes når ankomende tog har stoppet. Designet innebygd i infrastrukturen er med på å redusere risiko for ulykker både under transport og på holdeplass. Det er imidlertid avdekket dårlige rutiner for systematisk rapportering og registrering av hendelser med ubemannet jernbane / metro.

5.1.2 Ubemannede fartøy (over og under vann)

Undervannsoperasjoner basert på droner (ROV - Remotely Operated Vehicle) har vært i bruk i olje- og gassindustrien siden 1970. Det har vært hendelser og ulykker i bruken av ROV-er, men ingen systematiske undersøkelser og analyser er utført. Flere pilotprosjekter, forsknings- og testanlegg er etablert for å utforske fordeler ved bruk av USV -er (Unmanned Surface Vehicles) i gods og persontransport. Som et eksempel kan bruk av det autonome lasteskipet, Yara Birkeland, fjerne 40 000 trailere årlig fra norske veger når det tas i bruk fra 2021. Det vil kunne redusere vogntogulykker på veg. Det første testområdet for autonome skip ble etablert i Norge (Trondheim) i 2016 og et forum for autonome skip ble etablert online (NFAS, 2019). Det er betydelige fordeler med USV-er knyttet til effektivitet, kostnader, miljømessig konsekvenser, logistikk og sikkerhet. Sikkerhetsutfordringer eksisterer, men effekter er foreløpig usikre på grunn av sparsom driftserfaring. Sikkerheten for USV-er ligger ennå på et umodent nivå, men må prioriteres etter hvert som bruk av f.eks. fjernstyrte skip og ferger øker. (Bakken et al., 2019)

Erfaringen fra selvdrevne kabelferger i Norge har vært god, men det har skjedd ulykker på grunn av overbelastning (Høklie 2017). En analyse av 100 maritime ulykkesrapporter, der målet var å vurdere om ulykken ville ha skjedd hvis skipet hadde vært ubemannet gir indikasjoner på konsekvenser av ubemannede fartøy. Det ble stilt spørsmål om sannsynlighet og konsekvenser for ulike typer ulykker. Analysen antydte at forekomsten av navigasjonsulykker (f.eks. kollisjon, grunnstøting) kunne forventes å avta med autonome og ubemannede skip. Imidlertid kan konsekvensene som følge av ulykker uten navigasjon (f.eks. brann og tap av skip på grunn av strukturell skade) forventes å være mye større for de ubemannede skipene sammenlignet med de konvensjonelle. Manglende mulighet for intervensjon fra mennesker i nærheten gir mer alvorlige konsekvenser (Wrobel et al. 2017).

Det jobbes med utvikling av styringssystemer for autonome skip basert på prinsippet om operasjonelle soner (*operational envelope*) som kan ha overføringsverdi til vegtransport. Avhengig av avstand til land, holmer, skjær og andre fartøy beregnes kontinuerlig sikkerheten og om umiddelbare inngrep er nødvendig. I god avstand er det strategiske valg og beslutninger. På middels avstand er det taktiske valg og beslutninger som

må gjøres og i umiddelbar nærhet er det operasjonelle valg og beslutninger som må gjøres umiddelbart. Dette har likhetstrekk med Gibson sin teori om *area for safe travel*, utviklet for bilkjøring (Gibson & Crooks 1938). Her er det læringspotensialer i overføring fra skipsfart basert på erfart frekvens av uønskede sensorbaserte stopp med autonome selvkjørende minibusser: De bråstopper for biler, syklistene og fotgjengere som kommer for nære bussen eller for grener, høyt gress og stolper som står nær vegkanten. Unødig og uønsket bråstopp kan unngås med programvare som har en mer veltilpasset operasjonell sikkerhetssone på strategisk, taktisk og operasjonelt nivå.

5.1.3 Automatisering innen luftfart

Automatisering innen luftfart har en lang historie, der pilotenes manuelle funksjoner systematisk er automatisert, og bemanningen i cockpiten er tilsvarende redusert. Hendelser på grunn av uforutsette konsekvenser av automatisering skjer, men generelt er flysikkerheten (kommersiell passasjertrafikk) ekstremt høy. Ulykker knyttet til automatisering i luftfart har nylig skjedd med Boeing 737 Max. Viktige anbefalinger er å sikre samsvar med menneskelige faktorer, designstandarder og støtte for vurdering av menneskelige faktorer i luftfartesting og sertifisering (Endsley, 2019).

I tillegg til økende automatisering av pilotenes oppgaver, har bruken av droner økt innen luftfart for å unngå eller redusere farlige og kjedelige operasjoner som er risikabelt i bemannede helikopteroperasjoner. Automatiserte systemer og droner og ubemannede fly er imidlertid sårbare for angrep gjennom de fysiske /cyber-systemene den består av, for eksempel sensorer, aktuatorer, kommunikasjonslenker og bakkekontrollsystemer. Som et eksempel var en iransk cyber warfare-enhet i stand til å lande en amerikansk drone basert på et forfalskningsangrep som modifiserte Global Positioning System-GPS-data (Aitawy & Youseff, 2016). I Petritoli et al. (2017) ble gjennomsnittlig tid mellom svikt for droner og ubemannede fly estimert til å være 1000 timer; omtrent 100 ganger høyere enn i bemannede flyreiser. De dominerende feilene var i drivverket, bakkekontrollsystemet og navigasjonssystemet. Erfaringer med droner og ubemannede fly fra den amerikanske regjeringen (Waraich et al. 2013), tilsier at 50-100 uhell forekommer hver 100 000 flytime, kontra menneskelig opererte fly der det er ett uhell per 100 000 flytimer. Uhell er relatert både til start, underveis og landing. Flest feil skjer under take-off og landing. Bare 12% skjer underveis når ønsket høyde er nådd. Uhellfrekvensen for droner og ubemannede fly er betydelig høyere enn bemannede operasjoner. Hovedårsaker er relatert til dårlig oppmerksomhet mot menneskelige faktorer, for eksempel dårlig utforming av bakkekontrollsentre (Waraich et al. 2013, Hobbs et al. 2014).

Det er relativt enkelt å automatisere skinnegående transportmidler sammenlignet med luftfart, skipsfart og vegtransport. Atferd innen vegtransport krever ferdigheter, kunnskap og ekspertise for sikker manøvrering i komplekse omgivelser, mens det kan være enklere å automatisere transport som i stor grad er regelstyrt og som opererer i et mindre komplekst miljø (på skinner, i luftrommet og på det åpne havet).

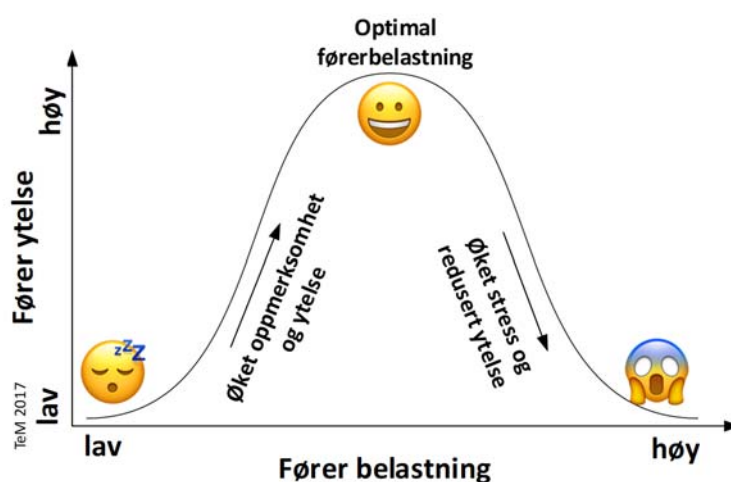
5.2 Å kjøre blir vanskeligere og samtidig enklere

Automatisering betyr at relativt enkle oppgaver kan overtas og utføres på et vedvarende og høyere sikkerhetsnivå. Oppgavene som er for vanskelige å løse med automatisering, overlates foreløpig til menneskelige førere. Automatisering endrer den menneskelige oppgaven fordi førere er pålagt å holde seg "våkne" til enhver tid, i tilfelle systemet for automatisk kjøring ikke vet hva det skal gjøre eller handler feil. Dette representerer en ny utfordring fordi førerens rolle går fra aktiv kjøring til overvåking av en prosess. Vi er som mennesker dårlig egnet til å overvåke ensformige prosesser over tid. Automatisering gjør oss inaktive, trøtte og årvåkenheten reduseres. Kravet i halvautomatiske kjøretøy og lavere grad av automatisering (SAE 2-3) er

Foresight om Teknologi:

Det går om lag 50 år fra en nyvinning skjer til den er allment utbredt, selv om den er sosialt nødvendig.

at føreren skal være i kontroll-loopen. Det er forventet at føreren på bare få sekunder skal forstå situasjonen, gripe inn og gjøre det som er riktig hvis automatikken svikter. Tidsmarginene for å velge riktig respons i trafikken er minimale. Resultatet er en paradoksalsituasjon der ADAS og mer avanserte semi-automatiske systemer som har til hensikt å gjøre kjøreoppgaven lettere, faktisk gjør det spesielt krevende. Dette er en problemstilling som ble beskrevet av Robert M. Yerkes and John D. Dodson allerede i 1908, og kalles Yerkes-Dodson Law (Yerkes & Dodson 1908), se Figur 42. Når automatikken tar over kjøreoppgaven blir det kjedelig å kjøre og som mennesker er vi dårlige til å overvåke kjedelige og monotone prosesser over lengre tid. Det endrer årvåkenhet og det er lett å bruke den ekstra kapasiteten som automatisering frigjør, til å sette søkelys på andre ting enn trafikkbildet.



Figur 42. The Yerkes–Dodson Law. Illustrasjon av SINTEF

Det er nettopp menneskets dårlige evne til å opprettholde konsentrasjon og årvåkenhet over en lengre periode som gjør at reaksjonstiden øker. Dette er et typisk scenario for automatiserte kjøretøy på SAE nivå 3. Særlig når føreren kan ha overdreven tillit til systemet gjennom feilaktig markedsføring (jfr. diskusjon av Tesla Autopilot).

5.3 Vi må vie oppmerksomhet til den hybride situasjonen vi har i dag

I løpet av de neste 10-20 årene vil vi befinne oss i en hybrid situasjon der kjøretøy styres både av mennesker og maskiner. Dette er en utfordrende kombinasjon fordi vi får et økende samspill mellom menneskestyrt og automatiserte kjøretøy. Omfanget av automatisering vil variere avhengig av type ADAS/autonomi og vil endre seg over tid, som et resultat av teknologiforbedringer og programvareoppdateringer. I et kjøretøy utstyrt med ADAS/autopilot kjører vi ikke lenger kontinuerlig aktivt, men tar i stadig større grad rollen som *prosesskontrollør*. Noen ganger overrasker systemet føreren med plutselige inngrep, eller fordi den uventet unnlater å gripe inn. Det avgjørende spørsmålet blir: *Hvem har kontroll?* Som diskutert ovenfor er det spørsmål om vi greier å gripe inn i tide selv om vi vet at vi er juridiske og forsikringsmessig ansvarlig for sikker ferdsel.

5.4 Hva skjer på veiene når selvkjørende biler skal samhandle med mennesker?

De siste årene har automatiserte kjøretøy blitt testet ut mange steder, både internasjonalt og i Norge. Hva er egentlig erfaringene? Automatiserte biler og busser og lastebiler skal gjøre trafikken tryggere. Visjonen er at automatisering vil få slutt på fyllekjøring, råkjørere som bevisst "trækker pedalen i bønn", folk som sovner ved rattet og uoppmerksomme sjåfører som sender tekstmeldinger, snakker i telefonen eller gjennomfører videosamtaler. Selvkjørende biler kan i beste fall redusere ulykker med opp mot 90 prosent, ifølge rapporter blant annet fra amerikanske vegmyndigheter (NTHSA 2017) og fra analyseselskapet McKinsey (2018)

Til tross for mye oppmerksomhet på automatiserte kjøretøy i forskning og media, overses gjerne de sikkerhetsmessige konsekvensene av et trafikkbilde med blanding av førerstyrte og automatiserte kjøretøy. Denne hybrid-situasjonen kan medføre en rekke utilsiktede effekter som ofte ignoreres i estimat av forventede sikkerhetsgevinster. Kjøretøy kjørt av mennesker vil være på veien i minst 50 år framover. Det omfatter motoriserte og manuelt kontrollerte kjøretøy, veteranbiler, motorsykler, traktorer, arbeidsredskaper, mopeder, el-mopeder, sykler og el-sykler.

Når vanlige førere deler vegen med forskjellige nivåer av automatiserte kjøretøy, blir det viktig at myndighetenes regulatorrolle utvikles og at regulering, f.eks. lover og forskrifter, henger med utviklingen. Det innebærer blant annet at vegmyndighetene holder seg informert om utviklingen og ligger i front mht. juridiske rammeverk og sertifiseringsordninger. Stegvis utprøving og uttesting i ulike trafikkmiljø er et viktig ledd i dette arbeidet. Å overvåke situasjonen, ha gode rutiner for å holde seg informert og delta i internasjonalt standardiseringsarbeid blir viktig. Amerikanske myndigheter (GHSA 2017) og Carstens og Martens (2018) tar til orde for at det framover blir viktig å:

Utdanne publikum - Myndighetene bør utvikle utdanningskampanjer om fordeler og risiko ved automatiserte kjøretøy, f.eks. kampanjer som forteller hvordan de trygt skal betjene kjøretøy med en eller flere automatiserte funksjoner og hvordan de bør samhandle og dele vegger og gater med slike kjøretøy.

Fange data - Myndighetene må identifisere automatiseringsnivå for ulike kjøretøy og samle data om hendelser og ulykker i databaser og register for kjøretøy, førerkort og ulykker. Politiets, Havarikommisjonens og forsikringsbransjens ulykkesrapporter må utformes med presis og omfattende data på ulike automatiseringsnivå.

Bruke standardisert symbol for automatisert kjøring slik at det er lett for fører å forstå og huske hvilken modus/tilstand bilen kjører i.

Bruke standardisert merking av automatiserte kjøretøy på SAE nivå 4-5 er slik at alle trafikanter i nære omgivelser forstår hvilken type kjøretøy de møter og hvilken atferd de kan forvente.

Bruke standardiserte signal og talemeldinger som forteller andre trafikanter om at et automatisert kjøretøy på nivå 3 – 5 er nær og hvilken atferd det har intensjon om å utføre (stoppe, kjøre rett fram, svinge osv).

5.5 Hvilken sikkerhet kan vi forvente på lang sikt?

Mange etterspør hvordan vi vil tilpasse oss automatisert vegtransport og hvordan situasjonen vil bli på lengre sikt. Foreløpig viser det seg at samhandling lar seg løse, men vi har noen samarbeidsproblemer på enkelte områder, - særlig i samspill med andre trafikanter. I en overgangsfase, inntil teknologien er moden og opererer i normale hastigheter, vil en del førere bli utålmodige i møte med kjørestilen til automatiserte kjøretøy. Det har hittil ikke resultert i alvorlige ulykker, men irritasjon. Dette kan sammenlignes med den irritasjonen mange opplever ved å kjøre bak en saktegående traktor eller feiemaskin i bytrafikken. Når selvkjørende minibusser etter hvert kan operere sikkert i normale hastigheter, vil dette irritasjonsmomentet forsvinne.

5.6 Tillit er grunnleggende

Søkelyset på innovasjon må være at trafikksikkerheten blir påviselig forbedret. Produsenter må med andre ord vurdere risikoen ved nye innovasjoner og være transparente om resultatene. Myndighetene må på den ene siden være modige og tillate pilotering, men samtidig bry seg med hva selskapene driver med og se over

skulderen på hva de gjør. Det vil også være et incentiv til produsenter og operatører av piloter om å sette sikkerheten høyt og gå forsiktig fram.

I økende grad må produsenter ta hensyn til menneskers plass og rolle i den nye mobiliteten og samspillet mellom mennesker og robotisert kjøretøy. I tillegg må læringskapasiteten til aktørene forbedres ved å lære av hendelser og ulykker og ved aktivt å inkludere erfaringer fra brukere i fremtidig utvikling. Overvåking og eventuell fjernstyring av selvkjørende kjøretøy fra kontrollrom slik som vi kjenner fra luftfart og ubemannet metro kan være med på å øke sikkerhet og tillit. En studie av Walker et al 2020 påpeker også at det er viktig med transparens for å bygge tillit. Eksempelvis ved at det er visualisert på et display hva det automatiserte kjøretøyet ser og hvordan den klassifiserer det den ser. Det kan også være informasjon om rute og hvor på ruten den selvkjørende bussen, taxien eller bilen til enhver tid befinner seg.

Forarbeidet til den norske loven om testing av selvkjørende kjøretøy viser at myndigheter ikke er overbevist om at alle produsenter vil være i stand til å lykkes med denne snuoperasjonen av egen vilje, og anser det som vesentlig at lovgivning blir innført for å legge til rette for en innovasjon som i praksis er ansvarlig. Det er viktig at disse oppgavene ikke utelukkende skal være produsentenes rolle, men at myndighetene også vurderer sin egen rolle og garanterer de offentlige interessene som står på spill på grunn av automatisering i veitransport.

Neste steg nå for å etablere tillit kan være sertifisering og etablering av *Sikkerhetsbevis* for høyt automatiserte kjøretøy. For eksempel ved bruk av UL 4600;2020 (*Standard for Safety for the Evaluation of Autonomous Products*), ISO 26262 (*Road Vehicles-Functional safety*) eller *Safety case* metodikk, kjent blant annet fra sertifisering innen jernbane (Myklebust and Stålhane 2018). Et Sikkerhetsbevis er en strukturert samling av informasjon og bevis som til sammen sannsynliggjør at et komplekst og sikkerhetskritisk system som et automatisert kjøretøy er trygt.

5.7 Både mennesker og teknologien må lære hverandre å kjenne

Utpøvingen av automatiserte kjøretøy har avdekket en rekke mindre problemer som oppstår i møte mellom menneske og maskin. Eksempelvis kan det oppstå en utfordring når en automatisert bil skal kjøre inn på en motorvei. Bilene er programmert til å akselerere, for så å legge seg inn. Problemet oppstår når ingen vil slippe dem inn. De automatiserte bilene får ikke den luka som kreves. Å kjøre inn på en motorvei er et sosialt samspill. Du setter på blinklyset, akselerer og legger deg litt over i nabofeltet for å vise at du er på vei inn på motorveien.

Noe lignende skjer når bilene skal ta en venstresving i et kryss. De blir foreløpig stående veldig lenge for å vurdere om det er trygt å kjøre. Ulykker skjer når andre sjåførere blir utålmodige. Automatiserte kjøretøy behersker ikke helt dette samspillet ennå. Det har i enkelte nabolag i Arizona der det er omfattende utpøving av automatiserte taxier ført til uttalt aggresjon mot disse kjøretøyene, med sinte leserinnlegg, tagging og kniv i dekk for å punktere kjøretøyene. Automatiserte drosjer i San Fransisco (Google) har også vært involvert i flere påkjøring-bakfra-ulykker som beskrevet i tidligere kapitler.

Igjen oppstår ulykker i samspillet med kjøretøy som ikke er automatisert. De automatiserte kjøretøyene stopper når trafikklyset skifter til gult, der menneskelige førere ofte ville ha kjørt gjennom krysset. Det fører til at bilen bak krasjer inn i det automatiserte kjøretøyet. Algoritmen er nå endret slik at de automatiserte kjøretøyene oppfører seg mer likt vanlige førere. Dette kan bedre seg etter hvert som de høyt automatiserte kjøretøyene kan operere i mer vanlige hastigheter.

Den største faren er likevel førere som ikke skjønner at de fortsatt har ansvaret i delvis automatiserte kjøretøy. De må fortsatt følge med og gripe inn. Det er først når kjøretøyet er høyt automatisert og det ikke

lenger er en sikkerhetsperson i bilen/bussen (operatør), at ansvaret blir gitt til operatørselskapet. Her har også produsenten av kjøretøyet et ansvar. Det er ingen tvil om at begrepet Autopilot som Tesla bruker er misvisende, og kan ha bidratt til alvorlige ulykker.

Utfordringen for design av automatiserte kjøretøy med *human-in-the-loop* er å sikre menneskelig inngrep/intervensjon og overtakelse av kontroll i tide til å unngå ulykker. Høyt automatiserte kjøretøy er foreløpig dårlig rustet til å håndtere uventede situasjoner. Det er ennå mye å hente innen utvikling av sensortechnologi, programvare, kunstig intelligens (AI) og systemenes evne til lære av feil og å dele læring med andre automatiserte kjøretøy. Det er forventet at det kan ta fem til ti år før automatiserte kjøretøy er trygge og kan fungere i alle veg og trafikkmiljø (Finlay, 2019). I lukkede områder og i kontrollerte miljøer, dvs. med begrenset operasjonelt design domene (ODD), som i gruvedrift, har bruken av automatiserte kjøretøy vært vellykket.

6 Oppsummering: Det samlede risikobildet for automatiserte kjøretøy

6.1 Ulykkesbildet

Flere alvorlige ulykker med Tesla Autopilot har ført til at Tesla har endret og begrenset autopilotfunksjonaliteten på eget initiativ og etter pålegg fra myndighetene. Slike delvis automatiserte kjøretøysystemer på SAE nivå 2 (SAE J3016 2018) med midlertidig kjøreassistanse, tilbys for tiden for serieproduserte biler fra flere produsenter. Dette gjøres imidlertid utelukkende med premisset om at en oppmerksom sjåfør til enhver tid kan ta over og kontrollere kjøretøyet. For helautomatisk kjøring (SAE nivå 4-5) er fører ikke lenger tilgjengelig som sikkerhetsbarriere ved tekniske feil. Å bytte ut menneske, handling og ansvar med programmerte maskiner reiser spørsmål om teknisk, etisk og juridisk risiko, samt utfordringer for produktsikkerhet. Automatisering av kjøretøy kan forbedre sikkerheten, men det kan også innføre ny risiko i grensesnittene mellom det automatiserte systemet og mennesker, hvis mennesket er i kontroll-loopen. Dette er tilfelle med SAE-automatiseringsnivå 2 og 3. Så vidt vi vet fra medier og offentlige ulykkes rapporter har det vært fire dødsulykker over hele verden. Tre av disse er med delvis automatisert (SAE nivå 2) autopilot og en med et mer helautomatisert kjøretøy på offentlige veier (SAE nivå 3). I alle disse dødsulykkene var autopilot påslått, men uten at fører grep inn i tide.

Det finnes lite ulykkesdata fra utprøving av SAE nivå med sikkerhetsoffiser om bord, så langt, men erfaringer med hendelser tyder på at slike ofte er involvert i påkjøring-bakfra-kollisjoner ved signalregulerte kryss, fordi andre bilførere feiltolker de automatiserte kjøretøyenes oppførsel. Waymo hevder de har hatt 22 ulykker i løpet av en toårs periode som ledd i etableringen av en taxi tjeneste i Phoenix Arizona på nivå 4. I de fleste tilfellene hadde andre kjøretøy ansvar for at ulykker skjedde. De automatiserte kjøretøyene har også utfordringer ved innkjøring på motorveg. De har ikke lært den "nudging" atferden vanlige sjåfører aktivt gjør for å se om trafikk på motorveien gir rom og slipper deg inn.

Ulykkesdataene vi hittil har med automatiserte kjøretøy på nivå 2-4 indikerer sikkerhetsrisiko med automatisering relatert til både menneskelige faktorer og tekniske begrensninger, dvs. problemer med deteksjon av hindringer (sensorer), programmering (regelbasert), langvarig oppmerksomhet (menneske i kontroll-loopen), HMI (Autopilot-regler) og misbruk (inkludert ruskjøring), se Tabell 14. Listen kan bli lengre etter hvert som flere data fra ulykker med automatiserte kjøretøy blir rapportert og mer grundig informasjon om ulykkesårsak avdekkes. Med kjøretøy på SAE-nivå 4-5 vil problemer som oppstår og risiko være av mer teknisk karakter, tilsvarende det vi ser fra bruk av robottraller (AGV) i Norge.

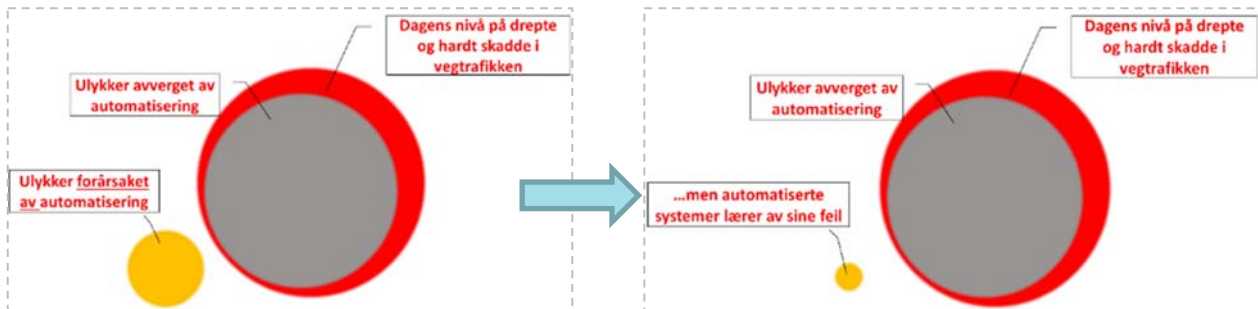
Tabell 14. Ulykkesårsak for automatiske kjøretøy på SAE nivå 2 til 4

Ulykkesårsak og andre forhold som påvirker utfall	Robottraller (AGV)	Nivå 2 ulykker	Nivå 3 ulykker	Nivå 4 ulykker
Sensor relatert	Sensorer ser fri veg	Sensor ser fri veg Sensor klarer ikke å identifisere objekt Sensorer og programvare ikke pålitelig i høye hastigheter (bruker tid på å identifisere, rekker ikke å agere)	Sensor klarer ikke å identifisere objekt Programmert for "comfort mode"	"Regelbasert" programmering
Hastighet	Lav hastighet	Høy hastighet	Høy hastighet	Lav hastighet
Menneske i loopen	Nei	Uoppmerksom fører HMI (Autopilot engagement rules)	Uoppmerksom fører "Safety officer"	Nei
Kommunikasjon til omgivelsene	Ja, snakker og gir beskjed om intensjoner	Nei	Nei	Nei
Misbruk	Ikke relevant	Ja, bruk av Autopilot ved kjøring i rus, når du er søvnig, bruker mobil osv	Ja, mulig	Ikke relevant
Stoppet eller plassert på en farlig måte	Flatt batteri hindrer tilgang til operasjons salen eller heis			Viker ikke for utrykningskjøretøy

Samspill mellom ikke automatiserte kjøretøy og høyt automatiserte vil være en utfordring i blandet trafikk:

- fordi automatiserte kjøretøy oppfører seg uventet (forventingsbrudd) og
- fordi de følger regelverket til punkt og prikke og kanskje for firkantet og
- fordi algoritmen i *deep learning* (AI-metode) system kan forsterke uheldig atferd hvis de lærer uheldig atferd av safety officer ombord eller ved observasjon av andre kjøretøy

Utvikling innen sensorer og kunstig intelligens (AI og spesielt innenfor *deep learning*) vil være viktig for å heve dagens automatiserte kjøretøy opp på et høyere nivå som tillater høyere hastigheter og bruk i alle typer trafikkmiljø. Erfaringer fra piloter gir her verdifull input til forbedringer.



Figur 43. Teoretisk risikonivå og AV-er som lærer av sine feil (SINTEF)

Det samlede ulykkesbildet viser at vi må forvente enkelte nye typer ulykker med høyt automatiserte kjøretøy, men langt færre enn med manuelle kjøretøy. I tillegg lærer automatiserte kjøretøy av hver hendelse og kan dele det med andre automatisert kjøretøy (se Figur 43).

6.2 Potensielle konsekvenser av automatisert vegtrafikk

Kunnskap sammenstilt i denne rapporten viser status og skisserer mulige konsekvenser av automatisert vegtransport på kort og lang sikt med samspill mellom automatiserte kjøretøy og andre trafikanter (myke trafikanter og ikke-automatiserte kjøretøy) i en overgangsperiode (hybrid periode). De viktigste områdene diskuteres i påfølgende avsnitt.

Trafikkulykker (færre ulykker)

Amerikanske vegmyndigheter antar at automatiserte kjøretøy kan redusere antall trafikkulykker med 90% ut fra argumentet om at ca. 90% av alle ulykker skyldes menneskelige feil. Automatikken er langt mer pålitelig, den sovner ikke bak rattet, den kjører ikke i ruset tilstand, den kan reagere og bremse langt raskere enn mennesket og den er årvåken til enhver tid. I USA kan det bety 30.000-40.000 sparte liv i året. Norge har allerede verdens beste trafiksikkerhet med færrest drepte pr 100.000 kjørte km. Oversatt til norske forhold antas automatiserte kjøretøy å kunne gi 100 færre drepte pr år. Dette er kanskje ikke realistisk siden vi allerede er nær 100 drepte i trafikken pr år, men at det kan gi en betydelig reduksjon er hevet over tvil, selv om automatisering kan skape nye typer ulykker.

Kunstig intelligens (AI) og lærende systemer

Det samlede ulykkesbildet viser at vi må forvente enkelte nye typer ulykker med høyt automatiserte kjøretøy, men langt færre enn med manuelle kjøretøy. I tillegg kan flere automatiserte kjøretøy etter hvert lære av hver hendelse og å dele denne informasjonen med andre automatisert kjøretøy. Vi må forvente at det er stort søkelys på ulykker med automatiserte kjøretøy en stund framover, også når vi får ulykker i Norge.

Vi må skille mellom ulykker som kunne ha vært avverget og de som ikke er mulig å avverge enten det er fører eller datamaskin bak rattet. Når Google bilen blir påkjørt i høy hastighet fra siden av en bil som kjører på rødt lys, så er det en ulykke hverken datamaskinen eller en dyktig fører hadde greid å avverge på grunn av sikhindringer, den andre bilens hastighet og tid til kollisjon. Når Google bilen kolliderer ved feltskifte i lav hastighet, på et sted der det ikke er sikhindringer, må det imidlertid stilles spørsmål om sensorteknologien og programvaren i det høyt automatiserte kjøretøyet er utilstrekkelig og bør forbedres.

Det er ikke alltid alle forhold omkring en ulykke er umiddelbart krystallklare. Det er en viktig forskeroppgave å samle kunnskap om slike ulykker og følge utviklingen over tid.

Utkoblinger (disengagements) som mål på sikkerhet

Utkoblingsfrekvens (UF) brukes som indikator for trafikksikkerhet i pilotprosjekt med automatiserte kjøretøy. California Department of Motor Vehicles (DMV) etablerte i 2013 et sett sikkerhetsindikatorer når teknologiselskapene med Google i spissen søkte tillatelse til pilotprosjekt med utprøving av automatiserte kjøretøy på offentlig veg. Hensikten var å regulere og ivareta sikkerheten for alle trafikanter, samt å etablere et system som kunne følge utviklingen innen systemsikkerhet og funksjonalitet for automatiserte kjøretøy. Systemet som DMV etablerte er basert på årlig selvrapporing av ulykker fra selskapene. UF indikerer hvor ofte et kjøretøy byttet fra automatisert til manuell modus. Denne indikatoren fanger ikke opp forbedringer i programvare eller virkningen av forbedringer på tilstrekkelig måte.

Historisk sett har industrien brukt utkoblingsfrekvens pr km som mål på fremgang. Men utkoblingsrate på 100 mil kjørt i et flatt, tørt område der det ikke er andre biler eller myke trafikanter og få kryss, er ikke sammenlignbart med å kjøre 100 mil i et travelt og komplekst bymiljø.

Det betyr ikke at utkoblinger ikke har nytte som indikator. Det er to typer utkoblinger:

1. Reaktive utkoblinger (RU), der en sikkerhetsoperatør kobler ut systemet fordi de tror en farlig situasjon kan oppstå, og
2. Proaktive utkoblinger (PU), der en sikkerhetsoperatør proaktivt kobler ut i forkant av en situasjon på veien som leverandøren vet systemet ikke har blitt lært å håndtere.

Teknisk hastighet er et bedre mål for fremgang funksjonelt og sikkerhetsmessig fordi det fanger opp fremskritt gjort på kjerneteknologien. Når nye versjoner av programvaren har bestått disse testene, antas det at de presterer bedre enn forgjengerne.

Svekker kjøre-evne

Automatisering av kjøreoppgaven vil over tid svekke manuelle ferdigheter. Vi passiviseres, og ved innføring av automatiserte kjøretøy på SAE nivå 3 der føreren må forvente å ta over kontroll i visse situasjoner, kan vi rett og slett oppleve en utvikling der førere hverken er i stand til å kontrollere kjøretøyet eller reagere raskt nok. Det er grunnen til at en rekke teknologibedrifter og bilprodusenter hopper over SAE nivå 3 og heller sikter seg inn mot nivå 4-5.

Samspill med myke trafikanter

Automatiserte kjøretøy vil i prinsippet stoppe for alle hindringer (inkludert myke trafikanter). I bytrafikk kan dette potensielt stanse alle selvkjørende i perioder med stor andel fotgjengere og syklister. For å løse opp dette samspillet må kanskje automatiserte kjøretøy lære seg å kommunisere. Det er foreslått at de skal utrustes med Smiley's som uttrykker emosjonelt om de vil la deg passere eller om de har det travelt og må få prioritet. En annen løsning er å gi de et språk slik de autonome transport-trallene har i gangen på St. Olavs hospital i Trondheim. I Sverige er det utviklet en prototyp av et kommuniserende system basert på LED lamper i overkant av frontruten. Målet er å teste om prototypen er lett å forstå og om den gjør fotgjengere tryggere i samspill med selvkjørende kjøretøy. Prosjektet er et samarbeid mellom Interactive Institute Swedish ICT, Viktoria Swedish ICT, AstaZero, Autoliv, Högskolan i Halmstad, Semcon, SAFER, Viscando, Volvo Cars, og Volvo Trucks.

Misbruk

Alle tekniske systemer kan potensielt hackes og misbrukes – særlig trådløse systemer, som er enklere tilgjengelig. Ny teknologi møtes alltid med skepsis. Det kan være sunt, men også være uheldig og hemme utviklingen. Uheldig bevisst atferdstilpasning (misbruk) er f.eks. bruk av autopilot til ruskjøring, å se film, bruke mobilen eller aktivere den fordi du som fører er for søvnnig til å følge med på trafikkbildet.

6.3 Erfaringer fra SmartFeeder-pilotene

Erfaringer fra norske piloter med selvkjørende minibusser (maks 12 passasjerer) under utvikling til SAE nivå 4, men som i praksis foreløpig er på SAE nivå 3, viser at det hverken har vært dødsulykker eller politirapporterte ulykker. Slik sett er det forsikringsulykker og rapporterte hendelser som kan gi en indikasjon på sikkerhetsnivået. Det har foreløpig ikke skjedd hendelser der automatiserte kjøretøy har skyld. Testingen har vært forsiktig. Hastigheten har i den første fasen vært i størrelsesorden 12-15 km/t. Samtidig har testingen foregått i komplekse og krevende trafikkmiljøer som i bytrafikk med mange biler, men også fotgjengere og syklistene. Selv om det er serieproduksjon av disse selvkjørende bussene så er de enda på et tidlig utviklingsstrinn og kan ennå ikke kjøre uten en sikkerhetsoperatør ombord. Men den første tillatelsen til forsiktig utprøving uten sikkerhetsoperatør om bord er nå innvilget. I en del piloter er også trafikkreguleringer endret for å gi de selvkjørende bussene prioritet. Det er slik sett ikke overaskende at det ikke har vært alvorlige hendelser i første pilot fase (2018-2020).

På Forus har det ikke vært verken ulykker eller alvorlige hendelser. På Fornebu rygget en varebil på den selvkjørende bussen som sto stille. Det ga mindre materielle skader. På Gjøvik har det vært mekaniske problemer med tre havari der differensial sviktet. På Kongsberg har det også vært materielle problemer med fire havari av differensial (foran og bak på begge bussene). I Oslo (Ruter) ble det registrert en påkjørsel av taxi under kjøring i manuell modus. Flere av operatørene melder om utfordringer i samspillet med andre trafikanter, og da særlig uheldige forbikjøringer fra utålmodige bilister.

På Kongsberg der de selvkjørende bussene blant annet er gitt prioritet i lyskryss, er de selvkjørende bussene nå en del av det ordinære kollektivtilbudet til Brakar.

7 Diskusjon

Autonome kjøretøy har hatt en rivende teknologisk utvikling siden den første selvkjørende minibussen på SAE nivå 4 ble demonstrert i gatene mellom Studentersamfundet og St. Olav Hospital i Trondheim i 2009. De håndterer flere og flere trafikale situasjoner og er blitt bedre og bedre til å gjenkjenne statiske og bevegelige objekter i trafikkbildet. Korrekt gjenkjenning er grunnleggende for at automatikken skal ta riktige beslutninger og ha evne til å håndtere uventede situasjoner på en sikker måte.

7.1 Sikkerhet for selvkjørende minibusser under utprøving i Norge

Det har hittil ikke vært alvorlige hendelser eller ulykker med selvkjørende minibusser uten ratt og pedaler under utvikling til SAE nivå 4 i Norge. Dette til tross for omfattende utprøving på norske veier og gater i fem piloter. En forklaring kan være at utprøvingen har skjedd med sikkerhetsoperatør (bussvert) om bord, og på denne måten ikke er en "ekte SAE nivå 4", jfr. kapittel **Error! Reference source not found.** Operatøren har som oppsummert i 3.4.3 grepet inn en rekke ganger og kan på denne måten ha avverget ulykker.

Samtidig er det viktig å merke seg at den norske utprøvingen med selvkjørende minibusser i hovedsak har skjedd i en pilot fase og ikke i regulær rutetrafikk, bortsett fra de to siste månedene vi har med registreringer fra Kongsbergpiloten. Det er også viktig å ta med i vurderingen av sikkerhet at de selvkjørende bussene i Norge og internasjonalt opererer i lave hastigheter inntil 20 km/t og at de i de fleste tilfeller har en sikkerhetsoperatør (bussvert) om bord som kan gripe inn og stanse kjøretøyet mykt eller brått når de ser det er nødvendig. Sikkerhetsmessig har det vært fornuftig at selvkjørende minibusser i en pilotfase opererer i lave hastigheter med en person som kan gripe inn om nødvendig.

Vi har ikke mulighet til å skille i datasettet mellom inngrep fra operatør som har skjedd under en demonstrasjon av funksjonalitet for presse, myndigheter eller andre interessenter og inngrep fra operatør som

har skjedd under regulær rutetrafikk. Operatørene kan også ha fått ulik opplæring og ha hatt ulik terskel for å gripe inn.

Vi vet fra videopptak og observasjoner Transportøkonomisk institutt (TØI) har gjort på Kongsberg i en tidlig fase, innenfor *Autobus* prosjektet, at en del ungdommer har lekt seg med å kjøre tett opp til og krysse rett foran de selvkjørende bussene. Denne leken og utprøvingen er med i vårt datasett hvis det har forårsaket bråstopp initiert av det automatiserte kjøretøyet eller er registrert som en softstopp initiert av operatør. I datamaterialet for registrerte bråstopp initiert av det automatiserte kjøretøyet, kan det være en større andel stopp som skyldes at trafikanter har vært nysgjerrige på det nye automatiserte kjøretøyet, slik TØI har observert på utvalgte steder langs pilotlinjene, med videopptak og registreringer av hendelser sett utenfra. Rapportering fra *Autobus* prosjektet foreligger ikke ennå, men foreløpige observasjoner fra prosjektet ble presentert på konferansen Human Explorer i Brussel høsten 2019.

Vi vet også at Ruter daglig observerte en syklist med Go-Pro kamera som syklet rett mot Navya-bussen i området ved Akershus festning. Syklisten sluttet med det etter en samtale med Ruter hvor han ble invitert med på en tur i den selvkjørende bussen sammen sin familie. Til tross for slik usikkerhet i datamaterialet fra de norske automatiserte kjøretøyene på SAE nivå 4 så er det innsamlet en betydelig mengde data fra kjøretøyene og samlet gir de en første pekepinn på sikkerhetsnivået.

Internasjonalt har selvkjørende minibusser på tilnærmet SAE "nivå 4" vært involvert i to kjente uhell med materielle skader. I begge tilfellene har de selvkjørende minibussene ikke juridisk sett skyld i ulykken, Det er likevel tidlig å konkludere bastant om sikkerhetsnivået. Hittil har selvkjørende minibusser på SAE "nivå 4" kjørt ca. 62 000 km på norske veier og gater. Trafikksikkerhetsmessig måles vanligvis risikoen som antall drepte eller skadde per million personkilometer.

Teknisk sett er alle de automatiserte minibussene under utprøving i Norge på SAE nivå 4. Det er imidlertid viktig å merke seg at vi her diskuterer "*Norgesvarianten*" for nivå 4 med sikkerhetsoperatør ombord. Forutsetninger for å kunne hevde at kjøretøyet er på nivå 4 innebærer f.eks. at bussen ikke stopper hvis gresset i vegkanten blir for høyt, eller må svinge utenom feilparkerte biler. Dette er også en erfaring fra den sveitsiske utprøvingen på tilnærmet SAE nivå 4 i byen Sion, der de høyt automatiserte bussene stopper for overhengende grener i kjørefeltet. Dette understreker behovet av å presisere en nøyaktig beskrivelse av hvilke betingelser de høyt automatiserte kjøretøyene er designet for, slik at utenforstående kan forstå hvilke forutsetninger som gjelder – og slik at det er mulig å sammenligne mellom flere prosjekter på samme SAE-nivå. Dette beskrives i SAE som Operational Design Domain (ODD).

Det er stor forskjell på en buss som får beskjed om å kjøre fra A til B i et gatenett i en by med parkering, trafikksignaler, stopp- og vikepliktsregler og svingeforbud, og en buss som kjører som en trikk på usynlige skinner hvor den er "skånet" for mange utfordrende situasjoner. Det siste er tilfelle i en nederlandsk utprøving av selvkjørende minibusser på SAE nivå 4 i Rivium. Begge eksemplene kan være på nivå 4, men det er meget vanskelig å sammenlikne mht. modenhet, sikkerhet, funksjonalitet, anvendelighet osv. uten henvisning til ODD.

Vi bør i større grad kreve at leverandørene skal spesifisere ODD og at disse betingelsene inkluderes i rapporter fra utprøvinger og pilotstudier. Dette vil blant annet gi et bedre sammenligningsgrunnlag mellom ulike piloter/prosjekter.

Kongsberg er den første norske byen og en av de første i verden som har erstattet en vanlig buss på en linje i byen med to selvkjørende minibusser. Selv om det fungerer rimelig bra, så er det nødvendig å øke hastigheten dersom slike tjenestetilbud skal bli konkurransedyktig enten det er med små selvkjørende minibusser eller store automatiserte busser med kapasitet til 50 passasjerer. Dette vil kreve en grundig

analyse av tiltak for å oppnå akseptabel sikkerhet ved økt hastighet. Et av tiltakene som har vært foreslått er å opprette en kontrollsentral for overvåkning og fjernstyring av automatiserte kjøretøy. En slik kontrollsentral er planlagt tilknyttet etablering av et tilbud med selvkjørende minibusser på Øya i Trondheim, og blir viktig både for sikker ferdsel og for å sikre effektiv trafikkavvikling. En lignende kontrollsentral er også planlagt for kontroll, overvåkning og fjernstyring av autonome ferger som tas i bruk mellom Ravnkloa og hurtigbåt terminalen i det ytre havnebassenget i Trondheim. Slike kontrollsentraler kan i prinsippet samordnes på tvers av transportmodi.

Cooperative Intelligente Transportsystemer (C-ITS) ses også på som et virkemiddel som kan øke sikkerhet og effektiv trafikkavvikling ved innføring av høyt automatisert kjøretøy på SAE nivå 4. Eksempelvis ved å sende varsel om risikoforhold utenfor rekkevidde av det automatiserte/autonome kjøretøyets sensorer (maks 200m i dag), varsle om utrykningskjøretøy og forbedre samspeillet med andre trafikanter.

7.2 Sikkerhet for automatiserte kjøretøy på SAE nivå 2 - 3

Det er to sentrale trekk i utvikling av høyt automatiserte kjøretøy innen vegtrafikk. Det ene er utvikling av selvkjørende privatbiler. Det andre er utvikling av selvkjørende minibusser for å forbedre og effektivisere kollektivtrafikk, jfr. *Mobility as a service* (MaaS), og etterspørselsstyrte dør til dør tjenester, til-fra-kollektivknotepunkt.

Vi ser at den teknologiske utviklingen skjer raskest i privatbilsegmentet. Automatiserte kjøretøy i privatbilsegmentet opererer i normale hastigheter og uten tilrettelegging av fysisk infrastruktur. Denne utviklingen innen automatiserte privatbiler forteller oss noe om hvor raskt vi kan forvente at også høyt automatiserte kjøretøy innen kollektivtrafikk kan operere i normalt høye hastigheter. I det perspektivet er det interessant å se på sikkerhetsmessig status for automatiserte kjøretøy på SAE nivå 2-3.

På den bakgrunn blir de et vindu inn i en framtid der også de selvkjørende bussene på SAE nivå 4 kan operere i normale hastigheter.

Vi ser at det internasjonalt har vært en del alvorlige ulykker og dødsulykker med delvis automatiserte kjøretøy på SAE nivå 2-3. I alt fem dødsulykker med Tesla (SAE nivå 2) og en med Uber (SAE nivå 3).

Det er mye vi kan lære av Tesla-ulykkene på et lavere automatiseringsnivå (SAE nivå 2). Cadillac og Mercedes har også automatisering som ligner på Tesla sin autopilot rent funksjonelt, men de har regulert og begrenset bruksområdet (Operational Design Domain) for denne typen autopilot til kun bruk på godkjente motorvegstrækninger uten vegarbeid. Dette reduserer klart eksponering og risiko ved bruk av denne typen Autopilotfunksjonalitet for førere av andre bilmerker. Vi ser også at Tesla i stor grad baserer sin Autopilot på input fra radar, mens de andre bilmerkene baserer seg på Lidar. Det er ifølge Tesla fordi Lidar foreløpig er en forholdsvis kostbar sensor. Det skjer mye utvikling og forbedring i både ytelse og funksjonalitet både for radar og Lidar. De vil nok nærme seg hverandre i både ytelse og funksjonalitet med tiden, slik at forskjeller vi ser i dag på sikt vil viskes ut.

Det er to typer feil som er verd å merke seg, som har ført til alvorlige ulykker eller hendelser med automatiserte kjøretøy på SAE nivå 2 - 3, AGV-er og selvkjørende minibusser som utprøves i Norge:

For det første oppstår ulykker og hendelser på grunn av kjøretøyenes manglende kunnskap om sine egne dimensjoner (*sense of self*). Det ser vi i to dødsulykker med Tesla, der de på autopilot uten antydning til å bremse kjører inn i siden av vogntog og får taket skrellet av. Vi ser det i ulykker med robottraller (AGV-er) som kjører under trappetige som de river ned. I alle disse ulykkene spiller området sensoren dekker vertikalt en sentral rolle. Så lenge sensoren, enten det er radar eller Lidar, ikke dekker et tilstrekkelig område kan systemet se klar bane og åpen veg videre, selv om et vogntog eller en trappetige sperrer vegen.

Den andre typen hendelser er *umotivert stans (fantombremsing)*. Det ser vi med en rekke bilmerker med både autopilot og automatiske nødbremsesystem (AEB), samt med selvkjørende minibusser under utprøving i Norge som tilsynelatende umotivert bremses kraftig ned. Både Teslaeiere og eiere av andre bilmerker kan oppleve umotivert stans (*bråbrems*) ved kjøring under lave bruere og innkjøring til tunnel eller om et vogntog kommer nær i slak sving på smale veier. Under prøvetur med selvkjørende minibuss i Sion opplevde vi at den bråstoppet for overhengende greiner fra trær. Greiner en bussjåfør ikke ville brydd seg om å stanse for. De stanser også brått for gress, stolper og andre objekter langs traséen de kjører.

For personbiler kan slik umotivert stans i høye hastigheter øke fare for påkjøring-bakfra-ulykker og kjedekollisjon. For den type selvkjørende minibusser som prøves ut i Norge kan det utgjøre en risiko for passasjerer i bussen om de ikke har setebelte. Det viser også utfordringer med å detektere hindringer i høyden. I det ene tilfellet er det viktig å oppdage en trailer på tvers av vegen og i det andre tilfellet bør en lav bru eller inngang til tunnel ignoreres. Minibussene har en sensor plassert høyt oppe foran på bussen, det kan forklare at de stopper brått for overhengende greiner. Sensorer på automatiserte privatbiler er som regel plassert lavt ned i grillen på kjøretøyet. Slik sett påvirker også plassering av viktige sensorer evnen til å oppdage både hindringer som er reelle farer og hindringer som ikke utgjør en fare.

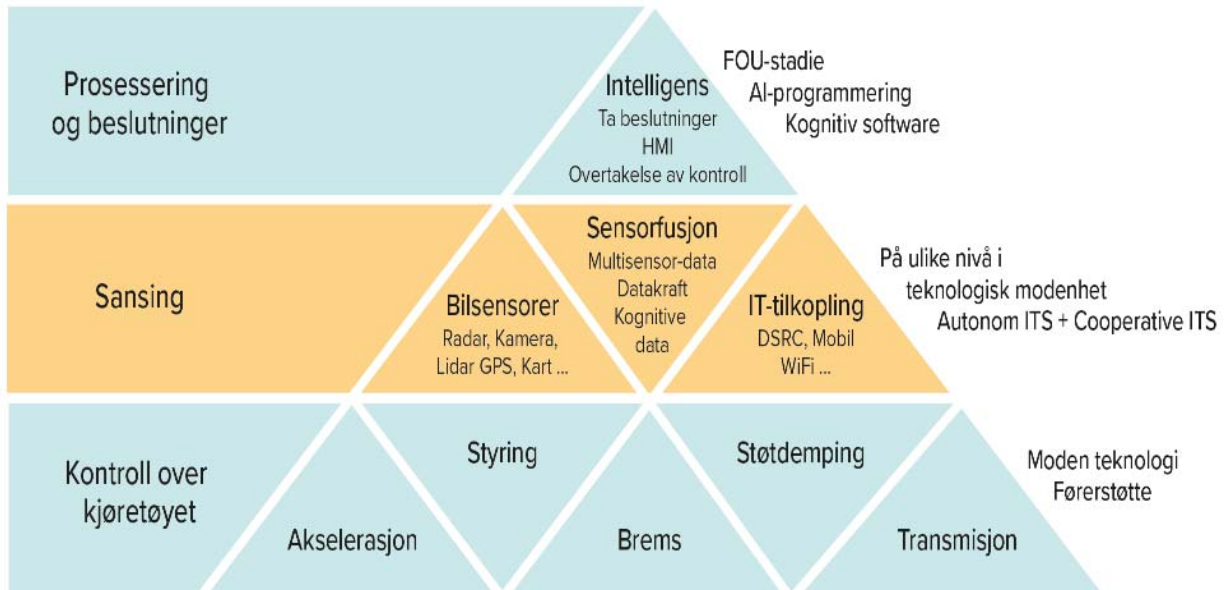
Amerikanske ulykkesanalyser av dødsulykker tyder også på at navnet på funksjonen (Autopilot) kan ha påvirket tilliten til systemet og slik sett medvirket til ulykker på grunn av overdreven tro på systemet og manglende kunnskap om begrensinger og funksjonalitet.

En studie av Teslaulykker utført av amerikanske myndigheter (NHTSA 2017) viser at Tesla har 40% mindre ulykker enn tilsvarende bilmerker¹. Denne studien er imidlertid omstridt. Selv om det er gjort betydelige fremskritt i løpet av det siste tiåret for å gjøre automatiserte personbiler, robottaxi og selvkjørende minibusser på SAE nivå 2-4 trygge, er det fremdeles sikkerhetsmessig viktige mangler ved teknologien som kan og bør forbedres. Eksempler på problemer med automatiserte kjøretøy:

- Kritiske blindsoner og blinde flekker som gjør at de enten ikke ser objekter eller ser fri veg
- Sensorområdet horisontalt og ikke minst vertikalt må utvides
- Sensoropløsning må forbedres
- Evne til å gjenkjenne og tolke bevegelige og statiske objekter i trafikkbildet må forbedres
- De er ikke raske nok til å gjenkjenne objekter og reagere i høye hastigheter
- De har ingen ide om egen utstrekning (bredde og høyde)
- De mangler evne til å kommunisere intensjon om egen atferd til andre trafikanter
- De er dårlige på fletting, innkjøring på motorveg og tolkning av vikeplikt
- De mangler evne til å varsle, forhandle om og kommunisere egne intensjoner
- De mangler evne til å vike for utrykningskjøretøy
- De bremses unødvendig for ofte (falsk positiv vs. falsk negativ) fordi området for sikker ferdsel er for trangt /strengt definert eller fordi teknologien ikke er dynamisk og tilpassningsdyktig nok

For sikker ferdsel i høye hastigheter er det ennå en del byggesteiner i realiseringen av automatiserte kjøretøy: Fra de mer grunnleggende byggesteinene som gjelder kontroll over kjøretøyet til mer avanserte systemer for sansing og endelig byggesteiner i toppen av pyramiden for prosessering og beslutninger (*Figur 44*).

¹ <https://techcrunch.com/2017/01/19/nhtsas-full-final-investigation-into-teslas-autopilot-shows-40-crash-rate-reduction/2017/01/19/nhtsas-full-final-investigation-into-teslas-autopilot-shows-40-crash-rate-reduction/>



Figur 44. Modenhetsnivå for byggesteiner i realiseringen av automatiserte kjøretøy

Utviklingen som ligger til grunn for realiseringen av automatiserte kjøretøy har foregått over et langt tidsrom og i etapper. Først har fokuset vært på teknologi og systemer som kontrollerer kjøretøyet i lengderetningen og sidevegs, med kontroll av akselerasjon, bremsing og styring med mere. Dette er såkalte førerstøttesystemer – en moden teknologi som har vært på markedet i flere tiår. Derneft har fokus vært på sensorsystemer. Det har også vært en rivende utvikling av kommunikasjonssystemer og teknologi som sørger for at kjøretøyet er oppkøplet til internett og/eller sentralsystemer som leverer ulike ITS-tjenester og som er pålogget til enhver tid. Det har vært søkelys på samvirke og koordinering av informasjon fra ulike sensorsystemer. Denne teknologien er på ulike nivå i modenhet. Den siste byggesteinen er kunstig intelligens og det som kalles *Kognitiv programvare*. Dette er teknologi og programvare for dataprosessering og beslutning av kjøretøyetshandlemåte. Denne teknologien og programvaren har en kort historie og har ikke vært utprøvd på veg før Google startet sin utprøving av selvkjørende kjøretøy i Nevada i 2012.

Kroppsspråk eller andre visuelle signaler som for eksempel hva en person bærer på, kan gi viktig informasjon når du tar beslutninger i trafikken. Hvis noen skynder seg mot gaten mens de snakker i telefonen, kan du konkludere med at de sannsynligvis har søkelys på andre ting, og ikke på de trafikale omgivelsene. Det fornuftige er da å senke hastighet, fortsette med forsiktighet og være klar til å bremse. På samme måte, hvis en fotgjenger står ved et vegkryss og ser til begge sider - da vet du at de tenker å krysse vegen og at de sannsynligvis er klar over og forventer kryssende trafikk, se *Figur 45*. Tegn til at de vil gå ut i vegen er tegn til deg om at du bør stoppe. Som førere identifiserer vi lett gjenstander og trafikanter rundt oss og du gjør stadig vurderinger om hva andre trafikanter tenker å gjøre.



Figur 45, Utfordringer med tolkning av en fotgjengers intensjon i utvikling av kunstig intelligens (AI) for selvkjørende kjøretøy. Kilde NVIDIA

Automatiserte kjøretøy er foreløpig dårlige til å tolke og handle riktig i uventede situasjoner. Programvare for automatiserte kjøretøy må lære en tolkning- og handlingsprosess tilsvarende det gode førere gjør. For automatiserte kjøretøy må det bygges lag på lag med kunnskap inn i programvaren. Dette er lag med dype læringsalgoritmer trent opp til å tolke trafikkbildet og reagere riktig basert på erfaringsdata fra den virkelige verden om atferd i trafikk. Ved å kjøre disse dype lærings-algortimene samtidig, kan kjøretøyet få et mer komplett syn på trafikkomgivelsene. Det kan forbedre sikkerheten.

Det jobbes med to ulike AI strategier. En er å forbedre kjøretøyet forståelse av omverdenen ved at læringsalgoritmer trenes på en rekke bilder av det samme objektet for å gjenkjenne objektet i ulike trafikksituasjoner. Et eksempel er å vise hundrevis av bilder av utrykningskjøretøy slik at programvaren vil kunne oppdage utrykningskjøretøy på egen hånd. Tesla bruker en slik strategi. Hver gang et Tesla kjøretøy bråbremses, fordi kjøretøyet ikke gjenkjenner et objekt, så søkes det opp lignende situasjoner og objekter alle Tesla kjøretøy har erfart, for å forbedre egen AI.

En alternativ strategi er å bruke bilder for innlæring av et læringskonsept for en gruppe lignende situasjoner. Ved å kombinere ansiktsuttrykk med andre kjennetegn, f.eks. om en person holder en kaffekopp, en mobiltelefon eller ser seg om til begge sider, kan programvaren trekke konklusjoner om hvor fotgjengeren fokuserer oppmerksomheten og hvilken atferd som kan forventes. Det vil si stå i ro eller gå ut i veien. Å tolke intensjoner og videre atferd til en fotgjenger er en kompleks serie av prosesseringer vi som mennesker gjør samtidig (parallell prosessering) i trafikken. Automatiserte kjøretøy har ennå utfordringer knyttet til parallell prosessering. I Uber-ulykken der en fotgjenger ble drept, greide ikke systemet å gjenkjenne og beslutte riktig handling, selv om fotgjengeren som leide en sykkel ble oppdaget 20 sekunder før hun ble kjørt ned. Av ulykkesrapporten fra amerikanske myndigheter framgår det at prosesseringen til Uber sitt automatiserte kjøretøy på SAE nivå 3 var seriell og hver prosess tok 6 sekunder. Parallell prosessering og lærende systemer kan redusere tidsbruken og bidra til å øke sikkerheten for automatiserte kjøretøy. Data fra testing i trafikk og/eller fra trafikksimuleringer er en av de grunnleggende elementene i AI systemer som avgjør hvor godt dype nevralt nettverk presterer. De to andre er nettverksarkitektur og optimaliseringsalgoritme (Robertazzi & Li 2020; Kostenko 2017).

Prinsipielt fører mye eksponering i trafikk og mye læringsdata til bedre og mer trafikksikker ytelse. Simuleringer kan være nyttig for å øke trafikksikkerhet, men er begrenset til de situasjoner som den som lager simuleringen kan forestille seg. En strategi som baserer seg på læring og deling av læring fra alle i en

flåte av kjøretøy, kan lære AI systemet å tolke sjeldne objekter og trafikksituasjoner som forekommer sjeldent.

8 Konklusjoner

Utfordringen med å etablere pålitelige estimat for skaderisiko ved innføring av ny teknologi i transportsektoren er at vi sjelden har tilstrekkelig eksponering eller gode tall for eksponering (personkilometer) med den nye teknologien. I tillegg er teknologien i stadig endring. Det kan både forbedre sikkerhet og innføre nye risikofaktorer tilknyttet endringer ved teknologien. Foreløpig har vi begrenset datagrunnlag og kunnskap fra kjøretøy på SAE nivå 2 i autopilot modus. Vi har også begrenset data og kunnskap fra pilotprosjekt og utprøving av kjøretøy på SAE nivå 3-4. Ved å sammenstille kunnskap fra pilotering i alle verdensdeler og fra de 5 pilotprosjektene med høyt selvkjørende minibusser i Norge, ser vi klare tendenser til en utvikling med positiv betydning for trafikksikkerhet.

Selv om det er gjort betydelige teknologiske fremskritt i løpet av det siste tiåret for å gjøre automatiserte kjøretøy trygge, er det fremdeles svakheter ved teknologien. Det kommer frem av rapporterte hendelser og dødsulykker med kjøretøy på SAE nivå 2-4 som er redegjort for i denne rapporten. Selv om det foreløpig er begrenset eksponering for høyt automatiserte kjøretøy, så viser gjennomgangen her at sensorsystemene har kritiske blindsoner og input fra ulike sensorer må koordineres bedre (*sensor fusion*). Oppløsningen på sensorene må forbedres for å kunne oppdage alle relevante hindringer. Samtidig må rekkevidde og området sensorsystemene dekker horisontalt og vertikalt forbedres. I dag kjenner ikke automatiserte kjøretøy sin egen størrelse og utstrekning. Det har medvirket til dødsulykker på SAE nivå 2.

Evnen til å gjenkjenne objekter er mangelfull. Det kommer klart fram i dødsulykken med Uber på SAE nivå 3. Evnen til å tolke atferd og hensikt til andre trafikanter og dermed forutse uventede situasjoner har et stort forbedringspotensial. Det forutsetter bedre AI-system. Mye gjenstår innen utvikling av kunstig intelligens og lærende systemer.

I samhandling med andre trafikanter har automatiserte kjøretøy foreløpig fire klare svakheter

1. De er dårlige på fletting, innkjøring på motorveg og tolkning av vikeplikt
2. De kjenner ikke egen utstrekning (høyde/bredde)
3. De mangler evne til å varsle, forhandle om og kommunisere egne intensjoner
4. De mangler evne til å vike for utrykningskjøretøy

For å kompensere for noen av disse svakhetene kan det i en overgangsfase være fornuftig å etablere et kontrollrom for overvåkning og eventuell fjernstyring av ubemannede og høyt automatiserte kjøretøy på veg.

Automatisering har skapt nye type ulykker som skyldes teknologien, men de hindrer kjøring i ruset tilstand, er ikke uoppmerksomme, søvnige, aggressive, og de følger trafikkregler til punkt og prikke dersom trafikkreglene kan digitaliseres. Selv om de forårsaker nye ulykker vil det skje en stadig forbedring av teknologien, og sikkerhetssystemene har potensiale til å redde oss unna langt flere ulykker enn det den nye teknologien i en tidlig fase eventuelt forårsaker.

Omfattende pilotering i Norge med automatiserte busser viser at det til tross for betydelig eksponering i trafikk ikke har vært alvorlige hendelser. Det har det heller ikke vært internasjonalt med denne typen selvkjørende minibusser.

Utvikling innen sensorer, kunstig intelligens (AI) og lærende systemer (*deep learning*) vil være viktig for å heve dagens automatiserte kjøretøy opp på et høyere nivå som tillater høyere hastigheter og bruk i alle typer

trafikkmiljø. Erfaringer fra piloter gir her verdifull input til forbedringer. Automatiserte kjøretøy kan ta lærdom av hver hendelse og kan dele det med andre automatisert kjøretøy. Slik kan alle automatiserte kjøretøy bli bedre rustet til å håndtere uventede situasjoner på en sikker måte.

Det samlede ulykkesbildet viser at vi må forvente enkelte nye typer ulykker med høyt automatiserte kjøretøy, men langt færre enn med manuelle kjøretøy.

De sikkerhetsrelaterte barrierene for innføring av automatiserte kjøretøy som er drøftet i denne rapporten, er oppsummert i *Tabell 15*.

Tabell 15. Oppsummering av sikkerhetsrelaterte barrierer mot innføring av automatiserte kjøretøy

Barriere mot innføring	SAE 1-3	SAE 4-5	Kommentar	Mulig løsning
Svekker kjøreevne	Ja	Ja	Bare et problem om du veksler mellom manuell og automatisert kjøring	Beholde manuell teknologi og kompetanse
Samspill med myke trafikanter	Greit på nivå 1-2 Problematisk på nivå 3	Problematisk på nivå 4-5	Sensorikk og algoritmer umoden på nivå 3-5	Lærende system (AI) Kommunisere med signal i høy hastighet og tale i lav hastighet
Samspill med vanlige kjøretøy	Greit på nivå 1-2 Uavklart på nivå 3	Har ført til en rekke ulykker på nivå 4 i pilot fase	Ingen ulykker med norske selvkjørende minibusser, men mange med automatiserte biler	Forbedre sensorikk, AI og C-ITS
Teknologien	Moden på nivå 1 Delvis umoden på Nivå 2-3	Umoden sensorikk og evne til å håndtere uventede situasjoner og ekstremvær	Forbedrings potensial: Økt hastighet Økt evne til å håndtere uventede situasjoner Lærende system, Robusthet Liten motorkraft	Forbedre sensorikk, AI og C-ITS
Lovverket	På plass Fører har ansvar	På plass for pilotering Operatør eller operatør har ansvar	Ansvar vil gå over på tjenesteleverandør og teknologi tilbyder når menneske ikke er i loopen	Fjernstyring og overvåkning Geo-Fencing
Misbruk	Mulig Har ført til ulykker	Ikke særlig rom for det	Alle tekniske system kan potensielt misbrukes, f.eks. ved å bruke i ruset tilstand eller se video, spille, tekste	Gode HMI løsninger på nivå 1-3. God info om begrensinger (ODD) og tilstand du kjører i
Hacking	Mulig Er demonstrert	Mulig Er demonstrert	Alle tekniske system kan potensielt hackes, men ingen rapporterte ulykker	Brannmur og programvare-løsninger på alle nivåer
Infrastruktur	Tesla har hatt ulykker der dårlig vegmerking er medvirkende årsak		Samspill med vanlige kjøretøy. Ulykker på grunn av dårlig vegmerking	Forbedre sensorikk, AI og C-ITS og posisjonering

9 Råd og anbefalinger

Basert på grunnlaget fremskaffet i denne rapporten om trafikksikkerhet for automatiserte kjøretøy og erfaringer fra utprøving av selvkjørende minibusser på SAE nivå 4 i Norge, har vi utarbeidet følgende råd og anbefalinger innenfor rammen av SmartFeeder-prosjektet:

Industrien og tjenestetilbydere

- Dokumentere at utvikling og innføring av høyt automatiserte kjøretøy skjer i tråd med prinsipp for ansvarlig innovasjon
- Utarbeide detaljerte og utvetydige spesifikasjoner av kjøretøyets automatiseringsnivå iht. *ISO SAE 22736 ITS – Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles* med spesiell vekt på kjøretøyets operasjonelle virkeområde (ODD Operational Design Domain)

Bilbransjeforbundet, NAF, Trygg Trafikk, Opplysningsrådet for Vegtrafikk, Teknologirådet

- Sikre at kunder, medlemmer og målgrupper får full innsikt i muligheter og begrensninger i kjøretøy med førerassistansesystemer på ISO SAE nivå 1-3.
- Sikre at kunder, medlemmer og målgrupper får full innsikt i hvordan høyt automatiserte kjøretøy (SAE nivå 4-5) fungerer og hvordan vi som førere og myke trafikanter bør samhandle med dem slik at samspillet foregår på en trygg, effektiv og sikker måte

Myndigheter

- Fortsatt ta initiativ til utprøving og pilotering med høyt automatiserte kjøretøy på ISO SAE nivå 4-5 for persontransport og godstransport i Norge. Norge er ledende innen automatisering i skipsfart og ranket som nr. 3 internasjonalt innen vegtransport, etter Nederland og Singapore. Kreve gjennom konkurransegrunnlagene for anskaffelser at leverandører og tjenesteytere utarbeider detaljerte og utvetydige spesifikasjoner av kjøretøyets automatiseringsnivå iht. *ISO SAE 22736 ITS – Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles* med spesiell vekt på kjøretøyets operasjonelle virkeområde (ODD Operational Design Domain)
- Ta initiativ som setter sikkerhet, menneskelige faktorer, ansvarlig innovasjon og ansvarlig innføring av avanserte systemer for førerassistanse (SAE nivå 1-2) på agendaen.
- Regulere ansvarsforholdene for fører, operatør og passasjer for bruk av automatiserte kjøretøyer på ISO SAE nivå 3 – 5 gjennom lover og forskrifter
- Støtte initiativ som setter forbrukerinformasjon, testing og sertifisering av systemer for automatiserte kjøretøy og vegtrafikk på dagsorden
- Øke muligheten til å lære av hendelser og ulykker med automatiserte kjøretøy:
 - a. Med registrering av hvilke førerassistansesystemer kjøretøy har og som var i bruk under hendelser / ulykker. Registrering/ meldeplikt via bilbransjen, forsikringsbransjen og endringer i politiets rutiner og skjema for ulykkesrapportering samt fokus i UAG og Havarikommisjonens etterforskninger og analyser av veitrafikkulykker.
 - b. etablere systemer som sikrer ansvarlig utprøving og innføring av høyt automatiserte kjøretøy etter modell av California Department of Motor Vehicles (DMV)
 - i. Etablere nasjonalt register for alle hendelser med høyt automatiserte kjøretøy (ISO SAE nivå 4-5)

- ii. Etablere rutinemessig observasjon /studier av samspillet mellom høyt automatiserte kjøretøy og andre ikke-automatiserte trafikanter.
 - iii. Støtte forskning som følger og dokumenterer utviklingen
- c. Fortsatt arbeide for internasjonal harmonisering og samordning av initiativ som sikrer forsvarlig innovasjon og innføring av høyt automatiserte kjøretøy for transport av personer og gods på veg i UNECE og lignende fora. Deltakelse i internasjonalt standardiseringsarbeid som eksempelvis SAE og ISO er også et viktig grunnlag for slike initiativ.

10 Referanser

Ainsalu J., Arrfman V., Bellone M., Ellner M., Happamaki T., Haavisto N., Josefson E., Ismailogullari A. Lee B. Madland O. Madzulis R. Muur J. Makinen S., Nousainen V., Pilli-Sihvola E. Rutanen E. Sahala S. Schonfeldt B. Schmolnicki P.M., Soe R.M., Saaski J., Szymanska I. Vaskinn I., and Åman M. (2018). *Review: State of the art of automated buses*. Sustainability 2018, 10, 3118

Altawy, R. & Youssef, A. M. (2016). *Security tradeoffs in cyber physical systems: A case study survey on implantable medical devices*, IEEE Access, vol. 4, pp. 959-979.

Arstechnica (2019) <https://arstechnica.com/cars/2019/02/in-2017-the-feds-said-tesla-autopilot-cut-crashes-40-that-was-bogus/?amp=1>

Bakken T., Holmstrøm, S. Johnsen S.O., Merz M., Grøtli E.I, Transeth A. Risholm P., Storvold R. (2019). *Bruk av droner i nordområdene*. SINTEF rapport 2019: 01284

Benson, A., Tefft, B.C., Svancara, A. M. & Horrey, W. (2018). Potential Reduction in Crashes, Injuries and Deaths from Large-Scale Deployment of Advanced Driver Assistance Systems. AAA Foundation for Traffic Safety.

Bloomberg (2019) Government Innovation. Autonomous Vehicles in Cities. <https://www.bloomberg.org/program/government-innovation/bloomberg-aspen-initiative-cities-autonomous-vehicles/>

Carsten O., Martens M.H. (2018). How can humans understand their automated cars? HMI Principles, Problems and solutions. Cognition, Technology & Work. <https://doi.org/10.1007/s10111-018-0484-0>

CR- Consumer reports (2019). <https://www.consumerreports.org/automotive-technology/car-safety-systems-that-could-save-your-life/>

Dixit V.V. Chand S. & Nair D. J. 2016. Autonomous Vehicles: Disengagements, Accidents and Reaction Times. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168054> J PLOS ONE, Edited by Jun Xu, vol. 11, issue 12, p. e0168054, Beihang University, CHINA

DMV. (2020). Reports of Traffic Accidents Involving an Autonomous Vehicle–OL316. Retrieved from: https://www.dmv.ca.gov/portal/dmv/detail/vr/autonomous/autonomousveh_ol316 Last accessed: 04.03.2020.

Dunn N., Dingus T. And Soccolich M.S. (2019) Understanding the impact of technology: Do advanced driver assistance and semi-automated vehicle systems lead to improper driving behavior? AAA Foundatin for Traffic Safety. <https://aaafoundation.org/understanding-the-impact-of-technology-do-advanced-driver-assistance-and-semi-automated-vehicle-systems-lead-to-improper-driving-behavior/> Last accessed: 04.03.2020.

Dutch Safety Board (2019). Who is in Control? Road safety and automation in road traffic <https://www.onderzoekraad.nl/en/page/4729/who-is-in-control-road-safety-and-automation-in-road-traffic> Last accessed: 04.03.2020.

Elvik, R. and Vaa, T. (2004). The Handbook of Road Safety Measures. Elsevier Science, Oxford

Endsley, M. (2019) "Human Factors & Aviation Safety" Testimony to the United States House of Representatives – Hearing on Boeing 737-Max8 Crashes.

EURO NCAP (2019). *Automated Driving Tests*. <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/safety-campaigns/2018-automated-driving-tests/>

Eriksson, A., & Stanton, N. A. (2017). Takeover time in highly auto-mated vehicles: noncritical transitions to and from manual control. *Human factors*, 59 (4), 689-705.

Fagnant D.J., and Knockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations Transportation *Volume 77*, July 2015, Pages 167-181

Finlay, S. (2019) *Apple's 'Woz' sees autonomous vehicles as long way off*. Webpage: <https://www.wardsauto.com/autonomous-vehicles/apple-s-woz-sees-autonomous-vehicles-long-way> Last accessed: 04.03.2020

Foss, T., 2017, Automatisert kjøring på veg, SINTEF-rapport 2017-00264

Governor's Highway Safety Association (GHSA) 2017. Autonomous vehicles meet humans. Traffic Safety Issues for States. <http://www.ghsa.org/sites/default/files/2017-01/AV%202017%20-%20FINAL.pdf>

Hauer, E. (1997). *Observational Before-After studies in Road Safety. Estimating the effect of Highway and Road Traffic Engineering Measures on Road Safety*. Pergamon.

Hobbs, A., & Shively, R. J. (2014). Human Factor Challenges of Remotely Piloted Aircraft. In 31st EAAP Conference (pp. 5-14).

Høklie, O.I. (2017). *Design av informasjonspanel for Autonom Passasjerferge Milliampere*, Part of Master Thesis NTNU, 2017

IEEE Spektrum (2020). *White paper: Testing is critical for adoption of autonomous vehicles*. Keysight.com <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06408/white-papers/5992-3478.pdf>
Retrieved 30.06.2020
Jenssen, G.D. (2007). *Teknologiske trender, smarte biler, smarte veger og miljøvennlig bytransport*. SINTEF Report.

Jenssen, G.D. (2010). *Behavioural Adaptation to Advanced Driver Assistance Systems: Steps to Explore Safety Implications*. Doctoral thesis. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for bygg, anlegg og transport. 1503-8181; 2010:124.

Gunnar D. Jenssen (2017). *Teknologien endrer samfunnet. Bok kapittel om Autonome kjøretøy*. Norges Tekniske Vitenskapsakademi (NTVA). Fagbokforlaget 2017, pp 195-207. ISBN 978-82-450-2297-1

Jenssen, G.D., Moen, T., Johnsen, S.O. (2019). *Accidents with Automated Vehicles, Do Self-Driving Vehicles need a better sense of self*, 26th ITS Word Congress

Johnsen S.O., Hoem Å., Stålhane T., Jenssen G.D., Moen T. (2018) Risk based Regulation of autonomous systems. ESREL 2018

Johnsen S. O., Bakken T., Transeth A.A., Holmstrøm S., Merz M., Grøtli E.I., Jacobsen S.R., Storvold R. (2020). Safety and security of drones in the oil and gas industry. ESREL paper

Kostenko V.A. (2017). Combinatorial optimization algorithms combining greedy strategies with limited search procedure. Journal of computer and systems sciences

Kulmala R. (2010). Ex-ante safety assessment of intelligent transportation systems. Accident Analysis and Prevention 42 (2010). 1359-1369.

KPMG (2019). *2019 Autonomous Vehicles Readiness Index. Assessing countries' preparedness for autonomous vehicles*. KPMG International. Retrieved from: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/02/2019-autonomous-vehicles-readiness-index.pdf> Last accessed: 04.03.2020.

Moyer, J.D., Eshbaugh, M. & Rettig, J. (2017). Cost analysis of global road traffic death prevention: Forecasts to 2050. *Development Policy Review*, 35(6), 745-757, doi: <https://doi.org/10.1111/dpr.12263>

Navigant Research (2020). <https://www.autonomousvehicletech.com/articles/1634-navigant-research-names-the-leading-companies-developing-automated-driving-systems>

NFAS (2019). Norwegian Forum for Autonomous Ships. Retrieved from <http://nfas.autonomous-ship.org/index-en.html> Last accessed: 28.02.2020

NTSB (2019). National Transport Safety Board- Preliminary report highway hwy19fh008 <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/HWY19FH008-preliminary.pdf>

NHTSA (2017) The National Highway Traffic Safety Administration, Office of Defects Investigation resume PE 16-007. Automatic vehicle control systems, Tesla Model S accident in Florida May 7, 2016. <https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2016/INCLA-PE16007-7876.PDF>

Petritoli, E., Leccese, F. & Ciani, L. (2017). Reliability assessment of UAV systems. IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (METroAeroSpace). 21-23 June 2017, Padua, Italy. doi: [10.1109/MetroAeroSpace.2017.7999577](https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2017.7999577)

Pink O., Becker J., Kammel S. (2015). Automated driving on public roads: Experience in real traffic, in *IT-Information*.

Robertazzi.T.H., & Shi L. (2020) Networking algorithms. SpringerSAE (2018). SAE International standard "J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems." Revised: 2016-06

SAE J3016 (JUN2018), Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. Society for Automotive Engineers, June 2018

Samferdselsdepartementet (2017). Lov om utprøving av selvkjørende kjøretøy. LOV-2017-12-15-112. Retrieved from: LOVDATA - <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2017-12-15-112> Last accessed: 04.03.2020

Statistisk Sentralbyrå (SSB) 2018. Trafikkulykker med personskaade.

<https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/statistikker/vtu> Retrieved 04.03.2020

Tennøe, T., Jenssen, G.D., & Ehde, S. (2003). *Trafikken i 2020*. Sluttrapport fra et Scenarieverksted.

<https://teknologiradet.no/wp-content/uploads/sites/19/2014/07/Sluttrapport.pdf>

Teoh, E. R., & Kidd, D. G. (2017). Rage against the machine? Google's self-driving cars versus human drivers. *Journal of Safety Research*, 63, 57-60

Trent Victor, Marcus Rothoff, Erik Coelingh, Anders Ödblom, Klaas Burgdorf (2017). When autonomous vehicles are introduced on a larger scale in the road transport system: The Drive Me project. Springer, [Automated Driving](#) pp 541-546

Quality Control Corporation (2019). Replicating NHTSA's Extraordinary Safety Claims about Tesla's Autopilot/Autosteer System

http://quality-control.us/nhtsa_autopilot_safety_claims.html

UITP (2013). *Observatory of Automated Metros World atlas report*. International Association of Public Transport (UITP), Brussels

University of Denver, Automated Driving Demonstration Grants, March 21, 2019.

UNECE (2020) <https://www.unece.org/info/media/presscurrent-press-h/transport/2020/un-regulation-on-automated-lane-keeping-systems-is-milestone-for-safe-introduction-of-automated-vehicles-in-traffic/doc.html>

UNECE (2018) ECE/TRANS/WP.29/1140. Reference document with definitions of Automated Driving under WP.29 and the General Principles for developing a UN Regulation on automated vehicles. April 2018.

<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29resolutions/ECE-TRANS-WP29-1140e.pdf>

Vagia, M., Transeth, A. A., Fjerdingen, S. A. (2016). A literature review on the levels of automation during the years. What are the different taxonomies that have been proposed? *Applied ergonomics*, 53, 190-202.

Wang, Y., Zhang, M., Ma, J., & Zhou, X. (2016). Survey on driverless train operation for urban rail transit systems. *Urban Rail Transit*, 1-8.

Walter F., Steinke J., Martens M. and Verwe W.B.(2020) Do engineer perceptions about automated vehicles match user trust? Consequences for design

Transportation Research Interdisciplinary Perspectives 8. DOI: [10.1016/j.trip.2020.100251](https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100251)

Waraich, Q. R., Mazzuchi, T. A., Sarkani, S., & Rico, D. F. (2013). Minimizing Human Factors Mishaps in Unmanned Aircraft Systems. *Ergonomics in Design*, 21(1), 25-32. doi:

<https://doi.org/10.1177/1064804612463215>

Wrobel K., Montewka J. & Kujala P. (2017). Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety. *Reliability Engineering System Safety* 165 doi: 10.1016/j.res.2017.03.029

Yerkes, R. M. & Dodson, J. D. (1908). The relationship of strength of stimulus to rapidity of habit formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18, 459–482.

A Appendix 1

Begreper

Automatisert: Datastyrt maskiner som kan utføre et sett med definerte oppgaver ved å følge spesifikke instruksjoner med minimal eller ingen menneskelig styring eller kontroll innenfor predefinerte miljø. Kjøretøy kan ha ulike grader av automatisering i tråd med standardisering gitt av Society for Automotive Engineers (SAE J3016).

Automasjon: Synonymt med automatisering. Er bruk av ulike kontrollsystem for å styre industri roboter, styre og stabilisere skip, fly og kjøretøy for et sett spesifiserte oppgaver ved å følge spesifikke instruksjoner med minimal eller ingen menneskelig styring eller kontroll innenfor predefinerte miljø.

Autonome: Maskiner, fartøy eller kjøretøy som har intelligens til å ta avgjørelser når de blir møtt med nye eller uventede situasjoner, uten at mennesket er i kontroll loopen. De kan navigere en valgt rute, stoppe for hindringer og vike unna for å unngå kollisjoner. Disse maskinene kan ha evnen til å lære når de møter nye situasjoner. Et autonomt kjøretøy er pr definisjon selvforsynt med den informasjon det trenger for å kjøre trafiksikkert og effektivt fra A til B. Det kan koples opp til vegkantutstyr, andre Kjøretøy og sentralsystemer slik at informasjon utenfor kjøretøyets egne sensorer blir gjort tilgjengelig.

Autonomibegrepet har fått mye interesse og oppmerksomhet de siste tiårene og er av mange betraktet som et naturlig neste skritt i utviklingen av automatisering. Tradisjonelt har begrepet autonom ofte blitt brukt som et synonym til ubemannet, og med denne tolkningen som et autonomt system har slike system eksistert i minst 60 år i form av satellitter, Robottraller (industriroboter) og i form av militære våpensystemer. En nøyaktig og allment akseptert definisjon av autonomi eksisterer imidlertid ennå ikke. Vår definisjon av begrepet er her redegjort for. Samtidig følger vi internasjonale standarder som ikke anbefaler å bruke begrepet Autonomi, men grader av automatisering for kjøretøy innen vegtransport.

Begrepet er opprinnelig gresk og brukt om helt uavhengige bystater. Kritikere av begrepet hevder at høyt automatiserte og selvkjørende biler er ikke autonome. De er tilkoblet: til hverandre, og ofte til infrastruktur (*fleet learning*). Fordelene kan øke med tilkoblingen særlig trafiksikkerhetsmessig og for å effektivisere trafikkavvikling. Enda viktigere: Selvkjørende biler (som "vanlige" biler): er deler av komplekse sosio-tekniske systemer, som begrenser, muliggjør og etterspør nye former for mobilitet og sosialt liv. Disse systemene kan være mer komplekse for høyt automatiserte kjøretøy (ikke mindre) på grunn av avhengighet av tilkoblinger til (private) datainfrastrukturer, offentlig infrastruktur, (nye) normer og regler.

Robottralle (Automated Guided Vehicle; AGV):

En Robottralle (AGV) er et ubemannet, ofte elektrisk kjøretøy som styres av forhåndsprogrammert programvare for å flytte materialer eller gods rundt i et anlegg (industri, lager, sykehus osv.)

Selvkjørende kjøretøy (Self-Driving Vehicle; SDV): Et Selvkjørende kjøretøy er et kjøretøy der drift skjer uten direkte førerinput eller forhåndskonfigurerte skript for å kontrollere styring, akselerasjon og bremsing. Lasere og sensorer oppdager hindringer i kjørefeltet og utløser automatisk stopp av kjøretøyet. Funksjoner for maskinlæring gjør det mulig for kjøretøyet over tid å bli mer effektivt og nøyaktig når det møter nye situasjoner. Merk! SAE J3016 anbefaler ikke bruk av begrepet selvkjørende med følgende begrunnelse: *The meaning of this term can vary based on unstated assumptions about the meaning of driving and driver. It is variously used to refer to situations in which no driver is present, to situations in which no user is performing the DDT, and to situations in which a driving automations system is performing any part of the DDT.* Standarden SAE J3016 eksisterte ikke når arbeidet med loven om selvkjørende kjøretøy ble påbegynt.

Robottraller versus automatiserte kjøretøy

Forskjellen mellom Robottraller (AGV) og automatiserte kjøretøy er ofte misforstått. Hvert system opererer med grunnleggende ulik teknologi. Det gjelder alt fra sansing/oppfatning og programvare for navigasjon til sensorer de har ombord. Derfor har de forskjellig funksjonalitet og mulige anvendelser.

Robottraller (AGVer) er avhengige av styringsenheter som magnetbånd, beacons, strekkoder eller forhåndsdefinerte laserbaner som lar Robottrallene ferdes på faste ruter i et kontrollert miljø.

Unntak finnes der avanserte Robottraller opererer med tilnærmet lik grunnleggende teknologi til høyt automatiserte kjøretøy (eksempelvis i norske sykehus). Automatisert veg og godstransport har opplevd en god utvikling på grunn av rask fremgang i funksjonalitet og kapasitet til sensorer og big data. Neste generasjonsløsninger for automatiserte kjøretøy er disruptive og forstyrrer konvensjonelle Robottralle (AGV) teknologier i og med at de er fordelaktig på flere områder.

SAE International standard “J3016: **Operational Design Domain (ODD)** er et begrep fra SAE (2018). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems.” som beskriver det funksjonelle området det automatiserte kjøretøyet er designet for å operere i. Begrepet har likhetstrekk med termen *operational envelope* brukt i skipsfart som beskriver operasjoner det autonome skipet kan og bør utføre på strategisk, taktisk og operativt nivå. Dette er et dynamisk område beskrevet av Gibson (1958) innen bilkjøring som *area of safe travel*. Area of safe travel er et dynamisk felt rundt kjøretøyet eller skipet som til enhver tid bestemmer videre ferdsel gitt av de preprogrammerte sikkerhetsmarginer kjøretøyet kan operere sikkert under.

Autopilot beskriver en modus der kjøretøyet opererer (styrer, gasser, bremses) uten inngrep fra fører

Forkortelser

ACC Adaptive Cruise Control

ABS Anti-lock Braking System

ADAS Advanced Driver Assistance Systems

AEB Automatic Emergency Braking

AI Artificial Intelligence

C-ITS Cooperative Intelligent Transport Systems

DL Deep Learning

EDR Event Data Recorder (black box)

ESP Electronic Stability Program

Euro NCAP European New Car Assessment Programme

HMI Human Machine Interaction

ODD Operational Design Domain

ITS Intelligent Transportation Systems

SAE Society for automotive Engineers



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no