

BYGGESTEINER I EN DRIFTSORIENTERT TRAFIKKMODELL FOR TUNNELER



Simen A. O. Hansen

Masteroppgave i Samfunnssikkerhet

Det teknisk-naturvitenskapelige fakultet

Våren 2018 Universitetet i Stavanger



Universitetet
i Stavanger



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Master i teknologi - Samfunnssikkerhet	Vårsemesteret, 2018 Åpen
Forfatter: Simen A. O. Hansen (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Ove Njå Veileder: Ove Njå	
Tittel på masteroppgaven: Byggesteiner i en driftsorientert trafikkmodell for tunneler Engelsk tittel: Building blocks in an operation-oriented traffic model for tunnels	
Studiepoeng: 30	
Emneord: <ul style="list-style-type: none">- Trafikkmodell- Tunnelsikkerhet- Systemteori- Risikoindikatorer- Byggesteiner	Sidetall: 54 + vedlegg/annet: 74 Stavanger, 15/6-2018 dato/år

Sammendrag

Det eksisterer et stort antall tunneler i Norge, samtidig er flere nye tunneler under planlegging og konstruksjon. To av verdens lengste undersjøiske vegtunneler vil om få år befinne seg i Norge. Tunnelsikkerhet er altså et tema som i høyeste grad er relevant i dag, og følgende er dette et tema som får mye fokus fra ulike hold. Uønskede hendelser i tunneler kan ha et helt annet konsekvensnivå enn hendelser på åpne veier; tunnelens utforming begrenser tilgjengelighet, fremkommelighet og fluktmuligheter, noe som igjen kan gi utfordringer både med redningsarbeid og håndtering av hendelsene. Av denne grunn er det aktuelt å se på muligheter for å redusere antall uønskede hendelser.

Dette har vært grunnlaget for utformingen av problemstillingen:

«Hva er de viktigste byggesteinene i en driftsorientert trafikkmodell for vegtunneler?»

Formålet med studien har altså vært å undersøke hvordan en kan oppdage og måle avvik i trafikkstrømmen, og uttrykke dette fortløpende ved hjelp av en trafikkmodell.

Dette ble gjort ved å først studere hendelsesdata fra tunnel, for å kunne si noe om hvilke hendelser som faktisk oppstår. Det ble undersøkt hvilke avvik i trafikkstrømmen som kunne gi en indikasjon på økt risiko for disse hendelsene, og med det altså en økning i helhetlig risiko for tunnelsystemet. Videre er disse avvik knyttet sammen med risikoindikatorer som kan måles og beregnes. Byggesteinene representerer en redegjøring for hvordan de ulike faktorer, som regnes som sentrale for det tiltenkte formål, kan måles, beregnes og gis uttrykk for i trafikkmodellen.

Studien konkluderes med at faktorer som må inkluderes som byggesteiner i trafikkmodellen er; Et fundament for modellen som kan utvides med andre byggesteiner; Vurdering av hastigheten til kjøretøy; Kjøretøys plassering i vegbanen; Identifisering av kjøretøytype; Den kjøretekniske tilstanden på kjøretøyene; Inklusjon av eksterne forstyrrelser på trafikkstrømmen; Og en måte å gi uttrykk for den helhetlige risiko i driften av tunnelsystemet. Videre konkluderes det med at de ulike størrelsene i prinsippet kan måles med eksisterende teknologi, men at det er for tidlig å si noe mer konkret om hvilke løsninger som er mest hensiktsmessige.

Forord

Denne oppgaven markerer avslutningen på to spennende og lærerike år på masterstudiet innen Samfunnssikkerhet ved Universitetet i Stavanger.

Med en veldig begrenset kunnskap om tunnelsikkerhet, risikoindikasjon og trafikkmodeller, startet jeg arbeidet med denne masteroppgaven som omhandler akkurat disse fagområdene. Det har følgende vært en veldig krevende prosess, men jeg kom i mål til slutt og det med en nybakt interesse for et nytt fagområde.

Jeg vil rette en takk til alle i Statens vegvesen som har bidratt med informasjon og svar på mine spørsmål, og da særlig Kai Gundersen med sitt bidrag av data.

Jeg vil også rette en stor takk til min veileder, Ove Njå, for gode råd og uvurderlig tilbakemelding underveis i prosessen.

Simen A. O. Hansen

15/6-2018

Stavanger

Innholdsfortegnelse

SAMMENDRAG	II
FORORD	III
FIGURLISTE	VI
TABELLER	VI
BEGREPSAVKLARING	VII
1. INNLEDNING	1
1.1 FORMÅL	4
1.2 PROBLEMSTILLING	5
1.3 FORSKNINGSSPØRSMÅL OG AVGRENSNING	5
2 HVORDAN FORTOLKE TRAFIKKSTRØMSMODELLER I VEGTUNNELER	7
2.1 SYSTEMTENKNING SETT I FORHOLD TIL TUNNELER	7
2.2 RISIKO OG RISIKOINDIKATORER	16
2.3 TRAFIKKMODELLER	18
3 METODE	22
3.1 LITTERATURSTUDIE	23
3.2 VALG AV STUDIEOMRÅDE	23
3.3 DATAINNSAMLING OG ANALYSE	24
3.4 FREMGANGSMETODE FOR IDENTIFISERING AV BYGGESTEINER.....	26
3.5 STYRKER OG SVAKHETER.....	27
4 BYGGESTEINER	28
4.1 SYSTEMBESKRIVELSE BYFJORDTUNNELEN.....	28
4.2 TEKNOLOGISKE LØSNINGER	30
4.3 NORMALSITUASJONER OG RESTRIKSJONER	35
4.4 RIF, AVVIK OG RISIKOINDIKATORER	39
4.5 BYGGESTEINER I TRAFIKKMODELLEN	43
5 DISKUSJON	51
6 KONKLUSJON	54
7 REFERANSELISTE	55
8 VEDLEGG	58
8.1 DATA BYFJORDTUNNELEN	58

8.2	DATA OSLOFJORDTUNNELEN	59
-----	------------------------------	----

Figurliste

FIGUR 1: VERDIKJEDE FOR INFORMASJONSFLYT (TRONSDEN, 2018).....	3
FIGUR 2: FORESLÅTT VERDIKJEDE FOR INFORMASJON (MODIFISERT ETTER TRONSDEN, 2018)	4
FIGUR 3: KONTROLLSIRKEL (LEVESON 2011).....	10
FIGUR 4: INNGANGSPORTAL TIL BYFJORDTUNNELEN PÅ SOKN. (PHOTO: JARLE VINES (CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION SHAREALIKE 3.0))	13
FIGUR 5: MENNESKELIG KONTROLLER OVERORDNET EN AUTOMATISERT KONTROLLER I ET FYSISK SYSTEM (LEVESON, 2011)	14
FIGUR 6: FLYTSKJEMA SOM VISER PROSSESEN GJENNOM STUDIEN	22

Tabeller

TABELL 1: EKSEMPLER PÅ AKTIVE OG PASSIVE KONTROLLTILTAK.	11
TABELL 2: VERTIKALKURVATUR BYFJORDTUNNELEN. TALLENE ER HENTET DIREKTE FRA VEGKARTTJENESTEN OG NOE(N) OVERLAPPING/MANGLER FOREKOMMER. (KILDE: VEGKART.NO)	28
TABELL 3: RESTRIKSJONER I TUNNELSYSTEMET VED NORMALT SITUASjonsBILDE.	39
TABELL 4: NIVÅER AV ALVORLIGHETSGRAD FOR RISIKOPÅVIRKENDE FAKTORER.....	39
TABELL 5: RISIKOPÅVIRKENDE FAKTORER OG TILHØRENDE ALVORLIGHETSGRAD OG RESTRIKSJONER.....	40
TABELL 6: SENTRALE RESTRIKSJONSBRUDD OG TILHØRENDE AVVIK OG RISIKOINDIKATORER PÅ DISSE.....	42

Begrepsavklaring

AID	Automatisk hendelsesdeteksjon
Algoritme	<i>I matematikk og databehandling er en algoritme en fullstendig beskrivelse av fremgangsmåten for løsning av en beregningsoppgave eller annen oppgave</i> (SNL, 2018). I denne oppgaven brukes en bredere definisjon av begrepet algoritme, basert på Leveson (Leveson, 2011), hvor algoritmer er både skrevne instruksjoner for maskinvarekontrollere (hardware/software) og prosedyrer tiltenkt for menneskelige kontrollere.
Avvik fra normal trafikkstrøm	Def. i denne studien: Brudd på gitte restriksjoner.
Byggestein	En grunnstein i en modell som enten beskriver en størrelse og hvordan denne størrelsen kan måles/modelleres/uttrykkes, eller beskriver en fundamental del/virkemåte av trafikkmodellen.
Headway	Det eksisterer ikke (kjent for forfatter) et norsk ord for headway, og for denne oppgaven defineres det som avstanden, i tid eller distanse, mellom to kjøretøy (målt fra støtfanger bak på hvert kjøretøy).
Helhetlig risiko	Definisjon i denne studien: Den fare uønskede hendelser i trafikkstrømmen utgjør for den normale flyten i trafikkstrømmen.
Input	Data/informasjon som går inn i en modell.
ITS	Intelligente transportsystem
Modell	En tilnærming av virkeligheten. Kan være en persons egen modell, altså oppfatningen hans/hennes av hvordan

	<p>virkeligheten er. Kan også være en konstruert modell som skal representere hele eller deler av en virkelighet, eksempelvis en globus som representerer jordkloden, eller en trafikkmodell som representerer trafikkstrømmen i et gitt område.</p>
Output	<p>Data som hentes ut fra en modell; altså den informasjonen modellen gir uttrykk for.</p>
Parameter	<p>En parameter forstås som en variabel som kan inneha ulike verdier, men hvor denne verdien er gitt på forhånd og dermed ikke endrer seg dynamisk i modellen. En parameter kan eksempelvis, innen statistikk, være forventningsverdi (μ) eller standardavvik (σ).</p>
Risikoindikator	<p>Definisjon i denne studien: Målbare faktorer i avvik.</p>
Risikopåvirkende faktor	<p>Definisjon i denne studien: Uønskede hendelser som utgjør en økning i helhetlig risiko.</p>
Ulykke	<p>En ulykke defineres som en ikke-planlagt og uønsket hendelse som resulterer i tap (tap kan være menneskeliv eller skader, skade på eiendeler, forurensing av miljø, etc.) (Leveson, 2011).</p>
Variabel	<p>Data som er spesifikke for et prosjekt, eller som typisk endres i forbindelse med prosjektet, for eksempel trafikkintensitet og signaltider (Vejdirektoratet, 2010). Variabel defineres i oppgaven som en størrelse kan ta ulike verdier, og variabler benyttes for å beskrive hvordan en risikoindikator måles (fysisk størrelse, enhet på denne størrelsen). Binære variabler har kun to mulige verdier, 0 og 1. Disse verdiene benyttes her som ja/nei hvor variabelen beskriver en faktor med to mulige tilstander.</p>
VTS	<p>Vegtrafikksentral – Det er fem VTS i Norge: VTS Nord – Mosjøen, VTS Midt – Trondheim, VTS Øst – Oslo, VTS Sør – Porsgrunn, og VTS Vest – Bergen.</p>

ÅDT	Årsdøgntrafikk – Gjennomsnittlig daglig antall kjøretøypasseringer, beregnet fra årstotal.

1. Innledning

Det eksisterer allerede over 1100 tunneler i Norge; over 30 av disse er undersjøiske og flere er under konstruksjon. I Rogaland er Ryfast-prosjektet godt underveis og dette inkluderer Ryfylketunnelen, verdens (per 2018) lengste undersjøiske veitunnel. Samtidig er Rogfast-prosjektet i planleggingsfasen og ved ferdigstillelse vil dette sette ny lengderekord for undersjøiske veitunneler. Norge har allerede et stort antall tunneler, og flere er planlagt bygget, tunnelsikkerhet er derfor en høyaktuell problemstilling.

Nødvendigvis vil flere tunneler gi større sannsynlighet tunnelrelaterte hendelser, og bare de siste årene har det inntruffet flere uønskede hendelser av større omfang. Eksemplene nedenfor er hentet fra Njø (2017).

Det var to branner i tunge kjøretøy i Oslofjordtunnelen i 2011, hvorav den siste av disse medførte at 32 personer ble kjørt til sykehus. I 2012, denne gang i Gudavangtunnelen, brant det i et polskregistrert kjøretøy med den konsekvens at 28 personer ble kjørt til sykehus. Tre år senere i samme tunnel, startet det å brenne i en turistbuss med den konsekvens at fire personer ble kjørt til sykehus. I Skatestraumtunnelen i 2015 brast draget mellom trekkbil og tilhenger, og tilhengeren som var lastet med flere tusen liter bensin kolliderte med tunnelveggen. Det oppstod lekkasje i tilhengeren og bensinen som lakk ut tok fyr. Brannen som oppstod resulterte i flere lettere skadet personer og det tok seks dager før det ble ansett som forsvarlig å gå inn i tunnelens på grunn av usikkerhet rundt brannen og skadene som måtte ha oppstått.

Tunnelulykker, særlig de som utarter seg til brann, kan altså utgjøre en stor risiko for trafikanter i tunnelene. Noen av faremomentene kan anses å være grunnet tunnelers grunnleggende utforming og konstruksjon; vegbanen i tunneler er i delvis lukket og isolert rom; det er vanskelig/ugunstig å konstruere fluktveier; og ved brann vil røykutvikling skape farlige forhold med giftige gasser og dårlig sikt. I tillegg til faren dette utgjør for trafikanter som oppholder seg i tunnelen på ulykkestidspunktet, vil dette også komplisere rednings- og slukkeinnsats for nødetatene. Tunnelers utforming gir begrensninger i hva som er gjennomførbart konstruksjonsmessig med hensyn på sikkerhet og kostnader, og derfor rettes mye av fokus mot gode løsninger for å redusere antall hendelser og tidlig varsling av hendelsene, samt løsninger for å gjøre respons på uønskede hendelser sikrere og mer effektiv.

Roadrunner¹ er en slik løsning som er under utvikling, hvor det skal benyttes skinnegående droner i tunneler som både manuelt og automatisk kan bidra til bedre oversikt av trafikkbildet samt bedre kommunikasjonen i tunnelsystemet. En detaljert beskrivelse av dette systemet er gitt i IRIS rapport Mulighetsstudie - Roadrunner (Njå 2017). En forutsetning for Roadrunners tiltenkte formål er at det utvikles en trafikkmodell som vil vise forventede trafikkstrømmer og gir mulighet for deteksjon av avvik i denne strømmen (Njå, 2017). Det er derfor interessant å inkludere konseptet om Roadrunner videre i deler av denne studien hvor dette er relevant.

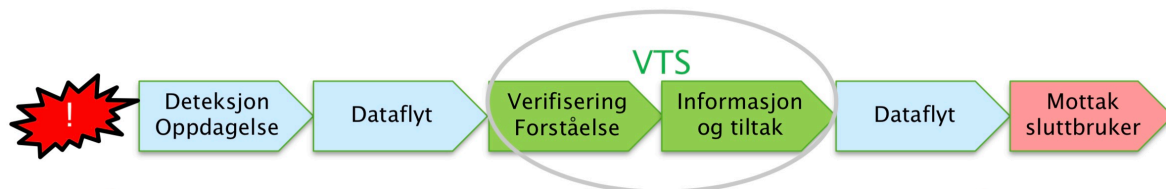
Sikkerhetsnivået til en tunnel beregnes (måles) ofte på risikoanalyser hvor det utføres sannsynlighetsberegninger for at gitte hendelser vil inntreffe. For tunneler over 500m er det krav om utførelse av både kvalitativ og kvantitativ risikoanalyse (Statens vegvesen, 2016). I hvilken grad sannsynlighetsberegninger gir en reell indikasjon på sikkerhets-/risikonivået avhenger av hvilke data, statistikk og observasjoner, som ligger til grunn for beregningen. Videre blir det ved planlegging og ved risikoanalyser av veier og tunneler ofte benyttet trafikkmodeller. En trafikkmodell er en forenklet representasjon av virkemåten til et avgrenset trafikksystem under ulike betingelser. Den skal predikere blant annet trafikkflyt og konsentrasjon for å kunne tilpasse infrastrukturen. I en trafikkmodell benyttes ulike algoritmer, parametere og variabler for å simulere en mest mulig realistisk fremstilling av hvordan trafikk vil oppføre seg under de gitte forutsetninger. Som nevnt benyttes slike modeller (ikke utelukkende) i planleggingsfaser og risikovurderinger, eventuelt for spesifikke formål av allerede eksisterende struktur hvor det vurderes endring/utbedring. Trafikkmodeller er derimot i mindre grad benyttet som verktøy for ad-hoc sikkerhetsvurdering og drift, spesifikt da i sammenheng med tunnelsikkerhet².

Nancy Leveson (2011) påpeker i sin systemtenkning at gode modeller, med korrekte prosedyrer for kontrollhandlinger (algoritmer), er nødvendig for at det/den som kontrollerer prosessene i et system, eller deler av et system, skal kunne utføre kontrollhandlinger på en tilfredsstillende måte. For å utføre tilfredsstillende kontroll av prosesser må aktørene, heriblant vegtrafikksentralene (VTS) ha gode modeller, altså en korrekt forståelse og oversikt

¹ Utvikles av Roxel

² Basert på forstudie av hvorvidt trafikkmodeller brukes operasjonelt, gjerne i sammenheng med tidlig deteksjon av avvik.

over virkeligheten, for å utføre sine tiltenkte funksjoner. VTS sine hovedfunksjoner er overvåking av trafikkavvikling og veiforhold, styring av trafikkavvikling, samt varsle om hendelser, generere veimeldinger og gi bistand til aktuelle operatører og nødetater (Trondsen, 2018). Disse funksjonene utføres ved hjelp av ulike løsninger implementert i, og tilknyttet til, vei- og tunnelsystemet. Figur 1 viser verdikjeden for informasjon som genereres ved deteksjon/oppdagelse fra ulike kilder (f.eks. kamera og/eller innrapportering fra publikum) ved en uønsket hendelse i systemet (rødt felt). VTS (grønne felt) som mottaker av dataflyten; manuelt eller automatisk verifiserer mottatt data og oppretter en forståelse av hva data sier om situasjonsbildet i trafikkstrømmen; og fra denne forståelsen avgjør hvilke, om noen, kontrolltiltak som må iverksettes for å håndtere situasjonen.



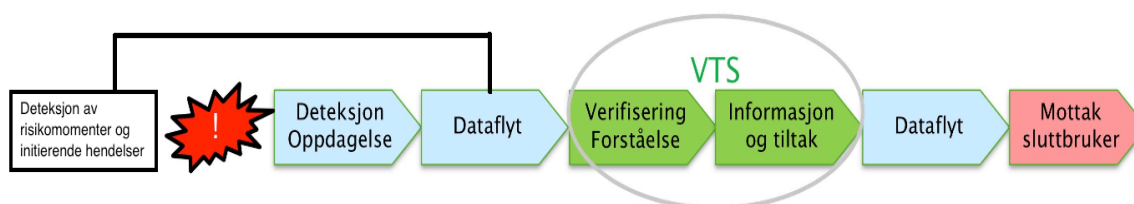
Figur 1: Verdikjede for informasjonsflyt (Trondsen, 2018)

Informasjonsflyten går til slutt videre til sluttbruker (rosa felt) som er de aktuelle aktører som har behov for denne. Disse aktørene kan for eksempel være trafikantene som må ha viktig trafikkinformasjon, nødetater som må rykke ut ved hendelser, aktører som driver med risiko- og sikkerhetsanalyse, og aktører som utarbeider planer for fremtidige tunneler.

Tunneler og trafikkstrømmene i disse, er i seg selv komplekse systemer med mange involverte aktører. Tunnelsystemet inngår samtidig i et enda mer komplekst system som omfatter drift, planlegging og utvikling av infrastruktur på regionalt og nasjonalt nivå. Det eksisterer behov for kommunikasjon mellom de ulike nivåene i dette systemet, hvor informasjon går til rette mottakere, og for at nødvendige algoritmer er på plass slik at kontroll utøves korrekt på de rette nivåer. Eksempelvis er det viktig at den delen av systemet som arbeider med risikoutredning av en tunnel får den nødvendige informasjonen fra de andre relevante nivåene av systemet.

1.1 Formål

Som tidligere nevnt skal trafikkmodeller gi et forenklet men (så langt som mulig) realistisk bilde av virkeligheten. Disse modellene benyttes deretter for analyser og utbedring av tunnelsystemet eller ved planlegging av nye system. Det er et behov for modeller i et komplekst system for å kontinuerlig inneha korrekt kunnskap om systemers tilstand og dermed kunne utføre de rette handlinger. Hensikten med oppgaven blir dermed å skape grunnlaget for en ny trafikkmodell som kan brukes i driften av tunneler og gi et realistisk bilde av trafikkstrømmen til enhver tid. Hovedmomentet vil være å undersøke om det finnes ulike risikoindikatorer i trafikkstrømmen og hvordan disse kan detekteres og uttrykkes i en slik modell. Dette kan være et viktig bidrag for tidlig deteksjon av risikopåvirkende faktorer og initierende hendelser som krever ekstra oppmerksomhet, og dermed øke potensialet for å hindre uønskede hendelser som kan følge av slike risikomoment. Det ønskes altså å utvide verdikjeden for informasjonsflyt med et nytt ledd før hendelser inntreffer. Dette leddet symboliserer informasjon som genereres i trafikkstrømmen før en uønsket hendelse inntreffer.



Figur 2: Foreslått verdikjede for informasjon (Modifisert etter Trondsen, 2018)

I figur 2 er det lagt til ett nytt felt som representerer dataflyt fra trafikkstrømmen gjennom tunnelen *før* en eventuell uønsket hendelse inntreffer. Avvik, samt risikoindikatorer for disse avvikene i en normal trafikkstrøm (prosessen) skal identifiseres. Risikoøkning for identifiserte avvik og tilhørende risikoindikatorer, uttrykkes i modellen, og blir videresendt til kontrolleren for prosessen for videre bearbeiding og vurdering av korrekte tiltak.

1.2 Problemstilling

For å kunne gi et realistisk bilde av trafikkstrømmen i tunneler må byggesteinene for en slik trafikkmodell identifiseres. Disse byggesteinene er da i utgangspunktet de ulike størrelser som skal inn i modellen. Det må også gjøres rede for hvilken teknologi som er tilgjengelig og kan benyttes til å si noe om de ulike størrelsene i modellen. Dette er hovedformålet med denne masteroppgaven, og problemstillingen blir da som følger:

«Hva er de viktigste byggesteinene i en driftsorientert trafikkmodell for vegtunneler?»

Med viktigste byggesteiner menes de byggesteiner som, videre i studien, vurderes som fundamentale for at en slik trafikkmodell skal kunne utføre sin tiltenkte funksjon. Det vil også forsøkes å prinsipielt gjøre rede for hvordan disse byggesteinene kan modelleres med dagens teknologi, altså gjøre rede for hvordan algoritmer kan prosessere input i modellen til ønsket output; med den forutsetning at det er realistisk gjennomførbart med teknologi som eksisterer i dag eller er under utvikling.

1.3 Forskningsspørsmål og avgrensning

For å kunne løse problemstillingen er oppgaven avgrenset og operasjonalisert med disse forskningsspørsmålene:

- Hva er en modell? Hvorfor er modeller viktig?
- Hvilke aktører rettes modellen mot?
- Hva er byggesteinene i en slik modell?
- Hva er risikoindikatorer og hvordan kan de defineres og måles?
- Hvilken teknologi eksisterer for måling av nødvendige størrelser?
- Hvordan kan trafikkmodellen uttrykke risikoindikatorer i trafikken og kobles mot aktuelle aktører; og hva er eventuelle forutsetninger for at dette kan utføres?

1.3.1 Andre avgrensninger

For at oppgaven ikke skal bli for omfattende, vil det som omtales som systemet og dets ulike aktører avgrenses til tunnelsystemet og de direkte involverte aktører. Direkte involverte aktører er i denne konteksten trafikanter, VTS, nødetater og vedlikeholdspersonell.

Levesons systemteori, samt teori for både risikoindikasjon og trafikkmodellering, er langt mer omfattende enn det som benyttes i denne studien. Gjengivelse av teori og begreper er avgrenset til det som er sentralt for å kunne besvare forskningsspørsmålene og problemstillingen.

Oppgaven har ikke som formål å ta stilling til hvorvidt ulik teknologi, som sensorteknologi, ITS-løsninger, o.l., er gjennomførbare, lønnsomme (i et kost – nytte perspektiv), eller hvordan de teknisk skal implementeres. Teknologikapittelet senere i oppgaven er ment å gi en generell oversikt over hva som kan anses som realistisk gjennomførbart (i teknisk forstand) videre når byggesteinene identifiseres.

2 Hvordan fortolke trafikkstrømsmodeller i vegtunneler

I dette kapitlet gjøres det rede for det teoretiske fundamentet for oppgaven med å løse problemstillingen. I oppgaven blir tunneler sett på som et system. Dette systemet har en prosess som skal studeres, trafikkstrømmen. I denne prosessen er det mange involverte aktører og det skal redegjøres for hvilken tilknytning disse har til trafikkmodellen det skal identifiseres byggesteiner for. For å utføre dette på en systematisk og oversiktlig måte benyttes Levesons (2011) teori om systemtenkning, og følgende er kapittel 2.1 basert på hennes teori. Hennes systemtenkning dekker de nødvendige teoretiske forutsetningene for å knytte sammen system, prosesser og prosessmodeller, restriksjoner kontrollere og kontrollhandlinger. Det gjøres rede for hvordan tunnel, aktører og trafikkstrøm blir satt opp mot denne systemteorien.

Andre viktige begreper og konsepter som benyttes i oppgaven presenteres i de videre delkapitler. Risiko og risikoindikatorer er sentrale begrep som er tett tilknyttet flere av forskningsspørsmålene og disse hvordan disse forstås i denne studien defineres her.

Delkapitlet om trafikkmodeller redegjør for hva som forstås med både begrepet modell og begrepet trafikkmodell.

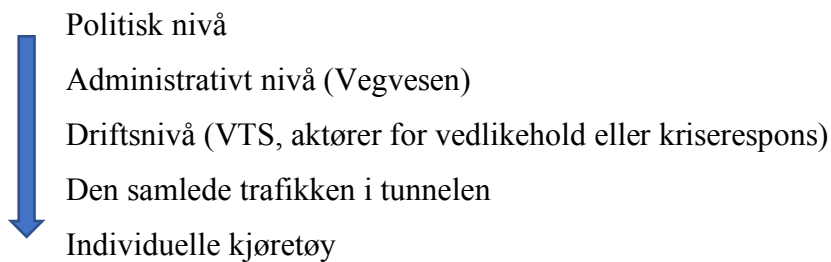
2.1 Systemtenkning sett i forhold til tunneler

Innen tunneler og tunnelsikkerhet er det mange faktorer som spiller inn. Selve tunnelkonstruksjonen retter seg mot det ingeniørfaglige; Geologiske og klimatiske faktorer vil alltid være tilstede; Det menneskelige aspektet, altså menneskelig interaksjon ved vedlikehold og drift av tunnel, samt fra trafikanter; Og så har vi selve tunnelsikkerheten hvor alle de forannevnte faktorene flettes sammen.

En kan ikke enkelt bryte ned et slikt system i mindre komponenter, slik en gjør i en såkalt *divide and conquer*-metode, hvor en skiller mellom fysiske aspekter (separate fysiske komponenter) og adferd (diskrete hendelser over tid) (Leveson, 2011).

Systemteori er utviklet for å kunne vurdere systemer som er for komplekse for komplette analyser og for organiserte til at statistikk kan benyttes. I systemteori betraktes systemet som en helhet, istedenfor å separate deler. Det antas at noen systemegenskaper må anses i sammenheng med alle aspekter, fra sosiale til tekniske. Systemteorien er basert på to grunnleggende ideer: *emergence* og *hierarki*, samt *kommunikasjon* og *kontroll*.

Generelle modeller av komplekse system kan uttrykkes ved at ulike nivåer for organisering deles inn i et hierarki. Hvert nivå i hierarkiet er mer komplekst enn nivået under, og karakteriseres av *fremvoksende kritiske egenskaper*³. Slike egenskaper eksisterer ikke på de lavere nivåene av hierarkiet, altså de er meningsløse uttrykt på de respektive nivåene sitt språk. En hierarkisk inndeling av tunnelsystemet kan se slik ut:



For et individuelt kjøretøy er det snakk om kjøretøysikkerhet og personlig sikkerhet (for fører), og først når en går opp et nivå til den samlede trafikken vil egenskapen *tunnelsikkerhet* framtre.

Pålitelighet er en komponentegenskap⁴. Eksempelvis kan påliteligheten til en ventil bestemmes isolert sett, hvor påliteligheten er definert som sannsynligheten for at ventilen vil virke etter spesifikasjoner over tid under gitte betingelser. Sikkerhet er på sin side en fremvoksende kritisk egenskap, og kan kun bestemmes ved å se hele sammenhengen. Sikkerheten til et industrianlegg kan ikke bestemmes kun ved å studere for eksempel en enkelt ventil i anlegget. På samme måte kan ikke sikkerheten i en tunnel vurderes ut i fra påliteligheten til et enkelt kjøretøy, men kjøretøyet må ses i sammenheng med resten av trafikkstrømmen og forøvrig resten av tunnelsystemet.

Et skytevåpen avfyrt i en ørken uten mennesker og dyr kan anses som både trygt (høy sikkerhet) og pålitelig. Derimot vil samme skytevåpen avfyrt på et kjøpesenter være høyst utrygt (lav sikkerhet) men fortsatt være pålitelig.

Det vil ikke bli lagt vekt på pålitelighet til komponenter i systemet, ei heller egenskapen sikkerhet, i denne oppgaven. Dette er fordi det vil kreve en mer målrettet studie av spesifikke

³ Fritt oversatt fra det engelske begrepet *emergent properties*.

⁴ Leveson forteller at det kan eksistere situasjoner hvor andre faktorer som miljø kan spille inn på en enkelt komponents pålitelighet (f.eks. ekstern påvirkning). Det snakkes i teksten her altså om grunnleggende pålitelighet som kan defineres og måles isolert sett.

tunnelsystemer og deres komponenter, noe som ikke omfattes i denne oppgavens mer generelle formål.

Sikkerhet og pålitelighet er altså to forskjellige egenskaper, og fordi sikkerhet er en framvoksende kritisk egenskap er det ikke mulig å se på komponenter isolert sett og vurdere helhetlig sikkerhet. Sikkerhet avhenger av håndhevelsen av restriksjoner på komponentene i et system, samt restriksjoner av interaksjon mellom komponentene.

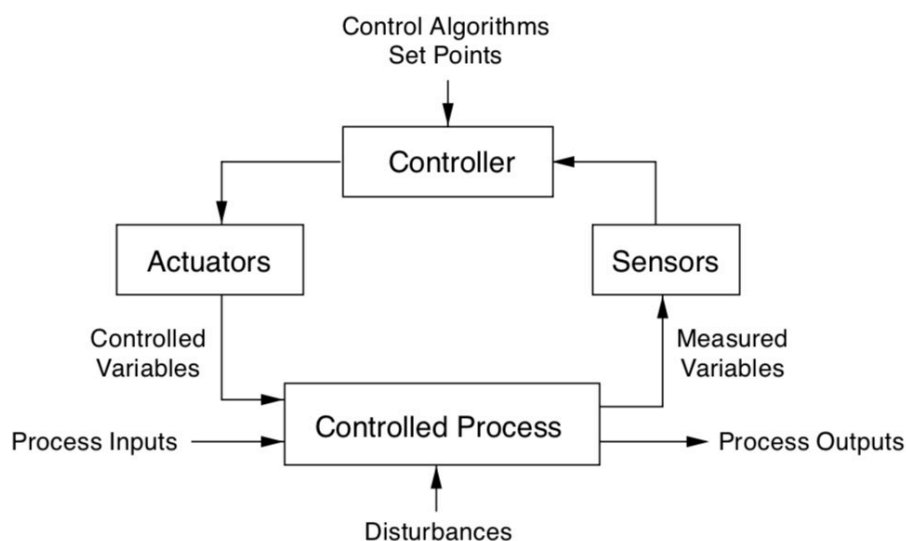
Påleggelse av restriksjoner på en aktivitet ved ulike nivåer av et hierarki, er eksempel på en kontrollhandling. Hierarkier er karakterisert av kontrollprosesser som opererer ved grensesnittene mellom nivåene. For å kontrollere en prosess må fire vilkår oppfylles:

- *Målbetingelse:* Kontrolleren må ha et eller flere mål. Dette målet kan være at restriksjoner blir håndhevet av hver kontroller i den hierarkiske kontrollstrukturen. I tunnelsystemet vil kontroller på høyt nivå i hierarkiet, for eksempel Statens vegvesen, ha som målbetingelse at sikkerhetsnivået for tunnelen skal tilfredsstillende. Dette medfører at kontroll som Statens vegvesen utøver videre ned i hierarkiet i form av restriksjoner skal opprettholde sikkerhetsnivået. Slik restriksjon kan for eksempel være krav til opplæringen av operatører hos VTS. VTS på sin side kan ha som overordnet mål at trafikkstrømmen flyter på en trygg måte. Fører av et kjøretøy har som overordnet mål å styre kjøretøyet trygt gjennom tunnelen.
- *Handlingsbetingelse:* Kontrolleren må være i stand til å påvirke systemet. I ingeniørfaglig sammenheng er kontrollhandlinger implementert av en aktuator. Kontroller av trafikkstrømmen (her VTS) må kunne regulere/stanse denne hvis hindringer oppstår (f.eks. uønsket hendelse – kollisjon) og dermed målbetingelsene til kontroller ikke opprettholdes ved videre flyt av trafikkstrømmen. En slik handling kan eksempelvis være å senke fysisk bom, eller aktivere lyssignal.
- *Modellbetingelse:* Kontrolleren må være (eller inneha) en modell, altså en tilstrekkelig virkelighetstro representasjon av det fysiske systemet. En bilfører må ha korrekt situasjonsforståelse, altså de nødvendige mentale modellene for å kunne forutse tilstanden til omgivelsene i nær fremtid, for å kunne ta korrekte beslutninger for føring av kjøretøyet; Automatisk kontroller for styring av ventilasjonsvifter må inneha

korrekt tilstand for gjeldende luftkvalitet; Statens vegvesen må ha korrekt modell av tunnelens driftstilstand over tid for å kunne vurdere korrekte tiltak for utbedring.

- *Observerbarhetsbetingelse:* Kontrolleren må være i stand til å fastslå tilstanden til systemet. I ingeniørfaglig sammenheng er observasjoner av systemet utført av sensorer. For å inneha korrekt modell av trafikkstrømmen må VTS kunne få informasjon om denne ved hjelp av sensorer, som her kan være kamera, radar, tredjepartsinformasjon (nødtelefoner i tunnelen), etc. På samme måte avhenger den automatiske kontrolleren for viftestyring av sensorer for måling av den faktiske luftkvalitet.

Figur 3 er en illustrasjon av en generell kontrollsjerke som viser forløpet i en kontrollprosess. Kontrolleren mottar informasjon om tilstanden til den kontrollerte prosessen i form av målte variabler gitt av sensorer. Dette kalles feedback. Informasjonen blir deretter brukt til å manipulere kontrollerte variabler med den hensikt at prosessen skal oppfylle forhåndsgitte grenseverdier og/eller mål selv om prosessen blir utsatt for forstyrrelser. Generelt sett vil vedlikehold og drift av et systemhierarki kreve flere kontrollerte prosesser hvor det er kommunikasjon av informasjon for regulering eller kontroll.



Figur 3: Kontrollsjerke (Leveson 2011)

Det vil vanligvis oppstå en viss forsinkelse i kontrollhandlingens effekt (*lag*) på grunn av utsettelse/forsinkelser i signalets forplantning gjennom kontrollsjerkelen. Dette kan forårsakes

av; en aktuator som ikke reagerer umiddelbart på eksterne kommandoer (dødtid); en prosess kan ha forsinkelser i å respondere på manipulerede variabler (*tidskonstanter*); og en sensor måler gjerne verdier ved gitte tidsintervaller (*feedback forsinkelse*). Tidsforsinkelser gir begrensninger på hastigheten og omfanget av hvordan forstyrrelser, både interne og eksterne, kan reduseres.

Sikkerhetsrestriksjoner er restriksjoner som er satt på deler av, eller hele systemet, og som skal forhindre hendelser som kan lede til tap. Det blir vanskeligere å identifisere sikkerhetsrestriksjoner etter hvert som systemer blir mer komplekse. Før i tiden ble sikkerhetsrestriksjonene i større grad gitt av fysiske lover og begrensninger i materialer, i tillegg var systemene enklere og i mindre grad automatiserte enn hva som er tilfellet i dag. Når det snakkes om sikkerhetsrestriksjoner skilles det mellom to former for kontroll av disse, *passiv kontroll* og *aktiv kontroll*. Passiv kontroll krever ingen handling, og utfører i utgangspunktet kontroll bare ved å være tilstede. Aktive kontroll må derimot utføres ved kontrollhandlinger. Eksempler på aktive og passive kontrolltiltak for en tunnel er gitt i Tabell 1.

Det anses ikke som tilstrekkelig for oppgavens formål å kun se på kontroll og restriksjoner gitt i systemet som har det spesifikke formål å forhindre hendelser som leder til tap; det må også inkluderes «utilsiktet» kontroll og medfølgende restriksjoner som utøves på en eller flere deler av systemet, og som gir en begrensning i delen(e)s tilgjengelige handlingsmønster. I denne oppgaven gis derfor begrepet restriksjon en mer generell betydning. Restriksjon defineres her som *passiv eller aktiv kontroll som utøves på en eller flere deler av systemprosessen*.

Aktiv kontroll	Passiv kontroll
Lys- og skiltregulering	Midtdeler
Stengebom	Merking i veibane (reflekser, ikke-regulerbar skilting, etc.)
Ventilasjonsvifter	Brannresistent belegg/kledning i tunnellop
Sprinkler-/slukkeanlegg	

Tabell 1: Eksempler på aktive og passive kontrolltiltak.

For å kunne bestemme de mest effektive kontrollhandlingene må kontrolleren, enten rollen fylles av et menneske eller en automatisert funksjon, ha en oversikt over prosessens nåværende tilstand.

En slik modell kan være relativt simpel, kanskje med kun en eller to variable. Et eksempel er modellen til en termostat hvor variablene kun er nåværende temperatur og ønsket temperatur. I andre tilfeller er modellene ekstremt komplekse, som en modell for kontroll av flytrafikk, og kan kreve stort antall tilstandsvariabler mellom systemkomponenter på de ulike nivåer. Enten modellen er en del av kontrollogikken til en automatisert kontroller eller er en mental modell i en menneskelig kontroller så må den ha tilgang på den samme typen informasjon: den nødvendige sammenhengen mellom alle systemvariablene (lover for kontroll), den nåværende tilstanden (nåværende verdier av systemvariablene), og måtene prosessen kan forandre tilstand. Modellen benyttes for å bestemme hvilke kontrollhandlinger som må utføres, og den blir oppdatert gjennom ulike former for feedback.

Uønskede hendelser kan oppstå når prosessmodellen ikke samstemmer med prosessen hvor følgende situasjoner kan forekomme:

1. Ukorrekt eller utrygge kontrollkommandoer blir gitt.
2. Nødvendige kontrollhandlinger ikke er bestemt.
3. Potensielt korrekte kontrollkommandoer blir gitt på feil tidspunkt.
4. Kontroll avsluttes for tidlig, eller for sent.

Prosessmodeller er nødvendige på alle nivåer av kontrollhierarkiet. På høyrere nivå blir modellene mindre detaljerte, men dekker et bredere område.⁵

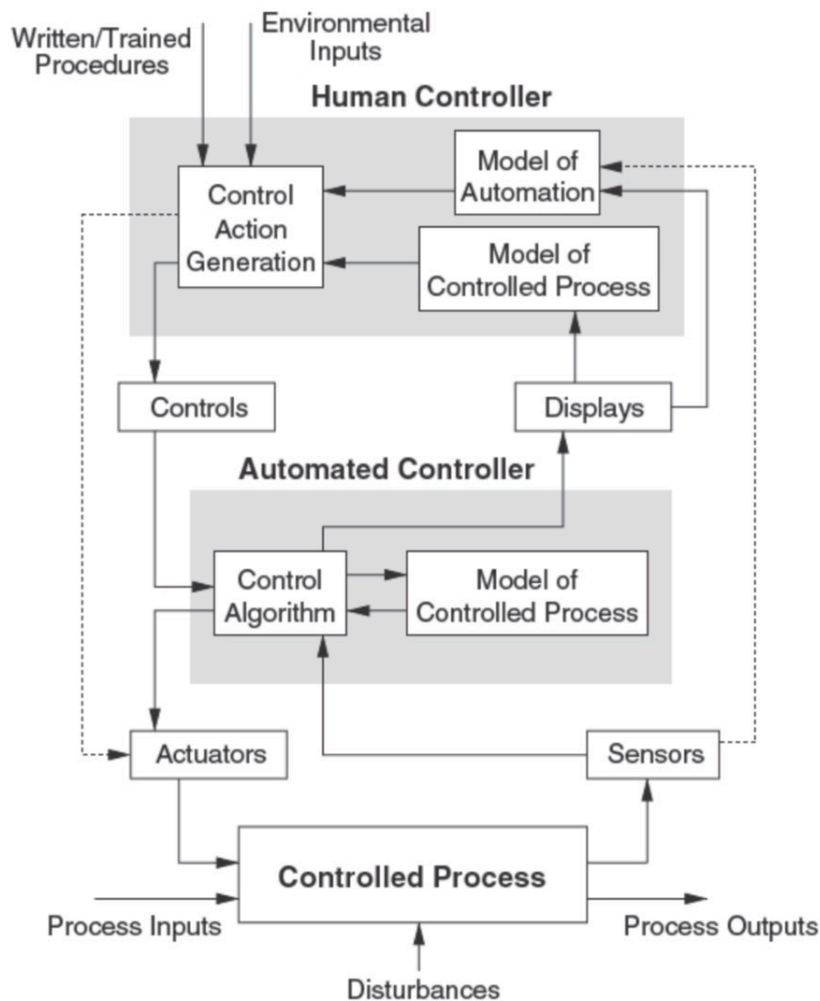
⁵ Dette kan ses igjen i mikro- kontra makrotrafikkmodeller (se kapittel om trafikkmodeller).



Figur 4: Inngangsportal til Byfjordtunnelen på Sokn. (Photo: Jarle Vines (Creative Commons Attribution Sharealike 3.0))

Når det videre i oppgaven skal arbeides mot en trafikkmodell er det nødvendig at denne knyttes opp mot systemet den skal benyttes i, altså tunnelsystemet.

Det er nødvendig å definere hvordan denne modellen plasseres i systemet; hva er input, hva er output, hvem og/eller hva skal benytte seg av informasjonen. Denne beskrivelsen av systemet vil være en simplifisering; det virkelige systemet er mye mer komplekst og består av et hierarki med flere nivåer og kanskje flere ulike prosesser på hvert nivå. Den overordnede styringen av trafikkstrømmen vil videre anses som en prosess styrt av både menneskelige (VTS) og automatiske kontrollere (systemer for automatisk kontroll av trafikkstrøm), og denne styringen kan ses i figur 5.



Figur 5: Menneskelig kontroller overordnet en automatisert kontroller i et fysisk system (Leveson, 2011)

Den kontrollerte prosessen kan overordnet sies å være trafikkstrømmen i tunnelen; altså trafikkflyten skal bevege seg uhindret gjennom tunnelen uten uønskede hendelser. Forenklet kan trafikk inn i tunnel ses på som prosess input, mens trafikk ut av tunnel er prosess output. Dette må ikke forveksles med input og output for en trafikkmodell som består av informasjon om prosessen, mens prosess input og output kan anses som «trafikk inn i tunnel – trafikk ut av tunnel».

Automatisert kontroller er systemer som mottar feedback fra sensorer og ut ifra denne feedbacken automatisk utfører en kontrollhandling ved ulike hendelser. I en slik overordnet oversikt som her vil disse systemene være ITS, for eksempel system for automatisk hendelsesdeteksjon (AID) eller Roadrunner. Eksempler på automatisk kontrollhandling fra et slikt system kan være automatisk viftestyring ved brann, stengning av tunnel, og

alarmer/varsling. Som vist i figur 5 vil den menneskelige kontrolleren være overordnet den automatiserte, altså vil det være innforstått at mennesker kan overvåke og utføre kontroll på den automatiserte kontroller. Dette er nødvendig for å sikre at den automatiserte kontrolleren fungerer som tiltenkt, eller for å utføre kontroll på systemet som ikke er bygget inn i algoritmer for automatikk.

Den menneskelige kontrolleren er i første omgang operatørene på VTS som overvåker både den kontrollerte prosessen, samt den automatiske kontrolleren. Menneskelige kontrollere trenger både en modell av prosessen og en modell (automasjonsmodell) for den automatiserte kontrolleren (Leveson, 2011). Operatørene mottar informasjon, både fra den automatiske kontrolleren og direkte fra prosessen (via sensorer). Denne informasjonen oppdaterer operatørens egne prosessmodeller og leder, om nødvendig, til en kontrollhandling. En slik kontrollhandling kan videre utføres direkte på prosessen eller for å styre og/eller oppdatere den automatiserte kontrollerenes kontrollalgoritmer.

Videre vil det på høyere nivå i hierarkiet være andre kontrollere⁶ som igjen legger restriksjoner på operatørene på VTS. Slik kontroll kan være opplæring av operatører, prosedyrer og rutiner operatørene må følge, etc.

Det vil også være kontrollere på lavere nivå, heriblant trafikantene. Disse er direkte involvert i trafikkstrømmen og legger sine egne restriksjoner på denne strømmen. En nærmere presentasjon av de involverte aktørene blir gitt i systembeskrivelsen senere i oppgaven.

Forstyrrelser av den kontrollerte prosessen kan skyldes både interne eller eksterne faktorer. Interne forstyrrelser har opphav i selve prosessen, altså trafikkstrømmen. Dette kan være kjøretøy som stanser, kolliderer eller bryter med trafikkflyten på andre måter, samt eventuelle andre forstyrrelser forårsaket direkte av trafikkstrømmen. Eksterne forstyrrelser er her ytre påvirkninger på prosessen og kan være blant annet: Klimatiske faktorer (tåke, fuktighet, temperatur, etc.), uønskede objekter i veibanen (dyr, mennesker, andre objekter), og tunnelsystemets fysiske tilstand (eksempelvis dårlige kjøreforhold grunnet lysforhold, slitasje av veibane, eller lignende).

⁶ For eksempel kan nivåene (generelt og oversimplifisert) over VTS i kontrollhierarkiet være: seksjonen i vegvesenet for den aktuelle region, Vegdirektoratet/Statens vegvesen, samferdselsdepartementet, og så videre.

Sensorer kan i dette systemet bestå av blant annet av kamera, radar, og andre former for detektorer installert i tunnel, samt andre innretninger for informasjonsinnsamling. Ved hjelp av en trafikkmodell målers alle forutbestemte variabler i prosessen og sendes som feedback til kontrollerne. Det er altså her trafikkmodellen plasseres i den kontrollerte prosessen, og output fra denne benyttes til å oppdatere både den automatiske og den menneskelige kontrolleren sin korrekte oversikt over systemet og prosessen (altså deres modeller).

Aktuatorer vil i utgangspunktet bestå lys- og signalregulering, fysisk bom, ventilasjonsstyring, og lignende. Aktuatorene er altså kontrollernes virkemidler for å påvirke prosessen. For videre kontroll av prosessen vil det i et tunnelsystem ofte være nødvendig med direkte menneskelig interaksjon, for eksempel nødetater eller annet mannskap på lokasjon.

2.2 Risiko og risikoindikatorer

Begrepet risiko har noe varierende betydning avhengig av hvem som bruker begrepet og om hva det brukes om. Aven beskriver risiko som et uttrykk for *den fare som uønskede hendelser representerer for mennesker, miljø og økonomiske verdier* (Aven, 2006). Det finnes flere måter å kvantifisere risiko. En mye brukt definisjon er at risiko er mulige konsekvenser med tilhørende sannsynligheter. En mer generell definisjon er at risiko er en kombinasjon av mulige konsekvenser og den tilhørende usikkerheten rundt hva som er konsekvensene (Aven, 2006). Disse definisjonene faller sammen når usikkerheten kvantifiseres ved bruk av sannsynlighet, mens sistnevnte definisjon fortsatt gir mening når det ikke eksisterer sannsynlighetsverdier. Risikoen er altså til stede uavhengig om sannsynlighet er brukt til å uttrykke usikkerheten (Aven, 2015). Hvordan begrepet risiko forstås i denne oppgaven defineres mot slutten av kapittelet.

Det finnes flere definisjoner av begrepet indikator avhengig av hvilken sammenheng det brukes i. Øien (2001) definerer en indikator som *en målbar eller operativ variabel som kan benyttes til å beskrive tilstanden til et bredere fenomen eller aspekt av virkeligheten*. En litt mer konkret definisjon er at risikoindikator er *en målbar/observerbar størrelse som kan gi informasjon om risiko* (Vinnem, Aven, Sørsum, & Øien, 2003).

Videre skiller litteraturen mellom flere typer mellom ledende (leading) og etterslepene (lagging) indikatorer. Det er stor variasjon i litteraturen mellom betydningen av disse indikatorene. Thorsen (2013) skriver at det ikke finnes noen entydig definisjon av ledende og etterslepene indikatorer, og at hvordan disse indikatorene defineres tilsynelatende avhenger av hvilken risikopåvirkende faktor som måles i forhold til hva. En risikopåvirkende faktor (RIF) defineres av Øien (2001) som *et aspekt (en hendelse/tilstand) i et system eller en aktivitet, som påvirker risikonivået til systemet/aktiviteten*. RIF er en teoretisk variabel, altså det er ikke (nødvendigvis) gitt hvordan den kan måles, mens en risikoindikator er en målbar/operativ definisjon av denne (Øien, 2001).

Videre beskriver Øien (2001) hvordan en kan identifisere risikoindikatorer, gjengitt her i forenklet form:

1. Utvelgelse av kategorier for uønskede hendelser som bidrar med høyest økning av risiko.
2. Identifisere risikopåvirkende faktorer (fra kvantitativ risikoanalyse, altså utføre en grov risikoanalyse med basis i hendelsesdata)
3. Vurdering av potensiell endring i RIF (over tid)
4. Vurdering av effekten på endring i hver RIF på den totale risiko (når endringen stor nok til at det kreves overvåkning.)
5. Utvelgelse av signifikante RIF
6. Første utvelgelse av mulige risikoindikatorer for hver enkelt RIF
7. Testing og endelig valg av passende risikoindikatorer.
8. Etablere rutiner for bruken av risikoindikatorer.

Metoden gitt av Øien er hovedsakelig tiltenkt benyttet til offshore installasjoner.

Når det skal arbeides mot en trafikkmodell som skal kunne si noe om faremomenter før en eventuell hendelse inntreffer, kreves det altså både modifikasjon/forenkling av metoden, samt justeringer i betydningen av begrepene. Fordi trafikkstrømmen gjennom tunnelen videre anses som én overordnet prosess, vil det være hensiktsmessig for trafikkmodellen å gi uttrykk for en helhetlig risiko. Trafikkmodellens hovedformål er altså ikke å gi uttrykk for risikoen for uønskede hendelser, men risikoen for at det oppstår forstyrrelser eller brudd på prosessen (trafikkstrømmen). I denne studien vil helhetlig risiko derfor forstås som *den fare uønskede hendelser i trafikkstrømmen utgjør for den normale flyten i trafikkstrømmen*; risikopåvirkende

faktor vil forstås som *uønskede hendelser som utgjør en økning i helhetlig risiko*; avvik fra den normale trafikkstrømmen er *brudd på gitte restriksjoner*; og risikoindikatorer er *målbare faktorer i avvik*.

2.3 Trafikkmodeller

Oppgavens formål er å etablere byggesteiner for en trafikkmodell, og derfor er det nødvendig å redegjøre for hva som forstås med en trafikkmodell.

2.3.1 Generelt om modeller

En modell, fra et vitenskapsteoretisk ståsted, er en beskrivelse eller representasjon som brukes til å forstå hvordan et system eller en prosess fungerer. Basert på utvalg av viktige trekk fra systemet eller prosessen kan en modell gi oss et forenklet bilde av virkeligheten. Modeller er viktige for de gir oss en måte å studere og forstå ulike fenomen, for eksempel ulykker og hasardiøse systemegenskaper, og de gir en måte å kommunisere denne forståelsen til andre (Leveson, 2011).

Det benyttes flere ulike former for modeller alt etter hva modellen skal beskrive eller representere. *Fysiske modeller* er representasjoner av virkelige objekter, eksempelvis er et verdenskart en forenklet modell av jordkloden. *Matematiske modeller* viser sammenhenger mellom det som skal beskrives ved hjelp av variabler og matematiske ligninger. *Konseptuelle modeller*

2.3.2 Generelt om trafikkmodeller

Det skilles mellom ulike plan når en skal studere trafikkavvikling avhengig av hvilken detaljeringsgrad, tidshorisont, og hvor stor geografisk utstrekning (Flügel, Flötteröd, Kwong, & Steinsland, 2014). De tre planene er strategisk, taktisk og driftsorientert. Den geografiske utstrekningen for hver av disse planene er: strategisk - (minimum) regionalt, taktisk – (minimum) bydel, operasjonelt – (som regel) mindre seksjon av vei eller veikryss.

Disse ulike planene kan sees i sammenheng med ulike nivåer for trafikkmodeller (Bang, 2016):

- Strategisk plan: *Makronivå* – Har lav detaljeringsgrad og kjøretøy blir ikke individualisert. Benyttes for større geografiske områder.
- Taktisk plan: *Mesonivå* – Er en kombinasjon av makro- og mikromodell, hvor individuelle kjøretøys atferd er aggregert.
- Driftsorientert: *Mikronivå* – Høy detaljeringsgrad med individuelle kjøretøy og individuell/detaljert atferd. Benyttes på mindre geografiske områder, f.eks. ett veikryss.

En trafikkmodell kan være stokastisk eller deterministisk (Vejdirektoratet, 2010).

Stokastiske modeller genererer tilfeldige verdier basert på sannsynlighetsfordelinger som er lagt inn i modellen. Dette kan sies å samstemme bra med virkelighetens trafikkavvikling som varierer tilfeldig innenfor gitte rammer. Da en stokastisk modell gir ulike resultat ved hver enkelt gjennomgang må den kjøres flere ganger for å danne en gjennomsnittlig verdi(er), et oversiktsbilde av trafikken.

For en deterministisk modell er alle beregninger fastlagt ut ifra gitte startbetingelser og verdier (for eksempel gjennomsnittsverdier for variabler), og resultatet vil være det samme for hver gang en slik modell kjøres (nødvendig forutsetning er at gitte betingelser og verdier ikke endres).

Modeller på meso- og mikronivå er vanligvis stokastiske mens på makroskopisk nivå er oftest modellene deterministiske (Vejdirektoratet, 2010; Flügel, Flötteröd, Kwong, & Steinsland, 2014).

2.3.3 Mikroskopiske modeller

I denne oppgaven er fokuset rettet på tunneler, og disse ligger i utgangspunktet på driftsorientert plan. På dette planet er det hovedsakelig mikroskopiske trafikkmodeller som benyttes. En driftsorientert trafikkmodell for tunneler har den fordelen at tunneler i stor grad er godt overvåket ved hjelp av ulike sensorikk. Dette gjør det lettere å utføre en kontinuerlig sanntids-oppdatering av ulike variabler i modellen. Det er slik sanntidsoppdatering av variabler som muliggjør tidlig deteksjon av uønskede hendelser, altså risikoindikatorer. Det gjøres videre rede for hvilke risikoindikatorer og tilhørende variabler som er sentrale, i

resultatkapittelet. Det anses som nødvendig at den driftsorienterte trafikkmodellen for tunneler med sine særegne variabler, må ha en grunnmodell, eller et fundament, som disse variablene kan bygges på.

På mikronivå spiller flere faktorer inn på hvordan trafikken simuleres (Vejdirektoratet, 2010); Hvordan kjøretøy skiller seg fra hverandre med eksempelvis lengde, maksimal hastighet og akselerasjonsegenskaper; Ulik førerkaraktistikk som kjøremåte, hvordan det akselereres og ønsket hastighet; Kjøretøyets posisjon i veibanen/veistrekingen, dets individuelle hastighet og deres rute i veinettet.

En generell gjennomgang av trafikksimuleringsmodellens oppbygning på mikronivå er beskrevet av Hollander og Liu (2008). Trafikkmodeller består som oftest av flere undermodeller hvor hver enkelt av disse skal reprodusere mekanismene for enkeltavgjørelser utført av enkeltindivider. Disse enkeltavgjørelsene kan eksempelvis være hvorvidt tidsluken for forbikjøring er akseptabel eller om akselerasjon, deselerasjon eller nedbremsing er nødvendig for å opprettholde avstand til kjøretøy foran. Hver enkelt av undermodellene består av ulike parametere og en fullstendig trafikkmodell kan inneholde flere titalls parametere. Det kan være vanskelig å isolere de diskrete faktorene som parameterne representerer, eller kreve store mengder data, for å kunne direkte måle dem. Hollander og Liu gir uttrykk for at studier på enkeltparameteres verdi eksisterer, men de er ikke kjent med arbeid hvor det har vært mulig å gjøre det for alle parametere som en fullstendig trafikkmodell består av.

Det finnes et stort antall mikroskopiske trafikksimuleringsmodeller, og allerede i 2002-2003 eksisterte det opptil hundre ulike modeller (Brockfeld, Kühne, Skabardonis, & Wagner, 2003). Noen av de mest grunnleggende typer modelltypene som brukes i analyse av trafikkflyt er car following-model, lane changing-model, og gap acceptance-model:

- **Car following-model (CFM)**

CFM modeller beskriver dynamikken i trafikkflyt, hvordan kjøretøys plassering, akselerasjon og hastighet endres relativt til andre kjøretøy i kjørefeltet. I denne modellen er det kun ett kjørefelt.

- **Lane changing-model (LCM)**

På grunn av CFMs begrensning på et kjørefelt, er det videreutviklet modeller som kan beskrive situasjoner hvor kjøretøy bytter felt. Disse modellene kalles for lane

changing-models. Tradisjonelt sett vurderer LCM-modeller trafikanters beslutning for feltendring ut i fra en trinnvis prosess.

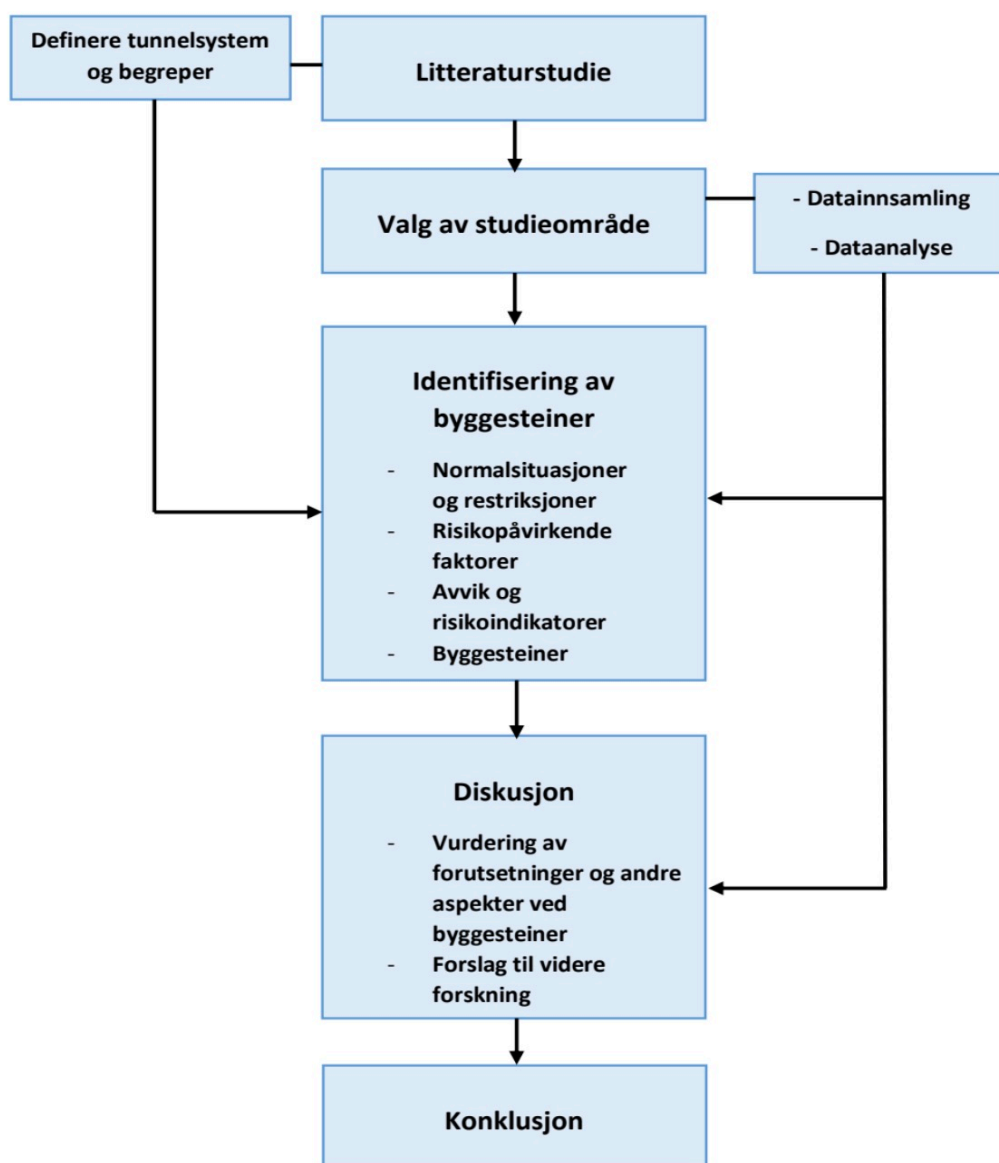
- **Gap acceptance-model (GAM)**

Disse modellene hjelper å beskrive hvordan en sjåfør vurderer hvorvidt det er tilstrekkelig avstand til å utføre et feltbytte. Andre situasjoner en GAM kan beskrive er hvordan to trafikkstrømmer løser konflikter.

En kombinasjon av disse modellenes funksjoner, samlet til en grunnmodell, anses her å være tilstrekkelig for å beskrive trafikkflyten i tunnelsystemet, og som et fundament for videre påbygging med variabler for risikoindikasjon.

3 Metode

I dette kapittelet beskrives fremgangsmåten som ble valgt for å besvare forskningsspørsmål og problemstilling. Det er flere ulike måter dette kunne blitt belyst på, derfor er det nødvendig å redegjøre for de metodiske valgene som er gjort, samt begrunne disse. En forstudie er gjennomført for å kartlegge nåværende bruk av driftsorienterte trafikkmodeller og deteksjon av tidlige hendelser. Både forstudien og litteraturstudien er utført med søk i skolebibliotekets databaser, Google Scholar, Brage, samt generelle søk på internett. I figur 6 er det gitt en oversikt over den metodiske prosessen gjennom hoveddelen av studien.



Figur 6: Flytskjema som viser prosessen gjennom studien

3.1 Litteraturstudie

Innen dette forskningsområdet eksisterer det flere ulike aspekter, som tunneldrift, risiko, aktører, trafikkstrøm, modeller, tiltak, etc. Litteraturstudiens hensikt var å etablere en teoretisk sammenheng mellom disse aspektene, for igjen å få en bedre forståelse hvordan disse kan knyttes opp mot hverandre. Nancy Levesons systemtenkning ble til dette ansett som svært hensiktsmessig for å løse dette, fordi hennes teori inkluderer aspekter på alle nivå, og gir et godt grunnlag for å videre finne sammenhengen mellom de ulike aspektene.

Levesons systemteori ble ikke funnet tilstrekkelig til å direkte dekke noen av aspektene, derfor er risiko og tilhørende begreper, samt prinsipper for risikoindikasjon definert med basis i annen litteratur. Videre er det redegjort for hva trafikkmodeller er og prinsippene bak disse.

Disse teoretiske aspektene er beskrevet i kapittel 2 og danner det teoretiske fundamentet som resten av oppgaven baserer seg på. Det er også gjennomført et generelt søk etter teknologiske virkemidler som benyttes/kan benyttes i sammenheng med tunneler og tunnelsikkerhet. Dette søket har foregått både i akademiske artikler, rapporter/artikler fra Statens vegvesen, populærvitenskapelige artikler, samt ulike nyhetskilder på internett.

Da det i denne oppgaven ikke skal vurderes ulike aspekter av disse teknologiske løsninger som effektivitet, lønnsomhet, gjennomførbarhet, eller lignende, så har heller ikke kildene vært nøye gransket for eventuelle løsninger som er på planleggingsstadiet eller under utvikling. Det er kun gjort en subjektiv vurdering hvorvidt det er realistiske løsninger som potensielt kan benyttes innen et rimelig tidsperspektiv (5-10 år).

3.2 Valg av studieområde

Trafikkavvikling i tunneler fungerer generelt sett på samme måte uavhengig av hvilken tunnel det dreier seg om. Det vil nødvendigvis være litt variasjon i byggesteinene avhengig av faktorer som kurvatur, belysning, lengde, fartsgrense, trafikkmengde, etc. Kjøremonster kan også være annerledes avhengig av om det er tunnel med ett eller to løp, møtende trafikk eller kun en kjøreretning i tunnellop. Det antas allikevel i denne oppgaven at en trafikkmodell utviklet med basis i byggesteinene funnet her vil, med minimale endringer, kunne benyttes for en hvilken som helst annen tunnel. Byggesteinene vil i utgangspunktet være de samme.

Derfor anses det som tilstrekkelig å undersøke en spesifikk tunnel for å løse denne oppgavens problemstilling.

Valg av tunnel baserer seg på to hovedkriterier:

- Praktiske årsaker: Hvorvidt data for tunnelen(e) eksisterer og om tunnelen er tilgjengelig for befaring skulle være nødvendig.
- Dimensjonerende årsaker: Tunnelen må være av en betydelig størrelse, både fysiske dimensjoner og trafikkmengde. Det er åpenbart at det for oppgavens formål ikke er hensiktsmessig å studere en lite trafikkert tunnel med horisontalt løp og lengde på 200m. Undersjøiske tunneler er kanskje de mest interessante da de som regel har høy maksimal stigningsgrad.

Byfjordtunnelen ble valgt som utgangspunkt for studien basert på hovedkriteriene. Det viste seg etterhvert at tilfredsstillende hendelsesdata for denne tunnelen ikke var problematisk å anskaffe innen studiets tidsrom. Oslofjordtunnelen ble ansett for å være tilstrekkelig lik Byfjordtunnelen, og derfor er det supplert med hendelsesdata fra denne tunnelen.

3.3 Datainnsamling og analyse

For oppgavens formål er databehovet i utgangspunktet noenlunde begrenset. Databehovet vil være større og mer aktuelt når en trafikkmodell først er under utvikling og skal modelleres. I denne studien skal det blant annet etableres databehov for en senere/videre utvikling av en trafikkmodell for tunneler. Dette behovet uttrykkes i byggesteinene i form av ulike størrelser som må måles/registreres. Ulike tilleggsdata vil kunne bidra til å gi et mer fullstendig bilde av systemet som undersøkes, og dermed øke presisjonen.

Databehovet for denne oppgaven består altså da av hendelsesrapporter, ulykkes-/hendelsesdata og statistikk; eller mer generelt, alle kilder som kan gi et bilde av hvordan trafikkstrømmen beveget seg fra normalisert tilstand til en ekstraordinær tilstand (ved hendelser).

Det skiller mellom tre hovedtyper av data (Blaikie, 2010):

- *Primærdata* er ny data generert (innsamlet, analysert, og rapportert) av forsker(e) som er ansvarlige for studien hvor gjeldende data benyttes.

- *Sekundærdata* er allerede eksisterende rådata (statistikk eller lignende) innhentet av andre.
- *Tertiærdata* er data som allerede er analysert. Denne analysen kan være gjort av den/de som genererte data, eller analysert av andre på basis av sekundærdata.

Det var i utgangspunktet ønskelig å benytte primærdata i form av egne observasjoner. Blant annet skulle det filmes/registreres trafikkstrømmen på begge sider av en tunnel (her: Byfjordtunnelen), og fra dette kunne si noe om forventet gjennomkjøringstid, hastighet, og lignende, for ulike typer kjøretøy. Behovet for dette er større i tunneler hvor det ikke er sensorer som fortløpende kan registrere denne typen data, men både Byfjordtunnelen og Oslofjordtunnelen har for eksempel kamera gjennom hele tunnellopene.

På grunn av vanskeligheter med å velge en god metode for denne typen datainnsamling og tidsbegrensninger⁷ kunne det ikke gjennomføres. Ved forespørsel lot det seg heller ikke gjennomføre å registrere denne typen data direkte fra VTS Vest sine systemer.

Sekundærdata er benyttet som en datakilde for å kunne si noe om hvilke uønskede hendelser som oppstår i tunnelen, hvor alvorlige hendelsene er, og frekvens av disse hendelsene. Noen hendelser er åpenbare, som kollisjoner eller brann, mens andre er gjerne ikke like fremtredende. Derfor er det samlet inn hendelsesdata for de aktuelle tunnelene. Det er hentet ut ulykkesstatistikk for Byfjordtunnelen fra vegvesenets database som er tilgjengelig på Vegkart. Det var ikke mulig å få tilgang på mindre hendelser for denne tunnelen. Om det skyldes at VTS Vest ikke har data for dette, eller ikke ønsket å dele denne typen data, vites ikke. Mer omfattende data da fra Oslofjordtunnelen ble tilgjengeliggjort etter forespørsel.

Analysen av data er gjennomført som en rent subjektiv risikovurdering, hvor de ulike hendelser studeres og vurderes ut i fra en antatt risikopåvirkning (enten ved oppgitt konsekvens, eller antall hendelser av samme type).

⁷ De rette organer ble kontaktet for godkjenning og eventuell tillatelse til å filme private kjøretøy på offentlig vei, da særlig med hensyn på personvern. Svar kom så sent i prosessen at det med hensyn på tid ikke lot seg gjennomføre.

3.4 Fremgangsmetode for identifisering av byggesteiner

For å løse problemstillingen trenger jeg en fremgangsmetode hvor jeg på en logisk og systematisk måte kan identifisere byggesteinene. Denne delen av studien er basert på tilknytningen mellom aspektene og definisjoner av begreper, gjort rede for i den teoretiske utredningen.

Fremgangsmetoden blir da som følger:

- **Normalsituasjoner**

Det første steget er å beskrive normal trafikkstrøm i tunnelsystemet, altså ulike situasjoner som oppstår og som regnes som normalt. Jeg starter helt grunnleggende med en enkelt bil og går videre med flere og mer komplekse situasjoner. For hver av disse beskrives hvilke restriksjoner som legges på systemet av kjøretøy, restriksjoner fra kjøretøy til andre kjøretøy, samt hvilke restriksjoner systemet legger på kjøretøy.

- **RIF, avvik og risikoindikatorer**

Neste steget er å kategorisere hvilke restriksjoner, som ved brudd på restriksjonen, gir høyest økning i risiko og knytte disse sammen med tilhørende risikopåvirkende faktorer (uønskede hendelser). De risikopåvirkende faktorene finnes ved å studere tilgjengelig hendelsesdata (ulykkesrapporter, statistikk, m.m.) og vurdere hvilke som gir høyest økning i risiko.

Deretter identifiseres alle avvik, samt risikoindikatorer som er de målbare brudd på restriksjoner som kan medføre at situasjonsbildet går fra normalisert til ekstraordinært (for eksempel en uønsket hendelse). Metoden i dette steget er basert på en noe modifisert og forenklet utgave av Øien (2001) sin metode beskrevet i teorikapittelet.

- **Byggesteiner**

I det tredje og siste steget skal det vurderes hvordan de identifiserte risikoindikatorene kan beskrives og måles; hvilke parametere og variabler gjelder for hver enkelt risikoindikator; og hvordan disse kan fastsettes ved hjelp av algoritmer.

Byggesteinene for en trafikkmodell vil altså bestå av algoritmer for måling/beregning og uttrykking for avvik (eventuelt beskrivelsen av hvordan algoritmer, og hva de beskriver i situasjonsbildet).

3.5 Styrker og svakheter

Det er alltid viktig å være nøye i utvelgelse og bruk av data. Kvalitetssikring av data spiller inn på hvordan data kan påvirke godhet av resultat i både positiv eller negativ retning. Fordi studien i liten grad benytter seg av data som direkte midler for å løse problemstilling, blir også kvalitetssikringen av data en mindre vesentlig faktor. Dette ser jeg på som en styrke ved oppgaven. Siden oppgavens formål er å utforske et relativt nytt tema innen tunnelsikkerhet⁸, er det gjort flere subjektive beslutninger og vurderinger for å svare på problemstillingen. Disse beslutningene og vurderingene er i stor grad basert på egne erfaringer, logisk resonnement og fornuft. Begrenset kunnskap og erfaring innen forskningsområdet må derfor nødvendigvis anses som en svakhet i oppgaven.

En kan argumentere for at noe av fremgangsmetoden for å identifisere byggesteinene kan ses på som grundig men kan kanskje noe triviell. Til tross for at deler av resultatene kan fremstå som trivielle her, mener jeg at fremgangsmetoden kan egne seg godt i enda mer komplekse system hvor det da eksistere flere faktorer å ta hensyn til underveis i prosessen. Følgende vil det da eksistere et potensial for mange flere RIF, restriksjoner, avvik, og risikoindikatorer, og dermed vil det være gunstig med en slik grundig og stegvis metode.

⁸ Basert på forstudiet.

4 Byggesteiner

I dette kapittelet presenteres funnene gjort i denne studien. I de første to delkapittel gis det en systembeskrivelse av tunnelen som studeres i denne oppgaven, aktører som er tilknyttet systemet, samt en oversikt over ulike teknologiske løsninger. Videre vil dette kapittelet være bygget opp i henhold til fremgangsmetoden beskrevet i metodekapittelet.

4.1 Systembeskrivelse Byfjordtunnelen

Byfjordtunnelen er den største av to tunneler i Rennfast-prosjektet, og ble åpnet i 1991. Tunnelløpets lengde er 5875m og består av ett løp med to kjøreretninger, samt egne krabbefelt i oppadgående retninger. Tunnelen er undersjøisk og er en såkalt senketunnel, hvor tunnellopet bygges i seksjoner på land som senkes og kobles til tidligere plasserte seksjoner. Tunnelen har en maksimal stigning på 8,2 prosent. Tunnelens generelle vertikalkurvatur kan sees i Tabell 2.⁹

Stigning i grader (Fra Randaberg mot Sokn)	Fra meter	Til meter
0,1	0	8
-4,1	8	295
-8,2	298	416
-8	413	3078
-2,3	3078	3413
7,5	3413	4069
8	4069	6094
5,3	6106	6398

Tabell 2: Vertikalkurvatur Byfjordtunnelen. Tallene er hentet direkte fra Vegkarttjenesten og noe(n) overlapping/mangler forekommer. (Kilde: Vegkart.no)

Rennfast-prosjektet bidrar med veiforbindelse mellom fastlandet i Randaberg kommune og Rennesøy, Mosterøy, Sokn, Bru, Vestre Åmøy og Austre Åmøy. På grunn av at denne veiforbindelsen er en del av Ev39 og utgjør den mest gunstige ruten for trafikk mellom

⁹ Tunnelmunning på Randaberg og Sokn er plasser omtrent på henholdsvis 321m og 6192m.

Kristiansand i sør til Bergen og videre til Trondheim i nord, er det en relativt tungt trafikkert veistrekning.

ÅDT for tunnelen for 2017 var 9600 kjøretøy. Det differensieres ikke mellom ulike typer kjøretøy i databasen, men derimot registreres mengden lange kjøretøy (lengde større eller lik 5,6 meter) og denne andelen utgjorde 12 prosent.

4.1.1 Aktører

VTS Vest har ansvaret for direkte overvåking og styring av tunnelen, og kan regnes som nærmeste kontroller på prosessen.

Hovedformålene til VTS er:

1. *Overvåke vegnettet og trafikkavviklingen med særlig fokus på tunneler*
2. *Generere og formidle informasjon for å veilede trafikantene*
3. *Fjernstyre trafikktekniske installasjoner*
4. *Varsle og formidle beslutningsstøtte for drift og vedlikehold*
5. *Vær bindeledd (sic) og koordinere innsats ved hendelser på vegnettet*
6. *Motta henvendelser fra publikum*

(Statens vegvesen, 2013)

Nødetatene involveres som aktør når en uønsket hendelse inntreffer. Politiet blir øverste kontroller i prosessen med redning og trafikkstyring, mens VTS og andre aktører bidrar med feedback samt utfører kontrolltiltak på vegne av politiet (f.eks. å stenge tunnel med bom/lys).

Tjenesteleverandører for vedlikehold og drift anses ikke i denne studien for å være direkte tilknyttet prosessen. Leverandører av systemer som Roadrunner overlater kontrollen av disse til VTS, og vedlikehold foregår som oftest utenom prosessen (tunnel stenges midlertidig, kolonnekjøring, altså ekstraordinær hendelse). I en større sammenheng er disse aktørene derimot sentrale da forbedringer av systemer utføres av dem. For at endringer skal utføres korrekt er det viktig at disse aktørenes egne modeller samsvarer med virkeligheten, og dette krever igjen god feedback fra de mer direkte involverte aktørene som VTS og nødetater.

Trafikanter er på laveste nivå i dette systemhierarkiet. Disse er direkte involvert som deler/enheter av trafikkstrømmen, men kan således utøve egne restriksjoner og kontroll på prosessen. De er allikevel underlagt restriksjoner og kontroll fra overliggende nivå i hierarkiet, VTS.

Vegvesenets/Vegdirektoratets andre avdelinger (andre enn VTS) og politikere er plassert høyere i hierarkiet og har dermed en mer indirekte innvirkning på tunnelsystemet og drift av dette. De er allikevel ikke irrelevante da data innsamlet om systemet på lavere nivå benyttes til å ta beslutninger og utøve kontrollhandlinger nedover i hierarkiet. Fordi de ikke er direkte involvert i prosessen vil de allikevel ikke inkluderes videre.

4.2 Teknologiske løsninger

Det er store mengder ulik teknologi for å forbedre tunnelsikkerhet, og det jobbes hele tiden med å utvikle nye metoder. Det finnes allerede eksisterende teknologiske løsninger som potensielt kan øke sikkerhetsnivået. Prioritering av slike løsninger bygger ofte på en kost-nytte vurdering, og det kan medføre at nyttig teknologi utelates ved nybygging av tunneler og oppgradering av eksisterende tunnelinfrastruktur. I dette delkapittelet vil det presenteres en oversikt over slike løsninger som kan bidra i modelleringen av trafikkmodellen. Det blir ikke gjort en detaljert beskrivelse (se avgrensningskapittel) av de ulike løsningene, da de kun anses som eksempler på at nødvendig input prinsipielt kan realistisk gjennomførbare løsninger.

4.2.1 Overordnede systemer

I dagens transportindustri er det stort fokus effektivitet, kvalitet, sikkerhet og miljø. *Intelligente transportsystemer* (ITS) benyttes for å møte de ulike målene for dette fokuset ved å integrere telekommunikasjon, elektronikk og informasjonsteknologi med transportprosjektering/drift (Pascale, Nicoli, Deflorio, Chiara, & Spagnolini, 2011). ITS er en fellesbetegnelse for alle typer teknologi og datasystemer som brukes i transportsektoren og målet med ITS-teknologi er:

Målet med ITS-teknologi er todelt: For trafikanter og transportører kan ITS gjøre kjøreturen tryggere, mer effektiv og med mindre utslipp. For de som drifter og

vedlikeholder vegen, kan ITS gjøre det enklere å sette inn de riktige tiltakene til riktig tid. ITS-teknologi kan også være et verktøy for å bedre trafikkavviklingen og prioritere kollektivtrafikk. (Statens vegvesen, 2018)

En annen overordnet kategori er *automatisk hendelsesdeteksjon (AID)*. AID kan sies å være et ITS i seg selv, eller en del av et mer omfattende ITS. I utgangspunktet vil manuell overvåking av veier og tunneler være en oppgave som krever enorme menneskelige ressurser, derfor benyttes AID – automatisk hendelsesdeteksjon. Dette er systemer som ved hjelp av ulike teknologi automatisk detekterer, registrerer og varsler om hendelser. Systemene til SVV baserer seg hovedsakelig på 2D bildeanalyse og det forløper seg i korte trekk på følgende måte (ViaNova, 2013):

1. Hendelse oppstår
2. AID detekterer hendelse
3. AID genererer alarmvarsel til operatør på VTS
4. Operatør vurderer alarm og handler etter korresponderende vegplan

I rapporten fra ViaNova (2013) understrekes det viktigheten av at AID-systemene ikke genererer for mange feilalarmer da disse kan utgjøre ekstra belastning på operatører, og i verste tilfelle medføre at oppmerksomheten avledes fra en reell hendelse.

Roadrunner er, som nevnt tidligere, et helhetlig system som består av en rask skinnegående drone med ulike sensorer og kommunikasjonsmidler. Målet er at dette systemet skal potensielt kunne bidra med støtte under evakuering, støtte for nødetatene, hendelsesrespons, ubemannet eskorte, tunnelinspeksjon og transport av utstyr. Dette systemet vil, avhengig av hvilke sensorer som Roadrunner utstyres med, fungere både som informasjonskilde til en modell (gi input), samt det vil kunne benytte informasjon ut av modell (bruke output). Roadrunner vil (og må) kunne benytte seg av den driftsorienterte trafikkmodellen som gir Roadrunner en korrekt modell/oversikt over trafikkstrømmen, og dermed muliggjør dronenes funksjon som aktuatorer, altså gjør dronene i stand til å velge rette kontrollhandling.

4.2.2 Løsninger for informasjonsinnsamling

Informasjon om ulike forhold i vei og tunnel kan komme fra flere ulike kilder. Disse kildene vil for denne oppgaven regnes som sensorer i det systemteoretiske perspektivet. Videre i denne oppgaven vil det med hensyn til oversiktighet skilles mellom direkte og indirekte sensorløsninger. Med direkte sensorløsninger menes her teknologi som utelukkende skal detektere ulike forhold, og som viderefører denne informasjonen til eksempelvis ITS, trafikkmodeller, og/eller lignende. Slike løsninger er gjerne del av en fast installasjon i for eksempel tunneler.

Indirekte sensorløsninger er informasjon som kommer fra andre kilder, for eksempel fra publikum, fra kjøretøy, og så videre.

4.2.2.1 Direkte sensorløsninger

Det eksisterer flere sensorløsninger enn de som er gitt nedenfor, men fordi flere løsninger måler de samme størrelsene er det kun enkelte tatt med for å synliggjøre at det er teknisk mulig å gjennomføre målinger av størrelsene. I *Veileder for trafikkdata* (Statens Vegvesen, 2014) står det mer detaljert om de mulige sensorløsningene som kan benyttes i dag for innhenting av ulike størrelser.

Video benyttes til å gi visuell informasjon om tilstanden i trafikkstrømmen. Video kan i prinsippet, sammen med software for bildegjenkjenning, brukes til identifikasjon av individuelle kjøretøy. Dette kan gjøres ved gjenkjenning av skiltnummer på bil¹⁰ eller ved bilens form og fasong. Hvilken informasjon denne typen sensor kan detektere avhenger av hvilke(n) type(r) kamera, hvor mange som installeres i tunnelen, oppløsning/detaljgrad av video, med mer.

Radar benyttes til å måle fart og retning på passerende kjøretøy. Det anbefales ikke å benytte radar på veger med større trafikkvolum enn 700 kjøretøy/time, da for tett trafikk kan medføre manglende kjøretøymålinger (Statens Vegvesen, 2014).

¹⁰ Optical character recognition (OCR)

Induktive sløyfer er elektriske ledninger som legges som en spole ned i veien, og ved hjelp av magnetfelt som genereres av passerende trafikk, kan disse registrere volum, fart og lengde til kjøretøy.

Akustiske fiberledninger prøves for tiden ut langs en vegstrekning av E8 i Troms som en del av pilotprosjektet Borealis (Statens vegvesen, 2017). Hovedformålet med Borealis er å utvikle nye og teste eksisterende ITS-løsninger. Disse fiberledningene, som graves ned rett under bakken, transporterer lysstråler som blir forstyrret av vibrasjoner når kjøretøy passerer over. Disse forstyrrelsene varierer blant annet etter kjøretøyets retning, hastighet og størrelse.

Weight-in-Motion (WiM) er sensorer i bakken som kan måle kjøretøys vekt mens det er i bevegelse. Det finnes flere ulike typer sensorer brukt i WIM-system og blant disse er en av typene sensorer basert på fiberoptikk. Disse har flere fordeler i forhold til andre typer sensorer (strain gauge, load cell, piezoelektrisk kvartssensor, etc.) blant annet høy sensitivitet, resistans mot elektromagnetisk forstyrrelse, høy temperatur toleranse, og god korrosjonsresistans (Hanto, et al., 2017). I tilknytning til Borealis skal Statens vegvesen også prøve ut WIM-system¹¹. Disse systemene kan gi informasjon om kjøretøy er for tungt eller feil lastet ved å veie hver aksel på kjøretøyet (Statens vegvesen, 2017).

Piezoelektriske kabler er trykkfølsomme kabler som kan registrere antall akslinger, akselavstand, trykk og fart for passerende kjøretøy, samt de kan måle den sidevegs plassering i kjørebanelen (Statens Vegvesen, 2014)

4.2.2.2 Indirekte sensorløsninger

Data Exchange between traffic and travel information centres II (DATEX II) utvikles av blant annet Den europeiske standardiseringsorganisasjonen (CEN), og er en standard for utveksling og kommunikasjon av trafikkinformasjon mellom trafikksentraler, tjenestetilbydere, og andre aktører. Denne standarden benyttes i dag av Statens vegvesen for å kunne tilby informasjon i sanntid, blant annet værdata, reisetider, kamerabilder, og vegmeldinger med ulikt innhold (Statens vegvesen, 2018). DATEX II er relevant for alle

¹¹ Det vites ikke hvorvidt dette er fiberoptiske sensorer eller andre typer.

områder hvor dynamisk veg- og transportinformasjon benyttes og det er behov for interoperabilitet mellom de ulike informasjonskildene/systemene, blant annet i vehicle-to-infrastructure systemer (DATEX Organisation).

V2X, eller *vehicle-to-everything*, er systemer som gjør det mulig for kjøretøy å kommunisere med hverandre, med infrastruktur, eller med andre plattformer. V2X inkluderer vehicle-to-vehicle (V2V) og vehicle-to-infrastructure (V2I) kommunikasjon. Dette gjør det mulig å benytte kjøretøygenerert informasjon i ITS.

4.3 Normalsituasjoner og restriksjoner

Med utgangspunkt i systemet Byfjordtunnelen beskrives her ulike normalsituasjoner som kan oppstå, altså det som kan regnes som normalitet i trafikkstrømmen, samt de restriksjoner som er gjeldende for situasjonen. Merk at det her menes alle restriksjoner gitt på del(er) av systemet, og ikke kun restriksjoner gitt av sikkerhetsmessige hensyn. Restriksjonene for de enklere situasjonene vil i stor grad være gjeldende også for de mer komplekse. Så fremt annet ikke er spesifisert i teksten vil det altså forstås at restriksjoner fra en situasjon gjelder også for de videre beskrevne situasjoner. Normalsituasjonene blir for enkelthetskyld tildelt nummerering og vil videre omtales etter denne nummereringen (eks. Sit1, Sit2, osv.). Det velges å se bort fra vedlikehold av tunnel som egen situasjon, da det her anses som ekstraordinær situasjon.

Normalsituasjoner for Byfjordtunnelen:

1. Én bil

Den minst komplekse situasjonen som kan oppstå i prosessen¹² er én enkelt bil som kjører gjennom tunnelen. Restriksjoner på denne bilens tur gjennom tunnelen er som følger:

- Fartsgrense som er gitt for gjeldende tunnel.
- Vegmerking. Med vegmerking menes feltinndeling med striper.
- Kjøretøyets egenskaper som akselerasjon, bremseegenskaper, topphastighet.
- Fysiske begrensninger for vegbanen. Byfjordtunnelen har som tidligere nevnt en vertikalkurvatur med høy stigningsgrad. Dette vil legge fysiske begrensninger på bilens potensielle bevegelsesevne; i større eller mindre grad avhengig av ytelsen og vekt på bilen.
- Sikt i tunnel. Byfjordtunnelen er godt belyst, men det er fortsatt ikke på nivå med dagslys og må derfor her som en restriksjon.
- Fartsmåling. Det blir målt gjennomsnittshastighet i nedstigende retning på begge sider av tunnelen. Denne er tett koblet til restriksjonen fartsgrense, og kan forstås som en mer observerende faktor. Det er allikevel en restriksjon i den grad at den kan påvirke førere av kjøretøy i større grad enn kun fartsgrense. Brudd på restriksjonen fartsgrense

¹² Siden prosessen er her trafikkstrømmen vil en tom tunnel ikke være relevant.

vil samtidig gi brudd på fartsmåling og fartsmåling blir derfor utelatt videre som en restriksjon.

- Kontrollhandlinger utført av VTS, nødetater, vedlikeholdsansvarlige, etc. Eksempler er stenging av tunnel/kjørefelt.
- Uønskede objekter i kjørebanelen som dyr, mennesker eller gjenstander.
- Drivstoff tilgjengelig i kjøretøyet.
- Fører av kjøretøyet vil gjennom egne kjøreegenskaper og, avhengig av i hvilken grad fører lar seg påvirke av restriksjonene, utføre sine egne aktive kontrollhandlinger deretter. Eksempler på slike kontrollhandlinger utført er å justere hastighet (med nedbremsing/akselerasjon/jevn hastighet), styre bilen, vurdering av risikoer (eksempelvis uønskede objekt i kjørebanelen) og handling ut ifra dette.
- Værfaktorer spiller i liten grad inn i lengre tunneler. Unntak kan være ved kaldt eller snøtungt føre hvor den individuelle sikten til fører av kjøretøy avhenger av fjerning av frost/snø på vindu, eller hvor snø faller av kjøretøy og medfører dårligere veggrep.

2. To biler i samme retning

Når prosessen består av to biler som kjører samme retning gjelder de samme restriksjoner som i Sit1. Det vil i tillegg legges restriksjoner hastighet på det bakerste kjøretøyet (kjøretøy 1) avhengig av hastigheten til, og avstand til, det fremste kjøretøyet (kjøretøy 2). Dette vil kun være en restriksjon i de tilfeller hvor kjøretøy 2 ønsker å holde høyere hastighet og avstanden til kjøretøy 1 begrenser ønsket hastighet. Dette kan sies å være en passiv kontrollhandling fra kjøretøy 1 på kjøretøy 2¹³. I noen tilfeller vil kjøretøy 2 øke hastighet og minske avstanden til kjøretøy 1, enten i et forsøk på å «tvinge» kjøretøy 1 til å øke hastighet eller som forberedelse på en forbikjøringsmanøver. Dette kan anses som en aktiv kontrollhandling fra kjøretøy 2 på kjøretøy 1. Hvordan kjøretøy 1 forholder seg til denne kontrollhandlingen vil det ikke bli videre spekulert i.

¹³ Det finnes unntak hvor forreste kjøretøy kan utøves aktive kontrollhandlinger på kjøretøy bak; «bremsesjekk» for å fremprovosere større avstand til kjøretøyet bak; senker farten for å forenkle mulighetene for forbikjøring; men for enkelthetskyld ses det bort i fra dette i oppgaven.

3. To møtende kjøretøy

En situasjon med to møtende kjøretøy vil normalt kunne regnes som to tilfeller av Sit1, med samme restriksjoner, da kjøretøyene i utgangspunktet har hver sin «isolerte» kjørebane gitt av vegmerkingen. Hvis et av to møtende kjøretøy krysser over i motgående kjørefelt vil det nødvendigvis utgjøre større risiko enn om et ensomt kjøretøy gjør det samme. Det kan derfor sies at det utøves en restriksjon ved møtende trafikk, som kommer i tillegg til vegmerking.

4. Tunge og/eller lange kjøretøy

Med tunge kjøretøy menes alle kjøretøy for tunge til å klassifiseres som personbil, altså lett lastebil og oppover. Tunge kjøretøy har samme restriksjoner som en vanlig bil. Derimot vil tyngden på kjøretøyet, størrelse, samt motorytelse gjøre at noen av restriksjonene blir mer gjeldende. Med høy stigningsgrad i hver ende av tunnelen vil det være stor påkjenning for kjøretøyetets bremses og motor ved henholdsvis nedstigning og oppstigning.

Lange kjøretøy er alle tunge kjøretøy men inkluderer også personbiler med tilhenger/campingvogn. Disse blir videre i oppgaven ansett som tunge kjøretøy da; den ekstra vekten påfører ekstra belastning på kjøretøyetets motor og bremses; selv om større hengere har egne bremses er det ofte dårlig vedlikehold på disse hengerne (Rosenvinge & Sandbakk, 2014) (Ramsrud, 2011).

5. Normal trafikkstrøm

Ved normal trafikkstrøm, altså omtrent 9600 kjøretøy i døgnet¹⁴, vil trafikkstrømmen være påvirket av de samlede restriksjoner for hver av tidligere beskrevne situasjoner. Her vil hastigheten i større grad være begrenset av mengden kjøretøy som følge av kumulerende effekt av restriksjonene i Sit2.

En ny restriksjon i forhold til Sit3 vil være at flere møtende kjøretøy vil umuliggjøre (ved normal kjøring) forbikjøring. Dette er i Byfjordtunnelen tatt høyde for med krabbefelt i oppstigende retning.

6. Ekstrem trafikkstrøm

Trafikkstrømmen kan bli påvirket av tidspunkt på dagen (vanlig rushtid), hvilken dag i uken, tid på året, ferjetrafikken fra Mortavika-Arsvågen-sambandet, været, eller spesielle

¹⁴ Tid på døgnet vil naturligvis ha innvirkning på trafikkmengden.

høytidsdager/feriedager. Ekstreme trafikkstrømmer oppstår når en kombinasjon av to eller flere av disse kombineres. Eksempelvis vil trafikkstrømmen natt til en vilkårlig tirsdag være langt mindre enn trafikkstrømmen når påsketrafikken inntreffer.

Ved ekstrem trafikkstrøm vil tunnelens kapasitet utgjøre en restriksjon.

Det antas ellers at de samme restriksjonene gjelder for ekstrem trafikkstrøm som for normal trafikkstrøm.

En oversikt over sentrale egenskaper ved trafikkstrømmen, eller egenskaper som har innvirkning på denne, er gitt under i tabell 3. I flere tilfeller vil restriksjonene og egenskapene være avhengige av hverandre i ulik grad. For å gjøre det lettere å skille mellom disse er eventuelle slike tilknytninger ignorert når de ulike restriksjonene er blitt kategorisert og inndelt i tabellen. For bedre oversikt er det også gitt en overordnet restriksjonskategori.

Restriksjonskategori	Restriksjon på egenskap	Restriksjon påført av (kontroller)
Hastighet	Hastighet - interne faktorer	Fartsgrense, egenskaper kjøretøy, fører av kjøretøy
	Hastighet - eksterne faktorer	Annet kjøretøy, tunnelens utforming
Plassering	Kjøretøybane – midlertidige faktorer	Motgående trafikk, midlertidig veimerking og skilting, gjenstander i kjørebane
	Kjøretøybane – permanente faktorer	Tunnelens utforming, design og geografi, vegmerking og skilting
	«trygg» avstand mellom kjøretøy	Kjøretøy
Kjøretøyets tilstand (annet enn hastighet)	Rekkevidde	Tilgjengelig drivstoffmengde
	Bremseegenskaper	Kjøretøyets type, tekniske spesifikasjoner, tilstand av kjøretøyet, egenskaper for veidekket
	Kapasitet - kjøretøy	Vekt og størrelse av last på kjøretøy, vedlikehold kjøretøy, type kjøretøy, korrekthet av utnyttelse av kjøretøy/henger.
	Sikt	Værfaktorer, tunnelens utforming (bl.a. belysning og kledning på tunnelvegger)

Kapasitet	Tilgjengelighet	Kontrollhandling av aktører (stenging av kjøreretning(er), o.l.)
	Trafikkflyt	Tunnelens utforming, trafikkmengde

Tabell 3: Restriksjoner i tunnelsystemet ved normalt situasjonsbilde.

4.4 RIF, avvik og risikoindikatorer

Ved å studere tilgjengelige data (se vedlegg) er det hentet ut det som anses å være de mest sentrale risikopåvirkende faktorene (gitt under i tabell 4). Disse faktorene er kategorisert etter en subjektiv vurdering av alvorlighetsgrad, altså størst risiko for forstyrrelse av trafikkstrømmen. Denne alvorlighetsgraden er basert på hendelsesdata og er vurdert etter følgende kriterier:

- Hvorvidt hendelse førte til stengning av en eller begge kjøreretninger.
- Hvor lang perioden for stengning var. Perioder under 30 minutt anses som kort stengning, mens over 30 minutt anses det som lang stengning.
- Hvorvidt hendelse øker risiko for påfølgende uønskede hendelser. Eksempelvis vil et stanset kjøretøy i vegbanen være lettere å oppdage tidlig enn en relativt liten gjenstand i veibanen. Dette kan igjen medføre mer akutt nedbremsing eller unnamanøver og dermed øke risiko for ny hendelse.

Nivå	Alvorlighetsgrad	Konsekvenser for trafikkstrømmen
3	Høy	Hendelse som medfører stengning i begge retninger. Fullstendig stans i trafikkstrøm.
2	Middels	Hendelse som medfører stengning i en kjøreretning over lengre periode, eller hendelse som gir økt risiko for påfølgende hendelser samt medfører stengning av en eller begge kjøreretninger i kort periode.
1	Lav	Hendelse som kan medføre stengning av en kjøreretning over kort periode. Liten til ingen nevneverdig risikoøkning for påfølgende hendelser.

Tabell 4: Nivåer av alvorlighetsgrad for risikopåvirkende faktorer.

Brudd på en restriksjon vil ha varierende innvirkning på de ulike RIF. Restriksjonene som anses å ha størst potensial for innvirkning på en RIF er gitt i tabell 5 nedenfor.

Fordi restriksjoner er inndelt i overordnede kategorier må det understrekes at tilknytningen mellom restriksjoner og RIF ikke er absolutt. Med det menes at ved en oppstått RIF har det uansett forekommet et brudd i en (eller flere) av tilhørende restriksjon(er), mens et vilkårlig brudd på en restriksjon vil ikke nødvendigvis kunne gi økt sannsynlighet for alle tilknyttede RIF.

RIF	Restriksjonkategori	Kategori
Stans personbil	Kjøretøytilstand, kapasitet	1
Stans tungt/langt kjøretøy	Kjøretøytilstand, kapasitet	2
Møteulykke	Hastighet, plassering, kjøretøytilstand,	3
Utforkjøring	Hastighet, plassering, kjøretøytilstand	3
Brann	Kjøretøytilstand	3
Gjenstand/objekt i vegbanen	Kjøretøytilstand	2

Tabell 5: Risikopåvirkende faktorer og tilhørende alvorlighetsgrad og restriksjoner.

Kategorien, altså alvorlighetsgraden, av de ulike RIF kan bidra i videre vurdering av hvilken risikoendring de ulike tilhørende avvik utgjør for den helhetlige risikoen.

Det skal ikke utelukkes at det eksisterer mange flere mulige RIF enn de som er valgt her, men det anses som hensiktsmessig å begrense seg til hendelser som faktisk er inntruffet, og ikke bare tenkte hendelser.

4.4.1 Avvik og risikoindikatorer

Ved brudd på en restriksjon vil det ha forekommet et avvik fra normalen. Et kjøretøy som avviker fra normalen ved å kjøre fortere enn fartsgrensen tillater, har brutt en restriksjon for hastighet. Et brudd på hastighetsrestriksjoner vil ha innvirkning på risikonivået via de risikopåvirkende faktorene *møteulykke* og *utforkjøring* (gitt i tabell 5); altså vil den økte hastigheten derfor anses som en risikoindikator.

Belastningen på et vogntog som er lastet over lasteevne, vil kunne føre til overopphetning av motor og/eller bremses, noe som igjen kan føre til stans eller i verste tilfelle brann. Dette vil være brudd på en restriksjon for kjøretøytytelse, nærmere bestemt restriksjoner gitt på kapasitet til kjøretøy. Dette bruddet vil derfor kunne antas gi økt sannsynlighet for at de risikopåvirkende faktorene *stans tungt/langt kjøretøy* og *brann* skal inntreffe. Risikoindikator for dette vil være økt temperatur på drivverk og/eller bremses.

Trafikkmodellens evne til å predikere risiko avhenger av dens evne til å detektere og identifisere avvik og tilhørende risikoindikatorer. Trafikkmodellen kan naturligvis ikke identifisere avvik hvis avviket ikke på forhånd er definert i modellen. Følgende avhenger denne evnen til risikopredikasjon av hvilken grad viktige avvik inngår i trafikkmodellens oppbygging. Det antas at det eksisterer flere avvik og risikoindikatorer enn det som kommer frem videre i denne studien. Den videre oversikten over avvik må derfor ikke anses som komplett, men den gir uttrykk for hvilke avvik som vurderes som essensielle.

Med utgangspunkt i de tidligere identifiserte RIF, alvorlighetsgraden av disse, og tilhørende restriksjoner; er det valgt ut avvik som anses for å være sentrale bidragsytere til den helhetlige risikoen. Det er vurdert hvilke tilhørende risikoindikatorer som eksisterer for avvikene; hvordan disse risikoindikatorerne kan uttrykkes ved variabler; og hvordan disse variablene fysisk kan måles.

Brudd på restriksjon	Risikoindikator	Variabel
Kjøretøy avviker fra trafikkstrømmen med en større hastighetsendring.	Signifikant økning eller reduksjon i hastighet.	Hastighet - km/t
Kjøretøy avviker fra den normale kjørebane.	Kjøretøy: krysser over i motsatt kjørefelt, krysser sperrelinjer, «vinglende» kjørebane	Avstand fra et gitt målepunkt – meter
Varmgang i kjøretøy - kjøretøytilstand	Økt temperatur i kjøretøy eller del av kjøretøy	Temperatur - c
Gjenstand i vegbane	Gjenstand i vegbane	Binær variabel -vegbane fri for gjenstander
Kjøretøy er ikke i henhold til forventet/nødvendig stand	Drivstoffnivå lavt, dårlig teknisk stand, risikokjøretøy (se diskusjonskapittel)	Binær variabel - kjøretøystand ok
Et eller flere kjøretøy kjører for tett bak ledende kjøretøy.	Avstand mellom to (eller flere) kjøretøy er for liten til å kunne anses som innenfor gitte sikkerhetsparametere	Avstand mellom kjøretøy

Tabell 6: Sentrale restriksjonsbrudd og tilhørende avvik og risikoindikatorer på disse.

4.5 Byggesteiner i trafikkmodellen

Trafikkmodellen skal som tidligere nevnt gi et uttrykk for hvordan avvik i trafikkstrømmen kan indikere en økning i den helhetlige risiko. I diskusjonskapittelet drøftes det hvordan den helhetlige risikoen i prosessen kan beskrives fortløpende med en slik modell. Byggesteinene beskriver ulike deler av trafikkmodellen, som satt sammen, kan gi en realistisk representasjon av trafikkstrømmen. En byggestein kan her sies å være en grunnleggende algoritme (prosedyre) for den respektive delen av modellen den representerer. Byggesteinene beskriver altså hvilken informasjon (input) som behøves, hvordan informasjonen skal behandles i modellen, og hvordan dette skal uttrykkes for de aktuelle brukere av modellen (output til aktører). Hvilken output som gis og hvordan den kan bidra med en helhetlig beskrivelse av risiko i sanntid, drøftes nærmere i diskusjonskapittelet.

Byggesteinene som gjøres rede for i dette kapittelet er basert på de tidligere identifiserte risikoindikatorer som anses som signifikante for den helhetlige risikoen; viktige faktorer som tidligere ikke har vært knyttet til en bestemt risikoindikator; samt hvorvidt måling av risikoindikatorer og syntese av disse til risikofaktorer er teknisk og praktisk gjennomførbart. For at modellen skal kunne fungere som intendert er den avhengig av bruken av ulike algoritmer. Behovet for kompleksitet i de ulike algoritmene vil variere, og det blir følgende ikke gitt en utredning av alle nødvendige algoritmer i denne studien. En generell algoritme for bruk til kontroll av gitte grenseverdier kan derimot gis ved:

```
If (input.value) > value.limit  
    Give "output"  
Else ignore
```

En inputverdi kontrolleres mot en satt grenseverdi. Hvis inputverdien er større enn denne grenseverdien blir det gitt output. Er inputverdi innenfor grenseverdien blir målingen ignorert og forkastet. For målinger hvor grenseverdien er en minimumsverdi, blir følgende algoritmen omvendt.

➤ **Byggestein 1 – Fundamentet**

Fundamentet i trafikkmodellen for tunneler vil være en eller flere mindre modeller som sammen skal gi en mest mulig presis fortolkning av den reelle tilstanden i systemet, altså de individuelle kjøretøy i den samlede trafikkstrømmen. Her benyttes en grunnmodell som simulerer trafikkflyt på mikroskopisk nivå, det vil si, hvordan de individuelle kjøretøy oppfører seg etter gitte parametere. Nødvendige faktorer som modellen skal uttrykke er gitt av delmodellene CFM, LCM og GAM (se beskrivelse i delkapittelet Modeller). Variabelen her vil være hvor mange kjøretøy som til enhver tid skal inngå i modellen. Sentrale parametere vil være: hastighet, trafikkmengde, trafikk tetthet, headway, og reisetid.

For en modell som skal kjøres én eller flere ganger vil disse parametere gis en verdi, bestemt av et estimat som antas å være representativt for virkeligheten og/eller bestemt ut i fra gjennomsnittsverdier målt over tid. For en driftsorientert modell som skal gå kontinuerlig vil derimot disse parametere kunne anses som variabler som kan måles i sanntid. Dette avhenger nødvendigvis av hvilken type sensorinput som eksisterer for valgte tunnel; noen tunneler har liten til ingen sensorikk installert, og det må derfor være mulig å representere et estimat av virkeligheten for de faktorer hvor sensorinput mangler. Av denne grunn anses dette som en fundamental byggestein.

Til tross for gode fundamentale modeller i bunn, så må en viss form for sensorikk allikevel være tilstede for at en driftsorientert trafikkmodell for tunneler skal kunne gi en noenlunde realistisk representasjon av «nå»-tilstanden i trafikkstrømmen. Det anslås at et minimumsbehov med hensyn til sensorinput vil være registrering av kjøretøy inn og ut av tunnelen. Dette vil gi modellen korrekt antall kjøretøy i tunnelen på et hvert tidspunkt, og kjøretøyenes posisjon kan kalkuleres ut ifra gitte parametere betinget normalsituasjon (f.eks. snitthastighet for type kjøretøy og tid siden kjøretøy entret tunnel vil kunne si noe om hvor kjøretøyet forventes å være i tunnelen). Både antall kjøretøy og posisjonen på kjøretøyene kan være essensielt for redningsarbeid ved en eventuell uønsket hendelse hvor for eksempel sikt er redusert på grunn av store røykmengder.

➤ Byggestein 2 - Hastighet

For at trafikkstrømmen skal flyte på et naturlig vis uten økt sannsynlighet for uønskede hendelser, er det en nødvendighet at hastigheten blant individuelle kjøretøy holdes på et relativt jevnt nivå. Kjøretøy med signifikant høyere hastigheter enn normen for resten av trafikkstrømmen bryter med de restriksjoner som er lagt på hastighet og medfører en økt sannsynlighet for uønskede hendelser øker. På samme måte vil et kjøretøy med lavere hastighet enn normen kunne skape potensielt farlige situasjoner som forbikjøringer, eller så kan den lave hastigheten antyde et kjøretøy med kjøretekniske problemer. Hastighetsfaktoren utgjør altså en mulig økning i den helhetlige risikoen for systemet, og bør derfor inkluderes som en byggestein i trafikkmodellen.

Variabelen for denne byggesteinen kan måles direkte eller indirekte. Ved manglende løsninger for direkte fartsmåling, er det mulig å inkludere en enkel matematisk algoritme i modellen som beregner et kjøretøys hastighet, v ved å registrere strekning tilbakelagt, s , over tid, t . Hastigheten (v) blir da:

$$v = s / t$$

Normen for trafikkstrømmen kan bestemmes på to måter; ved «sanntids» gjennomsnittshastighet for alle kjøretøy i tunnelen; eller fartsgrensen i tunnelen. Fartsgrensen er allerede gitt og vurdering av avvik mot denne kan gis av:

1. Fartsgrense – hastighet kjøretøy = Δ hastighet
2. Δ hastighet vurderes mot gitte grenseverdier (for fartsgrense) og ved overstigning av disse verdiene vil det registreres som avvik.

For vurdering av avvik i hastighet mot gjennomsnittshastighet kan en gå frem slik:

1. Hastighetsmåling individuelle kjøretøy
2. Sum hastighetsmålinger / Antall målinger = Gjennomsnittshastighet
3. Hastighetsmåling på nytt kjøretøy (eller ny måling på allerede målt kjøretøy)
4. Ny måling vurderes mot gitte grenseverdier (for gjennomsnittshastighet) og ved overstigning av disse verdiene vil det registreres som avvik.
5. Ny beregning av gjennomsnittsmåling inkludert ny verdi fra punkt 3. Unntak kan være hvis verdien er vurdert som avvik i punkt 4.

Det gjøres ingen vurdering av hva som er hensiktsmessige grenseverdier her, da det anses som noe som krever ekspertkunnskap/erfaring på området.

Gjennomførbarheten av denne byggesteinen avhenger av sensorer som kan registrere kjøretøyenes forflytning ved flere lokasjoner i tunnellopet. Nøyaktigheten av en gjennomsnittsmåling vil også avhenge hvor mange målinger som tas per kjøretøy.

➤ **Byggestein 3 – Plassering i vegbanen**

Plasseringen i vegbanen, eller stor variasjon av denne, kan gi en indikasjon på et kjøretøy med utilstrekkelig kontroll. Et kjøretøy som varierer mellom å ligge ytterst på hver side av kjørefeltet tyder på ustabile faktorer, enten i kjøretøy eller i førers kjøremønster. Kjøretøy som krysser over i motsatt kjørefelt vil utgjøre en direkte fare for seg selv og motgående kjøretøy. Avstand fra gitte punkt på tvers av kjørebane vil kunne måles ved flere sensorer, men på grunn av kjøretøys bredde varierer vil det være hensiktsmessig å kunne måle avstanden på begge sider av kjøretøy. For eksempel kan avstand fra høyre feltinndelingslinje for kjørefeltet, og avstand fra venstre feltinndelingslinje, måles opp mot gitte grenseverdier. Grenseverdiene bestemmes ut ifra hva hvilke verdier som medfører overstigning av kjørefeltets inndeling.

En mer enkel måte for vurdering av plassering kan være visuell måling ved hjelp av video med bildegjenkjenning. Da neglisjeres faktoren med bredde på kjøretøy, og behovet for to sensorer per målepunkt elimineres. Dette forutsetter at det utvikles egen software og algoritmer for dette spesifikke formål.

Fiberoptiske lyttekabler på langs hver side av kjørefeltet vil i utgangspunktet kunne gi beste kontinuerlige måling av plassering, men det vites ikke hvorvidt en slik lyttekabel kan differensiere mellom ulike kjøretøy eller følge flere individuelle kjøretøy over tid.

Piezoelektriske kabler kan ifølge Veileder i trafikkdata (Statens Vegvesen, 2014) benyttes til å måle et kjøretøys plassering på tvers av vegbanen.

Uansett hvilken sensortechnologi som kan benyttes, vil det sentrale i denne byggesteinen være å måle kontinuerlig et kjøretøys plassering på tvers av kjørefeltet, og kunne si noe om det bryter restriksjonene gitt av kjørefeltinndelingslinjer eller hvorvidt det har en ustabil kjørebane.

➤ **Byggestein 4 – Kjøretøytype**

Det kan være nødvendig å vite hvilke ulike kjøretøy som befinner seg i trafikkstrømmen, da avvik i tunge kjøretøy potensielt sett kan utgjøre en større risikopåvirkning enn lette kjøretøy. Kjøretøytyper kan relativt enkelt modelleres i trafikkmodellen; Ved å benytte WiM-teknologi, induktive sløyfer, piezoelektriske kabler, fiberoptiske lyttekabler, og/eller lignende, kan en måle et kjøretøys lengde, volum og/eller vekt. Disse variablene kan sjekkes mot et gitt sett grenseverdier og så tildeles en verdi som representerer kjøretøytypen, for eksempel slik:

Input (vekt av kjøretøy) > grenseverdi (øvre grense for lette kjøretøy)

➔ Definer som tungt kjøretøy

Basert på hvilken type et kjøretøy defineres, kan kjøretøyet assigneres en egen risikoverdi som dermed kan inkluderes i risikoberegning hvis det skulle forekomme et avvik ved kjøretøyet.

Videre kan lasten i et kjøretøy også vurderes til en viss grad ved å:

1. Kjøretøytype defineres og vekt, volum og/eller lengde av kjøretøyet sjekkes opp mot grenseverdier for disse størrelsene basert på gitte restriksjoner på eksempelvis:
 - totalvekt
 - hengerstørrelse
 - maksimal hengervekt / lastevekt
2. Ved brudd på disse restriksjoner, vil kjøretøy kunne «flagges» som et avvik og eventuelle kontrollhandlinger kan bestemmes.

➤ **Byggestein 5 - Kjøretøytilstand**

Tilstanden til et kjøretøy kan si noe om forventet ytelse og driftssikkerhet av dette. Avvik fra en normalt god kjøretøytilstand er tidligere identifisert som drivstoffmangel, generell teknisk dårlig forfatning og mangel på vedlikehold, og varmgang i kjøretøyets drivverk eller bremses. Varmgang kan oppdages ved bruk av infrarøde sensorer som registrerer temperatur. En parameter vil her være en gitt grensetemperatur som ikke må overstiges. I modellen kan det utføres en kontinuerlig vurdering på input gitt fra sensor(er) plassert i/ved tunnelen. Denne kontrollen utføres enkelt ved en simpel algoritme i modellen som ved brudd temperaturer over gitt grenseverdi gir en bestemt output.

Bildegjenkjenning fra foto/video ved inngangen til tunnel kan benyttes for å identifisere kjøretøy, og sjekke status på blant annet periodisk kontroll for det gitte kjøretøy i kjøretøyregisteret. For en fortløpende vurdering av andre faktorer ved kjøretøytilstand, kreves det en kommunikasjon mellom kjøretøy og ITS-systemet (V2I). Informasjonen om kjøretøyet blir deretter kontrollert opp mot gitte grenseverdier for parametere, og eventuell overstigning av grenseverdiene medfører output fra modellen.

➤ **Byggestein 6 – Eksterne forstyrrelser**

Eksterne forstyrrelser forårsakes av faktorer som ikke er en del av den normale trafikkstrømmen. Det kan være uønskede objekter i tunnelen som fotgjengere, syklist, dyr, gjenstander, oljesøl, etc. Kjøretøy som har stanset i vegbane eller havarilomme kan også ses på som uønskede objekter i denne forstand.

Det kan også være faktorer som påvirker integriteten til selve infrastrukturen, som rasfare, fysiske skader på vegbanen, o.l.

For at modellen skal kunne gi uttrykk for dette kreves det feedback fra systemet. For uønskede objekter er bildegjenkjenning igjen en mulighet. Det gjøres en kontroll av alle objekter i tunnelen og det gis en output hvis de identifiseres som noe annet enn kjøretøy som er en del av trafikkstrømmen. For å vurdere om et kjøretøy er en del av trafikkstrømmen eller er et uønsket objekt (stanset kjøretøy), må det eksistere en interoperabilitet mellom byggesteinene. For at et stanset kjøretøy ikke skal identifiseres som et «godkjent» objekt, må det kryss refereres med byggestein for hastighet. Når det da ikke eksisterer en gyldig verdi for hastigheten blir da kjøretøyet klassifisert som uønsket objekt. Rasfare og lignende, blir sett på som faktorer som krever feedback fra eksterne kilder, eksempelvis eksperter, vedlikeholdsoperatører, og lignende.

➤ **Byggestein 7 – Helhetlig risiko**

Det er som nevnt tidligere ønskelig at modellen skal kunne uttrykke en helhetlig risiko. For å gjennomføre dette må de ulike avvik tildeles en verdi som sier noe om i hvilken grad de påvirker den totale risikoen. Videre må disse verdiene summeres og vurderes mot gitte grenseverdier. Fordi usikkerheten er stor i forhold til hvorvidt avvik medfører en uønsket hendelse eller ei, anses det ikke som hensiktsmessig å bruke en vurdering av helhetlig risiko som baseres på sannsynlighet. Verdien baseres heller på alvorlighetsgraden av konsekvenser et avvik potensielt kan medføre. Som en kan se i tabell 5 er avvik i restriksjonskategori

«kjøretøytilstand» tilknyttet alle identifiserte RIF. Dette tilsier i utgangspunktet at et avvik i kjøretøytilstand må gis en substansiell verdi. Problemet med dette er at det eksistere flere ulike avvik i denne kategorien som en ikke kan rettferdiggjøre denne verdien for. For eksempel vil naturligvis ikke en personbil med drivstoffmangel utgjøre en veldig høy økning i helhetlig risiko.

Derfor må det først bestemmes i hvilken grad et avvik har innflytelse på en RIF, og deretter justere verdien etter denne innflytelsen på, samt alvorlighetsgrad av, RIF. Verdier for avvik vil ikke bestemmes i denne oppgaven, da det anses som for omfattende å finne de mest korrekte verdier, samt validere disse ved å studere større mengder data enn det som er tilgjengelig. Det kan derimot gis et generelt eksempel på hvordan helhetlig risiko prinsipielt kan uttrykkes og er som følger:

I en modell for et tunnelsystem settes grenseverdier for helhetlig risiko til 5, 10 og 20, for henholdsvis middels, høy og akutt risiko. Verdier under 5 anses som liten risiko, mens verdier lik eller høyere 20 anses som høy risiko. Den samlede verdien for registrerte avvik kan automatisk reduseres når for eksempel kjøretøy med avvik er registrert utkjørt av tunnelen, eller avvik kan manuelt slettes etter en fortløpende vurdering av menneskelige kontrollere.

1. Det registreres et avvik i tunnelen med verdi 2, dette avviket kan for eksempel være lavt drivstoffnivå.
2. Output fra modellen er uendret da dette avviket alene ikke utgjør noen større endring.
3. Like etter registreres avvik med verdi 6. Dette kan være et veldig saktegående tungt kjøretøy.
4. Output fra modellen viser nå at helhetlig risiko anslås å være middels.
5. Det registreres nytt avvik med verdi 12 i det saktegående kjøretøyet i form av temperatur over gitte grenseverdier.
6. Modellen forteller nå at den helhetlige risikoen er akutt.
7. Kontrollhandlinger må iverksettes.

At risikoen i dette eksempelet er akutt kan forklares med at et saktegående tungt kjøretøy kan indikere tekniske problemer, og i tillegg vil høy temperatur være en ledende indikator på brann. Samtidig vil kjøretøyet med lavt drivstoffnivå ha en økt risiko for stans, som igjen kan medføre forstyrrelser i trafikkstrømmen. Samlet gir disse avvikene en markant økning i

helhetlig risiko. Nødvendige kontrolltiltak bestemmes manuelt eller automatisk. For eksempel ved bruk av Roadrunner, kan en drone automatisk ved hjelp av algoritmer vurdere at stans i tungt kjøretøy utgjør lavere risikoverdi enn høy temperatur i kjøretøy¹⁵; og deretter lokalisere det tunge kjøretøyet og informere dette, med bruk av audio eller visuelle hjelpemidler, at det må stanse. Helhetlig risiko reduseres tilsvarende hvis ny måling av temperatur i kjøretøyet reduseres samt avvik for saktegående kjøretøy slettes. En midlertidig økning i risiko vil imidlertid forekomme da én nå har et stanset tungt kjøretøy.

¹⁵ Dette eksempel gjelder varmgang i drivverk i oppoverbakke. Ved måling av høy temperatur i et tungt kjøretøys bremses i nedoverbakke, vil det ikke være hensiktsmessig å signalisere dette kjøretøyet om å stanse, da dette involverer større belastning på bremses med allerede for høy temperatur.

5 Diskusjon

I dette kapittelet ses det nærmere på diskusjonsmomenter som ikke tidligere har blitt godt nok berørt, det drøftes ulike aspekter som begrensninger og forutsetninger for utnyttelse av en driftsorientert trafikkmodell, samt det redegjøres for hva som menes er essensielt videre arbeid.

En viktig del av trafikkmodellens evne til å representere virkeligheten avhenger av hvilken input som er tilgjengelig. Dette avhenger igjen av i hvilken grad en kan gjennomføre kontinuerlig måling, eller i det minste ha flere målingspunkter, langs kjørefeltene i tunnelen. Det bør ved videre arbeid mot en komplett trafikkmodell gjøres rede for hvilke løsninger som egner seg best til dette formålet eventuelt behovet for nye løsninger.

I et tenkt system med en driftsorientert trafikkmodell som detekterer avvik, samt en løsning for kontrollrespons på avvikene (f.eks. Roadrunner), vil én måtte ta hensyn til eventuell *lag* som oppstår. *Lag* kan forplante seg gjennom ulike deler av kontrollsjirkele. Når et avvik oppstår vil tidsrommet for mulige kontrollhandlinger være begrenset og det er derfor kritisk at kontrollere raskt kan avgjøre hvilke kontrolltiltak som bør utføres. Reaksjonstiden til aktuatorer vil også være viktige for tidskritiske kontrolltiltak. I dette tenkte systemet kan *lag* oppstå i flere deler av kontrollsjirkele; tiden en drone bruker for å forflytte seg til ønsket posisjon; feedback forsinkelser som følge av at målinger gjøres ved gitte tidsintervaller (eller intervaller langs tunnellopet); eller et registrert avvik eller følgende kontrolltiltak krever validering og godkjenning av en menneskelig kontroller. *Lag* som oppstår som følge av dataprosessering, altså beregninger internt i datasystemer, anses som neglisjerbar da ytelsen på dagens datasystemer er veldig høy (forutsetter nødvendigvis bruk av nyere hardware). For å håndtere *lag* vil systemet måtte testes og der hvor *lag* er mest fremtredende bør tiltak iverksettes. Hvis det viser seg at dronene bruker for lang tid til å komme i posisjon, må kanskje hastigheten på dronene økes, eller antallet droner bør økes slik at distansen mellom avvik og drone reduseres. Hvis feedback forsinkelser er for store, må tidsintervallene for måling reduseres, gjerne ved installasjon av flere sensorer. Forsinkelser som følge av menneskelige faktorer kan reduseres ved bedre kontrollalgoritmer hos operatørene, altså forbedre prosedyrer og/eller gi bedre opplæring; eller den menneskelige faktoren kan fjernes

helt ved å utvikle automatiske kontrollalgoritmer. Det anbefales, når trafikkmodellen er kommet lenger i utviklingsstadiet, at det gjennomføres en grundig utredning på hvor eventuell lag kan oppstå i systemet, og hvordan dette best kan reduseres til akseptable nivåer.

Den foreslåtte fremgangsmåten i byggestein for helhetlig risiko forutsetter en noe lineær vurdering av avvik. Det kan eksistere flere avvik ved samtidig inntreffelse kan forårsake en ikke-lineær økning i risiko. Altså vil to avvik som hver for seg blir tildelt risikoverdi 2, sammen kunne forårsake en risikoøkning som er mye høyere enn den samlede verdien av disse (4). Det må derfor forsøkes å identifisere slike ikke-lineære tilfeller. En idé kan være å granske tidligere ulykkes- og hendelsesrapporter for å avgjøre om det finnes tilfeller hvor to (eller flere) tilsynelatende uavhengige avvik, som samlet medførte den uønskede hendelsen.

Fra hendelsesdata gis det at tunge kjøretøy (medregnet personbil med tilhenger eller campingvogn) er involvert i 34% av de registrerte hendelsene i Oslofjordtunnelen i perioden. Den årlige andelen av tunge (lange) kjøretøy var derimot kun på 15%. Tunge kjøretøy er altså overrepresentert i hendelsesstatistikken tilgjengelig i denne studien. Det kan argumenteres for at statistisk signifikans for et så lite datautvalg ikke er tilfredsstillende. Da det allikevel er relativt velkjent at tunge kjøretøy har større problemer enn lette kjøretøy med de høye stigningsgradene i noen tunneler; må det vurderes om tunge kjøretøy i seg selv er et «avvik» som bør gis ekstra oppmerksomhet. For eksempel vil Roadrunner muliggjør kontinuerlig overvåking av tunge kjøretøy i kritiske deler av tunnelen (hvor stigningsgraden er høy), og umiddelbart kunne utføre kontrolltiltak hvis avvik i eksempelvis temperatur detekteres. Dette handler om prioritering av ressurser og bør følges studeres nærmere når det er gjort rede for hvilke ressurser som faktisk er tilgjengelig.

De to mest fremtredende årsakene er teknisk feil på kjøretøy og drivstoffmangel med cirka 52% og 20% (Engebretsen). Disse årsakene gir brudd på restriksjonen om kjøretekniske egenskaper for kjøretøy, men er ikke umiddelbart mulige å hverken registrere eller vurdere fortløpende i tunnelsystemet. En mulig fremtidig løsning for registrering av drivstoff vil være å benytte seg av vehicle-2-infrastructure teknologi. Dette bør være gjennomførbart teknisk sett, da standarder som DATEX II er under rask utvikling. En potensiell hindring kan være gjennomførbarheten av å «presse» nye standarder på en konkurransestilt bilindustri. Når det gjelder å registrere/måle kjøreteknisk tilstand på et passerende kjøretøy anslås dette for å være tilnærmet umulig. Derimot vil en ved identifisering av kjøretøy (for eksempel registrering av bilskilt, V2I, e.l.) kunne iverksette en automatisk prosess som fortløpende sjekker opp

identifisert kjøretøy mot kjøretøyregisteret til Statens vegvesen. I dette registeret er allerede informasjon om kjøretøyets type, alder, tid siden forrige periodiske kjøretøykontroll, etc., og dette kan gi en indikasjon på kjøretøyteknisk tilstand.

Det kan diskuteres hvorvidt deteksjon av avvik i trafikkstrømmen er viktig hvis man ikke har midler til å følge opp avvikene og potensielt forhindre følgende hendelser. Alle registrerte data om avvik og indikatorer på uønskede hendelser kan selvfølgelig analyseres og benyttes i videre studier av årsakssammenhenger og lignende. Men for å direkte øke sikkerhetsnivået i tunneler anses tidlig deteksjon av hendelser som sentralt. En driftsorientert trafikkmodell som fortløpende kan vurdere avvik og tilhørende risiko i tunnelen komplementeres derfor bra av et system som Roadrunner. Roadrunner kan med sine skinnegående droner bidra med en oppfølging av detekterte avvik som ikke ellers er mulig ved mer konvensjonell overvåking. Ved brudd på ulike restriksjoner kan drone(r) sendes til gjeldende kjøretøy og informere fører av kjøretøy av dette, samt utføre kontrolltiltak i form av audio og/eller visuelle kommandoer/signaler.

Som nevnt tidligere er det viktig at AID-systemer ikke genererer for mange feilalarmer. Her vil en trafikkmodell som uttrykker avvik i trafikkstrømmen kunne forbedre dette aspektet. Når AID-systemet gir alarm om hendelse, kan denne hendelsen automatisk kryssrefereres mot registrerte avvik for den delen av tunnelsystemet hvor hendelsen tilsynelatende oppstod. Fordi hendelser i prinsippet kan oppstå uten at noen avvik først er registrert, vil en allikevel måtte undersøke alle alarmer. En slik kryssreferering vil allikevel kunne bidra til å si noe om kredibiliteten til alarmen. Dette må undersøkes nærmere i videre studier.

Det kan ikke ignoreres at visse typer sensorinput kan benyttes til å identifisere privatpersoner, og dermed vil personvern og lover om personvern, utgjøre en ny problemstilling. Hvilke data kan registreres? Kan alle data benyttes eller må noe forkastes? Kan data lagres til analyse eller bruk senere? Dette må redegjøres for videre i utviklingen av trafikkmodellen og tas hensyn til i valg av sensorinput.

6 Konklusjon

Formålet med studien har vært å identifisere de viktigste byggesteiner for en driftsorientert trafikkmodell for tunneler som skal kunne detektere avvik i trafikken, altså potensielle forløpere til uønskede hendelser. Det er ingen tvil om at det gjenstår mye arbeid før en slik trafikkmodell er ferdigstilt, men med denne studien er det dannet et godt grunnlag for videre utvikling.

Det er identifisert syv byggesteiner.

- ***Byggestein 1: Fundament***
- ***Byggestein 2: Hastighet***
- ***Byggestein 3: Plassering i vegbanen***
- ***Byggestein 4: Kjøretøytype***
- ***Byggestein 5: Kjøretøytilstand***
- ***Byggestein 6: Eksterne forstyrrelse***
- ***Byggestein 7: Helhetlig risiko***

Hver enkelt byggestein representerer et aspekt som er vurdert som nødvendig for at trafikkmodellen skal kunne gi uttrykk for risikoendringer ved avvik i trafikkstrømmen som potensielt kan lede til en uønsket hendelse, og dermed økning i helhetlig risiko. For å modellere disse byggesteinene kreves ulike inndata, enten fra sensorteknologi eller fra en eller flere av de andre byggesteinene. Det eksisterer i dag teknologi som i prinsippet muliggjør måling av de nødvendige størrelser for de ulike byggesteiner; det har derimot ikke lyktes på et så tidlig stadium å bestemme hvilke(n) teknologi som egner seg best for de respektive byggesteiner.

I det videre arbeid vil det være hensiktsmessig å utvikle mer konkrete og detaljerte algoritmer for hvordan byggesteinene skal modelleres, samt hvordan byggesteinene kan knyttes sammen til å danne en mer komplett trafikkmodell. Mulighetsstudier av hvilken teknologi som er egner seg best til å gi korrekt inndata i modellen er også nødvendig.

7 Referanseliste

- Aven, T. (2006). *Pålitelighets- og risikoanalyse*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Aven, T. (2015). *Risikostyring*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Bang, B. (2016). *Trafikksimulering av kø i by*. Hentet Mars 2018 fra Statens vegvesen:
https://www.vegvesen.no/_attachment/1563780/binary/1137886?fast_title=03+Mikrosimulering+av+trafikkavvikling+i+by.pdf
- Blaikie, N. (2010). *Designing social research: The logic of anticipation*. Cambridge: Polity Press.
- Brockfeld, E., Kühne, R. D., Skabardonis, A., & Wagner, P. (2003). Towards a Benchmarking of Microscopic Traffic Flow Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(Vol. 1852), ss. 124-129.
- DATEX Organisation. (u.d.). Hentet 24. april 2018 fra Datex2:
http://www.datex2.eu/sites/www.datex2.eu/files/Datex_Brochure_2011.pdf
- Engebreetsen, A. (u.d.). *Ulykker i tunnel*. Hentet 18. februar 2018 fra
<http://docplayer.me/docview/62/48189322/#file=/storage/62/48189322/48189322.pdf>
- Flügel, S., Flötteröd, G., Kwong, C., & Steinsland, C. (2014). *TØI rapport 1358/2014: Evaluations of methods for calculating traffic assignment and travel times in congested urban areas with strategic transport models*. Oslo: Transportøkonomisk Institutt.
- Hanto, D., Ula, R., Setiono, A., Puranto, P., Adinanta, H., Waluyo, T., & Widiyatmoko, B. (2017). Comparison study between static and dynamic responses of optical fiber weight in motion sensor. *Journal of Physics: Conference Series* 817 012041.
- Hollander, Y., & Liu, R. (2008, Januar 15). The principles of calibrating traffic microsimulation models. Springer Science + Business Media.
- Hoogendoorn, S., & Knoop, V. (2013). Traffic flow theory and modelling. I B. van Wee, J. A. Annema, & D. Banister, *The Transport System and Transport Policy - An introduction*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited.
- Leveson, N. (2011). *Engineering a Safer World*. London: MIT Press.
- Mathew, T. V. (2017). Fundamental Parameters of Traffic Flow. *Lecture notes in Transportation Systems Engineering*. Bombay: Indian Institute of Technology .
- Myrland, J. V. (2016). VTS 2020 - Bedre tjenester fra vegtrafikksentralene med ny teknologi. *Teknologidagene - Innovativ og smart vegtransport*. Trondheim: Statens vegvesen.

- Njå, O. (2017). *Mulighetsstudie - Roadrunner*. Stavanger: IRIS .
- Pascale, A., Nicoli, M., Deflorio, F., Chiara, B. D., & Spagnolini, U. (2011, Mai 8). Wireless sensor networks for traffic management and road safety. *IET Intelligent Transport Systems*.
- Punzo, V., & Simonelli, F. (2005, Januar). Analysis and Comparison of Microscopic Traffic Flow Models with Real Traffic Microscopic Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(Vol. 1934), ss. 53-63.
- Ramsrud, K. (2011, desember 6). *Mange kjører ulovlig med henger*. Hentet 12. mai 2018 fra Ringerikes Blad: <https://www.ringblad.no/motor/mange-kjorer-ulovlig-med-henger/s/1-97-5834810>
- Rosenvinge, M., & Sandbakk, P.-K. (2014, januar 7). *Mange dårlige tilhengere*. Hentet 12. mai 2018 fra NRK: https://www.nrk.no/sorlandet/_-mange-darlige-tilhengere-1.11455256
- SNL. (2018, februar 20.). *Algoritme*. Hentet 15. mai 2018 fra Store norske leksikon: <https://snl.no/algoritme>
- Statens vegvesen. (2013, April 9). Hentet fra Nettside Statens vegvesen: <https://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/nasjonalt/vts-20-ar-som-vegvesenets-oye>
- Statens Vegvesen. (2014). *Veileder i trafikkdata*. Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen. (2017, Oktober 19). *Legger lyttekabler i vegen*. Hentet 20. mars 2018 fra Statens vegvesen: <https://www.vegvesen.no/Europaveg/e8borealis/nyhetsarkiv/legger-lyttekabler-i-vegen>
- Statens vegvesen. (2018, mars 22). *DATEX II*. Hentet 11. april 2018 fra Statens vegvesen: <https://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/om+organisasjonen/apne-data/Datex>
- Thorsen, H. K. (2013). Monitorering av storulykkesrisiko i drift av en offshore installasjoner - En studie av ledende indikatorer. (*Masteroppgave*). Stavanger: Universitetet i Stavanger.
- Trondsen, J. (2018). Digitalisering - Vegtrafikksentralene - hva trenger de? *Kursdagene - Digitalisering i tunnelbransjen*. Statens vegvesen.
- Vejdirektoratet. (2010). *Trafiksteknik - Anvendelse af Mikrosimuleringsmodeller*. Vejdirektoratet Danmark.
- ViaNova. (2013, Oktober). *Automatisk hendelsesdetektering i tunnel - Teknologisammenligning*. Oslo: Statens vegvesen.

- Vinnem, J., Aven, T., Sørum, M., & Øien, K. (2003). Structured approach to risk indicators for major hazards. *ESREL*.
- Wiencke, H. S., Midtgaard, A., & Engebretsen, A. (2007). *Veileder for risikoanalyser av vegtunneler*. Vegdirektoratet .
- Øien, K. (2001). Risk indicators as a tool for risk control. *Reliability Engineering and System Safety* 74, ss. 129-145.
- Øien, K., Tinmannsvik, R., Massaiu, S., & Størseth, F. (2010). *Building Safety - Development of new models and method for the identification of early warning indicators*. Trondheim: SINTEF.

8 Vedlegg

8.1 Data Byfjordtunnelen

8.1.1 Ulykker

Oversikt over uønskede hendelser i Byfjordtunnelen i hele tunnelens driftstid. Dette er hendelsene som er publisert på Vegkart-tjenesten til Statens vegvesen, og omfatter kun større hendelser (ulykker). Det er registrert noen flere ulykkesinvolverte kjøretøy i vegkart-databasen, hvor flere av disse er på tidspunkt hvor det ikke er registrert hendelser. Disse er også lagt ved i tabell og merket som ukjent hendelse (N/A).

Tidspunkt for hendelse	Type(r) kjøretøy involvert Personbil = P Motersykel = M Lastebil = L Tankbil = T Kombi = K Varebil = V	Hendelse	Hendelseslokasjon i tunnelen i meter fra tunnelstart på Randaberg siden. NB. Merk at selve tunnelmunningene på Randaberg og Sokn er plassert omtrentlig fra henholdsvis 321m og 6192.
09.09.1996 08:28	P, T	Påkjøring bakfra	1082
02.08.2004 09:30	M, P	Forbikjøring	1010
24.05.2006 09:30	P, P	Møteulykke i kurve	1613
09.10.2007 10:58	P	Utforkjøring på venstre side i høyrekurve	2221
08.04.2008 22:25	P	Utforkjøring på venstre side på rett vegstrekning	518
20.08.2011 02.50	P	Utforkjøring på høyre side på rett vegstrekning	234
07.02.2012 09:44	P, L, K, K	Forbikjøring	6086
19.10.2012 17:00	P, P	Påkjøring bakfra	6061
31.12.2012	P, P	Ukjent hendelse	2277
27.08.2013 09:15	P, V	Påkjøring bakfra	4163
29.09.2013 08:00	N/A	Utforkjøring på høyre side på rett vegstrekning	2015
25.11.2013	P	Ukjent hendelse. Mulig denne hører til hendelse 29.09.2013, og dato er feilregistrert.	2015

31.12.2013 20:16	P, P	Uhell med uklart forløp ved møting	6092
12.09.2014 16:08	P, P	Møteulykke på rett vegstreking	5354
21.03.2015 01:24	P	Utforkjøring på høyre side i høyrekurve	1506
21.10.2015 17:17	P, P, V m/henger	Møteulykke på rett vegstreking	3426
05.04.2016 00:02	P	Utforkjøring på venstre side på rett vegstreking	3186

8.2 Data Oslofjordtunnelen

Tabellen viser alle hendelser i Oslofjordtunnelen i perioden 18.4.2017 – 18.4.2018 (kilde: Kai Gundersen, Statens vegvesen).

Tidspunkt for hendelse	Tidspunkt gjenåpning tunnel (samme dato såfremt ikke annet oppgitt), hvis stengning (antall kjøretøyer stengt av 3 mulige, eventuelt hvilken retning. Ø = retning Drøbak, V = retning Drammen, B = Begge retninger)	Type(r) kjøretøy involvert	Hendelse eller årsak til stengning, samt eventuell annen informasjon	Kamera som oppdaget hendelse (hvis oppgitt)
19.04.2017 15:47	16:32 B	Personbil og lastebil	Kollisjon	939/940
20.04.2017	17:39 V	Buss (russebuss)	Tom for drivstoff	989
21.04.2017 11:46	12:25 B	N/A	Gjenstand i veibanen har medført oljesøl	
23.04.2017 08:24	08:34 B	Personbil	Melding om brann fra Brann øst; ingen brann funnet på kamera.	
24.04.2017 09:00	10:24 V	N/A	Stengt en retning pga. hendelse i Elgskaugåstunnelen	
26.04.2017 11:57	14:50 B	Personbil	Brann	907
30.04.2017 11:38	11:45 V	Bil med båthenger	Veldig saktegående	

01.05.2017 16:25	17:02 Ø	N/A	Gjenstander i veibanen	943
02.05.2017 17:10	17:58 Ø	Vogntog	Stans	916
05.05.2017 17:50	29.05 19:02 B	Vogntog	Brann i last (bestående av papir)	
31.05.2017 07:55	08:28 Ø	Personbil	Punktering	
01.06.2017 10:06	10:27 Ø	Personbil	Stans	930
06.06.2017 08:26	08:35 V	N/A	Gjenstander i kjørebanelen	
06.06.2017 08:40	09:04 Ø	Varebil	Punktering	972
07.06.2017 20:47	21:25 Ø	Personbil	Stans, stengt kjørefelt mens berging pågår.	981
08.06.2017 23:25	00:23 V	Personbil	Stans	980
11.06.2017 18:55	19:06 Ø	Personbil	Stans	937
13.06.2017 12:52	13:06 Ø	Personbil	Stans	
14.06.2017 09:31	09:54 V	Personbil	Stans	962
15.06.2017 16:28	16:36 Ø	N/A	Jekkestropp i vegbanen	
21.06.2017 17:16	17:43 Ø	Personbil	Stans. Stengning mens berging pågår.	
22.06.2017 18:53	20:13 V	Bil m/campingvogn	Defekt clutch, stans i havarilomme.	952
23.06.2017 09:42	09:59 V	Buss	Stans	971
25.06.2017 02:58	N/A	N/A	Mulig fyllekjører har stoppet i tunnel.	994
25.06.2017 06:36	06:58 V	Fotgjenger	Fotgjenger oppdages på kamera. Blir hentet av politiet.	902/930
25.06.2017 12:11	13:53 Ø	Vogntog	Stans	942
25.06.2017 18:34	18:43 B	Ukjent kjøretøytype	Melding om brann. Ingen brann, kjøretøy med mye røyk kjørte ut av tunnel for egen maskin.	994
29.06.2017 09:44	10:54 V	To personbiler	Uhell med melding om røykutvikling. Ingen røyk sett fra Hurum.	
29.06.2017 16:55	17:44 V	Personbil	Stans	984
30.06.2017 09:25	10:17 V	Vogntog	Stans	971
30.06.2017 12:12	12:36 B	N/A	Melding om jernstang i veibanen. Ikke mulig å se på kamera.	
04.07.2017 09:09	09:29 V	Personbil	Stans	979
04.07.2017 09:53	10:10 Ø	Vogntog	Kort stans	

04.07.2017 17:05	17:54 B	N/A	Gjenstander i veibanen	947 og 966
05.07.2017 21:52	23:02 Ø	Vogntog	Stans pga. drivstoffmangel.	905
06.07.2017 21:16	21:25 Ø	Personbil	Bremseproblemer	981
09.07.2017 21:40	22:56 N/A	Personbil	Stans	940
12.07.2017 07:34	08:00 Ø	N/A	Søppelsekk i veibane	950
19.07.2017 19:14	19:53 Ø	Bobil	Stans	932
19.07.2017 21:37	21:40 Ø	Personbil	Stans	912
20.07.2017 16:13	16:37 Ø	N/A	Gjenstander i veibane	
23.07.2017 09:56	10:45 Ø	N/A	Gjenstander i veibane	
28.07.2017 17:24	17:27 V	Personbil	Stans	960
30.07.2017 19:03	19:19 V	N/A	Gjenstander i veibane	909,949, 959,979
02.08.2017 13:32	14:16 B	Vogntog	Melding om brann, fører melder at det er vanddamp fra røket vannslange.	919
03.08.2017 18:05	N/A	N/A	Trillebår i veibanen. Personbilfører flytter denne til havarilomme. Ingen hindring	930
03.08.2017 19:09	20:05 Ø	N/A	Melding om planke i veibanen	
07.08.2017 15:57	16:22 Ø	Bobil	Stans	930
11.08.2017 11:44	12:16 Ø	Bobil	Stans	904
12.08.2017 15:32	16:35 V	N/A	Melding om bilstans. Funnet på kamera	983
14.08.2017 19:35	20:50 Ø	Liten lastebil	Melding om stans. Funnet på kamera	956
15.08.2017 14:33	14:55 V	Personbil	Stans	
16.08.2017 02:08	03:08 V	Vogntog	Stans	997
19.08.2017 N/A	18:54 V	Personbil	Stans	976
21.08.2017 18:11	18:46 V	Personbil	Stans	
23.08.2017 13:53	14:16 V	Personbil	Stans	
23.08.2017 20:32	21:00 Ø	Syklist	Syklist i en kjøreretning. Kjøreretning stengt.	
25.08.2017 14:24	14:42 V	Personbil	Stans	934
28.09.2017 16:04	19:26 Ø	Lastebil m/henger	Stans	912

29.08.2017 19:44	19:56 V	Lastebil	Stans	952
03.09.2017 18:51	18:56 B	Vogntog	Brann; slukkes av fører etter kort tid.	973
04.09.2017 14:43	14:56 Ø	Personbil	Stans	919
06.09.2017 14:27	14:36 V	N/A	Berging av kjøretøy i havarilomme	963
12.09.2017 09:48	09:57 V	Personbil	Stengt mens berging av kjøretøy i havarilomme.	943
13.09.2017 19:29	20:06 Ø	Lastebil	Stans i bakken mot Drøbak. Produserer mye eksos på vei ut.	
15.09.2017 22:18	23:45 Ø	Vogntog	Stans	
19.09.2017 10:47	10:57 B	N/A	Stengt, årsak ikke oppgitt.	
28.09.2017 16:01	17:02 Ø	Varebil m/henger	Stans	912
06.10.2017 11:24	11:57 Ø	Syklist	Syklist i tunnel, stengt aktuell kjøreretning.	
06.10.2017 15:56	17:10 Ø	Bil m/campingvogn	Stans	916
09.12.2017 02:41	04:58 Ø	Vogntog/tankbil	Saktegående før stans.	
09.10.2017 12:36	12:59 Ø	N/A	Jekkestropp i veibanen	947
09.10.2017 19:04	19:27 Ø	Personbil	Stans	914
10.10.2017 06.42	07:19 V	Personbil	Stans	979
11.10.2017 01:40	04:41 V	Lastebil	Punktering. Lastet med propan.	
13.10.2017 13:07	14:00 Ø	Personbil	Stans	919
17.10.2017 04:57	06:18 B	N/A	Betongblokk løsnet fra vegg. Stengt begge retninger.	966
18.10.2017 10.03	10:17 B	Personbil	Røyk observert av forbipasserende. Stengt begge retninger. Røyk var vanndamp, motoren kokte. Kjørte ut for egen maskin.	960
19.10.2017 13:14	13:44 Ø	Personbil	Stans	
25.10.2017 08:50	09:18 Ø	N/A	Kjettinger i veibanen	
12.11.2017 10:05	10:52 B	Lastebil	Røykutvikling. Brannstengt. Kjører ut på egenhånd	946
14.11.2017 13:26	14:53 Ø	Personbil	Stans	
20.11.2017 20.03	20:25 V	N/A	Gjenstand i veibanen	993
21.11.2017 10:05	10:19 B	Vogntog	Røykutvikling, stengt begge retninger.	

			Vogntog kjørte ut på egenhånd.	
01.12.2017 08:13	08:35 B	Personbil m/henger	Mistet isoporplater.	901
02.12.2017 07:43	08:35 V	Personbil m/henger	Stans	924
09.12.2017 02:39	04:19 B	Tankbil	Saktegående før stans. Lastet med propan. Stengt begge retninger mens berging pågår.	
11.12.2017 15:12	15:27 B	N/A	Gjenstander i kjørebane, begge retninger.	
14.12.2017 15:08	15:54 V	N/A	Armeringsjern i veibanen	
15.12.2017 16:01	16:50 Ø	Personbil	Stans	903
15.12.2017 18:45	18:55 V	Personbil	Stans	862
17.12.2017 16:34	16:49 V	Personbil m/henger	Trelast ikke i henhold til mengde og sikring. Stans	
18.12.2017 09:27	10:31 V	Kjøretøy m/henger	Punktering på henger	
02.01.2018 16:18	16:30 Ø	Personbil	Stans	929
17.01.2018 09:10	18.01 08:00 B	Lastebil og personbil	Personbil kollidert i lastebil. Havarert lastebil med revnet lasteskap og lasten i veibanen. Blokkerer alle felt.	947
26.01.2018 10:29	12:20 Ø	Lastebil	Stans	924
04.02.2018 21:45	22:36 Ø	Personbil	Stans	908
06.02.2018 16:37	17:09 Ø	Personbil	Melding om bilstans. Funnet på kamera	917
06.02.2018 21:41	22:04 Ø	Vogntog	Melding fra publikum om brann i dekk på vogntog. Ingen kjøretøy med brann funnet.	
08.02.2018 15:31	N/A V	Lastebil	Stans. Reiser for egen maskin etter 10 min.	
09.02.2018 09:05	11:10 Ø	Personbil	Stans	
09.02.2018 15:02	15:15 B	Vogntog	Stoppet pga. varme bremseser.	
13.02.2018 14:35	14:53 V	Personbil	Stans	948
14.02.2018 10:10	Ingen stengning	Personbil	Stans, ingen stengning pga. varsellys på taket til kjøretøy.	986
17.02.2018 11:50	12:03 V	Personbil	Stans	
18.02.2018 13:46	13:52 Ø	Personbil m/henger	Stans	937

18.02.2018 16:41	16:51 V	Vogntog	Stans	971
22.02.2018 09:29	09:48 N/A	Vogntog	Saktegående samt lastestropp i veibanen.	971
24.02.2018 15:25	16:14 Ø	Personbil	Stans	915
26.02.2018 06:08	07:30 Ø	Personbil	Stans	922
06.03.2018 07:25	08:12 Ø	N/A	Gjenstand i veibanen.	952
13.03.2018 08:25	08:36 Ø	Personbil	Stans	940
13.03.2018 18:43	19:35 V	Lastebil	Ødelagt drivaksel.	
19.03.2018 14:47	17:12 V	Vogntog	Stans	969
20.03.2018 17:19	17:31 V	Personbil	Stans	976
24.03.2018 12:56	13:35 Ø	Personbil	Stans	
31.03.2018 17:56	20:26 V	Tankbil	Stans	986
03.04.2018 11:51	12:31 Ø	Personbil	Stans	950
06.04.2018 12:18	13:10 V	Personbil	Stans	981
08.04.2018 14:34	14:46 V	Personbil	Stans	944
10.04.2018 14.56	15:30 V	Personbil	Stans	
17.04.2018 07:54	08:48 Ø	Lastebil	Stans	