AALBORG UNIVERSITET

Analyse af trængselsreducerende tiltag med fokus på variable hastighedstavler

KANDIDATSPECIALE
ANNETTE BROK NIELSEN, CHRISTIAN NØRREGÅRD POTTER & MARK THOLSTRUP
VEJE & TRAFIK
AALBORG UNIVERSITET

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Femte Studieår v/ Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet
Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst

Titel:

Analyse af trængselsreducerende tiltag med fokus på variable hastighedstavler

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

Februar 2020 - juni 2020

Deltagere:

Annette Brok Nielsen
Christian Nørregård Potter
Mark Tholstrup

Vejleder:

Harry Lahrmann

Hovedrapport: 138 sider
Bilag: 61 sider
Afsluttet: 10-06-2020

Synopsis:

I dette afgangsprojekt undersøges det, hvorvidt de opdaterede styringsalgoritmer, som styrer hastighedsvisningen på de variable hastighedstavler ved Limfjordstunnelen og M3, har haft en effekt på trafikafviklingen. Projektets teoretiske ramme tager udgangspunkt i Boris Kerners trefase-teori, som beskriver trafikale sammenbrud og hvor trafikafviklingen opdeles i tre forskellige faser, henholdsvis frit flow, synkroniseret flow og bevægelig kø.
Følgende problemformulering besvares i afgangsprojektet: *Hvordan har de opdaterede styringsalgoritmer for de variable hastighedstavler påvirket trafikafviklingen ved Limfjordstunnelen og M3?"*.
For at svare fyldestgørende på ovenstående problemformulering er der gennemført et litteraturstudie om variable hastighedstavler, indsamlet spoledata, Bluetoothdata og GPS-data og efterfølgende udført statistisk test på den indsamlede data for at konkludere på trafikafviklingen.
Effekten, som de opdaterede styringsalgoritmer har haft på trafikafviklingen ved Limfjordstunnelen og M3, vurderes ud fra en kapacitetsanalyse, en hastighedsharmoniseringsanalyse, en rejsetidsanalyse og en analyse af de skiltede hastigheder på de variable hastighedstavler. På baggrund af analyserne af trafikafviklingen kan det konkluderes, at der ikke har været en entydig statistisk signifikant forbedring af trafikafviklingen på Limfjordstunnelen og M3 som følge af de opdaterede styringsalgoritmer.

Abstract

This master thesis is an inquiry of whether the new algorithm controlling the variable speed limits (VSL) located on two Danish highways respectively M70 (Limfjordstunnelen) in North Jutland and M3 (Motorring 3) in Copenhagen have had a positive effect on the traffic flow.

In this thesis a literature study on various aspects regarding VSL is included. The theoretical framework for this thesis is based on Boris Kerners Three-Phase Traffic Theory, which states that breakdown in traffic can be separated into three phases: free flow, synchronised flow and wide moving jam. Disturbances in the traffic flow such as sudden acceleration/deceleration or lane switch at bottlenecks are the primary reason for traffic breakdown in situations where the traffic flow or density are at a critical level.

Therefore it is on the foundation of the Three-Phase Traffic Theory that this thesis studies the VSL's effect on the traffic flow. It is the hypothesis that the new algorithm which controls the VSL on the two highways may have been able to (1) prolong the free flow and synchronised flow phases, (2) reduce the probability of an emergence of the wide moving jam in heavily congested periods, and (3) mitigated the propagation of wide moving jams once the traffic phase has occurred.

The methods used for estimating the effect on the traffic flow have been a capacity analysis, speed-harmonisation analysis, an analysis of travel time and analysis of the posted speed limits on the VSL. The data of the traffic flows is collected from the national traffic database Mastra or received from various collaborators who are in possession of both GPS- and Bluetoothdata of the traffic flow on M70 and M3.

Based on the results from the four analysis it can be concluded that the new algorithm controlling the VSL has not had a significantly positive effect on the traffic flows or traffic breakdowns on M70 and M3. The reasons for the lack of positive effect on the traffic flow can be due to (1) malfunction inherent in the algorithm, (2) drivers low rate of compliance, (3) the complexity of traffic flows and traffic breakdowns which VSL only to a certain extend can regulate or (4) a combination of the three.

It is suggested that for the VSL to have a more significantly positive effect on the traffic flow there should be further investments in road-regulative projects who can work in collaboration with the VSL. This could either be automatic speed control, automatic driving vehicles or new algorithms based on reinforcement learning or deep-learning.

Forord

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med afgangsprojektet på kandidatuddannelsens fjerde semester i Veje og Trafik ved Aalborg Universitet. Projektperioden strækker sig fra februar 2020 til juni 2020, og projektgruppen består af Annette Brok Nielsen, Christian Nørregård Potter og Mark Tholstrup.

Afgangsprojektet omhandler effekten af ændringen i styringsalgoritmen bag de variable hastighedstavler på en strækning ved Limfjordstunnelen og M3. I den forbindelse analyseres en situation før og efter ændringen af styringsalgoritmen for de variable hastighedstavler. Det nærværende afgangsprojekt er opdelt i tre dele: del 1 er en indledende analyse, del 2 er en analyse af effekten af variable hastighedstavler ved M3 og Limfjordstunnelen og del 3 er en metodekritik, diskussion og konklusion på studiet.

Projektgruppen vil gerne rette en stor tak til vejleder Harry Lahrmann for konstruktiv vejledning under hele forløbet. Ydermere takker gruppen også følgende personer, der har været behjælpelig med data til dette projekt:

- Thomas Jansson fra Connected Cars A/S for at være behjælpelig med GPS-data på M3.
- Jacob Jensen fra Veovo for at være behjælpelig med Bluetoothdata på Limfjordstunnelen.
- Mathias Schmidt fra AFRY for at være behjælpelig med data fra de variable hastighedstavler ved Limfjordstunnelen og M3.

Læsevejledning

I dette afgangsprojekt bruges Harvardmetoden til kildehenvisning. Metoden angiver en kilde ved navn og årstal. Ved kildehenvisning i en sætning fremgår kilden med forfatter og årstal før punktum og ved referering af et helt afsnit eller sætning fremgår kilden til sidst i afsnittet. Litteraturlisten bagerst i rapporten angiver alle de anvendte kilder i alfabetisk orden efter forfatterens efternavn og derefter årstal. Figurer, hvor der ikke er angivet nogle kilder, er selv fremstillet af gruppen.

Gloseliste

I løbet af afgangsprojektet er der brugt en række fagtermer hvor definitionen af disse fagtermer er angivet i Tabel 1.

Betegnelse	**Definition**
Belastningsgrad	Et forhold mellem trafikintensitet og -kapacitet på en given strækning.
Bevægelig kø	Situation hvor trafiktætheden er høj og hastigheden lav.
Flaskehals	Udtryk for en delstrækning, hvor trafiktilstrømningen periodevist overstiger kapaciteten, og der derfor opstår kø foran delstrækningen, eller steder på strækningen hvor der forekommer en indsnævring af vognbanerne og der dermed opstår kø grundet de fysiske forholde.
Frit flow	En trafikstrøm af trafikanter, der ikke bliver påvirket af andre trafikanter og dermed kan manøvrere frit mellem trafikanterne og har mulighed for selv at vælge hastighed.
Hastighed	Et udtryk for trafikanternes tilbagelagt længde pr. tidsenhed, hvor (v) angiver hastighed i m/s, mens (V) angiver den i km/t.
Hastigheds-harmonisering	Tilstand i trafikken, hvor trafikanternes hastigheder er tilnærmelsesvis ens.
Headway	Er et mål for det tidsmæssige mellemrum (sekunder) mellem to køretøjer fra front af bagerste køretøj til front af forreste køretøj.
Hverdagsdøgntrafik (HDT)	Den gennemsnitlige trafik på et døgn i hverdagene uden for sommermånederne juni, juli og august.
Kapacitet	Det største antal trafikanter, det forventes der kan afvikles på en bestemt strækning under de trafikmæssige og vejmæssige vilkår.
Kritisk hastighed	Den højeste hastighed trafikanterne kan køre med før der sker et trafiksammenbrud.
Kritisk trafik-intensitet	Den højeste trafikintensitet der forekommer før der sker et trafiksammenbrud.
Niveau af trængsel	Forholdet mellem skiltede hastighed og kørte hastighed i procent.
Speed-flow diagram	Et diagram over de registrerede hastigheder og trafikintensiteter.
Rejsetid	Den tid det tager at køre en bestemt strækning.
Spidstimen	Timen i løbet af en hverdag hvor trafikintensiteten er størst.
Synkroniseret flow	Trafikanterne bevæger sig i en synkroniseret strøm.
Trafikafvikling	En trafikstrøm af køretøjer (køretøjer/tidsenhed/retning)
Trafikintensitet	Antallet af trafikanter, der pr. tidsenhed passerer et tværprofil.
Trafiksammenbrud	Situationen hvor trafikken går fra synkroniseret flow til bevægelig kø.
Trafiktæthed	Antallet af køretøjer pr. længdeenhed på en strækning i et givet tidspunkt. På engelsk angivet som density.
Trængsel	Situationen hvor trafikanterne oplever gener, i form af nedsat bevægelsesfrihed i et trafikaltsystem.
Trængselsperiode	Den periode i løbet af et døgn hvor trafikintensiteten er høj og trafikanternes hastighed er lav.
Årsdøgnstrafik (ÅDT)	Den samlede trafikmængde der passere et tværprofil på vejen og bestemmes som 1/365 af årets samlede trafik.

Tabel 1. Betegnelser og definition. [Kerner, 2017; Vejdirektoratet, 2019]

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1 Indledning **1**
1.1 Definition på trængsel . . . 3
1.2 Konsekvenser af stigende trængsel . . . 3
1.3 Løsninger til at håndtere trængsel . . . 4
1.3.1 Kapacitetsforøgende tiltag . . . 4
1.3.2 Trafikreducerende tiltag . . . 5
1.4 Intelligente transportsystemer . . . 6
1.4.1 Typer af ITS . . . 6
1.4.2 Politiske initiativer i ITS . . . 7

Kapitel 2 Problembeskrivelse **9**
2.1 Problemformulering . . . 9
2.2 Afgrænsning . . . 10

Kapitel 3 Metode **11**
3.1 Rapportstruktur . . . 11
3.2 Litteraturstudie . . . 12
3.3 Data . . . 13
3.3.1 Dataindsamling . . . 13
3.3.2 Databehandling . . . 13
3.4 Statistisk test . . . 13
3.4.1 T-test . . . 14
3.4.2 ANOVA . . . 15

I Indledende undersøgelse og litteraturstudie. **19**

Kapitel 4 Projektlokaliteter **21**
4.1 Limfjordstunnelen . . . 21
4.1.1 Analyse af Limfjordstunnelen . . . 22
4.1.2 Anvendelse af ITS ved Limfjordstunnelen . . . 26
4.2 Motorring 3 . . . 27
4.2.1 Analyse af Motorring 3 . . . 28
4.2.2 Anvendelse af ITS ved Motorring 3 . . . 31

Kapitel 5 Teori om kødannelse **33**
5.1 Trefase-teori . . . 34
5.1.1 Spontant og induceret trafiksammenbrud . . . 36
5.2 Årsag til trafiksammenbrud . . . 37
5.2.1 Kritisk grænse for trafiksammenbrud . . . 38
5.2.2 Metastabel tilstand . . . 39

Kapitel 6 Litteraturstudie **41**
6.1 Historisk udvikling i anvendelsen af variable informations- og hastighedstavler 41
6.2 Betingelser for tavlevisning . . . 43
6.2.1 Styringsformer for variable vejtavler . . . 43
6.2.2 Styringsalgoritmer til forbedring af trafikafvikling . . . 44
6.3 Variable hastighedstavlers effekt på trafikafviklingen . . . 47
6.3.1 Nationale feltundersøgelser . . . 47
6.3.2 Internationale feltundersøgelser . . . 51
6.3.3 Simuleringsundersøgelser . . . 59
6.3.4 Forudsigelses mikrosimulerings undersøgelse . . . 62
6.4 Opsummering af litteraturstudiet . . . 66

II Analyse af effekten af variable hastighedstavler ved Limfjordstunnelen og M3. **69**

Kapitel 7 Styringsalgoritme **71**
7.1 Opbygningen af trafikledelsessystemet . . . 71
7.2 Styringsalgoritme 2015-2019 . . . 72
7.2.1 Styringsalgoritme for variable hastighedstavler . . . 73
7.3 Ny styringsalgoritme fra 2019 . . . 76
7.3.1 Tidspunkt for implementering af styringsalgoritmen . . . 79

Kapitel 8 Analyse **81**
8.1 Kapacitet og hastighedsharmonisering . . . 81
8.1.1 Analyse af kapacitet . . . 83
8.1.2 Analyse af hastighedsharmonisering . . . 88
8.2 Rejsetider . . . 96
8.2.1 Rejsetider for Limfjordstunnelen baseret på Bluetoothdata . . . 97
8.2.2 Rejsetider for Motorring 3 baseret på GPS-målinger . . . 99
8.3 Skiltede hastighed . . . 101
8.3.1 Resultater for Limfjordstunnelen . . . 102
8.3.2 Resultater for Motorring 3 . . . 105

III Metodekritik, diskussion og konklusion. **109**

Kapitel 9 Metodekritik **111**
9.1 Dataindsamling . . . 111
9.2 Kapacitet . . . 111
9.3 Hastighedsharmonisering . . . 113
9.4 Rejesetider . . . 114
9.4.1 Rejsetid baseret på spoledata . . . 114
9.4.2 Fordele og ulemper ved metoder for rejsetider . . . 121

Kapitel 10 Diskussion **123**

Kapitel 11 Konklusion **129**

Litteratur **133**

Bilag A Uheld **139**

Bilag B Kritisk hastighed og trafikintensitet **141**

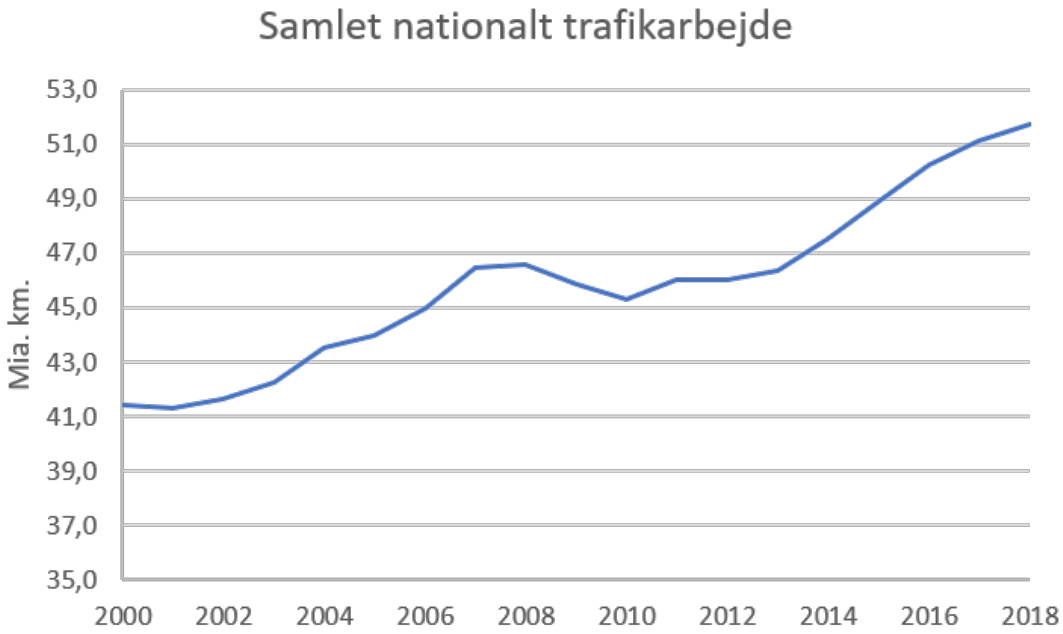
Bilag C Boxplot **157**

Bilag D Variation i hastigheden **165**

Bilag E Skiltede hastighed **177**

1 Indledning

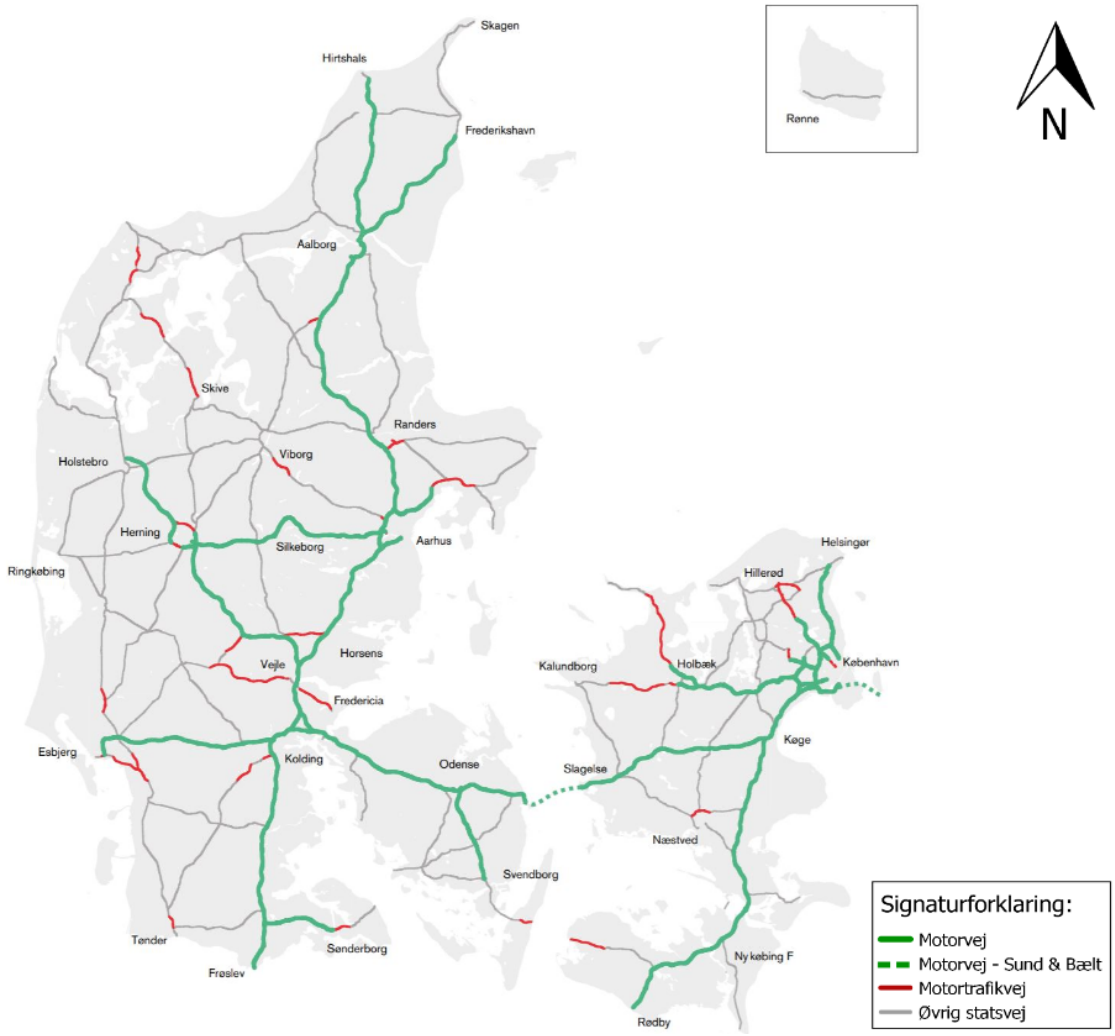
Den danske vejnet er presset og trafikanter oplever i stigende grad forlængede rejsetider på grund af trængsel [Dansk Industri, 2019a]. En af de primære årsager til den stigende trængsel skyldes, at det samlede nationale trafikarbejde er steget markant i perioden 2000-2018, hvilket fremgår af Figur 1.1.



Figur 1.1. Samlet nationalt trafikarbejde fra 2000-2018. [Vejdirektoratet, 2019b]

På figuren ses det, at der har været en stigning i antallet af milliarder kørte kilometer på det samlede danske vejnet på 24,7% fra 41,4 i 2000 til 51,7 i 2018. [Vejdirektoratet, 2019b]

Af det samlede trafikarbejde på 51,7 milliarder kilometer i 2018 blev 48% (24,8 milliarder kilometer) afviklet på det danske statsvejnet [Vejdirektoratet, 2019b]. Dette er på trods af, at statsvejnettet kun udgør fem procent af det samlede danske vejnet [Vejdirektoratet, 2019a]. Statsvejnettet fremgår af Figur 1.2.



Figur 1.2. Statsvejnettet. [Vejdirektoratet, 2019a]

Den stigende udvikling i trafikarbejdet i perioden 2008-2018 er primært sket på statsvejnettet, hvor der har været en stigning i trafikarbejdet på 20,9%, mens der på de kommunale veje i samme periode har været en stigning i trafikarbejdet på 3,2%. Ses der alene på de danske motorveje i perioden, har stigningen i trafikarbejdet været på 34%. [Vejdirektoratet, 2019b]

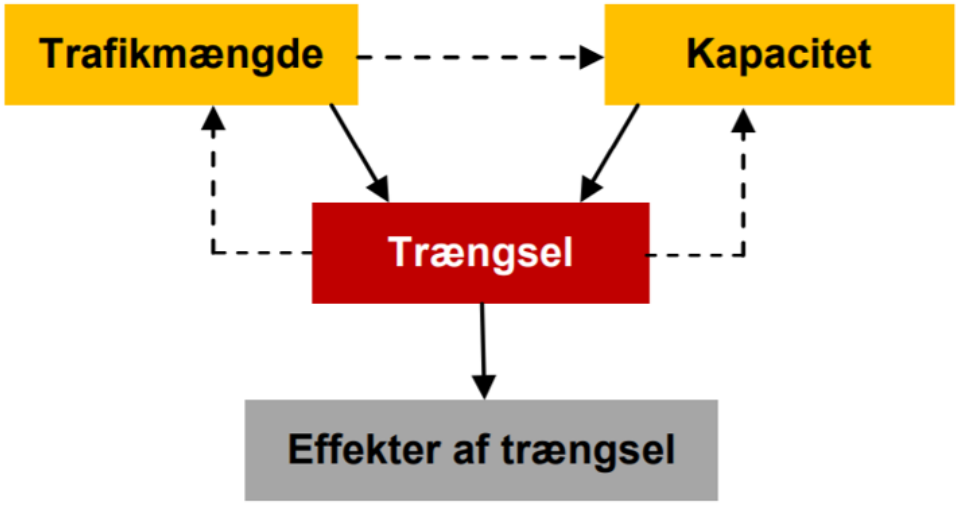
Trafikvæksten på det danske statsvejnet er størst omkring storbyerne på grund af urbanisering og centralisering af arbejdspladser, som resulterer i større efterspørgsel på mobilitet i og omkring storbyerne [Kristensen et al., 2018]. Ydermere kan trafikvæksten på statsvejnettet også forklares ved, at der har været et markant trafikspring til statsvejene, på grund af investeringer i kapacitetsforøgelse [Vejdirektoratet, 2019a].

For personbiler skyldes trafikvæksten flere faktorer, blandt andet en stor samfundsøkonomisk fremgang, lavere registreringsafgifter og et større behov for at være mobil [Vejdirektoratet, 2019a]. Dette har resulteret i, at antallet af danske indregistrerede personbiler er steget med 37% fra cirka 1,9 til cirka 2,5 millioner i perioden 2000-2018. Ydermere har der været en stigning i antallet af kørte kilometer for personbiler på 31% fra cirka 31.000 til cirka 41.000 millioner i samme periode [Danmarks Statistik, 2020].

Den markante vækst i trafikarbejdet på de danske veje i perioden 2000-2018 ser samtidig ud til at fortsætte frem til 2030. I en rapport, som blev publiceret af Ekspertgruppen Mobilitet for fremtiden i 2018, konkluderes det, at der vil være en samlet vækst i trafikarbejdet for personbiltrafik på 16% og lastbiltrafik på 12% i perioden 2015-2030. Den stigende trafikvækst vil have en række konsekvenser, heriblandt en væsentlig stigning i trængselsniveauet, som i følge samme rapport, vil stige med 66% procent i perioden 2015-2030. [Kristensen et al., 2018]

1.1 Definition på trængsel

Trængsel er et udtryk for et ulige forhold mellem udbuddet af infrastrukturkapacitet og efterspørgslen målt i trafikmængder. Trængselsniveauet er derfor afhængigt af interaktionen mellem ændrede trafikmængder samt ved dimensionering af kapaciteten. Interaktionen ses illustreret på Figur 1.3.



Figur 1.3. Interaktion mellem infrastrukturkapacitet og trafikmængder. [DTU Transport, 2012]

Trængsel har mange afledte effekter og påvirker mange dele af samfundet og der er derfor brug for en generel definition på trængsel for at ensarte forståelsen af trængselsbegrebet og hvordan begrebet opgøres. Trængselskommissionen anbefaler derfor følgende definition på trængsel i trafikken:

"Trængsel er et udtryk for trafikanternes nedsatte bevægelsesfrihed som følge af interaktionen mellem trafikmængden og trafiksystemets kapacitet.." [DTU Transport, 2012]

1.2 Konsekvenser af stigende trængsel

Trængsel udgør en samfundsøkonomisk udgift og der er mange afledte effekter knyttet hertil, heriblandt tidsspild, øget energiforbrug og miljøgener i form af forurening og støj. [Kerner, 2017]

Ifølge den seneste opgørelse fra Vejdirektoratet over tabte køretøjstimer resulterede trængsel i, at de danske trafikanter i 2016 sammenlagt brugte gennemsnitlig 335.000 timer dagligt på at holde i kø. De tabte køretøjstimer kunne ifølge opgørelsen gøres op til en årlig omkostning for det danske samfund på op imod 24 milliarder kroner. [Vejdirektoratet, 2019a]. En anden rapport udarbejdet af Dansk Industri fra 2019 angiver, at tabet af køretøjstimer sandsynligvis er tættere på 25-27 milliarder kroner [Dansk Industri, 2019b].

Dele af det danske erhvervsliv hævder yderligere, at den øgede trængsel påvirker mulighederne for at få kvalificeret arbejdskraft, da ansatte vælger virksomheder fra, som ligger i trængselsplagede områder. Ifølge en analyse udarbejdet af MOE Tetraplan kan flere virksomheder placerede i vækstcentre se frem til en reduktion i tilgængelig arbejdskraft på op mod 20% [Danskbyggeri.dk, 2020]. Trængsel hæmmer yderligere virksomhedernes mulighed for investeringer, produktivitet og konkurrencekraft, hvilket også forværre virksomhedernes muligheder for at vækste [Dansk Industri, 2019a].

Der prioriteres politisk i at imødekomme og afhjælpe trængslen. Den daværende regering V-LA-K fremlagde i 2019 et forslag til investeringer i infrastruktur projekter på 112,7 milliarder kroner frem mod 2030. Hovedsageligt var investeringerne tilsigtet kapacitetsudvidelser, men i investeringsforslaget fremgår også en række andre tiltag, som også kunne reducere trængsel. [Regeringen.dk, 2019]

1.3 Løsninger til at håndtere trængsel

Da trængsel i trafikken er et resultat af ubalancen i forholdet mellem udbud og efterspørgsel, skelnes der mellem trængselsreducerende tiltag, som enten har til formål at øge kapaciteten på vejene eller reducere trafikmængden [DTU Transport, 2012].

1.3.1 Kapacitetsforøgende tiltag

Det typiske tiltag, som har til formål at øge kapaciteten på et vejnet, er sporudvidelse. På grund af det stigende trafikarbejde gennem 00'erne og 10'erne er der løbende blevet investeret i en række sporudvidelser på det danske vejnet for derved at aflaste det stigende pres på vejnettet. Eksempler heraf er sporudvidelse på Motorring 3 (M3), udbygning af infrastrukturen på det midt- og østjyske vejnet, sporudvidelse af Køge Bugt Motorvejen samt sporudvidelse af den fynske motorvej mellem Odense V. og Nørre Aaby. [Vejdirektoratet, 2014b, 2016b, 2019a; Friis, 2017]

Der er en række ulemper, som knytter sig til kapacitetsforøgelse gennem sporudvidelse. Sporudvidelse af et vejnet kræver, at der er det nødvendige areal, hvilket naturligt sætter begrænsninger for antallet af spor, som et vejnet kan udvides til. Ydermere er sporudvidelse et omkostningstungt og irreversibelt tiltag, som animerer til øget privatbilisme, hvilket giver flere biler på vejene og øget CO_2-udledning som konsekvens heraf. Samtidig er det ikke en naturlig selvfølge, at sporudvidelse resulterer i mindre trængsel, og i visse tilfælde kan tiltaget vise sig at være kontraproduktivt. Sporudvidelse kan nemlig give anledning til et markant trafikspring til privatbilisme, fordi kapacitetsforholdene på vejene undergår

en væsentlig forbedring. Trafikspringet kan i løbet af få år betyde en væsentlig stigning i trafikarbejdet, som kan bevirke, at trængslen genopstår, og dermed vil sporudvidelsen være forgæves. [Marfelt, Østergaard, 2012a,b; Næss, 2011]

Når begrænset areal vanskeliggør muligheden for sporudvidelsen, kan andre kapacitetsforøgende tiltag implementeres. På Hillerødmotorvejen har der været forsøgsordninger med anvendelsen af nødspor til kapacitetsforøgelse i morgen- og eftermiddagsspidstimerne, og på M3 undersøges det, hvorvidt indretning af flettestrækninger kan forbedre kapaciteten. [Vejdirektoratet, 2014a, 2016b].

1.3.2 Trafikreducerende tiltag

Som et middel til at reducere trængsel er det, udover at regulere på kapaciteten af et vejnet, også muligt at regulere på efterspørgslen. Efterspørgslen på et transportmiddel er et resultat af de generaliserede rejseomkostninger, som der er knyttet til at rejse med det specifikke transportmiddel. De generaliserede rejseomkostninger afhænger af transporttiden, de faktiske transportomkostninger og kvalitative parametre som komfort og sikkerhed [Madsen, 2019]. Tiltag, der har til formål at reducere biltrafikken på vejnettet, skal derfor sigte efter at udligne de generaliserede rejseomkostninger mellem transportmidlerne. Herved bliver konkurrencefladerne mellem transportmidlerne øget således, at det i højere grad er attraktivt at rejse med kollektiv trafik eller cykel. [Lahrmann, 2018]

En udligning af de generaliserede rejseomkostninger kan enten gennemføres ved at reducere rejseomkostningerne for kollektiv trafik og cyklisme, øge rejseomkostningerne for bilisme eller ved en kombination af disse. En undersøgelse af potentialet for at reducere rejseomkostningerne for kollektiv trafik fremgår i rapporten "Perspektiver ved indførelse af gratis offentlig transport", og slår fast at: *"[..] en generel gennemførelse af gratis offentlig transport på landsplan ikke er hensigtsmæssig. De økonomiske omkostninger vil være store og effekten lille for så vidt angår trængsel, trafikmiljø og uheld."* [Lohmann-Hansen et al., 2006]. På trods af en implementering af gratis kollektiv trafik, kan det dermed konkluderes, at de generaliserede rejseomkostninger, som er knyttet til rejse med kollektiv trafik, stadig er så høje, at det ikke kan konkurrere med privatbilismen.

Fremfor at reducere de generaliserede rejseomkostninger tilknyttet kollektiv trafik, er det gennem tiltag muligt at øge de generaliserede rejseomkostninger for privatbilisme Disse tiltag skal sigte efter at øge de faktiske transportomkostninger, såsom øgede brændstofpriser eller registreringsafgifter, etablering af betalingsringe eller implementering af et roadpricing-system. [Madsen, 2019]

Særligt roadpricing har potentialet til at kunne regulere trafikken ved at pålægge en tidsafhængig myldre takst og en stedsspecifik storbytakst på privatbilismen, for derved at øge de generaliserede rejseomkostninger for privatbilismen og udligne konkurrencefladerne mellem transportmidlerne [Trængselskommissionen, 2013]. Ulempen ved roadpricing er dog, at den kan komme til at ramme indkomstmæssigt skævt. Dette vil betyde, at højindkomstgrupperne stadig ville kunne betale for at køre i bil, på bekostning af, at lavindkomstgrupper tvinges til rejse med kollektiv trafik.

1.4 Intelligente transportsystemer

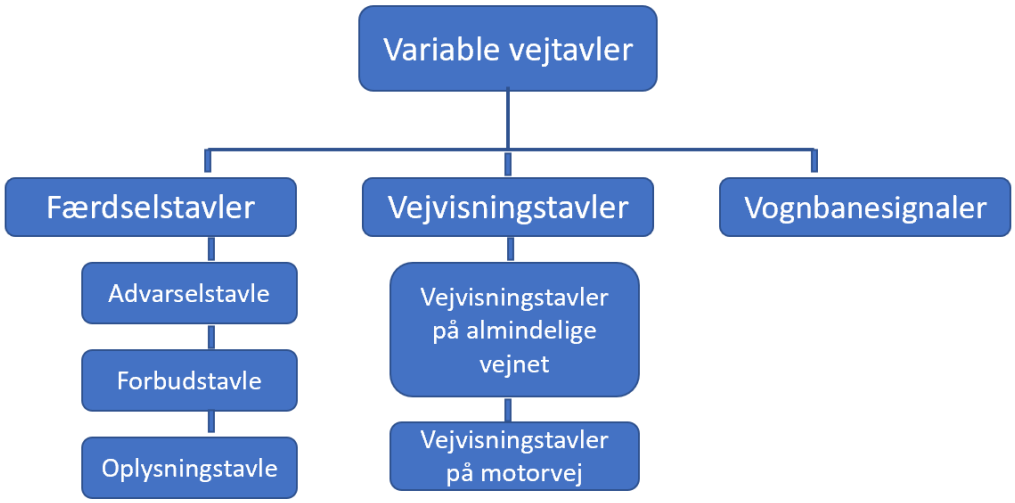
I takt med den teknologiske udvikling er der i stigende grad kommet fokus på anvendelsen af intelligente transportsystemer (ITS), som et middel til at forbedre den kollektive trafik, privatbilisme og rejser for de bløde trafikanter. ITS kan defineres som *"[..]tiltag, der anvender informationsteknologi (IT) eller elektronik til at generere en service eller en dynamisk funktion i et trafik- eller transportsystem"* [Vejdirektoratet, 2010].

På det danske vejnet anses ITS i stigende grad som en løsning til at udnytte den eksisterende kapacitet mere effektivt, forbedre fremkommeligheden, øge sikkerheden og fremme miljøvenlig kørsel. Anvendelsen af ITS som et middel til at reducere trængsel for bilister ses i højere grad i storbyerne, hvor eksempelvis adaptiv signalstyring optimerer trafikafviklinge i belastede vejkryds. [Vejdirektoratet, 2010]

1.4.1 Typer af ITS

Overordnet kan ITS inddeles i tre grupper; (1) information og advarsel til trafikanterne, (2) trafikstyring og (3) overvågning. [Vejdirektoratet, 2010]

1) Informations- og advarselssystemer dækker over en række forskellige dynamiske tavler såsom advarselstavler, oplysningstavler, påbudstavler, forbudstavler, undertavler samt fartviserer. De forskellige dynamiske tavler kan opdeles i tre hovedgrupper, som fremgår af Figur 1.4.



Figur 1.4. De tre hovedgrupper af informations- og hastighedstavler. [Vejdirektoratet, 2018]

Informations- og advarselssystemerne fungerer ved, at et system af forbundne tavler nedjusterer hastighedsgrænsen i intervaller ved opstående trængsel, dårlige vejrforhold eller ulykker. Tavlerne anvendes til at øge information til trafikanterne ved eksempelvis at informere om rejsetider, så trafikanterne har mulighed for at benytte andre ruter ved begyndende trængsel. Det kan også være tavler, der informerer om en kø opstrøms for at forhindre eksempelvis bagendekollisioner [Vejdirektoratet,

2010]. Tavlevisningen på de variable hastighedstavler styres af nogle bagvedliggende styringsalgoritmer, og kan være baseret på en række forskellige parametre, såsom trafikintensiteten, belastningsgraden, middelhastigheden, vejrforhold eller lignende [Nissan, Koutsopoulosb, 2011].

De dynamiske tavler skal på den måde forbedre trafikafviklingen, sikkerheden og trygheden i trafikken på problematiske strækninger med periodevis trængsel. Ydermere anvendes informationssystemer også i den kollektive trafik kendt som Mobility as a Service (Maas), hvor mobilitetsservice samles i en platform for at forbedre muligheden for kombinationsrejser og øge brugeroplevelsen. [Vejdirektoratet, 2010]

2) ITS-systemer til trafikstyring er blandt andet rampedosering, som bruges til at tilpasse mængden af indflettende trafikanter på eksempelvis motorveje ved hjælp af signalstyring. Derved påvirkes trafikafviklingen på motorvejen mindst muligt af den indflettende trafik fra rampetilslutninger. Derudover anvendes eksempelvis reversible vognbaner, som er en form for dynamiske vognbaner, hvor vejmyndigheden har mulighed for at ændre kørselsretningen med informationstavler eller lys direkte i vejbanen. Derved øges kapaciteten på strækninger, hvor den retningsbestemte trafikbelastning er ujævnt fordelt over døgnet. [Vejdirektoratet, 2010]

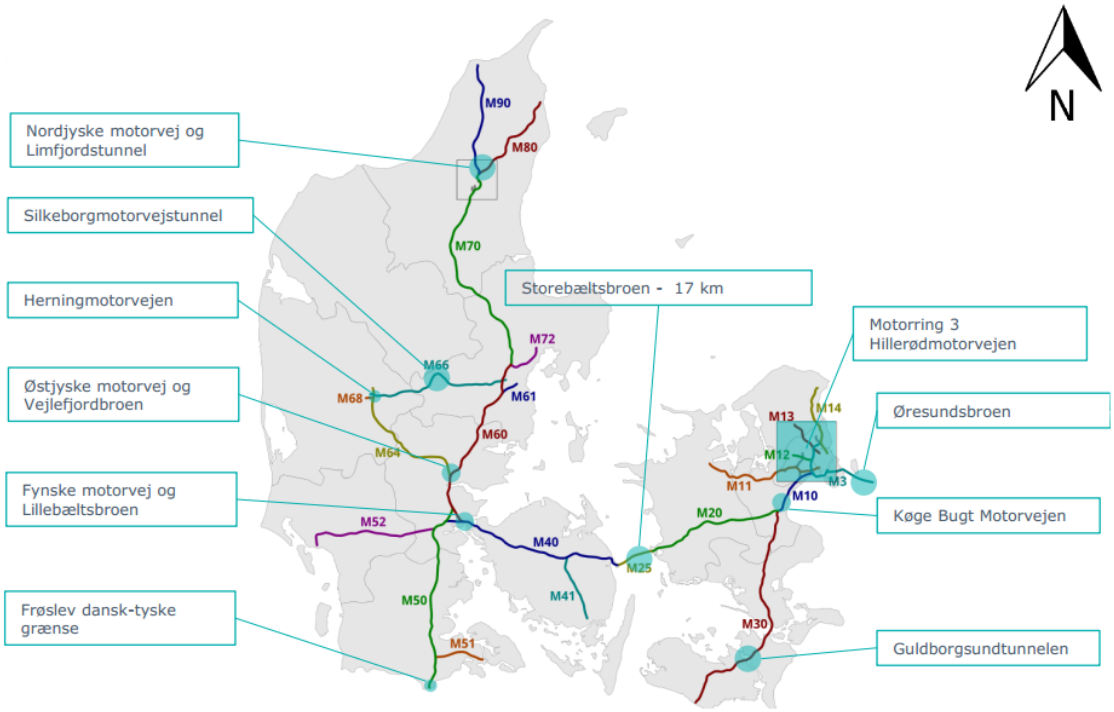
3) ITS benyttes også i overvågningsøjemed bland andet i forbindelse med automatisk hastighedskontrol, hvor trafikanter, der overskrider hastighedsgrænsen, automatisk bliver registreret og efterfølgende tilsendt en bøde. Overvågning benyttes også i forbindelse med eksempelvis tunnelstyring og generel trafikovervågning eller til intelligent overvågning og styring af parkeringsområder. [Vejdirektoratet, 2010]

1.4.2 Politiske initiativer i ITS

I 2009 indgik et flertal af de danske partier og den daværende V-K regering aftalen "En grøn transportpolitik"for at fremme de teknologiske initiativer og prioritere ITS-løsninger til at reducere trængsel. Aftalen resulterede i, at følgende ITS-projekter blev finansieret: [Transport- og Boligministeriet, 2009]

- Investering i intelligent trafikstyring på Helsingørmotorvejen på 75 millioner kroner.
- Investering i intelligent trafikstyring ved Limfjordstunnelen på 50 millioner kroner.
- En forundersøgelse til forbedring af trafikantservice ved at etablere et digital vejnet, med mulighed for at inddrage private parter på 20 millioner kroner.

Som et resultat af de politiske prioriteringer på ITS-området er det danske statsvejnet blevet opgraderet de seneste år. Dette har medført, at Vejdirektoratet har trafikledelsessystemer på statsvejnettet i forbindelse med udvalgte broer og tunneller, samt Herningmotorvejen, M3, Køge Bugt Motorvejen og Frøslev grænsen mellem Danmark og Tyskland, se Figur 1.5. [Lunde-Christensen, 2020]



Figur 1.5. Vejdirektoratets trafikledelsessystemer. [Lunde-Christensen, 2020]

På figuren ses den geografiske placering af de 11 trafikledelsessystemer på det danske statsvejnet.

Dermed kan det konkluderes, at der er i løbet af de seneste år, er kommet et stigende fokus på ITS som en løsning til at optimere på trafikafviklingen og øge trafiksikkerheden.

Problembeskrivelse 2

På grund af stigende trængsel på det danske vejnet efterspørges nye løsninger til at forebygge trængsel [ItsDanmark, 2019; Vejdirektoratet, 2019a]. Vejdirektoratet har i den henseende undersøgt potentialet for anvendelsen af variable hastighedstavler som et tiltag til at reducere trængsel og forbedre trafikafviklingen.

I 2005 forsøgte Vejdirektoratet sig med implementering af hastighedstavler på M3 i forbindelse med udbygningen af den allerede dengang trængselsplagede motorvejsstrækning. De succesfulde erfaringer herfra ledte til at hastighedstavlerne blev implementeret på flere andre problematiske strækninger, her iblandt Nordjyske Motorvej i forbindelse med Limfjordstunnelen. Senere tvivl blandt politikere omkring effekterne af tavlerne specielt på M3, har ført til effektundersøgelser og manglende bevilling af midler til af drifte de eksisterende tavler, som i flere omgange har ført til perioder med deaktiverede tavler. [Steffen McGhie, 2018]

I et afgangsprojekt udarbejdet af en kandidatstuderende på Aalborg Universitet fra 2019 omhandlende trængsel ved Limfjordstunnelen, blev det konkluderet på baggrund af en analyse foretaget før ændringen i styringsalgoritmen, at de variable hastighedstavler ikke altid fungerede efter hensigten [Natascha Rigborg, 2019]. I samme periode i 2019 blev der ændret på styringsalgoritmen, som regulerer og bestemmer hastighedsvisningen på tavlerne med henblik på at optimere på trafikafviklingen [Lunde-Christensen, 2020].

Formålet med dette projekt er derfor at undersøge, hvilken effekt de ændrede styringsalgoritmer bag de variable hastighedstavler har haft på trafikafviklingen på de to lokaliteter, M3 og Limfjordstunnelen.

2.1 Problemformulering

Dette projekt tager udgangspunkt i følgende problemformulering:

"Hvordan har de opdaterede styringsalgoritmer for de variable hastighedstavler påvirket trafikafviklingen ved Limfjordstunnelen og M3?"

Problemformuleringen besvares gennem følgende problemstillinger:

- Hvilken betydning har den nye styringsalgoritme haft for kapaciteten ved Limfjordstunnelen og M3 op til et trafiksammenbrud?
- Hvilken effekt har den nye styringsalgoritme haft på hastighedsharmoniseringen ved Limfjordstunnelen og M3?

- Hvordan er den gennemsnitlige rejsetid blevet påvirket af den nye styringsalgoritme ved Limfjordstunnelen og M3?
- Hvilken betydning har den nye styringsalgoritme haft for de viste hastigheder på de variable hastighedstavler?

2.2 Afgrænsning

I projektet afgrænses der fra følgende områder:

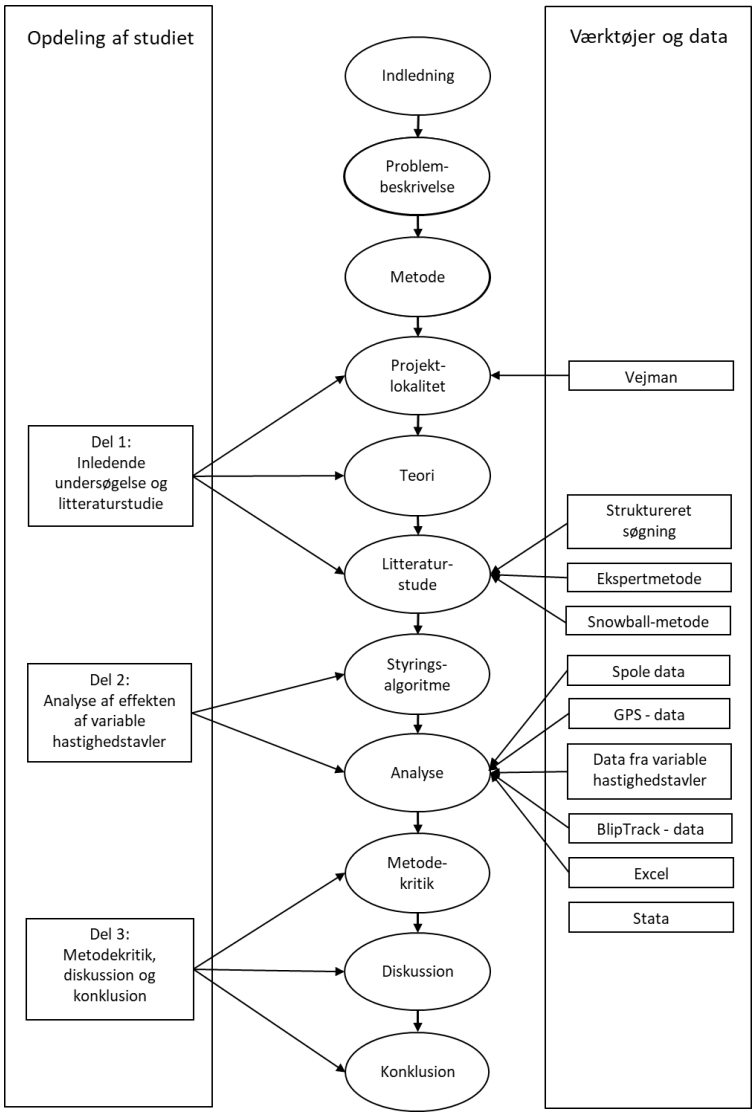
- De samfundsøkonomiske effekter af variable hastighedstavler.
- De variable hastighedstavlers betydning for trafiksikkerheden.
- De variable hastighedstavlers effekt på udledningen af køretøjers forurening og støj.

Metode 3

I dette kapitel beskrives rapportens struktur og de metoder, som er anvendt i dette projekt.

3.1 Rapportstruktur

Strukturen for dette studie er angivet i Figur 3.1.



Figur 3.1. Flowchart over processerne i dette projekt inddelt i tre dele og med tilhørende værktøjer og data der er anvendt i de forskellige processer

Dette studie er inddelt i tre hoveddele. Del 1 er en indledende analyse af projektlokaliteter og litteraturstudie, del 2 er en analyse af effekten af variable hastighedstavler ved M3 og Limfjordstunnelen og del 3 er en metodekritik, diskussion og konklusion på studiet.

3.2 Litteraturstudie

I dette afgangsprojekt er der udarbejdet et litteraturstudie om variable hastighedstavler. Emnerne, der er indgår i litteraturstudiet, er henholdsvis den historiske udvikling i anvendelsen af variable hastighedstavler, de bagvedliggende styringsalgoritmer og effektstudie af variable hastighedstavler på både et nationalt og internationalt niveau.

Den metodiske tilgang til at finde relevant litteratur har som udgangspunkt været gennem struktureret søgning i databaser, og gennem referencer til andre undersøgelser i diverse rapporter. Yderligere er der også fundet relevant litteratur gennem ekspertmetoden, hvor eksperter på fagområdet henviser til relevant litteratur.

I den strukturerede søgning er der fundet international litteratur ved at anvende søgedatabaserne Science Direct og Aalborg Universitetsbibliotek (Primo). National litteratur er som udgangspunkt fundet i søgedatabasen Trafik og Veje, Vejreglerne, Aalborgs Universitets projektbibliotek, og ved brug af ekspertmetoden ved kontakt til Vejdirektoratet.

Følgende kriterier har skulle være gældende for effektstudier af variable hastighedstavler for, at de skulle indgå i litteraturstudiet

- Medtager kun litteratur der indeholder effektstudier af trafikafviklingen, hvorfor effektstudier af trafiksikkerheden ekskluderes.
- Data og litteratur som er publiceret før 2000 ekskluderes.
- Medtager kun simuleringsundersøgelser, hvor studiet indeholder realtrafikdata, ramper, og tager højde for trafikanternes adfærd.
- Medtager kun litteratur hvor effektundersøgelsen er udarbejdet på en motorvej.

De søgeord der er brugt i de forskellige søgedatabaser, samt hvor mange artikler/rapporter hvert søgeord har givet, fremgår af "Resultater"i Tabel 3.1. Herefter er litteraturen blevet sorteret efter om titlen, resumeet og konklusionen har relevans. Den resterende litteratur er herefter blevet gennemlæst og den relevante litteratur for litteraturstudiet fremgår også af tabellen. Ydermere er der fundet fem referencer ved brug af snowball-metoden, hvor relevant litteratur findes gennem henvisning fra andre rapporter.

Database	Søgeord	Resultater	Relevante
AUB	Titel: Intelligent Transportation System AND Traffic Management	30	1
	Titel: “Variable Speed Limit”, Emne: Variable Speed Limit	51	5
	Titel: "Variable Speed Advisory"	3	1
	Titel: Traffic AND “Prevention system”, NOT Intersection	6	1
Trafik og Veje	Dynamisk skiltning	6	1
	Variable hastighedstavler	8	1
Vejregler	Variable vejtavler. Håndbog	20	1
Science Direct	Titel: "variable speed limit", NOT "Intersection", Other: “Highways”	52	6

Tabel 3.1. Søgedatabaser med tilhørende søgeord og resultaterne heraf, samt mængden af relevant litteratur

3.3 Data

3.3.1 Dataindsamling

Mastra er den primære datakilde til dette projekt. Der er anvendt spoledata ved M3 og Limfjordstunnelen, som er registreret af Vejdirektoratet i januar 2019 og 2020 og der er lavet udtræk fra Mastra i aggregerede niveau samt spoledata for enkeltkøretøjer.

Yderligere er der indsamlet data over rejsetider ved GPS-data for M3 fra firmaet Connected Cars A/S og Bluetoothdata for Limfjordstunnelen fra firmaet Veovo. For at tage højde for personfølsomme oplysninger ved GPS-data er området for udtrækning af data begrænset til udelukkende at inkludere en strækning på M3 ved hjælp af et polygon. Data over tavlevisning ved M3 og Limfjordsforbindelsen er leveret af konsulentfirmaet AFRY.

3.3.2 Databehandling

Til behandling af data er Micorsoft-Excel og statistikprogrammet Stata anvendt. Illustrationer i form af kort er udarbejdet i QGIS og figurer er udarbejdet i AutoCAD.

3.4 Statistisk test

For at undersøge om ændringen i styringsalgoritmen har haft en signifikant effekt, bruges to statistiske metoder henholdsvis en t-test og en ANOVA test. I analysen af de variable hastighedstavler udtages en stikprøve for både før og efter ændringen af styringsalgoritmen. Dermed er analyserne uparret, da det ikke er de samme biler der måles på i de to situationer og dataene er kontinuerte data, da der måles på hastigheden. Ydermere bruges der et

signifikansniveau på 0,05 som angiver accept og forkastelse området for analyserne. Dermed er der 5% sandsynlighed for at forkaste en sand nulhypotese. [Vejrup-Hansen, 2012]

For at kunne konkludere, om der er en effekt af den ændrede algoritme, er det relevant at undersøge om stikprøven stammer fra en normalfordelt population. Antallet af frihedsgrader i analyserne angiver hvor mange parametre der er mulighed for at estimere i et dataset. I disse analyser er antallet af frihedsgrader angivet ved antallet af observationer minus antallet af parametre, der estimeres. [Vejrup-Hansen, 2012]

Metoderne til de to statistiske test vil blive gennemgået i de følgende afsnit, hvor værdierne har følgende betydning: [Vejrup-Hansen, 2012]

n_k	Antallet af målinger i stikprøven
$\overline{x_k}$	Middelværdien for stikprøven
SD_k	Spredningen for stikprøven
$\overline{x}$	Middelværdien for populationen
σ	Spredningen for populationen

3.4.1 T-test

En t-test anvendes for at undersøge, hvorvidt to stikprøver er statistisk ens eller forskellige fra hinanden.

Først undersøges det, om de to stikprøver har ens varians, hvilket er afgørende for typen af t-test, som skal bruges til sammenligning af de to stikprøver. F-test afgør, hvorvidt to stikprøver er ens eller uens, og formlen for F-test er følgende: [Vejrup-Hansen, 2012]

$$F = \frac{SD_1^2}{SD_2^2} \tag{3.1}$$

Hvor de opstillede hypoteser er følgende:

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \qquad H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \tag{3.2}$$

P-værdien bestemmes ud fra antallet af frihedsgrader og F-teststørrelsen. I tilfælde af, at P-værdien er større end 0,05 accepteres H_0-hypotesen om ens varians, men er P-værdien derimod mindre end 0,05 kan nul hypotesen ikke accepteres og der er dermed forskellig varians. [Vejrup-Hansen, 2012]

Ens varians

I de situationer, hvor F-testen angiver, at der er ens varians imellem de to stikprøver, beregnes stikprøvernes fælles spredning ud fra følgende formel: [Vejrup-Hansen, 2012]

$$SD = \sqrt{\frac{SD_1^2 \cdot (n_1 - 1) + SD_2^2 \cdot (n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}} \tag{3.3}$$

Dernæst bestemmes t-test størrelsen ud fra følgende formel: [Vejrup-Hansen, 2012]

$$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{\sqrt{\frac{SD^2}{n_1} + \frac{SD^2}{n_2}}} \tag{3.4}$$

Til sidst bestemmes P-værdien ud fra antallet af frihedsgrader og t-teststørrelsen, hvor antallet af frihedsgrader er bestemt ud fra formlen: [Vejrup-Hansen, 2012]

$$f = n_1 + n_2 - 2 \tag{3.5}$$

Forskellig varians

I de situationer hvor F-testen angiver, at der er forskellige varians imellem de to stikprøver, beregnes t-test størrelsen ud fra følgende: [Vejrup-Hansen, 2012]

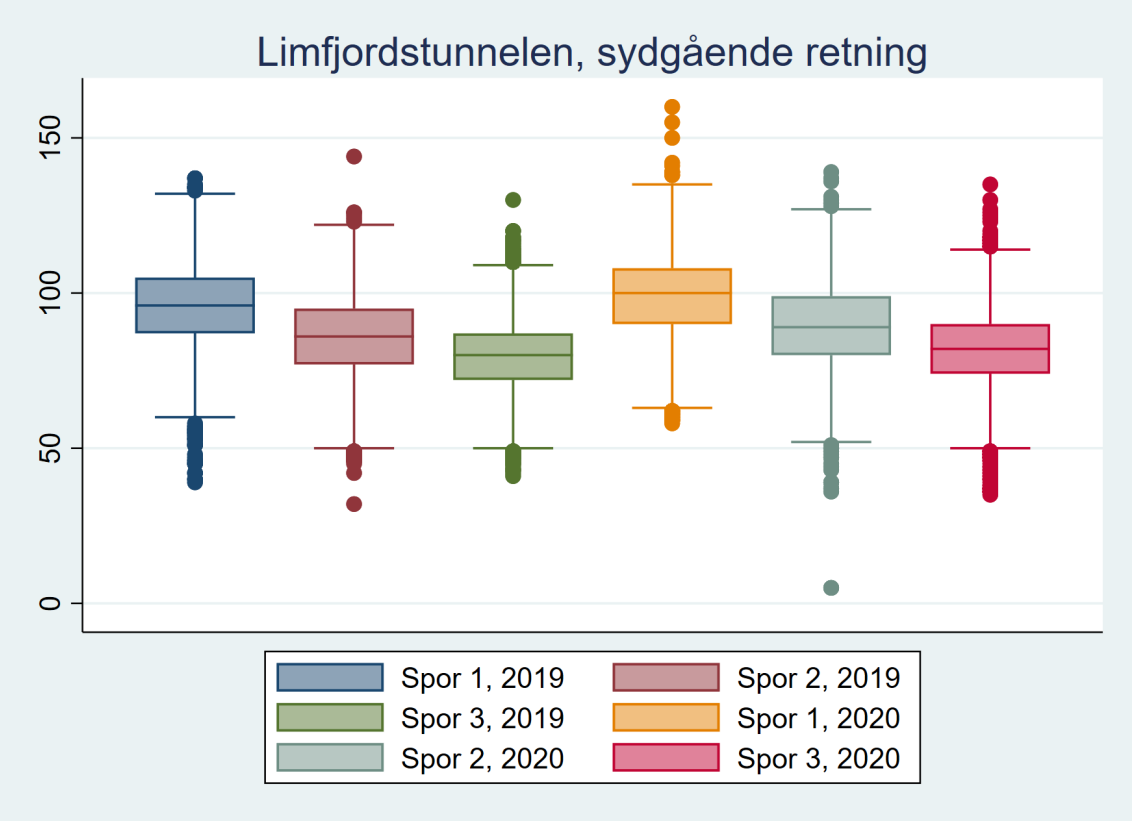
$$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{\sqrt{\frac{SD_1^2}{n_1} + \frac{SD_2^2}{n_2}}} \tag{3.6}$$

Dernæst bestemmes P-værdien ud fra antallet af frihedsgrader og t-teststørrelsen, hvor antallet af frihedsgrader er bestemt ud fra følgende formel: [Vejrup-Hansen, 2012]

$$f = \frac{1}{\frac{c^2}{n_1 - 1} + \frac{(1-c)^2}{n_2 - 1}} \qquad \text{hvor} \qquad c = \frac{\frac{SD_1^2}{n_1}}{\frac{SD_1^2}{n_1} + \frac{SD_2^2}{n_2}} \tag{3.7}$$

3.4.2 ANOVA

ANOVA (Analysis of Variance) bruges ved uparrede datasæt, hvor middelværdien sammenlignes med tre eller flere stikprøver samtidigt. Et eksempel på et boxplot fremgår af Figur 3.2. [Vejrup-Hansen, 2012]



Figur 3.2. Variation i hastighed ved Limfjordstunnelen, sydgående retning den 15.01.2019 og 15.01.2020.

På figuren fremgår et box-plot over hastigheden for tre spor på Limfjordstunnelen for 2019 og 2020. Hvor de tre vandrette streger ved boksene indikerer følgende: [Vejrup-Hansen, 2012]

- Nederste streg af boksen: 1. kvartil - værdien hvorunder 25% af målingerne ligger
- Midterste streg i boksen: Median - værdien der deler stikprøven i to lige store dele
- Øverste streg af boksen: 3 kvartil - værdien hvorunder 75% af målingerne ligger

Den lodrette streg indikerer spændet af stikprøven, og prikkerne over og under den lodrette streger indikerer outliers. Den øverste og nederste vandrette streg indikerer grænsen mellem outliers og værdier i analysen og er bestemt ud fra følgende formler: [Vejrup-Hansen, 2012]

- Øverste vandrette streg: $75\%\text{kvartil} + 1,5 \cdot (75\%\text{kvartil} - 25\%\text{kvartil})$
- Nederste vandrette streg: $25\%\text{kvartil} + 1,5 \cdot (75\%\text{kvartil} - 25\%\text{kvartil})$

Formålet med ANOVA-analysen er at sammenligne variationen mellem sporene med variationen inde for hvert spor ved brug af en ensidet F-test. Denne test bliver ensidet da variationen imellem sporene ikke kan blive mindre end variationen inde for hvert spor. Hypotesen for ANOVA-analysen er dermed følgende: [Vejrup-Hansen, 2012]

$$H_1 : \sigma_{\text{indefor}} \neq \sigma_{\text{mellem}} \qquad H_0 : \sigma_{\text{indefor}} = \sigma_{\text{mellem}} \tag{3.8}$$

F-teststørrelsen bestemmes ud fra følgende formel: [Vejrup-Hansen, 2012]

$$F = \frac{SD^2_{mellem}}{SD^2_{indefor}} \tag{3.9}$$

Hvor variationen indenfor hver spor ($SD_{indefor}$) og imellem sporene (SD_{mellem}) bestemmes ud fra følgende formler: [Vejrup-Hansen, 2012]

$$SD^2_{indefor} = \frac{(n_1 - 1) \cdot SD^2_1 + (n_2 - 1) \cdot SD^2_2 + ... + (n_k - 1) \cdot SD^2_k}{n_1 + n_2 + ... + n_k - k} \tag{3.10}$$

$$SD^2_{mellem} = \frac{n_1 \cdot (\overline{x_1} - \overline{x})^2 + n_2 \cdot (\overline{x_2} - \overline{x})^2 + ... + n_k \cdot (\overline{x_k} - \overline{x})^2}{k - 1} \tag{3.11}$$

Hvis F-teststørrelse er tæt på 1 angiver det, at der ikke er nogen forskel i variationen mellem sporerne og variationen indenfor hvert spor. Til sidst bestemmes p-værdien for undersøgelsen, hvor antallet af frihedsgrader er følgende: [Vejrup-Hansen, 2012]

- Frihedesgrader for SD_{mellem} er antallet af grupper minus en
- Frihedsgrader for $SD_{indefor}$ er antallet af målinger i alt minus en

Del I

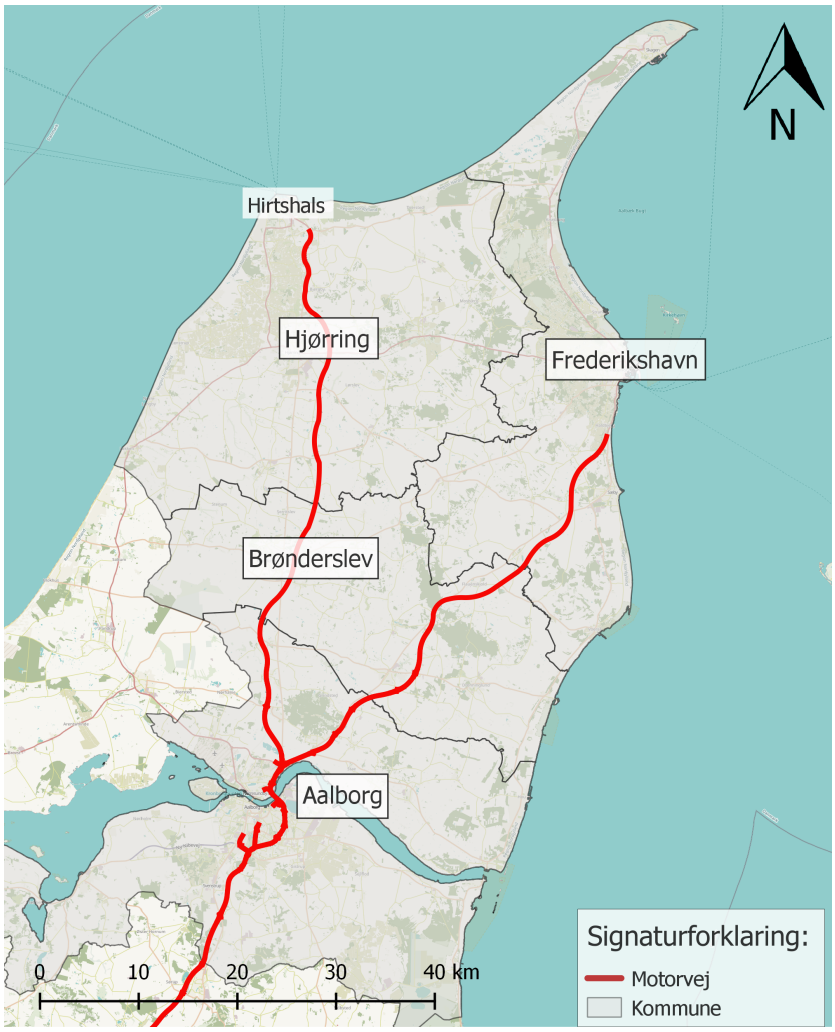
Indledende undersøgelse og litteraturstudie.

Projektlokaliteter 4

Følgende kapitel belyser de to projektlokaliteter, Limfjordstunnelen og M3, hvor effekten af de variable hastighedstavler analyseres i det senere kapitel 8.

4.1 Limfjordstunnelen

Limfjordstunnelen er den eneste motorvejsforbindelse over Limfjorden og forbinder blandt andet Hjørring, Frederikshavn og Brønderslev Kommune med resten af Jylland. Limfjordstunnelen og tilhørende motorvejsnet fremgår af Figur 4.1.



Figur 4.1. Motorvejsforbindelsen som forbinder Vendsyssel med resten Jylland.

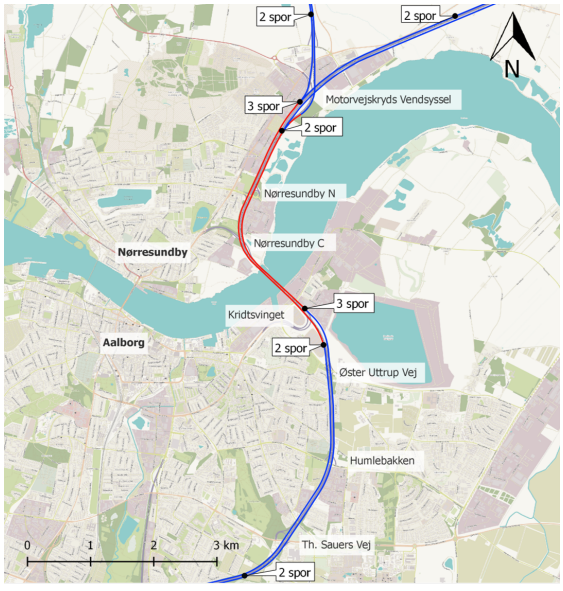
Limfjordstunnelen blev indviet i maj 1969 for at aflaste Limfjordsbroen der på dette tidspunkt var en af danmarks mest trafikerede strækninger med op til 13.000 kt/dag, og derfor havde kapacitetsproblemer. Limfjordstunnelen er dimensioneret med en kapacitet på 80.000 kt/dag. Et år efter indvielsen havde tunnelen en ÅDT på 14.200 kt/dag. [Videbæk et al., 2019]

Den sydlige forbindelse mellem Hobro og Limfjordstunnelen blev anlagt i 1992 [Sørensen, 1992]. Efterfølgende er forbindelserne fra Limfjordstunnelen til Frederikshavn og Hirtshals blevet opgraderet til motorveje, som stod færdig i henholdsvis i 1999 og 2004 [Sørensen, 2002; Berlingske, 2003].

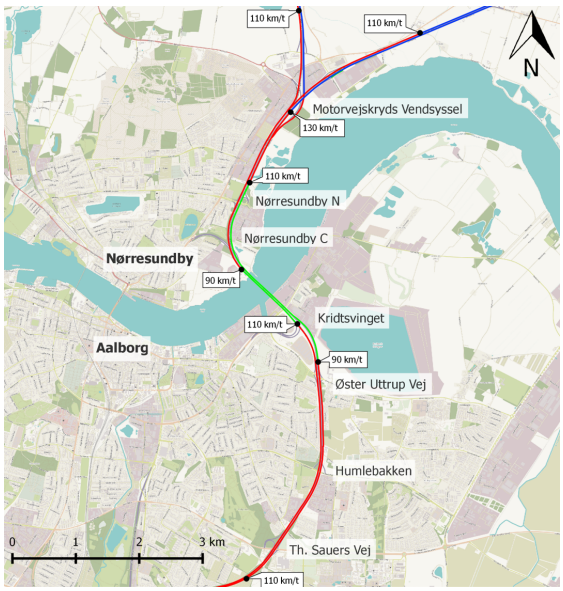
Året efter åbningen af Limfjordstunnelen i 1969 blev det foreslået at etablere en tredje forbindelse over Limfjorden, da den daværende borgmester i Aalborg frygtede, at kapacitetsgrænsen hurtigt ville blive overskredet [Videbæk et al., 2019]. Siden åbningen af Limfjordstunnelen har den tredje Limfjordforbindelse gentagende gange været til debat. Seneste udspil til den nye forbindelse indgik i finansloven i 2019, hvor der blev afsat midler til at opdatere VVM-undersøgelsen for den tredje Limfjordsforbindelse [Finansministeriet, 2018].

4.1.1 Analyse af Limfjordstunnelen

Antallet af spor på motorvejsstrækningen ved og i Limfjordstunnelen fremgår af Figur 4.2, og hastighedsgrænserne uden for trængselsbelastede tidspunkter fremgår af Figur 4.3.

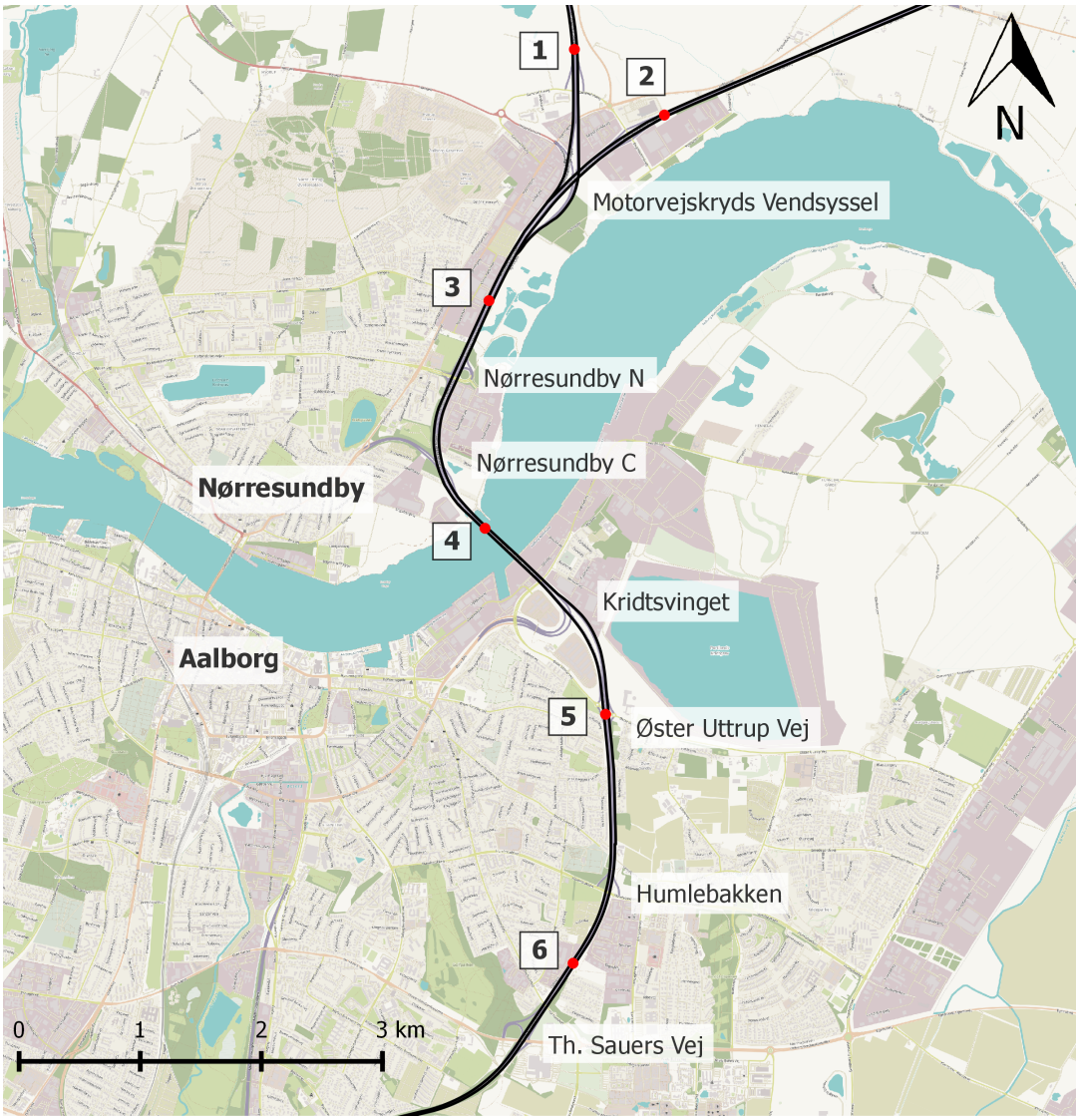


Figur 4.2. Antallet af spor ved Limfjordstunnelen. [Vejdirektoratet, 2020b]



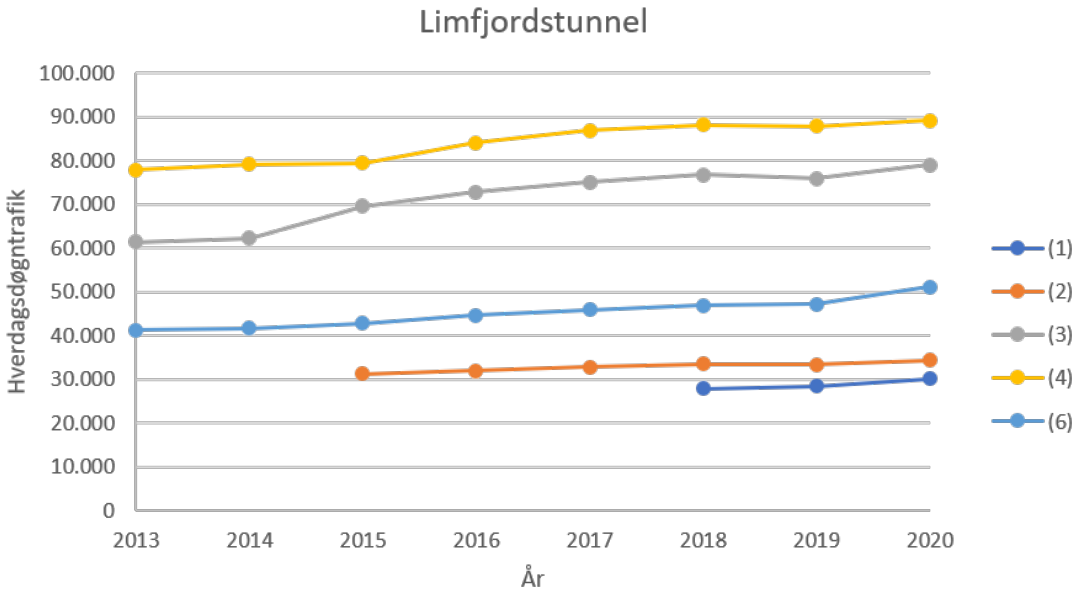
Figur 4.3. Hastighedsgrænserne ved Limfjordstunnelen. [Vejdirektoratet, 2020b]

Udviklingen i hverdagsdøgnstrafikken (HDT) i perioden 2013-2020 og niveauet af trængsel i 2020 ved Limfjordstunnelen og de tilhørende motorvejsstrækninger fastlægges ud fra seks målepunkter. Placeringerne af de seks målepunkter er angivet i Figur 4.4.



Figur 4.4. Placering af de seks punkter, hvor der måles for udviklingen i HDT og niveauet af trængsel ved Limfjordstunnelen.

Udviklingen i HDT ved Limfjordstunnelen i de seks målepunkter i perioden 2013-2020 er angivet på Figur 4.5.



Figur 4.5. Udviklingen i HDT ved de seks målepunkter nær Limfjordstunnelen fra 2013-2020. [Vejdirektoratet, 2020a]

På figuren ses det at der ved Limfjordstunnelen i målepunkt 4 allerede tilbage i 2015 blev registret 80.000 kt/dag, hvilket er tunnelforbindelsens kapacitetsgrænse. Yderligere ses det at trafikmængden siden 2017 er stagneret ved 90.000 kt/dag [Videbæk et al., 2019].

Niveauet af trængsel for motorvejsstrækningen på tre tilfældige dage i januar 2020 bestemmes ud fra forholdet mellem den målte gennemsnitshastighed og den skiltede hastighed uden for trængselsperioden i de seks målepunkter. Formlen for at fastlægge niveauet af trængsel, fremgår af Formel 4.1.

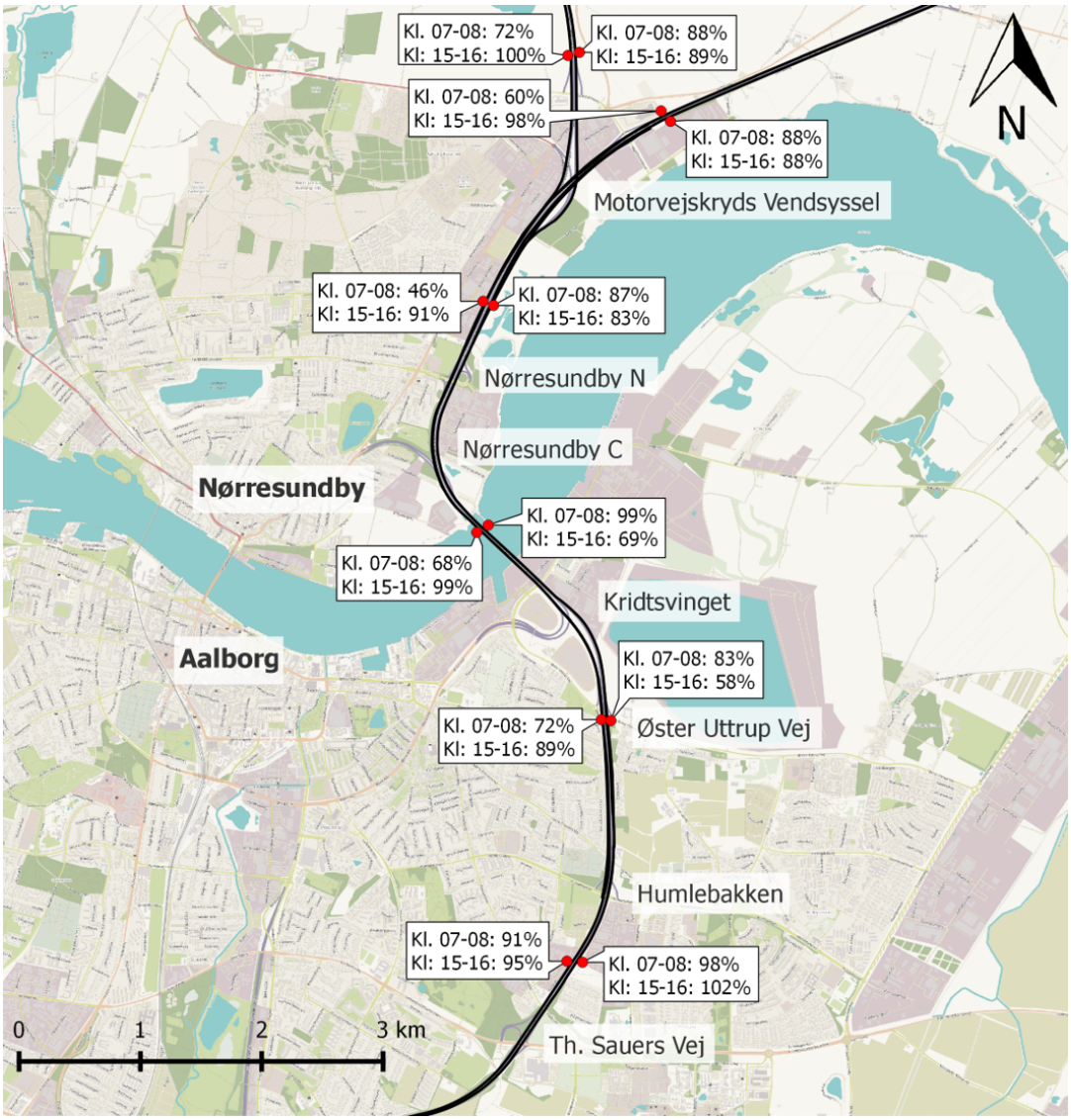
$$T = \frac{v_g}{v_s} \cdot 100 \tag{4.1}$$

Hvor:

T	Niveauet af trængsel [%]
v_g	Den gennemsnitlige kørte hastighed [km/t]
v_s	Den skiltede hastighedsgrænse [kt/km]

Et lavt procenttal angiver, at der er en stor difference imellem den skiltede hastighed og den kørte hastigheder, og at der dermed er trængsel.

Ud fra de indsamlede data fremgår det, at morgenspidstimen er fra kl. 07:00-08:00 og eftermiddagsspidstimen er fra kl. 15:00-16:00. Niveauet af trængsel i de to spidstimer for motorvejsstrækningen ved Limfjordstunnelen fremgår af Figur 4.6.



Figur 4.6. Niveauet af trængsel i morgenspidstimen fra 07:00-08:00 og eftermiddagsspidstimen fra 15:00-16:00 i begge retninger ved de seks målepunkter. [Vejdirektoratet, 2020a]

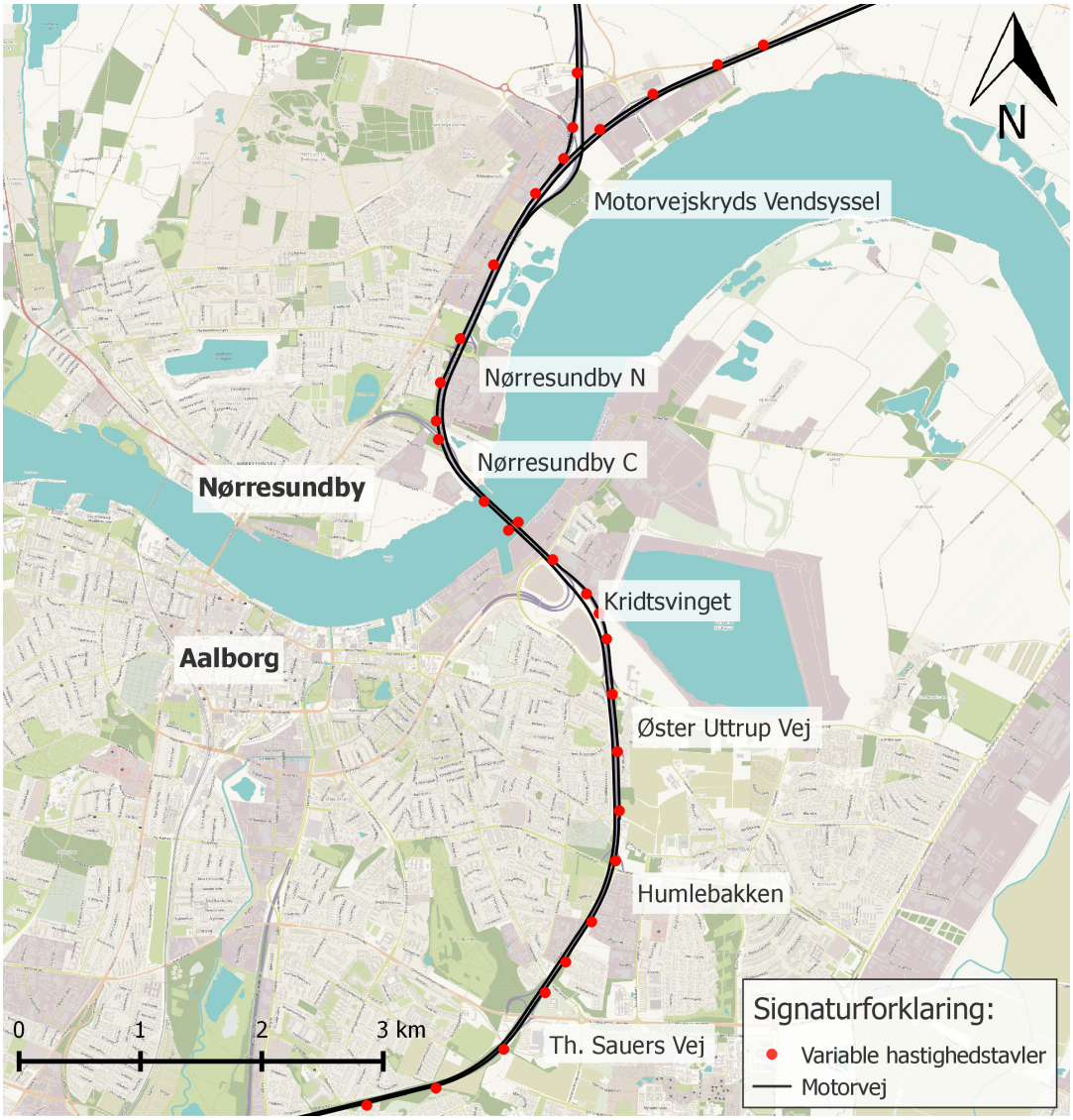
I morgenspidstimen opstår trængslen i Motorvejskrydset Vendsyssel, hvor niveauet af trængsels ligger mellem 46-72%. I eftermiddagsspidstimen opstår trængslen ved Øster Uttrup Vej og strækker sig til Limfjordstunnelen med niveauet af trængsel på 58-69%.

Niveauet af trængsel ved Limfjordstunnelen skyldes blandt andet, at trafikafviklingen bliver påvirket af den nordgående trafik fra Aalborg centrum, som ledes ud på motorvejen syd for tunnelen via Kridtsvinget i eftermiddagsspidstimen. Ligeledes bliver den påvirket nord for tunnelen i sydgående retning af sammenflettende trafikanter fra Hirtshalsmotorvejen og Frederikshavnmotorvejen i Motorvejskrydset Vendsyssel i morgenspidstimen.

4.1.2 Anvendelse af ITS ved Limfjordstunnelen

I oktober 2011 blev ITS på strækningen ved Limfjordstunnelen i form af variable hastighed- og informationstavler opgraderet. Formålet med systemet var at reducere kødannelse og rejsetider i myldretiden, samt at forbedre trafiksikkerheden ved at informere bilisterne om trafiksituationen. [Madsen, Greibe, 2012]

I alt er der opsat 70 variable hastighedstavler, syv køtavler og 12 variable informationstavler. Tavlerne modtager information om trafikken fra 44 målesteder på strækningen [Madsen, Greibe, 2012; Transport Tidende, 2011].



Figur 4.7. Placering af variable hastighedstavler på motorvejen ved Aalborg.

Ud fra figuren fremgår det, at de variable hastighedstavler for den nordgående trafik er placeret lige før afkørslen til Th. Sauers Vej til og med midten af Limfjordstunnelen. For den sydgående trafik er de variable hastighedstavler placeret før sammenfletningen ved Motorvejskryds Vendsyssel til midten af Limfjordstunnelen.

4.2 Motorring 3

M3 er en bymotorvejsstrækning på 20 km, som ligger vest for København og forbinder Helsingørmotorvejen i nord med Køge Bugt Motorvejen i syd. Ydermere har den også forbindelse til Hillerødmotorvejen, Frederikssundmotorvejen og Holbækmotorvejen [Vejdirektoratet, 2016b]. Placeringen af M3 ses af Figur 4.8.

Figur 4.8. Lokation af M3 og forbindelserne til Helsingørmotorvejen, Hillerødmotorvejen, Frederikssundmotorvejen, Holbækmotorvejen og Køge Bugt Motorvejen.

M3 er anlagt i flere etaper siden, at Folketinget I 1942 vedtog den første anlægslov om en motorvej vest om København. Anlægningsfasen blev igangsat i 1966 og vejen stod herefter færdig i 1977. I 1993 undersøgte Vejdirektoratet muligheden for udvidelse af M3, men under udarbejdelsen af planerne blev det besluttet at vente med udvidelsen og i stedet prioritere udvidelsen af Helsingørmotorvejen. Anlægsloven om udvidelse af M3 fra fire til

seks spor over en strækning på 17 kilometer blev herefter vedtaget i 2003 grundet stigende trængselsproblemer. Anlægsperioden strakte sig fra 2005-2008 og åbningen af strækningen skete i etaper i perioden 2007-2008, på nær strækningen ved Frederikssundmotorvejen, som åbnede i 2011. [Jacobsen, 2010]

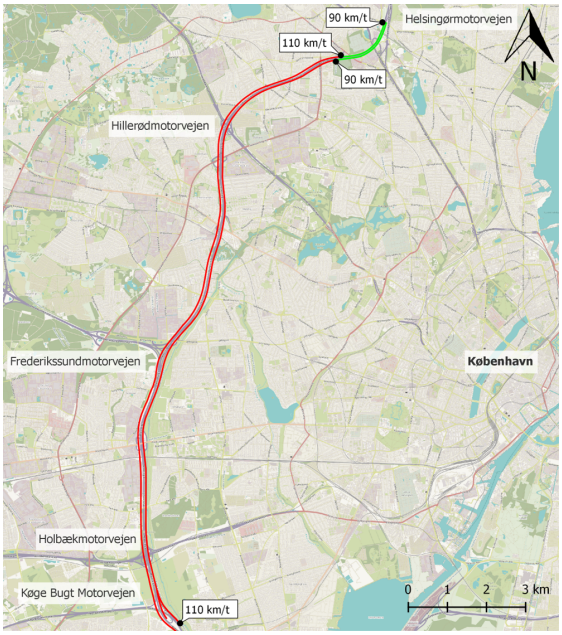
M3 er efter Køge Bugt Motorvejen Danmarks mest trafikeret motorvejsstrækning. Den mest trafikerede delstrækning på M3 er mellem Frederikssundvej og motorvejskrydset Frederikssundmotorvej med HDT i 2019 på cirka 146.000 kt/dag. M3 og Køge Bugt Motorvejen er de eneste strækninger i Danmark, hvor HDT var over 130.000 kt/dag i 2019. [Vejdirektoratet, 2020a]

I følge en opgørelse fra Vejdirektoratet er den gennemsnitlige rejsetid på M3 steget siden udvidelsen i 2010 og frem til 2015 med seks minutter [Bredsdorff, 2016]. M3 var i 2019 den strækning på det danske vejnet, som havde de største trængselsproblemer med næsten 120 timers forsinkelse pr. kilometer pr. døgn. Trængslen ved M3 er blandt andet et resultat af, at strækningen skal afvikle trafikken fra Helsingørmotorvejen, Køge Bugt Motorvejen, Hillerødmotorvejen, Frederikssundmotorvejen og Holbækmotorvejen [Vejdirektoratet, 2019a].

4.2.1 Analyse af Motorring 3

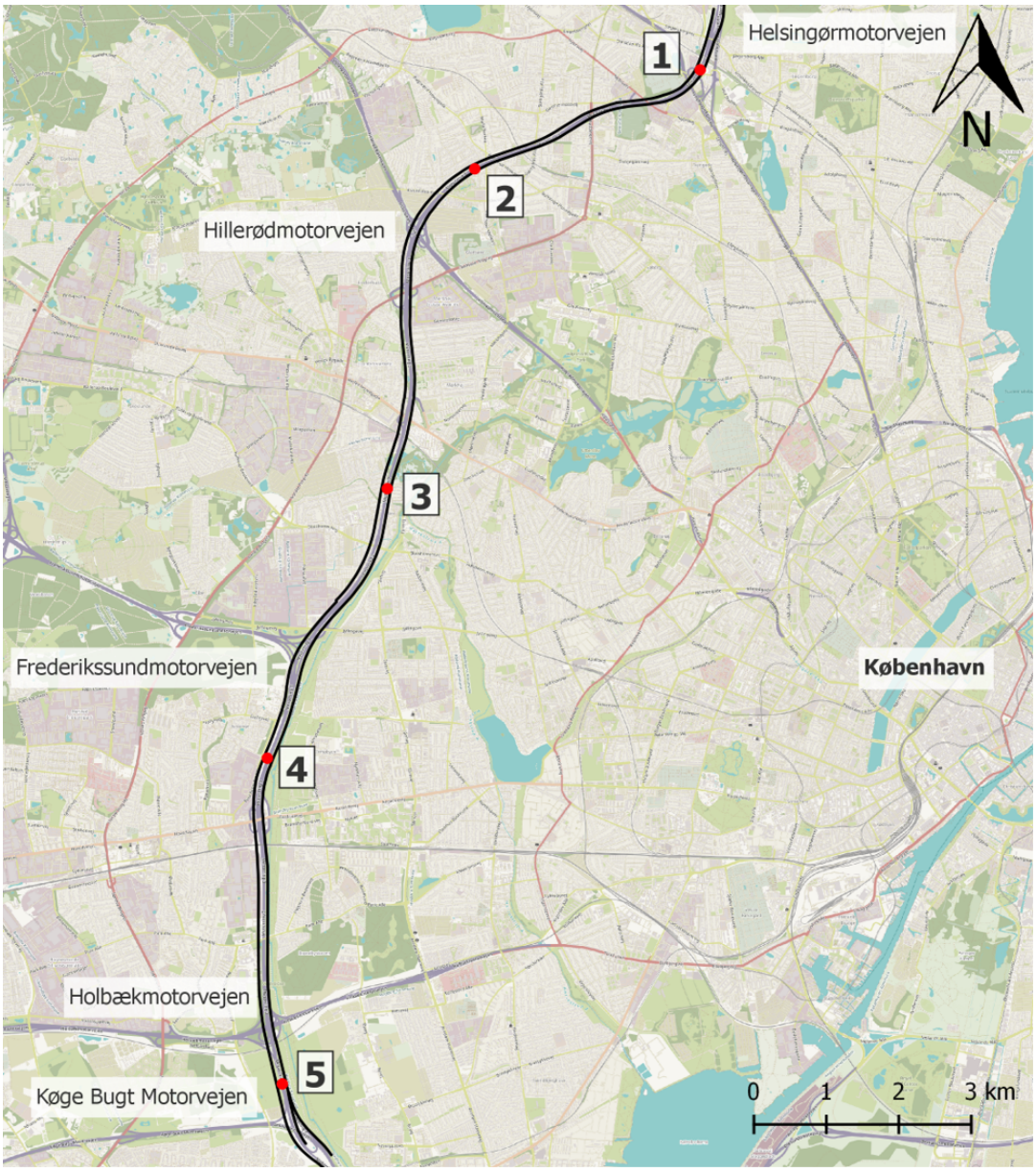
Antallet af spor på M3 fremgår af Figur 4.9 og hastighedsgrænserne uden for trængselsperioden på M3 fremgår af Figur 4.10.

Figur 4.9. Antallet af spor ved M3. [Vejdirektoratet, 2020b]



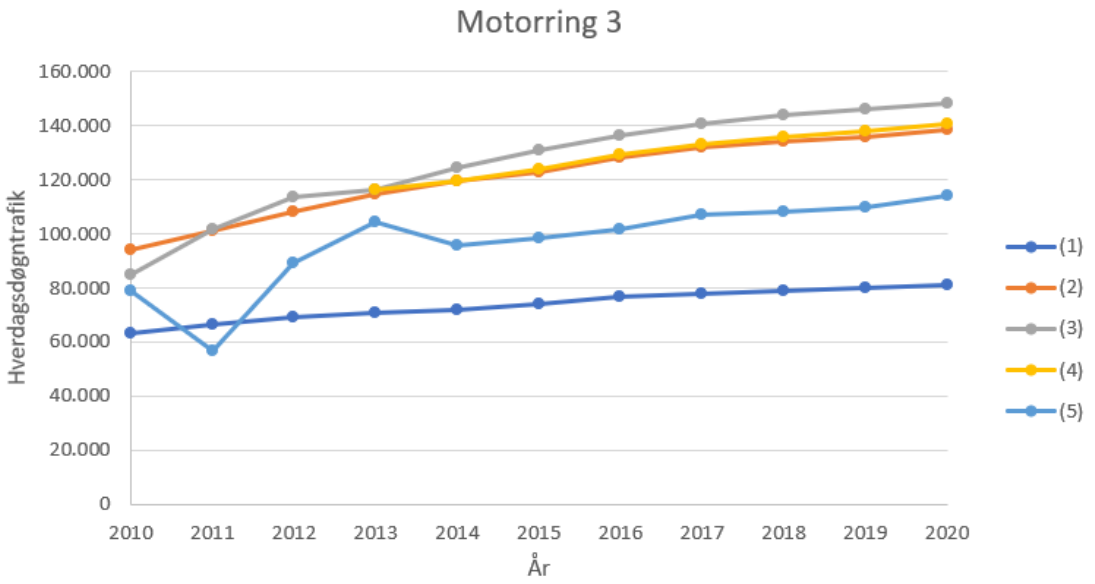
Figur 4.10. Hastighedsgrænserne ved M3. [Vejdirektoratet, 2020b]

Udviklingen i HDT i perioden 2010-2020 og niveauet af trængsel i 2020 fastlægges ud fra fem målepunkter. Placeringen af de fem målepunkter fremgår af Figur 4.11.



Figur 4.11. Placering af de fem punkter, hvor der måles HDT og niveauet af trængsel på M3.

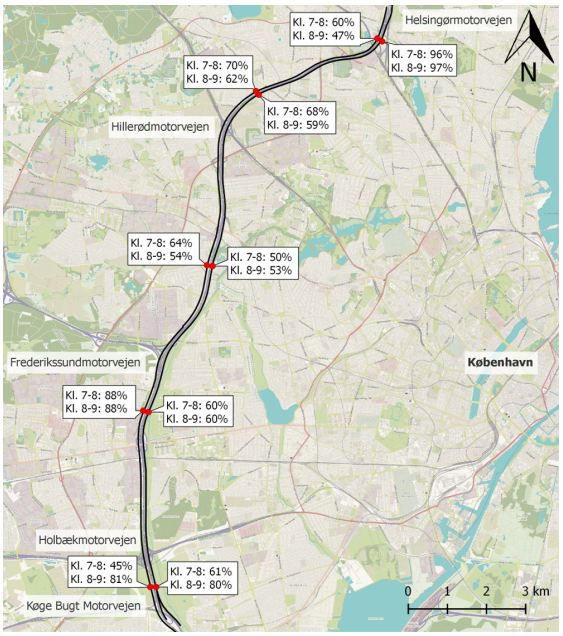
Udviklingen i HDT på M3 i de fem målepunkter i perioden 2010-2020 fremgår af Figur 4.12.



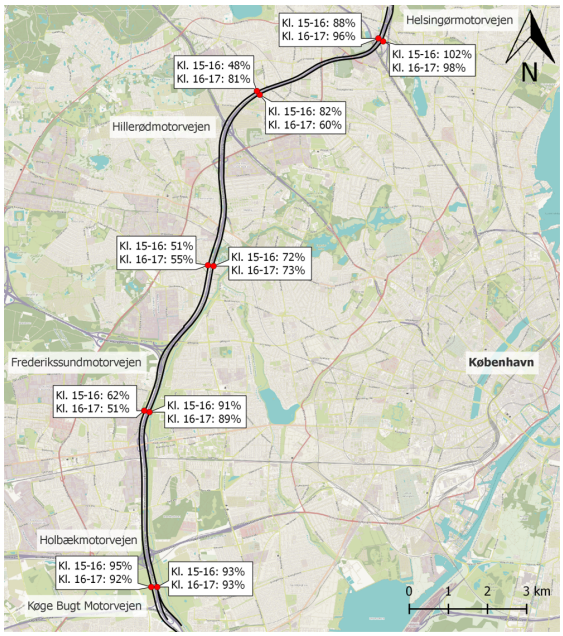
Figur 4.12. Udviklingen i HDT ved de fem målepunkter på M3. [Vejdirektoratet, 2020a]

På figuren fremgår det, at der har været en stigning i HDT i perioden 2010-2020 i alle målepunkterne. I målepunkt 3, som ligger mellem Hillerødmotorvejen og Frederikssundmotorvejen, ses den største stigning i trafikintensiteten på 43% fra cirka 85.000-148.000 kt/dag. Det kan samtidig observeres på figuren, at der siden 2016 har været en stagnerende HDT i de fem målepunkter, hvilket kan betyde, at kapacitetsgrænsen er nået på M3. Af figuren fremgår det også, at der ved målepunkt nr. 5 er sket et fald i antallet af trafikanter i 2011, hvilket kan skyldes, at udvidelsen af motorvejsstrækningen ved Frederikssundmotorvejen og tilkoblingen mellem disse strækninger stod færdig i august 2011 [Nielsen, 2016].

Niveauet af trængsel i de fem målepunkter ved M3 i 2020 bestemmes ud fra samme metode som ved Limfjordstunnelen, se Formel 4.1. I morgentimerne ligger den største belastning på vejnettet i perioden 07:00-09:00 og i eftermiddagstimerne ligger den største belastning i perioden 15:00-17:00. Niveauet af trængsel i 2020 for henholdsvis morgen- og eftermiddagsspidstimerne er angivet i Figur 4.13 og Figur 4.14.



Figur 4.13. Niveauet af trængsel i morgenspidstimerne 07:00-09:00 for begge retninger ved de fem målepunkter. [Vejdirektoratet, 2020a]



Figur 4.14. Niveauet af trængsel i eftermiddagsspidstimerne 15:00-17:00 for begge retninger ved de fem målepunkter. [Vejdirektoratet, 2020a]

Af figuren ses det, at trængslen på M3 i 2020 var størst mellem Hillerødmotorvejen og Frederikssundmotorvejen i både morgen- og eftermiddagsspidstimerne.

4.2.2 Anvendelse af ITS ved Motorring 3

De variable hastighedstavler på M3 blev etableret som et led i en større opdatering af ITS og trafikledelse på motorvejsstrækningen i forbindelse med udbygningen af M3 i 2005-2009. Der blev etableret i alt 66 variable hastighedstavler og placeringen af disse fremgår af Figur 4.15. Ydermere blev der etableret kameraer og radardetektorer til registrering af den trafikale udvikling og uheldshændelse på M3. [Vithen, Habo, 2005]

Figur 4.15. Placering af variable hastighedstavler ved M3.

Som et resultat af en politisk trafikaftale i 2014 blev en undersøgelse af øget kapacitet på M3 publiceret i 2016 af Vejdirektoratet. M3 er en bymotorvej, hvilket betyder, at der er fysisk snævre rammer for sporudvidelse og derfor kan der ikke gennemføres omfattende kapacitetsforøgelse. Af rapporten fremgår en række forslag til øget kapacitet på M3, som ikke kræver sporudvidelse, heriblandt kørsel i nødspor i morgen- og eftermiddagsspidstimerne, rampedosering og forbedret anvendelse af de allerede eksisterende variable hastighedstavler med henblik på hastighedsharmonisering. [Vejdirektoratet, 2016b]

Det øgede fokus på hastighedsharmonisering som et tiltag til at øge kapaciteten begrundes som følgende i rapporten udarbejdet af Vejdirektoratet: *"Den maksimale kapacitet på en vejstrækning opnås ikke altid ved den højest tilladte hastighed. Hvis trafikmængderne på vejen nærmer sig kapacitetsgrænsen vil den optimale hastighed, hvor der afvikles flest biler, typisk ligge under den højest tilladte. På en strækning kan der derfor være en gevinst ved at harmonisere den tilladte hastighed med mængden af trafik."* [Vejdirektoratet, 2016b]

Teori om kødannelse 5

Traditionelt har trafikafviklingsteori taget udgangspunkt i antagelsen om, at trafik kan afvikles i to faser, som betegnes frit flow (free flow) og trængsel (congested traffic). [Kerner, 2017]

I frit flow kan trafikanter køre med den ønskede hastighed og begrænses kun af den skiltede hastighed på den pågældende strækning eller af andre faktorer som vejudformning eller vejrforhold. Trafikanters gennemsnitlige hastighed på en strækning er afhængig af trafiktætheden og trafikintensiteten. Frit flow er i den sammenhæng et resultat af, at forholdet mellem trafiktætheden og trafikintensiteten er så lavt, at interaktionen mellem trafikanter er ubetydelig. Formel 5.1 viser gennemsnitshastighed som et resultat af forholdet mellem trafiktæthed og trafikintensitet: [Kerner, 2017]

$$v = \frac{q}{p} \tag{5.1}$$

Hvor:

v	Gennemsnitshastighed [km/t]
q	Trafikintensitet [kt/t]
p	Trafiktæthed [kt/km]

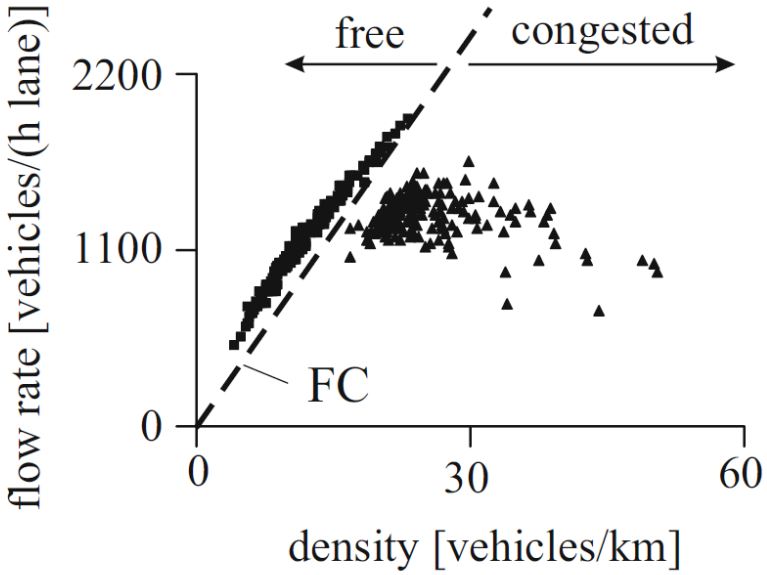
Trængsel på en strækning opstår, når forholdet mellem trafikintensiteten og trafiktætheden stiger, hvilket har den konsekvens, at den observerede gennemsnitlige hastighed bliver lavere end den gennemsnitlige minimumshastighed, som stadig bør være mulig under frit flow. Formel 5.2 viser grænsen for den gennemsnitlige minimumshastighed når trafikintensiteten og trafiktætheden har maksimal værdi. [Kerner, 2017]

$$v_{min}^{(free,\ emp)} = \frac{q_{max}^{(free,\ emp)}}{p_{max}^{(free,\ emp)}} \tag{5.2}$$

Hvor:

$v_{min}^{(free,emp)}$	Minimumsværdi for gennemsnitshastigheden [km/t]
$q_{max}^{(free,emp)}$	Maksimal trafikintensitet [kt/t]
$p_{max}^{(free,emp)}$	Maksimal trafiktæthed [kt/km]

Et empirisk eksempel på definitionen af henholdsvis frit flow og trængsel kan ses af Figur 5.1.



Figur 5.1. Forholdet mellem flowrate, trafiktæthed (density) og minimumshastigheden i frit flow. [Kerner, 2017]

Af figuren ses forholdet mellem trafikintensiteten (kt/t) og trafiktætheden (kt/km), hvor linjen FC definerer den gennemsnitlige minimumshastighed, som stadig er mulig under frit flow. Stiger eksempelvis trafiktætheden på en strækning tilpas meget uden, at der på samme tid er en reduktion i trafikintensiteten, vil trafikanternes gennemsnitlige hastighed kunne observeres til højre for linjen FC og der vil dermed opstå trængsel. [Kerner, 2017]

5.1 Trefase-teori

Den traditionelle teori, som kun skelner mellem to faser i trafikafvikling, kan ikke anvendes til at forklare hændelser i trafikken, som kan observeres ud fra empirisk dataindsamling af trafikafvikling. Derfor udviklede Boris Kerner trefase-teorien, som netop har til formål at forklare trængsel og trafiksammenbrud på et vejnet. [Kerner, 2017]

Trefase-teorien består af tre følgende faser:

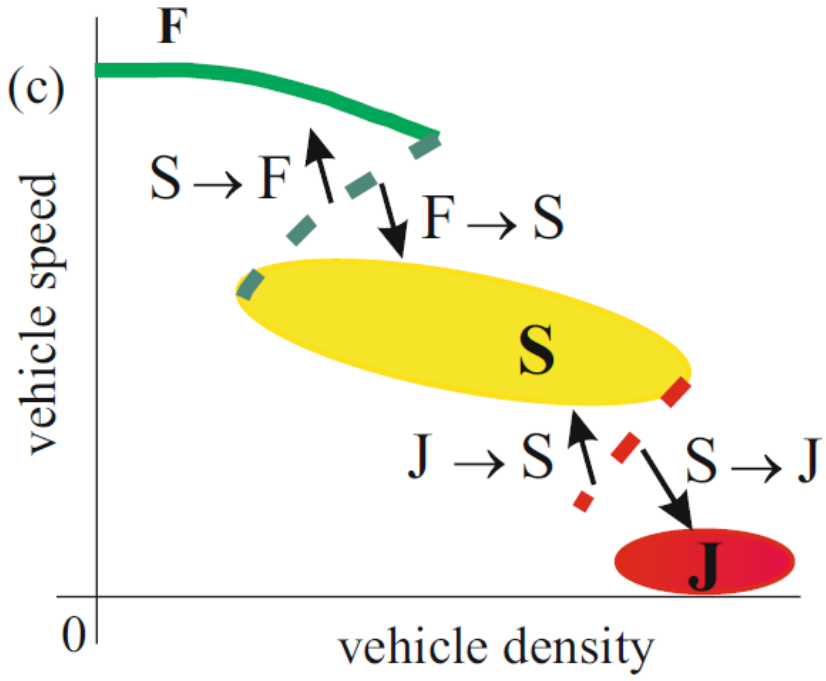
- Frit flow.
- Synkroniseret flow.
- Bevægelig kø.

I trefase-teorien deles trængselsfasen således op i to forskellige faser, som betegnes *synkroniseret flow* og *bevægelig kø*. *Synkroniseret flow* og *bevægelig kø* har følgende karakteristika: [Kerner, 2017]

1) **Synkroniseret flow**
   Synkroniseret flow er første trængselsfase, og er en transition fra F (frit flow) -> S (synkroniseret flow). Fasen kendetegnes ved, at trafiktætheden og trafikintensiteten stiger til en grad, hvor trafikanternes gennemsnitshastighed er under den gennemsnitlige minimumshastighed, som er mulig under frit flow. Interaktionen mellem trafikanterne kan dermed ikke længere negligeres og trafikken bevæger sig dermed i en synkroniseret strøm; heraf definitionen synkroniseret flow. Synkroniseret flow karakteriseres yderligere ved at have en trafikintensitet, som typisk er lige så høj som under frit flow, og fasen opstår i det fleste tilfælde ved trafikale flaskehalse. [Kerner, 2017]

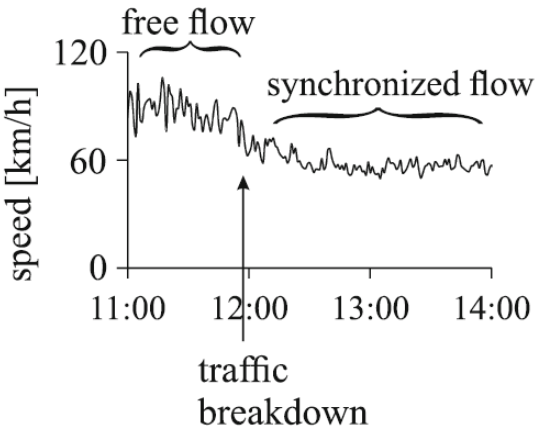
2) **Bevægelig kø**
   Bevægelig kø er anden trængselsfase og her forekommer et trafiksammenbrud og er en transition fra S (synkroniseret flow) -> J (bevægelig kø). Denne fase er kendetegnet ved, at trafikanternes gennemsnitlige hastighed og trafikintensiteten på en strækning falder pludseligt og markant, og i så høj en grad, at den gennemsnitlige hastighed og trafikintensiteten kan være lig med 0. Samtidig er trafiktætheden meget høj. I modsætning til synkroniseret flow, som er knyttet til en flaskehals, vil en bevægelig kø ofte udbrede sig opstrøms og kan i visse tilfælde udbrede sig til nærliggende flaskehalse opstrøms eller nedstrøms. [Kerner, 2017]

En empirisk illustration af transitionerne fra F -> S og S -> J, samt de modsatte transitioner J -> S og S -> F fremgår af Figur 5.2

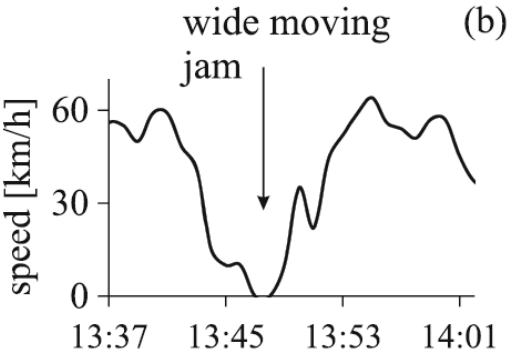


Figur 5.2. Sammenhængen mellem fart og trafiktæthed (density) i de tre faser. [Kerner, 2017]

En empirisk illustration af udviklingen i den gennemsnitlige hastighed for de to trængselsfaser synkroniseret flow og bevægelig kø fremgår af Figurerne 5.3 og 5.4.



Figur 5.3. Gennemsnitshastigheden for trafikanter under synkroniseret flow. [Kerner, 2017]

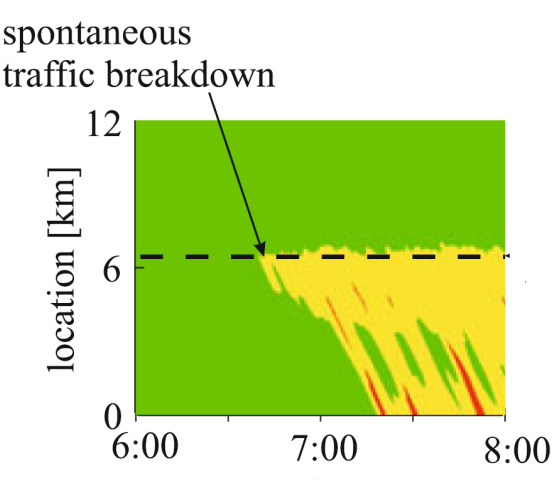


Figur 5.4. Gennemsnitshastigheden for trafikanter under bevægelig kø. [Kerner, 2017]

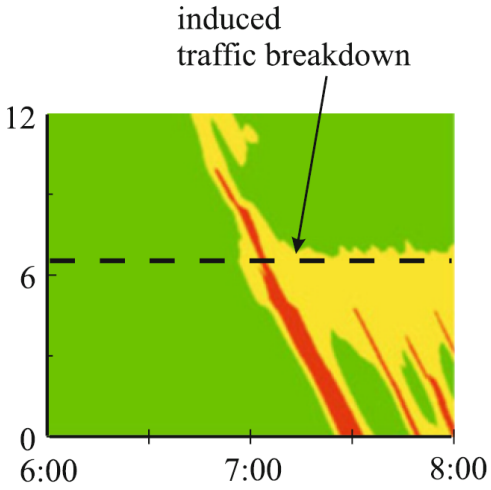
5.1.1 Spontant og induceret trafiksammenbrud

Trafiksammenbrud på et vejnet kan kategoriseres som værende enten spontant eller induceret. Begge typer af trafiksammenbrud deler samme egenskaber for trafikafviklingen, når trafiksammenbruddet er forekommet. Det, som adskiller de to typer af trafiksammenbrud, er derfor selve årsagen til trafiksammenbruddene. [Kerner, 2009]

Et spontant sammenbrud i trafikken karakteriseres ved at have frit flow både opstrøms og nedstrøms ved den trafikale flaskehals i tidsrummet *før* sammenbruddet forekommer. Når transitionen fra F -> S forekommer ved flaskehalsen udbreder det synkroniserede flow opstrøms. Induceret sammenbrud i trafikken er et resultat af, at et trængselsmønster udbreder sig nedstrøms på et vejnet. Induceret trafiksammenbrud ved en flaskehals er derfor udløst af, at der i et andet punkt på vejnettet er forekommet et sammenbrud og at dette trængselsmønster udbreder sig og forårsager trafiksammenbruddet ved en flaskehals. Figurerne 5.5 og 5.6 viser en empirisk illustration af de to typer af trafiksammenbrud. [Kerner, 2009]



Figur 5.5. Forekomsten af spontant sammenbrud i trafikken. [Kerner, 2009]



Figur 5.6. Forekomsten af induceret sammenbrud i trafikken. [Kerner, 2009]

På de to figurer ses det, hvordan et trafiksammenbrud ved en flaskehals, som i dette eksempel repræsenteres ved den stiplede linje efter 6 kilometer, opstår ved henholdsvis spontant og induceret trafiksammenbrud. Ved det spontane sammenbrud er der frit flow ved flaskehalsen i tidsrummet før sammenbruddet opstår og efterfølgende udbredes det synkroniserede flow kun opstrøms, hvorimod det inducerede trafiksammenbrud er et resultat af udbredelsen af en bevægelig kø nedstrøms.

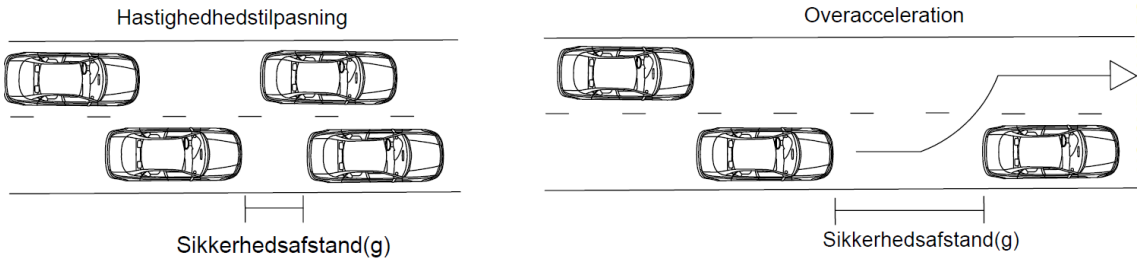
5.2 Årsag til trafiksammenbrud

En overgangs til trængselsfasen, F -> S transition, udløses af en lokal forstyrrelse i trafikken, som betegnes en *nuklear*. En lokal forstyrrelse i trafikken, som forårsager pludselig ændringer i hastigheden, trafikintensiteten eller trafiktætheden, kan skyldes flere forskellige faktorer, såsom vognbaneskift, andelen af tung transport, vejrforhold eller trafikale flaskehalse. [Kerner, 2017]

Særligt flaskehalse er den typiske årsag til, at der forekommer trafiksammenbrud på et vejnet. Flaskehalse kan være enten tilbagevende (recurrent bottlenecks) eller ikke-tilbagevende (nonrecurrent bottlenecks). Tilbagevendende flaskehalse er karakteriseret ved, at en fysisk udformning af vejnettet, som eksempelvis vejindsnævringer og motorvejstilkørsler, hvor antallet af vognbaner på en strækning reduceres, skaber kapacitetsreduktion. Der er derfor en deterministisk (konstant) lokal forstyrrelse knyttet til de tilbagevendende flaskehalse, fordi trafikflowet på eksempelvis en motorvejstilkørsel permanent forstyrres af trafikanter, der tilsluttes motorvejen via en rampetilkørsel. Flaskehalse kan yderligere også være ikke-tilbagevendende og opstår dermed uafhængigt af et fysisk karakteristika på vejnettet. Ikke-tilbagevendende flaskehalse kan være et resultat af trafikuheld, vejarbejde eller afholdelse af større arrangementer, hvor der typisk opstår et ualmindeligt højt transportbehov. [Falcocchio, Levinson, 2015]

5.2.1 Kritisk grænse for trafiksammenbrud

Den lokale forstyrrelse i trafikken, som oftest forekommer ved flaskehalse på grund af indfletning og vognbaneskift, vil ikke nødvendigvis resulterer i et trafiksammenbrud. Hvorvidt den lokale forstyrrelse ved en flaskehals resulterer i transitionen fra F -> S, afhænger af balancen mellem de to konkurrerende tendenser i trafikken, henholdsvis tendensen til synkroniseret flow på grund af hastighedstilpasning og tendensen til frit flow på grund af overacceleration. De to modsatrettede tendenser fremgår af Figur 5.7. [Kerner, 2009]



Figur 5.7. Eksempel på tendensen til hastighedstilpasning og overacceleration. [Kerner, 2017]

I frit flow er trafiktætheden tilpas lav og hastigheden tilpas høj til at overaccelerationseffekten er stærkere end hastighedstilpasningseffekten, hvorfor der ikke forekommer en F -> S transition. I et tilfælde, hvor trafiktætheden stiger eller hastigheden falder til et kritisk niveau, kan den lokale forstyrrelse betyde, at hastighedstilpasningseffekten bliver stærkere end overaccelerationseffekten, hvorefter der forekommer en F -> S transition. [Kerner, 2009]

I et tilfælde af en lokal forstyrrelse, hvor der efterfølgende forekommer en F -> S transition, vil mindst et af følgende forhold, som fremgår af formel 5.3, være gældende:

$$v \leq v_{cr,\ FS}^{(B)} \qquad p \geq p_{cr,\ FS}^{(B)} \tag{5.3}$$

Omvendt, hvis hastigheden eller trafiktætheden ved flaskehalsen ikke har den kritiske værdi ved påvirkning af den lokale forstyrrelse, vil der ikke forekomme en F -> S transition som vist ved formel 5.4 [Kerner, 2009]:

$$v \geq v_{cr,\ FS}^{(B)} \qquad p \leq p_{cr,\ FS}^{(B)} \tag{5.4}$$

Hvor:

v	Lokal forstyrrelse i hastigheden [km/t]
$v_{cr,\ FS}^{(B)}$	Kritisk værdi for lokal forstyrrelse i hastigheden [km/t]
p	Lokal forstyrrelse i trafiktætheden [kt/km]
$p_{cr,\ FS}^{(B)}$	Kritisk værdi for lokal forstyrrelse i trafiktætheden [kt/km]

5.2.2 Metastabel tilstand

Ifølge formel 5.3 er transitionen fra F -> S afhængig af de kritiske værdier v og p, som er foranlediget af den lokale forstyrrelse ved en flaskehals. Transitionen fra F -> S er dog yderligere afhængig af den trafikintensitet, som kan observeres ved flaskehalsen. [Kerner, 2017]

I følge trefase-teorien er der uendelige kapaciteter(C) ved en flaskehals, og sandsynligheden, for at der forekommer en F -> S transition, stiger i takt med, at trafikintensiteten(q_{sum}) ved en flaskehals øges. [Kerner, 2017]

Følgende forhold gælder for sammenhængen mellem trafikintensiteten og kapaciteten ved en flaskehals:

$$\begin{aligned} q_{sum} &= \text{F -> S transition kan ikke forekomme} \\ C_{min} < q_{sum} < C_{max} &= \text{Metastabel tilstand ved flaskehals} \\ q_{sum} = C_{max} &= \text{Sandsynlighed for trafiksammenbrud er lig med 100\%} \end{aligned} \tag{5.5}$$

Når trafikintensiteten stiger til et punkt mellem den minimale kapacitet og den maksimale kapacitet vil trafikafviklingen ved flaskehalsen derfor være i en *metastabel tilstand*. I den metastable tilstand er et trafiksammenbrud således sandsynligt, og trafikafviklingen i tidsrummet (T_{obs}) afhængig af, hvorvidt der forekommer forstyrrelser ved flaskehalsen, som har en kritisk værdi jævnfør formel 5.3. Forekommer denne forstyrrelse opstår der bevægelig kø og trafiksammenbrud som konsekvens heraf [Kerner, 2017].

Litteraturstudie 6

Følgende litteraturstudie behandler følgende aspekter ved variable hastighedstavler:

1) Den historiske udvikling i anvendelsen af variable informations- og hastighedstavler.
2) Nationale betingelser til etablering af variable hastighedstavler og de bagvedliggende styringsalgoritmer.
3) National og internationale studier af variable hastighedstavlers effekt på trafikafviklingen.

6.1 Historisk udvikling i anvendelsen af variable informations- og hastighedstavler

ITS-systemer, som har til formål at lede og styre trafik, blev for første gang etableret i 60'erne og 70'erne og systemerne var grundet teknologiske begrænsninger relativt simple. [Gordon, 2016]

Eksempelvis blev der i slutningen af 70'erne etableret de første forsøg med anvendelsen af variable informationstavler i Berkshire, England. Disse variable informationstavler virkede ved at informere bilister om eksempelvis for tæt kørsel eller for høj hastighed. For tæt kørsel blev detekteret ved hjælp af en radar, som målte afstanden mellem to køretøjer og hvis afstanden ikke var tilstrækkelig mellem de to køretøjer, blev en informationstavle aktiveret med en besked til den bagvedkørende bilist om at øge afstanden til forankørende. Detektering af for høj hastighed skete ved hjælp af induktionsspoler i asfalten og hvis hastigheden var højere end den tilladte blev tavlen aktiveret med en besked til bilisten om at sætte hastigheden ned. [Winnett, Wheeler, 2002]

Tiltaget var ment som præventiv ulykkesbekæmpelse og efterfølgende evalueringer viste en positiv effekt med en halvering af ulykker. Senere evalueringer viste også, at særligt de hastighedsnedsættende tavler opnåede større effekt over tid, hvilket indikerede, at de faste trafikanter på strækningen efter en periode lærte at afpasse hastigheden til tavlerne. På baggrund af undersøgelserne blev det konkluderet, at det var muligt at påvirke trafikanternes hastighed med de variable tavler og at effekten på trafikanternes hastighed var permanent. [Winnett, Wheeler, 2002]

Det øgede fokus på ITS i løbet af 80'erne mundede ud i et tværnationalt samarbejde på europæisk plan, hvor det første store ITS-projekt "PROMETHEOUS"(Program for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) fra 1986, skulle fremme anvendelse af realtid data til optimering af et trafiksystem. [Grumert, 2014]

I Danmark blev de første permanente variable varslingstavler etableret på motorvejsstrækningen op til Limfjordsforbindelsen i 1994 da Limfjordstunnelen skulle undergå gennemgribende reparationsarbejde. I reparationsarbejdets startfase blev midlertidig advarselsmærkning etableret, men på grund af flere dødsulykker i den efterfølgende periode blev det af Vejdirektoratet besluttet, at permanent dynamisk køvarsling skulle etableres på strækningen [Gautier, 1994].

De gode erfaringer med køvarsling ved Limfjordstunnelen bevirkede, at Vejdirektoratet etablerede trafikledelsessystemer i forbindelse med ombygningen af Helsingørmotorvejen i 1996-97. Der blev etableret fem variable informationstavler, 18 videokameraer, tre automatiske køvarslingssystemer og 64 variable hastighedstavler. Formålet med etableringen af de variable hastighedstavler var, at operatøren let og efter behov kunne foretage lokale hastighedsændringer, så trafikanterne var forberedt på vejarbejde i forbindelse med ombygningen af motorvejen. Anvendelse af de variable hastighedstavler var en succes, men det fremhæves i evalueringsrapporten, at de høje driftsomkostninger som fulgte med, ikke var hensigtsmæssig, hvis hastighedstavlerne skulle etableres som et permanent system. [Vejdirektoratet, 1997]

Et at de første lokale forsøg med variable hastighedstavler var ved Brovst skole i 2001, og blev etableret med økonomisk støtte gennem Trafikministeriets rådighedspulje. Ønsket om etablering af de variable tavler kom på baggrund af, at der i en periode på knap 10 år frem mod 2001 forekom flere ulykker hvoraf en person blev dræbt og fire andre alvorligt sårede. Ulykkerne skete på en strækning omkring skolen, hvor en stor del af bilisterne kørte hurtigere end den tilladte hastighed. Formålet med etableringen af tavlerne var at undersøge, om de havde en hastighedsnedsættende effekt på lokaliteter, hvor det ikke var muligt at anvise andre typer af hastighedsnedsættende foranstaltninger. Evalueringen af tavlerne blev fortaget efter et halvt års drift og en analyse viste, at etableringen af tavlerne havde resulteret i en reduktion af gennemsnitshastigheden på 20%. [Eriksen et al., 2003]

De første variable informations- og hastighedstavler havde således primært fokus på at øge trafiksikkerheden. På grund af teknologiske forbedringer i løbet af 90'erne opstod potentialet for, at trafikledelsessystemer også kunne forbedre trafikafviklingen og reducere risikoen for trafiksammenbrud gennem registrering af realtids trafikdata og efterfølgende beregninger af, hvilken hastighed de variable tavler skulle angive for at sikre den optimale trafikafvikling. [Gordon, 2016; Lu et al., 2019]

Siden 00'erne og især inden for det seneste årtier har der være en markant udbredelse af trafikledelsessystemer og særligt udviklingen af styringsalgoritmer til at sikre den optimale trafikafvikling. [Lu et al., 2019]

6.2 Betingelser for tavlevisning

For at sikre, at de variable tavler fungerer efter hensigten, er der en række betingelser, som skal overholdes ved både implementering og drift af de variable tavler. Planlægning, projektering og drift af variable hastighedstavler i Danmark specificeres i håndbogen *Projektering af variable vejtavler og vognbanesignaler*, hvoraf processen opdeles i tre grupper:

1) **Dimensionsgivende forudsætninger for projektering**
   Forud for etableringen af variable vejtavler er det et krav, at en række dimensionsgivende grundforudsætninger analyseres for derved at sikre optimal anvendelse af vejtavlerne. I denne fase undersøges eksempelvis (1) de geometriske forhold på strækningen, så det tekniske udstyr placeres mest hensigtsmæssigt i forhold til de fysiske forhold, (2) dimensionerede trafikbelastning, så trafikmønstre og spidsbelastningsperioder kortlægges og (3) dimensionerede hastighed, så hastighedsvisningen på tavlerne tilpasses forholdene på den pågældende strækning. [Vejdirektoratet, 2018]

2) **Tavletekniske forudsætninger for projektering**
   I den efterfølgende fase skal der eksempelvis tages stilling til (1) de overordnede funktionskrav, heriblandt læsbarhed, relevans og troværdighed, (2) fastlæggelse af relevante visningstilstande og kriterier for skift mellem de tre driftsfaser, aktiv, hvile og ude af drift og (3) styringsformer, som tavlevisningen skal afhænge af. [Vejdirektoratet, 2018]

3) **Tavleteknisk projektering**
   I den tavletekniske projektering behandles de elementer som er knyttet til (1) design af tavlernes størrelse, skrift og symbolstørrelse, (2) placering af detektorer og detaljerede krav til udstyret og (3) krav til styringsalgoritmens drift. [Vejdirektoratet, 2018]

6.2.1 Styringsformer for variable vejtavler

Styringen af visningen på de variable vejtavler kan overordnet set være baseret på fem forskellige styringsformer, som har forskellige funktioner og kompleksitet, hvilket fremgår af Tabel 6.1.

Styringsform	Funktion
Manuel styring	Anvendes primært som varslingssystem i forbindelse med vejarbejde, uheld eller problematisk vejrforhold, hvor restriktioner skal pålægges trafikanters kørselsadfærd uafhængigt af detekteret belastningsgrad, gennemsnitshastighed, trafikintensitet eller lignende.
Tidsstyring	Styring til advarsels- eller forbudstavler.
Trafikstyring	Anvendes i tilfælde, hvor de variable tavlers hastighedsvisning skal ændres afhængigt af den pågældende trafiksituation, såsom trafikintensitet eller gennemsnitshastighed. Trafikstyring kræver, at de placerede detektorer registrerer trafiksituationen med høj præcision og yderligere definerer en udviklet styringsalgoritme visningen på tavlerne.
Mikroklimastyring	Anvendes, når de variable vejtavler skal vise budskab efter vejrforhold, som kan forårsage uheld på et vejnet. Detektorer på strækningen registrerer vejr, føre, sigtbarhed, temperatur og luftkvalitet, hvorefter en styringsalgoritme viser den anbefalede hastighed.
Kombinerede styringsformer	Kombination af de ovenstående styringsformer. Er den mest komplekse styringsform, som indebærer, at styringsalgoritmen udregner det optimale budskab på en tavle baseret på flere uafhængige kilder, som eksempelvis kombinationen af vejrforhold og trafikintensitet.

Tabel 6.1. De fem forskellige styringsformer. [Vejdirektoratet, 2018]

Som allerede beskrevet, har den teknologiske udvikling igennem det seneste årti skabt potentialet for, at kombinerede styringsformer ved hjælp af algoritmer kan optimere på trafikafviklingen. I følgende afsnit beskrives eksempler på styringsalgoritmer og systemer, som har til formål at optimere på trafikafviklingen og minimere risikoen for trafiksammenbrud.

6.2.2 Styringsalgoritmer til forbedring af trafikafvikling

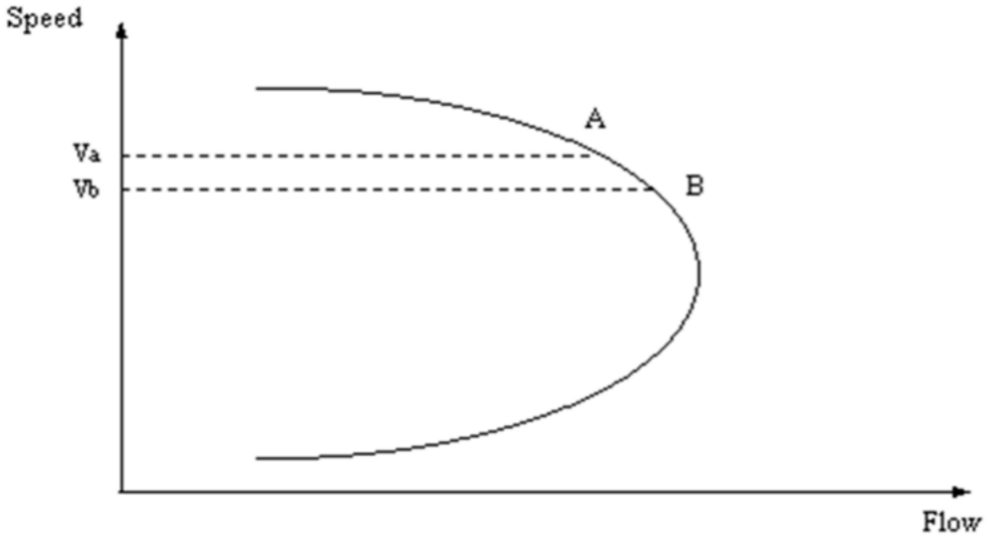
Der er udviklet en række forskellige styringsalgoritmer med henblik på optimering af trafikafvikling. Fælles for styringsalgoritmerne er, at de anvender realtids trafikdata til at definere tavlevisningen. [Vejdirektoratet, 2018]

Styringsalgoritmerne adskiller sig fra hinanden ved strategien for optimering af trafikafviklingen, som styringsalgoritmerne udvikles efter. Grundlæggende skelnes der mellem de to strategier, som enten (1) forebygger forekomsten af chokbølger (Traffic Breakdown Prevention Strategy) eller (2) harmoniserer hastigheden (Flow Homogenisation Strategy). [Lucky, Eng, 2014]

Strategien for forebyggelse af trafiksammenbrud sigter efter en udjævning af trafiktæthed på delstrækninger, hvor trafiktætheden stiger til et kritisk niveau, hvilket særligt er gældende for trafikale flaskehalse. Hvis der registreres en kritisk høj trafikintensitet, sænkes hastighedsvisningen på de variable tavler, så trafikintensiteten ved en flaskehals reduceres, hvilket forebygger chokbølger og trafiksammenbrud som konsekvens heraf. [Lucky, Eng, 2014]

Strategien for hastighedsharmonisering sigter efter at skabe en stabil trafikafvikling både i den enkelte vognbane og vognbanerne imellem. Hastighedsharmonisering reducerer variansen i trafikanternes hastigheder, og derved mindskes tendensen til pludselig acceleration og deceleration eller vognbaneskift, hvilket resulterer i lavere risiko for trafikale forstyrrelser og trafiksammenbrud som konsekvens heraf. [Lucky, Eng, 2014]

En teoretisk begrundelse for, hvordan en reduktion af hastigheder på en strækning kan optimere trafikafviklingen, ses af Figur 6.1.



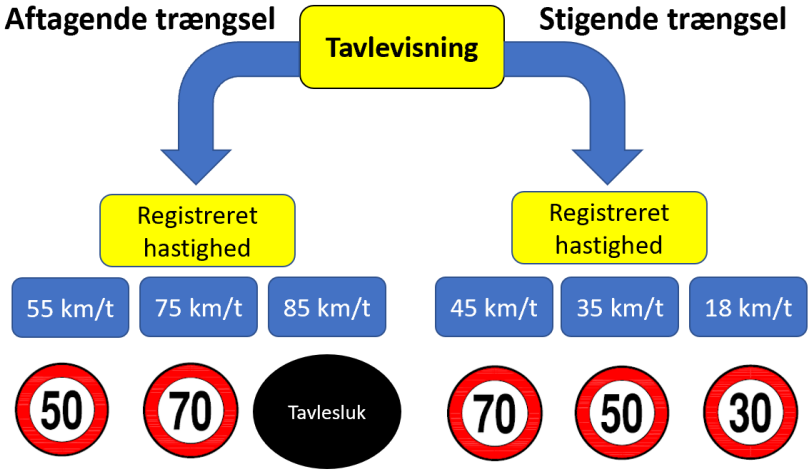
Figur 6.1. Teoretisk sammenhæng mellem hastigheden og trafikintensiteten. [Lucky, Eng, 2014]

Af figuren ses det, at en reduktion i hastigheden V_b kan optimere trafikafviklingen. [Lucky, Eng, 2014]

Eksempel på styringsalgoritmer

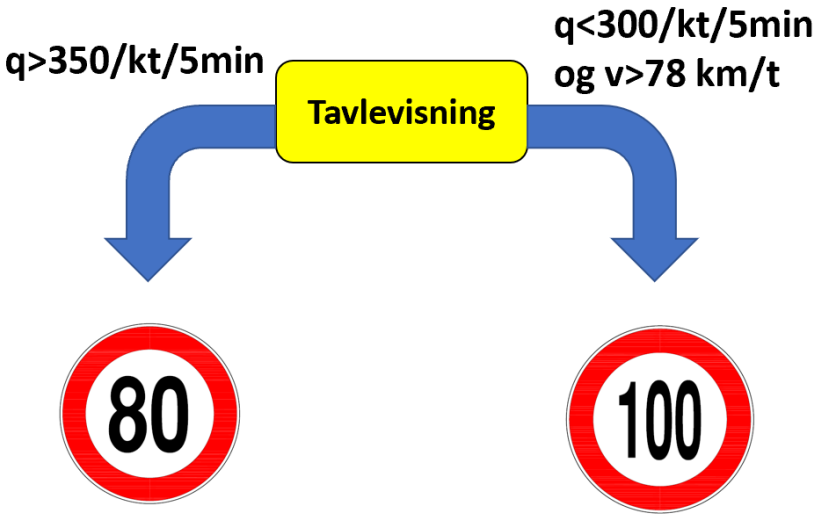
Et eksempel, på hvordan tre forskellige styringsalgoritmer kan udvikles med det formål at forbedre trafikafviklingen gennem hastighedsharmonisering ses ved et forsøg på motorvejsstrækningen E4-Södertälje-Stockholm fra 2013.

I det første forsøg var tavlevisning afhængig af en styringsalgoritme ved navn AID, der var baseret på en simpel registrering af hastighederne på strækningen. Tavlevisningen for styringsalgoritmen ses af Figur 6.2.



Figur 6.2. Første styringsalgoritme baseret på registrerede hastigheder. [Strömgren, Lind, 2016]

I andet forsøg var styringsalgoritmen baseret på en kombination af trafikintensitet (q) og hastighed (v) inden for et tidsrum på fem minutter, og tavlevisningernes betingelser fulgte følgende grænseværdi, som ses af Figur 6.3 [Strömgren, Lind, 2016]:



Figur 6.3. Anden styringsalgoritme, hvor også trafikintensitet definerede tavlevisning. [Strömgren, Lind, 2016]

I det tredje og sidste forsøg blev der anvendt en mere kompliceret styringsalgoritme til at hastighedsharmonisere, og denne var baseret på et forskningsstudie[1], der konkluderede, at variationen i den gennemsnitlige hastighed også kunne anvendes som en indikator for forstyrrelse i trafikken og dermed også til at forudse trafiksammenbrud. Følgende formel 6.1 blev af styringsalgoritmen anvendt til at beregne CVS (coefficient of variation) [Strömgren, Lind, 2016].

$$\mathrm{CVS} = \frac{\mathrm{SS}}{\mathrm{AS}} \tag{6.1}$$

[1] [M. et al., 2005]

Hvor:

CVS	Variationskoefficienten pr. 5. min.
SS	Standardafvigelsen for registrerede hastigheder pr. 5. min. [km/t]
AS	Gennemsnitshastigheden for registrerede hastigheder pr. 5. min. [km/t]

I tilfælde af at styringsalgoritmen beregnede en signifikant høj CVS, kunne det være en indikator for et forestående trafiksammenbrud. Blev en kritisk CVS registreret blev hastigheden sat ned på tavlerne. [Strömgren, Lind, 2016]

De tre eksempler illustrerer, hvordan styringsalgoritmer kan udvikles til at optimere på trafikafviklingen, og at de både kan variere i kompleksitet og kombinere flere forskellige trafikparametre i beregningen for optimal tavlevisning. I en efterfølgende undersøgelse af, hvordan en kombination af de tre hastighedsharmoniserende styringsalgoritmer kunne reducere den totale forsinkelse over en periode på to måneder, blev det konkluderet, at den totale forsinkelse kunne reduceres med 20% fra 3.384 timer til 2.685 timer. Effekten på 20% blev beregnet ud fra en teoretisk trafikmodel CALMAR, som fastlægger forsinkelse ud fra en række parametre såsom hastigheder, trafikintensitet og mængde af tunge køretøjer. Det markante fald i den totale forsinkelse skyldtes primært, at CVS-logikken var et effektiv middel til at udskyde trafiksammenbrud. [Strömgren, Lind, 2016]

6.3 Variable hastighedstavlers effekt på trafikafviklingen

I følgende afsnit gennemgås evalueringer af både nationale og internationale forsøg med at optimere på trafikafviklingen ved forskellige styringsalgoritmer.

6.3.1 Nationale feltundersøgelser

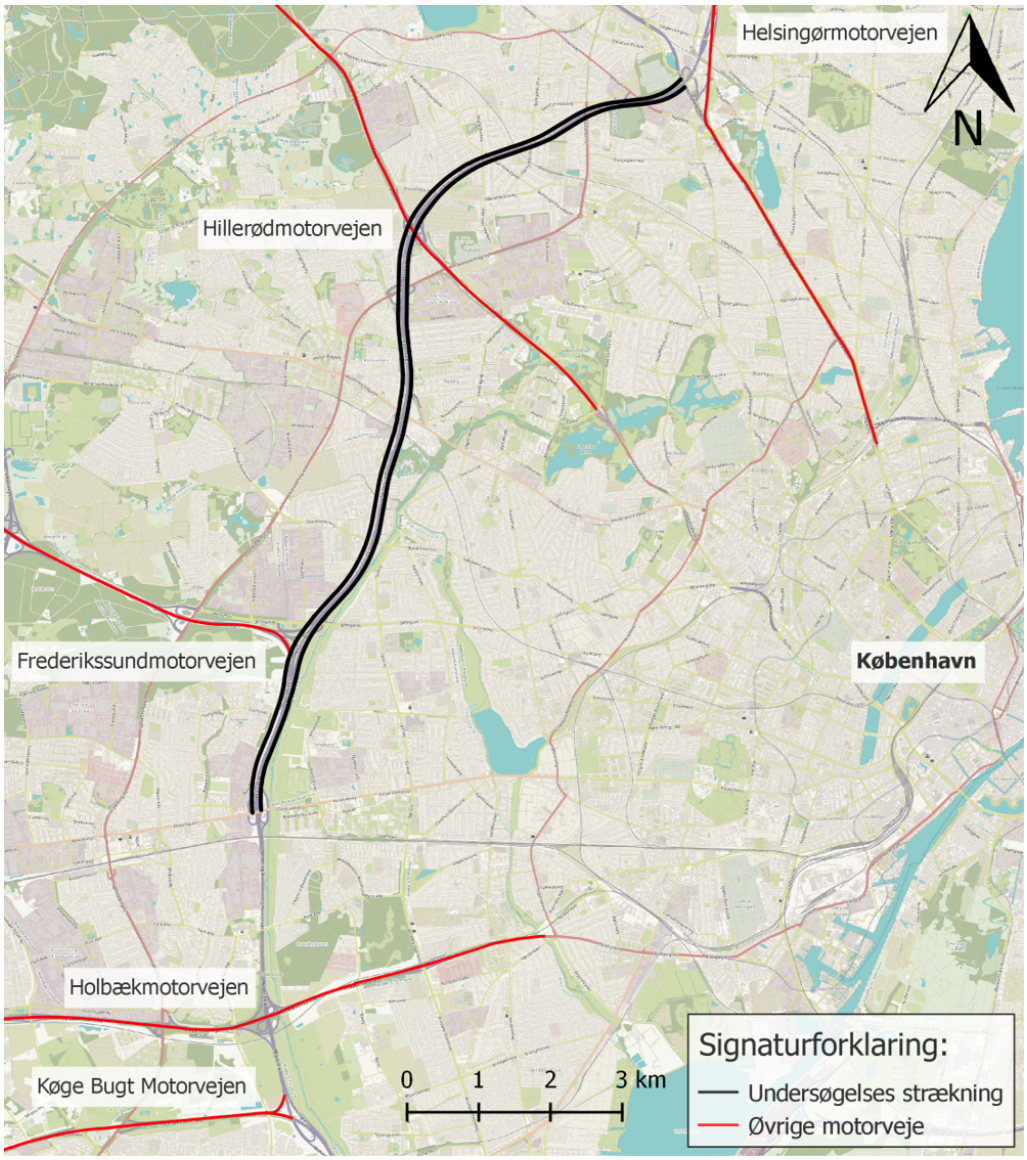
Motorring 3

For at få et bedre grundlag for vurdering af fremtidige investeringer i anlæg og drift af trafikledelsessystemer og på baggrund af, at der ikke tidligere er udarbejdet isolerede effektundersøgelser af variable hastighedstavler, gennemførte Vejdirektoratet i 2015 en evalueringsundersøgelse af trafikledelsessystemet på M3. Undersøgelsen ved M3 havde fokus de variable hastighedstavlers effekt på trafikafviklingen og trafiksikkerheden, men på grund af den relativ korte periode (0,5 år) med slukkede tavler var det ifølge rapporten ikke muligt at evaluere på trafiksikkerheden. [Rambøll, 2015]

For at evaluere på de variable hastighedstavlers effekt på trafikafviklingen, var det nødvendigt med en sammenlignelig periode, hvor tavlerne var aktiverede og derefter deaktiverede. Vejdirektoratet deaktiverede derfor det synlige anlæg i 2015 i en periode fra 15. februar til 15. august for at kunne sammenligne trafikafviklingen i den tilsvarende periode fra 2014. Under perioden med det deaktiverede synlige anlæg lod Vejdirektoratet resten af anlægget køre for at registrere trafikken og samle data, til behandling og efterfølgende evaluering. I perioden med slukkede tavler blev der monteret faste

hastighedstavler, der viste 110 km/t og 90 km/t, som anlægget normalt ville gøre i perioder uden trængsel. [Rambøll, 2015]

På grund af anlægsarbejde i forbindelse med København-Ringsted motorvejsstrækningen ved Holbækmotorvejen på M3 valgte Vejdirektoratet at afgrænse de trafikale analyser til strækningen nord for Roskildevej. Strækningen, som skulle være genstand for analysen, var derfor de 13 kilometer mellem Roskildevej i syd og Lyngby omfartsvej i nord, som fremgår af Figur 6.4. [Rambøll, 2015]

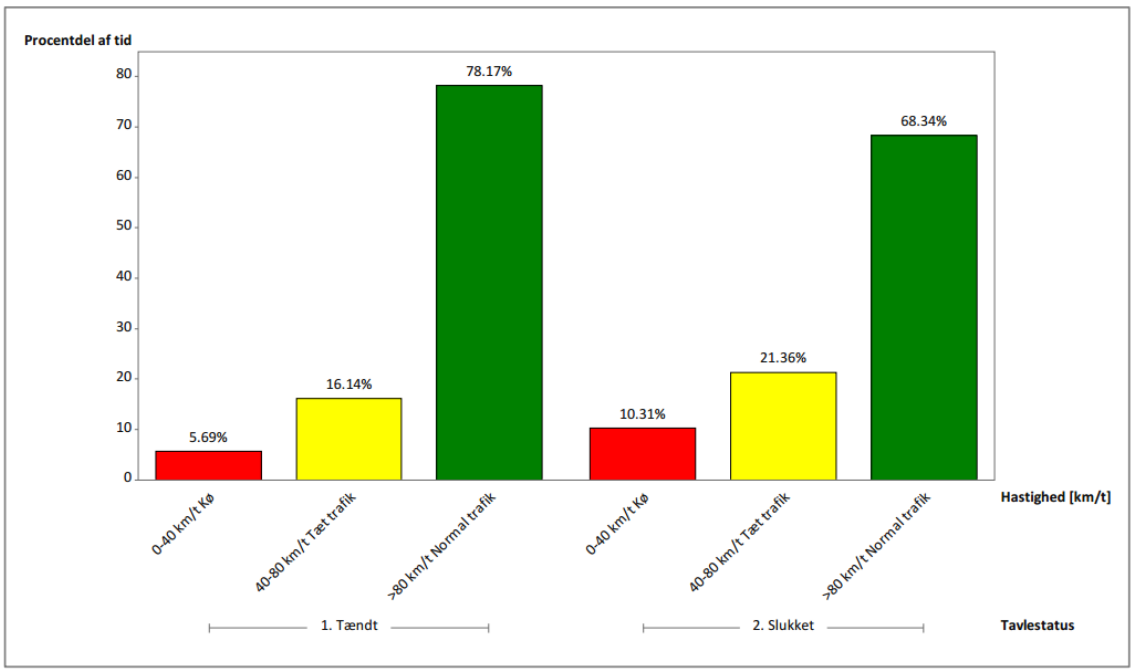


Figur 6.4. Analyse strækningen af M3. [Rambøll, 2015]

Ifølge den efterfølgende analyse af den indsamlede data var hovedkonklusionen, at tavlerne havde en positiv effekt på trafikafviklingen. I forhold til udnyttelse af vejens kapacitet viste analysen, at i perioden med aktiverede tavler blev der afviklet 1,4-1,9% mere trafik end i perioden med slukkede tavler. I rapporten skriver Vejdirektoratet dog, at i morgenmyldretiden i nordgående retning afvikles der 2,3% mere trafik med slukkede tavler, hvilket tilskrives en generel trafikvækst. [Rambøll, 2015]

Ifølge analysen reduceres rejsetiden med aktiverede tavler set over hele strækningen med 0,5-1,5 minut, hvor den største ændring ses i sydgående retning i eftermiddagsmyldretiden.

I analysen konkluderes det også, at afviklingen af trafikken skete ved højere hastigheder, når tavlerne var tændt, se Figur 6.5. [Rambøll, 2015]



Figur 6.5. Før og efter analyse af variable hastighedstavler, med procent fordeling af tiden i tre hastighedsintervaller i myldretiden. [Rambøll, 2015]

Af figuren fremgår det, at der var mindre kø med aktiverede tavler og at i kun 6% af myldretiden var hastigheden under 40 km/t, hvor imod det med slukkede tavler var cirka 10% af myldretiden. Analysen viste også, at med tændte tavler var perioden med frit flow (over 80 km/t) længere.

Limfjordstunnelen

I et afgangsspeciale udarbejdet af en studerende på Aalborg Universitet i 2019 behandles en trængselsanalyse af Limfjordstunnelen ved Aalborg, og her undersøges blandt andet effekten af de variable hastighedstavler. Der er benyttet tre typer data til analysen; Spoledata, data fra det variable tavlesystem samt Bluetoothdata. [Natascha Rigborg, 2019]

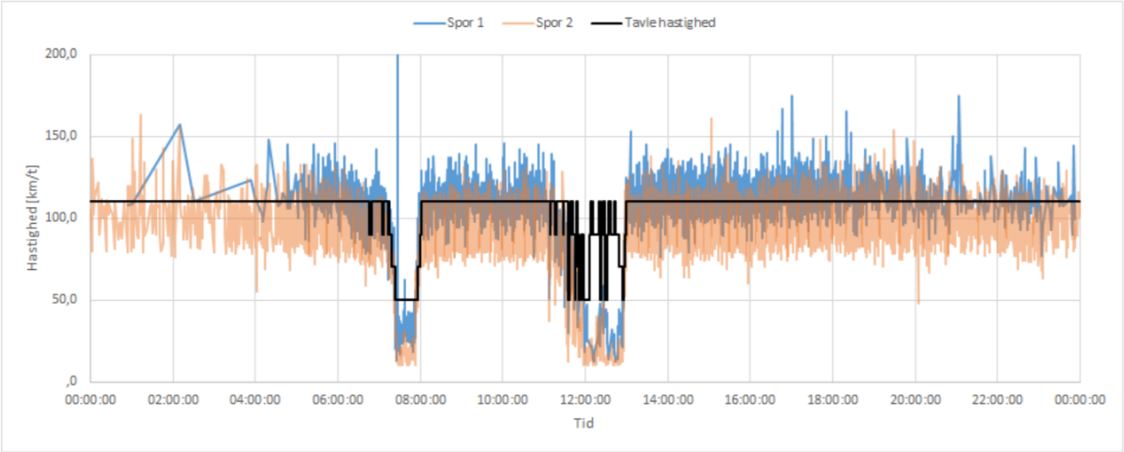
I analysen er der kun fokuseret på myldretidsperioder med risiko for trængsel og trafiksammenbrud. Strækningen, der analyseres, er mellem afkørsel 25 Humlebakken og afkørsel 20 Bouet, se Figur 6.6. [Natascha Rigborg, 2019]

Figur 6.6. Analyse strækningen ved Limfjordstunnelen. [Natascha Rigborg, 2019]

Tesen, som har dannet baggrund for undersøgelsen, var, at hastighedsvisningen på tavlerne var forsinket i forhold til den trafikale situation, og hastighedsvisningen blev først reduceret, når trafiksammenbruddet var forekommet. [Natascha Rigborg, 2019]

Først er der analyseret på data for at finde perioder, hvor det har været muligt at dokumentere et trafiksammenbrud på baggrund af tre-fase teorien. I perioder med trafiksammenbrud er der ved hjælp af data efterfølgende sammenholdt målte køretøjshastigheder med de viste hastigheder på de variable hastighedstavler. Dette er gjort med henblik på at kunne dokumentere, om der var en uoverensstemmelse mellem målte hastigheder og de viste hastigheder, da disse teoretisk set gerne skulle ligge tæt på hinanden. [Natascha Rigborg, 2019]

Analysen viser, at der i flere tilfælde er stor variation imellem de viste hastigheder og de kørte hastigheder. Se Figur 6.7. [Natascha Rigborg, 2019]



Figur 6.7. Forskel mellem viste og kørte hastigheder. [Natascha Rigborg, 2019]

På figuren ses det, at der i trængselsperioden i perioden kl. 11:00-13:00, er stor variation mellem den kørte og den viste hastighed. I en periode har den målte hastighed været under 50 km/t mens den viste hastighed har varieret mellem 50 km/t og 110 km/t, hvor den viste hastighed under hele perioden ikke burde have vist mere end 50 km/t. [Natascha Rigborg, 2019]

Yderligere påpeges den samme tendens i analysen vedrørende uoverensstemmelsen mellem den kørte og viste hastighed om natten, da det har vist sig at tavlerne ofte viser en lav hastighed i periode uden trængsel, som kan forklares ved en fejl i styringsalgoritmerne. Systemet forsøger hele tiden at harmonisere trafikanternes hastighed og dermed kan der opstå fejl, hvis en del af nattrafikken er langsomt kørende godstransport (80 km/t). [Natascha Rigborg, 2019]

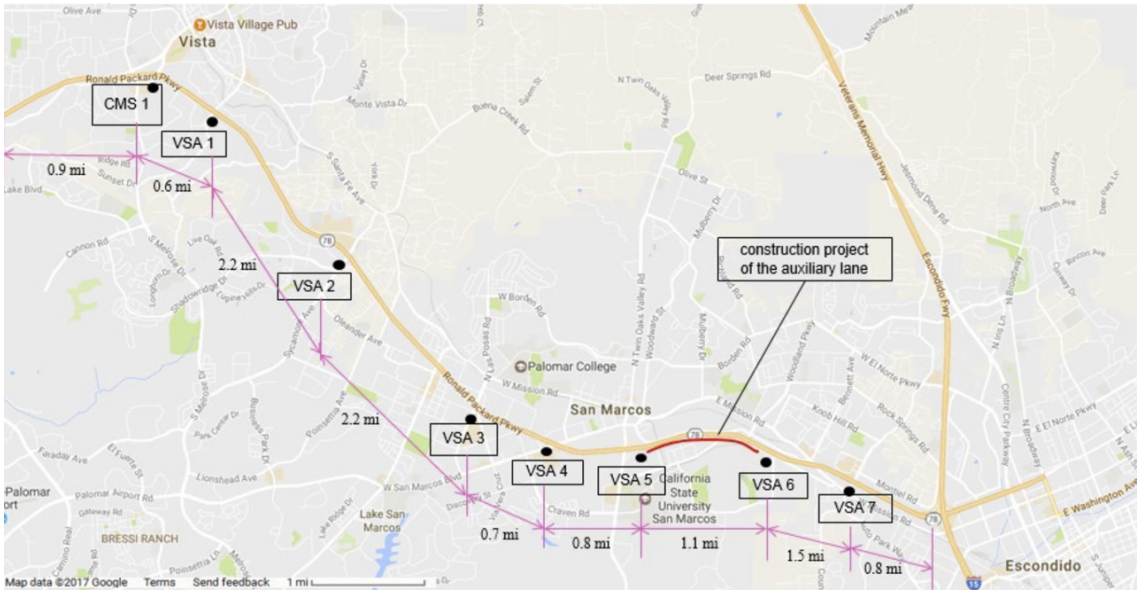
I analysen har det ikke været muligt af bekræfte tesen om, at de variable hastighedstavler først sætter hastigheden ned efter trafiksammenbruddet er indtruffet. Der peges dog specielt på et problem i, at de viste hastigheder følger de kørte hastigheder, hvor de i tilfælde af trafiksammenbrud burde sænke den viste hastighed inden trafiksammenbruddet indtræffer. Derfor konkluderes det i analysen, at der bør ændres i styringsalgoritmen for de variable hastighedstavler, så det ikke kun er registrerede hastigheder men også trafikintensiteten og særligt trafiktætheden, der er en styrende parameter for tavlevisningen. [Natascha Rigborg, 2019]

6.3.2 Internationale feltundersøgelser

Californien

I Californien er der udført et forsøg med midlertidige variable rådgivende hastighedstavler på motorvejsstrækningen state route 78 highway. På denne strækning er der flere trafikale flaskehalse i østgående retning. Holdet bag forsøget har i en periode forud for forsøget indsamlet data med radarer og sensorer på strækningen for at have data for trafikafviklingen i en periode hvor variable hastighedstavler ikke var etableret. Efterfølgende blev der sat et midlertidigt hastighedsharmoniseringsanlæg op på strækningen i form af forbundne

mobile LED-tavler. Teststrækningen blev inddelt i syv sektioner og fremgår af Figur 6.8. [Lu et al., 2019]



Figur 6.8. Test strækning i Californien. [Lu et al., 2019]

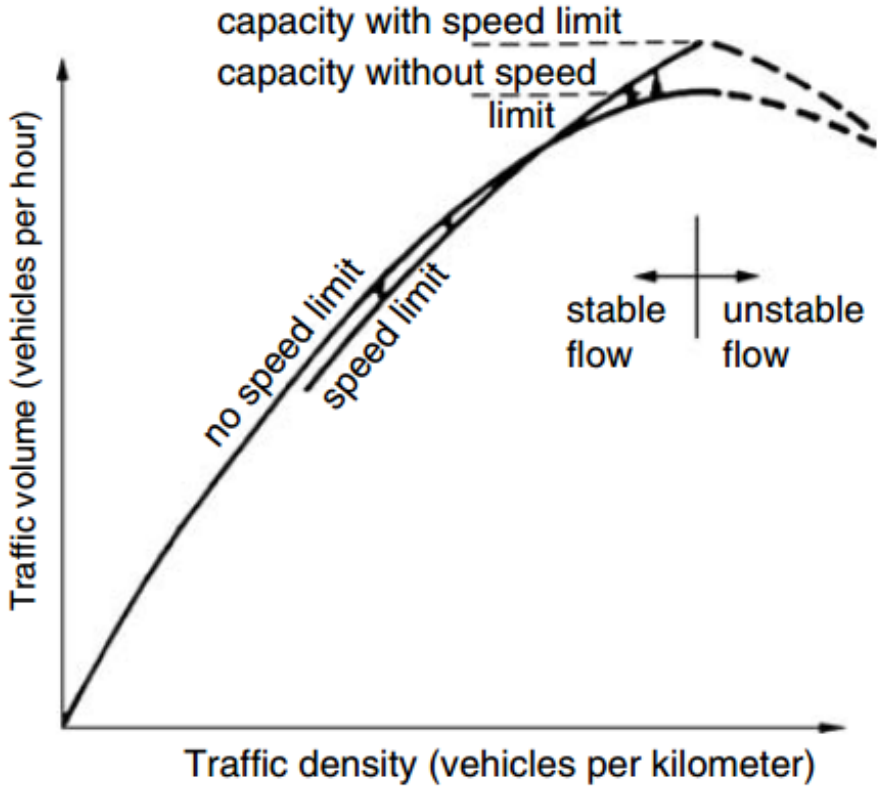
Styringsalgoritmen for hastighedsharmoniseringsanlægget adskilte sig fra tidligere afprøvede algoritmer for hastighedsstyring på motorveje og blev kaldet Backwards-progressive, throughput-maximization algorithm. Den grundlæggende ide bag styringsalgoritmen var at maksimere trafikafviklingen fra den fjerneste trafikale flaskehals nedstrøms til flaskehalsen opstrøms, hvor alle de berørte sektioner dækkes gradvist. For hver af de syv sektioner bestemmes den ønskede rådgivende hastighedsvisning baseret på trafikintensiteten målt på to til tre sektioner nedstrøms umiddelbart efter snittet, hvor de enkelte hastighedstavler var placeret. Den rådgivende hastighed beregnes herefter som den indkørende trafikintensitet som er tæt på eller lige under den gennemsnitlige kapacitet for disse nedstrømssektioner. Denne tilgang til styringsalgoritmens design er valgt på baggrund af enkeltheden i implementeringen og er forud for forsøget testet i en simuleringsmodel. [Lu et al., 2019]

På baggrund af data sammenligningen for trafikafviklingen i de to perioder var konklusionen, at der i perioden med de variable hastighedstavler var en dokumenterbar forbedring på en række parametre. I myldretidsperioden fra kl. 07:00-09:00 er tilbagelagte køretøjskilometer steget med 2,7%. Yderligere er rejsetiden reduceret med 6,3% og gennemsnitshastigheden er steget med 8,9% over strækningen. [Lu et al., 2019]

Europæisk motorvej

På en tresporet motorvej i Europa blev der indsamlet data for trafikafviklingen for maj-oktober 2005 uden variable hastighedstavler og januar-maj 2006 med variable hastighedstavler. Den viste hastighed på tavlerne blev beregnet af styringsalgoritmen ud fra de registrerede hastigheder og trafikintensiteter. På strækningen blev der placeret detektorer for hver 500 meter, der registrerede information om trafikintensiteten og hastigheden. [Papageorgiou et al., 2008]

Resultatet viser, at implementeringen af variable hastighedstavler på motorvejsstrækningen resulterede i en hastighedsharmonisering, som betød, at der forekom en mere stabil trafikafviklingen ved højere trafikintensitet sammenlignet med situationen uden variable hastighedstavler, se Figur 6.9. [Papageorgiou et al., 2008]



Figur 6.9. Sammenhængen mellem trafikintensiteten og trafiktætheden i de to situationer med og uden variable hastighedstavler. [Papageorgiou et al., 2008]

Resultaterne viser, at en hastighedsgrænse på 80 km/t resulterer i den optimale trafikafvikling. Hastighedsgrænsen på 100 km/t havde en moderat påvirkning, hvor hastighedsgrænsen på 60 km/t kan bruges ved høje trafikintensiteter for at øge trafiksikkerheden på bekostning af trafikafviklingen. [Papageorgiou et al., 2008]

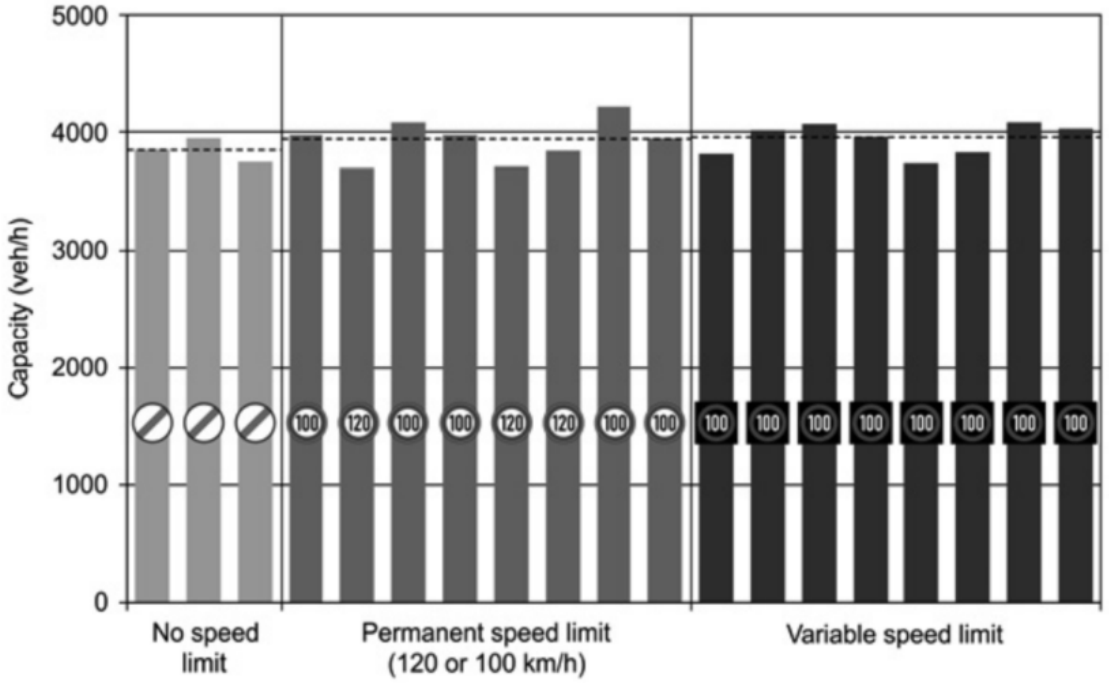
Tyskland

I Tyskland er der foretaget en undersøgelse af 50 motorvejsstrækninger, for at bestemme kapacitetseffekten af variable hastighedstavler. Undersøgelsen inkluderer både to- og tresporede motorveje og for at vurderer de variable tavlers effekt, skelnes der mellem tre hovedgrupper, henholdsvis strækninger med faste hastighedstavler, strækninger med variable hastighedstavler og strækninger uden hastighedsvisning. [Geistefeldt, 2011]

I undersøgelsen kan det overordnet set konkluderes, at variable hastighedstavler på motorvejsstrækningerne har en positiv effekt på kapaciteten og at de variable hastighedstavler reducerer risikoen for trafiksammenbrud. Dette kan udledes af tre forskellige del-analyser: den gennemsnitlige kapacitet, variationskoefficienten for den estimerede kapacitet og serviceniveauet. [Geistefeldt, 2011]

- **1) Den gennemsnitlige kapacitet**

I undersøgelsen fastlægges kapaciteten for de tosporede motorvejsstrækninger via et speed-flow diagram, og heraf kan det konkluderes at de tosporede motorvejsstrækninger med variable hastighedstavler - i gennemsnit - har højere kapacitet end motorvejsstrækningerne uden hastighedstavler og motorvejsstrækningerne med faste hastighedstavler. Resultatet fremgår af Figur 6.10.



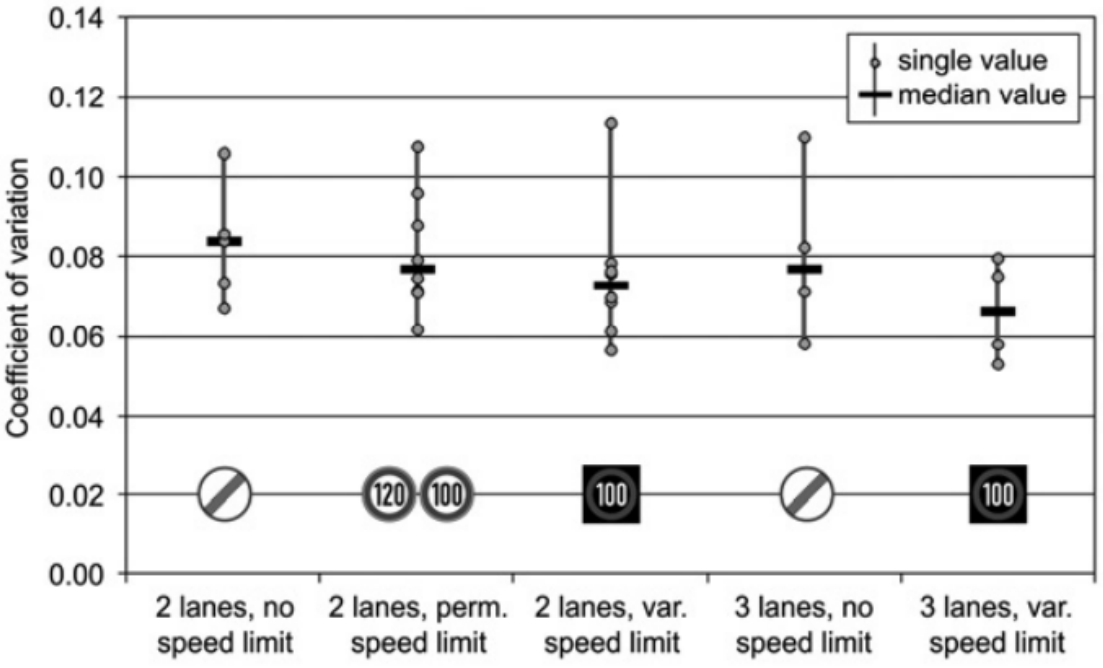
Figur 6.10. Kapaciteterne for tosporede motorvejsstrækninger, i de tre hovedgrupper: uden hastighedsvisning, faste hastighedstavler og variable hastighedstavler. Gennemsnitskapaciteten for de tre hovedgrupper fremgår af den stiplede linje. [Geistefeldt, 2011]

Det fremgår af figuren, at kapaciteterne på de tosporede motorvejsstrækninger svinger mellem 3.700-4.200 kt/t, og at den gennemsnitlige kapacitet for variable hastighedstavler er marginalt højere end faste hastighedstavler og væsentlig højere end kapaciteten for motorvejsstrækningerne uden hastighedstavler. [Geistefeldt, 2011]

- **2) Variationskoefficienten for den estimerede kapacitet**

I undersøgelsen vurderes risikoen for et trafiksammenbrud ved variationskoefficienten. Variationskoefficienten fastlægger, hvor meget den estimerede kapacitet på den enkelte motorvejsstrækning varierer i forhold til den gennemsnitlige kapacitet for motorvejsstrækningerne i samme hovedgruppe. En høj variationskoefficient angiver, at der er en øget risiko

for et trafiksammenbrud ved en trafikintensitet tæt på eller lige under den gennemsnitlige kapacitet [Geistefeldt, 2011]. Figur 6.11 viser variationskoefficienten af den estimerede kapacitetsfordeling på 29 ud af de 50 motorvejsstrækninger tæt på byområder med to- og tresporede strækninger.



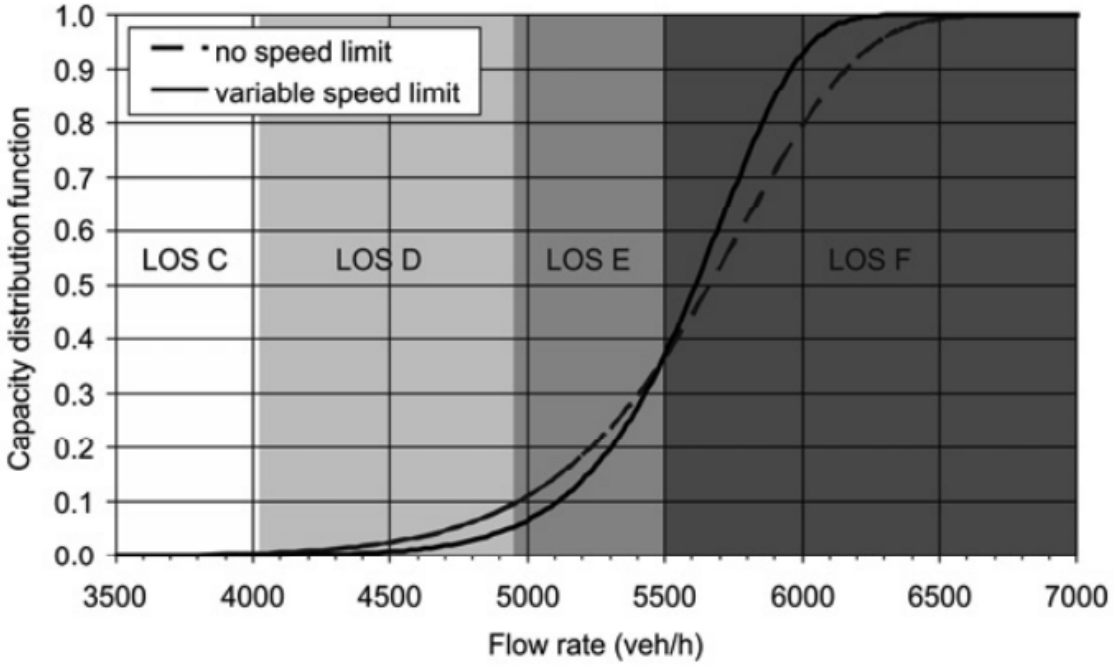
Figur 6.11. Variationskoefficienterne af den estimerede kapacitetsfordelingsfunktion for to og tresporede motorvej med forskellig hastighedskontrol. [Geistefeldt, 2011]

De lodrette linjer viser intervallet for variationskoefficienterne, den vandrette linje viser medianen og hver prik repræsenterer en motorvejsstrækning. Y-aksen viser variationen i kapaciteten, når trafiksammenbruddet forekommer i forhold til den gennemsnitlige kapacitet i hver hovedgruppe.

Af figuren fremgår det, at medianen af variationen i kapacitetsfordelingen er lavere både ved to- og tresporede motorvejsstrækninger med variable hastighedstavler sammenlignet med de andre grupper. Yderligere fremgår det også, at der er en outlier for tosporede vognbaner med variable hastighedstavler, der medfører, at denne kategori har den største variationskoefficient. [Geistefeldt, 2011]

- **3) Serviceniveau**

Serviceniveauet bestemmes ud fra trafikintensiteten i forhold til kapaciteten på strækningen. I undersøgelsen er serviceniveauet bestemt for tresporede strækninger med og uden variable hastighedstavler, se Figur 6.12. [Geistefeldt, 2011]



Figur 6.12. Serviceniveauet for tresporede motorvejsstrækninger med og uden variable hastighedstavler. [Geistefeldt, 2011]

På figurens y-akse ses kapacitetsfordelingsfunktionen, som er sandsynligheden for trafiksammenbrud, og x-aksen er trafikintensiteten pr. time. Som et eksempel kan det observeres, at der ved en trafikintensitet på 5.500 kt/t er en sandsynlighed for trafiksammenbrud på 38% for strækningerne med og uden variable hastighedstavler. Ud fra figuren kan det konkluderes, at variable hastighedstavler reducerer sandsynligheden for trafiksammenbrud på tresporede strækninger, når trafikintensiteten på strækningen er under 5.500 kt/t. Når trafikintensiteten stiger til mere end 5.500 kt/t har de variable hastighedstavler ikke nogen effekt på trafikafviklingen. Dette skyldes, at trafiktætheden er så høj, at trafikanter ikke længere kører efter den skiltede hastighed men i stedet følger den øvrige trafik. [Geistefeldt, 2011]

Canada

I byen Edmonton, Canada, er der foretaget undersøgelser omkring uheldsrisikoen og trængsel på en 11 kilometer bymotorvejsstrækning med og uden variable hastighedstavler. Da der i dette litteraturstudie undersøges for effekten, som variable hastighedstavler har på trafikafviklingen, vil undersøgelsen for uheldsrisikoen ikke blive benævnt yderligere. Bymotorvejen har på den udvalgte strækning en ÅDT på 100.000 kt/dag og har en hastighedsgrænse uden for trængselsperioden på 80 km/t. [Cheng et al., 2018]

På motorvejsstrækningen er der placeret ni detektorer, syv videokameraer og fire variable hastighedstavler. De variable hastighedstavler er placeret ved til- og frakørselsramperne samt i kurver, da det er disse steder, hvor muligheden for trafiksammenbrud på strækningen er størst. Detektorerne og kameraerne registrerer trafikintensitet og hastighed, hvert 20

sekund for hvert spor og det er disse data der ved hjælp af styringsalgoritmen angiver den viste hastighedsgrænse. Data til dette studie blev indsamlet i august 2015, hvor de variable hastighedstavler var aktiverede i otte dage og deaktiverede i to dage. [Cheng et al., 2018]

Hvorvidt variable hastighedstavler har haft en effekt på trængslen, vurderes ud fra de registrerede trafikintensiteter og hastigheder. Trængslen blev bestemt i ni stationspunkter. Resultaterne viser, at trængslen bliver reduceret, når de variable hastighedstavler er aktiverede, og at antallet af gennemstrømmende trafikanter er øget med 17-30,3%. I et af stationspunkterne, der er placeret i det højeste risikoområde for uheld og hvor hastigheden uden variable hastighedstavler var under 70 km/t, er hastigheden blevet øget med 21% ved at implementere variable hastighedstavler. [Cheng et al., 2018]

Frankrig og Australien

Dette studie undersøger effekten af variable hastighedstavler på en motorvejsstrækning i Frankrig samt effekten af faste hastighedsgrænser på en motorvejsstrækning i Australien. Dette gøres for at undersøge, hvilken effekt variable hastighedstavler har og om denne effekt er forskellig fra effekten for en fast nedsættelse af hastigheden. [Lucky, Eng, 2014]

Motorvejsstrækningen i Frankrig har tre spor i hver retning, hastigheden under frit flow er på 130 km/t og strækningen har en trafikintensitet på cirka 160.000 kt/dag. Data til undersøgelsen blev indsamlet ved hjælp af detektorer over en tidshorisont på 50 dage fra juli til september i 2007. Der er indsamlet individuelle køretøjsdata om klokkeslæt, dato, hastighed, hastighedsgrænse, længden på køretøjer samt køretøjstype. Data blev herefter brugt til at foretage undersøgelser på dage, hvor variable hastighedstavler var aktiverede og deaktiverede. Det fremgår ikke af undersøgelsen, hvilken styringsalgoritme der ligger til grund for den viste hastighedsgrænse. [Lucky, Eng, 2014]

Motorvejsstrækningen i Australien er delt op i to lokationer begge med tre spor i hver retning og en fast hastighedsgrænse på henholdsvis 100 km/t og 80 km/t. Den ene strækning har to afkørselsramper og to påkørselsramper, hvor den anden strækning ikke har nogle ramper. Stækningerne har en trafikintensitet på op imod 130.000 kt/dag. Data til undersøgelsen blev indsamlet over en tidshorisont på ni dage fra den 18. juli til den 27. juli. Der blev indsamlet individuelle køretøjsdata omkring klokkeslæt, dato, hastighed samt trafiktæthed. [Lucky, Eng, 2014]

Resultaterne for undersøgelsen er vist i Tabel 6.2.

Funktion	Variable hastighedstavler	Faste hastighedstavler
Variation i hastigheden mellem sporene	Reducere variansen mellem alle spor.	Større varians mellem sporene ved højere hastighedsgrænse.
Headway	Giver ikke en mere ensartet headway-fordeling.	Ved lavere hastighedsgrænsen bliver headway-fordelingen mindre ensartet.
Variation i hastigheden med en headway på et sekund	Reduceringen af variationen i hastigheden er gældende for en trafikintensitet lavere end 200 kt/t, hvor der ved højere trafikintensitet er en mindre reduceringen af variationen i hastigheden.	Ingen resultater der viser, at variationen i hastigheden er blevet reduceret.

Tabel 6.2. Resultaterne for undersøgelsen i forhold til variable og faste hastighedstavler. [Lucky, Eng, 2014]

Det fremgår af undersøgelsen for variable hastighedstavler, at trafikafviklingen er højere ved aktiverede variable hastighedstavler end ved deaktiverede variable hastighedstavler. Ydermere viser resultaterne også, at minimumshastigheden er højere under trængselsperioden, når de variable hastighedstavler er aktiverede. Minimumshastigheden for trafikanterne, når de variable hastighedstavler er aktiverede, ligger på cirka 30 km/t, hvorimod trafikanternes minimumshastighed under deaktiverede variable hastighedstavler er på 10 km/t. Maksimumshastigheden for trafikanterne, når de variable hastighedstavler er aktiverede, var i trængselsperioden på 100 km/t, hvorimod maksimumshastigheden for trafikanterne er på 80 km/t i perioden med deaktiverede variable hastighedstavler. [Lucky, Eng, 2014]

En central problematik, som der fremhæves i undersøgelsen, er, at graden af "rate-of-compliance", altså overholdelse af de viste hastigheder på tavlerne ikke efterleves af trafikanterne. En afgørende faktor for, at de variable hastighedstavler virker efter hensigten, er derfor, at trafikanter overholder de viste hastigheder, således at der opstår en harmonisering af hastigheder. [Lucky, Eng, 2014]

Opsummering af feltstudierne

I Tabel 6.3 fremgår resultaterne fra feltstudierne med variable hastighedstavler opdelt i de forskellige lande.

Lokation af studierne	**Effekt af variable hastighedstavler**
Danmark	▶ 1,4-1,9% flere gennemstrømmende køretøjer ved M3. ▶ 2,3% flere gennemstrømmende køretøjer i morgenmyldretiden i nordgående retning med deaktiverede hastighedstavler ved M3. ▶ 0,5-1,5 minutters reduktion i rejsetiden ved M3. ▶ I 6% af morgenmyldretiden var hastigheden under 40 km/t med variable hastighedstavler modsat 10% med deaktiverede hastighedstavler ved M3. ▶ Undersøgelse ved Limfjordstunnelen fremhæver at styringsalgoritmen ikke kun skal være baseret på detektering af hastigheden, men også trafiktætheden og trafikintensiteten.
Californien	▶ 2,7% stigning i køretøjskilometer i morgenspidstimerne. ▶ 6,3% reduktion i rejsetiden. ▶ 8,9% stigning i gennemsnitshastigheden.
Europæisk motorvej	▶ Hastighedsgrænse på 100 km/t havde en moderat påvirkning på trafikafviklingen. ▶ En hastighedsgrænse på 80 km/t gav den højeste trafikafvikling. ▶ En hastighedsgrænse på 60 km/t øger trafiksikkerheden på bekostning af antallet af trafikanter der bliver afviklet.
Tyskland	▶ Gennemsnitskapaciteten af tosporede motorveje er højere med variable hastighedstavler end ved faste og ingen hastighedstavler. ▶ Signifikant reduktion i middel koefficienten af variationen i kapaciteten med variable hastighedstavler i forhold til permanente og ingen hastighedstavler. ▶ Variable hastighedstavler reducerer risikoen for trafiksammenbrud ved trafikintensitet på under 5.500 kt/t på tosporede motorveje. Ved højere trafikintensitet end 5.500 kt/t har variable hastighedstavler ingen effekt.
Canada	▶ 17-30,3% forbedring i trafikafviklingen. ▶ 21% forøgelse i hastigheden i stationspunktet med højrisikoområde.
Frankrig og Australien	▶ Trafikafviklingen er forbedret. ▶ Minimums- og maksimumshastighedsgrænsen under trængselsperioden er forøget med 20 km/t. ▶ Reduktion af variationen i hastigheden mellem sporene. ▶ Headway fordelingen er ikke blevet mere ensartet. ▶ Reduktion af variationen i hastighed for hvert køretøj der kører med en headway på et sekund.

Tabel 6.3. Opsamling af effekterne ved variable hastighedstavler i feltstudierne.

6.3.3 Simuleringsundersøgelser

Simuleringsprogrammer bruges til at undersøge trafiktekniske hypoteser og løsninger i en model, som ville være yderst tidskrævende og omkostningsfulde, hvis de skulle testes i den virkelige verden.

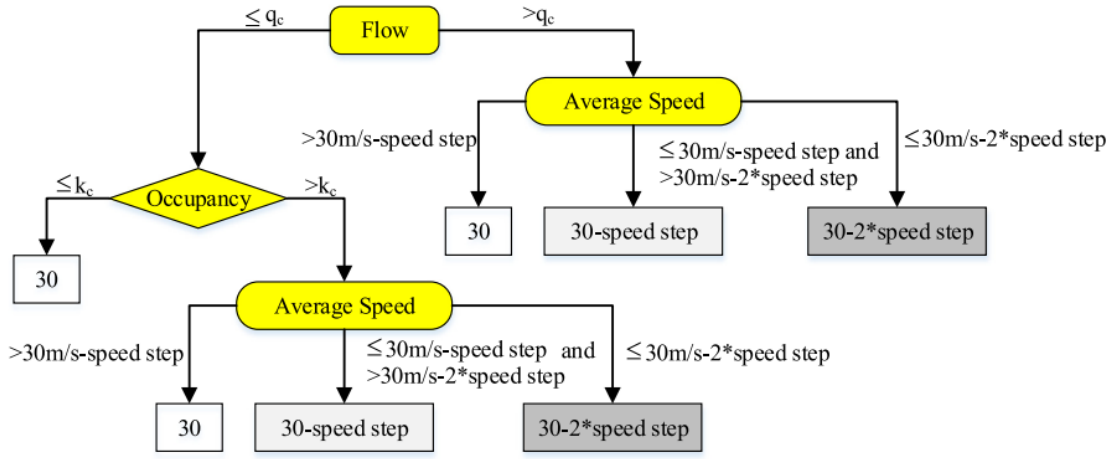
Fiktiv strækning

Simuleringsmodellen i dette studie er opbygget som en 4 kilometer lang fiktiv og ensrettet strækning. I modellen er der 16 variable hastighedstavler placeret med en afstand på 250 meter. Ydermere er der placeret detektorer samme sted som de variable hastighedstavler. Disse detektorer registrerer og videre giver information om trafikken. [Yang et al., 2018]

Denne undersøgelse tager udgangspunkt i en simuleringsmodel, der indeholder en car-following model og en styringsalgoritme for de variable hastighedstavler. [Yang et al., 2018]

Car-following modellen tager udgangspunkt i Kerners tre-fase teori, og bruges til at simulere trafikken i de tre faser og overgangen mellem faserne. De tre faser er henholdsvis frit flow, synkroniseret flow, samt bevægelig kø [Yang et al., 2018]. Teorien om Kerners tre-fase teori uddybes i kapitel 5.

Styringsalgoritmen for de variable hastighedstavler følger Figur 6.13.



Figur 6.13. Variable hastighedstavlernes styringsalgoritme. [Yang et al., 2018]

På figuren fremgår det, at den anviste hastighedsgrænse afhænger af trafikintensiteten, belastningsgraden og gennemsnitshastigheden. Det første algoritmen undersøger er om trafikintensiteten er lavere eller højere end den kritiske trafikintensitet (q_c) der er på 2.060 kt/t. Hvis trafikintensiteten er lavere eller lig med q_c følger algoritmen den vestre sti i flowdiagrammet, hvor den første parametre er belastningsgraden. Det fremgår ikke af undersøgelsen, hvordan belastningsgraden bliver bestemt, men det antages at der ses på forholdet imellem trafikintensiteten og kapaciteten på analysestrækningen. Hvis belastningsgraden er lavere eller lig med den kritiske belastningsgrad (k_c) på 18% sættes den viste hastighedsgrænse til 30 m/s (108 km/t), men er belastning derimod højere end k_c undersøges den gennemsnitlige hastighed på strækningen. På figuren fremgår tre formler under den gennemsnitlige hastighed, der undersøger, hvilken hastighedsgrænse tavlerne skal vise. I formlerne fremgår begrebet speed step der i denne undersøgelse sættes til 11,11 m/s, dermed kan hastighedsvisningen på tavlerne vise henholdsvis 108 km/t, 68 km/t og 28 km/t. Højre side af flowdiagrammet på figuren benyttes, hvis trafikintensiteten er højere

end q_c, hvor den viste hastighedsgrænse undersøges på samme måde som forklaret under gennemsnitlige hastighed. [Yang et al., 2018]

Konklusionen af undersøgelsen er, at variable hastighedstavler i simuleringen ikke kan forbedre trafikafviklingen i spidstimen eller forhindre, at der sker et spring fra frit flow til synkroniseret flow. Dog er det muligt ved brug af de variable hastighedstavler at forbedre flowraten under trængselsperioden og udskyde forekomsten af springet fra synkroniseret flow til bevægelig kø. Dette skyldes, at der implementeres hastighedsharmonisering, hvorved der sker en reducering af variationen i hastigheden mellem trafikanterne. Ydermere sker der en forbedring af flowraten, trafiksikkerheden og i stop og kør adfærden grundet hastighedsharmonisering. [Yang et al., 2018]

En svaghed ved undersøgelsen er at der tages udgangspunkt i car-following princippet, hvor modellen burde tage højde for, at trafikanterne har mulighed for at skifte vognbane. [Yang et al., 2018]

USA

I USA er der foretaget flere simuleringsundersøgelser omhandlende variable hastighedstavler. I dette litteraturstudie vil der blive fremhævet to undersøgelser henholdsvis en i Atlanta og en i Texas. Formålet med begge undersøgelser er at forbedre trafikafviklingen ved hjælp af variable hastighedstavler. Modellen til simuleringsundersøgelserne er baseret på realtids trafikdata fra detektorer, der er placeret på de forskellige motorvejsstrækninger. Modellerne er kalibreret ud fra trafikanternes adfærd og valideret efter det indsamlede data. De parameter der bliver kalibreret efter, er inddelt i tre kategorier: kapaciteten, vognbaneskift og trafikanternes adfærd, hvor modellerne er valideret ved at sammenligne hastigheden for det indsamlede data med hastigheden for simuleringsmodellen. [Vadde et al., 2012; Laval et al., 2014]

Styringsalgoritmen bag den viste variable hastighedsgrænse bliver for undersøgelsen i Atlanta baseret på detekterede hastigheder der bliver indsamlet hvert 20 sekund og herudfra bliver den gennemsnitlige hastighed beregnet i hvert detektorsnit [Laval et al., 2014]. For undersøgelsen i Texas bliver det viste hastighedsgrænse bestemt ud fra den detekteret trafikintensitet for hvert spor [Vadde et al., 2012].

Resultatet for mikrosimuleringsundersøgelsen i Atlanta, viser en negativ effekt med en forøgelse af den totale rejsetid på 7% fremfor scenariet med fri hastighed [Laval et al., 2014]. Det samme er gældende for mikrosimuleringsundersøgelsen i Texas, hvor det fremgår at rejsetiden er forøget med 6% [Vadde et al., 2012].

Opsummering af simulerings studierne

I Tabel 6.4 fremgår resultaterne fra simuleringsstudierne med variable hastighedstavler opdelt i de forskellige lande.

Lokation af studierne	Effekt af variable hastighedstavler
Fiktiv strækning	► Variable hastighedstavler kan ikke forbedre flow raten i spidstimen eller forhindre, at der sker et spring fra frit flow til synkroniseret flow. ► Variable hastighedstavler kan forbedre flow raten under trængselsperioden og udskyde forekomsten af springet fra synkroniseret flow til bevægelig kø.
USA	► 7% forøgelse i rejsetid ved mikrosimuleringsundersøgelse baseret på detekteret hastigheder i Atlanta. ► 6% forøgelse i rejsetiden ved mikrosimuleringsundersøgelse baseret på trafikintensiteten i Texas.

Tabel 6.4. Opsamling af effekterne ved variable hastighedstavler i simuleringsstudierne.

6.3.4 Forudsigelses mikrosimulerings undersøgelse

Fiktiv strækning

Denne undersøgelse har fokus på, hvorvidt anvendelsen af en forudsigelsesmodel baseret på makroskopiske trafikafviklingsmodel kan forbedre trafikafviklingen ved implementering af variable hastighedstavler. [Yang et al., 2013]

For at bestemme det gennemstrømmende antal af trafikanter er analysestrækningen inklusive ramperne inddelt i ni delstrækninger hvor middelhastigheden, trafiktæthed og kapaciteten bliver bestemt. Hastighedsgrænsen bliver opdateret i et tidsinterval på 20 sekunder og bliver bestemt ud fra den detekterede gennemsnitshastighed samt trafiktætheden på delstrækningerne. Den optimale hastighedsgrænse, der vises, er justeret efter, at trafikanterne ikke altid følger den viste hastighedsgrænse. Dette gøres ved, at den optimerede og viste hastighedsgrænse bliver justeret efter den detekterede hastighed over den forrige kontrolperiode. Dette er også angivet som forudsigelsesmodellen. [Yang et al., 2013]

I dette studie anvendes VISSIM som et værktøj til at evaluere forudsigelsesmodellen. Under simuleringen indsamler programmet data om trafikanternes hastighed og trafikintensitet i realtid og herudfra justeres den optimale hastighedsgrænse ved hjælp af forudsigelse og optimeringsmodellen. På motorvejsstrækningen er der implementeret to variable hastighedstavler og syv detektorer, hvor tre af detektorerne er placeret på ramperne. Perioden der bliver testet for, er i spidsperioden mellem kl. 06:00-08:00. Trafiktætheden ved kø er 100 kt/spor/km, hvor den kritiske hastighed er 35 km/t og hastigheden i frit flow er 100 km/t. Den viste hastighed på tavlerne justeres i et interval på 10 km/t. [Yang et al., 2013]

I analysens basis-scenarie bestemmes hastighedsgrænsen på bagrund af de detekterede hastigheder. Derudover er der opstillet følgende fem analysescenarier: [Yang et al., 2013]

- Scenarie 1: Ingen variable hastighedsgrænsekontrol
- Scenarie 2: Forudsigelsesmodellen for variable hastighedsgrænse med 75% belastningsgrad.
- Scenarie 3: Basismodel for variable hastighedsgrænse med 75% belastningsgrad.
- Scenarie 4: Forudsigelsesmodellen for variable hastighedsgrænse med 50% belastningsgrad.
- Scenarie 5: Basismodel for variable hastighedsgrænse med 50% belastningsgrad.

I analysens scenarie 2 og 3 ses en markant reduktion af rejsetiden sammenlignet med scenarie 1. Analysen viser også, at variable hastighedstavler kan bidrage til at udbedre trængslen hurtigere i scenarie 2 og 3. Det fremgår også, at forudsigelsesmodellen ikke reducerer rejsetiden i den højeste trængselsperiode, dog kan den mindske trængslen i det tidligere stadie i forhold til basis-modellen, hvilket resultere i en lavere gennemsnitlig rejsetid. Af de fem analysescenarier ses den største effekt i scenarie 2, hvor der sker en markant reduktion i den gennemsnitlige rejsetid og antallet af stop på 16%. Heraf kan det konkluderes, at forudsigelsesmodellen giver de bedste resultater ved scenariet med den højeste belastningsgrad. [Yang et al., 2013]

Canada

På en 11 km motorvejsstrækning i byen Edmonton i Canada undersøges effekten af en forudsigelsesmodel udarbejdet i VISSIM. Spidstimerne for strækningen er i perioden 07:00-09:00 og 16:00-18:00. Motorvejsstrækningen er sekssporet og med en hastighedsgrænse på 80 km/t og en ÅDT på 100.000 kt/dag. På selve hovedstrækningen er der placeret otte detektorer, samt på alle til- og frakørsler. Detektorerne registrerer data vedrørende hastighed og trafikintensiteten hvert 20 sekund. Ud fra den indsamlede data og udformningen af den undersøgte strækning opbygges en mikrosimuleringsmodel. Kalibreringen af modellen tager udgangspunkt i det indsamlede data for at sikre, at modellen stemmer overens med virkeligheden. [Cao et al., 2015]

For at sikre trafikanternes sikkerhed og forbedre trafikafviklingen er der taget højde for følgende krav i styringsalgoritmen for de variable hastighedstavler: [Cao et al., 2015]

- Den variable hastighedsgrænse skal være lavere end den maksimale hastighedsgrænse på 80 km/t for strækningen for at sikre trafikanternes sikkerhed.
- Den variable hastighedsgrænse skal være højere end minimumshastighedsgrænsen på 20 km/t for strækningen, for at sikre effektivitet i trafikafviklingen.

I analysen benyttes der en forudsigelsesmodel (Model Predictive Control), som er en dynamisk trafik model til at forudsige den trafikale situation og koordinere de variable hastighedstavler. For at bestemme den trafikale situation bliver analysestrækningen opdelt i homogene delstrækninger og i til- og frakørselsramper. Forudsigelsesintervallet er i dette tilfælde et minut. I hvert spor i de forskellige delstrækninger bestemmes trafiktætheden, hastigheden og trafikintensiteten i tidsintervaller på 20 sekunder.

Ud fra den indsamlede data blev trængslen defineret i de situationer, hvor trafikanternes hastighed er under 40 km/t. [Cao et al., 2015]

I undersøgelsen er der opstillet to scenarier. I det ene scenarie er trængslen et resultat af, at trafikintensitet bliver så høj, at der opstår et trafiksammenbrud. I det andet scenarie antages det, at trængslen opstår de steder på strækningen, hvor vejen skifter fra tre til to spor og der dermed er en naturlig flaskehals. [Cao et al., 2015]

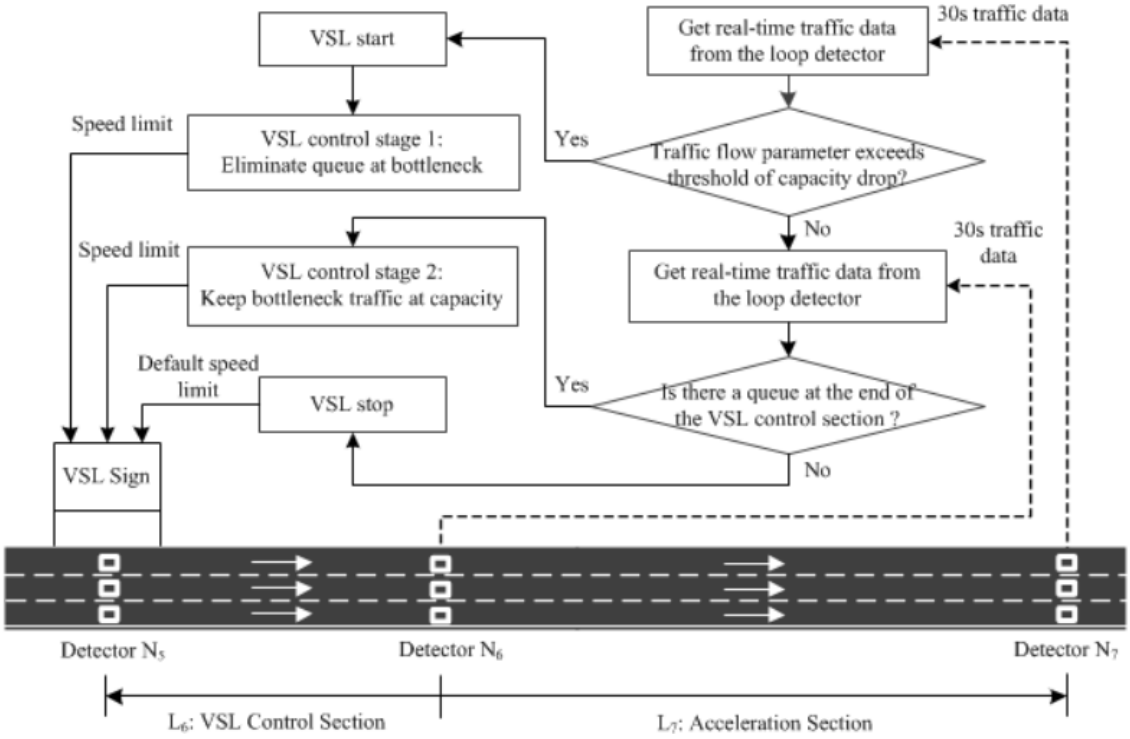
Resultatet for scenarie 1 er, at den oprindelige trængsel blev reduceret på flere strækninger, og at der kun var kortvarige trængselsperioder tilbage ved implementering af variable hastighedstavler. Ydermere var trafikanternes gennemsnitlige hastighed højere end uden variable hastighedstavler. I overbelastede tidspunkter blev trængselsperioden flyttet til et senere tidspunkt, varigheden var kortere, og grundet hastighedsharmonisering blev trængslen flyttet opstrøms fra det oprindelige trængselspunkt. [Cao et al., 2015]

I scenarie 2 blev kølængde reduceret ved implementering af variable hastighedstavler, dog opstod trængslen tidligere og med en længere varighed grundet hastighedsharmonisering. Yderligere fremgår det at trængslen opstod på de samme punkter grundet flaskehalse. [Cao et al., 2015]

USA

I dette litteraturstudie fremhæves to undersøgelser i San Diego, USA, der anvender forudsigelsesmodel til at optimere trafikafviklingen ved brug af variable hastighedstavler. Modellen til undersøgelsen er en makrosimuleringsmodel baseret på realtids trafikdata fra detektorer der er placeret på motorvejsstrækningerne. Makrosimuleringsmodellen er kalibreret ud trafikanternes adfærd, vognbaneskift og kapaciteten på strækningerne. Til sidst er modellen valideret ud fra de indsamlede kørte hastigheder. [Duan et al., 2013; Zhang et al., 2013]

Makrosimuleringsstudierne i San Diego benytter en Cell Transmission Model, hvor strækningen bliver inddelt i sektioner med homogene celler. I disse celler bliver trafikintensiteten og trafiktætheden bestemt i tidsintervaller af 30 sekunder for at forudsige trafiksammenbrud og herudfra bestemme den optimale hastighedsgrænse. På Figur 6.14 fremgår strategien der bliver brugt ved de variable hastighedstavler for at forudsige trafiksammenbruddet. De viste hastighedsgrænser skifter mellem 30 km/t, 70 km/t og 100 km/t [Duan et al., 2013].



Figur 6.14. Kontrol strategien for variable hastighedstavler. [Duan et al., 2013]

Resultaterne for de to forudsigelsesundersøgelser i San Diego angiver, at implementering af variable hastighedstavler har medvirket til, at det gennemstrømmende antal af trafikanter er blevet forøget med 4%. Ydermere er den totale rejsetid blevet reduceret med henholdsvis 8% og 26% og den totale forsinkelse er blevet reduceret med henholdsvis 24% og 56%. [Duan et al., 2013; Zhang et al., 2013]

Beijing

Denne undersøgelse forudsiger trængsel på en ottesporet motorvej i Beijing ved at forudsige den mest hensigtsmæssige hastighedsgrænse, som kan medvirke til et bedre trafikalt flow, og dermed mindske trængslen. For at kunne forudsige den mest hensigtsmæssige hastighedsgrænse, inddeles strækningen i delstrækninger, der har ens karakteristika og hver delstrækning bliver analyseret på baggrund af trafiktætheden, trafikintensiteten og gennemsnitshastigheden. Dette gøres ved, at trafikmængden og trafiktætheden på tilkørselsramperne og frakørselsramperne er kendte ved hjælp af detektorer. I forudsigelsesmodellen er tidsintervallet fem minutter og simulationstidsintervallet er et minut, dermed er der fem forudsigelses step i hvert tidsinterval. [Sun et al., 2004]

På baggrund af analysen konkluderes det i rapporten, at ved brug af variable hastighedstavler med forudsigelse af den mest hensigtsmæssige hastighedsgrænse, reduceres den totale rejsetid med op til 22%. [Sun et al., 2004]

Opsummering af forudsigelsessimuleringsstudierne

I Tabel 6.5 fremgår resultaterne fra forudsigelsessimuleringsstudierne med variable hastighedstavler opdelt i de forskellige lande.

Lokation af studierne	**Effekt af variable hastighedstavler**
Fiktiv strækning	▶ Forudsigelsesmodellen for variable hastighedstavler reducere ikke rejsetiden i i perioden med den største trængsel. ▶ Forudsigelsesmodellen kan reducere trængslen i det tidlige stadie før spidsbelastningen. ▶ 16% reduktion i antallet af stop for køretøjerne og den gennemsnitlige rejsetid, ved forudsigelsesmodellen med en belastningsgrad på 75%.
Canada	▶ På de strækninger hvor trængslen opstår grundet høj spidsbelastning, er trængselsperioden reduceret og udskudt, ydermere har køen flyttet sig længere opstrøms fra flaskehalsen, med mulighed for at opretholde en højere gennemsnitshastighed. ▶ På de strækninger hvor trængslen skyldes flaskehalse er den maksimale kølængde reduceret og trængslen opstår tidligere og med længere varighed.
USA	▶ 8% og 26% reducering i rejsetiden, den totale forsinkelse at blevet reduceret med 24% og 56% og trafikafviklingen er forøget med 4% ved en forudsigelsesmodel for variable hastighedstavler.
Beijing	▶ 22% reduktion i den totale rejsetid, ved en forudsigelsesmodel for variable hastighedstavler.

Tabel 6.5. Opsamling af effekterne ved variable hastighedstavler i forudsigelses simulerings studierne.

6.4 Opsummering af litteraturstudiet

De variable hastighedstavlers oprindelige funktion, da systemet for første gang blev implementeret i 1960'erne og 1970'erne, var primært at reducere bagendekollisioner og antallet af trafikuheld. Den teknologiske udvikling har åbnet op for, at variable hastighedstavler også kan have andre funktioner, heriblandt at optimere på trafikafviklingen, hvilket der især inden for det seneste årti er kommet særlig fokus på.

Implementering og drift af variable hastighedstavler er en omfattende proces, som inkluderer aspekter som planlægning, projektering og tavletekniske udvikling, heriblandt styringsalgoritmer. Styringsalgoritmerne har en central funktion for de variable hastighedstavler og der er i den henseende udviklet forskellige strategier for styringsalgoritmernes beregning af, hvordan sandsynligheden for trafiksammenbrud kan reduceres.

Der er gennemført en række undersøgelser af de variable hastighedstavlers effekt på trafikafviklingen, både nationalt og internationalt, samt i felten eller ved brug af trafiksimuleringer. Resultaterne viser at effektiviteten af de variable hastighedstavler afhænger af de specifikke systemdesigns. Fælles for undersøgelserne er, at variable hastighedstavler ikke

kan forbedre trafikafviklingen og rejsetiden væsentligt i spidsbelastningen, hvilket skyldes, at trafikanterne i denne situation køre efter de trafikale forhold frem for de angivende hastighedsgrænser. Variable hastighedstavler har den største effekt i stadiet lige før spidsbelastningen (synkroniseret flow) og kan medvirke til at udskyde situationen, hvor trafikken overgår fra synkroniseret flow. I stadiet for synkroniseret flow kan variable hastighedstavler reducere rejsetiden og variationen i hastigheden mellem sporene og øge trafikafviklingen. Ydermere kan det konkluderes, at effekten af de variable hastighedstavler i høj grad også afhænger af, om trafikanterne overholder de anviste hastighedsgrænser.

Den nationale effektundersøgelse af variable hastighedstavler på M3 viser, at effekten på antallet af gennemstrømmende trafikanter og den gennemsnitlige rejsetid er begrænset. Resultater af internationale feltundersøgelser viser, at variable hastighedstavler har en markant højere effekt på gennemstrømmende trafikanter og den gennemsnitlige rejsetid.

I mikrosimuleringsstudierne har variable hastighedstavler haft en mindre effekt på rejsetiden. Ydermere er det også kun i denne undersøgelse at rejsetiden er blevet forøget fremfor reduceret ved implementering af variable hastighedstavler. For forudsigelsesundersøgelserne er effekten af de variable hastighedstavler på trafikafviklingen generelt højere end resultaterne for feltstudierne, hvilket kan skyldes, at trafiksimuleringer kan være behæftet med fejl og kan overestimere effekten af variable hastighedstavler.

Del II

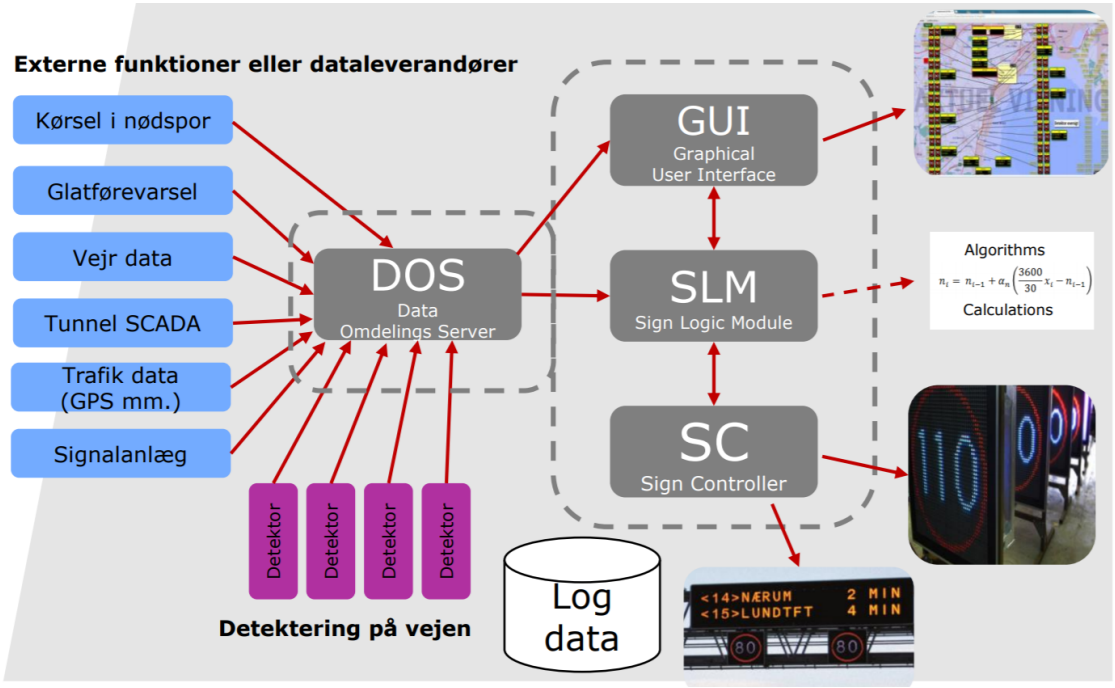
Analyse af effekten af variable hastighedstavler ved Limfjordstunnelen og M3.

7 Styringsalgoritme

Formålet med dette kapitel er at beskrive styringsalgoritmerne for de variable hastighedstavler ved Limfjordstunnelen og M3, som blev anvendt i perioden 2015-2019 samt de nye styringsalgoritmer, som er anvendt fra december 2019.

7.1 Opbygningen af trafikledelsessystemet

Trafikledelsessystems opbygning fremgår af Figur 7.1. [Lunde-Christensen, 2020]



Figur 7.1. Opbygningen af det nye trafikledelsessystem. [Lunde-Christensen, 2020]

Det ses af figuren, at systemet er opbygget af fire kernemoduler, som har hver deres individuelle funktion i det samlede system. Af Tabel 7.1 fremgår de fire kernemodulers funktion.

	Definition	Beskrivelse
DOS	Data Omdelings Server	Indsamler og videregiver trafikdata i et bestemt interval. Dataene kommer fra realtidsdetektering af trafikken og ekstern information.
GUI	Graphical User Interface	Manuelt overvågning- og kontrolsystem. GUI giver et overblik over den samlede trafiksituation og illustrerer, hvad de variable informations- og hastighedstavler viser i realtid.
SLM	Sign Logic Module	Baseret på data fra DOS bestemmes det i SLM, hvordan den pågældende trafiksituation er i realtid og videregiver den mest hensigtsmæssige information og skiltede hastighed til Sign Controller.
SC	Sign Controller	Informations- og hastighedstavler

Tabel 7.1. De fire kernemoduler i det nye trafikledelsessystem. [Lunde-Christensen, 2020]

Af de fire kernemoduler har Sign Logic Module (SLM) den mest centrale funktion i forbindelse med informations- og hastighedsvisning. Det skyldes, at det er i dette kernemodul, at det fastlægges, hvilke parametre og grænseværdier i trafikken, der er bestemmende for informations- og hastighedsvisningen på tavlerne. Det er i dette SLM-kernemodul, at der er foretaget ændringer og testet nye funktioner med det formål at optimere trafikafviklingen på M3 og Limfjordstunnelen. [Lunde-Christensen, 2020]

7.2 Styringsalgoritme 2015-2019

Frem til december 2019 fungerede trafikledelsessystemerne ved M3 og Limfjordstunnelen efter styringsprincipper fastlagt i 2015. Trafikledelsessystemet havde følgende funktioner. [Lauritzen, 2015]

- Beregning og visning af rejsetid
- Kalenderstyret hastighed
- Køvarsling
- Hastighedsharmonisering
- Funktion ved manuelt valgt hastighed og vognbanebenyttelse
- Hastighedstilpasning

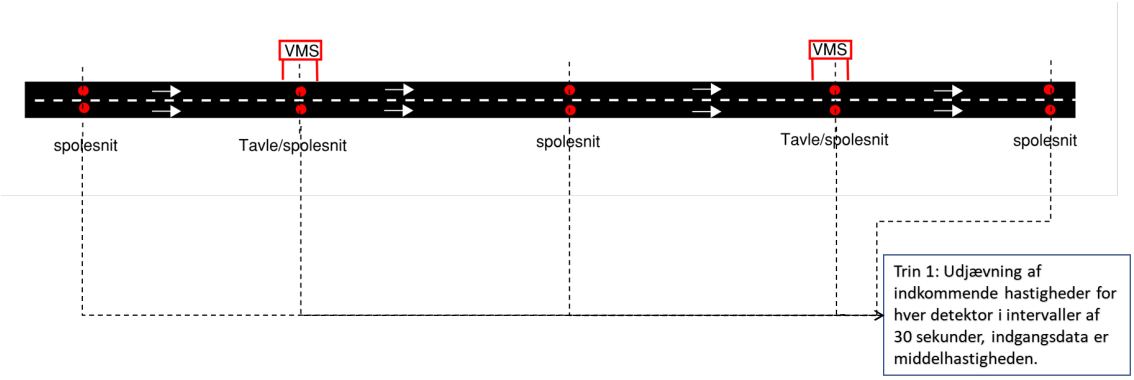
Til disse funktioner benyttes tre typer af tavler, som er informationstavler, variable hastighedstavler og advarselstavler. Disse tre typer af tavler er afhængige af hinanden, men har forskellige formål, hvoraf variable hastighedstavler har den mest centrale funktion i forbindelse med hastighedstilpasning og hastighedsharmonisering. Det er derfor styringsalgoritmen for de variable hastighedstavler, som præsenteres i følgende afsnit. [Lauritzen, 2015]

7.2.1 Styringsalgoritme for variable hastighedstavler

Hastighedsharmonisering

Punktdetektorer indsamler data om trafiksituationen, som behandles af styringsalgoritmen i intervaller af 30 sekunder. Processen, hvor det bestemmes, hvilken hastighed der skal vises på de variable hastighedstavler, er delt op i fire trin:

Trin 1) I trin 1 beregnes den udjævnede hastighed gennem styringsalgoritmen for hver detektor ud fra middelhastigheden over de seneste 30 sekunder, som illustreret i Figur 7.2.



Figur 7.2. Illustration af hastighedsharmoniseringens første trin.

Formlen for hastighedsudjævningen er givet som følge: [Lauritzen, 2015]

$$V_{udj.ny} = V_{udj.gl} + \alpha \cdot (V_{ny} - V_{udj.gl}) \tag{7.1}$$

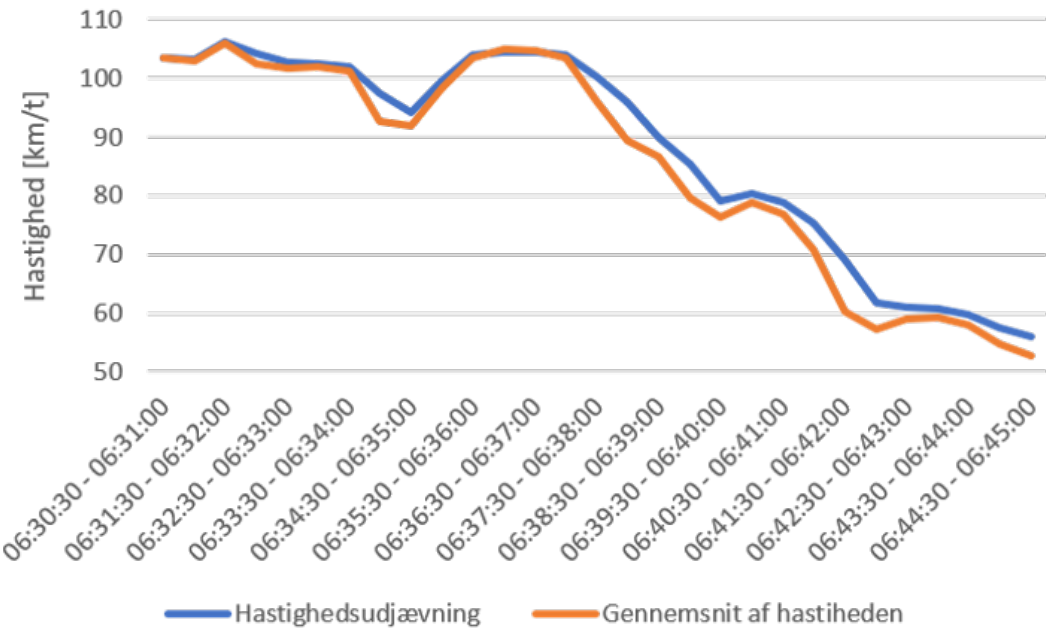
Hvor:

$V_{udj.ny}$	Den nye udjævnede hastighed [km/t]
$V_{udj.gl}$	Den seneste udjævnede hastighed [km/t]
V_{ny}	Middelhastigheden for de seneste 30 sek. [km/t]
α	Udjævningsfaktor

Værdien (α) varierer alt efter, om der er en faldende eller stigende tendens i hastighedsmålingerne. I perioder, hvor der ikke bliver registreret trafik i detektorsnittet, bliver værdien $V_{udj.gl}$ fastholdt. [Lauritzen, 2015]

- $\alpha_{faldende}$: 0,25 (anvendes ved beregninger hvor $V_{ny} < V_{udj.gl}$)
- $\alpha_{stigende}$: 0,50 (anvendes ved beregninger hvor $V_{ny} > V_{udj.gl}$)

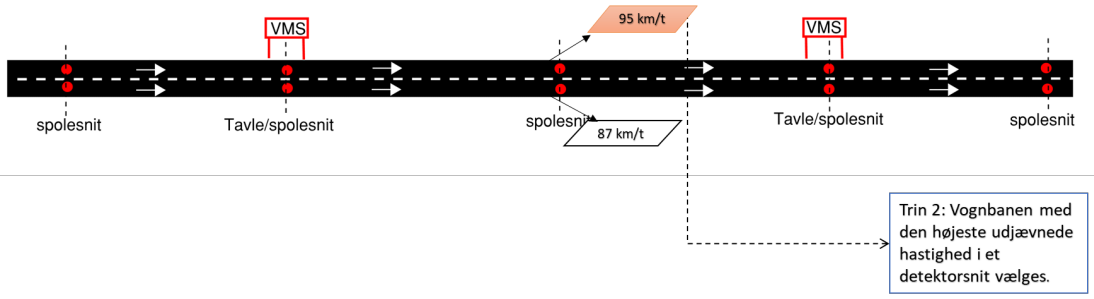
For at illustrere hvordan hastighedsudjævnings formlen virker, sammenholdes denne formel med et glidende gennemsnit af middelhastighederne der bliver indsamlet hvert 30 sekund, se Figur 7.3. Data til denne illustration er fra Limfjordstunnelen i morgenspidstimen den 08.01.2019 i tidsrummet 06:30-06:45.



Figur 7.3. Illustration af formlen for udjævningshastigheden i forhold til et glidende gennemsnit af middelhastighederne i intervaller af 30 sekunder, ved Limfjordstunnelen den 08.01.2019 i tidsrummet 06:30-06:45.

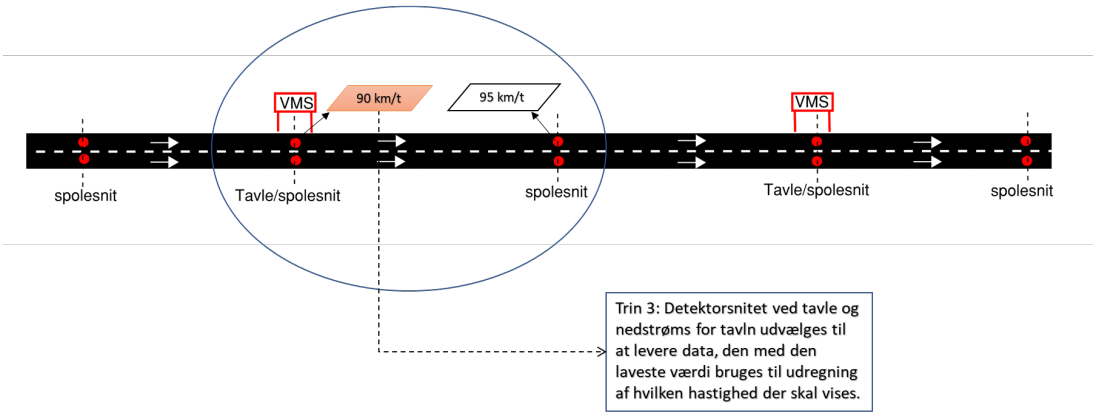
Ud fra ovenstående figurer fremgår det, at hastighedsudjævningen generelt ligger højere end det glidende gennemsnit over middelhastigheden, men at værdierne ligger forholdsvis tæt på hinanden.

Trin 2) I hastighedsharmoniseringens andet trin udvælges der for et detektorsnit data fra vognbanen med den højeste udjævnede hastighed, som illustreret på Figur 7.4. [Lauritzen, 2015]



Figur 7.4. Illustration af andet trin i hastighedsharmoniseringen.

Trin 3) For et tavlesnit er der tilknyttet nogle bestemte detektorsnit, som giver information til styring af tavlesnittet. I hastighedsharmoniseringens tredje trin bestemmes det, hvilke tavlesnit, der skal vise den beregnede hastighed til tavlevisningen. Typisk udvælges detektorsnittet ved et tavlesnit samt et detektorsnit nedstrøms fra tavlesnittet. Ud fra de to detektorsnit udvælges den detektor, der har den laveste udjævnede hastighed. Illustration af trin 3 fremgår af Figur 7.5. [Lauritzen, 2015]



Figur 7.5. Illustration af tredje trin i hastighedsharmoniseringen.

Trin 4) I hastighedsharmoniseringens fjerde trin bliver hastigheden, der skal vises på tavlerne, valgt. Den udjævnede hastighed, der blev bestemt i tredje trin, er udgangspunktet for den hastighed, der skal vises i tavlesnittet og er i Tabel 7.2 angivet som den styrende hastighed. Hvis der skulle opstå fejl på en detektor, peges der i stedet på en konfigurerbar visning, som via et forudbestemt skema angivet angiver, hvad der skal vises på tavlerne. [Lauritzen, 2015]

Ved styrende hastighed mellem	**Peges der på hastighedsvisningen**
0 km/t - 55 km/t	50 km/t
55 km/t - 65 km/t	60 km/t
65 km/t - 75 km/t	70 km/t
75 km/t - 85 km/t	80 km/t
85 km/t - 95 km/t	90 km/t
95 km/t - 200 km/t	110 km/t

Tabel 7.2. Tabel over styrende hastighed for hastighedsvisning før ændringen i styringsalgoritmen. [Lauritzen, 2015]

Hastighedstilpasning

Formålet med hastighedstilpasningsfunktionen er at sikre, at hastighedsvisningen på nabotavlerne er afstemt efter hinanden, således at hastighedsændringen sker i små trin og at der ikke opstår pludselige ændringer i hastighedsvisningen på tavlerne. [Lauritzen, 2015]

Der er derfor opstillet følgende kriterier for hastighedstilpasningen [Lauritzen, 2015]:

- Skift i tavlevisning sker i trin af 20 km/t med minimum 40 sekunders mellemrum. Beregnes hastighedsvisningen eksempelvis til 50 km/t i et tavlesnit, hvor den aktuelle visning er 90 km/t, skal tavlen vise 70 km/t i 40 sekunder, før den sættes ned til 50 km/t.

- Forskellen mellem tavlerne opstrøms og nedstrøms må have en difference på 20 km/t. Vises eksempelvis 90 km/t i en aktuel tavlevisning og der beregnes en hastighed til 50 km/t i tavlen, skal tavlen opstrøms skifte fra 90 km/t til 70 km/t.

Trinparametrene 20 km/t og 40 sekunder mellem hvert skift er justerbare. Operatøren ved Vejdirektoratets Trafik Informations Center (T.I.C.) har altid mulighed for at omgå systemet og fastsætte hastighedsgrænserne manuelt for en tavle eller for flere sammenhængende tavler. [Lauritzen, 2015]

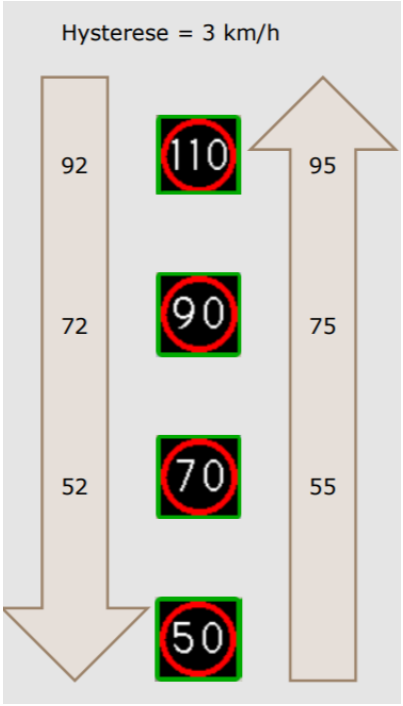
I denne styringsalgoritme bestemmes de viste hastigheder på tavlerne dermed ud fra detekterede hastigheder. Dette har den konsekvens, at variable hastighedstavler ikke anvendes til at forebygge trængslen, da hastigheden ikke sættes ned, når tætheden og dermed også trafikintensiteten stiger. Yderligere har det også den konsekvens, at de variable hastighedstavler i nogle tilfælde har skiltet med en lav hastighed om natten, fordi lastbilers lave hastighed har været grundlaget for hastighedsvisning på tavlerne. Ydermere er der også udfordringer i at sætte hastigheden op efter trængselsperioden, da trafikanterne skal overskride hastighedsgrænserne for at manipulere styringsalgoritmen til at hæve tavlehastighedsvisningerne [Natascha Rigborg, 2019]. Den nye styringsalgoritme som blev implementeret i 2019 havde netop til hensigt at håndtere problemerne, som var knyttet til den aktuelle styringsalgoritme.

7.3 Ny styringsalgoritme fra 2019

Siden 2019 har Vejdirektoratet i samarbejde med konsulentvirksomheden AFRY opdateret trafikledelsessystemet med det formål at sikre bedre trafikafvikling, øge trafiksikkerheden og rette op på tekniske fejl ved den tidligere styringsalgoritme.

I den nye styringsalgoritme inkluderes en række nye funktioner, som er styrende for visningen på informations- og hastighedstavlerne. De mest relevante er (1) dobbelte tærskelværdier for hastighedsstyring, (2) belastningsafhængig hastighedsstyring og (3) hastighedsreduktion foran overbelastede frakørsler

1) Dobbelt tærskelværdi indgår som en ny funktion med det formål at reducere hyppigheden af ændringer i hastighedsvisning på tavlerne. Formålet er, at tavlerne skal blive mindre følsom, og derfor skal der højere eller lavere hastigheder til at aktivere en ændring i hastighedsvisningen på tavlerne. I den tidligere styringsalgoritme var kriteriet for ændringen af tavlevisning kun bestemt af en enkelt tærskelværdi, hvilket medførte, at hastighedsgrænsen blev justeret oftere når den detekterede hastighed lå omkring tærskelværdien. Justeringen af hastighedsgrænsen opadgående og nedadgående samt tilhørende tærskelværdier kan ses på Figur 7.6, hvor det fremgår, at der er en forskel i tærskelværdien (hysterese) på 3 km/t. [Lunde-Christensen, 2020]



Figur 7.6. Dobbelt tærskelværdi. [Lunde-Christensen, 2020]

2) Belastningsafhængig hastighedsstyring implementeres med det formål at tillægge den aktuelle trafikintensitet en betydning for den skiltede hastighed. Den viste hastighed på tavlerne defineres dermed ud fra en kombination af de registrerede hastigheder og trafikintensiteter. Den nye funktion burde dermed medvirke til at undgå eller udskyde trafiknedbrud på motorvejene, da styringsalgoritmen har mulighed for at vælge en lavere skiltet hastighed i de situationer, hvor der forekommer høj trafikbelastning.

   Tærskelværdierne for den belastningsafhængig hastighedsstyring for en motorvejsstrækning med en kapacitet på 2.200 pe/t/spor er angivet i Tabel 7.3. [Lunde-Christensen, 2020]

Trafikintensitet (pe/t/spor)	**Hastighed (km/t)**
0 - 1.650	110
1.650 - 1.870	90
1.870 - 5.000	70

Tabel 7.3. Tærskelværdierne for den belastningsafhængig hastighedsstyring for en motorvejsstrækning med en kapacitet på 2.200 pe/t/spor. [Lunde-Christensen, 2020]

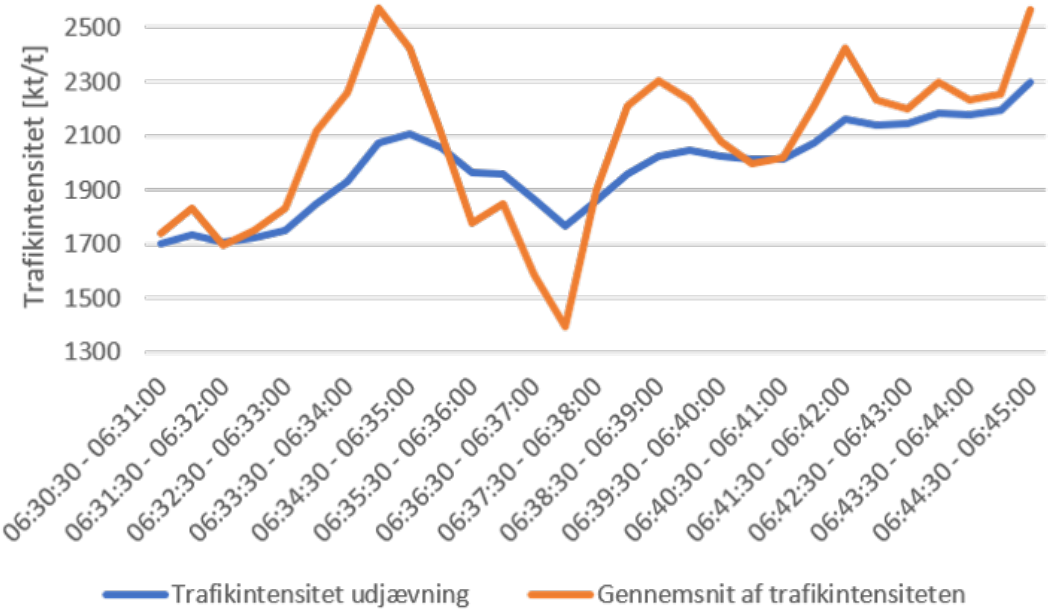
   Den viste hastighed på tavlerne som et resultat af den aktuelle trafikintensitet bliver bestemt ud fra nedenstående formel i hvert spor for hver detektorsnit. [Lunde-Christensen, 2020]

$$n_i = n_{i-1} + \alpha_n \cdot \left(\frac{3.600}{30} \cdot x_i - n_{i-1} \right) \tag{7.2}$$

Hvor:

n_i	Den nye udjævnede trafikintensitet [kt/t]
n_{i-1}	Den seneste udjævnede trafikintensitet [kt/t]
x_i	Middeltrafikintensiteten for de seneste 30 sek. [kt/t]
α	Udjævningskoefficient mellem 0 og 1 med en standardværdi på 0,15

For at illustrere hvordan formlen for belastningsafhængig hastighedsstyring virker, sammenholdes denne formel med et glidende gennemsnit af middeltrafikintensiteten, der bliver indsamlet hvert 30 sekund, se Figur 7.7. Data til denne illustration er fra Limfjordstunnelen i morgenspidstimen den 08.01.2019 i tidsrummet 06:30-06:45.



Figur 7.7. Illustration af formlen for belastningsafhængige hastighedsstyring i forhold til et glidende gennemsnit af middeltrafikintensiteten i intervaller af 30 sekunder, ved Limfjordstunnelen den 08.01.2019 i tidsrummet 06:30-06:45.

Ud fra ovenstående figurer fremgår det, at udjævningen af trafikintensiteten medvirker til at udsving mindskes i forhold til et glidende gennemsnit over trafikintensiteten. Udjævningen i trafikintensiteten kan medvirke til, at der ikke forekommer udsving i den skiltede hastighed for ofte.

3) Hastighedsreduktionen foran overbelastede frakørsler er en funktion, der skal sørge for, at der ikke bliver for stor forskel på trafikanternes hastigheder i mellem sporene. Hensigten er dermed at øge hastighedsharmoniseringen mellem sporene, hvilket skal reducere sandsynligheden for trafikuheld ved kødannelse i et spor, hvor trafikanterne kører med lavere hastighed end i de andre spor. [Lunde-Christensen, 2020]

7.3.1 Tidspunkt for implementering af styringsalgoritmen

Ved M3 blev funktioner af de nye algoritmer implementeret i etaper for at bestemme effekten for hvert enkelte funktionstiltag. Etaperne for tiltagene og hvornår de blev implementeret, fremgår af Tabel 7.4.

Scenarie	**Beskrivelse**	**Aktiv fra**	**Aktiv til**
1A	Dobbelt tærskelværdier for hastighedsstyring	17.10.2019	24.10.2019
2A	Hastighedsreduktion foran overbelastede frakørsler	24.10.2019	11.11.2019
3A	Belastningsafhængig hastighedsstyring	11.11.2019	18.11.2019
3A	Belastningsafhængig hastighedsstyring nye grænseværdier	18.11.2019	28.11.2019
4A	Information i tilknytning til hastighedsstyring og belastningsafhængig hastighedsstyring nye grænseværdier	28.11.2019	09.12.2019
4B	Information i tilknytning til hastighedsstyring, belastningsafhængig hastighedsstyring og rejsetid information	09.12.2019	

Tabel 7.4. Etaperne for de nye tiltag og hvornår de var aktive på M3. [Lunde-Christensen, 2020]

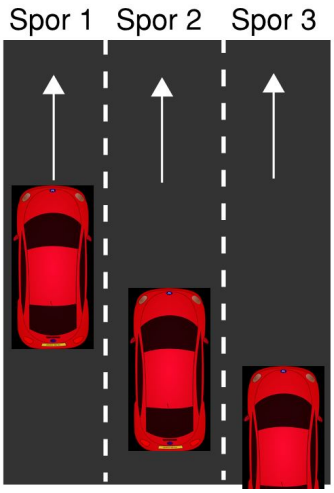
Ved Limfjordstunnelen blev den nye styringsalgoritme implementeret den 12.12.2019 og inkluderede følgende funktioner: Hastighedsreduktion foran overbelastede frakørsler, belastningsafhængig hastighedsstyring og information i tilknytning til hastighedsstyring. [Lunde-Christensen, 2020]

Analyse 8

Formålet med dette kapitel er at undersøge, hvorvidt den nye styringsalgoritme, som blev implementeret på M3 og ved Limfjordstunnelen i december 2019, har resulteret i en signifikant forbedring af trafikafviklingen. For at påvise om der har været en ændring i trafikafviklingen fra 2019 til 2020, anvendes følgende analysemetoder:

- Analyse af kapacitet og hastighedsharmonisering
- Analyse af rejsetid
- Analyse af tavlevisning

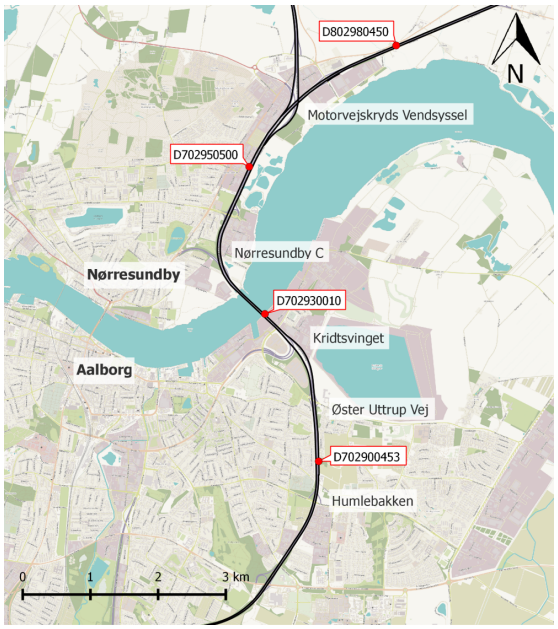
I analysen vil venstresporet blive refereret til som spor 1, midtersporet som spor 2 og højresporet som spor 3, som angivet i Figur 8.1.



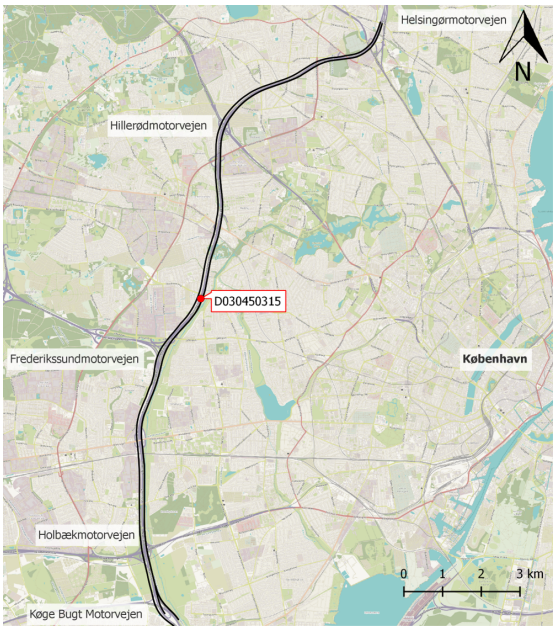
Figur 8.1. Forklaring af sporbetegnelse.

8.1 Kapacitet og hastighedsharmonisering

Af Figurerne 8.2 og 8.3 fremgår punkterne, hvor kapacitet og hastighedsharmonisering analyseres.



Figur 8.2. Analysepunkter ved Limfjordstunnelen. Punkterne på venstre side af strækningen bruges i analysen af den sydgående morgentrafik, og punkterne på højre side af strækningen bruges i analysen af den nordgående eftermiddagstrafik.



Figur 8.3. Analysepunkt ved M3. I punktet D030450315 analyseres morgen- og eftermiddagstrafikken i både nordlig og sydlig retning.

Fremadrettet vil punkterne ved Limfjordstunnelen blive refereret til, som angivet i Tabel 8.1.

	Sted ID	**Navn i rapporten**
Morgenspidstimen, sydgående	D802980450 D702950500	Frederikshavn Limfjordstunnelen
Eftermiddagsspidstimen, nordgående	D702900453 D702930010	Limfjordstunnelen Humlebakken

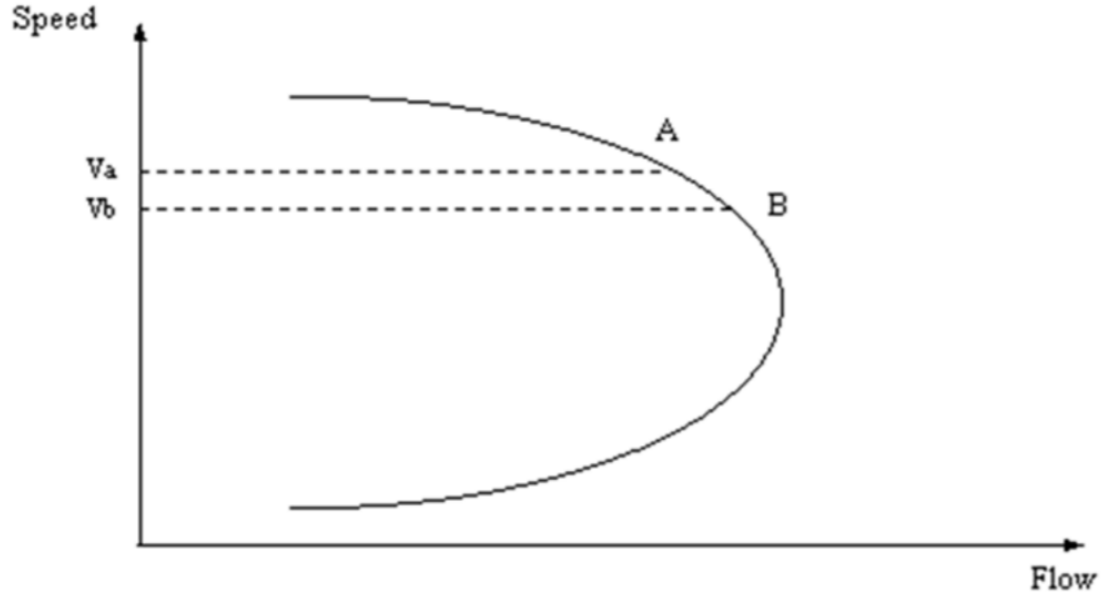
Tabel 8.1. Navne på analysepunkterne ved Limfjordstunnelen der refereres til i rapporten.

Der analyseres for en tidsperiode over en måned henholdsvis i januar 2019, hvor den gamle styringsalgoritme er i funktion og i januar 2020, hvor den nye styringsalgoritme er implementeret. Analysen foretages fra uge 2 til uge 5 på dagene tirsdag, onsdag og torsdag. At det kun er disse tre ugedage, der indgår i analysen, skyldes, at mandag og fredag samt weekend ikke repræsenterer en typisk hverdag [Vejdirektoratet, 2006]. Enkelte dage er udeladt af analysen på grund af trafikuheld. Dagene, der er inkluderet i analysen, fremgår af bilag A.

8.1.1 Analyse af kapacitet

Hvis den nye styringsalgoritme har haft en positiv effekt på trafikafviklingen fra 2019 til 2020, kan det antages, at der har været en kapacitetsforøgelse i perioderne med spidsbelastning. Hvis der har været en kapacitetsforøgelse, vil det i henhold til Kerners trefase-teori være muligt at afvikle trafik med en højere trafikintensitet, før der forekommer en transition fra synkroniseret flow til bevægelig kø.

Hvorvidt denne antagelse om kapacitetsforøgelse er gældende, undersøges ved at sammenligne de kritiske hastigheder og kritiske trafikintensiteter, som blev registreret i minutterne op til trafiksammenbruddene i 2019 og 2020. Hvis styringsalgoritmen har haft en effekt i fasen for synkroniseret flow, kan det antages, at den kritiske hastighed er reduceret og den kritiske trafikintensitet er forøget fra 2019 til 2020, som illustreret på Figur 8.4.



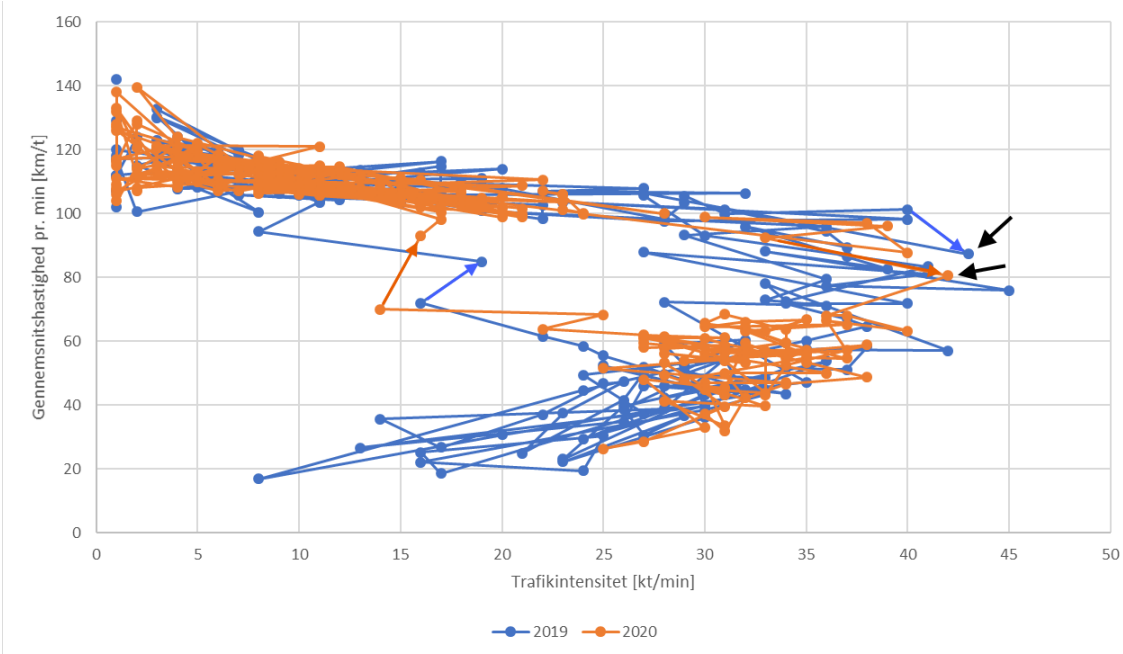
Figur 8.4. Teoretisk sammenhæng mellem hastigheden og trafikintensiteten. [Lucky, Eng, 2014]

I denne analyse undersøges derfor følgende hypoteser:

- Kritiske trafikintensitet for 2020 er højere end den kritiske trafikintensitet for 2019.
- Kritiske hastighed for 2020 er lavere eller lig med den kritiske hastighed for 2019.

Den kritiske hastighed og kritiske trafikintensitet bestemmes ved den hastighed og trafikintensitet, der er registreret før et trafiksammenbrud. For at tage højde for udsving i trafikken er den kritiske hastighed og kritiske trafikintensitet beregnet som det glidende gennemsnit af de hastigheder og trafikintensiteter, der er registreret i de fem minutter op til trafiksammenbruddet forekommer.

Et eksempel på et trafiksammenbrud, hvor de kritiske hastigheder og trafikintensiteter kan observeres ved et speed-flow diagram kan ses af figur 8.5.



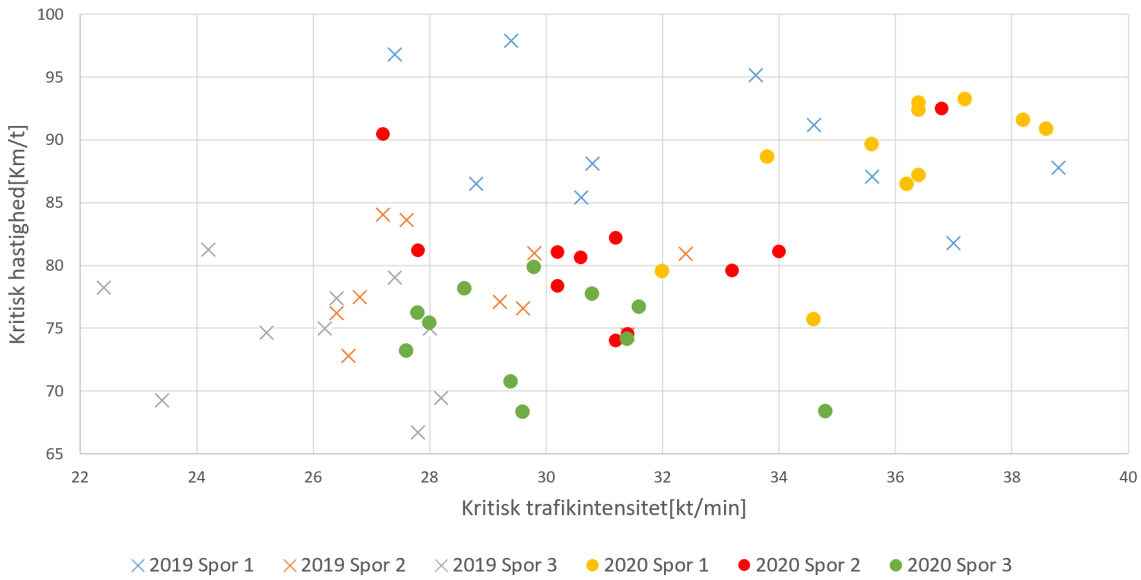
Figur 8.5. Speed-flow diagram for morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen i sydgående retning den 08.01.2019 og den 08.01.2020, spor 1.

På figuren er punktet for den kritiske hastighed og den kritiske trafikintensitet angivet med en pil for henholdsvis 2019 og 2020. Det ses, at værdierne for den kritiske hastighed og trafikintensitet for de to år er omtrent på samme niveau. For at konkludere om der har været en statistisk signifikant tendens til en øget kritisk trafikintensitet fra 2019 til 2020 gennemføres der en t-test.

I følgende afsnit fremgår resultaterne af den kritiske hastighed og kritiske trafikintensitet for Limfjordstunnelen og M3 i 2019 og 2020.

Resultater for Limfjordstunnelen

I punktdiagrammet angivet ved Figur 8.6 fremgår de kritiske hastigheder og kritiske trafikintensiteter for de enkelte dage på de tre forskellige spor i 2019 og 2020 ved Limfjordstunnelen i morgenspidstimen.



Figur 8.6. Kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen for 2019 og 2020.

Af figuren fremgår det, at der umiddelbart har været en forbedring af kapaciteten for alle tre spor i morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen i 2020 sammenlignet med 2019. Dette kan konkluderes på baggrund af, at trafikintensiteten før et sammenbrud er højere for 2020, og dermed er kapaciteten før der forekommer et faseskifte fra synkroniseret flow til bevægelig kø højere i 2020 end i 2019.

I morgenspidstimen i analysepunktet Frederikshavn i sydgående retning og i de to punkter for eftermiddagsspidstimen i nordgående retning ved Humlebakken og Limfjordstunnelen er denne tendens ikke lige så tydelig, se bilag B for punktdiagrammerne.

For at undersøge om der har været en signifikant effekt i både morgen- og eftermiddagsspidstimen, er medianen for den kritiske hastighed og trafikintensitet for hvert spor i henholdsvis 2019 og 2020 angivet i Tabel 8.2. En signifikant ændring i hastigheden eller trafikintensiteten fra 2019 til 2020 angives med $\star$.

H_0-hypotese			Krit. hastighed [km/t] 2019 $\leq$ 2020			Krit. trafikintensitet [kt/min] 2019 $\geq$ 2020		
			2019	2020	Forskel	2019	2020	Forskel
Morgen-spids-timen, syd-gående	Frederiks-havn	Spor 1	92,5	87,8	- 5,0%	30,4	30,7	+ 0,9%
		Spor 2	83,9	80,0	- 4,6%	22,4	23,9	+ 6,7% ⋆
	Limfjords-tunnelen	Spor 1	87,9	89,6	+ 1,9%	32,2	36,4	+ 13,0% ⋆
		Spor 2	77,3	81,0	+ 4,9%	28,4	31,2	+ 9,9% ⋆
		Spor 3	74,9	75,4	+ 0,5%	26,3	29,6	+ 12,5% ⋆
Efter-middags-spids-timen, nord-gående	Humle-bakken	Spor 1	89,5	98,6	+ 10,0%	29,4	29,6	+ 0,7%
		Spor 2	77,1	81,5	+ 5,7%	29,6	29	- 2,0%
	Limfjords-tunnelen	Spor 1	78,4	70,0	- 10,6% ⋆	30,8	35,0	+ 13,6% ⋆
		Spor 2	75,8	69,6	- 8,1% ⋆	36,2	38,4	+ 6,0%
		Spor 3	70,5	65,3	- 7,4%	27,2	28,2	+ 3,7%

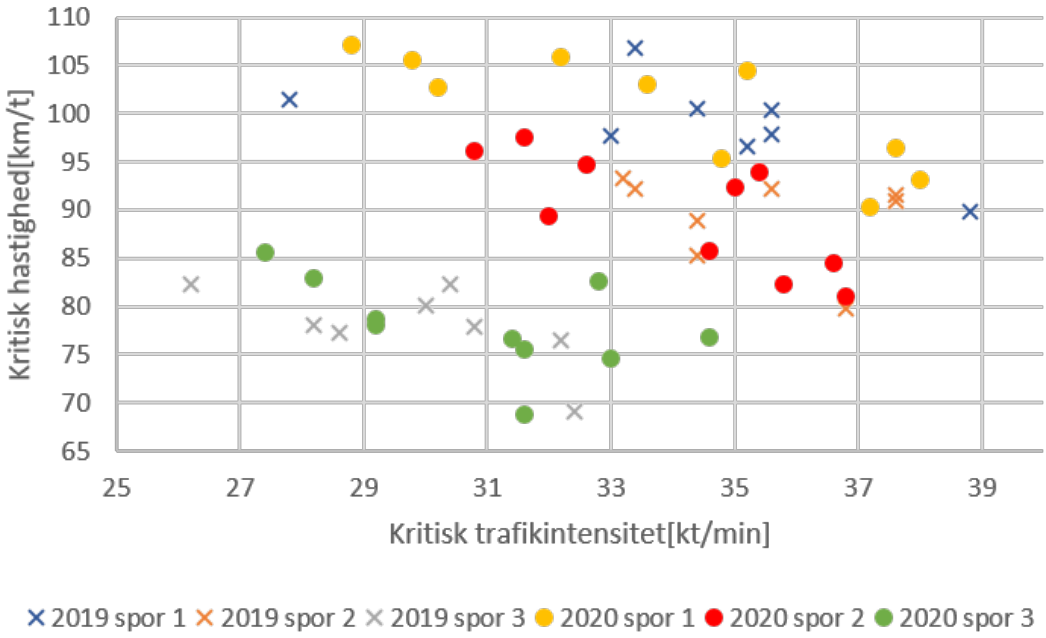
Tabel 8.2. Medianen for den kritisk hastighed og trafikintensitet, samt den procentvise forskel mellem resultaterne i 2019 og 2020 for Limfjordstunnelen. Stjernerne indikerer resultater med en statistisk signifikant forbedring fra 2019 til 2020. + og - angiver at der har været en stigning eller et fald fra 2019 til 2020.

Af tabellen fremgår det, at der ikke er en entydig forbedring af kapaciteten ved Limfjordstunnelen i morgen- eller eftermiddagsspidstimen. Der er en forbedring af kapaciteten ved Limfjordstunnelen i morgenspidstimen fra 2020 til 2019. Dette kan konkluderes af, at det i 2020 var muligt at afvikle en væsentlig højere trafikintensitet med tilsvarende hastighed før et trafiksammenbrud forekom sammenlignet med 2019. I eftermiddagsspidstimen for punktet ved Limfjordstunnelen fremgår der også en forbedring af kapaciteten efter ændringen af styringsalgoritmen. Det kan konkluderes af, at trafikintensiteten er højere i alle tre spor med en signifikant effekt ved spor 1. Det fremgår også, at hastigheden er blevet reduceret i alle tre spor med en signifikant reducering i spor 1 og 2. I de to resterende analysepunkter ses der ikke en tendens til en forbedring i kapaciteten. Det kan dermed konkluderes, at den nye styringsalgoritme har haft en positiv effekt på kapaciteten i de to punkter ved Limfjordstunnelen, og at kapaciteten ved de to resterende punkter ved Frederikshavn og Humlebakken ikke er forbedret.

Resultater for Motorring 3

Ud fra samme fremgangsmåde som ovenstående er det undersøgt, hvorvidt der har været en ændring i kapacitetsgrænsen for M3.

Figur 8.7 angiver de kritiske hastigheder og trafikintensiteter for alle tre spor i 2019 og i 2020 i morgenspidstimen for sydgående retning.



Figur 8.7. Kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i morgenspidstimen mod syd ved M3 for 2019 og 2020

Ud fra figuren fremgår det, at der ikke er en entydig forbedring af kapaciteten fra 2019 til 2020 ved M3 i morgenspidstimen i sydgående retning. Punktdiagrammerne for morgen- og eftermiddagsspidstimen er angivet i bilag B. Heraf fremgår det, at der er en generel øget kritisk hastighed for morgenspidstimen i nordgående retning for alle tre spor, men ikke en forbedring i den kritiske trafikintensitet. For eftermiddagsspidstimen i sydgående retning ses der ikke en entydig forbedring af kapaciteten, som det er tilfældet i nordgående retning.

Medianen for den kritiske hastighed og trafikintensitet i morgen- og eftermiddagsspidstimen i begge retninger er angivet i Tabel 8.3.

H_0-hypotese			Krit. hastighed [km/t] 2019 ≤ 2020			Krit. trafikintensitet [kt/min] 2019 ≥ 2020		
			2019	2020	Forskel	2019	2020	Forskel
Morgen-spids-timen	Syd	Spor 1	99,1	102,9	+ 3,8%	34,8	34,2	- 1,7%
		Spor 2	91,3	90,9	- 0,4%	35,0	34,8	- 0,6%
		Spor 3	78,0	77,5	- 0,7%	30,2	31,5	+ 4,3%
	Nord	Spor 1	97,2	100,7	+ 3,6%	37,2	35,1	- 5,6%
		Spor 2	85,9	90,8	+ 5,7%	37,9	38,9	+ 2,6%
		Spor 3	74,5	79,1	+ 6,2%	31,4	31,3	- 0,3%
Efter-middags-spids-timen	Syd	Spor 1	96,1	96,4	+ 0,4%	35,1	36,3	+ 3,4%
		Spor 2	88,0	89,6	+ 1,8%	34,6	35,2	+ 1,7%
		Spor 3	74,8	76,4	+ 2,1%	28,7	30,4	+ 5,9%
	Nord	Spor 1	107,4	105,5	- 1,8%	28,2	30,4	+ 7,8%
		Spor 2	97,7	95,1	- 2,7%	36,0	37,2	+ 3,3%
		Spor 3	86,0	86,4	+ 0,4%	32,2	34,6	+ 7,5%

Tabel 8.3. Medianen for den kritisk hastighed og trafikintensitet, samt den procentvise forskel i mellem resultaterne i 2019 og 2020 for M3. + og - angiver at der har været en stigning eller et fald fra 2019 til 2020.

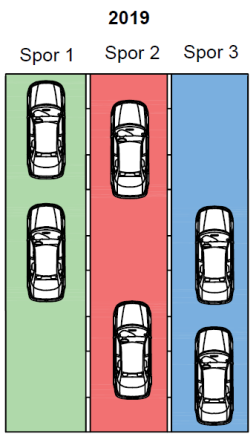
Ud fra ovenstående tabel fremgår det, at der er en forbedring i kapaciteten i eftermiddagsspidstimen, da der ses en øget trafikintensitet i alle tre spor og at den kritiske hastighed er reduceret eller forbliver konstant før trafiksammenbruddene. I morgenspidstimen fremgår det, at det kun er spor 3 i sydgående retning og spor 2 i nordgående retning, der har en forbedring i kapaciteten.

Hvorvidt forbedringen i den kritisk hastighed og trafikintensitet på M3 har været statistisk signifikant, kan konkluderes ud fra en uparret t-test. Heraf kan det konkluderes, at der ikke har været en signifikant øget kapacitet på M3.

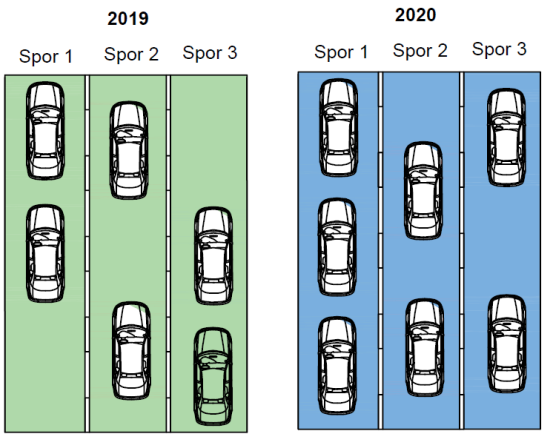
8.1.2 Analyse af hastighedsharmonisering

Hvis den nye styringsalgoritme har resulteret i en øget hastighedsharmonisering, kan det antages, at der er lavere variation i hastighederne både blandt trafikanterne i det enkelte spor og sporene imellem. Der udføres derfor en statistisk analyse på variationen i hastighederne, med henblik på at vurdere, hvorvidt trafikanterne kører med en mindre variation i hastighed i 2020 sammenlignet med 2019.

Figurerne 8.8 og 8.9 illustrerer de to hypoteser.



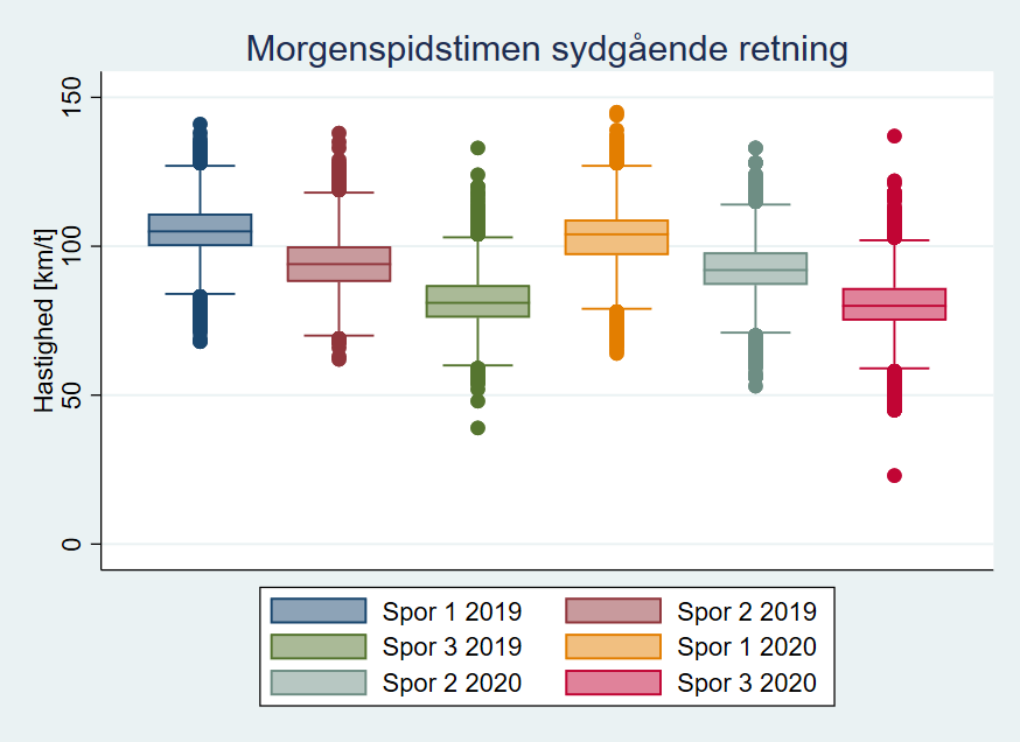
Figur 8.8. Hypotese 1: lavere variation i hastighed blandt trafikanter i det enkelte spor.



Figur 8.9. Hypotese 2: lavere variation i hastighed blandt trafikanterne i de tre spor.

Hypotese 1 skal dermed forstås som en undersøgelse af ændringen i variationen i hastigheden i det *enkelte* spor fra 2019 til 2020, hvor det i hypotese 2 undersøges, om der har været en ændring i variationen i hastigheden *mellem* sporene fra 2019 til 2020.

For at illustrere variation i hastighed udarbejdes boxplot over de registrerede hastigheder. Figur 8.10, viser et eksempel på et boxplot ved Limfjordstunnelen i sydgående retning i morgenspidstimen den 15.01.2019 sammenlignet med den 15.01.2020.



Figur 8.10. Variation i hastighed fra synkroniseret flow opstår (1.200 kt/t/spor) til trafiksammenbruddet forekommer ved Limfjordstunnelen, i morgenspidstimen i sydgående retning for den 15.01.2019 sammenlignet med den 15.01.2020.

I Tabel 8.4 fremgår kvartilerne fra ovenstående figur.

	Hastighed [km/t]					
	Spor 1		**Spor 2**		**Spor 3**	
	2019	**2020**	**2019**	**2020**	**2019**	**2020**
25% kvartil	99	92	86	84	77	72
Median	105	102	93	92	85	82
75% kvartil	110	108	101	99	93	88

Tabel 8.4. 25%-kvartil, median og 75%-kvartil over hastighederne i perioden med synkroniseret flow til trafiksammenbrud for Limfjordstunnelen i morgenspidstimen i sydgående retning, 15.01.2019 sammenlignet med 15.01.2020.

Hvis den nye styringsalgoritme har haft en effekt på hastighedsharmoniseringen fra 2019 til 2020, vil følgende gøre sig gældende for ovenstående boxplot:

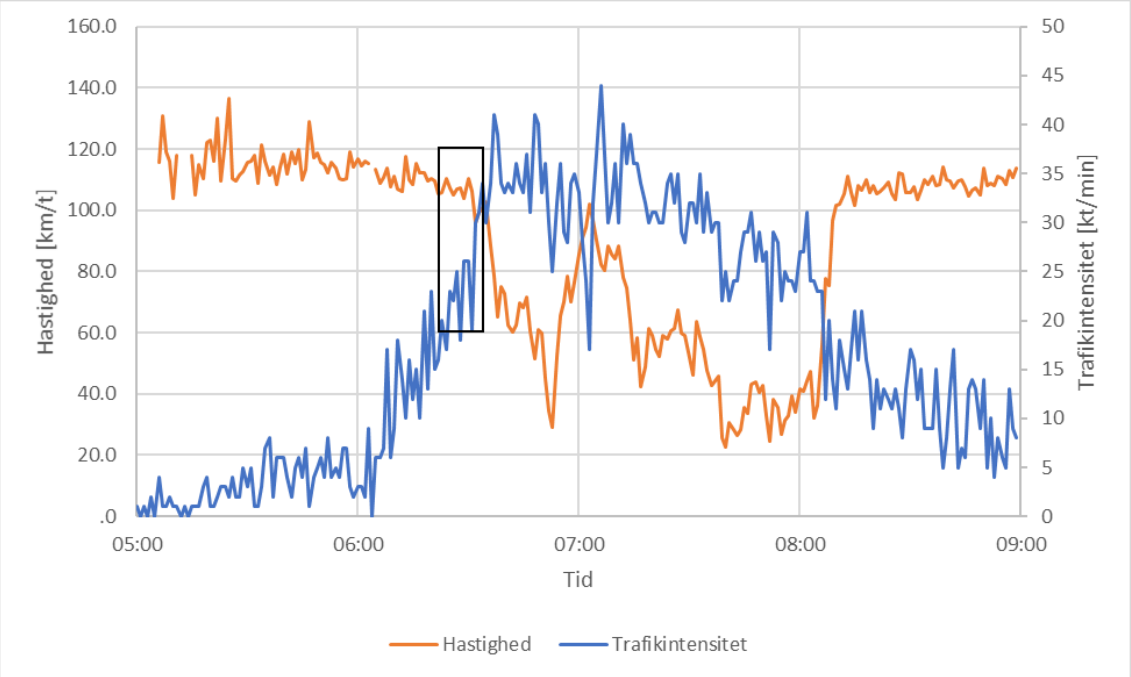
Hypotese 1: Boxplottene for 2020 vil have 25% og 75%-fraktiler, som symboliseres ved de øverste og nederste vandrette linjer i boksene til at ligge tættere på den vandrette streg i boksen, som symboliserer medianen. Dermed er der mindre variation i de registrerede hastigheder internt i sporene.

Hypotese 2: De tre boxplots til højre (2020) på ovenstående graf vil i højere grad være identiske med hinanden i forhold til de tre boxplots til venstre (2019).

Hvorvidt der har været en øget hastighedsharmonisering, konkluderes ved en t-test på variansen i de registrerede hastigheder inden for hvert spor og en ANOVA-test for variansen i de registrerede hastigheder mellem sporene. De to statistiske tests er beskrevet i kapitel 3. De beregnede variationer af hastigheden for de enkelte dage, samt resultaterne for de statistiske test for Limfjordstunnelen og M3 fremgår af bilag D.

Tidsrum for analyse

Af litteraturstudiet (kapitel 6) kunne det konkluderes, at variable hastighedstavler har en effekt på trafikafviklingen i situationen før, at trafiksammenbruddet forekommer. I tilfælde af, at et trafiksammenbrud opstår, har de variable tavler meget lav til ingen effekt på trafikken. For at vurdere den nye styringsalgoritmes effekt på hastighedsharmonisering, tager denne analyse derfor udgangspunkt i en undersøgelse af variationen i hastighederne i tidsrummet fra synkroniseret flow opstår (1.200 kt/t/spor) til trafiksammenbruddet forekommer. På Figur 8.11 fremgår et eksempel på, hvornår der måles på variation i hastighederne ved Limfjordstunnelen den 15.01.2019.

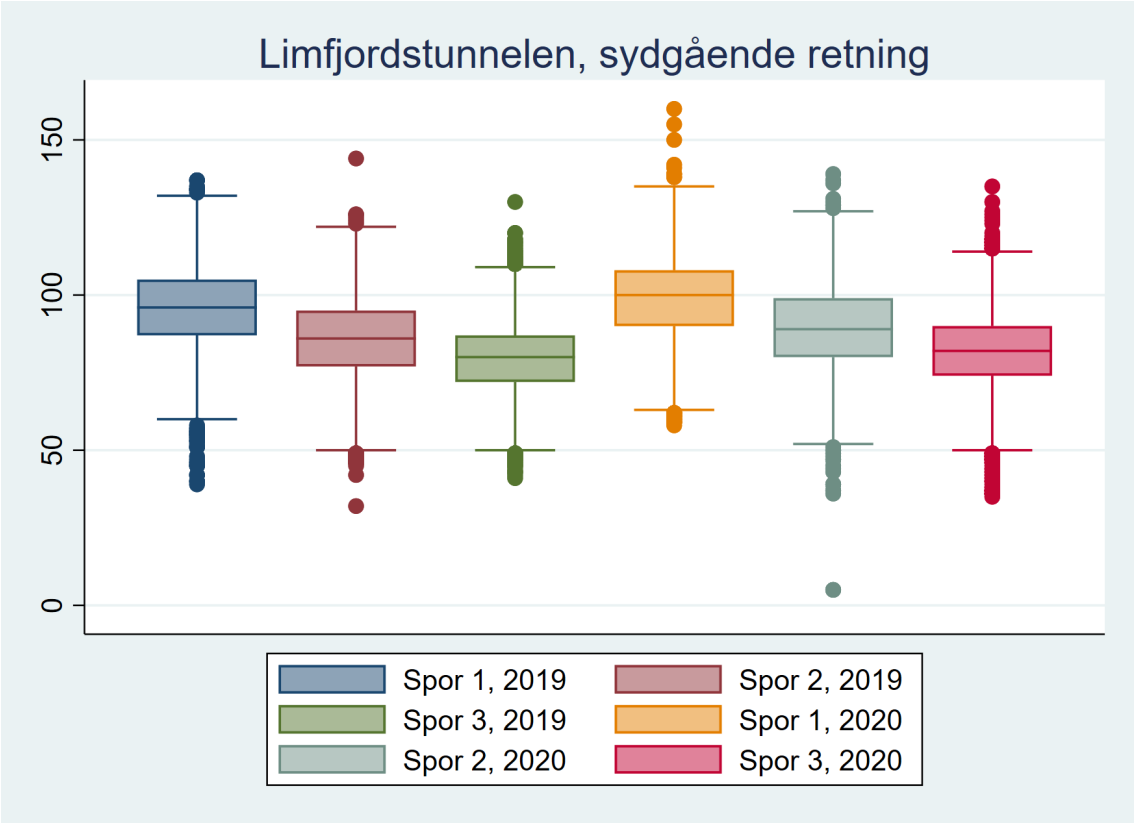


Figur 8.11. Trafikintensiteten og hastigheden i morgenspidstimen for Limfjordstunnelen for spor 1 den 15.01.2019. Den sorte kasse indikerer tidsrummet hvor variation i hastigheden analyseres

I det følgende afsnit undersøges det, om ændringen i styringsalgoritmen har medført en øget hastighedsharmonisering internt i sporene og sporene imellem.

Resultater for Limfjordstunnelen

For at visualisere om der har været en effekt på hastighedsharmoniseringen fra synkroniseret flow til trafiksammenbrud opstår, er de registrerede kørte hastigheder for hvert spor i 2019 og 2020 illustreret i et boxplot. Se Figur 8.12 for morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen.



Figur 8.12. Boxplot over hastigheden fra synkroniseret flow til trafiksammenbruddet opstår for Limfjordstunnelen i morgenspidstimen for sydgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

Ud fra figuren fremgår det, at hastigheden generelt er højere i 2020 sammenlignet med 2019, men variationen i hastighederne er umiddelbart identiske. I bilag C fremgår boxplottene for de resterende tre analysepunkter. På boxplottene fremgår der ikke en entydig tendens til hastighedsharmonisering, dog er hastigheden blevet forøget i 2020 inden trafiksammenbrud for punktet ved Humlebakken i eftermiddagsspidstimen i nordgående retning.

I Tabel 8.5 fremgår de tilhørende kvartiler for ovenstående Figur 8.12.

	Hastighed [km/t]					
	Spor 1		**Spor 2**		**Spor 3**	
	2019	**2020**	**2019**	**2020**	**2019**	**2020**
25% kvartil	87	90	77	80	72	74
Median	96	100	86	89	80	82
75% kvartil	105	108	95	99	87	90

Tabel 8.5. 25%-kvartil, median og 75%-kvartil over hastighederne i perioden fra synkroniseret flow til trafiksammenbrud for Limfjordstunnelen i morgenspidstimen i sydgående retning for 2019 sammenlignet med 2020.

For at konkludere på hypotese 1 om, hvorvidt der har været en øget hastighedsharmonisering fra det enkelte spor i 2019 til 2020, udføres der en uparret t-test på variansen. Resultaterne for morgen- og eftermiddagsspidstimen er angivet i Tabel 8.6.

H_0-hypotese		Varians 2019 ≤ 2020	
Morgenspidstimen, sydgående	Frederikshavn	Spor 1	p = 0,01
		Spor 2	p = 0,06
	Limfjordstunnelen	Spor 1	p = 0,14
		Spor 2	p = 0,12
		Spor 3	p = 0,01
Eftermiddagsspidstimen, nordgående	Humlebakken	Spor 1	p = 0,10
		Spor 2	p = 0,37
	Limfjordstunnelen	Spor 1	p = 0,19
		Spor 2	p = 0,45
		Spor 3	p = 0,21

Tabel 8.6. P-værdien for en uparret t-test med to stikprøver for Limfjordstunnelen i morgen- og eftermiddagsspidstimen.

Ud fra den uparrede t-test for variansen kan det konkluderes, at det kun er ved morgenspidstimen i spor 1 ved Frederikshavnmotorvejen og spor 3 ved Limfjordstunnelen, hvor der har været en signifikant forskel i hastighedsharmoniseringen for det enkelte spor i 2020 sammenlignet med 2019. Dermed kan der konkluderes, at styringsalgoritmen overordnet set ikke har haft en effekt på hastighedsharmonisering i de enkelte spor fra 2019 til 2020.

Hypotese 2 vedrørende hastighedsharmonisering mellem sporene undersøges ved en ANOVA-test. Hvis F-værdien er mindre i 2020 end i 2019 kan det konkluderes, at der har været en større hastighedsharmonisering mellem sporene. En p-værdi <0,05 angiver, at der er en signifikant øget variation mellem sporene og dermed kan H_0-hypotesen at $\text{variansen}_{(\text{mellem sporene})} = \text{variansen}_{(\text{indenfor hvert spor})}$ forkastes.

H_0-hypotese		Varians F-værdi 2019 ≤ 2020		
Morgenspidstimen, sydgående	Frederikshavn	2019	F = 0,37	p = 0,55
		2020	F = 1,12	p = 0,30
	Limfjordstunnelen	2019	F = 1,11	p = 0,34
		2020	F = 0,26	p = 0,77
Eftermiddagsspidstimen, nordgående	Humlebakken	2019	F = 10,4	p = 0,00
		2020	F = 14,9	p = 0,00
	Limfjordstunnelen	2019	F = 14,01	p = 0,00
		2020	F = 20,07	p = 0,00

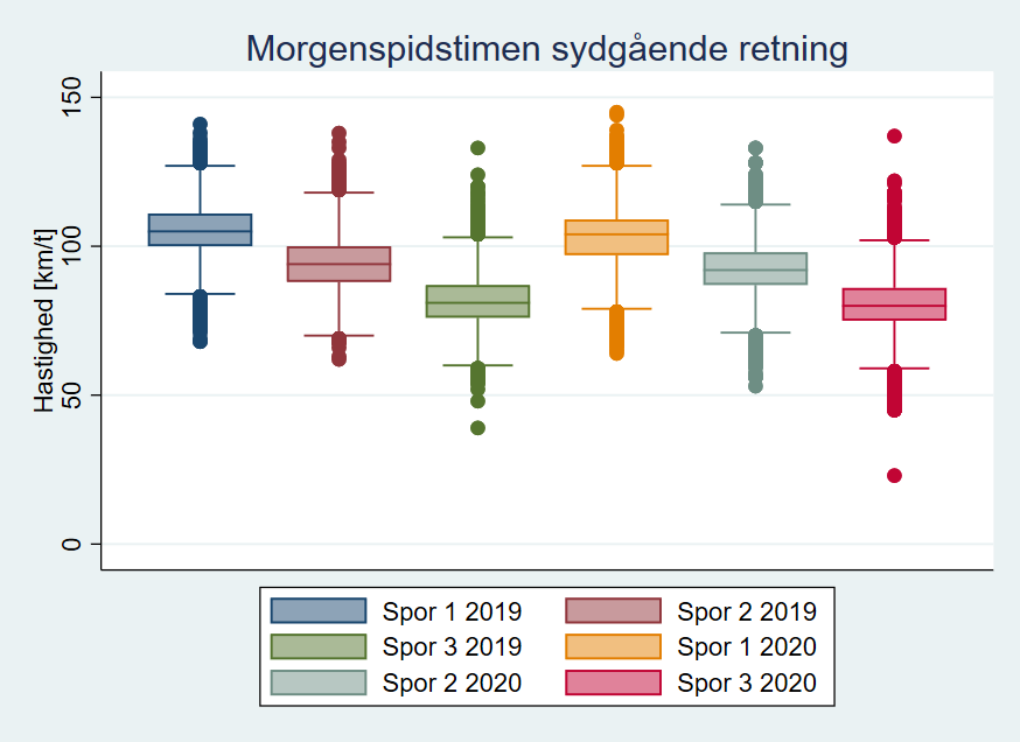
Tabel 8.7. F-værdien og p-værdien for en ANOVA-test for Limfjordstunnelen i morgen- og eftermiddagsspidstimen.

Ud fra ovenstående tabel kan det observeres, at der er en signifikant forøgelse i variation i hastighederne i nordgående retning i eftermiddagsspidstimen. Dermed kan det konkluderes, at der har været en øget variation i hastighederne imellem sporene, og at den nye styringsalgoritme dermed ikke har haft den ønskede effekt for hastighedsharmoniseringen

for nordgående retning i eftermiddagsspidstimen. For morgenspidstimen i sydgående retning fremgår det at hastighedsharmoniseringen bliver opretholdt i analysepunktet Frederikshavn, da F-værdien her er lig med 1. I analysepunktet Limfjordstunnelen i morgenspidstimen ses der en forbedring af hastighedsharmoniseringen imellem sporene, da F-værdien for 2020 er mindre end F-værdien for 2019.

Resultater for Motorring 3

Ud fra samme fremgangsmåde som ved Limfjordstunnelen, bestemmes det om ændringen i styringsalgoritmen har medført en større hastighedsharmonisering i 2020 i forhold til 2019 inden for hvert spor og imellem sporene ved M3. Figur 8.13 illustrerer de kørte hastigheder i fasen fra synkroniseret flow til bevægelig kø for M3 i morgenspidstimen i sydgående retning.



Figur 8.13. Boxplot over hastigheden fra synkroniseret flow til trafiksammenbrud for M3 i morgenspidstimen for sydgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

Ud fra figuren fremgår det, at der generelt ikke er en entydig ændring af hastighedsharmonisering fra synkroniseret flow til trafiksammenbruddet opstår i 2019 og 2020 i morgenspidstimen i sydgående retning. Dette er også gældende for eftermiddagsspidstimen i begge retninger. For morgenspidstimen i nordgående retning fremgår det, at trafikanterne generelt kører med højere hastighed i tidsperioden for synkroniseret flow til trafiksammenbruddet opstår i 2020 sammenlignet med 2019, se bilag C.

I Tabel 8.8 fremgår kvartilerne for morgenspidstimen i sydgående retning, der er illustreret i ovenstående Figur 8.13.

	Hastighed [km/t]					
	Spor 1		Spor 2		Spor 3	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
25% kvartil	97	97	86	86	75	75
Median	104	104	92	92	80	80
75% kvartil	109	109	98	98	85	86

Tabel 8.8. 25% kvartil, median og 75% kvartil en time før trafiksammenbruddet for M3 i morgenspidstimen for sydgående retning i 2019 og 2020.

For at konkludere på hypotese 1 udarbejdes en uparret t-test af variansen for at undersøge, om der er en statistisk signifikant forbedret hastighedsharmonisering i det enkelte spor i 2020 i forhold til i 2019. Resultaterne heraf fremgår i Tabel 8.9.

H_0-hypotese		Varians 2019 $\leq$ 2020	
Morgenspidstimen	Syd	Spor 1	p = 0,46
		Spor 2	p = 0,43
		Spor 3	p = 0,34
	Nord	Spor 1	p = 0,36
		Spor 2	p = 0,32
		Spor 3	p = 0,22
Eftermiddags-spidstimen	Syd	Spor 1	p = 0,40
		Spor 2	p = 0,13
		Spor 3	p = 0,11
	Nord	Spor 1	p = 0,24
		Spor 2	p = 0,40
		Spor 3	p = 0,41

Tabel 8.9. P-værdien for en uparret t-test med to stikprøver for M3 i morgen- og eftermiddagsspidstimen for syd- og nordgående retning.

Ud fra ovenstående tabel kan det konkluderes, at der ikke er en statistisk signifikant større hastighedsharmonisering for det enkelte spor i 2020 i forhold til i 2019 i morgen- og eftermiddagsspidstimen i både syd- og nordgående retning.

Hypotese 2 angiver om der har været en signifikant større hastighedsharmonisering imellem sporene, dette undersøges ved en ANOVA-test, hvor resultaterne heraf fremgår i Tabel 8.10.

H_0-hypotese		Varians F-værdi 2019 $\leq$ 2020		
Morgenspids-timen	Syd	2019	F = 0,12	p = 0,89
		2020	F = 0,25	p = 0,78
	Nord	2019	F = 1,25	p = 0,31
		2020	F = 3,95	p = 0,03
Eftermiddags-spidstimen	Syd	2019	F = 0,90	p = 0,42
		2020	F = 3,28	p = 0,06
	Nord	2019	F = 0,26	p = 0,78
		2020	F = 1,28	p = 0,30

Tabel 8.10. F-værdien og p-værdien for en ANOVA-test for M3 i morgen- og eftermiddagsspidstimen for syd- og nordgående retning.

Heraf kan det konkluderes, at der ikke er en signifikant større hastighedsharmonisering imellem sporene i morgen- og eftermiddagsspidstimen i syd- og nordgående retning efter ændringen af styringsalgoritmen. Dette fremgår ved, at F-værdien i 2020 er større end i 2019. Selvom hastighedsharmoniseringen imellem sporene ikke er større i 2020 i forhold til 2019, fremgår det, at der stadig er hastighedsharmonisering i morgenspidstimen i sydgående retning og i eftermiddagsspidstimen i nordgående retning. Dette kan konkluderes ud fra at F-værdien er tæt på 1 i 2020.

8.2 Rejsetider

Hvis implementeringen af den nye styringsalgoritme har haft en effekt på trafikafviklingen, er hypotesen, at dette vil kunne måles i trafikanternes rejsetider på strækningerne ved Limfjordstunnelen og M3.

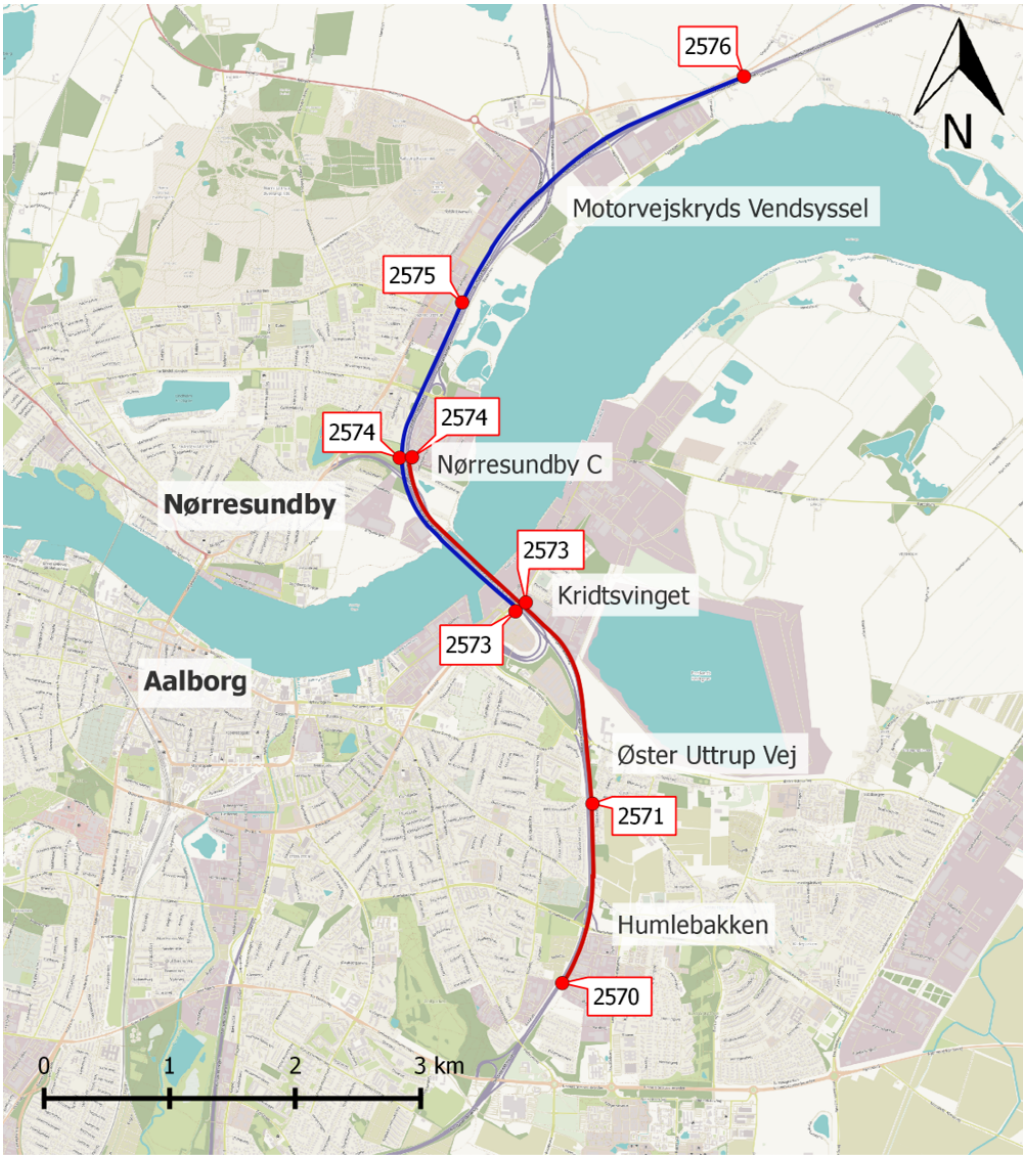
I følgende afsnit undersøges derfor, hvorvidt der har været en forbedring i rejsetiderne efter ændringen af styringsalgoritmen. Rejsetider kan bestemmes ved hjælp af forskellige metoder. Der kan blandt andet benyttes GPS- eller Bluetoothmålinger og på korte ensartede strækninger kan rejsetider også fastlægges på baggrund af strækningsmiddelhastigheden, som kan bestemmes ved hjælp af data fra spolesnitsmålinger [Vejdirektoratet, 2019].

I analyse af strækningerne ved Limfjordstunnelen benyttes Bluetoothdata leveret af BLIP Systems A/S, hvor det har været muligt direkte at trække rejsetider ud fra de dage og tidsrum, som analysen dækker over. I analyse af M3 benyttes GPS data leveret af Connected Cars A/S.

Rejsetiden bestemmes for morgen- og eftermiddagsspidstimen, ved Limfjordstunnelen med et tidsinterval på tre timer. På M3 analyseres der for et tidsinterval på fem timer. De forskellige tidsintervaller er valgt ud fra en betragtning af perioder med høj trafikintensitet som på M3 strækker sig over en længere periode end ved Limfjordstunnelen. Analysen er baseret på data fra tre sammenhængende dage uden uheld ved både Limfjordstunnelen og M3.

8.2.1 Rejsetider for Limfjordstunnelen baseret på Bluetoothdata

Ved Limfjordstunnelen benyttes Bluetoothdata til at bestemme rejsetider på en henholdsvis nordgående og sydgående strækning omkring Limfjordstunellen, se Figur 8.14.



Figur 8.14. Bluetooth rejsetids-analysestrækning ved Limfjordstunnelen.

På figuren ses de to strækninger, der analyseres for i nordgående og sydgående retning, samt Bluetoothmålestationerne, der er angivet med de respektive numre. Længden på de enkelte delstrækninger kan ses i Tabel 8.11.

	Målestation	Afstand
Sydgående	2576-2575	2,84 km
	2575-2574	1,48 km
	2574-2573	1,57 km
Nordgående	2573-2574	1,57 km
	2571-2573	1,69 km
	2570-2571	1,42 km

Tabel 8.11. Strækningsafstande mellem Bluetoothmålestationer på analysestrækningen ved Limfjordstunnelen

Resultaterne for rejsetider bestemt på baggrund af Bluetoothdata ved Limfjordstunnelen kan ses i Tabel 8.12 for sydgående morgentrafik og Tabel 8.13 for nordgående eftermiddagstrafik.

Limfjordstunnelen Bluetoothdata Sydgående morgentrafik (06:00-09:00)		**2019**	**2020**	**Forskel**
Målestation 2576-2575	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	69,7	82,5	+18,4%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	42,6	74,8	+75,6%
Målestation 2575-2574	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	59,1	48,6	-17,8%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	46,6	48,6	+4,3%
Målestation 2574-2573	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	51,9	48,8	-6,0%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	49,0	47,8	-2,4%
Samlet strækning	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	62,3	65,0	+4,3%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	45,3	61,0	+34,7%

Tabel 8.12. Rejsetider angivet som gennemsnit og median for sydgående morgentrafik ved Limfjordstunnellen i tidsrummet 06:00-09:00 i dagene tirsdag-torsdag i uge 2 henholdsvis i 2019 og i 2020. + og - angiver at der har været en stigning eller et fald fra 2019 til 2020.

Det kan ses af resultaterne i tabellen over den sydgående morgentrafik, at der overordnet set er en stigning i rejsetiden ved Limfjordstunnelen fra 2019 til 2020. Den eneste strækning, hvor der har været en reduktion i rejsetiden, er strækningen gennem Limfjordstunnelen (2574-2573). På strækningen ved Motorvejskrydset Vendsyssel (2576-2575) ses der en markant stigning i rejsetiden fra 2019 til 2020. Det ses, at de højeste rejsetider er ved strækningen ved Motorvejskrydset Vendsyssel, hvilket skyldes, at Frederikshavnmotorvejen og Hirtshalsmotorvejen på denne strækning flettes sammen og derfor er en naturlig trafikal flaskehals.

Limfjordstunnelen Bluetoothdata Nordgående eftermiddagstrafik (14:00-17:00)		**2019**	**2020**	**Forskel**
Målestation	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	65,6	51,8	-21,0%
2570-2571	Rejsetid median pr. km (sek.)	40,1	36,6	-8,7%
Målestation	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	63,7	52,6	-17,4%
2571-2573	Rejsetid median pr. km (sek.)	43,8	41,4	-5,5%
Målestation	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	46,0	44,9	-2,4%
2573-2574	Rejsetid median pr. km (sek.)	43,3	42,7	-1,4%
Samlet	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	58,3	49,8	-14,6%
strækning	Rejsetid median pr. km (sek.)	42,5	40,4	-4,9%

Tabel 8.13. Rejsetider angivet som gennemsnit og median for nordgående eftermiddagstrafik ved Limfjordstunnellen i tidsrummet 14:00-17:00 i dagene tirsdag-torsdag i uge 2 henholdsvis i 2019 og i 2020. + og - angiver at der har været en stigning eller et fald fra 2019 til 2020.

Det kan ses af resultaterne i tabellen over den nordgående eftermiddagstrafik, at der er en entydig reducering i rejsetiden på alle delstrækninger.

8.2.2 Rejsetider for Motorring 3 baseret på GPS-målinger

Ved M3 bruges GPS-målinger til at bestemme rejsetider. For at sikre, at de registrerede trafikanter ikke tager en afkørsel mellem to målestationer og derved udgår fra analysen, er det valgt at undersøge en strækning mellem to afkørsler. Strækningen der analyseres for kan ses på Figur 8.15.

Figur 8.15. Udvalgt strækning på M3 hvor der analyseres GPS-data for bestemmelse af rejsetider.

For at tage højde for personfølsomme oplysninger er området for udtrækning af data begrænset til udelukkende at inkludere strækningen på M3 ved hjælp af et polygon. Datasættet for GPS-målinger indeholder følgende elementer:

- TripId: Et unikt ID for en tur pr bil
- Breddegrad
- Længdegrad
- UTCtimestamp: Tidsstemplet

For at bestemme afstanden ud fra bredde- og længdegrader og da jorden er rund bruges Haversine formlen, der er givet ved: [GeoNet, 2017]

$$\mathrm{d} = 2 \cdot \mathrm{r} \cdot \arcsin\left(\sqrt{\sin^2 \cdot \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2 \cdot \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}\right) \tag{8.1}$$

Hvor:

d	Afstanden [km]
φ	Breddegraden for henholdsvis punkt 1 og 2
λ	Længdegraden for henholdsvis punkt 1 og 2
r	Radius for jorden = 6.371 km

Dernæst bestemmes rejsetiden ud fra tidsstemplet og tripID og afstanden bruges til at bestemme rejsetiden pr. kilometer. Hvis styringsalgoritmen har haft en effekt, er tesen, at rejsetiden for 2020 er reduceret i forhold til 2019.

Resultater for Motorring 3

Rejsetiderne for nord- og sydgående trafik i en morgen- og eftermiddagssituation fremgår af Tabel 8.14. Morgentrafikken strækker sig fra 05:00 til 10:00 og eftermiddagstrafikken strækker sig fra 13:00 til 18:00.

GPS baserede rejsetider for M3			
Gennemsnitlig rejsetid (sek. pr. km)	**2019**	**2020**	**Forskel**
Nordgående morgentrafik	89,0	92,0	+3,4%
Nordgående eftermiddagstrafik	62,0	69,0	+11,3%
Sydgående morgentrafik	53,0	59,0	+11,3%
Sydgående eftermiddagstrafik	80,0	80,0	0,0%
Rejsetid median (sek. pr. km)	**2019**	**2020**	**Forskel**
Nordgående morgentrafik	93,0	95,0	+2,2%
Nordgående eftermiddagstrafik	45,0	69,0	+53,3%
Sydgående morgentrafik	53,0	56,0	+5,7%
Sydgående eftermiddagstrafik	73,0	72,0	-1,4%

Tabel 8.14. GPS baserede rejsetider angivet som gennemsnit og median for M3 i sek. pr. km. + og - angiver at der har været en stigning eller et fald fra 2019 til 2020.

Af tabellen kan det overordnet set konkluderes, at der har været en stigning i rejsetider på den undersøgte strækning ved M3. Det ses dog, at der ikke har været en ændring i den gennemsnitlige rejsetid for eftermiddagstrafikken i sydgående retning.

8.3 Skiltede hastighed

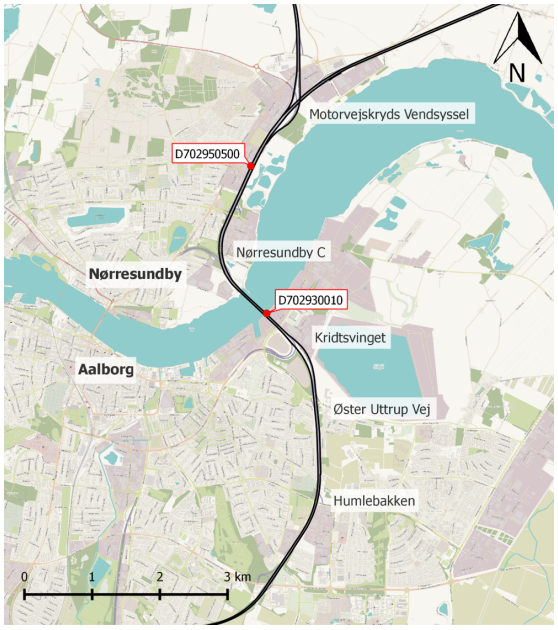
Ud fra ovenstående analyser kan det konkluderes, at der ikke har været en væsentlig effekt på trafikafviklingen efter ændringen i styringsalgoritmen. I den sammenhæng er det derfor interessant at undersøge, hvorvidt der har været en ændring i den skiltede hastighedsvisning i forhold til den kørte hastighed og trafikintensiteten fra 2019 til 2020. Analysen tager udgangspunkt i to dele:

- Hvorvidt den skiltede hastighed i 2020 i højere grad reagerer på en stigende trafikintensitet sammenlignet med 2019.

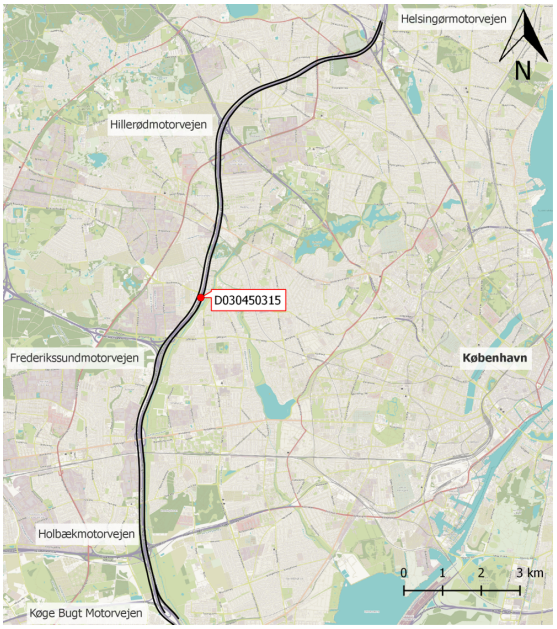
- Hvorvidt der har været en ændring i sammenspillet mellem den kørte og den viste hastighed fra 2019 til 2020.

I litteraturstudiet kapitel 6 afsnit 6.3.1 fremgik det, at den skiltede hastighed ved Limfjordtunnelen før ændringen i styringsalgoritmen følger den kørte hastighed ved et trafiksammenbrud, og at en bedre trafikafvikling formodentlig ville kunne opnås, hvis den skiltede hastighed justeres ned før det reelle trafiksammenbrud opstår.

Analysen er foretaget for tre sammenhængende dage for 2019 og for 2020 både i morgen- og eftermiddagsspidstimen. Hvis der har været uheld i de udvalgte dage, er disse dage blevet frasorteret i analysen. Der analyseres for følgende punkter ved Limfjordstunnelen og M3, se Figurerne 8.16 og 8.17 og resultaterne heraf fremgår af bilag E.



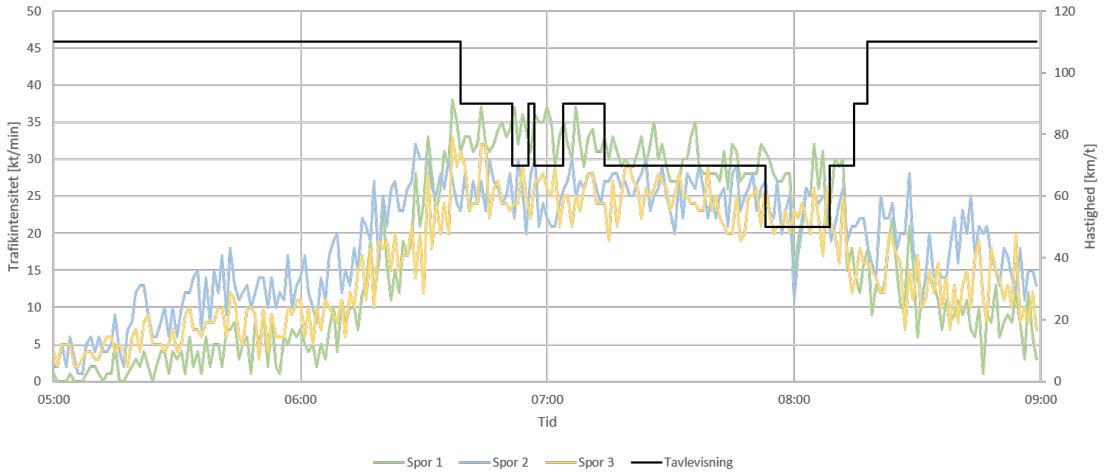
Figur 8.16. Analysepunkter ved Limfjordstunnelen. Hvor punktet på venstre side af motorvejen bruges i analysen af den sydgående morgentrafik, og punktet på højre side bruges i analysen af den nordgående eftermiddagstrafik.



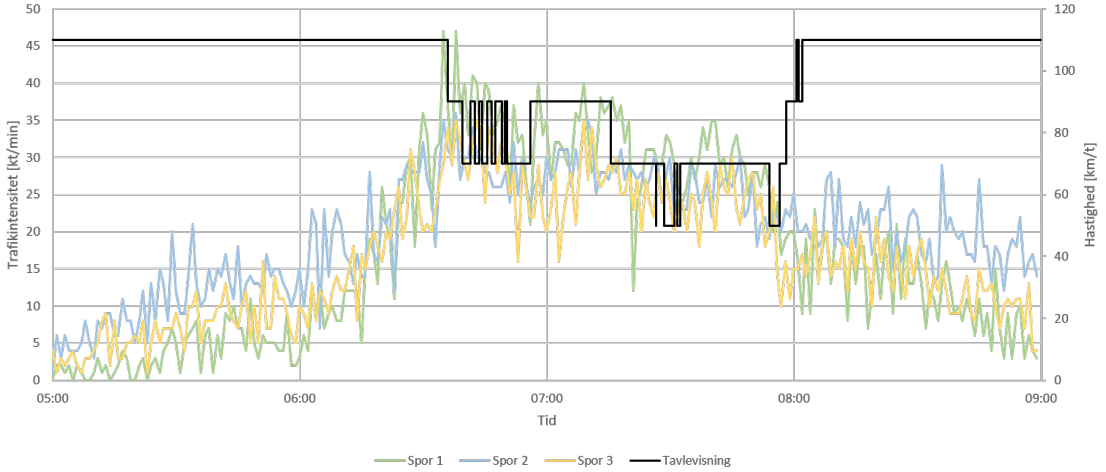
Figur 8.17. Analysepunkt ved M3. I punktet D030450315 analyseres morgen- og eftermiddagstrafikken i både nordlig og sydlig retning.

8.3.1 Resultater for Limfjordstunnelen

For at undersøge, hvordan trafikintensiteten fungerer som en styrende parameter for den skiltede hastighed på de variable hastighedstavler i 2020 ved Limfjordstunnelen, er der genereret grafer over trafikintensiteten og den skiltede hastighed. Figurerne 8.18 og 8.19 viser trafikintensiteten i morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen den 22.01.2019 og den 22.01.2020.



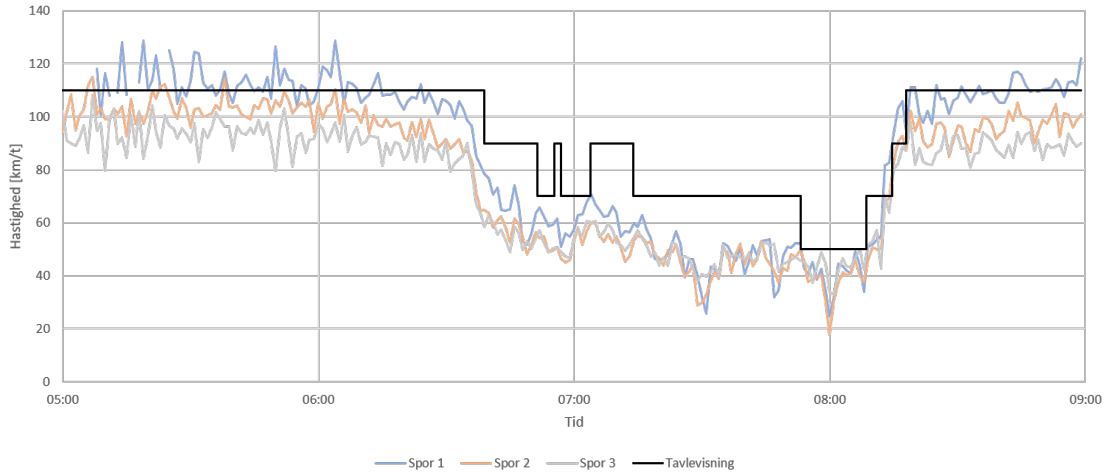
Figur 8.18. Sammenhængen mellem trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



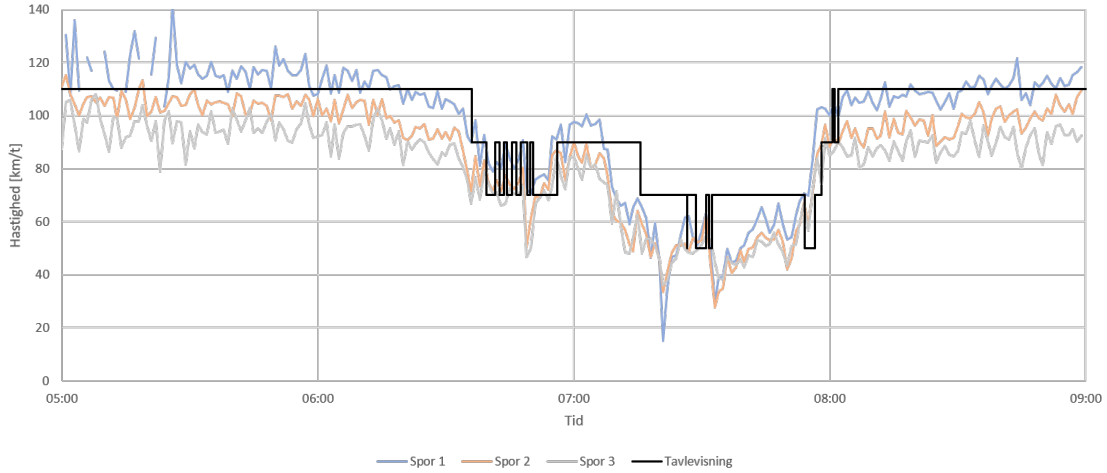
Figur 8.19. Sammenhængen mellem trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

Ud fra ovenstående figurer kan det konkluderes, at den skiltede hastighed varierer mere den 22.01.2020 end den 22.01.2019, og dermed ses der ikke en umiddelbar positiv effekt af indførslen af dobbelt tærskelværdi. Ydermere fremgår det af grafen for 2020, at trafikintensiteten fortsat er høj selvom den skiltede hastighed er sat ned. Det kan samtidig observeres, at spor 2 har den højeste trafikintensitet uden for trængselsperioden. Dette skyldes, at der tæt på den pågældende lokalitet er en afkørsel, hvor trafikanter på spor 3 drejer af fra motorvejen ved Kridtsvinget og trafikanterne på spor 1 og 2 fortsætter mod syd.

På Figurerne 8.20 og 8.21 undersøges det, hvordan den skiltede hastighed varierer i forhold til den kørte hastighed i morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen den 22.01.2019 og den 22.01.2020.



Figur 8.20. Sammenhængen mellem kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur 8.21. Sammenhængen mellem kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

Ud fra ovenstående figur for 2020 fremgår det, at den skiltede hastighed først ændres efter, de detekterede hastigheder reduceres, selvom det fremgår af Figur 8.19, at trafikintensiteten er høj i dette punkt. Hermed kan det konkluderes, at den nye styringsalgoritme ved Limfjordstunnelen i analysepunktet umiddelbart ikke tager højde for trafikintensiteten og dermed ikke fungerer efter hensigten. Yderligere fremgår det af figurerne, at de skiltede hastigheder først opjusteres efter eller samtidigt med at de kørte hastigheder stiger.

For at undersøge om der er en generel tendens for de to analysepunkter ved Limfjordstunnelen, er tidspunkterne for trængselsperioden angivet efter den skiltede hastighed og den kørte hastighed, vist i Tabel 8.15.

		2019 trængsel			2020 trængsel	
		Skiltede	**Kørte**		**Skiltede**	**Kørte**
Syd	22.01	06:38 - 08:17	06:37 - 08:14	21.01	06:37 - 08:01	06:35 - 07:58
	23.01	06:40 - 08:16	06:38 - 08:12	22.01	06:36 - 08:00	06:33 - 07:57
	24.01	06:37 - 08:36	06:35 - 08:34	23.01	06:36 - 08:12	06:34 - 08:11
Nord	22.01	11:03 - 11:07	11:02 - 11:07	21.01	15:10 - 16:31	15:06 - 16:31
	23.01	08:09 - 08:11	08:08 - 08:11	22.01	14:03 - 14:15	14:03 - 14:19
					15:16 - 17:38	15:14 - 17:48
				23.01	15:07 - 16:33	15:05 - 16:34
					19:02 - 19:49	19:03 - 19:49

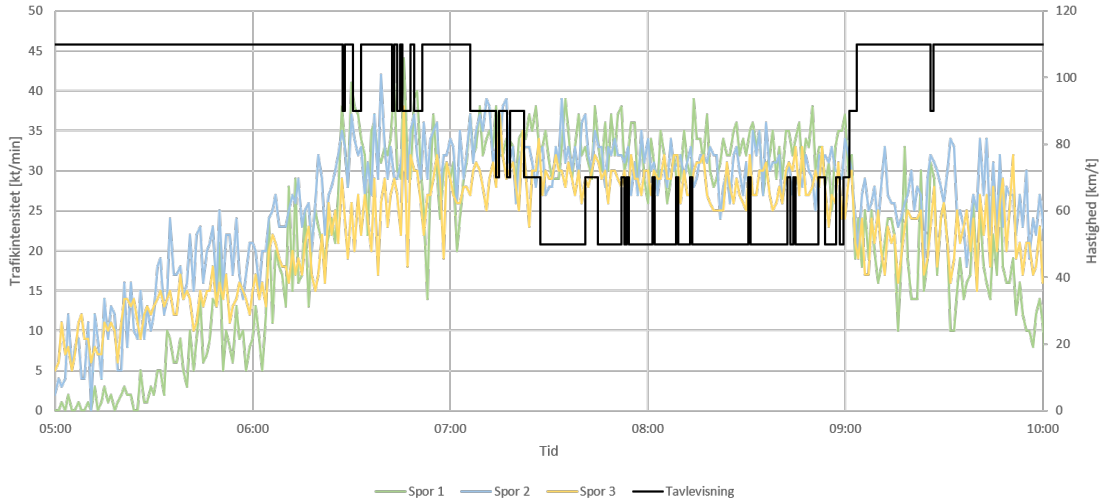
Tabel 8.15. Trængselsperioden ved de to analysepunkter ved Limfjordstunnelen angivet efter den skiltede hastighed og den kørte hastighed i 2019 og 2020.

Ud fra ovenstående tabel kan det konkluderes, at den skiltede hastighed først justeres efter, at der er sket en ændring i den kørte hastighed både i 2019 og 2020 i begge analysepunkter. Ydermere fremgår det, at trængselsperiode for analysepunktet i sydgående retning er blevet reduceret i 2020 i forhold til 2019, selvom der har været en stigning i antallet af trafikanter i tidsperioden 05:00-09:00 på 13,2% [Vejdirektoratet, 2020a]. I nordgående retning fremgår det, at der er flere trængselsperioder i 2020 for analysepunktet end det er tilfældet i 2019, samt at der ikke var trængsel i eftermiddagsspidstimerne i 2019.

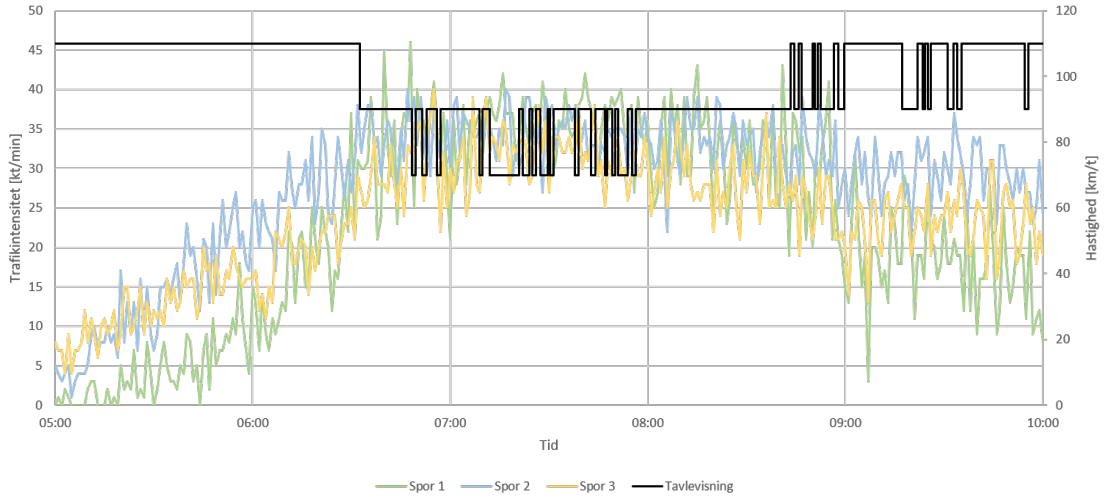
8.3.2 Resultater for Motorring 3

Ud fra samme fremgangsmåde som ved Limfjordstunnelen analyseres det på M3, hvordan den skiltede hastighed justeres både i forhold til trafikintensiteten og den kørte hastighed før og efter ændringen af styringsalgoritmen.

Figurerne 8.22 og 8.23 viser trafikintensiteten i morgenspidstimen i sydgående retning ved M3 og den skiltede hastighed for den 22.01.2019 og den 22.01.2020, for at undersøge om trafikintensiteten har en støre betydning for den skiltede hastighed i 2020 frem for 2019.



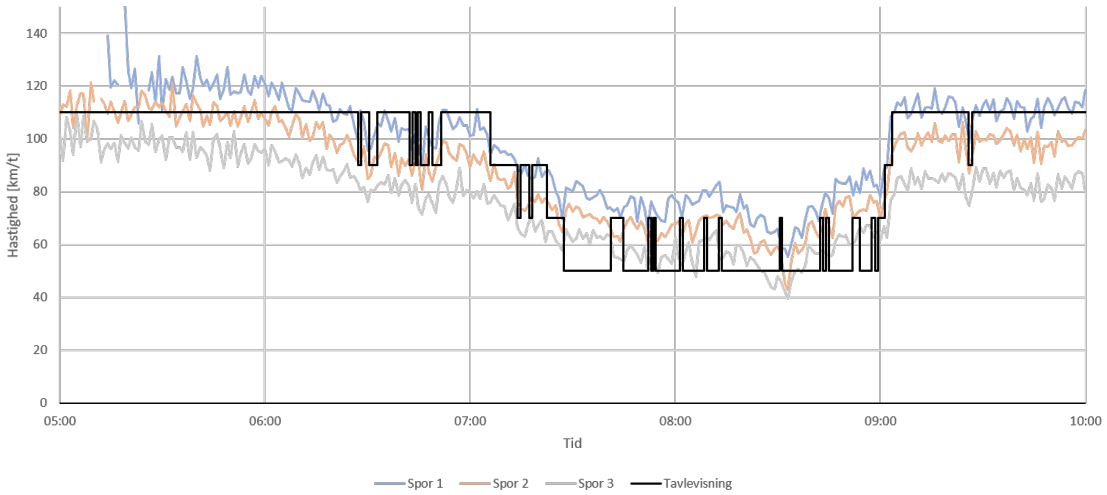
Figur 8.22. Sammenhængen mellem trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



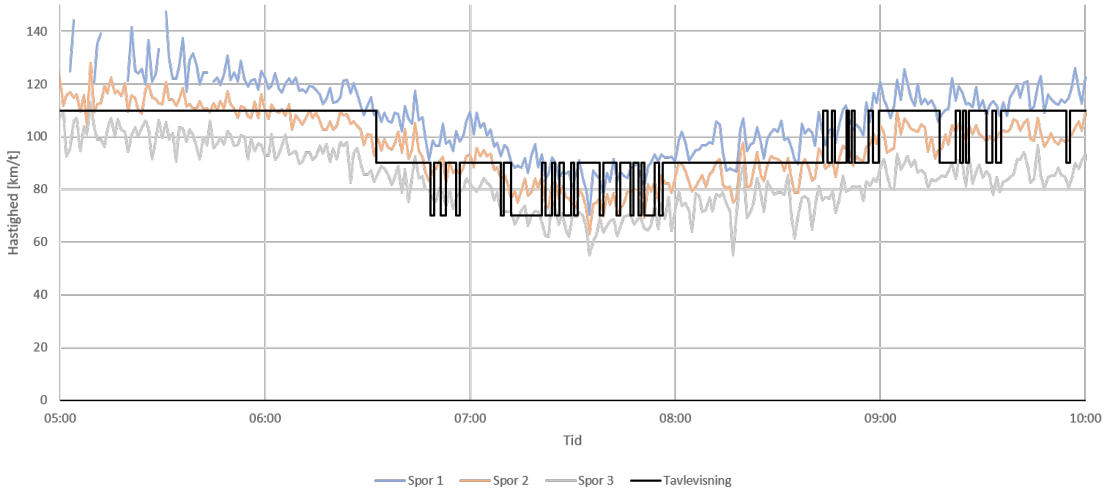
Figur 8.23. Sammenhængen mellem trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

Ud fra ovenstående figurer fremgår det, at der en forskel i den skiltede hastighed fra 2019 til 2020. Den skiltede hastighed den 22.01.2020 kommer ikke under 70 km/t, som er tilfældet den 22.01.2019, hvilket kan skyldes ændringen i styringsalgoritmen, hvor trafikintensiteten er en styrende parameter. Ydermere fremgår det, at trafikintensiteten for spor 1 stadig er stigende efter, at den skiltede hastighed er sat ned. I forhold til implementering af dobbelt tærskelværdi fremgår der i 2020 stadig mange skift lige efter hinanden i den skiltede hastighed.

På Figurerne 8.24 og 8.25 illustreres det, hvordan den skiltede hastighed varierer i forhold til den kørte hastighed i morgenspidstimen ved M3 den 22.01.2019 og den 22.01.2020.



Figur 8.24. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur 8.25. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

Ud fra ovenstående figurer fremgår det, at den skiltede hastighed for 2019 justeres efter eller samtidig med, at der sker ændringer i den kørte hastighed, hvorimod den skiltede hastighed justeres ned før den kørte hastighed falder i 2020 både i morgen- og eftermiddagsspidstimen, se bilag E for de resterende dage. Når den skiltede hastighed skal sættes op efter trængselsperioden, sker det efter eller samtidig med den kørte hastighed. Ydermere fremgår det, at hastighedsharmoniseringen mellem sporene ikke er blevet forbedret i 2020 frem for 2019, hvilket også var konklusionen i ovenstående analyse. For at undersøge om der er en generel tendens for analysepunktet ved M3, er tidspunkterne for trængselsperioden angivet efter den skiltede hastighed og den kørte hastighed, vist i Tabel 8.16.

			2019 trængsel			2020 trængsel	
			Skiltede	**Kørte**		**Skiltede**	**Kørte**
Morgen-spids-timen	S	22.01	07:06-09:03	06:55-09:03	21.01	06:24-09:08	06:37-09:08
		24.01	07:09-08:58	07:11-09:03	22.01	06:32-08:59	06:32-08:56
	N	22.01	06:15-09:02	06:12-08:58	21.01	06:11-09:50	06:11-09:47
		24.01	06:13-08:46	06:11-08:41	22.01	06:08-09:04	06:09-09:02
Eftermiddags-spids-timen	S	22.01	14:15-16:08	14:11-16:08	21.01	13:29-17:35	13:34-17:36
		23.01	13:57-16:54	13:55-16:54	23.01	13:19-17:54	13:27-17:53
		24.01	14:04-16:39	14:02-16:35			
	N	22.01	15:16-17:04	15:15-16:51	21.01	14:32- 17:43	14:49-17:46
		23.01	15:16-16:57	15:16-16:51	23.01	14:56- 17:09	15:01-17:07
		24.01	15:25-16:01	15:21-15:57			

Tabel 8.16. Trængselsperioden ved analysepunktet på M3 angivet efter den skiltede hastighed og den kørte hastighed i 2019 og 2020 i morgen- og eftermiddagsspidstimen i syd- (S) og nordgående (N) retning.

Ud fra ovenstående tabel kan det konkluderes, at ændringen af styringsalgoritmen for M3 har medført, at den skiltede hastighed justeres før eller samtidig med trængselsperiodens begyndelse i 2020 i forhold til 2019. I slutningen af trængselsperioden har ændringen i styringsalgoritmen ikke haft nogen effekt, da den skiltede hastighed både i 2019 og 2020 justeres efter eller samtidig med de kørte hastigheder. Ydermere fremgår det, at trængselsperioden generelt er blevet forlænget i 2020 frem for 2019 i de udvalgte dage. Ud fra spoledata udtræk fremgår det, at trafikmængden i timerne 05:00 til 19:00 i de undersøgte dage er forholdsvis ens med en forskel for nordgående retning på -1,5% og sydgående retning op 0,4% [Vejdirektoratet, 2020a].

Del III

Metodekritik, diskussion og konklusion.

Metodekritik 9

9.1 Dataindsamling

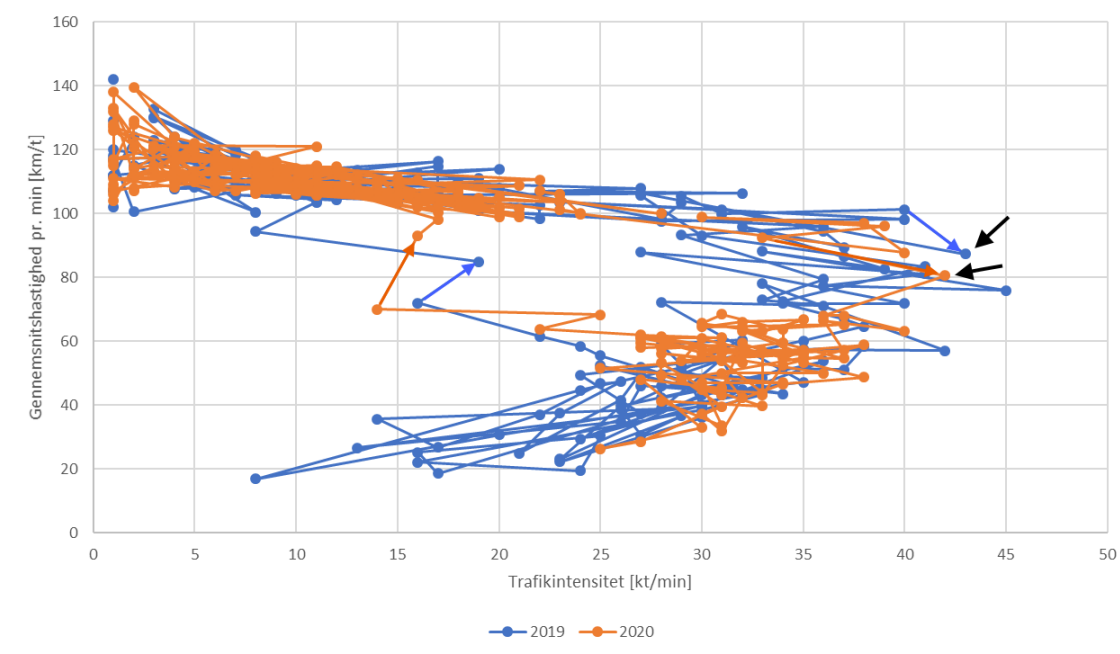
I dette afgangsprojekt analyseres trafikafviklingen for udvalgte dage i januar måned 2019 før ændringen af styringsalgoritmen og januar måned 2020 efter ændringen i styringsalgoritmen. Der kan argumenteres for, at den statistiske styrke af analysen af effekten ved de variable hastighedstavler havde været større, hvis trafikafviklingen var analyseret for en længere periode, således at der var et større datagrundlag at basere konklusioner på. At analysen af trafikafviklingen er begrænset til en tidsperiode på to måneder, skyldes, at den nye styringsalgoritme kun har været i funktion siden december 2019. Det havde været optimalt, hvis analysen for trafikafviklingen også havde inkluderet data for foråret 2020, men Coronaepidemiens effekt på trafikafviklingen, der startede i midten af marts, blev vurderet til ikke at give et repræsentativt datagrundlag. Det har derfor kun været muligt at sammenligne trafikafviklingen med de to forskellige styringsalgoritmer for henholdsvis januar 2019 og 2020.

Det kunne eksempelvis have været relevant at inkludere flere dage i analysen for skiltede hastigheder, da analysen kun tager udgangspunkt i skiltningen for tre dage i 2019 og 2020. En analyseperiode på flere dage havde givet et bedre grundlag at konkludere på, hvorvidt der var en tendens til, at skiltningen på de variable tavler var blevet bedre fra 2019 til 2020.

Ydermere kan der også argumenteres for, at analyse af trafikafviklingen i flere detektorsnit ved Limfjordstunnelen og M3 havde været hensigtsmæssigt. Dette ville have medvirket til en undersøgelse af, om ændringen i styringsalgoritmen har haft en generel effekt på hele strækningen fremfor et afgrænset punkt på strækningerne.

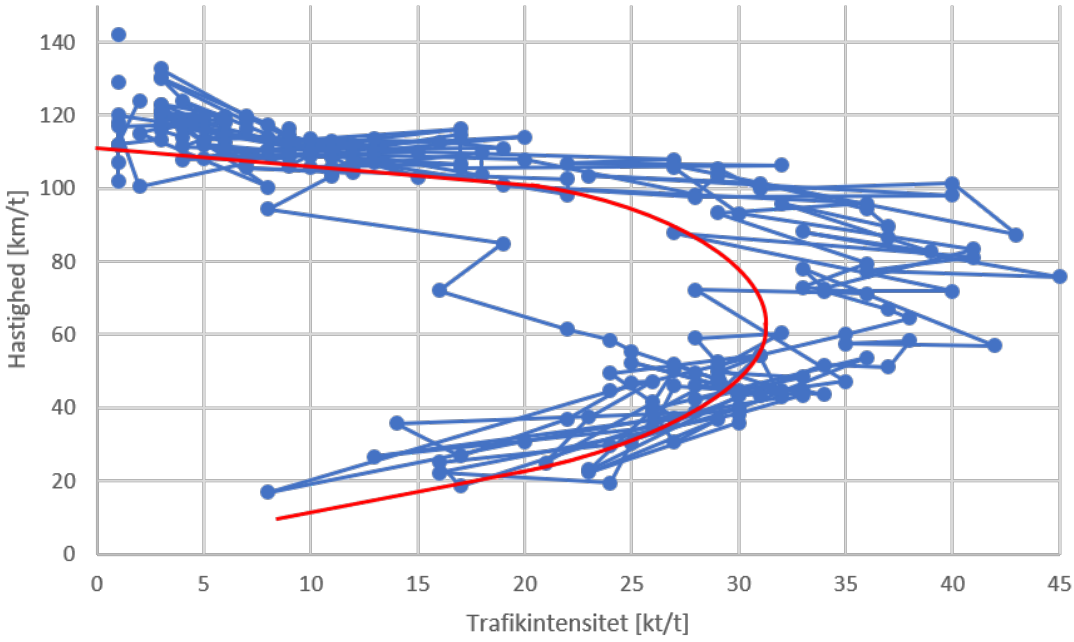
9.2 Kapacitet

I analysen af kapaciteten, kapitel 8.1.1, blev den kritiske hastighed og trafikintensitet fundet ved observation af data for alle dage. Punktet for den kritiske hastighed og trafikintensitet blev bestemt som den højeste hastighed og trafikintensitet, der er registreret før et trafiksammenbrud. Ved at tage et gennemsnit af de registrerede hastigheder og trafikintensiteter i fem minutter op til trafiksammenbruddet forekom, blev der taget højde for udsving. Et eksempel på denne metode er vist på Figur 9.1. Figuren viser et eksempel på et speed-flow diagram for morgenspidstimen i perioden 05:00-09:00 ved Limfjordstunnelen i sydgående retning den 08.01.2019 og den 08.01.2020 i spor 1.



Figur 9.1. Speed-flow diagram for morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen i sydgående retning den 08.01.2019 og den 08.01.2020, spor 1.

Den kritiske hastighed og trafikintensitet kan også fastlægges ved at beregne punktet for parablens toppunkt i et speed-flow diagram. Denne metode tager udgangspunkt i en polynomisk andengrads tendenslinje mellem de registrerede hastigheder, hvor tendenslinjen tvinges igennem punktet (0,0). Den kritiske hastighed og trafikintensitet er angivet som toppunktet på denne tendenslinje. En illustration af denne metode fremgår af Figur 9.2.



Figur 9.2. Speed-flow diagram med en illustration af en polynomisk andengrads tendenslinje for morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen i sydgående retning den 08.01.2019 for spor 1.

Toppunktet for en andengradslinje er angivet ved følgende formel:

$$x = \frac{-b}{2 \cdot a} \qquad y = a \cdot x^2 + b \cdot x \tag{9.1}$$

For at sammenligne disse to metoder med hinanden er de kritiske hastigheder og trafikintensiteter angivet i Tabel 9.1, samt deres procentvise forskel. For begge metoder anvendes punktet ved Limfjordstunnelen for morgenspidstimen i sydgående retning for år 2019. Metode 1 (M1) angiver resultaterne for metoden, hvor dataene undersøges for den højeste trafikintensitet og hastighed inden et trafikalt sammenbrud og metode 2 (M2) angiver resultaterne for metoden for toppunktet for tendenslinjen.

			Krit. hastighed [km/t]			**Krit. trafikintensitet [kt/min]**		
			M1	**M2**	**Forskel**	**M1**	**M2**	**Forskel**
Morgen-		Spor 1	87,9	61,2	+ 30,3%	32,2	31,5	+ 2,3%
spids-	Limtunnelen	Spor 2	77,3	59,5	+ 23,1%	28,4	28,1	+ 1,0%
timen		Spor 3	74,9	53,1	+ 29,2%	26,3	25,3	+ 3,8%

Tabel 9.1. Medianen for den kritisk hastighed og trafikintensitet, samt den procentvise forskel mellem metode (M1) og metode (M2) for kapacitetsanalysen. For punktet ved Limfjordstunnelen for morgenspidstimen i sydgående retning for år 2019. + angiver at der har været en stigning i forskellen mellem metode (M1) og metode (M2).

Ud fra ovenstående tabel fremgår det, at der er en markant større forskel i den kritiske hastighed i forhold til om metode (M1) eller metode (M2) anvendes til at fastlægge kapaciteten. Denne forskel er ikke lige så tydelig for den kritiske trafikintensitet, hvor punktet for den kritiske trafikintensitet er højere for metode (M1) end metode (M2).

Fordelene ved at bruge metode (M1), hvor kapaciteten fastlægges ud fra den højeste trafikintensitet og hastighed lige inden sammenbruddet, er, at dette giver et mere realistisk billede af trafikafviklingen lige op til sammenbruddet. Ved metode (M2), hvor den kritiske hastighed og trafikintensitet angives ud fra parablens toppunkt, giver det typisk et resultat, som er mindre end den højeste hastighed og trafikintensitet, der blev målt inden et trafikalt sammenbrud. Fordelen ved at bruge metode (M2) er, at denne metode er baseret ud fra en matematisk model.

9.3 Hastighedsharmonisering

I analysen for hastighedsharmonisering, blev variation i hastighederne målt fra det første tidspunkt, hvor der blev registreret en trafikintensitet på 1.200 kt/t/spor og frem til trafiksammenbruddet. Valget af denne grænse på 1.200 kt/t/spor er fastlagt på baggrund af en anden rapport [1], som også analyserer variable hastighedstavlers effekt på trafikafviklingen, og hvor der måles på hastigheder fra omkring 1.000 kt/t/spor. Der kan argumenteres for, at grænsen på 1.200 kt/t/spor, som der blev målt på hastigheder fra, kunne have været fastlagt ud fra en lavere trafikintensitet. Eksempelvis kunne

[1] [Lucky, Eng, 2014]

hastighederne måles fra det tidspunkt, hvor 50% af kapaciteten er udnyttet. Dermed skulle der måles hastigheder fra det første tidspunkt, hvor trafikintensiteten blev målt til 850 kt/t/spor, da kapaciteten pr. time pr. spor er fastlagt til 1.700 kt/spor af Vejdirektoratet [Vejdirektoratet, 2019]. Hvis grænsen var rykket ned til 850 kt/t/spor antages det, at variationen i hastighederne havde været højere, da lavere trafiktæthed medfører, at trafikanter kører med mere varierede hastigheder.

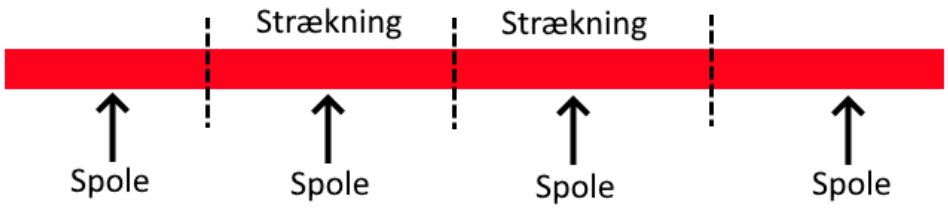
9.4 Rejesetider

I afsnittet 8.2, analyse af rejsetider ved Limfjordstunnelen og på M3, blev der benyttet to forskellige metoder til at bestemme rejsetiderne. De to metoder, som blev brugt, var Bluetoothdata ved Limfjordstunnelen og GPS-data på M3. For at validere resultaterne fra disse to metoder sammenlignes rejsetiderne ud fra en tredje metode, som er rejsetider beregnet ud fra spoledata fra Vejdirektoratets dataservice, Mastra.

9.4.1 Rejsetid baseret på spoledata

Rejsetiden bestemmes ud fra samme tidsperiode som i analyseafsnittet for Limfjordstunnelen for morgen- og eftermiddagsspidstimen med et tidsinterval på tre timer. På M3 analyseres kun for morgenspidstimen i nordgående retning, da det ikke har været muligt at finde tilstrækkelige sammenhængende detektorsnit til at kunne udføre en sammenlignelig analyse af trafikken i den sydgående retning. På M3 analyseres for et tidsinterval på fem timer, grundet en længere trængselsperiode end det er tilfældet ved Limfjordstunnelen.

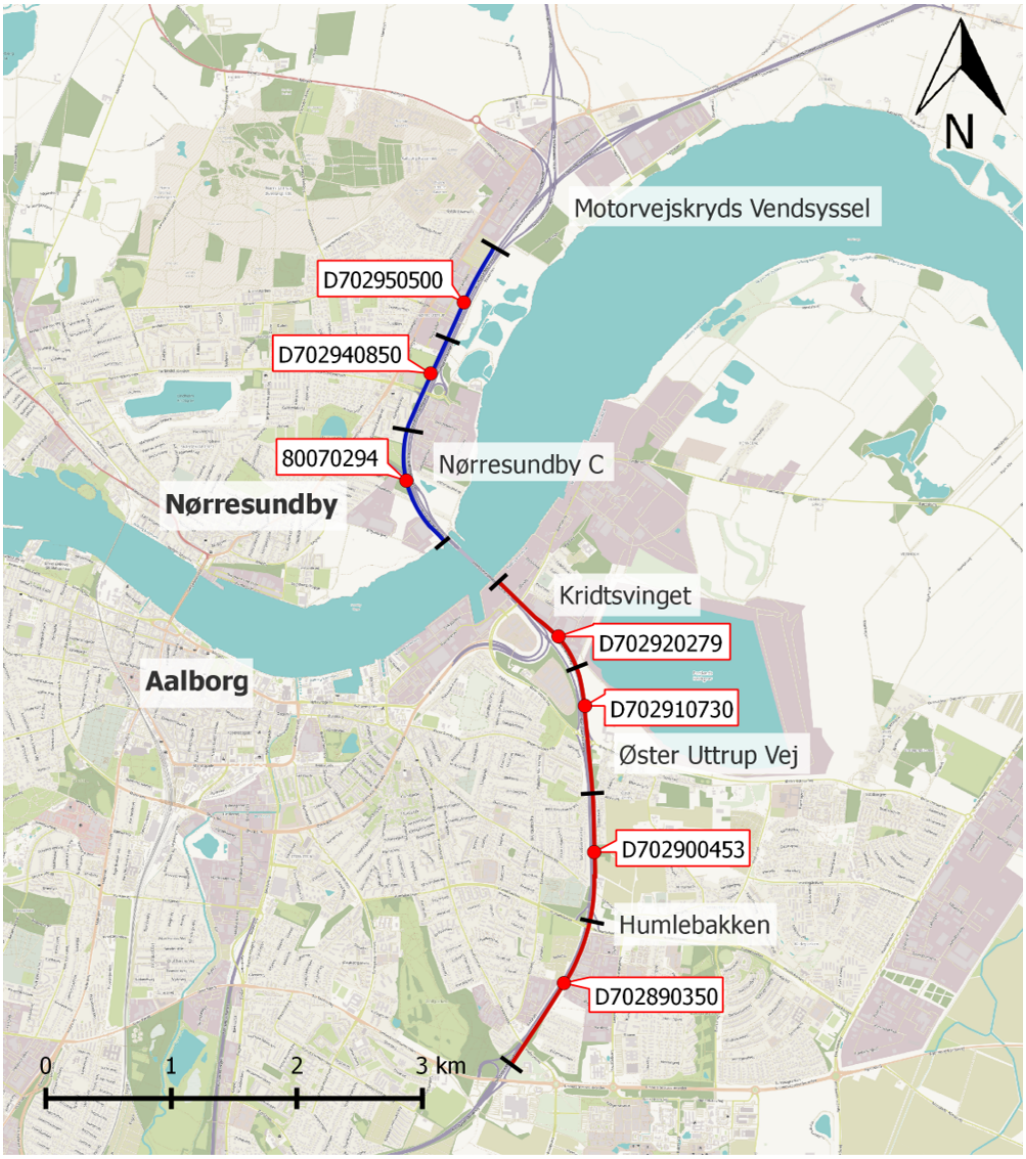
Strækningsmiddelhastigheden bestemmes grundlæggende ud fra en trafikants passagetid, som måles ved ind- og udkørsel på en strækning, hvilket er tilfældet med GPS eller Bluetooth, hvor track-ID kan beregne den enkelte trafikants position og hastighed. Ved spoledata er det ikke muligt at knytte en track-ID på de enkelte trafikanter. For at bestemme rejsetiden ud fra spolesnitsmålinger er det derfor nødvendigt at dele motorvejsstrækningerne op i homogene delstrækninger, hvor antallet af spor er ens. For at bestemme afstanden for hvert spolesnit, tildeles halvdelen af afstanden til spolesnittet før og efter, se Figur 9.3. [Vejdirektoratet, 2019]



Figur 9.3. Metode til opdeling af motorvejen i homogene delstækninger mellem hver spole.

Limfjordstunnelen

Opdelingen i delstrækninger baseres på sammenhængende spolesnit. Af Figur 9.4 fremgår placeringen af spolesnittene og en illustration af de tilhørende delstrækning.



Figur 9.4. Placering af spolesnit ved Limfjorden med illustration af tilhørende analysestrækning.

Baseret på spolesnittenes lokation kan de udvalgte delstrækningsafstande fastlægges og allokeres til de enkelte spolesnit. Strækningsafstandene for de fastlagte delstrækninger kan ses i Tabel 9.2.

	Spolesnit	Afstand
Sydgående	D702950500	0,77 km
	D702940850	0,90 km
	80070294	0,91 km
Nordgående	D702890350	1,47 km
	D702900453	1,19 km
	D702910730	0,87 km
	D702920279	0,96 km

Tabel 9.2. Delstrækningsafstande tildelt til hvert spolesnit på analysestrækningen ved Limfjordstunnelen.

Det antages, at trafikanterne har kørt med samme hastighed over delstrækningerne i forhold til de målte hastigheder i de tilhørende spolesnit. [Vejdirektoratet, 2019]

Da hastighed og afstand er fastlagt for hvert spolesnit, kan rejsetiden udregnes. Se Tabel 9.3 og 9.4 for trafikmængde, og rejsetiden bestemt som gennemsnittet samt medianen i morgentrafikken og eftermiddagstrafikken.

Limfjordstunnelen Spoledata Sydgående morgentrafik (06:00-09:00)		**2019**	**2020**	**Forskel**
Målestation D702950500	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	34.697	35.025	+0,9%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	58,9	56,7	-3,7%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	45,7	54,6	+19,5%
Målestation D702940850	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	31.545	31.716	+0,5%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	56,7	47,8	-15,7%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	44,2	47,2	+6,8%
Målestation 80070294	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	35.619	35.585	-0,1%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	62,7	52,9	-15,6%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	48,7	49,6	+1,8%
Samlet strækning	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	33.954	34.109	+0,5%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	59,5	52,2	-12,3%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	46,3	50,3	+8,6%

Tabel 9.3. Spolesnits rejsetider og trafikmængde for sydgående morgentrafik ved Limfjordstunnelen i tidsrummet 06:00-09:00 i dagene tirsdag-torsdag i uge 2 henholdsvis i 2019 og i 2020. + og - angiver at der har været en stigning eller et fald fra 2019 til 2020.

I tabellen ses der ikke en entydig tendens i rejsetiderne. Tages der udgangspunkt i gennemsnittet ses der en reduktion i rejsetiden fra 2019 til 2020, men ses der udelukkende på medianen er rejsetiden blevet forøget fra 2019 til 2020. Yderligere fremgår det, at antallet af trafikanter fra 2019 til 2020 har haft en begrænset stigning.

Limfjordstunnelen Spoledata Nordgående eftermiddagstrafik (14:00-17:00)		**2019**	**2020**	**Forskel**
Målestation D702890350	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	16.540	17299	+4,6%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	47,9	39,1	-18,4%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	32,5	31,3	-3,7%
Målestation D702900453	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	22.048	23.004	+4,3%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	57,7	53,0	-8,1%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	32,8	32,0	-2,4%
Målestation D702910730	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	20.206	21.153	+4,7%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	61,8	55,1	-10,8%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	25,6	24,3	-5,1%
Målestation D7029920279	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	24.181	24.823	+2,7%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	63,6	56,5	-11,2%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	29,5	28,1	-4,7%
Samlet strækning	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	20.744	21.570	+4,0%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	56,8	49,6	-12,7%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	39,4	37,9	-3,8%

Tabel 9.4. Spolesnitsrejsetider samt trafikmængde for nordgående eftermiddagstrafik ved Limfjordstunnellen i tidsrummet 14:00-17:00 i dagene tirsdag-torsdag i uge 2 henholdsvis i 2019 og i 2020. + og - angiver at der har været en stigning eller et fald fra 2019 til 2020.

Af tabellen fremgår det, at der har været en entydig reduktion i rejsetiden fra 2019 til 2020 over hele analysestrækningen. Dette er til trods for, at der har været en stigning i antallet af trafikanter.

For at sammenligne resultaterne og validere metoden for Bluetoothdata med spoledata, er det nødvendigt at fjerne en strækning med Bluetoothdata for at få tilnærmelsesvis identiske strækninger mellem de to metoder. Bluetoothstrækningen, der fjernes, er 2576-2575 fra Frederikshavn i sydgående retning. Dette medfører dog stadig ikke, at strækningerne er 100% sammenfaldende, hvilket kan medvirke til udsving i resultaterne. Variationen af den beregnede rejsetid mellem de to metoder angivet i Tabel 9.5.

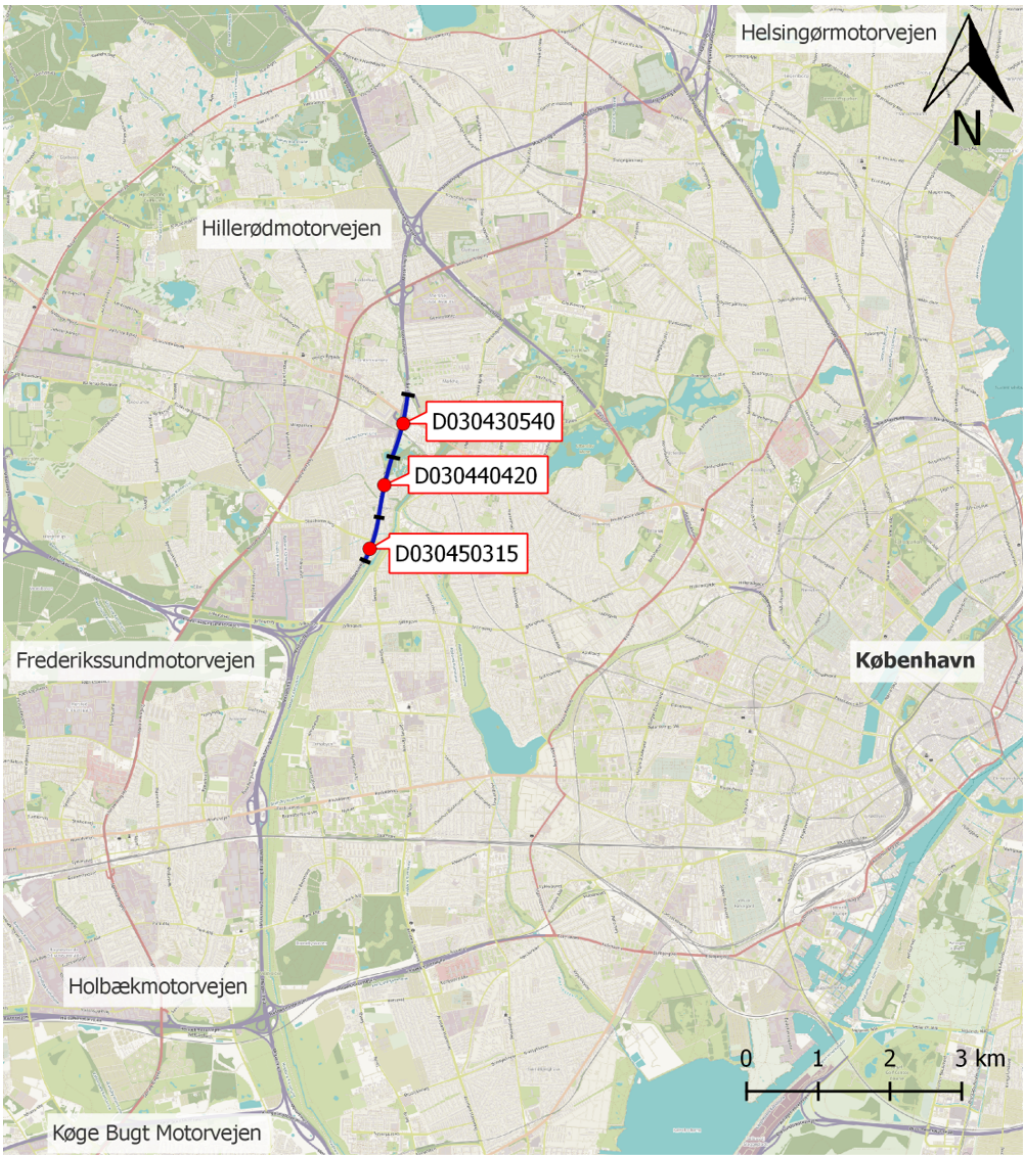
Limfjordstunnelen Bluetooth og spoledata			
Gennemsnitlig rejsetid (sek. pr. km)	**2019**	**2020**	**Forskel**
Sydgående morgentrafik Bluetooth	55,4	48,7	-12,1%
Sydgående morgentrafik spole	59,5	52,2	-12,3%
Forskel i metode	6,9%	7,2%	
Nordgående eftermiddagstrafik Bluetooth	58,3	49,8	-14,7%
Nordgående eftermiddagstrafik spole	56,8	49,6	-12,7%
Forskel i metode	2,6%	0,4%	
Rejsetid median (sek. pr. km)	**2019**	**2020**	**Forskel**
Sydgående morgentrafik Bluetooth	47,9	48,2	+0,7%
Sydgående morgentrafik spole	46,3	50,3	+8,6%
Forskel i metode	3,3%	4,4%	
Nordgående eftermiddagstrafik Bluetooth	42,5	40,4	-5,0%
Nordgående eftermiddagstrafik spole	39,4	37,9	-3,8%
Forskel i metode	7,3%	6,2%	

Tabel 9.5. Forskel i metode ved bestemmelse af rejsetider ved Limfjordstunnelen. + og - angiver at der har været en stigning eller et fald fra 2019 til 2020.

Ud fra tabellen ses det, at der beregnes forskellige rejsetider ved anvendelse af henholdsvis Bluetoothdata og spoledata som metode. Det ses, at den højest registrerede forskel mellem de to metoder er på fire sekunder per kilometer.

Motorring 3

På M3 benyttes spoledata med samme fremgangsmetode, som ved Limfjordstunnelen, til at bestemme rejsetider for morgentrafikken på en strækning i nordgående retning i tidsrummet 05:00-10:00. Placeringen af de udvalgte spolesnit, samt en illustration af spolernes tilhørende delstrækning fremgår af Figur 9.5.



Figur 9.5. Placering af spolesnit ved M3 med illustration af tilhørende analysestrækning.

De tildelte afstande for hvert spolesnit på analysestrækningen kan ses i Tabel 9.6.

Delstrækning spolesnit M3	
Spolesnit	Afstand
D030430540	0,92 km
D030440420	0,89 km
D030450315	0,66 km

Tabel 9.6. Delstrækningsafstande tildelt til hvert spolesnit på analysestrækningen på M3 i nordgående retning.

Resultaterne for rejsetider for morgentrafikken i nordgående retning på M3 bestemt ud fra spolesnitdata kan ses i Tabel 9.7.

Motorring 3 Spoledata Nordgående morgentrafik (05:00-10:00)		**2019**	**2020**	**Forskel**
Målestation D030430540	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	67.699	67.168	- 0,8%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	57,9	63,3	+ 9,3%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	52,0	51,6	- 0,8%
Målestation D030440420	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	68.076	67.585	- 0,7%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	57,8	63,0	+ 9,0%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	51,0	51,9	+ 1,8%
Målestation D030450315	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	65.920	65.862	- 0,1%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	75,4	93,9	+ 24,5%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	75,6	79,8	+ 5,6%
Samlet strækning	Gennemsnitlig trafikmængde (kt)	67.232	66.872	- 0,5%
	Gennemsnitlig rejsetid pr. km (sek.)	62,4	71,2	+ 14,1%
	Rejsetid median pr. km (sek.)	57,8	59,1	+ 2,2%

Tabel 9.7. Spolesnitsrejsetider og trafikmængde for nordgående morgentrafik på M3 i tidsrummet 05:00-10:00 i dagene tirsdag-torsdag i uge 3 i 2019 og i uge 2 i 2020. + og - angiver at der har været en stigning eller et fald fra 2019 til 2020.

Af tabellen fremgår det, at der har været en stigning i rejsetiden på analysestrækningen på M3 i nordgående retning fra 2019 til 2020. Ydermere ses det, at der har været et fald i mængden af trafikanter på 0,1-0,8% fra 2019 til 2020.

Rejsetiderne ud fra GPS-data og spoledata på strækningen sammenlignes i Tabel 9.8.

Motorring 3 GPS-data og spoledata			
Gennemsnitlig rejsetid (sek. pr. km)	**2019**	**2020**	**Forskel**
Nordgående morgentrafik GPS	89,0	92,0	+ 3,4%
Nordgående morgentrafik spole	62,4	71,2	+ 14,1%
Metodevariation	29,9%	22,6%	
Rejsetid median (sek. pr. km)	**2019**	**2020**	**Forskel**
Nordgående morgentrafik GPS	93,0	95,0	+ 2,2%
Nordgående morgentrafik spole	57,8	59,1	+ 2,2%
Metodevariation	37,8%	37,8%	

Tabel 9.8. Metodevariation ved bestemmelse af rejsetider ved på M3. + angiver at der har været en stigning fra 2019 til 2020.

Det ses af tabellen, at der er væsentlig højere forskel i den gennemsnitlige rejsetid mellem GPS-data og spoledata i forhold til Bluetoothdata og spoledata. Der er målt en forskel i gennemsnitlig rejsetid på op til 37,8% og at rejsetiden svinger mellem 20,8-35,2 sekunder per kilometer fra spoledata til GPS-data.

9.4.2 Fordele og ulemper ved metoder for rejsetider

Som et resultat af metodekritikken af rejsetider, kan det konkluderes, at den beregnede rejsetid i høj grad er afhængig af, hvilken metode der anvendes. Det kan i dette tilfælde være svært at konkludere, hvilken metode der giver de mest valide rejsetider. Trods det, at rejsetiderne mellem Bluetooth og spoledata varierer i forhold til hinanden, er forskellene relativt minimale, hvorimod der ses en stor forskel mellem GPS-data og spoledata.

Rådata kan være behæftet med fejl og de største outliers skal sorteres fra for, at data er anvendelig til analyser. Men selve registreringsmetoderne, der bruges til at levere rådata, kan også være behæftede med fejl og især i trafikanalyser som denne, hvor eksempelvis spoledata har svært ved at registrere køretøjer med lav hastighed.

Spoledetektor er den mest udbredte teknologi til detektering af trafik og fordelen ved brug af disse detektorer frem for Bluetooth og GPS er, at der kan registres trafik i de enkelte vognbaner, hvilket gør det muligt at lave nogle meget nuancerede analyser med data af høj kvalitet. Ved statistiske analyser kan data kvaliteten være afgørende for udfaldet og derfor anbefaler Vejdirektoratet spoledata til statistiske analyser. Ulempen ved spoledetektorer er, at det ikke er muligt at genkende de enkelte biler imellem spolerne hvorfor det givetvis ikke er den bedste metode til at beregne rejsetider og at det kan være grunden til, at resultater i rejsetidsanalysen varierer mellem de forskellige metoder. [Vejdirektoratet, 2012]

Fordelen ved Bluetooth er, at det er muligt at følge den enkelte trafikant og dermed kortlægge rejsen fra et punkt til et andet. Ulempen er dog, at det kun er en mindre del af trafikanterne der registreres og derfor er det andelen af mulige Bluetoothregistreringer i trafikken, der afgør, om data kan bruges til videre behandling. Yderligere er der risiko for at der er flere Bluetoothenheder i samme køretøj der registreres, hvilket igen kan resultere i upræcise data som kan være svaret på hvorfor, at rejsetiderne bestemt på baggrund af Bluetoothdata varierer fra rejsetider bestemt ved spoledata. [Vejdirektoratet, 2012]

Analyser baseret på GPS-data kræver ligesom analyser baseret på Bluetoothdata, at det er en betragtelig andel af trafikken, der registreres for at kunne bruges til at bestemme rejsetider. Fordelen ved GPS-data er, at der principielt er en høj geometrisk præcision, som dog kan forstyrres i tætte by- og skovområder. Svaret på, hvorfor GPS-rejsetider varierer i så stor grad fra spoledata, findes derfor sandsynligvis ikke i upræcise målinger, da M3 er placeret uden for centrum. Den beskedne forskel, der ses mellem spoledata og Bluetoothdata, peger på, at rejsetidsberegning ved spoledata er relativt retvisende. Derfor må variationen skyldes, at der enten ikke har været tilstrækkelige GPS-registreringer i analysen til at danne et repræsentativt datagrundlag for rejsetiden, eller, hvad der er mere sandsynligt baseret på den store variation, at der i analysen er sket fejl i GPS-databehandlingen. [Vejdirektoratet, 2016a]

I analysen blev der bestemt rejsetider på baggrund af medianen og gennemsnittet. Det ses, at der var en relativ stor variation i rejsetiderne alt efter, hvilken af de to statistiske metoder, der anvendes til at fastlægge rejsetider. Dette skyldes, at rejsetiderne er skævt fordelt over analyseperioden, hvilket vil sige, at der har været en stor variation i de målte rejsetider. Der kan i den henseende argumenteres for, at medianen er den mest repræsentative metode for at fastlægge rejsetider, da medianen i mindre grad er følsom over for outliers sammenlignet med gennemsnittet.

Diskussion 10

I følgende afsnit diskuteres effekten af de tre nye funktioner i styringsalgoritmen, dobbelt tærskelværdi, hastighedsreduktion foran overbelastede frakørsler og belastningsafhængig hastighedsstyring, som blev præsenteret i afsnit 7.3.

De tre funktioner har følgende formål:

- Dobbelte tærskelværdi skal medvirke til at reducere hyppigheden for ændringerne i tavlevisningen
- Hastighedsreduktionen foran overbelastede frakørsler skal øge hastighedsharmoniseringen imellem sporene og dermed mindske antallet af uheld der skyldes kødannelse i ét spor.
- Belastningsafhængig hastighedsstyring skal medvirke til, at den skiltede hastighed både blev bestemt ud fra de registrerede hastigheder og trafikintensiteten.

Det er vanskeligt at vurdere, hvilken betydning den enkelte funktion har haft på trafikafviklingen. Dette skyldes, at trafikafviklingen er sammenlignet i to forskellige perioder, hvor periode 1 ikke havde nogle af de nye funktioner implementeret i modsætning til periode 2, hvor alle tre funktioner var implementeret på samme tid. For at kunne specificere de enkelte funktioners effekt, havde det været at foretrække, at analysere trafikafviklingen i de etaper, hvor funktionerne blev implementeret hver for sig ved M3, som det fremgår i kapitel 7.3.

Som det kan konkluderes af kapitel 8, var der ikke nogen signifikant forbedring af trafikafviklingen som følge af, at de nye funktioner er implementeret. På enkelte spor ved Limfjordstunnelen kunne der observeres en signifikant forbedring af hastighedsharmoniseringen, men overordnet set er hverken kapaciteten, hastighedsharmoniseringen eller rejsetiden signifikant forbedret som et resultat af den nye styringsalgoritme.

Der kan argumenteres for, at den minimale effekt, som den nye styringsalgoritme har haft på trafikafviklingen, sandsynligvis skyldes, at de nye funktioner ikke fungerer efter hensigten. Dette kan enten skyldes (1) tekniske fejl ved funktionerne, (2) at de ikke er kalibreret optimalt, (3) at de nye funktionerne ikke komplementerer hinanden, eller (4) at de nye funktioner ikke er parametre, som er tilstrækkelige til at forbedre trafikafviklingen.

Ses der på de ny funktioners betydning for den skiltede hastighed kan det konkluderes, at den nye styringsalgoritme har resulteret i hyppigere skift i den skiltede hastighed både på Limfjordstunnelen og på M3. For Limfjordstunnelen var dette ikke tilfældet før ændringen i styringsalgoritmen. Ud fra dette kan det diskuteres om funktionen for den dobbelte tærskelværdi fungerer efter hensigten, eller om det skyldes, at de øvrige funktioner går ind og spiller en rolle i de hyppige skift i den skiltede hastighed. Ydermere kan det diskuteres,

om den belastningsafhængige hastighedsstyring har haft den ønskede effekt. På den ene side ses det i analysen for den skiltede hastighed ved M3, at denne funktion har en markant rolle i starten af trængselsperioden. I takt med at trafikintensiteten stiger, sættes den skiltede hastighed ned før trængselsperioden opstår og hvor hastigheden stadig er høj. På den anden side ses det derimod i slutningen af trængselsperioden ikke nogen effekt af den belastningsafhængige hastighedsstyring. Dette fremgår ved, at den skiltede hastighed sættes op samtidig med trafikanternes kørte hastighed. Ved Limfjordstunnelen fremgår effekten af den belastningsafhængige hastighedsstyring ikke lige så tydeligt. Dog fremgår det, at den belastningsafhængige hastighedsstyring har haft en effekt i nattetimerne, da der ikke fremgår nogle situationer hvor den skiltede hastighed er sat ned grundet lastbilers lave hastighed. Hermed kan det konkluderes, at funktionen har haft en effekt i disse situationer.

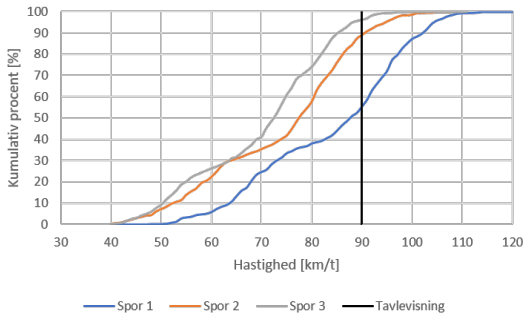
I funktionen for hastighedsreduktion foran overbelastede frakørsler, var formålet at sikre hastighedsharmonisering imellem sporene. Ud fra analysen omkring hastighedsharmonisering kan det diskuteres om formålet for denne funktion er blevet opfyldt. På den ene side fremgår det, at der ved analysen ved Limfjordstunnelen i morgenspidstimen i sydgående retning er blevet bibeholdt eller forbedret hastighedsharmonisering imellem sporene. På den anden side fremgår det, at der ved Limfjordstunnelen i eftermiddagsspidstimen i nordgående retning fremgår det dog, at hastighedsharmoniseringen imellem sporene er blevet forværret. I analysepunktet ved M3 fremgår det, at der generel er en forværring i hastighedsharmoniseringen imellem sporene. Ved M3 er denne analyse kun foretaget for et analysepunkt, hvorfor det kan diskuteres, om resultaterne herfor er en generel tendens for M3 eller et tilfælde.

Det kan dermed umiddelbart konkluderes, at der er fejl tilknyttet den nye styringsalgoritme og at de ikke altid fungerer efter hensigten. Spørgsmålet er dog, hvorvidt det udelukkende er fejl i styringsalgoritmens, som bevirker, at der ikke ses en signifikant forbedring af trafikafviklingen?

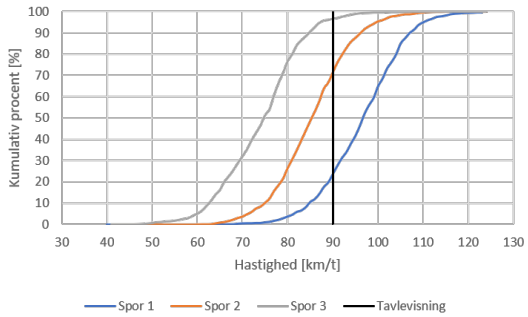
Hvorvidt den nye styringsalgoritmes manglende effekt på trafikafviklingen skyldes faktorer, som er uafhængig af de variable hastighedstavler og funktionerne, er en spændende diskussion. Der kan nemlig argumenteres for, at der også er andre årsager til, at der ikke ses en forbedret hastighedsharmonisering, øget kapacitet eller kortere rejsetider ved Limfjordstunnelen og M3. De andre årsager til den manglende effekt af ændringen i styringsalgoritmen kan skyldes trafikanternes manglende overholdelse af de skiltede hastigheder eller, at trafikafvikling på motorveje og de dertilhørende trafiksammenbrud er et komplekst sammenspil mellem flere faktorer, som variable hastighedstavler kun til en vis grad kan have en indvirkning på.

På baggrund af analyserne af trafikafviklingen i 2019 og 2020 kunne det konkluderes, at der ikke er en signifikant forbedring af trafikafviklingen og i den henseende kan der argumenteres for, at det sandsynligvis kan skyldes manglende overholdelse af den viste hastighed på tavlerne. For at de nye funktioner for de variable hastighedstavler skal fungere efter hensigten, er det meget centralt, at trafikanterne overholder de skiltede hastigheder. Dermed er der foretaget en analyse om trafikanternes overholdelse af den skiltede hastighed, som præsenteres i det følgende.

Analysen tager udganspunkt i morgenspidstimen i sydgående retning den 22.01.2020 både ved Limfjordstunnelen og ved M3. Begge analyser behandler et tidsrum, hvor den skiltede hastighed viste 90 km/t, ved Limfjordstunnelen strækker dette sig over tidsrummet 06:56-07:15 og ved M3 undersøges tidsrummet 07:56-08:43. Figurerne 10.1 og 10.2 angiver en kumulativ graf over henholdsvis Limfjordstunnelen og M3 for alle tre spor.



Figur 10.1. Kumulativ graf for de registrerede hastigheder ved Limfjordstunnelen i morgenspidstimen i sydgående retning i tidsrummet 06:56-07:15 den 22.01.2020 hvor den skiltede hastighed viste 90 km/t.



Figur 10.2. Kumulativ graf for de registrerede hastigheder ved M3 i morgenspidstimen i sydgående retning i tidsrummet 07:56-08:43 den 22.01.2020 hvor den skiltede hastighed viste 90 km/t.

Ud fra ovenstående grafer fremgår det, at det ved Limfjordstunnelen kun er i spor 1, hvor hastighedsgrænsen på 90 km/t ikke bliver overholdt. I dette spor kørte cirka 45% af de registrerede trafikanter med hastigheder højere end den skiltede hastighedsgrænse. Ved M3 fremgår det, at der ved spor 1 er cirka 80% og ved spor 2 er det 25%, som kører med højere hastigheder end den skiltede hastighedsgrænse på 90 km/t.

Det er et centralt problem, at trafikanterne til en vis grad ikke overholder de skiltede hastigheder. Hvis andelen af trafikanter, som ikke overholder de skiltede hastigheder kunne nedbringes, ville der sandsynligvis ses en større effekt af variable hastighedstavler.

Denne problematik er dog blot et eksempel på et større og mere centralt problem, som knytter sig til trafiksammenbrud, nemlig, at trafiksammenbrud, når trafikintensiteten eller trafiktætheden er tilpas høj, udløses af tilfældige og komplekse faktorer. Dette kan eksempelvis være trafikanters afvigende adfærd i form af pludselig deceleration, uhensigtsmæssige vognbaneskift eller langsom kørsel.

Trafikafviklingen er i sagens natur kompleks og den menneskelige faktor eller simple tilfældigheder som eksempelvis dårligt vejr, betyder, at det er vanskeligt at forudsige trafiksammenbrud. Trafiksammenbruds tilfældige natur har eksempelvis den konsekvens, at der på en strækning kan forekomme et trafiksammenbrud den ene dag, men udeblive dagen efter, på trods af, at der er samme trafikintensitet og trafiktæthed begge dage.

At der er en iboende tilfældighed i trafikafvikling og trafiksammenbrud kan derfor være en årsag til, at den nye styringsalgoritme for Limfjordstunnelen og M3 ikke har øget hastighedsharmoniseringen, øget kapaciteten eller reduceret rejsetiden. En styringsalgoritme kan være nok så kompleks og effektiv, og forbedre trafikafviklingen gennem øget hastighedsharmonisering, men bliver omsonst, hvis trafikanterne ikke er indstillet på at følge de viste hastigheder på tavlerne og desuden udviser afvigende trafikantadfærd i form af uhensigtsmæssig deceleration eller vognbaneskift.

At den menneskelige faktor har så stor betydning for trafiksammenbrud på motorvejene, eksemplificerer, at intelligente transportsystemers effekt på trafikafviklingen i høj grad afhænger af den kontekst, som det intelligente transportsystem implementeres i. Et eksempel er adaptive signalanlæg; her kan algoritmer gennem deep-learning udregne den mest optimale omløbstid for signalanlægget, således, at ventetiden for bilister, antallet af stop og CO_2-udledningen kan reduceres væsentligt. Den væsentlige effekt, som et adaptivt signalreguleret anlæg har, skyldes det faktum, at trafikafviklingen i et kryds i høj grad fungerer i et afgrænset rum, hvor tilfældigheder dermed reduceres. Derfor er det muligt at opstille modeller og forudsigelser, som er baseret på matematiske beregninger. Modsat er der på en motorvej betydeligt flere tilfældige faktorer, som kan udløse trafiksammenbrud når trafikintensiteten og trafiktætheden er kritisk.

Den naturlige slutning på ovenstående overvejelser er, at variable hastighedstavler ikke kan være et enkeltstående initiativ, hvis trafikafviklingen på de danske motorveje ønskes effektiviseret. Der er nødt til at implementeres flere intelligente transportsystemer, som kan fungere i sammenspil med de variable hastighedstavler, og derved reducere risikoen for, at trafiksammenbrud forårsages af tilfældigheder. Dermed ville afviklingen på de danske motorveje i højere grad kunne blive kontrolleret og fungere i et afgrænset rum ligesom adaptive signalanlæg i kryds. De forskellige tiltag, der sammen med variable hastighedstavler vil kunne antages at have en stor effekt på trafikafviklingen, præsenteres i det følgende.

Strækningskontrol ved M3 og Limfjordstunnelen kunne eksempelvis tvinge trafikanterne til at overholde den skiltede hastighed, og dette ville sandsynligvis betyde, at der ville opstå en højere grad af hastighedsharmonisering under antagelsen af, at styringsalgoritmen har funktioner, som fungerer efter hensigten. Strækningskontrol er blandt andet afprøvet i Holland, Storbritannien og Østrig og undersøgelserne viste en positiv effekt på trafikanternes overholdelse af den skiltede hastighed, hvor middelhastigheden reduceres og hastighedsharmoniseringen øges. [Hels et al., 2010]

Den teknologiske udvikling inden for selvkørende biler og adaptiv fartpilot - Adaptive Cruise Control (ACC) - har ligeledes muliggjort, at hastighedsharmoniseringen på motorveje kan øges. Boris Kerner fremhæver denne teknologi i "Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science":

> "It is assumed that future vehicular traffic in traffic and transportation networks is a mixed traffic flow consisting of human driving and automatic driving vehicles. Automatic driving vehicles should considerably enhance capacity of a traffic network."[Kerner, 2017]

Kerner argumenterer for, at køretøjer med ACC kan være centralt for at reducere risikoen for trafiksammenbrud. For at sikre, at AAC får den ønskede effekt på trafikafviklingen og reducerer sandsynligheden for trafiksammenbrud, er andelen af køretøjer med ACC-køretøjer afgørende:

> "The larger the percentage ACC of automatic driving vehicles in mixed traffic flow, the larger the probability of the appearance of the long platoon of ACC-vehicles, therefore, the larger the probability of the prevention of the disturbance growth and the smaller the breakdown probability P.B/ are"[Kerner, 2017]

I følge Kerner skal minimum 20% af et netværks køretøjer have ACC, før der opnås en effekt af denne funktion. [Kerner, 2017]

Et yderligere tiltag, som kunne fungere sammen med variable hastighedstavler, er rampedosering ved belastede flaskehalse. Rampedosering kunne sikre, at køretøjer, som skal ud på en motorvej via en tilkørsel, doseres således, at der vil opstå færrest mulige forstyrrelser i trafikstrømmen. En undersøgelse foretaget i 2007 på forskellige bymotorveje nær udvalgte storbyer i EU, viste at rampedosering kan forbedre rejsetiden med op til 17% [Østergaard, 2013]. Der kan dog argumenteres for, at der ville forekomme kødannelse på tilkørselsrampen, hvis der er tilpas høj efterspørgsel efter at komme ud på motorvejen.

For at optimere trafikafviklingen yderligere ved brug af variable hastighedstavler, kan det argumenteres for at koncepterne reinforcement learning og deep learning kan anvendes.

Reinforcement learning fungerer på den måde, at styringsalgoritmen justerer på de variable faktorer, i dette tilfælde udjævningskoefficienterne for hastigheden og trafikintensiteten, der blev præsenteret i kapitel 7, for at optimere på trafikafviklingen. Hver gang, at styringsalgoritmen har ændret på udjævningskoefficienterne, analyserer den på, hvilken effekt denne ændring har haft på trafikafviklingen. Dette medvirker til, at styringsalgoritmen opbygger en model, hvor den lærer, hvilke udjævningskoefficienter den skal bruge for at sikre den mest optimale trafikafvikling i de forskellige trafiksituationer. [Kaelbling et al., 1996]

I Deep learning (maskinlæring) bliver en model trænet til at forbedre trafikafviklingen i de forskellige trafikale situationer. Modellen bliver trænet til at vise en prædefineret hastighed på tavlerne ved hjælp af et træningssæt, som er bygget op af eksempelvis hastighedsmålinger fra forskellige trafikale situationer. Ved at justere på forskellige parametre i den bagvedliggende algoritme kan modellen trænes op til ofte at vise den rigtige hastighed på tavler i de forskellige situationer. Efter at modellen er færdigtrænet går den fra at analysere på et træningssæt til at analysere på realtidsdata, hvor den ikke på forhånd kender den optimale hastighedsvisning på tavlerne. Det kan argumenteres for, at der skal udarbejdes to forskellige modeller til M3 og Limfjordstunnelen, da den trafikale situation ikke er ens på de to strækninger. [MathWorks, 2016]

Dette projekt har i analysen af de variable hastigheder ikke medregnet de samfundsøkonomiske omkostninger, der er forbundet med at etablere og drive tavlerne. Der kan argumenteres for, at de ovenstående ITS-tiltag - og de variable hastighedstavler - bør ses i en samfundsøkonomisk sammenhæng, da der er åbenlyse omkostninger forbundet med at implementere og drive intelligente transportsystemer. Derfor bør de samfundsøkonomiske gevinster i form af reduceret rejsetid og mindre forurening, som der opnås gennem bedre trafikafvikling og færre trafiksammenbrud, holdes op imod de udgifter, som er knyttet til ITS på det danske vejnet.

Konklusion 11

Den stigende trængsel på store dele af det danske vejnet og udsigten til, at stigningen er vedvarende, byder til, at der forskes i andre tiltag end kapacitetsudvidelser som middel til at afhjælpe trængslen. Et tiltag, der teoretisk skulle kunne være med til at afhjælpe trængsel og som der er fokuseret på i dette speciale, er effekten af variable hastighedstavler og betydningen af de ændrede styringsalgoritmer ved Limfjordstunnelen og M3. Heraf er følgende problemformulering opstillet:

"Hvordan har de opdaterede styringsalgoritmer for de variable hastighedstavler påvirket trafikafviklingen ved Limfjordstunnelen og M3?"

Baseret på problemformuleringen er der opstillet følgende problemstillinger, som er blevet besvaret gennem analyser i denne rapport:

Tesen for problemstilling et var, at den nye styringsalgoritme har kunne udjævne trafikintensiteten i perioden lige op til et trafiksammenbrud, og dermed øget det samlede antal af gennemstrømmende trafikanter og udnyttet den eksisterende kapacitet bedre. Derfor besvares følgende problemstilling:

- Hvilken betydning har den nye styringsalgoritme haft for kapaciteten ved Limfjordstunnelen og M3 op til et trafiksammenbrud?

På baggrund af kapacitetsanalyserne ved Limfjordstunnelen og M3 kan det konkluderes, at der ikke har været en entydig og signifikant forbedring af kapacitetsudnyttelsen i analysepunkterne. Det ses, at der ved i morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen har været en forbedring, men ellers ses der ikke en overordnet forbedring af udnyttelsen af kapaciteten op til et trafiksammenbrud.

Tesen for problemstilling to var, at den nye styringsalgoritme har reduceret variationen i de registrerede hastigheder og dermed harmoniseret hastighederne fra en periode med en trafikintensitet på 1.200 kt/t/spor og op til et trafiksammenbrud. Følgende problemstilling besvares:

- Hvilken effekt har den nye styringsalgoritme haft på hastighedsharmoniseringen ved Limfjordstunnelen og M3?

Baseret på analyserne af variationen i hastighederne kan det konkluderes, at ændringen i styringsalgoritmen ikke har resulteret i en entydig forbedret hastighedsharmonisering hverken i det enkelte spor og sporene imellem ved Limfjordstunnelen og M3. Der ses dog en signifikant forbedring i hastighedsharmoniseringen på enkelte spor i morgenspidstimen

ved Frederikshavnmotorvejen og Limfjordstunnelen fra 2019 til 2020. I analysen for hastighedsharmoniseringen imellem sporene, fremgår det, at der udelukkende er sket en forbedring i morgenspidstimen i punktet ved Limfjordstunnelen.

Tesen for problemstilling tre var, at hvis der på baggrund af kapacitets- og hastighedsharmoniseringsanalyserne skulle vise sig en effekt af algoritmeændringen, ville dette udmønte sig i forbedrede rejsetider. Følgende problemstilling besvares:

- Hvordan er den gennemsnitlige rejsetid blevet påvirket af den nye styringsalgoritme ved Limfjordstunnelen og M3?

Denne problemstilling besvares gennem rejsetidsanalyser baseret på Bluetoothdata og GPS-data. Bluetoothdata blev brugt til at analysere rejsetiderne ved Limfjordstunnelen, hvor det fremgår, at rejsetiden er blevet reduceret i eftermiddagsspidstimen nordgående retning. I morgenspidstimen sydgående retning fremgår der en reducering i rejsetiden i analysestrækningen tættest på selve tunnelen, hvor det fremgår, at der ved analysestrækningen ved Motorvejskryds Vendsyssel er en forøgelse af rejsetiden efter implementeringen af den nye styringsalgoritme.
GPS-data blev brugt til at bestemme rejsetiden ved M3, hvor konklusionen er, at rejsetiden er blevet forøget efter implementeringen af styringsalgoritmen.

Tesen for problemstilling fire var, at styringsalgoritmens nye funktioner havde en effekt på den viste hastighed, som betød, at styringsalgoritmen skiftede den viste hastighed sjældnere og at trafikintensiteten i højere grad var en styrende parameter for den viste hastighed i 2020 sammenlignet med 2019. Følgende problemstilling besvares:

- Hvilken betydning har den nye styringsalgoritme haft for de viste hastigheder på de variable hastighedstavler?

På M3 ses der en effekt af den belastningsafhængige hastighedsstyring, som betød at den skiltede hastighed i trængselsperiodens begyndelse i højere grad reagerede på trafikintensiteten i 2020 sammenlignet med 2019. Funktionen for dobbelt tærskelværdi, som havde til hensigt at tavlerne skulle skifte den viste hastighed sjældnere, havde den modsatte effekt. Analysen for den skiltede hastighed viste, at hastighedsvisningen på tavlerne i nogle tilfælde skiftede oftere i 2020 end i 2019 ved både Limfjordstunnelen og M3.

Gennem besvarelserne på de opstillede problemstillinger kan den overordnede problemformulering besvares:

Det kan konkluderes, at de opdaterede styringsalgoritmer ved Limfjordstunnelen og M3 tilsyneladende ikke har haft en entydig eller signifikant forbedring for trafikafviklingen på de samlede strækninger. Dog ses der en entydig forbedring af trafikafviklingen i analysepunktet ved Limfjordstunnelen i morgenspidstimen i sydgående retning, hvor der har været en øget hastighedsharmonisering og kapacitet samt en reduceret rejsetid fra 2019 til 2020.

Som det blev diskuteret i afsnittet 10 kan den manglende entydige forbedring af trafikafviklingen, som følge af styringsalgoritmen, skyldes flere årsager. Først og fremmest kan den relativ korte tidsperiode, der er analyseret for, give et misvisende billede af den samlede effekt af styringsalgoritmen. Derfor kan det ikke afvises, at den nye styringsalgoritme har forbedret trafikafviklingen signifikant. Yderligere kan manglende entydig forbedring af trafikafviklingen fra 2019 til 2020 også skyldes andre faktorer uafhængigt af de variable hastighedstavler, såsom trafikanternes manglende overholdelse af hastighedsvisningen eller tilfældige årsager til trafiksammenbrud, som variable hastighedstavler ikke kan regulere eller forhindre.

Litteratur

Berlingske . Rolig indvielse af motorvejen. Tilgængelig fra: https://www.berlingske.dk/samfund/rolig-indvielse-af-motorvej, 2003. set d. 20-02-2020.

Bredsdorff Magnus. Fem år efter udvidelse: Mere kø på Københavns ringmotorvej end nogensinde. Tilgængelig fra: https://ing.dk/artikel/fem-aar-efter-udvidelse-mere-koe-paa-koebenhavns-ringmotorvej-end-nogensinde-186817, 2016. set d. 20-02-2020.

Cao Jing, Hu Dawei, Luo Ying, Qiu Tony Z., Ma Zhuanglin. Exploring the impact of a coordinated variable speed limit control on congestion distribution in freeway // Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2015. nr. 3. s. 167–178. set d. 05-03-2020.

Cheng Zeyang, Lu Jian, Li Yunxuan. Freeway crash risks evaluation by variable speed limit strategy using real world traffic flow data // Accident Analysis and Prevention. 2018. nr. 119. s. 176–187. set d. 04-03-2020.

DTU Transport . Definition af trængsel. Tilgængelig fra: https://trbm.dk/media/2496/definition-af-traengsel.pdf, 2012. set d. 20-02-2020.

Danmarks Statistik . Danmarks Statistik. Tilgængelig fra: https://www.dst.dk/da/, 2020. set d. 20-02-2020.

Dansk Industri . En infrastruktur i verdensklasse. Tilgængelig fra: https://www.danskindustri.dk/arkiv/analyser/2019/2/investeringsplan-for-dansk-infrastruktur-2020-2030/, 2019a. set d. 20-02-2020.

Dansk Industri . Trængsel koster samfundet over 30 milliarder kroner. Tilgængelig fra: https://www.danskindustri.dk/di-business/arkiv/nyheder/2019/12/trangsel-koster-samfundet-over-30-milliarder-kroner/, 2019b. set d. 13-02-2020.

Danskbyggeri.dk . Stigende trængsel gør det svært for virksomheder at tiltrække medarbejdere. Tilgængelig fra: https://www.danskbyggeri.dk/nyheder-og-presse/nyheder/presse/2020/stigende-traengsel-goer-det-svaert-for-virksomheder-at-tiltraekke-medarbejdere/, 2020. set d. 05-02-2020.

Duan Hui, Liu Pan, Li Zhibin, Zha Liteng. Evaluating the Effects of Different Control Strategies on Traffic Operations at Isolated Merge Bottlenecks // Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2013. nr. 96. s. 243–254. set d. 21-03-2020.

Eriksen Pia Juul, Rasmussen Camilla Stegsted, Jensen Sven Allan. Større tryghed - lavere hastighed: Et forsøg med variable hastighedstavler ved Brovst Skole. Tilgængelig fra: https://docplayer.dk/7286401-Stoerre-tryghed-lavere-hastighed-et-forsoeg-med-variable-hastighedstavler-ved-brovs html, 2003. set d. 12-02-2020.

Falcocchio John C., Levinson Herbert S. Road Traffic Congestion: A Concise Guide. nr. 7. 2015. ISBN: 978-3-319-15164-9.

Finansministeriet . Aftalen mellem regeringen og Dansk Folkeparti: Finansloven for 2019. Tilgængelig fra: https://www.fm.dk/~/media/files/nyheder/pressemeddelelser/2018/11/fl19-aftale/aftale-om-finansloven-for-2019.ashx?la=da, 2018. set d. 27-02-2020.

Friis Niels. Fire års vejarbejde på travl motorvej lakker mod enden: I dag fik 120.000 bilister et ekstra spor. Tilgængelig fra: https://ekstrabladet.dk/biler/fire-aars-vejarbejde-paa-travl-motorvej-lakker-mod-enden-i-dag-fik-120000-bilister-et-ekst 6795214, 2017. set d. 20-02-2020.

Gautier Eric. Dynamisk køvarsling ved Limfjordstunnelen. Tilgængelig fra: http://asp.vejtid.dk/Artikler/1994/08/6919.pdf?fbclid=IwAR1dX1ya9zyrslo4B1M0ypbo_sO2yIcw6t8AHHa69Ttc62VN86QTEInke_A, 1994.

Geistefeldt Justin. Capacity effects of variable speed limits on German freeways // Procedia - Social and Behavirol Sciences. 2011. nr. 16. s. 48–56. set d. 21-02-2020.

GeoNet . Distance on a sphere: The Haversine Formula. Tilgængelig fra: https://community.esri.com/groups/coordinate-reference-systems/blog/2017/10/05/haversine-formula, 2017. set d. 17-05-2020.

Gordon Robert. Intelligent Transportation Systems: Functional Design for Effective Traffic Management. nr. 2. 2016. ISBN: 978-3-319-14768-0.

Grumert Ellen. Cooperative Variable Speed Limit Systems: Modeling and Evaluation using Microscopic Traffic Simulation. 2014. ISBN: 978-91-7519-292-5.

Hels Tove, Kristensen Niels Buus, Carstensen Gitte, Berhoft Inger Marie, Hakamies-Blomqvist Lisa. Automatisk hastighedskontrol - vurdering af trafiksikkerhed og samfundsøkonomi. 2010. ISBN: 978-87-7327-204-6.

ItsDanmark . Intelligente Transport Systemer - 7 lavthængende frugter fra ITS Danmark. Tilgængelig fra: https://www.ft.dk/samling/20072/almdel/tru/bilag/545/593192.pdf, 2019. set d. 05-02-2020.

Jacobsen Per. Motorring 3: Udvidelse af bymotorvejen Fra Jægersborg til Holbækmotorvejen // Vejdirektoratet. 2010. s. 1–25.

Kaelbling Leslie Pack, Littman Michael L., W-Moore Andrew. Reinforcement Learning: A Survey // Artificial Intelligence Research. 1996. nr. 4. s. 237–285. set d. 08-06-2020.

Kerner Boris. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. 2009. ISBN: 978-3-642-02604-1.

Kerner Boris. Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science. 2017. ISBN: 9783319151656.

Kristensen Niels Buus, Enemark Anette, Hauxner Katinka, Wass-Danielsen Maria, Fosgerau Mogens, Nielsen Otto Anker, Riis Søren. Mobilitet for fremtiden. 2018. ISBN: 978-87-93292-36-9.

Lahrmann Harry. Fysisk Planlægning, Transport- og Mobilitetsplanlægning. 2018. Powerpoint, slide 13, forelæsning 1 i kursus Fysisk Planlægning, Transport- og Mobilitetsplanlægning.

Lauritzen Steen Merlach. Styringsfunktioner og –algoritmer. 2015.

Laval Jorge A., Guin Angshuman, Chilukuri Bhargava, Cho Hyun W. Travel-time Optimization on I-285 with Improved Variable Speed Limit Algorithms and Coordination with Ramp Metering Operations // Georgia Department of Transportation. 2014. nr. 14-14. s. 1–82. set d. 20-03-2020.

Lohmann-Hansen Anker, Nielsen Johan, Palm Vivian. Perspektiver ved indførelse af gratis offentlig transport. 2006. ISBN: 87-91614-30-9.

Lu Xiao-Yun, Spring John, Wu Cheng-Ju. Field Experiment of Variable Speed Advisory (VSA) Final Report // UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology. 2019. s. 1–97. set d. 05-03-2020.

Lucky Adama Brian, Eng B. The Impacts of Variable Speed Limit on Speed Variation and Headway Distribution // Queensland University of Technology. 2014. s. i–183. set d. 21-03-2020.

Lunde-Christensen Lasse Bredtved. AFRY - Trafikledelse på motorveje. 2020.

M. Abdel-Aty, N. Uddin, A. Pande. Improving Safety And Security By Developing A Traffic Accident Prevention System. Tilgængelig fra: `https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/82/15114`, 2005.

Madsen Per Bruun, Greibe Poul V. ITS - Aalborg, Trafikant og brugertilfredshed // Trafitec. 2012.

Madsen Tanja K. O. Trafikmodeller - lektion 4. Transportmiddelvalg, Turtidspunkt. 2019. Powerpoint, slide 20, forelæsning 4 i kursus Trafikmodeller.

Marfelt Birgitte, Østergaard Nicolai. Trafikeksperter: Motorveje et håbløst våben mod trængsel. Tilgængelig fra: `https://ing.dk/artikel/trafikeksperter-motorveje-et-hablost-vaben-mod-traengsel-132868`, 2012a. set d. 04-02-2020.

Marfelt Birgitte, Østergaard Nicolay. Trafikeksperter: Motorveje et håbløst våben mod trængsel. Tilgængelig fra: `https://ing.dk/artikel/trafikeksperter-motorveje-et-hablost-vaben-mod-traengsel-132868`, 2012b. set d. 20-02-2020.

MathWorks . What Is Deep Learning? 3 things you need to know. Tilgængelig fra: `https://www.mathworks.com/discovery/deep-learning.html`, 2016.

Natascha Rigborg . Trængselsanalyse ved Limfjordstunnelen. Tilgængelig fra: `https://projekter.aau.dk/projekter/files/306264844/Natascha_speciale.pdf`, 2019. set d. 18-02-2020.

Nielsen Jesper B. Vejarbejde snart slut på M3. Tilgængelig fra: `https://www.transportmagasinet.dk/article/view/153684/vejarbejde_snart_slut_pa_m3?red=mobile`, 2016. set d. 20-02-2020.

Nissan Albania, Koutsopoulosb Haris N. Evaluation of the Impact of Advisory Variable Speed Limits on Motorway Capacity and Level of Service // Procedia Social and Behavioral Sciences. 2011. nr. 16. s. 100–109. set d. 25-02-2020.

Næss Petter. The Third Limfjord Crossing: A Case of Pessimism Bias and Knowledge Filtering. // Transport Reviews. 2011. 31, 2. 231 – 249. set d. 20-02-2020.

Papageorgiou Markos, Kosmatopoulos Elias, Papamichail Ioannis. Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow // Transportation Research Record. 2008. nr. 2047. s. 37–48. set d. 27-02-2020.

Rambøll . Effekt af de variable tavler på Motorring 3 - Evalueringsrapport. 2015. set d. 14-03-2020.

Regeringen.dk . Aftale om et sammenhængende Danmark. Tilgængelig fra: `https://www.regeringen.dk/media/6531/aftale-om-et-sammenhaengende-danmark-investeringsplan-2030.pdf`, 2019. set d. 05-02-2020.

Schmidt Mathias. Data fra hastighedstavlevisninger på M3 og Limfjordstunnelen. 2020.

Steffen McGhie . Ingen kender effekten af intelligent trafikstyring for 162 millioner. Tilgængelig fra: `https://ing.dk/artikel/ingen-kender-effekten-intelligent-trafikstyring-162-millioner-214408`, 2018. set d. 18-02-2020.

Strömgren Per, Lind Gunnar. Harmonization with Variable Speed Limits on Motorways // Transportation Research Procedia. 2016. nr. 15. s. 664–675. set d. 25-02-2020.

Sun Rui, Hu Jianming, Xie Xudong, Zhang Zuo. Variable Speed Limit Design to Relieve Traffic Congestion Based on Cooperative Vehicle Infrastructure System // Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2004. nr. 138. s. 427–438. set d. 01-03-2020.

Sørensen Allan Vinding. En lang og sej kamp for motorvejen. Tilgængelig fra: `https://nordjyske.dk/nyheder/en-lang-og-sej-kamp-for-motorvejen/be5cc8c1-7ae8-45c1-acce-43991f3c8884`, 2002. set d. 20-02-2020.

Sørensen Erik. Fra "gedesti"til motorvej - ved åbningen af motorvejen Hobro - Aalborg // Dansk Vejtidsskrift. 1992. s. 3–4.

Transport- og Boligministeriet . En grøn transportpolitik. Tilgængelig fra: https://www.trm.dk/media/1771/en_groen_-transportpolitik.pdf, 2009. set d. 26-02-2020.

Transport Tidende . Det skal glide bedre under Limfjorden. Tilgængelig fra: https://transporttidende.com/artikler/det-skal-glide-bedre-under-limfjorden-p24766?fbclid=IwAR0Jc3WxtC9om98XtjWjnEFuidg650Vyx_rGjFvZqQlrsbKXFyFsDuaQFbQ, 2011. set d. 14-02-2020.

Trængselskommissionen . Afrapportering om landsdækkende roadpricing // Trængselskommissionen. 2013. set d. 20-02-2020.

Vadde Ramakrishna, Sun Dazhi, Sai Joseph O., Faruqi Mohammed A., Leelani Pat T. A simulation study of using active traffic management strategies on congested freeways // Modern Transportation. 2012. nr. 20. s. 178–184. set d. 24-02-2020.

Vejdirektoratet . Evaluering af variable tavler på Helsingørmotorvejen under ombygningen. Tilgængelig fra: https://docplayer.dk/13755994-Evaluering-af-variable-tavler-paa-helsingoermotorvejen-under-ombygningen.html, 1997.

Vejdirektoratet . Trafiktællinger: Planlægning, udførelse og efterbehandling. 2006.

Vejdirektoratet . Intelligente Transportsystemer - ITS PÅ VEJ. Tilgængelig fra: https://www.vejdirektoratet.dk/api/drupal/sites/default/files/publications/intelligente_transportsystemer.pdf, 2010. set d. 20-02-2020.

Vejdirektoratet . Detektorer for trafikregistring. Tilgængelig fra: http://http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=spoledetektor&docId=vd-anlaeg-detektorer2-full, 2012.

Vejdirektoratet . Forsøg med kørsel i nødsporet på Hillerødmotorvejen. Tilgængelig fra: https://www.vejdirektoratet.dk/pressemeddelelse/forsog-med-korsel-i-nodsporet-pa-hillerodmotorvejen, 2014a. set d. 20-02-2020.

Vejdirektoratet . Udbygning af den Østjyske Motorvej. Tilgængelig fra: https://www.vejdirektoratet.dk/api/drupal/sites/default/files/publications/udbygning_af_den_stjyske_motorvej_e45.pdf, 2014b. set d. 20-02-2020.

Vejdirektoratet . Indsamling behandling og præsentation af rejsetidsdata. Tilgængelig fra: http://http://http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=gps&docId=vd-2016-0038-full, 2016a.

Vejdirektoratet . Øget kapacitet på Motorring 3. Tilgængelig fra: https://www.vejdirektoratet.dk/udgivelse/oget-kapacitet-pa-motorring-3, 2016b. set d. 20-02-2020.

Vejdirektoratet . Brug af variable vejtavler og vognbanesignaler. Tilgængelig fra: http://vejregler.lovportaler.dk/showdoc.aspx?schultzlink=vd20180116, 2018.

Vejdirektoratet . Håndbog: Kapacitet og serviceniveau. 2019.

Vejdirektoratet . Statsvejnettet 2019 - Oversigt over tilstand og udvikling. Tilgængelig fra: `https://www.vejdirektoratet.dk/api/drupal/sites/default/files/2019-07/WEB_Statsvejnettet%202019.pdf`, 2019a. set d. 04-02-2020.

Vejdirektoratet . Trafikkens udvikling i tal. Tilgængelig fra: `https://www.vejdirektoratet.dk/side/trafikkens-udvikling-i-tal`, 2019b. set d. 26-02-2020.

Vejdirektoratet . Vej- og trafikteknisk ordbog. 2019.

Vejdirektoratet . Mastra. Tilgængelig fra: `https://mastra.vd.dk/mastra/nytui/main/mastra.html`, 2020a. set d. 11-02-2020.

Vejdirektoratet . Vejman.dk. Tilgængelig fra: `http://www.vejman.dk/da/Sider/default.aspx`, 2020b. set d. 20-02-2020.

Vejrup-Hansen Per. Statistik med Excel. 2012.

Videbæk Klaus, Bregendahl Uffe, Holst Frederik. 50 år siden i dag: Sådan fik Danmark sin første vej under vand. Tilgængelig fra: `https://www.dr.dk/nyheder/regionale/nordjylland/50-aar-siden-i-dag-saadan-fik-danmark-sin-foerste-vej-under-vand`, 2019. set d. 11-02-2020.

Vithen Charlotte, Habo Kenneth. Intelligent vejudstyr på Motorring 3 // Dansk Vejtidsskrift. 2005. set d. 20-02-2020.

Winnett M. A., Wheeler A. H. Vehicle-activated signs – a large scale evaluation. Tilgængelig fra: `https://trl.co.uk/sites/default/files/TRL548.pdf`, 2002. set d. 06-02-2020.

Yang Haifei, Zhai Xue, Zheng Changjiang. Effects of variable speed limits on traffic operation characteristics and environmental impacts under car-following scenarios: Simulations in the framework of Kerner's three-phase traffic theory // Physica A. 2018. nr. 509. s. 567–577. set d. 11-03-2020.

Yang Xianfeng, Lin Yongjie, Lu Yang, Zou Nan. Optimal Variable Speed Limit Control for Real-time Freeway Congestions // Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2013. nr. 96. s. 2362–2372. set d. 13-03-2020.

Zhang Hang, Li Zhibin, Liu Pan, Xu Chengcheng, Yu Hao. Control Strategy of Variable Speed Limits for Improving Traffic Efficiency at Merge Bottleneck on Freeway // Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2013. nr. 96. s. 2011–2023. set d. 21-03-2020.

Østergaard Nicolai. Trods succes i udlandet: Smart trafikteknologi får kniven // Ingeniøren. 2013.

Uheld A

Uheld ved Limfjordstunnelen

Nr.	Dato	Tidspunkt	Type	Retning
1	09.01.2019	08:09	Tabt presenning	Nordgående
2	24.01.2019	16:29	Tabt gods og harmonikasammenstød	Nordgående
3	29.01.2019	11:33	Solouheld	Sydgående
4	14.01.2020	07:31	Harmonikasammenstød	Sydgående

Tabel A.1. Uheld ved Limfjordstunnelen i undersøgelsesperioden 2019 og 2020. [Vejdirektoratet, 2020b]

Uheld ved Motorring 3

Nr.	Dato	Tidspunkt	Type	Retning
1	08.01.2019	06:45	Bagende kollision mellem personbil og varebil	Nordgående
2	10.01.2019	07:31	Bagende kollision mellem 2 personbiler	Nordgående
3	16.01.2019	15:48	Harmonikasammenstød	Sydgående
4	16.01.2019	17:40	Solouheld	Nordgående
5	23.01.2019	07:17	Bagende kollision mellem 2 personbiler	Nordgående
6	30.01.2019	08:41	Bagende kollision mellem 2 personbiler	Nordgående
7	30.01.2019	16:52	Bagende kollision mellem 2 personbiler	Sydgående
8	08.01.2020	17:31	Harmonikasammenstød	Nordgående
9	09.01.2020	07:36	Harmonikasammenstød	Nordgående
10	15.01.2020	02:47	Solouheld	Sydgående
11	21.01.2020	06:27	Harmonikasammenstød	Nordgående
12	21.01.2020	07:25	Sammenstød mellem 2 personbiler	Nordgående
13	22.01.2020	15:50	Sammenstød mellem 2 personbiler	Nordgående
14	28.01.2020	12:47	Solouheld	Sydgående

Tabel A.2. Uheld ved M3 i undersøgelsesperioden 2019 og 2020. [Vejdirektoratet, 2020b]

Undersøgelsesdagene

	Limfjordstunnel		Motorring 3	
	Morgen	**Eftermiddag**	**Morgen**	**Eftermiddag**
2019	Uge 2: 8, 10 Uge 3: 15, 16, 17 Uge 4: 22, 23, 24 Uge 5: 29, 30, 31	Uge 2: 8, 9, 10 Uge 3: 15, 16, 17 Uge 4: 22, 23 Uge 5: 29, 30, 31	Uge 2: 9 Uge 3: 15, 16, 17 Uge 4: 22, 24 Uge 5: 29, 31	Uge 2: 8, 9, 10 Uge 3: 15, 17 Uge 4: 22, 23, 24 Uge 5: 29, 31
2020	Uge 2: 7, 8, 9 Uge 3: 15, 16 Uge 4: 21, 22, 23 Uge 5: 28, 29, 30	Uge 2: 7, 8, 9 Uge 3: 14, 15, 16 Uge 4: 21, 22, 23 Uge 5: 28, 29, 30	Uge 2: 7, 8 Uge 3: 14, 15, 16 Uge 4: 22, 23 Uge 5: 28, 29, 30	Uge 2: 7, 9 Uge 3: 14, 15, 16 Uge 4: 21, 23 Uge 5: 29, 30

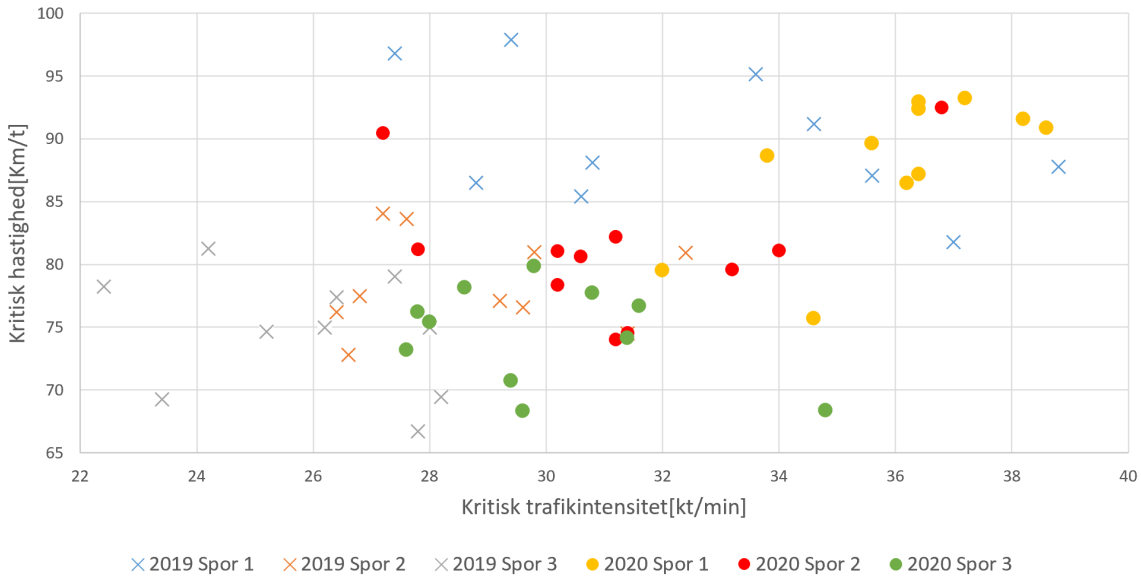
Tabel A.3. Undersøgelsesdagene for Limfjordstunnelen og M3 for 2019 og 2020 i sydgående og nordgående retning i morgen- og eftermiddagsspidstimerne.

Kritisk hastighed og trafikintensitet

B

Limfjordstunnelen

Morgenspidstimen



Figur B.1. Plot af kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i morgenspidstimen ved Limfjordstunnelen for 2019 og 2020

	Krit. hastighed [km/t]			**Krit. trafikintensitet [kt/min]**		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
08.01.2019	95,2	80,92	79,02	33,6	32,4	27,4
15.01.2019	87,1	76,6	66,7	35,6	29,6	27,8
16.01.2019	96,8	83,6	78,2	27,4	27,6	22,4
17.01.2019	91,6	81,0	77,4	34,6	29,8	26,4
22.01.2019	97,9	88,0	81,2	29,4	27,2	24,2
23.01.2019	87,8	74,5	69,5	38,8	31,4	28,2
24.01.2019	81,8	77,5	75,0	37,0	26,8	28,0
29.01.2019	85,4	76,2	74,6	30,6	26,4	25,2
30.01.2019	86,5	72,8	69,3	28,8	26,6	23,4
31.01.2019	88,1	77,1	75,0	30,8	29,2	26,2
Median	**87,9**	**77,3**	**75,0**	**32,2**	**28,4**	**26,3**

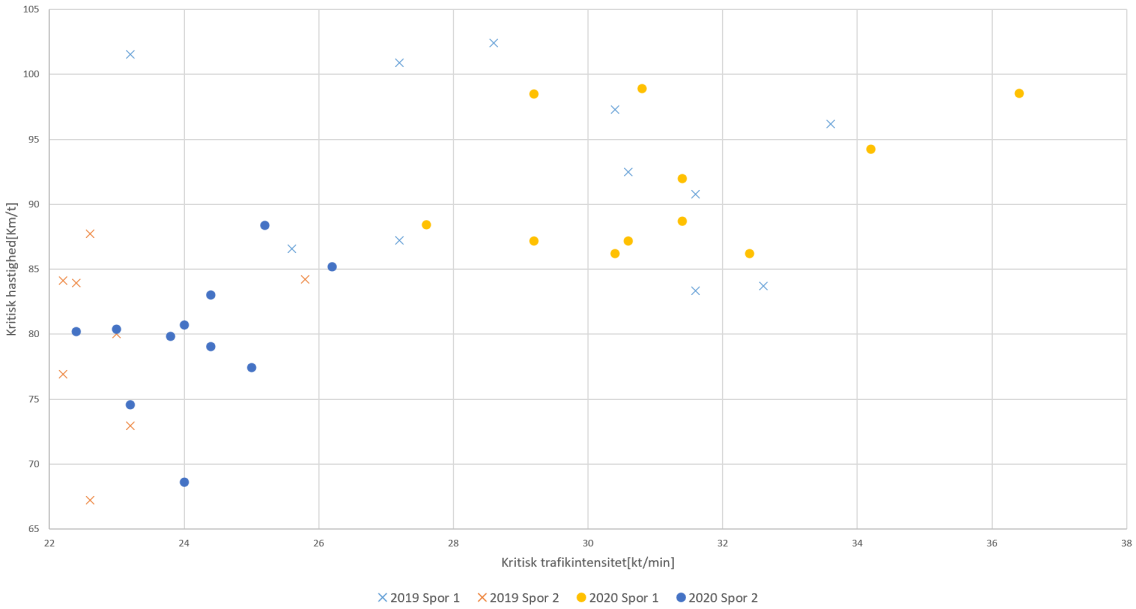
Tabel B.1. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D702950500 i morgenspidstimen 2019.

	Krit. hastighed [km/t]			**Krit. trafikintensitet [kt/min]**		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	75,7	90,4	79,8	34,6	27,2	29,8
08.01.2020	92,9	81,1	74,1	36,4	27,8	31,4
09.01.2020	89,6	79,6	76,7	35,6	33,2	31,6
15.01.2020	86,4	74,0	68,3	36,2	31,2	34,8
16.01.2020	93,2	82,2	78,1	37,2	31,2	28,6
21.01.2020	92,4	81,1	77,7	36,4	34,0	30,8
22.01.2020	88,6	78,3	73,2	33,8	30,2	27,6
23.01.2020	91,5	81,0	75,4	38,2	30,2	28,0
28.01.2020	90,8	80,6	76,2	38,6	30,6	27,8
29.01.2020	79,5	92,5	70,7	32,0	36,8	29,4
30.01.2020	87,2	74,5	68,3	36,4	31,4	29,6
Median	**89,6**	**81,04**	**75,4**	**36,4**	**31,2**	**29,6**

Tabel B.2. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D702950500 i morgenspidstimen 2020.

	Krit. hastighed [km/t]			**Krit. trafikintensitet [kt/min]**		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Ens	Ens	Ens	Uens	Ens	Ens
t-stat	0,7350	-1,403	0,091	-2,459	-2,395	-4,406
P-værdi en-halet	0,2356	0,088	0,464	0,014	0,0135	0,000
t-kritisk en-halet	1,729	1,729	1,729	1,729	1,729	1,729

Tabel B.3. T-test med to stikprøver for Limfjordstunnelen i punkt D702950500 i morgenspidstimen.



Figur B.2. Plot af kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i morgenspidstimen ved Frederikshavnmotorvejen for 2019 og 2020

	Krit. hastighed [km/t]		**Krit. trafikintensitet [kt/min]**	
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 1**	**Spor 2**
08.01.2019	102,4	84,2	28,6	25,8
10.01.2019	96,2	90,0	33,6	21,8
15.01.2019	100,9	87,7	27,2	22,6
16.01.2019	92,5	85,8	30,6	21,0
17.01.2019	101,5	84,1	23,2	22,2
22.01.2019	87,4	76,2	27,2	22,2
23.01.2019	83,3	72,9	31,6	23,2
24.01.2019	83,7	80,0	32,6	23,0
29.01.2019	86,6	67,2	25,6	22,6
30.01.2019	90,8	79,3	31,6	21,8
31.01.2019	97,3	84	30,4	22,4
Median	**92,5**	**83,9**	**30,4**	**22,4**

Tabel B.4. Kritisk hastighed og trafikintensitet for Frederikshavnmotorvejen, punkt D802980450 i morgenspidstimen 2019.

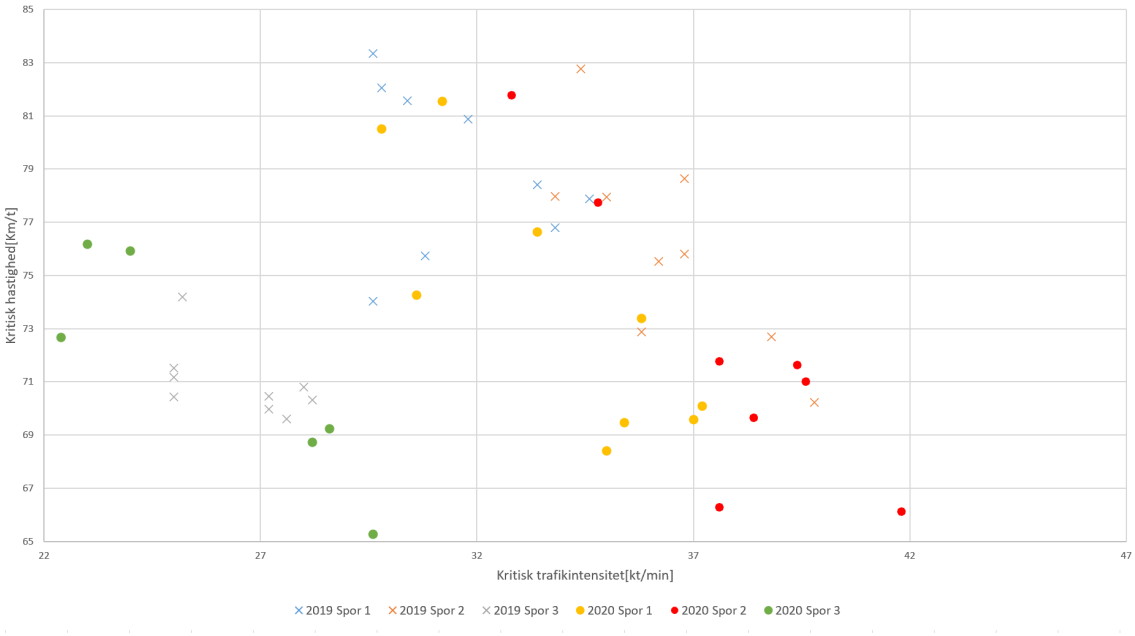
	Krit. hastighed [km/t]		**Krit. trafikintensitet [kt/min]**	
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 1**	**Spor 2**
07.01.2020	94,3	88,4	34,2	25,2
08.01.2020	98,5	80,7	36,5	24,0
09.01.2020	98,5	77,4	29,2	25,0
15.01.2020	87,2	74,6	29,2	23,2
16.01.2020	98,2	85,2	30,8	26,2
21.01.2020	88,7	79,8	31,4	23,8
22.01.2020	86,2	80,4	32,4	23,0
23.01.2020	86,2	68,6	30,4	24,0
28.01.2020	87,2	79,0	30,6	24,4
29.01.2020	92,0	83,0	31,4	24,4
30.01.2020	88,4	80,22	27,6	22,4
Median	**87,8**	**80,0**	**30,7**	**23,9**

Tabel B.5. Kritisk hastighed og trafikintensitet for Frederikshavnmotorvejen, punkt D802980450 i morgenspidstimen 2020.

	Krit. hastighed [km/t]		**Krit. trafikintensitet [kt/min]**	
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 1**	**Spor 2**
Varians	Ens	Ens	Ens	Ens
t-stat	0,55	0,51	-1,59	-3,14
P-værdi, enhalet	0,29	0,30	0,06	0,00
t-kritisk, enhalet	1,724	1,724	1,724	1,724

Tabel B.6. T-test med to stikprøver for Limfjordstunnelen i punkt D802980450 i morgenspidstimen

Eftermiddagsspidstimen



Figur B.3. Plot af kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i eftermiddagsspidstimen ved punkt 702930010, Limfjordstunnelen for 2019 og 2020

	Krit. hastighed [km/t]			**Krit. trafikintensitet [kt/min]**		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
08.01.2019	74,0	75,5	70,4	29,6	36,2	25,0
10.01.2019	76,8	72,9	71,5	33,8	35,8	25,0
15.01.2019	82,1	70,2	70,3	29,8	39,8	28,2
16.01.2019	78,4	75,8	70,0	33,4	36,8	27,2
17.01.2019	77,8	72,7	70,5	34,6	38,8	27,2
22.01.2019	80,9	77,9	69,6	31,8	35,0	27,6
23.01.2019	83,3	78,6	70,8	29,6	36,8	28,0
30.01.2019	81,6	82,8	74,2	30,4	34,4	25,2
31.01.2019	75,7	78,0	71,2	30,8	33,8	25,0
Median	**78,4**	**75,8**	**70,5**	**30,8**	**36,2**	**27,9**

Tabel B.7. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D702930010 i eftermiddagsspidstimen 2019.

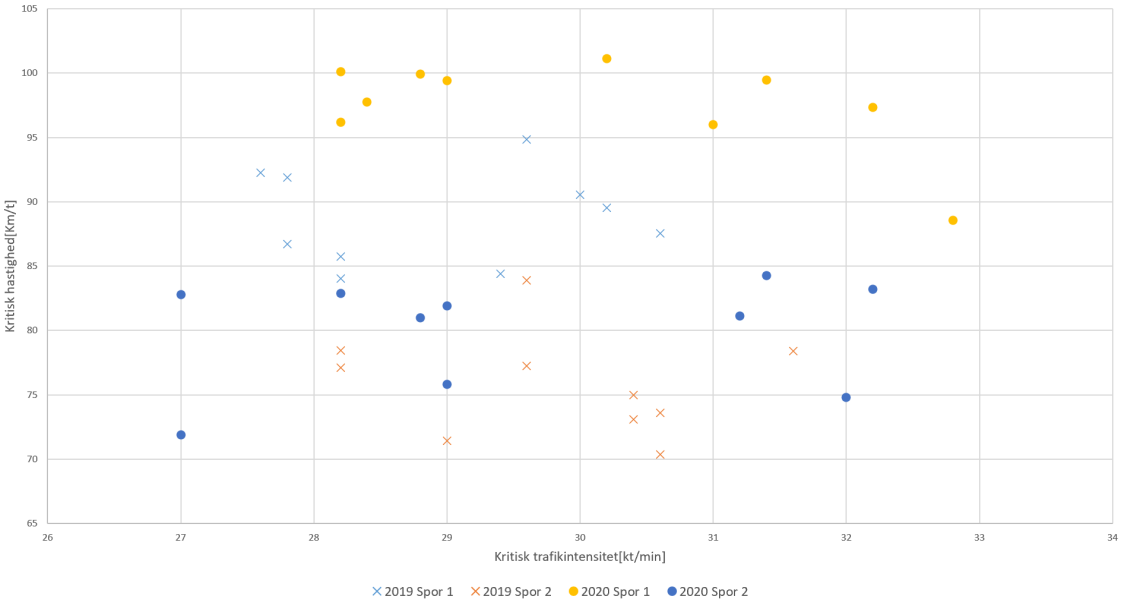
	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	69,6	66,1	68,7	37,0	41,8	28,2
08.01.2020	69,5	64,4	61,8	35,4	39,6	32,4
09.01.2020	63,9	61,4	62,2	35,6	34,6	27,8
15.01.2020	80,5	81,8	75,9	29,8	32,8	24,0
16.01.2020	76,6	71,6	72,7	33,4	39,4	22,4
21.01.2020	70,1	66,3	69,2	37,2	37,6	28,6
23.01.2020	74,3	71,8	61,7	30,6	37,6	22,6
28.01.2020	68,4	69,7	65,3	35,0	38,4	29,6
29.01.2020	81,5	77,7	62,7	31,2	34,8	32,2
30.01.2020	73,4	71,0	76,2	35,8	39,6	23,0
Median	**70,0**	**69,7**	**65,3**	**35**	**37,6**	**28,2**

Tabel B.8. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D702930010 i eftermiddagsspidstimen 2020.

Statistisk test

	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Ens	Ens	Uens	Ens	Ens	Uens
t-stat	2,926	2,470	1,579	-2,354	-1,113	-0,453
P-værdi en-halet	0,004	0,012	0,05	0,01	0,14	0,32
t-kritisk en-halet	1,739	1,739	1,812	1,739	1,739	1,782

Tabel B.9. T-test med to stikprøver for Limfjordstunnelen i punkt D702930010 i eftermiddagsspidstimen.



Figur B.4. Plot af kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i eftermiddagsspidstimen ved Humlebakken for 2019 og 2020

	Krit. hastighed [km/t]		Krit. trafikintensitet [kt/min]	
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 1**	**Spor 2**
08.01.2019	84,0	77,1	28,2	28,2
10.01.2019	91,9	73,6	27,8	30,6
15.01.2019	89,5	70,4	30,2	30,6
16.01.2019	92,3	71,4	27,6	29,0
17.01.2019	94,8	77,2	29,6	29,6
22.01.2019	90,5	75,0	30,0	30,4
23.01.2019	87,6	78,4	30,6	28,2
29.01.2019	85,8	78,4	28,2	31,6
30.01.2019	84,4	83,9	29,4	29,6
31.01.2019	86,7	73,1	27,8	30,4
Median	**89,5**	**77,12**	**29,4**	**29,6**

Tabel B.10. Kritisk hastighed og trafikintensitet for Humlebakken, punkt D702900453 i eftermiddagsspidstimen 2019.

	Krit. hastighed [km/t]		Krit. trafikintensitet [kt/min]	
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 1**	**Spor 2**
07.01.2020	100,1	84,3	28,2	31,4
08.01.2020	99,4	82,9	31,4	28,2
15.01.2020	96,2	81,0	28,2	28,8
16.01.2020	88,6	71,9	32,8	27,0
21.01.2020	99,4	83,2	28,8	32,2
22.01.2020	96,0	75,8	31,0	29,0
23.01.2020	97,8	82,8	28,4	27,0
28.01.2020	97,3	81,1	32,2	31,2
29.01.2020	101,1	81,9	30,2	29,0
30.01.2020	99,4	74,8	29,0	32,0
Median	**98,6**	**81,5**	**29,6**	**29,0**

Tabel B.11. Kritisk hastighed og trafikintensitet for Humlebakken, punkt D702900453 i eftermiddagsspidstimen 2020.

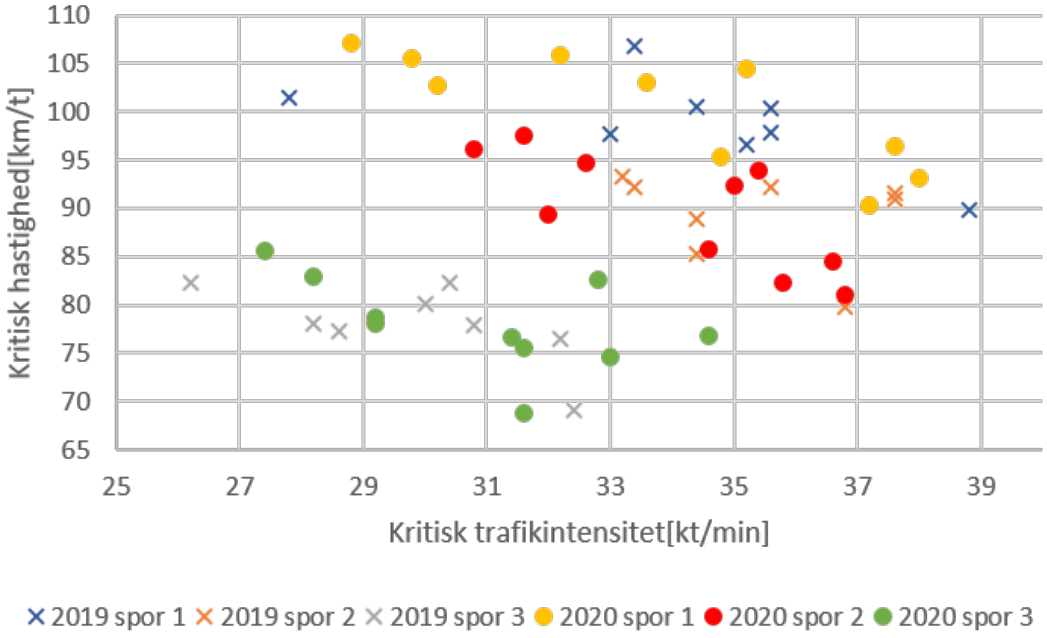
	Krit. hastighed [km/t]		Krit. trafikintensitet [kt/min]	
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 1**	**Spor 2**
Varians	Ens	Ens	Ens	Ens
t-stat	-5,45	-2,23	-1,64	0,33
P-værdi, enhalet	0,00	0,01	0,05	0,37
t-kritisk, enhalet	1,734	1,734	1,734	1,734

Tabel B.12. T-test med to stikprøver for Humlebakken i punkt D702900453 i eftermiddagsspidstimen.

Motorring 3

Morgenspidstimen

Sydgående retning



Figur B.5. Kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i morgenspidstimen mod syd ved M3 for 2019 og 2020

	Krit. hastighed [km/t]			**Krit. trafikintensitet [kt/min]**		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
09.01.2019	106,8	91,6	82,3	33,4	37,6	30,4
15.01.2019	96,5	85,4	78,1	35,2	34,4	28,2
16.01.2019	101,4	89,0	76,4	27,8	34,4	32,2
17.01.2019	100,4	90,9	82,3	34,4	37,6	26,2
22.01.2019	97,8	93,2	77,3	35,6	33,2	28,6
24.01.2019	97,7	92,2	77,9	33,0	33,4	30,8
29.01.2019	89,9	79,8	69,1	38,8	36,8	32,4
31.01.2019	100,3	92,2	80,1	35,6	35,6	30,0
Median	**99,1**	**91,3**	**78,0**	**34,8**	**35,0**	**30,2**

Tabel B.13. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D030450315 i morgenspidstimen for sydgående retning 2019.

	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	96,4	82,3	74,6	37,6	35,8	33,0
08.01.2020	107,1	96,1	85,6	28,8	30,8	27,4
14.01.2020	103,0	93,9	82,9	33,6	35,4	28,2
15.01.2020	95,3	85,7	76,7	34,8	34,6	31,4
16.01.2020	105,9	92,4	82,6	32,2	35,0	32,8
22.01.2020	104,4	94,7	76,9	35,2	32,6	34,6
23.01.2020	93,1	81,0	68,7	38,0	36,8	31,6
28.01.2020	90,3	84,4	75,5	37,2	36,6	31,6
29.01.2020	105,6	97,6	78,7	29,8	31,6	29,2
30.01.2020	102,7	89,3	78,0	30,2	32,0	29,2
Median	**102,9**	**90,9**	**77,5**	**34,2**	**34,8**	**31,5**

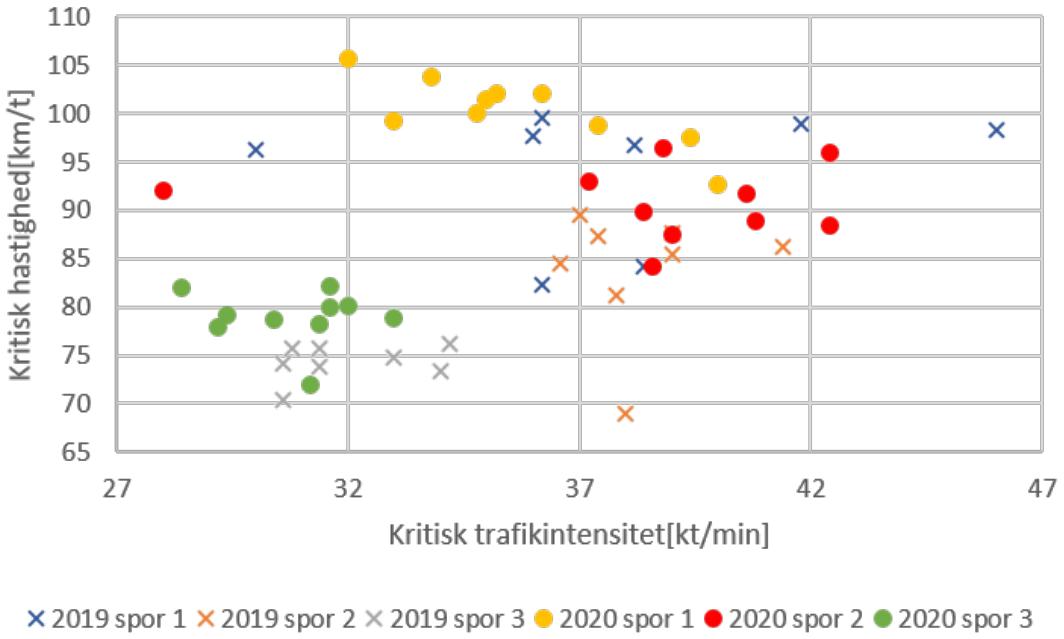
Tabel B.14. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D030450315 i morgenspidstimen for sydgående retning 2020.

Statistisk test

	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Ens	Ens	Ens	Uens	Ens	Uens
t-stat	-0,57	-0,18	-0,03	0,31	1,31	-1,00
P-værdi en-halet	0,29	0,43	0,49	0,38	0,10	0,17
t-kritisk en-halet	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75

Tabel B.15. T-test med to stikprøver for M3 for punkt D030450315 i morgenspidstimen for sydgående retning.

Nordgående retning



Figur B.6. Kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i morgenspidstimen mod nord ved M3 for 2019 og 2020

	Krit. hastighed [km/t]			**Krit. trafikintensitet [kt/min]**		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
09.01.2019	99,6	87,6	75,7	36,2	39,0	30,8
15.01.2019	82,3	68,9	75,7	36,2	38,0	31,4
16.01.2019	96,3	81,3	73,3	30,0	37,8	34,0
17.01.2019	98,9	89,5	74,2	41,8	37,0	30,6
22.01.2019	84,3	87,4	73,9	38,4	37,4	31,4
24.01.2019	98,3	86,3	76,1	46,0	41,4	34,2
29.01.2019	96,7	85,5	74,7	38,2	39,0	33,0
31.01.2019	97,7	84,5	70,3	36,0	36,6	30,6
Median	**97,2**	**85,9**	**74,5**	**37,2**	**37,9**	**31,4**

Tabel B.16. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D030450315 i morgenspidstimen for nordgående retning 2019.

	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	98,7	88,4	78,9	37,4	42,4	33,0
08.01.2020	100,1	84,2	72,0	34,8	38,6	31,2
14.01.2020	92,7	95,9	82,1	40,0	42,4	31,6
15.01.2020	97,6	87,5	77,9	39,4	39,0	29,2
16.01.2020	103,7	88,8	80,0	33,8	40,8	31,6
22.01.2020	105,7	92,0	81,9	32,0	28,0	28,4
23.01.2020	102,1	89,9	79,2	35,2	38,4	29,4
28.01.2020	99,3	93,0	78,7	33,0	37,2	30,4
29.01.2020	102,1	96,4	78,3	36,2	38,8	31,4
30.01.2020	101,4	91,6	80,1	35,0	40,6	32,0
Median	**100,7**	**90,8**	**79,1**	**35,1**	**38,9**	**31,3**

Tabel B.17. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D030450315 i morgenspidstimen for nordgående retning 2020.

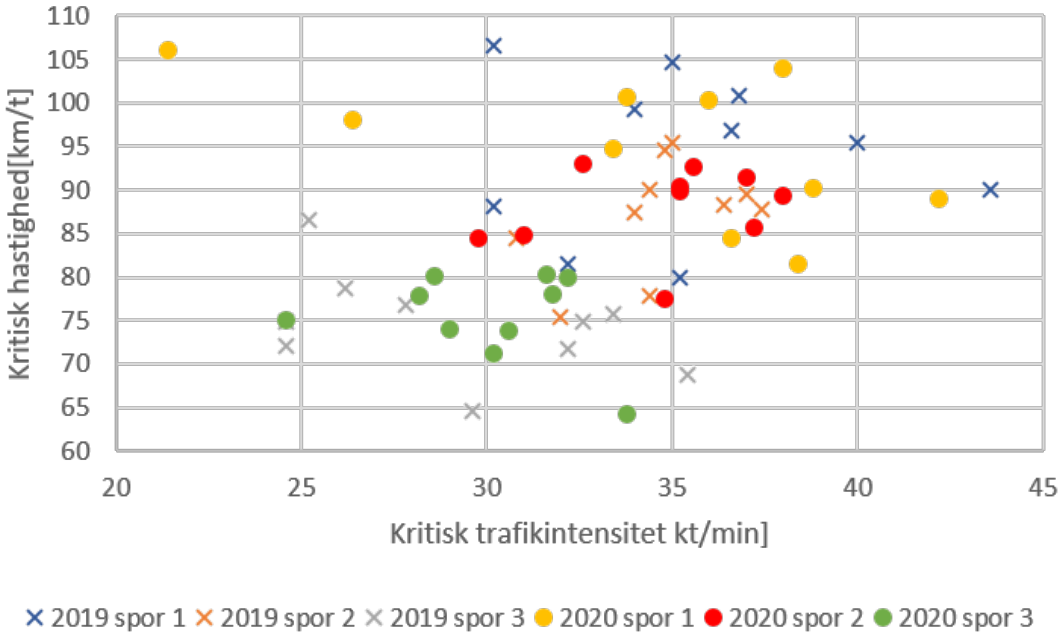
Statistisk test

	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Uens	Ens	Ens	Ens	Uens	Uens
t-stat	-2,27	-2,82	-4,02	1,25	-0,24	-1,69
P-værdi en-halet	0,023	0,006	0,0005	0,11	0,41	0,0056
t-kritisk en-halet	1,81	1,75	1,75	1,75	1,78	1,75

Tabel B.18. T-test med to stikprøver for M3 for punkt D030450315 i morgenspidstimen for nordgående retning.

Eftermiddagsspidstimen

Sydgående retning



Figur B.7. Kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i eftermiddagsspidstimen mod syd ved M3 for 2019 og 2020

	Krit. hastighed [km/t]			**Krit. trafikintensitet [kt/min]**		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
08.01.2019	96,8	87,5	75,7	36,6	34,0	33,4
09.01.2019	106,7	95,4	86,6	30,2	35,0	25,2
10.01.2019	90,0	87,7	68,8	43,6	37,4	35,4
15.01.2019	79,9	84,5	74,8	35,2	30,8	24,6
17.01.2019	81,5	75,5	64,6	32,2	32,0	29,6
22.01.2019	95,4	89,5	71,7	40,0	37,0	32,2
23.01.2019	99,2	90,0	76,7	34,0	34,4	27,8
24.01.2019	104,7	94,6	78,8	35,0	34,8	26,2
29.01.2019	100,9	88,3	74,8	36,8	36,4	32,6
31.01.2019	88,1	77,9	72,1	30,2	34,4	24,6
Median	**96,1**	**88,0**	**74,8**	**35,1**	**34,6**	**28,7**

Tabel B.19. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for sydgående retning 2019.

	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
007.01.2020	81,5	77,4	64,2	38,4	34,8	33,8
09.01.2020	98,1	84,8	75,0	26,4	31,0	24,6
14.01.2020	94,8	84,4	71,1	33,4	29,8	30,2
15.01.2020	89,0	89,4	80,3	42,2	38,0	31,6
16.01.2020	100,4	92,6	79,9	36,0	35,6	32,2
21.01.2020	90,2	85,7	74,1	38,8	37,2	29,0
23.01.2020	106,0	92,9	77,8	21,4	32,6	28,2
	100,6	90,4	80,1	33,8	35,2	28,6
29.01.2020	84,4	89,8	73,8	36,6	35,2	30,6
30.01.2020	103,9	91,4	78,1	38,0	37,0	31,8
Median	**96,4**	**89,6**	**76,4**	**36,3**	**35,2**	**30,4**

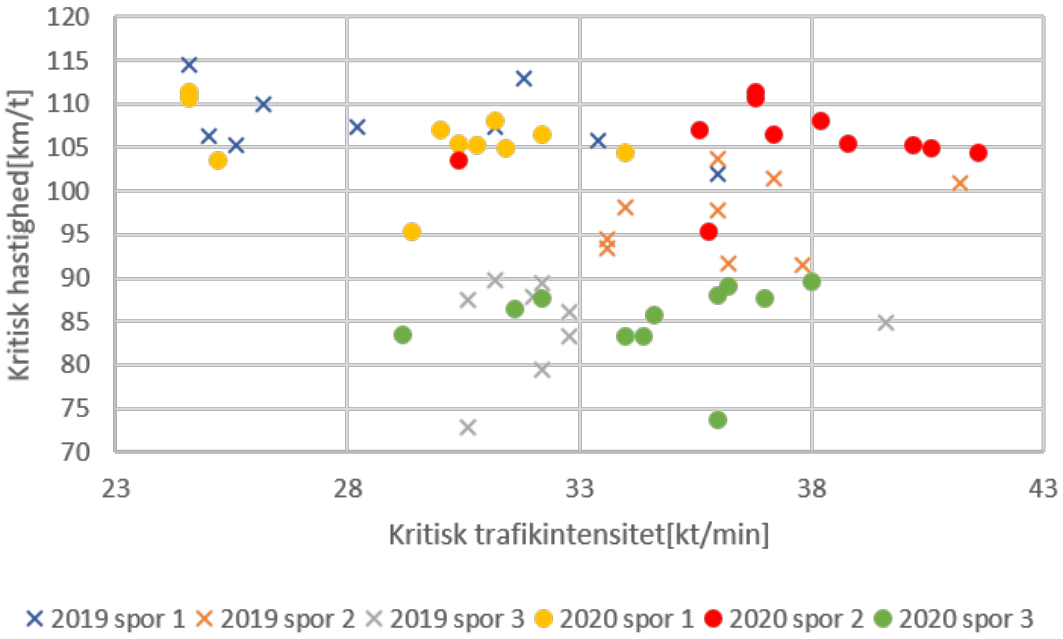
Tabel B.20. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for sydgående retning 2020.

Statistisk test

	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Ens	Ens	Ens	Ens	Ens	Ens
t-stat	-0,15	-0,32	-0,39	0,37	-0,02	-0,59
P-værdi en-halet	0,44	0,38	0,35	0,36	0,49	0,28
t-kritisk en-halet	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73

Tabel B.21. T-test med to stikprøver for M3 for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for sydgående retning.

Nordgående retning



Figur B.8. Kritiske hastighed og trafikintensitet for alle sporene i eftermiddagsspidstimen mod nord ved M3 for 2019 og 2020

	Krit. hastighed [km/t]			**Krit. trafikintensitet [kt/min]**		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
08.01.2019	102,0	91,5	79,4	36,0	37,8	32,2
09.01.2019	107,4	101,4	84,9	31,2	37,2	39,6
10.01.2019	109,9	91,7	86,0	26,2	36,2	32,8
15.01.2019	107,4	98,0	87,4	28,2	34,0	30,6
17.01.2019	105,3	93,4	72,8	25,6	33,6	30,6
22.01.2019	105,8	97,7	87,9	33,4	36,0	32,0
23.01.2019	106,4	94,5	83,3	25,0	33,6	32,8
24.01.2019	112,9	100,9	89,7	31,8	41,2	31,2
31.01.2019	114,4	103,7	89,4	24,6	36,0	32,2
Median	**107,4**	**97,7**	**86,0**	**28,2**	**36,0**	**32,2**

Tabel B.22. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for nordgående retning 2019.

	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	106,4	95,1	85,7	32,2	37,2	34,6
09.01.2020	95,2	78,2	73,8	29,4	35,8	36,0
14.01.2020	105,3	87,7	89,6	30,8	40,2	38,0
	110,6	99,9	86,4	24,6	36,8	31,6
15.01.2020	108,1	96,0	88,1	31,2	38,2	36,0
	103,5	93,6	83,5	25,2	30,4	29,2
16.01.2020	104,4	92,9	89,1	34,0	41,6	36,2
21.01.2020	111,4	100,0	87,7	24,6	36,8	32,2
23.01.2020	105,5	100,7	83,3	30,4	38,8	34,0
29.01.2020	104,9	91,6	83,3	31,4	40,6	34,4
30.01.2020	107,0	96,2	87,6	30,0	35,6	37,0
Median	**105,5**	**95,1**	**86,4**	**30,4**	**37,2**	**34,6**

Tabel B.23. Kritisk hastighed og trafikintensitet for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for nordgående retning 2020.

Statistisk test

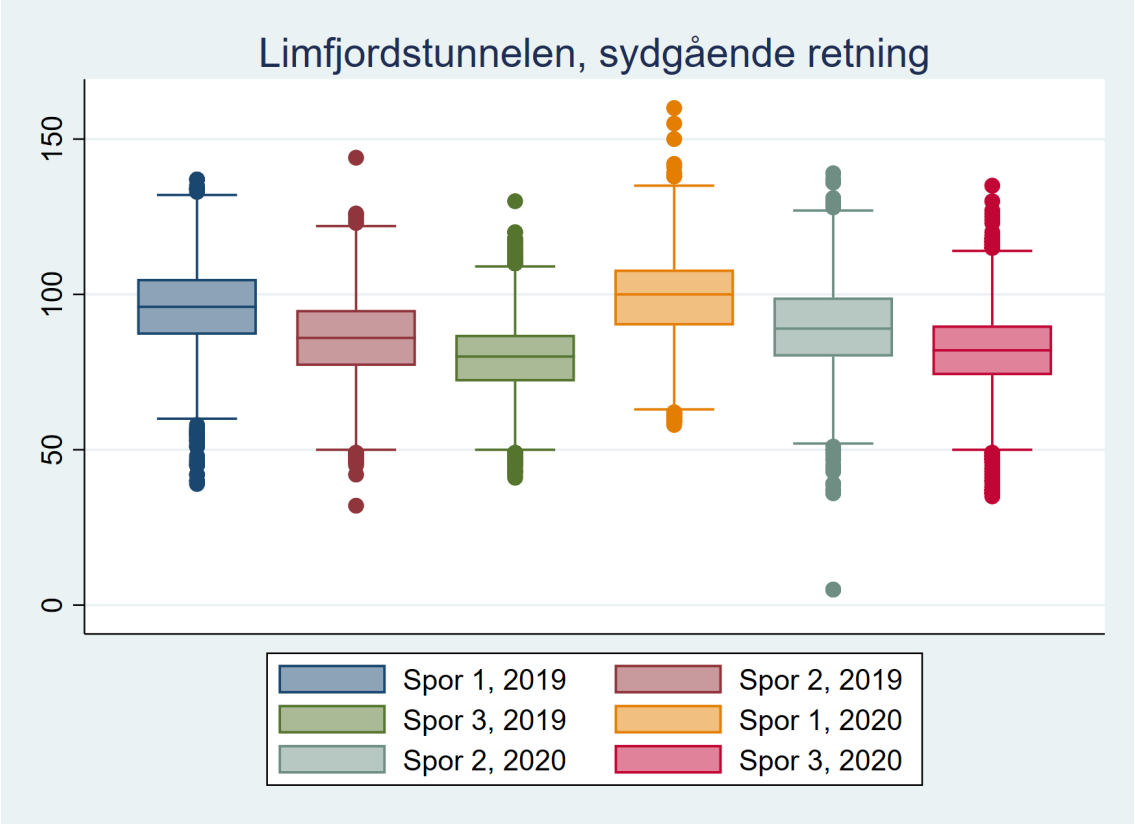
	Krit. hastighed [km/t]			Krit. trafikintensitet [kt/min]		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**	**Spor 1**	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Ens	Ens	Ens	Ens	Ens	Ens
t-stat	1,24	1,25	-0,34	-0,20	-1,02	-1,51
P-værdi en-halet	0,12	0,11	0,37	0,42	0,16	0,07
t-kritisk en-halet	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73

Tabel B.24. T-test med to stikprøver for M3 for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for nordgående retning.

Boxplot C

Limfjordstunnelen

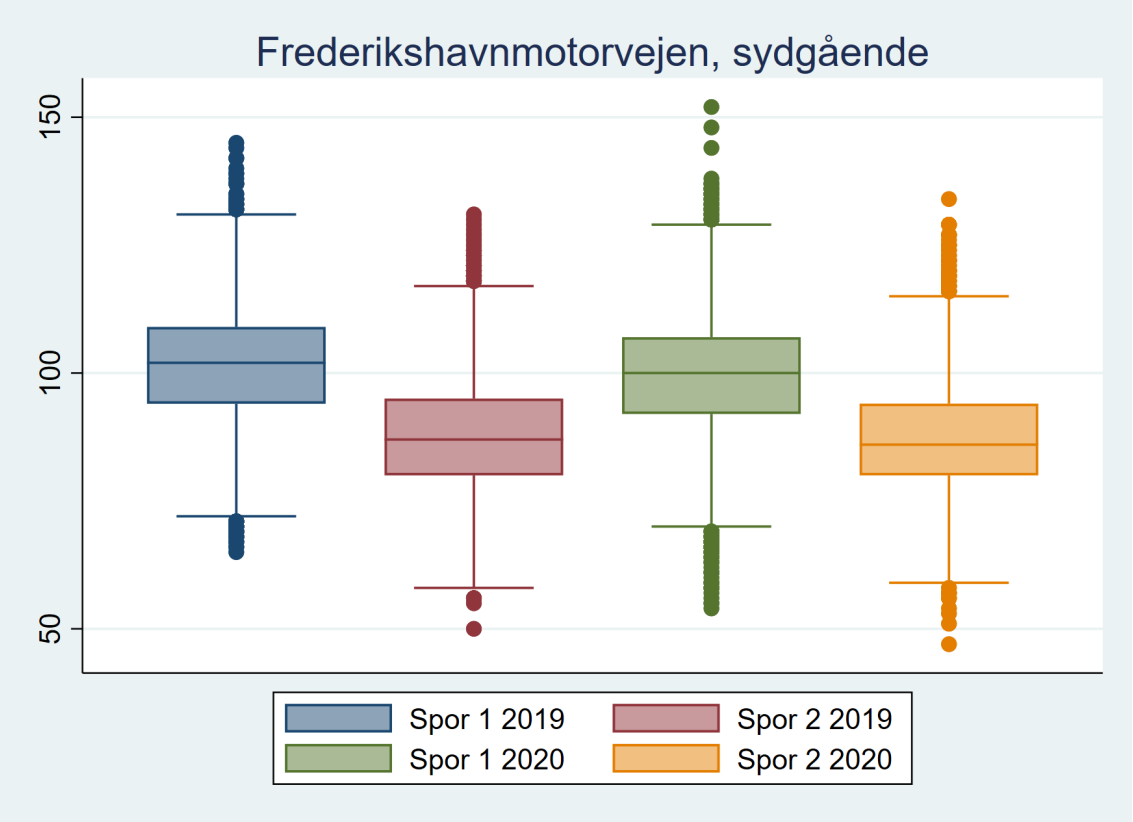
Morgenspidstimen



Figur C.1. Boxplot over hastighederne i perioden med synkroniseret flow til trafiksammenbruddet ved Limfjordstunnelen i morgenspidstimen i sydgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

	Hastighed [km/t]					
	Spor 1		Spor 2		Spor 3	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
25% kvartil	87	90	77	80	72	74
Median	96	100	86	89	80	82
75% kvartil	105	108	95	99	87	90

Tabel C.1. 25%-kvartil, median og 75%-kvartil over hastighederne i perioden fra synkroniseret flow til trafiksammenbrud for Limfjordstunnelen i morgenspidstimen i sydgående retning summeret 2019 sammenlignet med 2020.

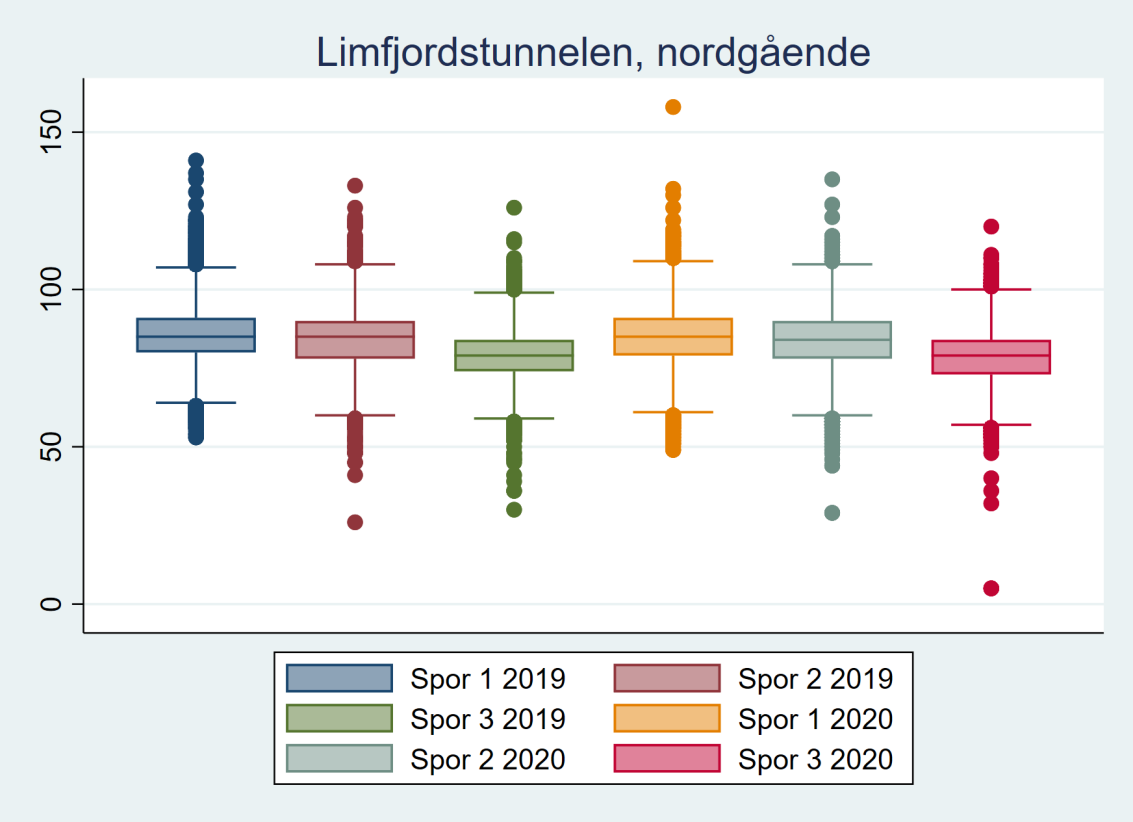


Figur C.2. Boxplot over hastighederne i perioden med synkroniseret flow til trafiksammenbruddet ved Frederikshavnmotorvejen i morgenspidstimen i sydgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

	Hastighed [km/t]			
	Spor 1		Spor 2	
	2019	2020	2019	2020
25% kvartil	94	92	80	80
Median	102	100	87	86
75% kvartil	109	107	95	94

Tabel C.2. 25%-kvartil, median og 75%-kvartil over hastighederne i perioden fra synkroniseret flow til trafiksammenbrud for Frederikshavnmotorvejen i morgenspidstimen i sydgående retning summeret 2019 sammenlignet med 2020.

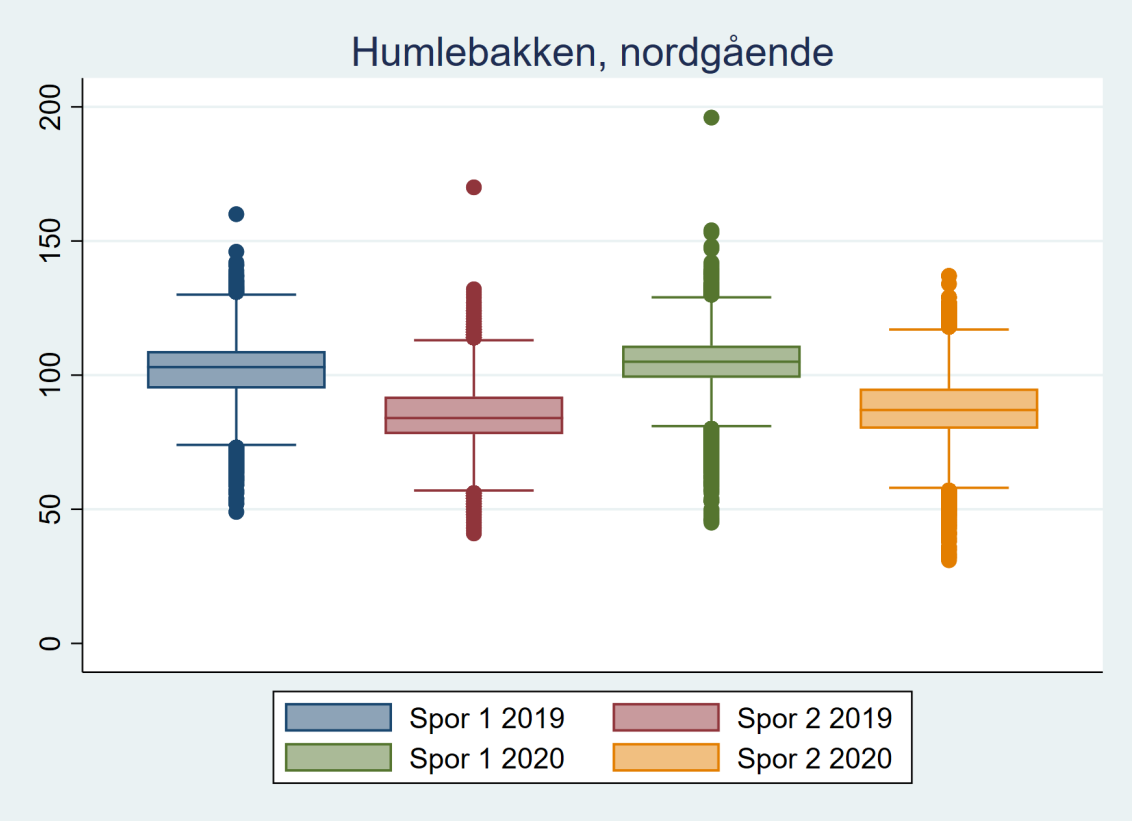
Eftermiddagsspidstimen



Figur C.3. Boxplot over hastighederne i perioden med synkroniseret flow til trafiksammenbruddet ved Limfjordstunnelen i eftermiddagsspidstimen i nordgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

	Hastighed [km/t]					
	Spor 1		**Spor 2**		**Spor 3**	
	2019	**2020**	**2019**	**2020**	**2019**	**2020**
25% kvartil	80	79	78	78	74	73
Median	85	85	85	84	79	79
75% kvartil	91	91	90	90	84	84

Tabel C.3. 25%-kvartil, median og 75%-kvartil over hastighederne i perioden fra synkroniseret flow til trafiksammenbrud for Limfjordstunnelen i eftermiddagsspidstimen i nordgående retning summeret 2019 sammenlignet med 2020.



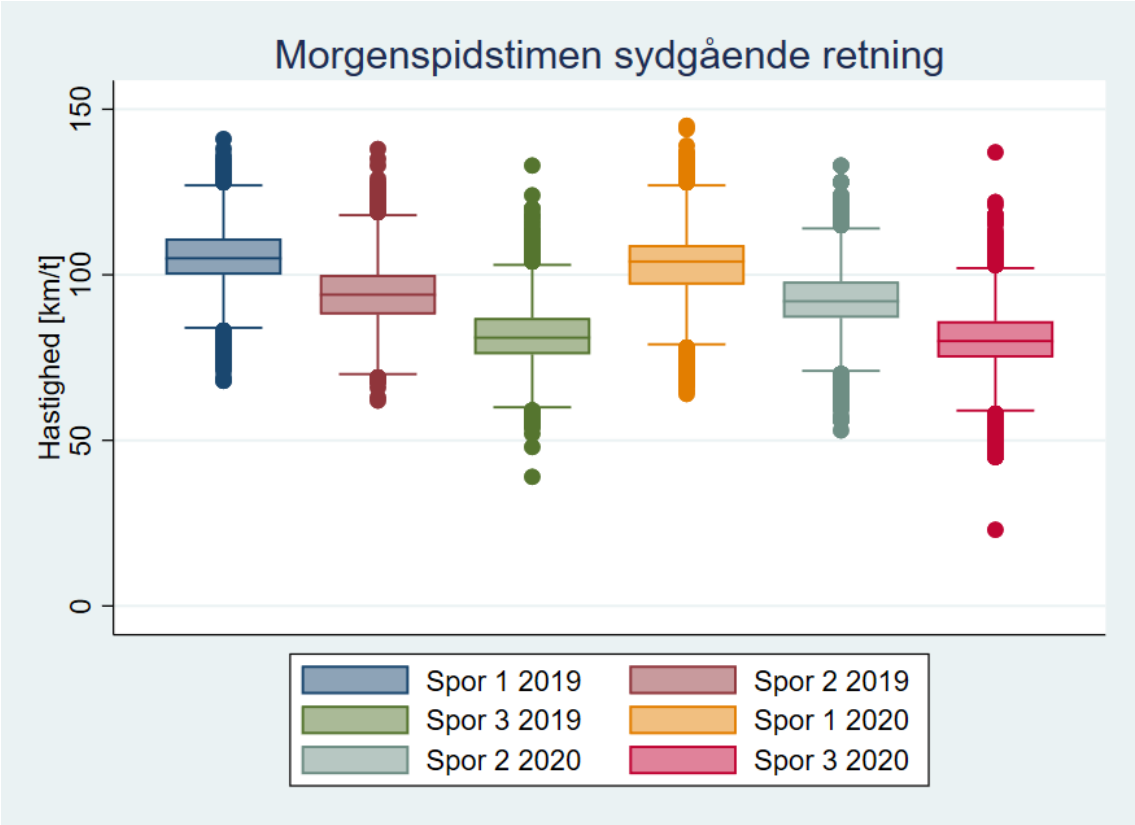
Figur C.4. Boxplot over hastighederne i perioden med synkroniseret flow til trafiksammenbruddet ved Humlebakken i eftermiddagsspidstimen i nordgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

	Hastighed [km/t]			
	Spor 1		**Spor 2**	
	2019	**2020**	**2019**	**2020**
25% kvartil	95	99	78	80
Median	103	105	84	87
75% kvartil	109	111	92	95

Tabel C.4. 25%-kvartil, median og 75%-kvartil over hastighederne i perioden fra synkroniseret flow til trafiksammenbrud for Humlebakken i i eftermiddagsspidstimen i nordgående retning summeret 2019 sammenlignet med 2020.

Motorring 3

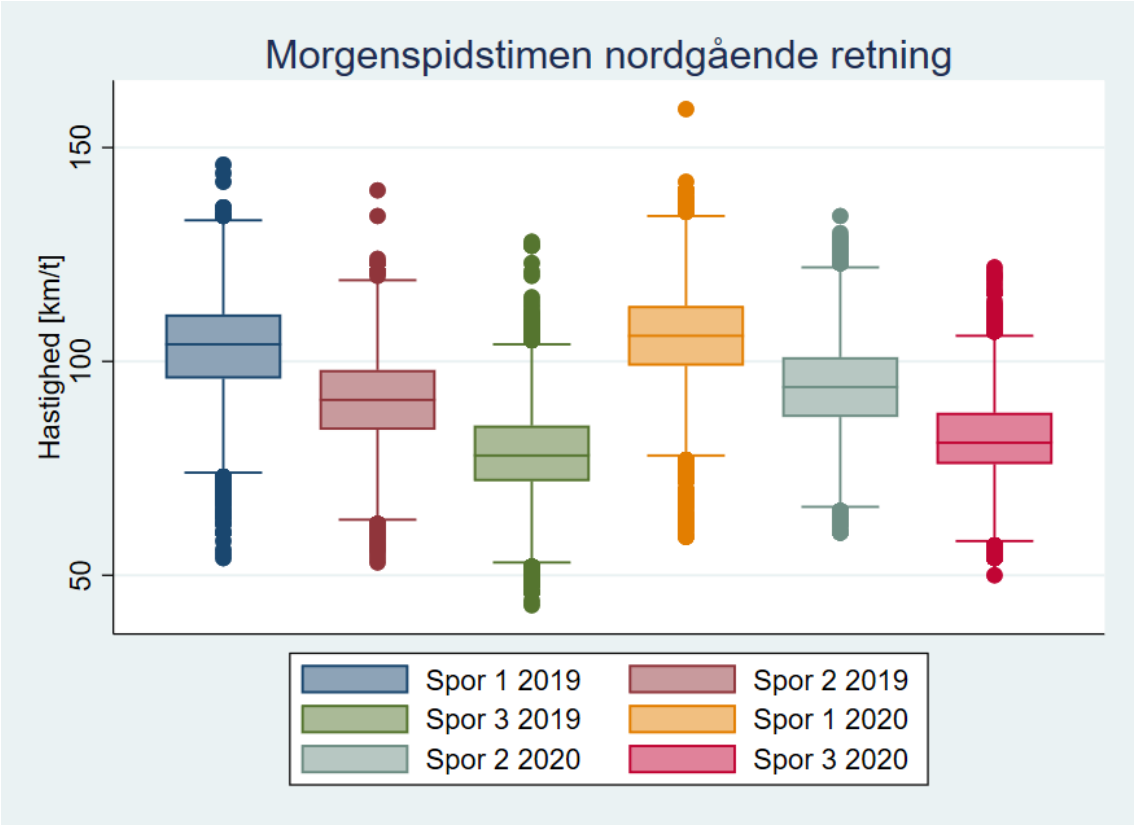
Morgenspidstimen



Figur C.5. Boxplot over hastigheden en time før trafiksammenbruddet for M3 i morgenspidstimen for sydgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

	Hastighed [km/t]					
	Spor 1		**Spor 2**		**Spor 3**	
	2019	**2020**	**2019**	**2020**	**2019**	**2020**
25% kvartil	100	97	88	87	76	75
Median	105	104	94	92	81	80
75% kvartil	111	109	100	98	87	86

Tabel C.5. 25% kvartil, median og 75% kvartil en time før trafiksammenbruddet for M3 i morgenspidstimen for sydgående retning.

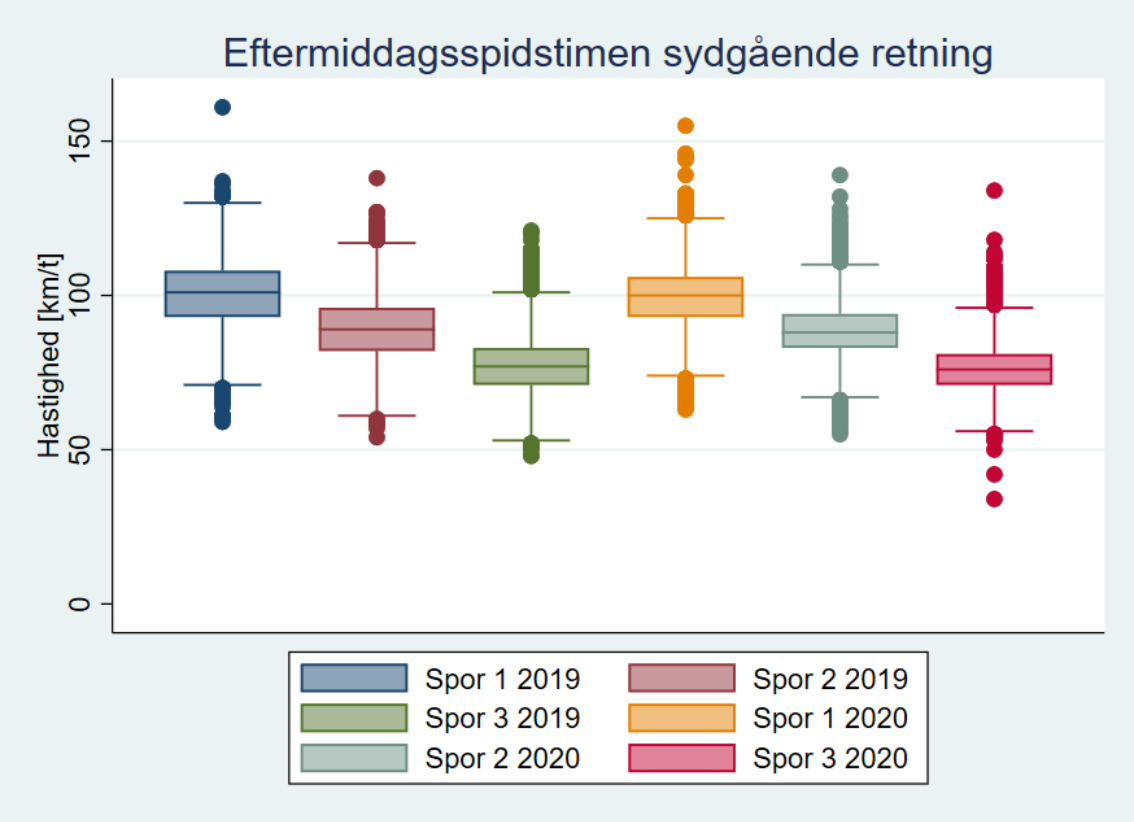


Figur C.6. Boxplot over hastigheden en time før trafiksammenbruddet for M3 i morgenspidstimen for nordgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

	Hastighed [km/t]					
	Spor 1		**Spor 2**		**Spor 3**	
	2019	**2020**	**2019**	**2020**	**2019**	**2020**
25% kvartil	96	99	84	87	72	76
Median	104	106	91	94	78	81
75% kvartil	111	113	98	101	85	88

Tabel C.6. 25% kvartil, median og 75% kvartil en time før trafiksammenbruddet for M3 i morgenspidstimen for nordgående retning.

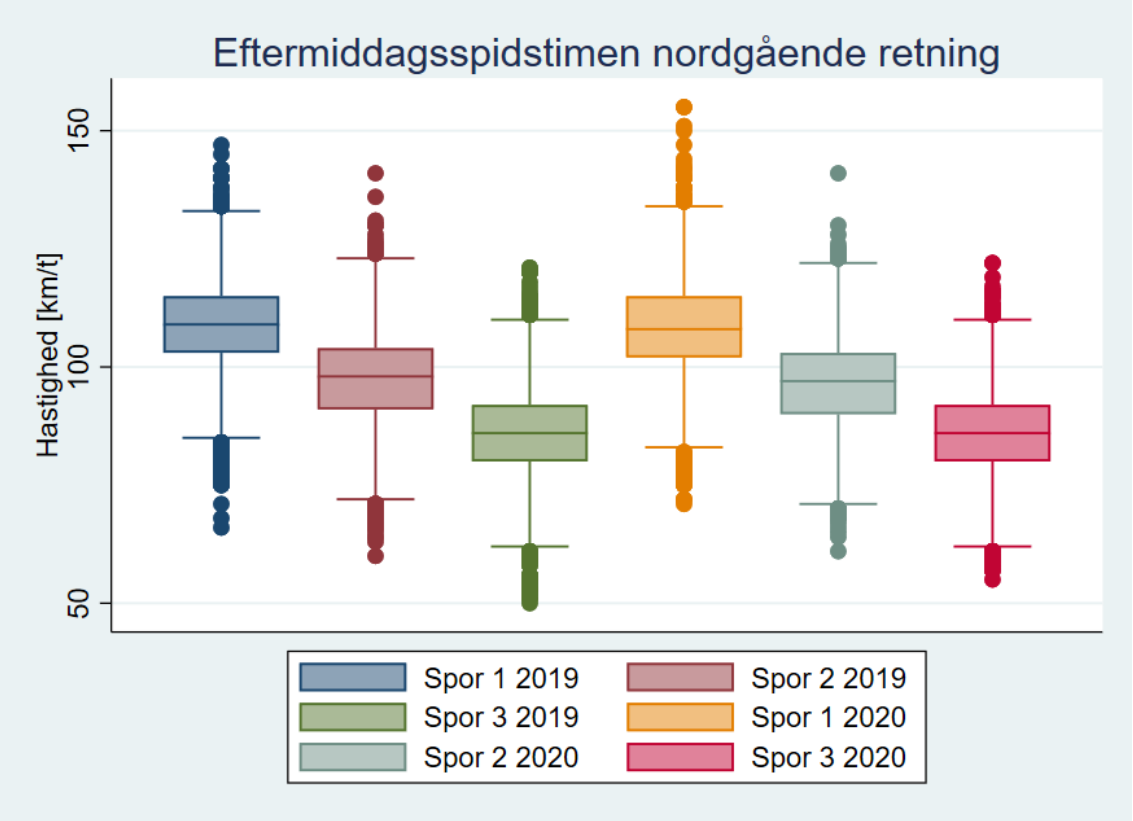
Eftermiddagsspidstimen



Figur C.7. Boxplot over hastigheden en time før trafiksammenbruddet for M3 i eftermiddagsspidstimen for sydgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

	Hastighed [km/t]					
	Spor 1		**Spor 2**		**Spor 3**	
	2019	**2020**	**2019**	**2020**	**2019**	**2020**
25% kvartil	93	93	82	83	71	71
Median	101	100	89	88	77	76
75% kvartil	108	106	96	94	83	81

Tabel C.7. 25% kvartil, median og 75% kvartil en time før trafiksammenbruddet for M3 i eftermiddagsspidstimen for sydgående retning.



Figur C.8. Boxplot over hastigheden en time før trafiksammenbruddet for M3 i eftermiddagsspidstimen for nordgående retning. [Vejdirektoratet, 2020a]

	Hastighed [km/t]					
	Spor 1		**Spor 2**		**Spor 3**	
	2019	**2020**	**2019**	**2020**	**2019**	**2020**
25% kvartil	103	102	91	90	80	80
Median	109	108	98	97	86	86
75% kvartil	115	115	104	103	92	92

Tabel C.8. 25% kvartil, median og 75% kvartil en time før trafiksammenbruddet for M3 i eftermiddagsspidstimen for nordgående retning.

Variation i hastigheden D

Limfjordstunnelen

Morgenspidstimen

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
08.01.2019	189,6	124,3	96,6
15.01.2019	115,1	111,3	147,5
16.01.2019	114,8	129,1	89,2
17.01.2019	138,0	149,9	120,5
22.01.2019	103,9	88,6	96,3
23.01.2019	175,5	187,5	142
24.01.2019	145,5	147,6	121,1
29.01.2019	118,6	140,3	122,9
30.01.2019	121,6	88,0	100,6
31.01.2019	83,9	114,5	94,5
Median	**120,0**	**126,7**	**110,5**

Tabel D.1. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for Limfjordstunnelen i punkt D702950500 i morgenspidstimen 2019.

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	197,8	96,5	167,6
08.01.2020	157,6	128,0	134,0
09.01.2020	98,1	126,8	101,0
15.01.2020	133,8	110,1	141,7
16.01.2020	101,5	139,0	115,5
21.01.2020	155,0	170,4	152,6
22.01.2020	165,3	181,7	149,2
23.01.2020	133,0	118,9	102,7
28.01.2020	108,2	138,9	116,2
29.01.2020	163,5	194,8	155,8
30.01.2020	180,8	190,8	168,1
Median	**155,0**	**138,9**	**141,7**

Tabel D.2. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for Limfjordstunnelen i punkt D702950500 i morgenspidstimen 2020.

Statistisk test

	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
t-stat	-1,09	-1,20	-2,37
P-værdi en-halet	0,14	0,12	0,014
t-kritisk en-halet	1,73	1,73	1,73

Tabel D.3. T-test med to stikprøver med ens varians for Limfjordstunnelen i punkt D702950500 i morgenspidstimen.

	2019	**2020**
F	1,11	0,26
P-værdi	0,34	0,76
F-kritisk	3,35	3,32

Tabel D.4. ANOVA-test for Limfjordstunnelen i punkt D702950500 i morgenspidstimen.

	Variation i hastigheden	
	Spor 1	**Spor 2**
08.01.2019	92,8	106,8
10.01.2019	78,6	118,7
15.01.2019	93,7	103,2
17.01.2019	87,2	91,1
22.01.2019	124,1	105,9
23.01.2019	134,3	134,1
24.01.2019	115,3	98,8
29.01.2019	106,5	89,1
30.01.2019	98,9	99,6
31.01.2019	79,7	107,8
Median	**96,3**	**104,6**

Tabel D.5. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for Frederikshavnmotorvejen punkt D802980450 i morgenspidstimen 2019.

	Variation i hastigheden	
	Spor 1	**Spor 2**
07.01.2020	122,3	100,5
08.01.2020	100,1	124,3
09.01.2020	117,8	112,3
15.01.2020	115,9	106,3
16.01.2020	119,0	120,3
21.01.2020	121,0	115,3
22.01.2020	118,3	116,2
23.01.2020	165,0	134,3
28.01.2020	120,4	96,7
29.01.2020	95,5	103,2
30.01.2020	138,4	127,6
Median	**119,0**	**115,3**

Tabel D.6. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for Frederikshavnmotorvejen punkt D802980450 i morgenspidstimen 2020.

Statistisk test

	Spor 1	**Spor 2**
t-stat	-2,49	-1,60
P-værdi en-halet	0,01	0,06
t-kritisk en-halet	1,73	1,73

Tabel D.7. T-test med to stikprøver med ens varians for Frederikshavnmotorvejen punkt D802980450 i morgenspidstimen.

	2019	**2020**
F	0,37	1,12
P-værdi	0,55	0,30
F-kritisk	4,41	4,35

Tabel D.8. ANOVA-test for Frederikshavnmotorvejen punkt D802980450 i morgenspidstimen.

Eftermiddagsspidstimen

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
08.01.2019	75,9	68,2	52,9
10.01.2019	79,3	89,3	76,2
15.01.2019	70,8	75,6	57,6
16.01.2019	85,0	73,9	62,0
17.01.2019	78,7	92,6	57,5
22.01.2019	78,8	73,0	61,5
23.01.2019	97,7	64,0	51,1
30.01.2019	94,6	94,3	66,1
31.01.2019	99,6	69,5	61,5
Median	**79,3**	**73,9**	**61,5**

Tabel D.9. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for Limfjordstunnelen punkt D702930010 i eftermiddagsspidstimen 2019.

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	84,1	70,8	50,3
08.01.2020	88,4	95,8	52,5
09.01.2020	83,6	87,0	60,2
15.01.2020	74,7	71,2	61,9
16.01.2020	75,1	96,0	58,8
21.01.2020	90,4	73,6	58,3
23.01.2020	71,8	67,7	54,9
28.01.2020	75,9	82,7	63,0
29.01.2020	87,4	83,3	63,9
30.01.2020	78,6	56,8	55,5
Median	**81,1**	**78,2**	**58,5**

Tabel D.10. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for Limfjordstunnelen punkt D702930010 i eftermiddagsspidstimen 2020.

Statistisk test

	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
t-stat	0,89	-0,12	0,83
P-værdi en-halet	0,19	0,45	0,21
t-kritisk en-halet	2,11	2,11	2,11

Tabel D.11. T-test med to stikprøver med ens varians for Limfjordstunnelen i punkt D702930010 i eftermiddagsspidstimen.

	2019	**2020**
F	14,01	20,07
P-værdi	9,29E-05	4,56E-06
F-kritisk	3,40	3,35

Tabel D.12. ANOVA-test for Limfjordstunnelen i punkt D702930010 i eftermiddagsspidstimen.

	Variation i hastigheden	
	Spor 1	**Spor 2**
08.01.2019	98,8	118,9
10.01.2019	125,7	158,3
15.01.2019	101,1	144,2
16.01.2019	160,6	144,2
17.01.2019	98,1	126,6
22.01.2019	120,0	158,8
23.01.2019	113,2	138,5
29.01.2019	138,3	154,3
30.01.2019	118,8	137,3
31.01.2019	104,6	140,2
Median	**116,0**	**142,2**

Tabel D.13. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for Humlebakken, punkt D702900453 i eftermiddagsspidstimen 2019.

	Variation i hastigheden	
	Spor 1	**Spor 2**
07.01.2020	84,3	138,4
08.01.2020	81,9	141,9
15.01.2020	106,8	146,8
16.01.2020	185,7	139,8
21.01.2020	89,5	132,1
22.01.2020	91,0	132,0
23.01.2020	104,9	135,8
28.01.2020	89,5	144,7
29.01.2020	100,7	152,8
30.01.2020	91,6	140,8
Median	**91,3**	**140,3**

Tabel D.14. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for Humlebakken, punkt D702900453 i eftermiddagsspidstimen 2020.

Statistisk test

	Spor 1	Spor 2
t-stat	1,34	0,35
P-værdi en-halet	0,01	0,37
t-kritisk en-halet	1,73	1,73

Tabel D.15. T-test med to stikprøver med ens varians for Humlebakken, punkt D702900453 i eftermiddagsspidstimen.

	2019	2020
F	10,40	14,91
P-værdi	0,005	0,001
F-kritisk	4,41	4,41

Tabel D.16. ANOVA-test for Humlebakken, punkt D702900453 i eftermiddagsspidstimen.

Motorring 3

Morgenspidstimen

Sydgående retning

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	Spor 2	Spor 3
09.01.2019	69,8	75,2	82,1
15.01.2019	61,4	58,8	51,5
16.01.2019	42,9	43,0	46,1
17.01.2019	92,2	73,6	81,7
22.01.2019	71,4	61,7	66,3
24.01.2019	81,1	79,3	76,3
29.01.2019	122,4	103,4	94,1
31.01.2019	64,1	74,8	77,9
Median	**70,6**	**74,2**	**77,1**

Tabel D.17. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for punkt D030450315 i morgenspidstimen for sydgående retning 2019.

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	112,0	96,9	86,7
08.01.2020	40,6	45,8	68,3
14.01.2020	64,7	56,5	64,1
15.01.2021	78,9	77,4	112,6
16.01.2022	67,6	65,0	73,1
23.01.2020	76,7	74,3	74,1
23.01.2020	107,4	97,3	78,2
28.01.2020	82,1	76,1	68,1
29.01.2020	59,3	56,1	79,3
30.01.2020	56,9	51,9	47,9
Median	**72,2**	**69,6**	**73,6**

Tabel D.18. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for punkt D030450315 i morgenspidstimen for sydgående retning 2020.

Statistisk test

	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Ens	Ens	Ens
t-stat	1,10	3,17	-0,41
P-værdi en-halet	0,46	0,43	0,34
t-kritisk en-halet	1,75	1,75	1,75

Tabel D.19. T-test med to stikprøver med ens varians for punkt D030450315 i morgenspidstimen for sydgående retning.

	2019	**2020**
F	0,12	0,25
P-værdi	0,89	0,78
F-kritisk	3,47	3,35

Tabel D.20. ANOVA-test for Limfjordstunnelen for punkt D030450315 i morgenspidstimen for sydgående retning.

Nordgående retning

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
09.01.2019	112,6	95,6	82,3
15.01.2019	111,4	113,7	91,6
16.01.2019	83,5	101,8	103,1
17.01.2019	106,8	97,9	119,6
22.01.2019	151,2	120,1	109,3
24.01.2019	123,7	109,7	97,4
29.01.2019	126,8	125,9	115,0
31.01.2019	85,5	82,6	69,3
Median	**112,0**	**105,8**	**100,3**

Tabel D.21. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for punkt D030450315 i morgenspidstimen for nordgående retning 2019.

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	177,3	124,2	90,5
08.01.2020	119,8	114,4	113,5
14.01.2020	129,0	124,6	95,0
15.01.2021	122,1	101,9	95,0
16.01.2022	113,5	117,7	115,5
23.01.2020	102,0	79,5	79,2
23.01.2020	102,3	85,9	83,1
28.01.2020	80,9	78,7	81,2
29.01.2020	107,2	101,2	96,0
30.01.2020	115,2	93,9	80,6
Median	**114,4**	**101,5**	**92,7**

Tabel D.22. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for punkt D030450315 i morgenspidstimen for nordgående retning 2020.

Statistisk test

	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Ens	Ens	Ens
t-stat	-0,37	0,49	0,77
P-værdi en-halet	0,36	0,32	0,22
t-kritisk en-halet	1,75	1,75	1,75

Tabel D.23. T-test med to stikprøver med ens varians for punkt D030450315 i morgenspidstimen for nordgående retning.

	2019	**2020**
F	1,25	3,95
P-værdi	0,31	0,03
F-kritisk	3,47	3,35

Tabel D.24. ANOVA-test for Limfjordstunnelen for punkt D030450315 i morgenspidstimen for nordgående retning.

Eftermiddagsspidstimen

Sydgående retning

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
08.01.2019	82,9	67,8	62,8
09.01.2019	68,9	61,9	67,9
10.01.2019	116,8	93,9	83,4
15.01.2019	155,8	111,9	80,9
17.01.2019	41,6	49,7	43,0
22.01.2019	96,4	94,7	85,6
23.01.2019	63,9	54,4	51,9
24.01.2019	53,9	85,1	72,2
29.01.2019	65,8	71,8	83,3
31.01.2019	113,0	105,3	78,4
Median	**75,9**	**78,4**	**75,3**

Tabel D.25. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for sydgående retning 2019.

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	84,1	83,2	63,9
09.01.2020	57,1	62,3	58,3
14.01.2020	62,1	57,7	51,6
15.01.2021	108,5	79,7	68,0
16.01.2022	60,9	49,4	38,8
21.01.2020	102,0	80,4	80,4
23.01.2020	71,6	73,7	69,7
29.01.2020	117,2	82,5	68,7
30.01.2020	79,7	60,5	69,4
Median	**79,7**	**73,7**	**68,0**

Tabel D.26. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for sydgående retning 2020.

Statistisk test

	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Ens	Ens	Ens
t-stat	0,25	1,18	1,25
P-værdi en-halet	0,40	0,13	0,11
t-kritisk en-halet	1,74	1,74	1,74

Tabel D.27. T-test med to stikprøver med ens varians for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for sydgående retning.

	2019	**2020**
F	0,90	3,28
P-værdi	0,42	0,06
F-kritisk	3,35	3,40

Tabel D.28. ANOVA-test for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for sydgående retning.

Nordgående retning

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
08.01.2019	133,5	97,0	90,4
09.01.2019	78,4	80,1	71,8
10.01.2019	109,6	120,2	109,8
15.01.2019	79,1	79,1	97,0
17.01.2019	67,9	81,9	55,7
22.01.2019	91,7	90,6	83,6
23.01.2019	72,7	66,4	67,1
24.01.2019	76,6	70,9	73,0
31.01.2019	53,8	61,5	55,6
Median	**78,4**	**80,1**	**73,0**

Tabel D.29. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for nordgående retning 2019.

	Variation i hastigheden		
	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
07.01.2020	83,9	71,2	64,6
09.01.2020	87,7	46,7	50,9
14.01.2020	124,9	130,6	128,2
15.01.2021	87,3	76,0	74,7
16.01.2022	100,3	69,8	63,6
21.01.2020	59,0	80,2	73,4
23.01.2020	90,4	80,3	61,5
29.01.2020	107,8	99,1	101,0
30.01.2020	86,9	69,8	65,6
Median	**87,7**	**76,0**	**65,6**

Tabel D.30. Variation i hastigheden en time før trafiksammenbrud for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for nordgående retning 2020.

Statistisk test

	Spor 1	**Spor 2**	**Spor 3**
Varians	Ens	Ens	Ens
t-stat	-0,72	0,27	0,22
P-værdi en-halet	0,24	0,40	0,41
t-kritisk en-halet	1,75	1,75	1,75

Tabel D.31. T-test med to stikprøver med ens varians for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for nordgående retning.

	2019	**2020**
F	0,26	1,28
P-værdi	0,78	0,30
F-kritisk	3,40	3,40

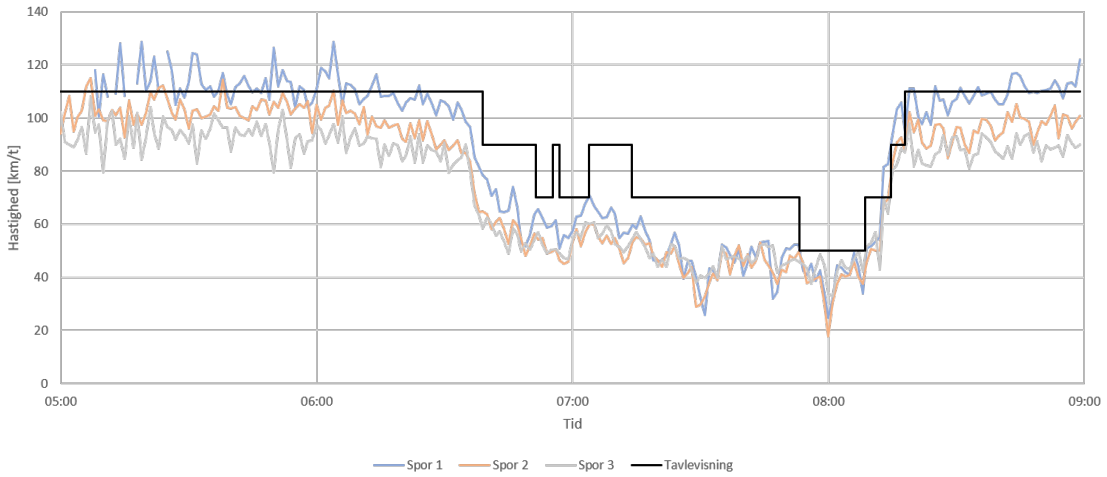
Tabel D.32. ANOVA-test for punkt D030450315 i eftermiddagsspidstimen for nordgående retning.

Skiltede hastighed E

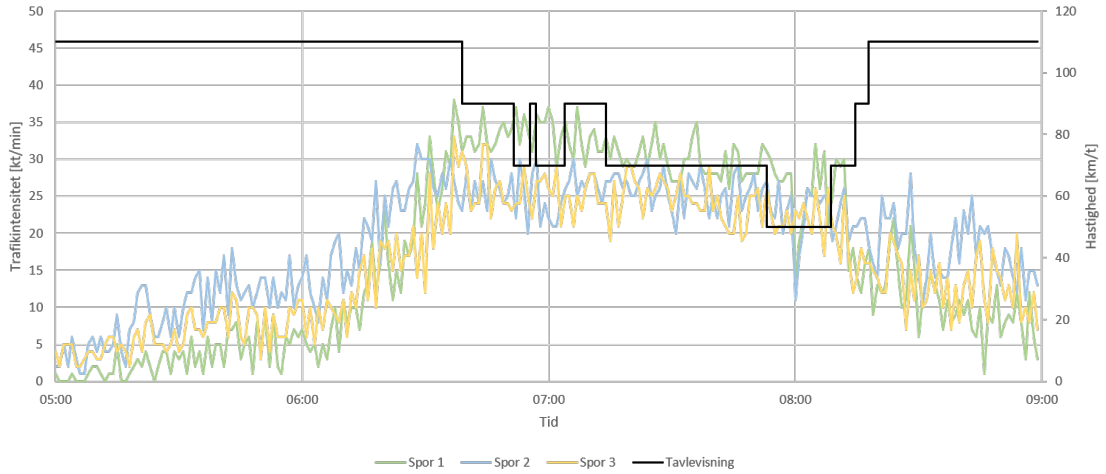
Limfjordstunnelen

Sydgående retning

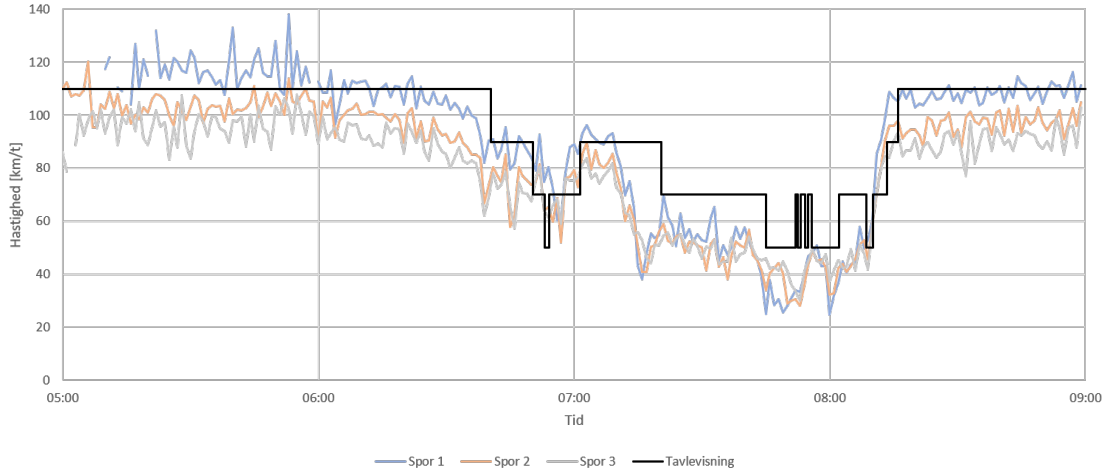
2019



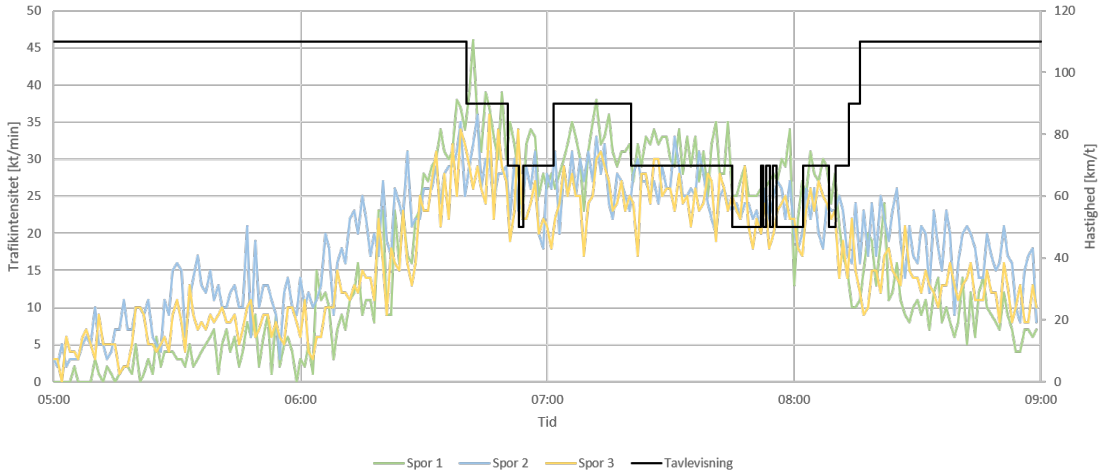
Figur E.1. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



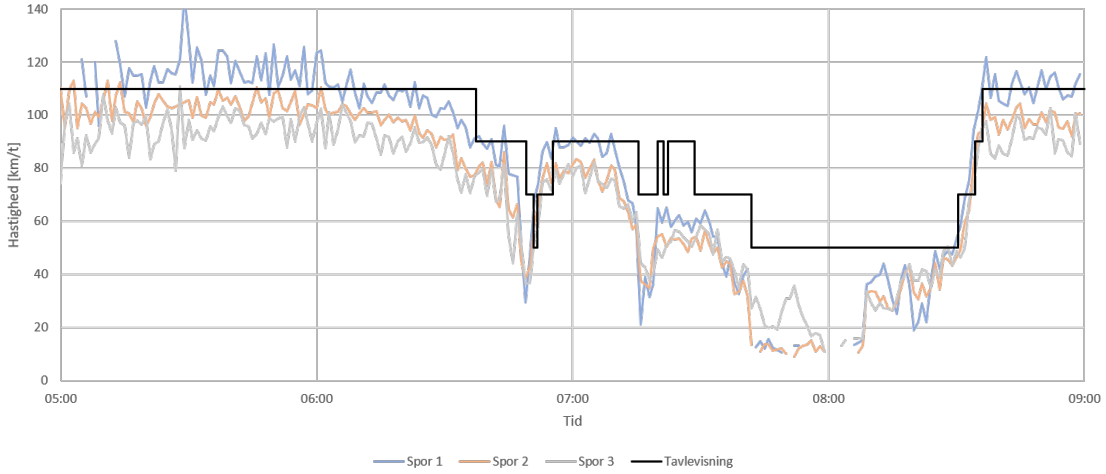
Figur E.2. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



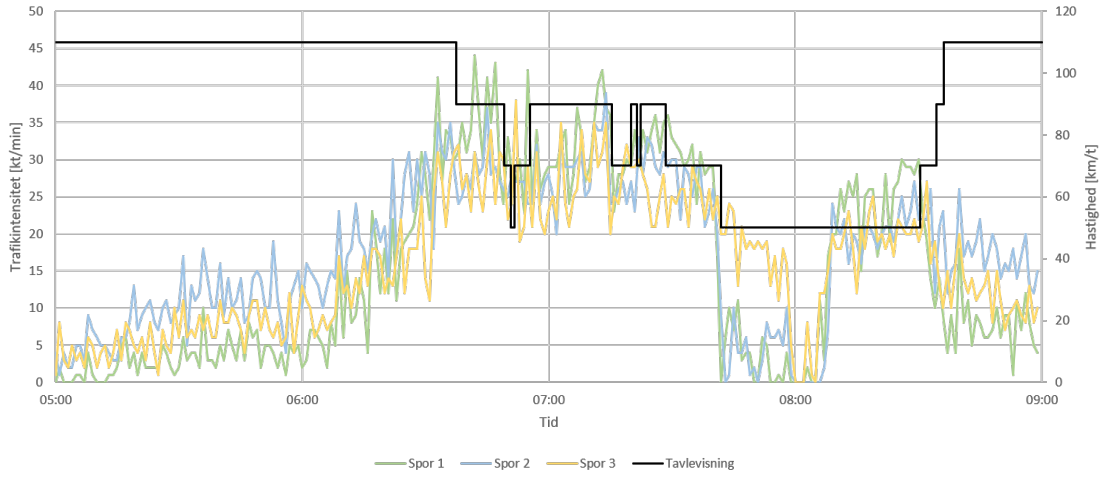
Figur E.3. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 23.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.4. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 23.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

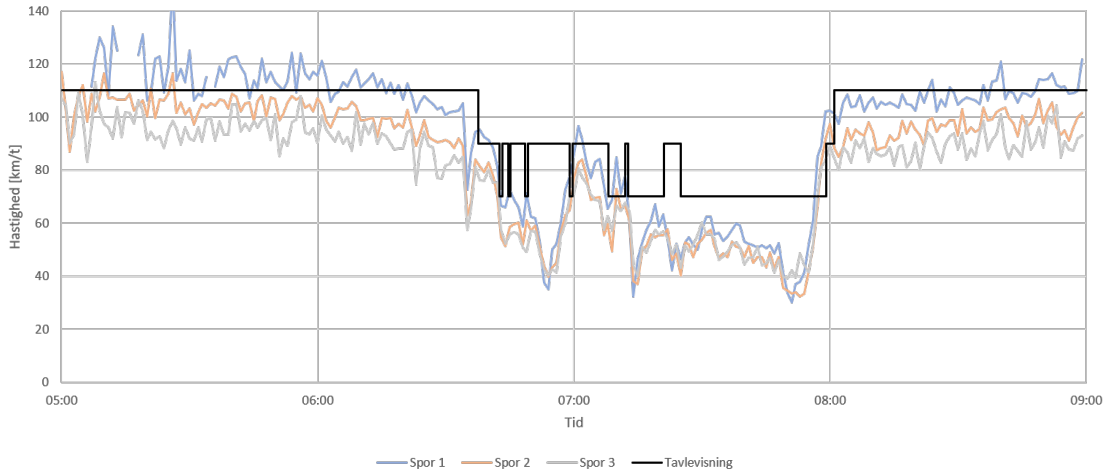


Figur E.5. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 24.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

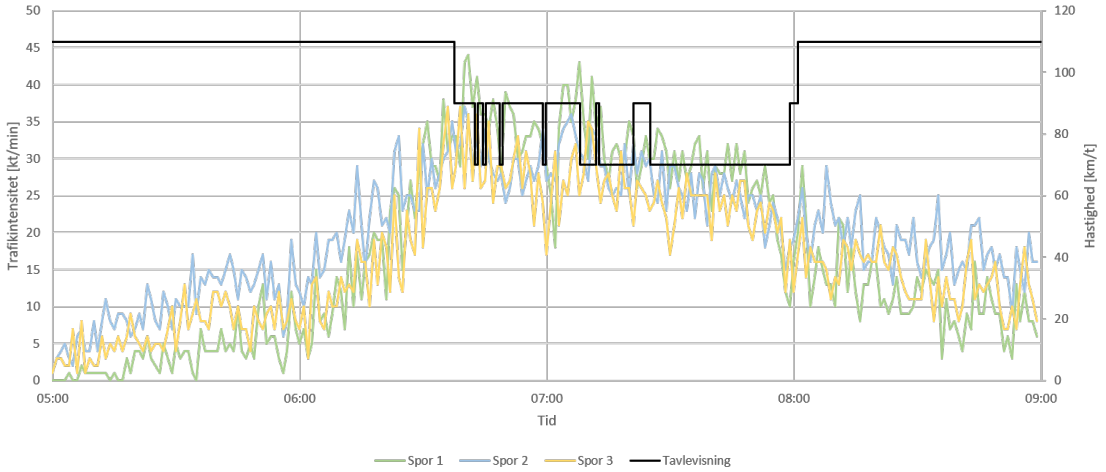


Figur E.6. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 24.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

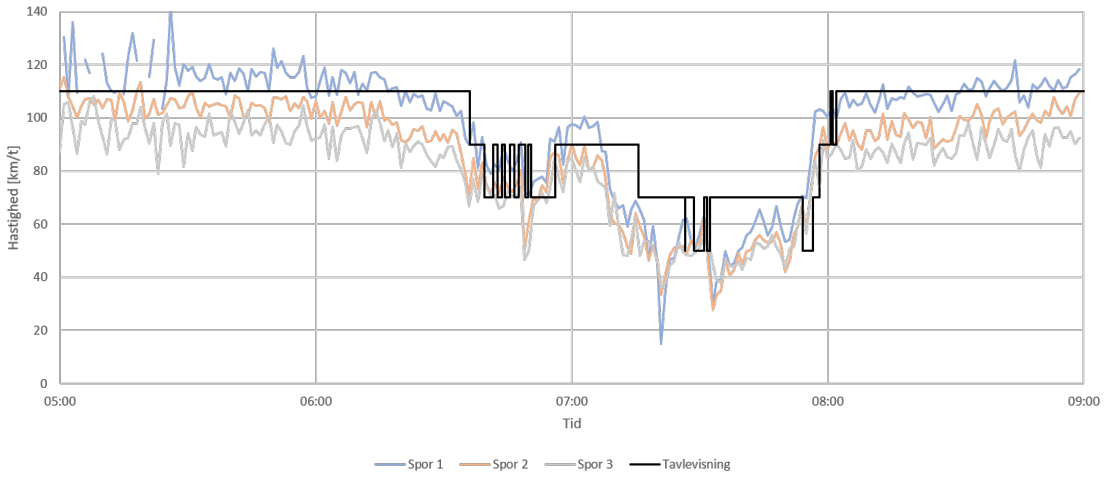
2020



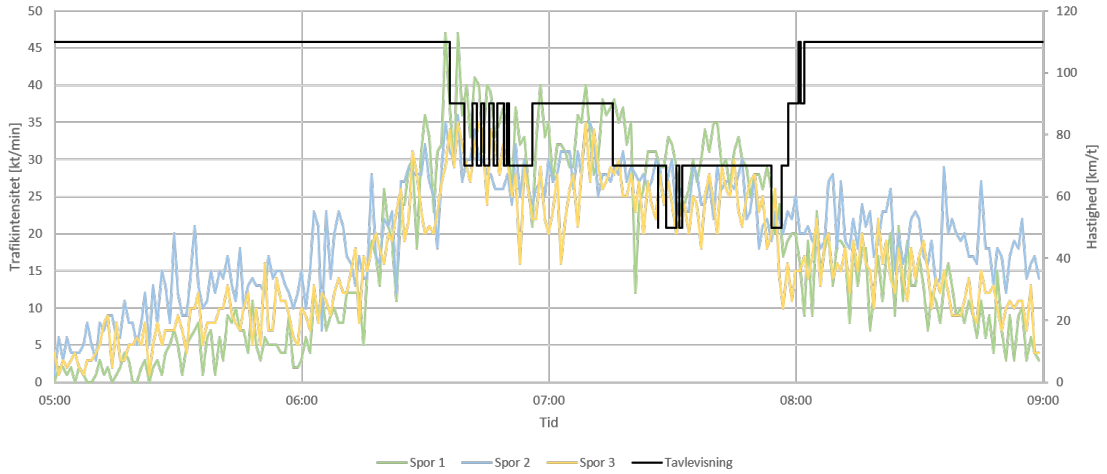
Figur E.7. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 21.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



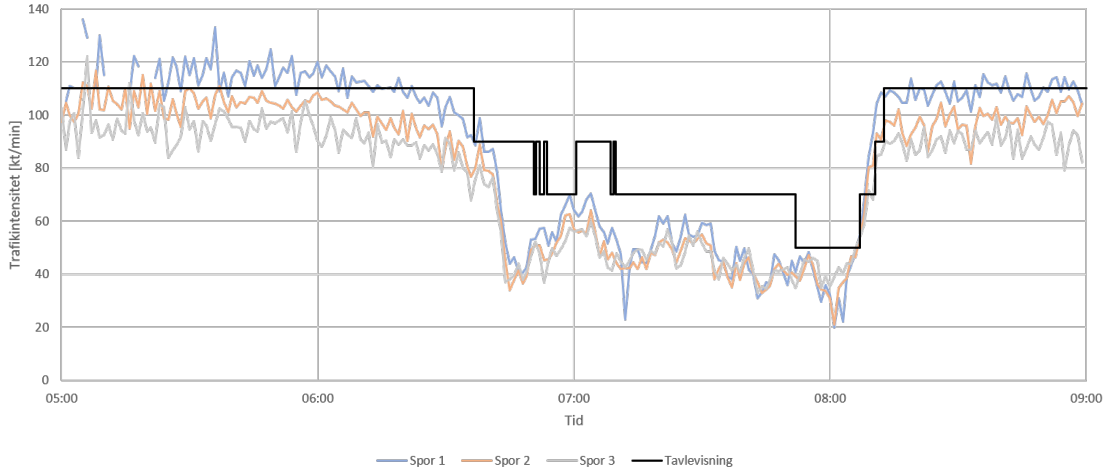
Figur E.8. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 21.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



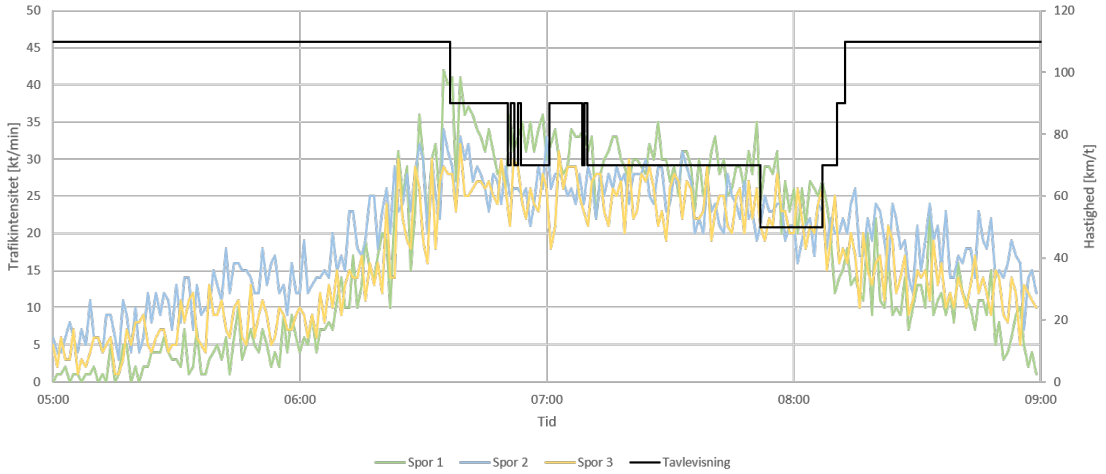
Figur E.9. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.10. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



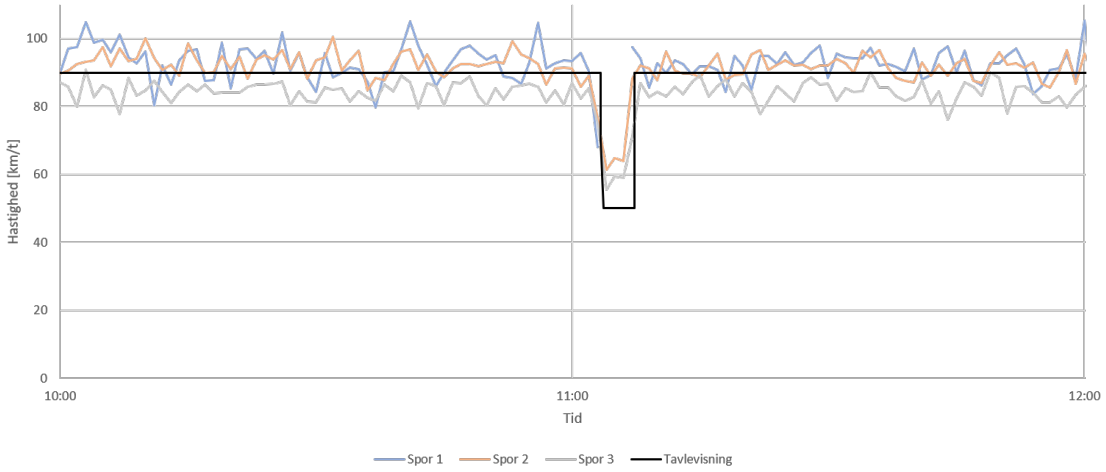
Figur E.11. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 23.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



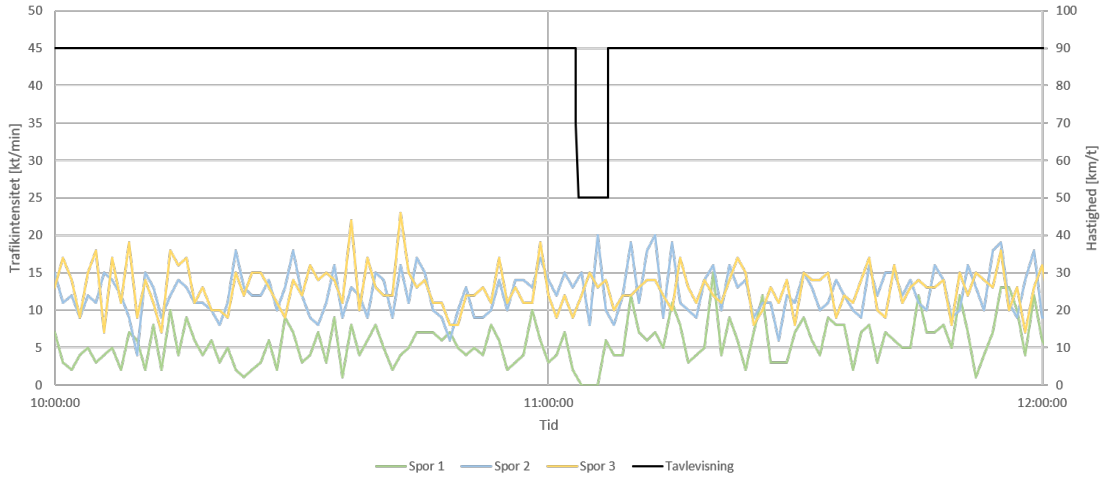
Figur E.12. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i sydgående retning for den 23.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

Nordgående retning

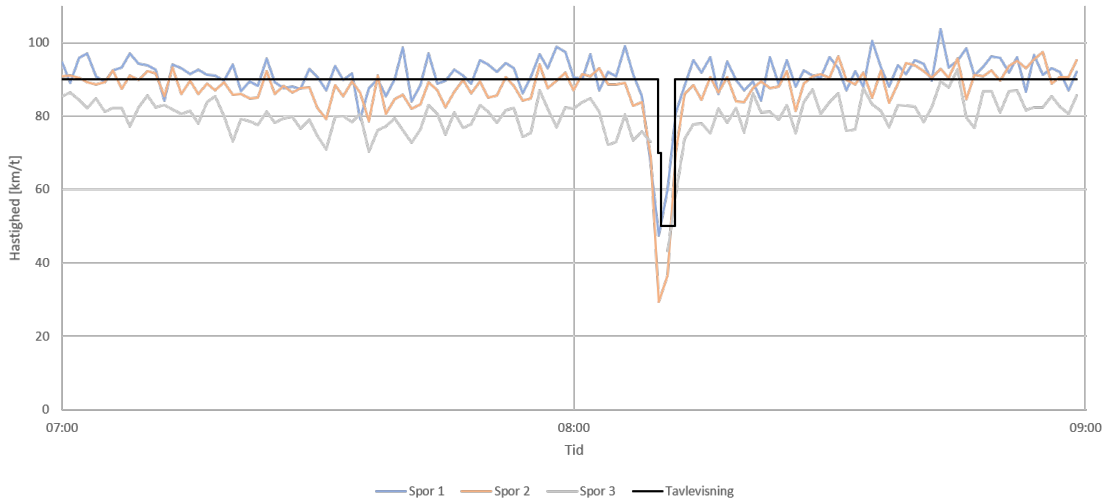
2019



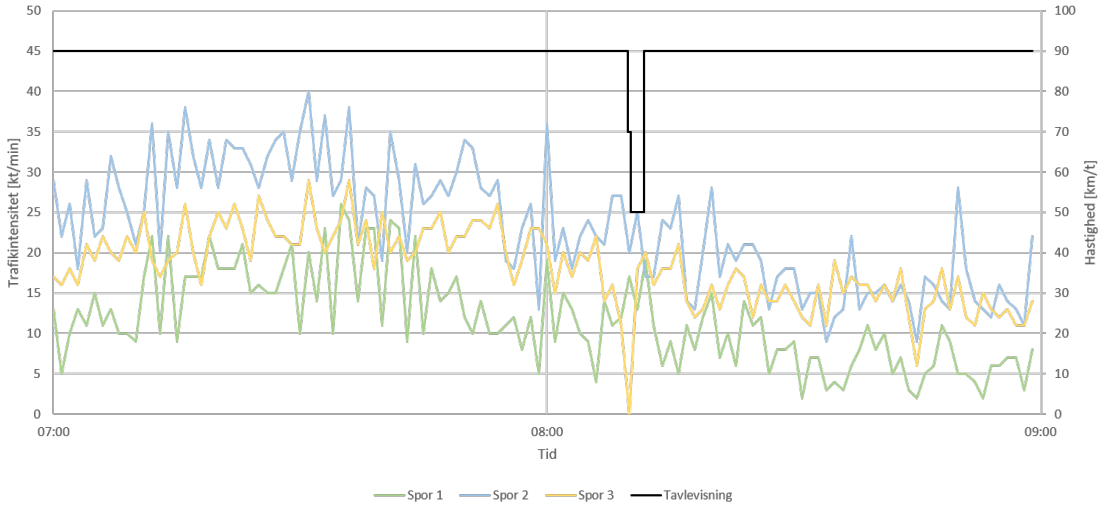
Figur E.13. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.14. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

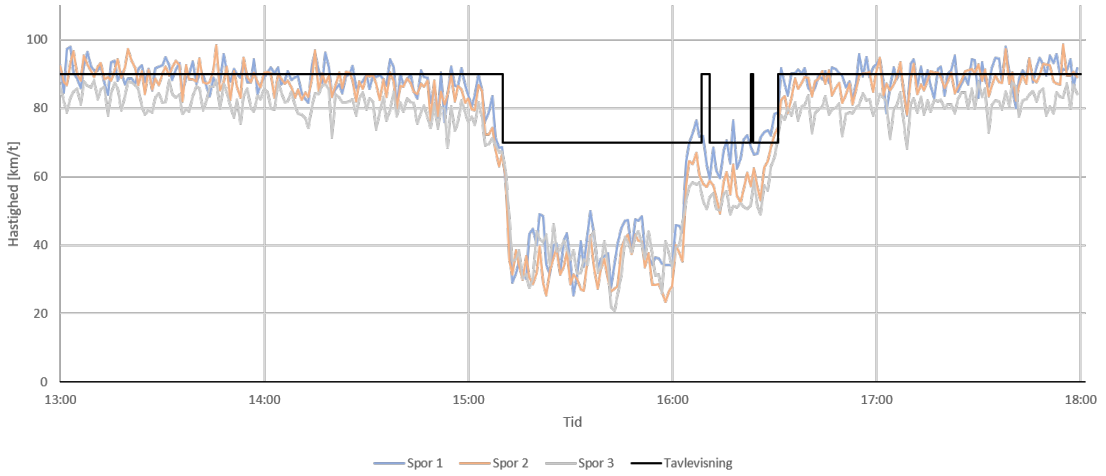


Figur E.15. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 23.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

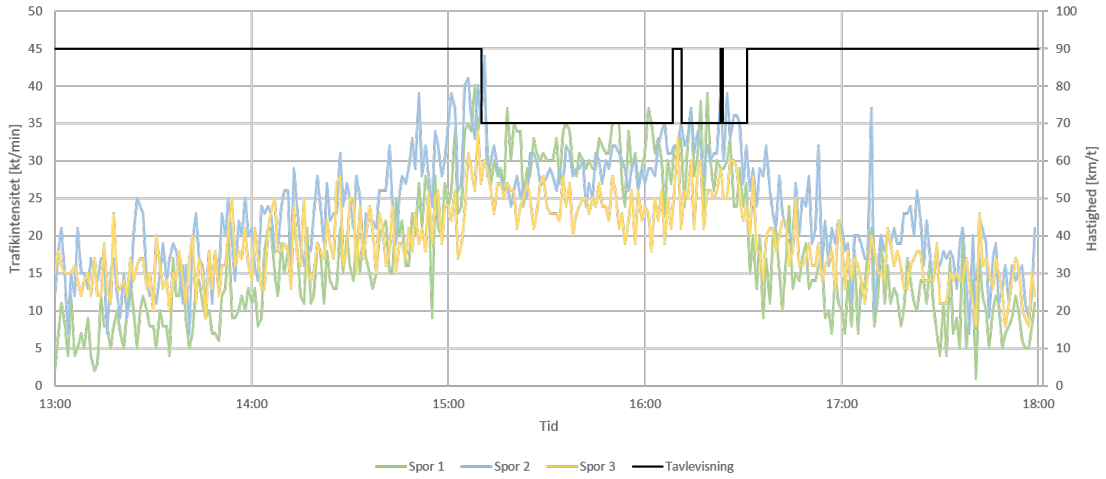


Figur E.16. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 23.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

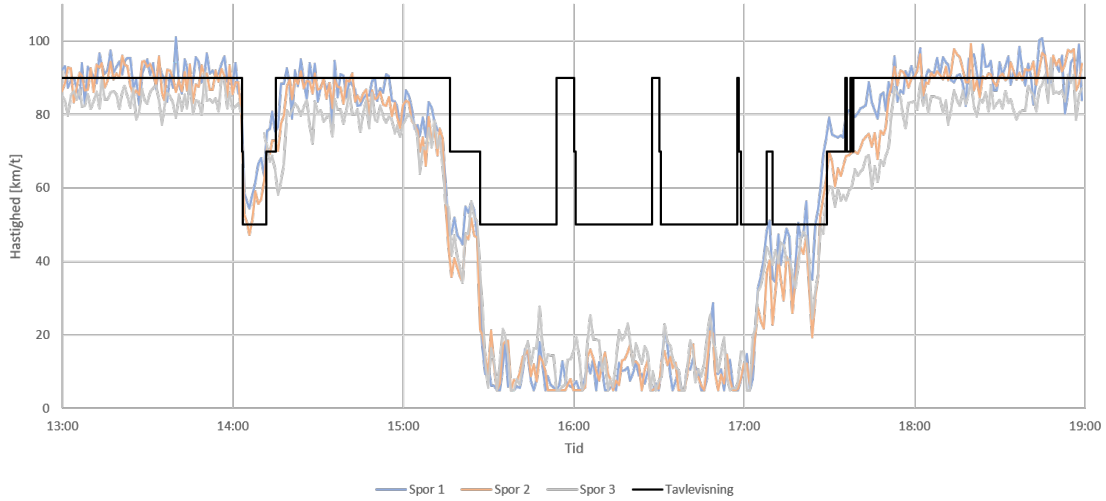
2020



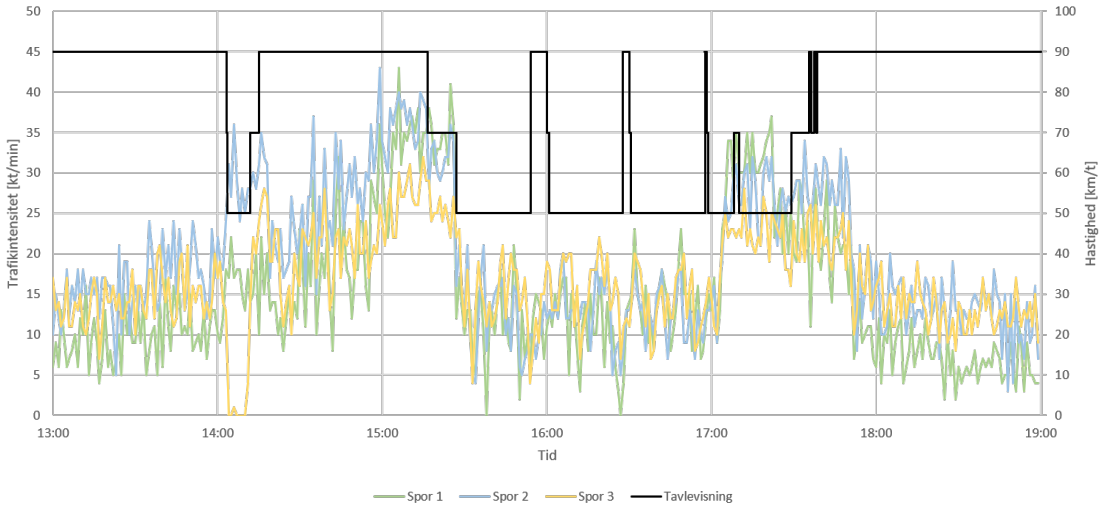
Figur E.17. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 21.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



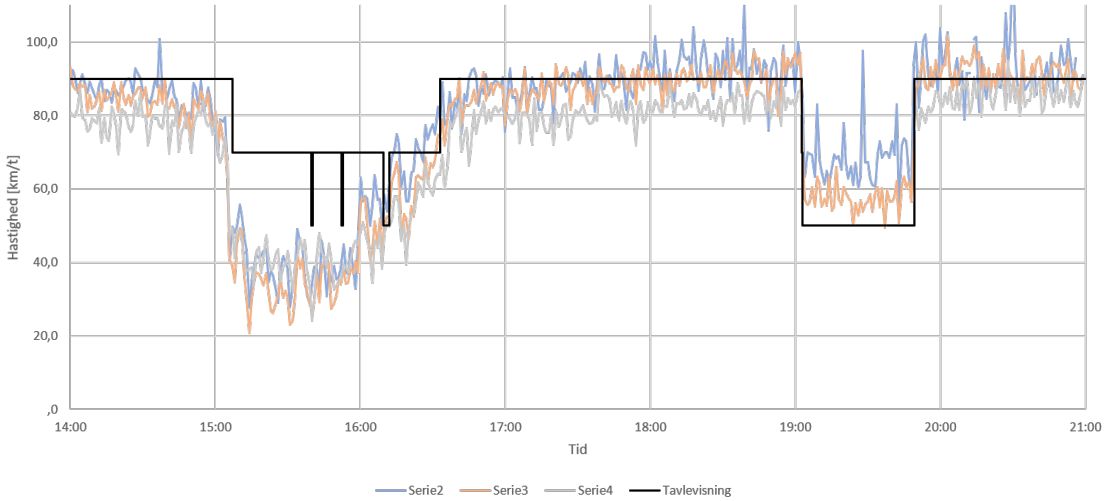
Figur E.18. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 21.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



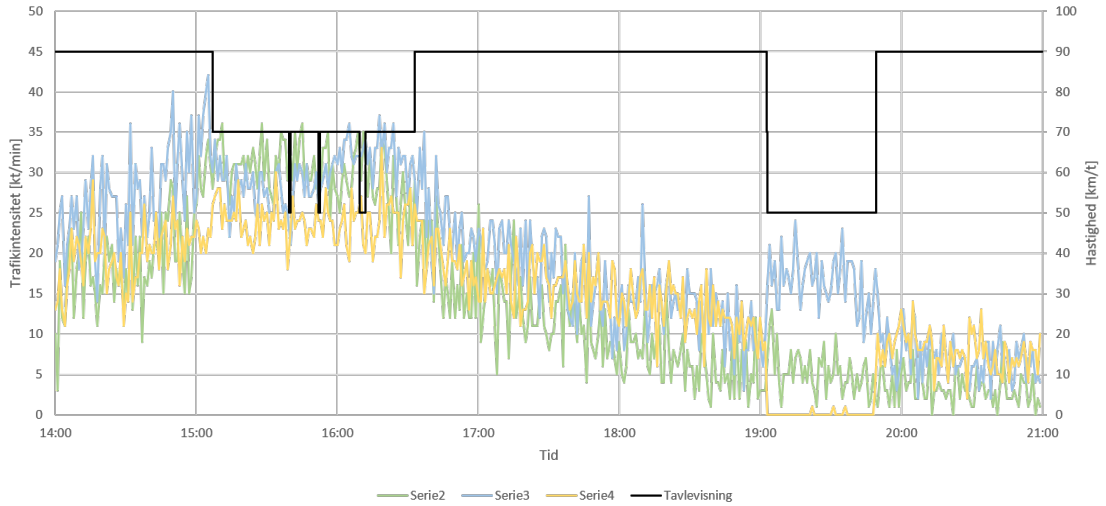
Figur E.19. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.20. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.21. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 23.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

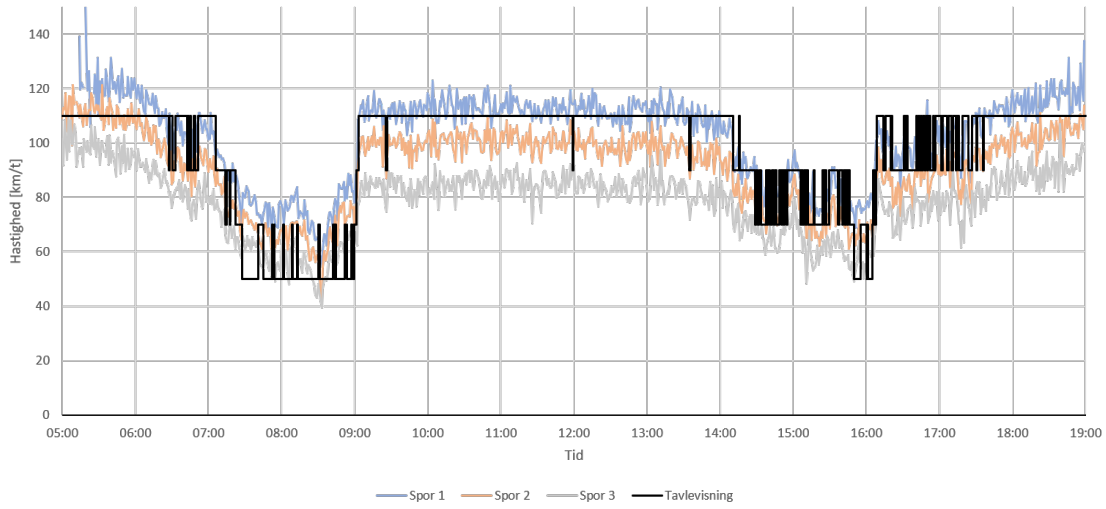


Figur E.22. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved Limfjordstunnelen i nordgående retning for den 23.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

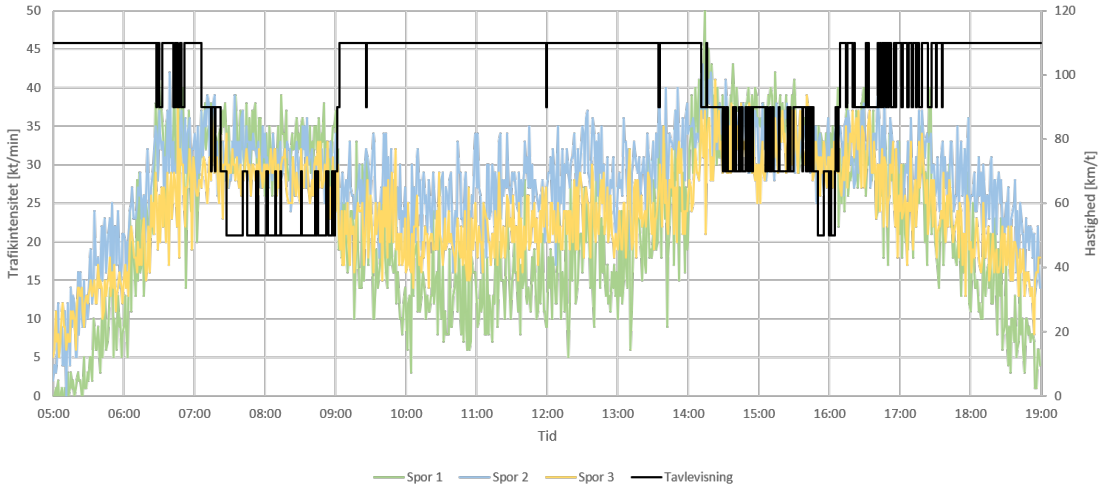
Motorring 3

Sydgående retning

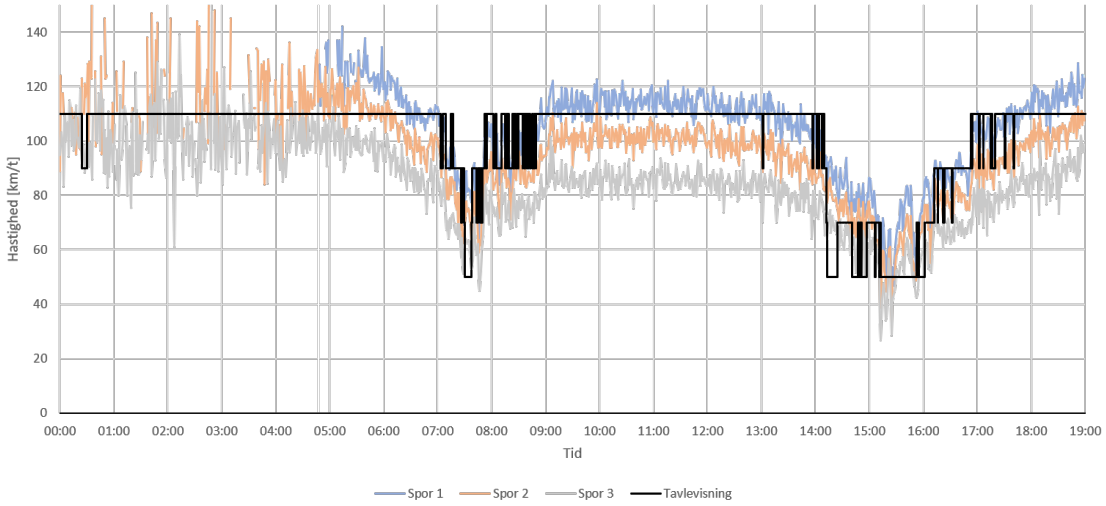
2019



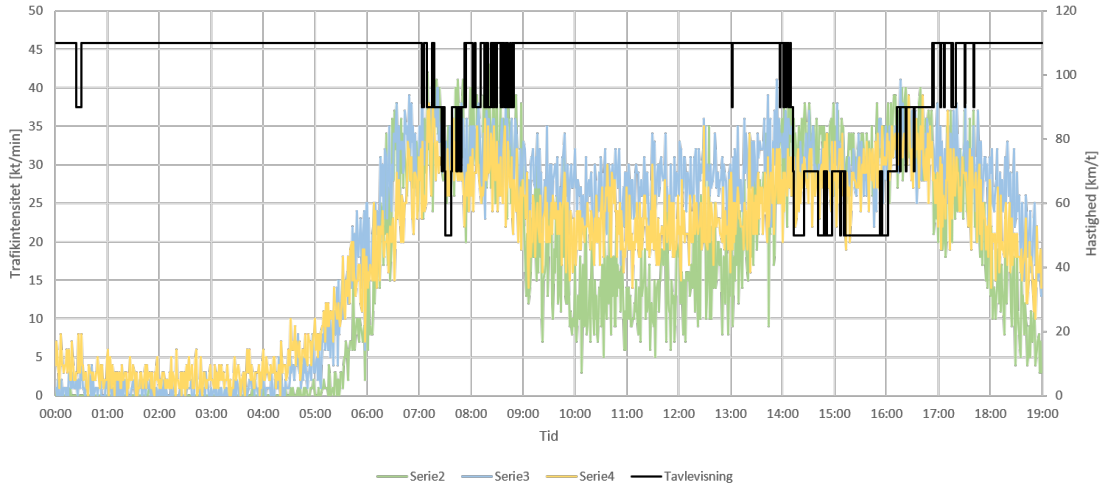
Figur E.23. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



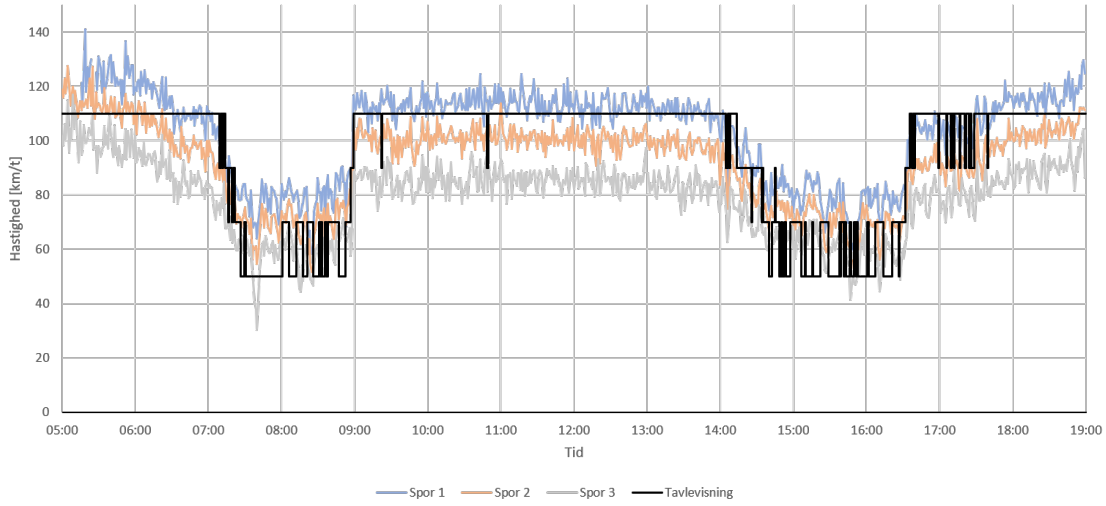
Figur E.24. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



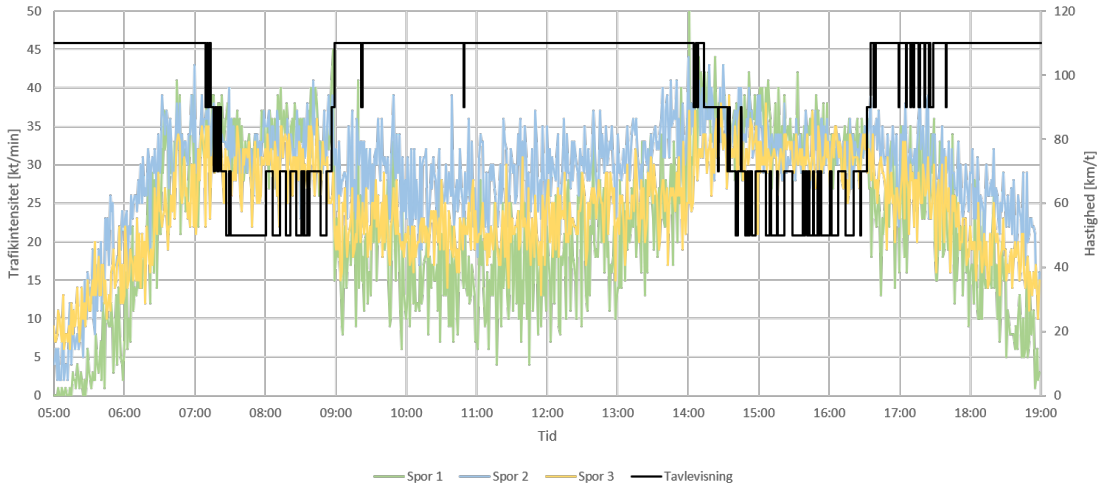
Figur E.25. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 23.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.26. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 23.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

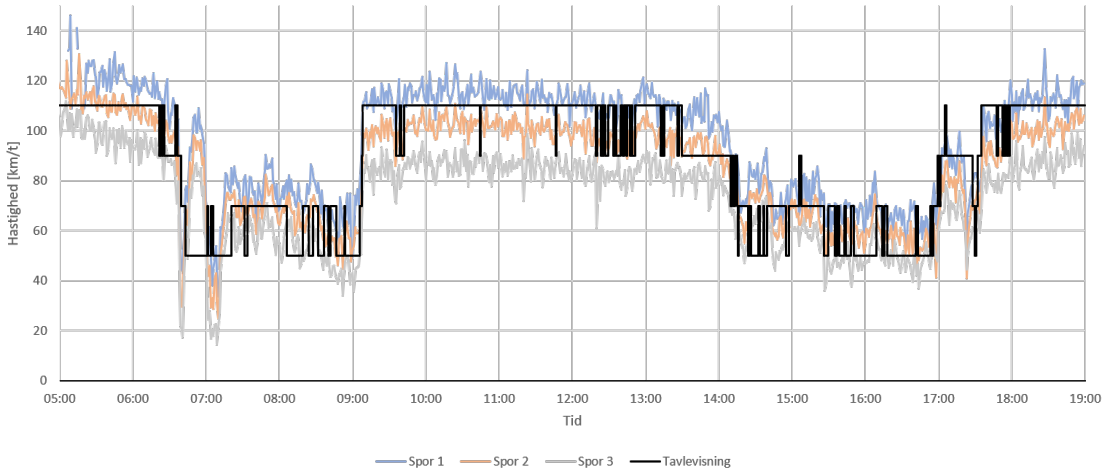


Figur E.27. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 24.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

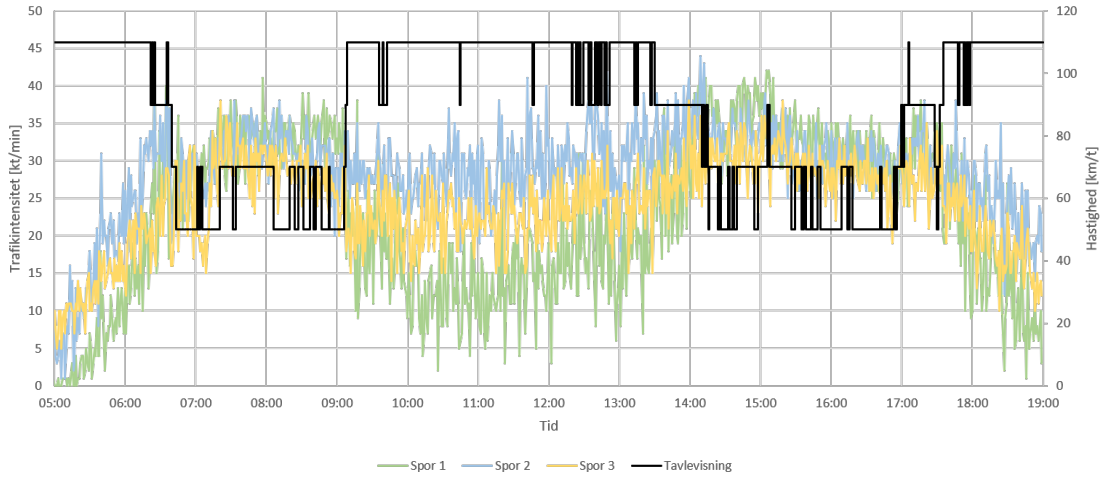


Figur E.28. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 24.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

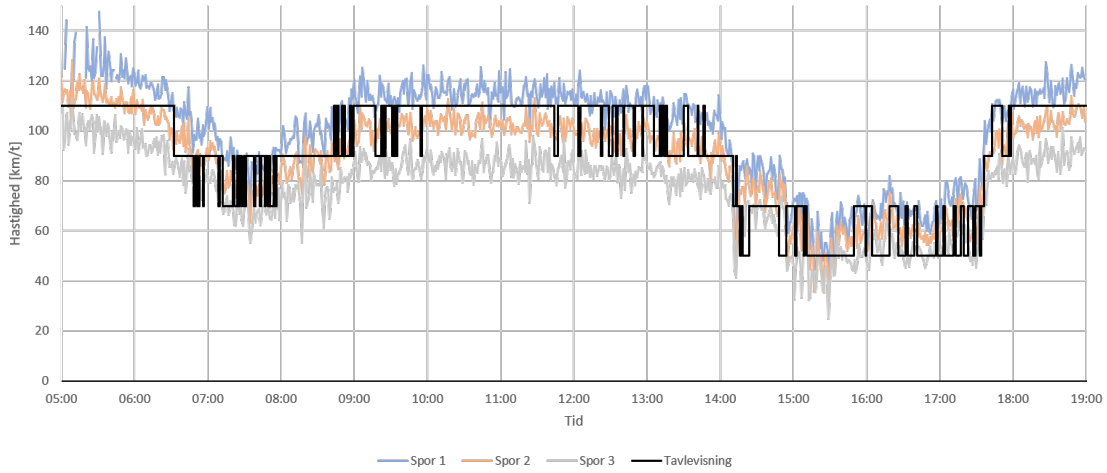
2020



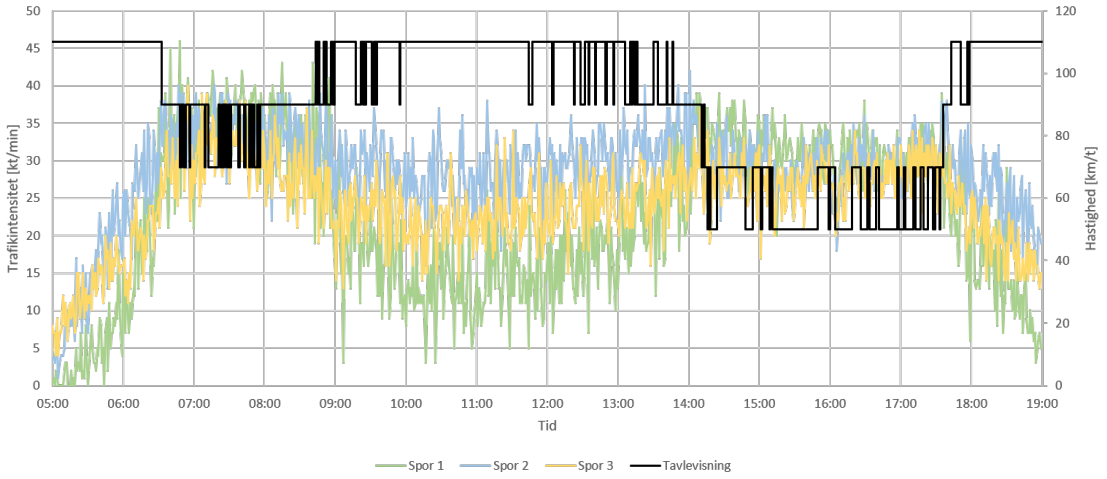
Figur E.29. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 21.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



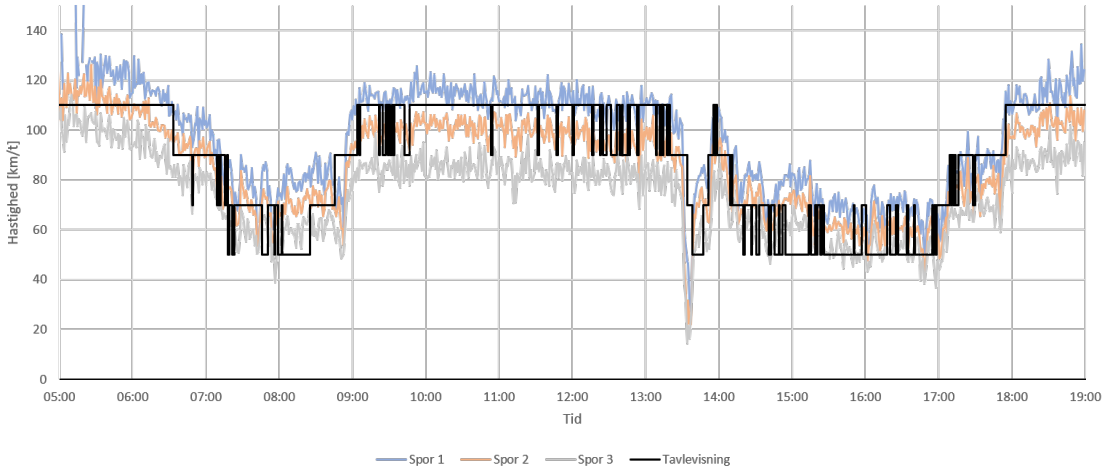
Figur E.30. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 21.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



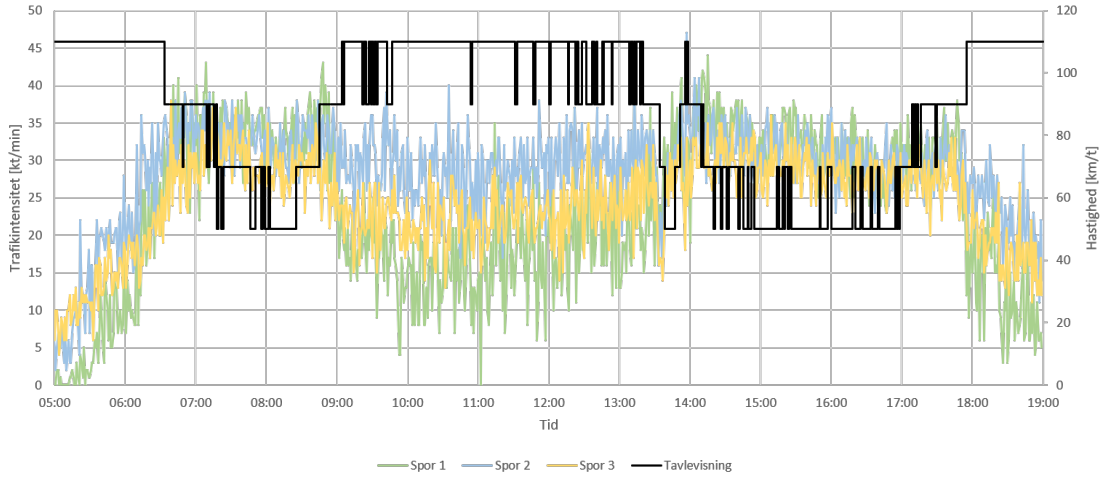
Figur E.31. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 22.01.2020, [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.32. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



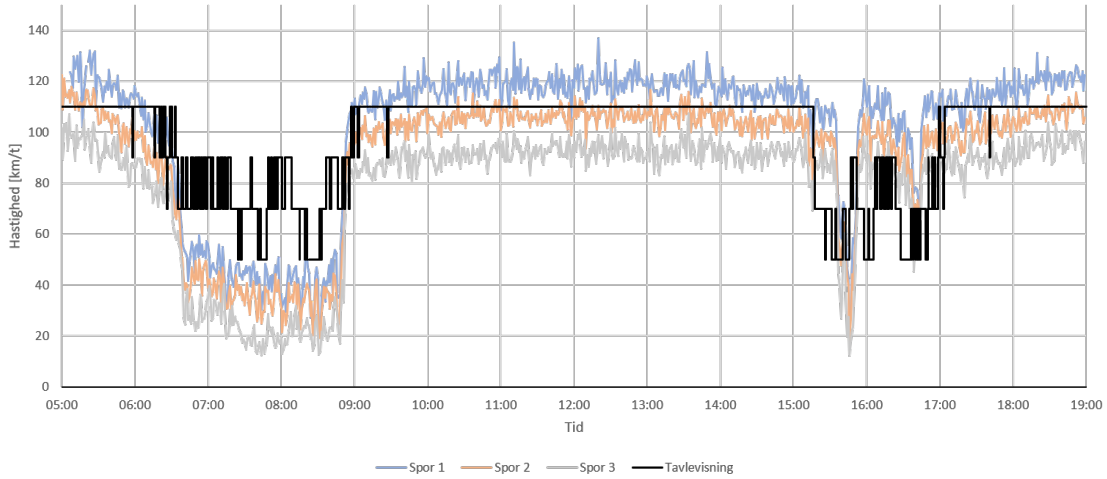
Figur E.33. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 23.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



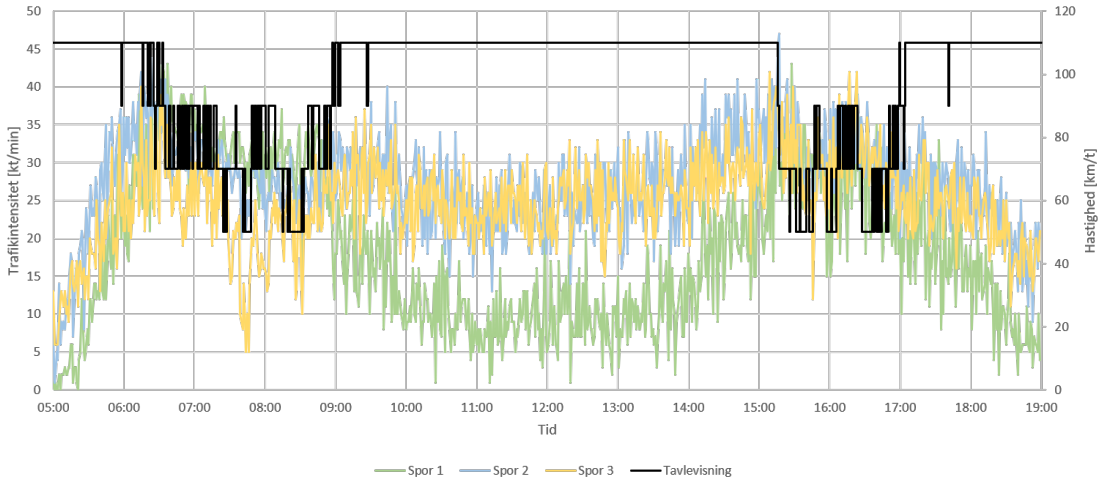
Figur E.34. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i sydgående retning for den 23.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

Nordgående retning

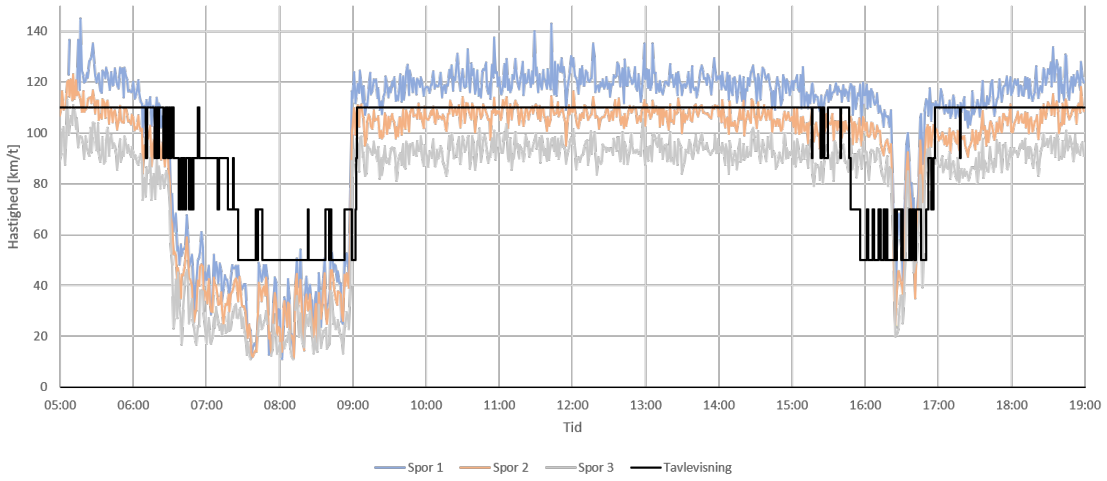
2019



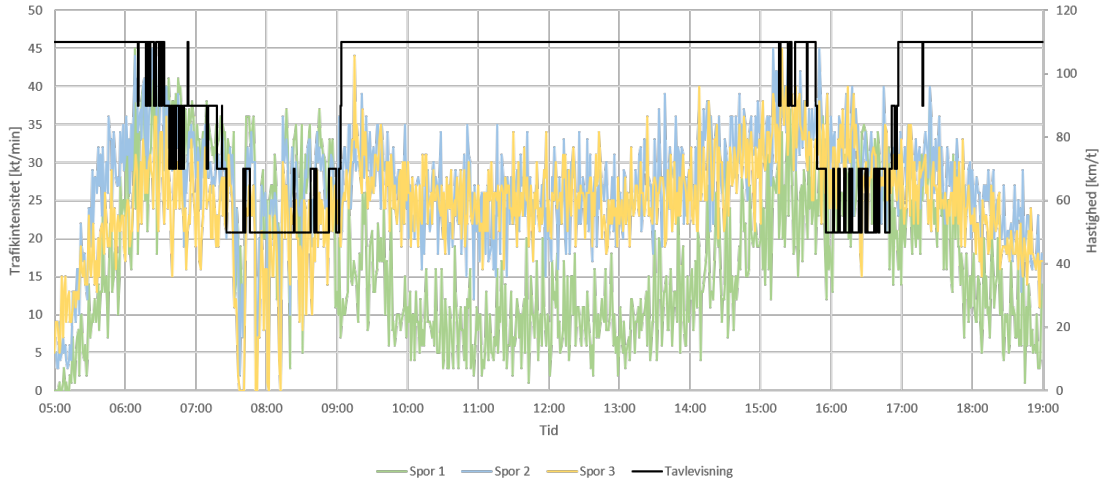
Figur E.35. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



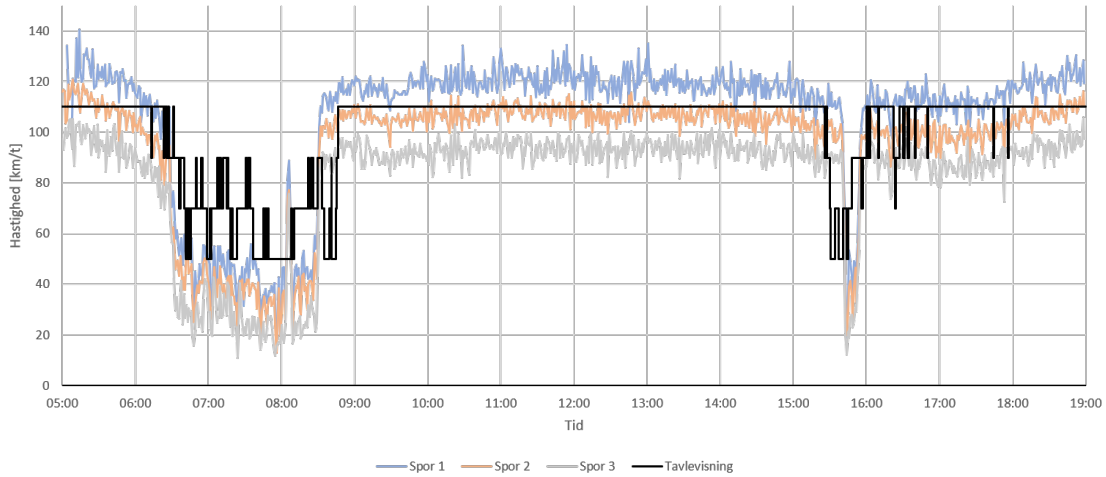
Figur E.36. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 22.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



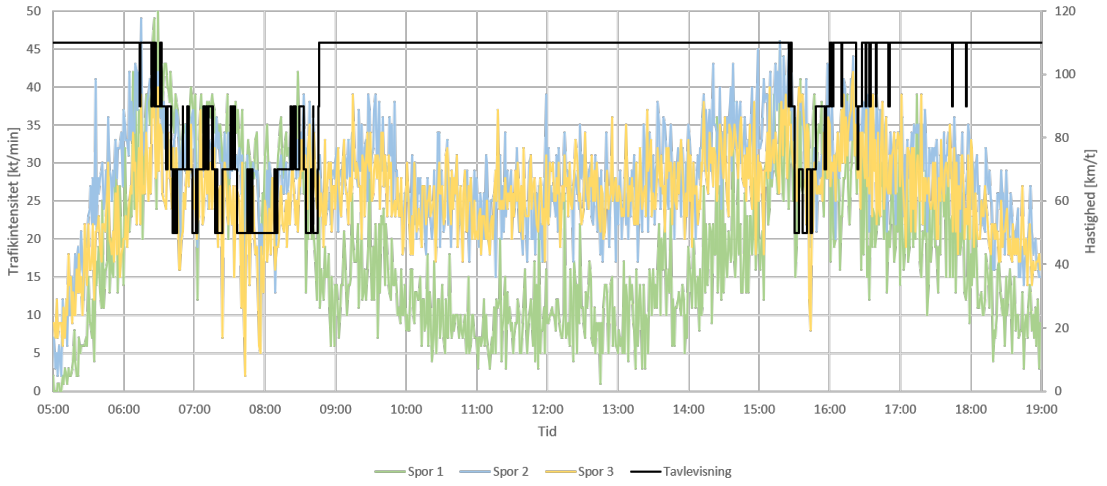
Figur E.37. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 23.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.38. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 23.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

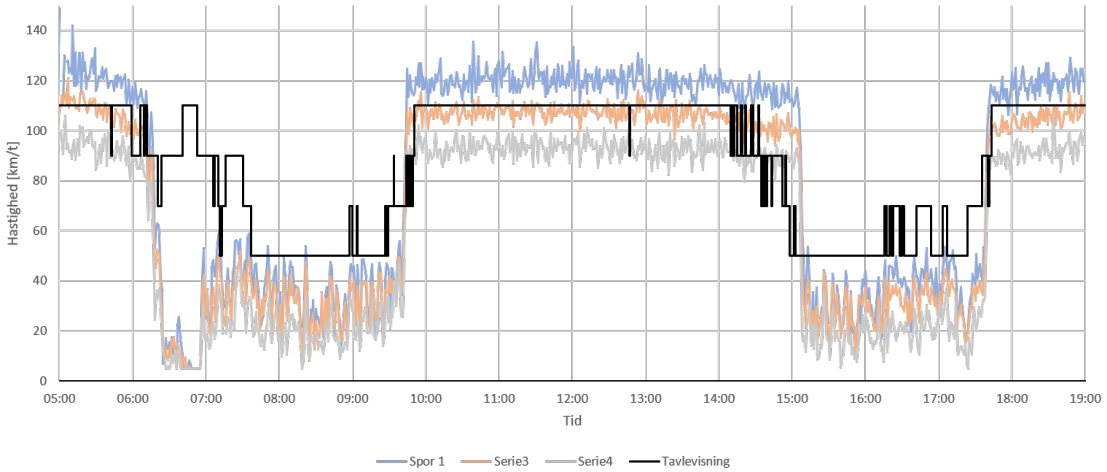


Figur E.39. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 24.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

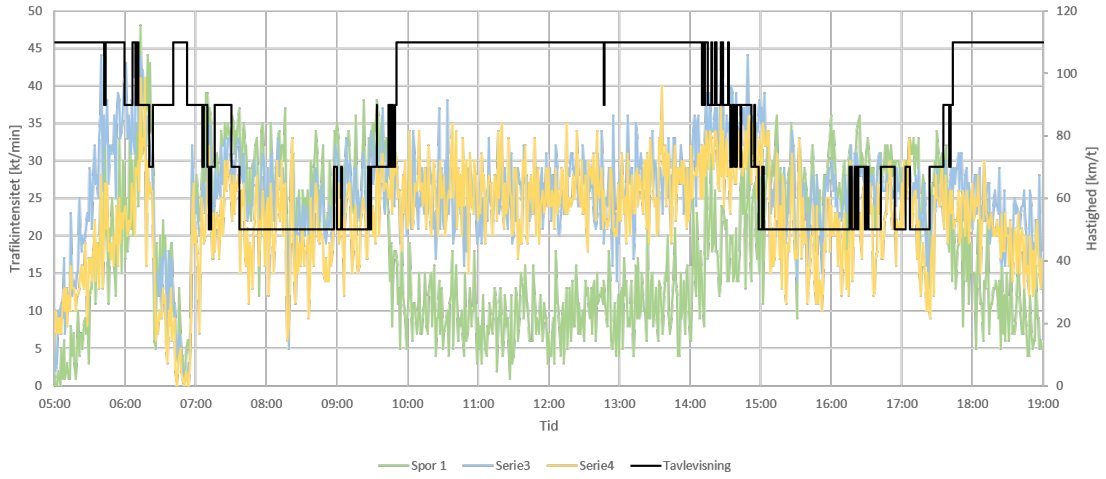


Figur E.40. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 24.01.2019. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]

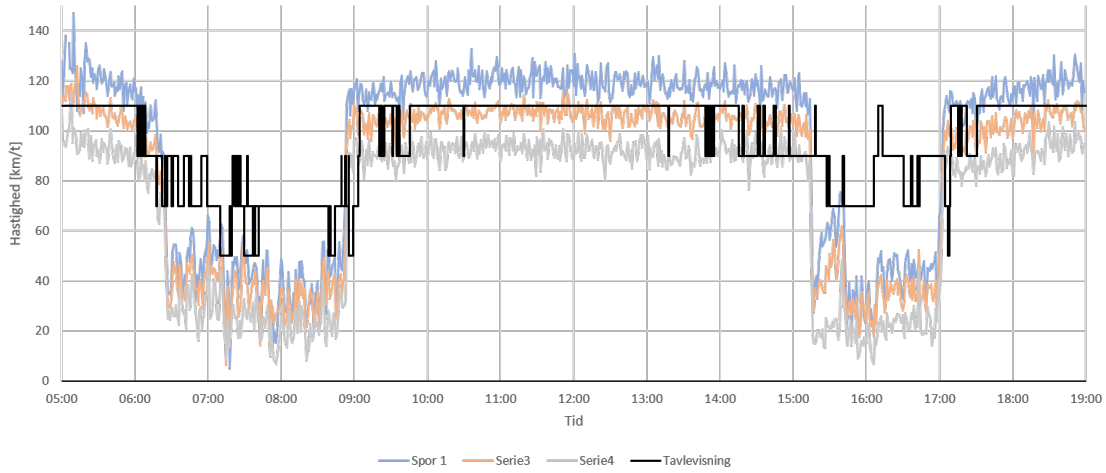
2020



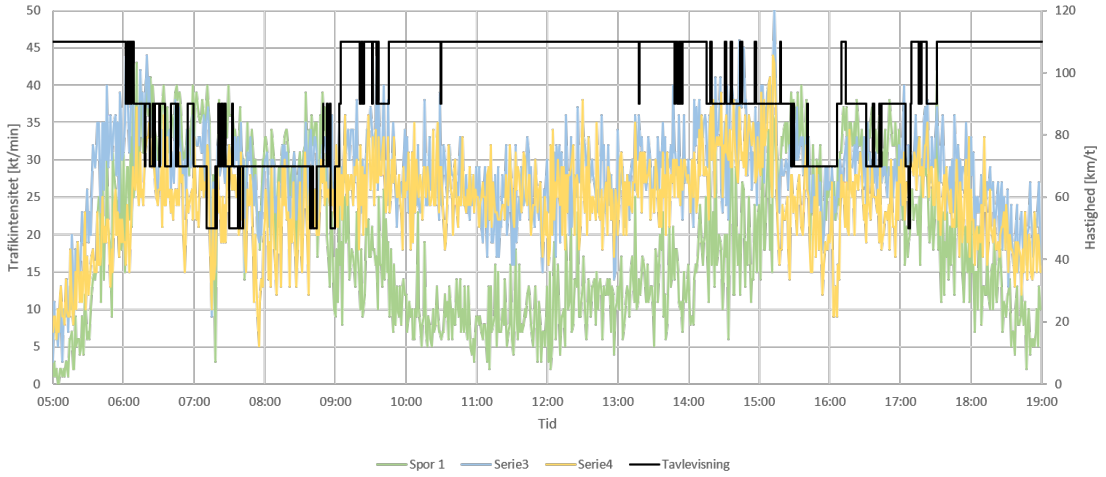
Figur E.41. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 21.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



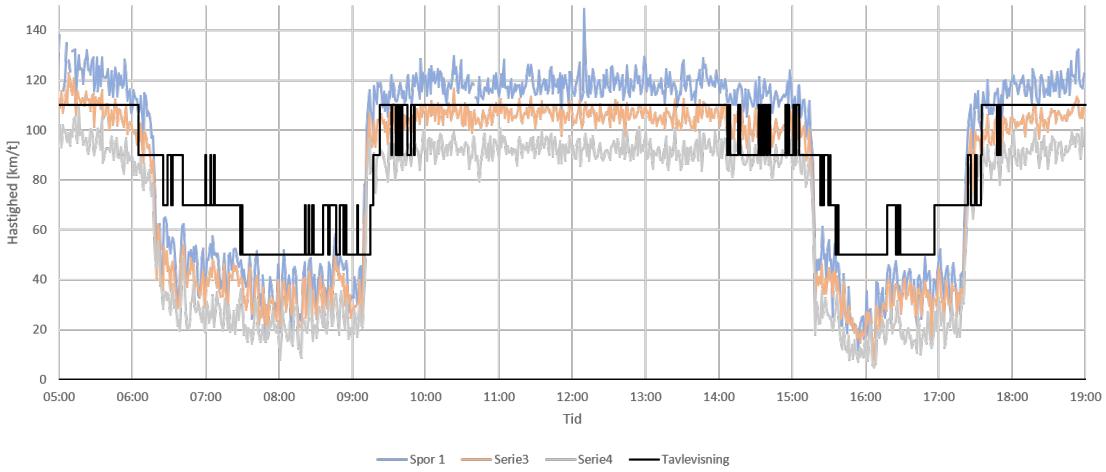
Figur E.42. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 21.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



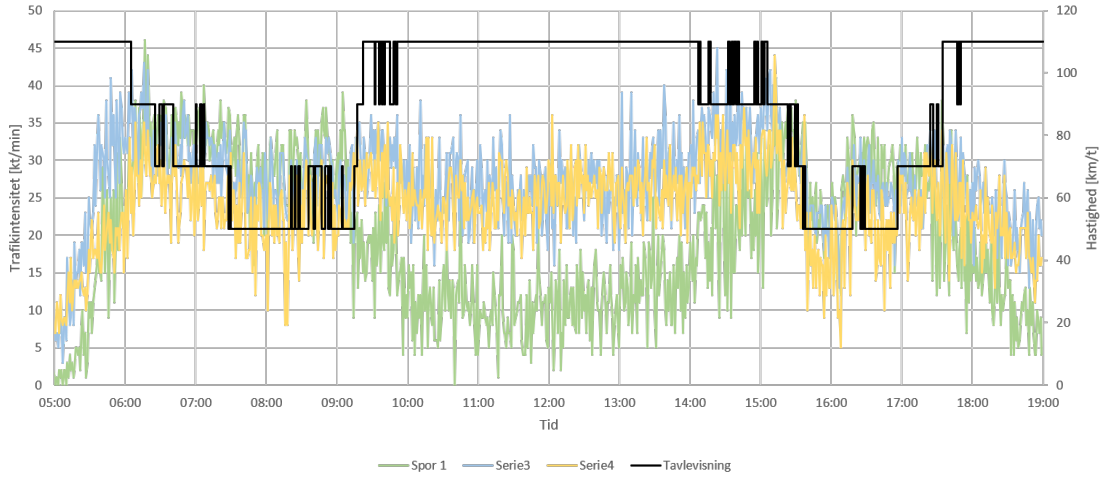
Figur E.43. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.44. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 22.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.45. Kørte hastigheder og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 23.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]



Figur E.46. Trafikintensiteten og skiltede hastigheder ved M3 i nordgående retning for den 23.01.2020. [Schmidt, 2020; Vejdirektoratet, 2020a]