

Fredrik Munch Starheim

# Økt fleksibilitet i utforming av tverrprofil for 4-felts motorveg

En vurdering av framkommelighet og trafikksikkerhet

Masteroppgave i bygg- og miljøteknikk

Veileder: Arvid Aakre

Juni 2021



Fredrik Munch Starheim

# **Økt fleksibilitet i utforming av tverrprofil for 4-felts motorveg**

En vurdering av framkommelighet og trafiksikkerhet

Masteroppgave i bygg- og miljøteknikk  
Veileder: Arvid Aakre  
Juni 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg- og miljøteknikk








## Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, institutt for bygg- og miljøteknikk, i Trondheim. Oppgaven ble skrevet våren 2021 i emnet TBA4940 Veg, masteroppgave, og tilsvarer 30 studiepoeng. Temaet for oppgaven ble bestemt gjennom et forprosjekt utført høsten 2020.

På grunn av koronasituasjonen har det vært en periode med nye utfordringer. Store deler av arbeidet har blitt utført fra hjemmekontor hvor all kommunikasjon har måttet foregå via e-post og videomøter.

Det rettes en takk til veileder Arvid Aakre ved institutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU Trondheim, for innspill og veiledning underveis i arbeidet med masteroppgaven. Jeg vil også takke Rambøll, avdeling for areal og samferdsel i Trondheim, som jeg ble godt kjent med gjennom en sommerjobb i 2020 og som har bidratt med drøfting av oppgavetema både i forprosjektet og masteroppgaven.



Trondheim, 11. juni 2021

Fredrik Munch Starheim



## Sammendrag

Innføring av nye retningslinjer for økt fleksibilitet i utformingen av tverrprofilen for 4-felts motorveg legger opp til at det kan bygges veger med smalere tverrprofil. I denne oppgaven er konsekvenser knyttet til framkommelighet og trafikksikkerhet analysert for alternative bredder på tverrprofilen. Det er i flere land utviklet egne dokumenter for vegens utforming, framkommelighet og trafikksikkerhet som legger føringer og krav for hvordan tverrprofilen skal utformes. For å undersøke hvordan verdier i etablert litteratur fra ulike land påvirker de analyserte konsekvensene, er det tatt utgangspunkt i litteratur som har undersøkt framkommelighet og trafikksikkerhet på motorveger i Danmark og USA.

Det ble gjennomført en omfattende litteraturstudie av eksisterende forskning og litteratur tilknyttet utforming av tverrprofil for 4-felts veg og motorveg, samt hva som karakteriserer god framkommelighet og trafikksikkerhet på motorveger. I litteraturstudien ble det funnet beregningsmetoder og verdier som er brukt til å estimere konsekvenser for framkommeligheten og trafikksikkerheten på en strekning. Med disse beregningsmetodene er det analysert hvordan variasjoner i inngangsverdier fra utvalgt litteratur vil påvirke beregningsresultatene.

En konsekvens av å bygge smalere tverrprofil med mindre skulderbredde er en økt fare for at hendelser fører til at deler av et kjørefelt blokkeres. Et stengt kjørefelt kan føre til en signifikant større reduksjon i framkommeligheten på en strekning med smalt tverrprofil sammenlignet med en strekning hvor tilstrekkelig bredde på ytre skulder hindrer at kjørefeltet blokkeres. Resultatene fra litteraturstudien og utførte analyser indikerer at smalere tverrprofil vil føre til dårligere evne til å avvike trafikk, og følgelig gi økt kødannelse og forsinkelse i egendefinerte scenarioer. Konsekvensene vil være større basert på verdier fra Danmark sammenlignet med tilsvarende verdier fra USA.

Estimerte konsekvenser for trafikksikkerheten når bredden på tverrprofilen reduseres, indikerer at en økning i antall personskadeulykker vil være signifikant større for landlige motorveger i USA sammenlignet med landlige motorveger i Danmark basert på ulike sikkerhetsfaktorer. Økningen i antall personskadeulykker vil også være større på urbane motorveger i USA, men her er forskjellen betraktelig mindre. Den klart største årsaken til økningen i antall personskadeulykker kommer av en reduksjon i bredden på ytre skulder.

Med økt fleksibilitet og mulighet til å velge smalere tverrprofil i utforming av 4-felts motorveg kreves strenge retningslinjer og tydelige rammer for å sikre løsninger som ivaretar framkommelighets- og trafikksikkerhetsbehov. Økt fleksibilitet vil også medføre større usikkerhet i utformingen ved at det kan velges alternative bredder på tverrprofilen med begrenset erfaringsgrunnlag fra tidligere. Resultatene i oppgaven viser at smalere tverrprofil kan ha negative konsekvenser for framkommeligheten og trafikksikkerheten på strekningen, hvor størrelsen på de estimerte konsekvensene vil variere avhengig av valgte verdier og framgangsmåter fra litteratur hentet fra ulike land.



## Abstract

The introduction of new guidelines for increased flexibility in the cross-section design for a four-lane motorway makes it possible to reduce cross-section widths. In this thesis, consequences related to traffic operation and safety are analyzed. In several countries, separate documents have been developed for road design, traffic operation, and traffic safety, that presents guidelines and requirements on how the cross-section should be designed. To investigate how values from established literature from different countries affect the analyzed consequences, literature that have studied traffic operation and safety on motorways in Denmark and the USA have been considered.

An extensive literature review was conducted on existing research and literature related to the cross-section design, traffic operation, and safety on four-lane motorways. In the literature study, calculation methods and values that have been used to estimate consequences for the traffic operation and safety on a motorway segment were found. Based on these calculation methods, it has been analyzed how variations in input values from selected literature will affect the calculation results.

One of the consequences of building a narrower cross-section with a smaller outside shoulder width is an increased risk of incidents that will lead to parts of a lane being blocked. For an incident leading to a lane closure on a motorway segment with a narrow cross-section, the traffic operation will be significantly worse compared to a wider cross-section with sufficiently outside shoulder width. The results from this thesis indicate that a reduction in cross-section width will lead to a decrease in traffic flow and increased congestions and delay in imagined incident scenarios. These consequences will be worse based on values from Denmark compared to the USA.

Estimated consequences on traffic safety indicate that there will be a significantly greater increase in the number of fatal and injury accidents on rural motorways in the USA compared to rural motorways in Denmark when the cross-section width on a four-lane motorway is reduced. There will also be a greater increase on urban motorway in the USA, but here the difference is considerably smaller. The most noticeable reason for the increase in the number of fatal and injury accidents is due to a reduction in outside shoulder width.

With increased flexibility and the possibility to reduce cross-section widths, strict guidelines and clear frameworks are required to ensure solutions that address traffic operation and safety needs. Increased flexibility will also lead to more uncertainty in the design due to the choice of alternative cross-section widths with limited experience from previous roads. Results from this thesis show that narrower cross-sections can lead to negative consequences for the traffic operation and safety on a motorway segment. The size of the estimated consequences will vary depending on the chosen values and procedures from literature obtained from different countries.



# Innhold

Forord.....	i
Sammendrag.....	iii
Abstract .....	v
Tabeller.....	ix
Figurer .....	xi
Forkortelser .....	xiii
1 Introduksjon.....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål .....	1
1.3 Omfang og begrensning .....	2
1.4 Oppgavens oppbygging.....	2
2 Metode.....	4
2.1 Litteraturstudie .....	4
2.2 Regneark.....	5
3 Teoretisk grunnlag.....	6
3.1 Vegutforming .....	6
3.1.1 Utformingsvariabler og -krav .....	6
3.1.2 Tverrprofil 4-felts veg og motorveg .....	10
3.1.3 Fleksibilitet i utforming .....	17
3.2 Framkommelighet .....	20
3.2.1 Grunnleggende motorvegsegment.....	21
3.2.2 Fri-flyt hastighet .....	21
3.2.3 Kapasitet.....	23
3.2.4 Service-nivå.....	27
3.3 Trafikksikkerhet .....	31
3.3.1 Nominell og substansiell sikkerhet.....	31
3.3.2 Ulykkesrisiko og ulykkestyper .....	32

3.3.3	Sammenheng mellom utformingsvariabler og sikkerhet.....	33
3.3.4	Sikkerhetsfaktorer.....	37
4	Analyse og resultat .....	44
4.1	Valg av tverrprofil og scenarioer.....	44
4.2	Framkommelighet .....	48
4.2.1	Kapasitet og service-nivå .....	48
4.2.2	Kø og forsinkelse.....	68
4.3	Trafikksikkerhet .....	74
5	Diskusjon.....	79
5.1	Økt fleksibilitet i utforming.....	79
5.2	Framkommelighet .....	81
5.3	Trafikksikkerhet .....	85
5.4	Hvilket tverrprofil er mest hensiktsmessig? .....	87
6	Konklusjon .....	89
7	Videre arbeid.....	91
	Kilder.....	92
	Vedlegg .....	97



## Tabeller

Tabell 1: Sammenligning av tverrprofil for 4-felts veg og motorveg fra ulike land .....	16
Tabell 2: Sammenheng service-nivå beskrevet for A-F fra HCM og belastningsgrad fra håndboken «Kapacitet og Serviceniveau» .....	30
Tabell 3: Sikkerhetsfaktorer for kjørefeltbredde på 4-felts motorveg i Danmark og USA .....	40
Tabell 4: Sikkerhetsfaktorer for ytre skulderbredde på 4-felts motorveg i Danmark og USA.....	41
Tabell 5: Sikkerhetsfaktorer for indre skulderbredde på 4-felts motorveg i Danmark og USA.....	42
Tabell 6: Bredder på utformingsvariabler i tverrprofilen brukt i analysen.....	46
Tabell 7: Oppsummering av scenarioer .....	47
Tabell 8: Justering av FFH for gjennomsnittlig kjørefeltbredde (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29).....	52
Tabell 9: Justering av FFH for fri sidebredde mot høyre (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29).....	53
Tabell 10: Estimert FFH for ulike tverrprofil under normale forhold .....	53
Tabell 11: Kapasitetsjusteringsfaktor for kapasitetsverdier fra dansk håndbok .....	55
Tabell 12: Grunnleggende kapasitet for ulike scenarioer basert på HCM.....	55
Tabell 13: Grunnleggende kapasitet for ulike scenarioer basert på dansk håndbok.....	55
Tabell 14: Justeringsfaktor for andel tunge kjøretøy .....	57
Tabell 15: Variasjon i estimert ÅDT avhengig av valgt K- og D-faktor.....	59
Tabell 16: Beregnet bruddpunkt for ulike scenarioer basert på verdier fra HCM.....	60
Tabell 17: Beregnet bruddpunkt for ulike scenarioer basert på verdier fra dansk håndbok .....	60
Tabell 18: Tetthetskrav for ulike service-nivå på motorvegsegment omgjort fra mi til km (Transportation Research Board, 2016, s. 12-19) .....	63
Tabell 19: Service-volum-tabell HCM scenario 1.....	64
Tabell 20: Service-volum-tabell HCM scenario 2.....	65
Tabell 21: Service-volum-tabell HCM scenario 3.....	66
Tabell 22: Service-volum-tabell basert på belastningsgrad for scenario 2 og profil 23 .....	67
Tabell 23: Service-volum-tabell basert på belastningsgrad for scenario 3 og profil 19.....	67
Tabell 24: Kapasitetsverdier scenario 1 for DK- og HCM-verdier .....	71

Tabell 25: Kapasitetsverdier scenario 2 for DK- og HCM-verdier .....	71
Tabell 26: Kapasitetsverdier scenario 3 for DK- og HCM-verdier .....	72
Tabell 27: Sammenlignet kø og forsinkelse for DK- og HCM-verdier.....	73
Tabell 28: Sikkerhetsfaktorer fra Jensen (Danmark) tilknyttet bredder på tverrprofilet .....	74
Tabell 29: Sikkerhetsfaktorer fra Bonneson (USA) tilknyttet bredder på tverrprofilet.....	75
Tabell 30: Sikkerhetsfaktorer fra Jensen (Danmark) for alternative bredder på utformingsvariabler...	76
Tabell 31: Sikkerhetsfaktorer fra Bonneson (USA) for alternative bredder på utformingsvariabler ....	76
Tabell 32: Kombinert sikkerhetsfaktor for ulike tverrprofil.....	77
Tabell 33: Beregnet sikkerhetsprestasjon for alternative tverrprofil med et tverrprofil på 23 m som referanseprofil .....	78

## Figurer

Figur 1: Generelt tverrprofil 4-felts motorveg.....	10
Figur 2: H3-profil (Statens vegvesen, 2019b) .....	11
Figur 3: Forslag til tverrprofil for smal 4-felts motorveg (Nye Veier, 2020a).....	12
Figur 4: Basistverrprofil for 4-felts motorveg (Vejdirektoratet, 2018) .....	13
Figur 5: Basistverrprofil for 4-felts veg (Vejdirektoratet, 2018).....	13
Figur 6: Tverrprofil for landlig motorveg (Trafikverket, 2020a, s. 49).....	14
Figur 7: Krav til bredder på motorveg (Trafikverket, 2020a, s. 50).....	14
Figur 8: Tverrprofil RQ 28 (FGSV, 2008, s. 24).....	15
Figur 9: Tverrprofil RQ 21 (Buch et al., 2018, s. 58).....	15
Figur 10: Justering av FFH for kjørefeltbredde (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29) .....	22
Figur 11: Justering av FFH for fri sidebredde mot høyre (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29).....	23
Figur 12: Korreksjonsfaktorer for kjørefeltbredde og fri sidebredde ved kjørefelt med henholdsvis nesten kun person- og varebiler, og kjørefelt hvor det også er tunge kjøretøy (Vejdirektoratet, 2019).....	25
Figur 13: Sammenheng mellom belastningsgrad og hastighet for personbiler på et grunnleggende motorvegsegment (Transportation Research Board, 2016, s. 12-47).....	26
Figur 14: Sammenheng mellom belastningsgrad og strekningsmiddel­hastighet for personbiler på vegger med fire eller flere felt (Vejdirektoratet, 2019, s. 41).....	27
Figur 15: Eksempler på trafikksituasjoner for ulike service-nivå på et motorvegsegment (Transportation Research Board, 2016, s. 12-17) .....	29
Figur 16: Service-nivå-kriterium og hastighet-volum-kurve for motorvegsegment (Transportation Research Board, 2016, s. 12-20) .....	29
Figur 17: Sammenheng mellom vegtype og predikerte ulykkestall (Høyre, 2016, s. 19) .....	32
Figur 18: Oversikt over metode for beregning av service-nivå (Transportation Research Board, 2016, s. 12-26) .....	49
Figur 19: Variasjon i estimert etterspurt trafikkmengde avhengig av valgt PHF.....	58
Figur 20: Hastighet-volum-kurve scenario 1 HCM.....	61
Figur 21: Hastighet-volum-kurve scenario 2 + 3 HCM .....	62

Figur 22: Akkumulert trafikkmengde over tid for overbelastet motorvegsegment (Chin et al., 2004, s. 11).....	68
Figur 23: Akkumulert trafikkmengde over tid for scenario 2 .....	72
Figur 24: Akkumulert trafikkmengde over tid for scenario 3 .....	73

## Forkortelser

HCM	Highway Capacity Manual
ÅDT	Årsdøgnetrafikk
FFH	Fri-flyt hastighet
Pbe	Personbilekvivalent
CSS/D	Context Sensitive Solutions/Design
PBPD	Performance Based Practical Design
CAF	Capacity Adjustment Factor (Kapasitetsjusteringsfaktor)
CMF	Crash Modification Factor (Sikkerhetsfaktor)
DK	Dansk håndbok
PHF	Peak Hour Factor (dimensjonerende timefaktor)
K	Andel av ÅDT i dimensjonerende time
D	Andel av trafikkmengde i dimensjonerende time i mest trafikkerte retning

# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

Antall dimensjoneringsklasser i den norske håndboken N100, «Veg- og gateutforming», ble i 2019 endret fra totalt ni til tre klasser. Av de gjenværende klassene er det én klasse for 4-felts motorveg (H3). Nye Veier uttalte i 2020 at de ønsker mer fleksibilitet til å utvikle et sikkert vegnett og samtidig oppnå besparelser som gir mulighet til å bygge mer veg for pengene. Å kun ha én dimensjoneringsklasse for 4-felts motorveg bidrar negativt til samfunnsøkonomisk lønnsomhet (Nye Veier, 2020b). Etter anbefaling fra Statens vegvesen senere samme år, la Samferdselsdepartementet frem retningslinjer for hvordan bredden på tverrprofilet for 4-felts motorveg med moderat trafikkmengde kan tilpasses et spesifikt prosjekt (Regjeringen, 2020). De nye retningslinjene skal inkluderes i en revidert utgave av håndbok N100 i løpet av 2021 og vil åpne for mer fleksibilitet i utforming av tverrprofilet (Slinde, 2021).

Med økt fleksibilitet legges det opp til at det kan bygges veger med smalere tverrprofil. Det kan finnes både positive og negative konsekvenser ved dette. Et smalere tverrprofil vil gi mindre ressursbehov og kreve mindre inngripende tiltak i terrenget, men kan samtidig føre til at sikkerheten og vegens evne til å avvikle trafikk svekkes. Framkommelighet og trafikksikkerhet er to overordnede forutsetninger for planlegging av vegnettet som legger grunnlag for retningslinjer og krav i utforming av tverrprofilet (Statens vegvesen, 2019b). God framkommelighet kjennetegnes ved at vegen har god kapasitet og høy reisehastighet, mens god trafikksikkerhet kjennetegnes ved at trafikkstrømmene er homogene når det gjelder retning, hastighet og kjøretøysammensetning og at trafikantatferden er forutsigbar (Vejdirektoratet, 2012b). Dette er forhold som må ivaretas ved valg av alternative bredder på tverrprofilet.

Håndbøker og standarder spiller en sentral rolle når en veg skal utformes. I mange land er det utviklet egne dokumenter for vegens utforming, framkommelighet og trafikksikkerhet. Dette har ført til at det mellom ulike land finnes en rekke forskjellige løsninger, framgangsmåter og verdier som påvirker hvordan vegen utformes. Når konsekvenser av å endre bredden på tverrprofilet skal analyseres, er grunnleggende forutsetninger og valg av inngangsverdier avgjørende for resultatet. På grunn av varierende verdier i litteratur fra ulike land vil også estimerte konsekvenser variere.

## 1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål

Opgavens problemstilling tar utgangspunkt i innføringen av nye retningslinjer for økt fleksibilitet i valg av bredder på tverrprofilet for 4-felts motorveg i Norge. Forskjellige tverrprofil kan ha ulik påvirkning på framkommeligheten og trafikksikkerheten på vegen. Det vil forsøkes å analysere i hvor

stor grad framkommeligheten og trafikksikkerheten påvirkes ved valg av alternative bredder på tverrprofilen. Retningslinjer og krav i håndbøker og standarder varierer mellom ulike land. Et mål for oppgaven er å undersøke hvordan disse variasjonene påvirker resultatene i analysen.

Problemstillingen deles inn i følgende forskningsspørsmål:

1. Hvilke konsekvenser vil økt fleksibilitet og smalere tverrprofil ha for framkommeligheten og trafikksikkerheten på en 4-felts motorveg?
2. Hvordan vil bruk av verdier i etablert litteratur fra ulike land påvirke analysene og beregningsresultatene knyttet til framkommelighet og trafikksikkerhet?

### **1.3 Omfang og begrensning**

Det andre forskningsspørsmålet i oppgaven omhandler å undersøke hvordan verdier fra litteratur hentet fra ulike land påvirker analysene og beregningsresultatene. I selve analysedelen er det valgt å kun gå videre med håndbøker og rapporter fra to land: Danmark og USA. En grunn til dette er at det fra Danmark og USA ble funnet detaljerte håndbøker og rapporter for både framkommelighet og trafikksikkerhet. Tilsvarende ble ikke funnet fra andre land. I tillegg er kildene i stor grad sammenlignbare med tanke på verdier og forhold som er undersøkt.

I en analyse av konsekvenser for framkommeligheten og trafikksikkerheten er det en rekke variabler og forhold som kan ha påvirkning på resultatet. I denne oppgaven er det valgt å legge vekt på effekter som oppstår på grunn av justering av bredder på kjørefeltene, ytre og indre skulder og midtdeler. Andre variabler som er undersøkt er hastighet og trafikkmengde. I analysen av sikkerhetseffekter blir det kun sett på ulykker som medfører personskade.

### **1.4 Oppgavens oppbygging**

Oppgaven er organisert som følger:

#### **Kapittel 2 – Metode**

I dette kapitlet beskrives metoder som er brukt i oppgaven og hvorfor disse er valgt.

#### **Kapittel 3 – Teoretisk grunnlag**

Her presenteres tidligere forskning og litteratur som er relevant for temaene utforming, framkommelighet og trafikksikkerhet. Dette legger grunnlaget for utførte analyser og diskusjon av problemstilling og forskningsspørsmål.

## **Kapittel 4 – Analyse og resultat**

Oppgavens analysedel er delt inn i fire deler. I den første delen er det definert hvilke bredder på tverrprofilen og scenarier som inngår i analysen. Basert på de ulike tverrprofilene og scenarioene er det deretter analysert effekter knyttet til kapasitet og service-nivå, kø og forsinkelse og trafiksikkerhet. Resultater er fremstilt underveis i analysen.

## **Kapittel 5 – Diskusjon**

I dette kapitlet drøftes resultater og beregninger i analysen sammen med teori funnet gjennom litteraturstudien.

## **Kapittel 6 – Konklusjon**

Her er det svart på problemstillingen og forskningsspørsmålene som er stilt innledningsvis i oppgaven.

## **Kapittel 7 – Videre arbeid**

I dette kapitlet presenteres tanker om videre arbeid som kan være interessant å utføre i lys av oppgavens problemstilling og funn.



## 2 Metode

I dette kapittelet vil metodene som er valgt for å undersøke oppgavens problemstilling presenteres. På grunn av et behov for å undersøke litteratur fra flere land knyttet til temaene utforming, framkommelighet og trafikksikkerhet, er det valgt å bruke litteraturstudie som den primære metoden i oppgaven. På bakgrunn av undersøkt forskning og litteratur er det funnet metoder som brukes til å analysere påvirkning på framkommeligheten og trafikksikkerheten på strekninger med ulike bredder på tverrprofilen. Disse metodene blir nærmere beskrevet i kapittel 4 etter hvert som metodene benyttes i analysen.

### 2.1 Litteraturstudie

En litteraturstudie er en omfattende studie og oppsummering av tidligere forskning og litteratur om et valgt emne. Gjennom litteraturstudien skal tidligere forskning listes opp, beskrives, oppklares og vurderes objektivt. Dette vil gi et teoretisk grunnlag og god forståelse for hvordan forskningen har utviklet seg innen emnet (Coffta, 2020). En ulempe med å basere oppgaven på en litteraturstudie er at det kun benyttes tidligere litteratur og forskning fra andre forfattere. Dette kan gjøre det mer utfordrende å komme med egne vinklinger på problemstillingen.

I denne oppgaven er litteraturstudien basert på definert problemstilling og forskningsspørsmål. Gjennom studien er eksisterende forskning og litteratur knyttet til utforming av tverrprofil for 4-felts veg og motorveg, og hva som karakteriserer framkommeligheten og trafikksikkerheten på slike veger, undersøkt. Litteraturen som er gjennomgått består i stor grad av håndbøker og standarder fra ulike land, samt vitenskapelige artikler og rapporter. For å danne et overblikk over utforming av tverrprofil og hvilke effekter som skulle analyseres, ble det tidlig utført en bred litteraturstudie. Deler av litteraturstudien bygger videre på litteraturstudien som ble gjennomført i prosjektoppgaven høsten 2020. Omfanget på tilgjengelig litteratur knyttet til framkommelighet og trafikksikkerhet på motorveger er stort. En utfordrende del av oppgaven var å selektere og velge ut den litteraturen som ble ansett som mest relevant for oppgavens problemstilling. Etter å ha utført et generelt søk på temaene utforming, framkommelighet og trafikksikkerhet, ble det utført et mer spesifikt søk basert på den mest relevante litteraturen som ble funnet i det generelle søket.

I litteraturstudien ble hovedsakelig Google Scholar brukt for å finne akademisk litteratur. Google ble også brukt for å oppnå et litt bredere søk og for å få tilgang til de kildene som ikke er tilgjengelige via Google Scholar. Vitenskapelige artikler ble funnet fra nettsider som Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board og ScienceDirect, som samler store mengder dokumenter og tidligere forskning. I tillegg ble det hentet flere rapporter fra nettsiden til amerikanske Federal Highway Administration og Statens vegvesen. Typiske søkeord som har blitt brukt er: narrow

lanes/shoulders, freeway, capacity, level of service, safety, accidents og design. Store deler av søket ble utført på engelsk for å få tilgang til størst mulig mengde litteratur, men det ble også gjort grundige søk på norsk og dansk.

I oppgavens problemstilling er det et mål å sammenligne verdier brukt i ulike land. Det er funnet detaljerte og utbredte håndbøker og rapporter for både framkommelighet og trafiksikkerhet fra Danmark og USA som er valgt til videre undersøkning. Fra Danmark er håndboken «Kapacitet og Serviceniveau», og en rapport som omfatter sikkerheten på det danske motorvegnettet, videre studert. Fra USA er teori og metoder fra de to velkjente manualene Highway Capacity Manual (HCM) og Highway Safety Manual (HSM) undersøkt. Disse manualene er ikke fritt tilgjengelig. Gjennom veileder ble det skaffet tilgang til siste versjon av HCM fra 2016. Tilknyttet HSM er det gjennom innledende litteratursøk funnet en rapport som omfatter sikkerheten på motorveger i deler av USA.

Temaet økt fleksibilitet i utforming av 4-felts motorveg er relativt nytt i Norge. Mye av litteraturen som er skrevet rundt dette er utgitt de siste årene og kan dermed ikke finnes i eksisterende versjoner av håndbøker og standarder. For å få tilgang til denne litteraturen er eInnsyn (nettside) brukt til å søke etter dokumenter som er mottatt, sendt eller opprettet av Statens vegvesen. Gjennom eInnsyn er det funnet og skaffet innsyn i analyser og vurderinger av utforming og sikkerhet på 4-felts motorveger.

## **2.2 Regneark**

Det er laget to regneark i Excel for å utføre beregninger i denne oppgaven. Det ene regnearket er brukt til å estimere effekter på kapasitet og service-nivå, mens det andre estimerer effekter på kø og forsinkelse. I regnearket for kapasitet og service-nivå er det tatt utgangspunkt i en beregningsmetode fra HCM, men for å enklere kunne utføre beregninger tilpasset oppgavens behov er det gjort noen små tilpasninger i framgangsmåten. Formler og verdier som inngår i regnearket er kronologisk gjennomgått i kapittel 4.2.1. Verdier som brukes for inngangsparameterne i regnearket er hentet gjennom litteraturstudien. Formler og verdier som inngår i regnearket for kø og forsinkelse er kronologisk gjennomgått i kapittel 4.2.2. I dette regnearket benyttes inngangsverdier som bygger på verdier estimert fra regnearket for kapasitet og service-nivå. Regnearket kan også benyttes som separat modell ved bruk av andre inngangsverdier.

Ettersom det ikke er et spesifikt prosjekt som blir analysert i oppgaven, er det valgt å bruke standardverdier til å estimere påvirkningen på framkommeligheten. Ved valg av standardverdier er det undersøkt en rekke verdier som representerer ulike forhold. Det er deretter valgt å gå videre med verdier som antas å være best egnet til denne oppgaven. Ved å justere verdien på inngangsparameterne vil regnearkene beregne effekten av justeringen. Skjermbilder som viser oppsettet av regnearkene kan finnes i Vedlegg 1 og 2. Selve Excel-filen kan finnes som vedlegg til innlevert oppgave.

## 3 Teoretisk grunnlag

I dette kapittelet er det gjennomført en undersøkelse av eksisterende kunnskap og litteratur som er relevant for å belyse problemstillingen i oppgaven. Kapittelet er delt inn etter temaene utforming, framkommelighet og trafiksikkerhet, og det er fortløpende gjort rede for litteratur og prinsipper som legger grunnlaget for oppgavens analysedel.

### 3.1 Vegutforming

Utformingen av en veg er tilpasset hastighet, trafikkmengde, dimensjonerende kjøretøy og topografien rundt. Med krav til geometri og terrengforholdene er det satt rammer for hvordan vegen kan utformes (Statens vegvesen, 2019b). Videre i dette kapittelet er variabler, med tilhørende verdier, som inngår i utformingen av vegens tverrprofil undersøkt. Relevante krav og standarder for utforming av veger i Norge, Danmark, Sverige og Tyskland er gjennomgått for å kartlegge variasjoner i utformingen og hva som ligger til grunn for de ulike valgene. I tillegg er det sett nærmere på hva som er viktig å tenke på i en vurdering av alternative løsninger og hvordan prosesser som legger vekt på fleksibilitet i vegprosjekter foregår.

#### 3.1.1 Utformingsvariabler og -krav

Det finnes et bredt spekter av faktorer som påvirker valg av tverrprofil og som bør vektlegges i vurderinger av vegens utforming. I vegprosjekter må det gjøres visse forutsetninger i forkant av prosjekteringen. Forutsetningene kan deles inn i overordnede forutsetninger for hele vegnettet, og spesifikke forutsetninger som varierer mellom de enkelte vegprosjektene. De overordnede forutsetningene omfatter temaer som trafiksikkerhet, framkommelighet, miljø og klimatiske forhold. Spesifikke forutsetninger omfatter mer detaljerte forhold som dimensjonerende trafikkmengde, fartsgrense, trafikantgrupper, kjøretøytyper, prosjektets beliggenhet, drift og vedlikehold (Statens vegvesen, 2019b). Hva som ligger til grunn for de to forutsetningene framkommelighet og trafiksikkerhet er beskrevet på følgende måte:

«Norge har en visjon (nullvisjonen) om et transportsystem uten ulykker med drepte eller hardt skadde. Trafiksikkerhetsstandard beskrives med skadekostnad, og det forutsettes at det i planprosessen beregnes skadekostnader for ulike planalternativer» (Statens vegvesen, 2019b, s. 9).

«Overordnede analyser definerer hvilken avviklingsstandard som kreves. Et overordnet vegnett ivaretar kravet om god og effektiv framkommelighet for personer og gods. Dette innebærer et robust og pålitelig transportsystem med korte reisetider og tilstrekkelig kapasitet» (Statens vegvesen, 2019b, s. 10).

Når en veg skal planlegges og utformes er det mange aspekter og faktorer som påvirker valg av utforming som må vurderes. Å velge passende verdier og egenskaper for de variablene som inngår i

vegens utforming er avgjørende for å oppnå ønsket effekt. Amerikanske Federal Highway Administration (FHWA) har identifisert 13 utformingsvariabler med tilhørende kriterier som har vesentlig betydning for sikker og effektiv drift av motorveger og som det bør rettes ekstra oppmerksomhet mot i utformingsbeslutninger (Harwood et al., 2014). De 13 variablene ble senere revidert og omgjort til følgende ti variabler:

1. Designhastighet
2. Kjørefeltbredde
3. Skulderbredde
4. Horisontal kurveradius
5. Overhøydeforhold
6. Stoppsikt
7. Maksimal helning
8. Tverrfall
9. Vertikal klaring
10. Bæreevne

(Federal Highway Administration, 2016)

Amerikanske motorvegbyråer må følge de kriterier som er gjeldende for de ovennevnte utformingsvariablene når det skal bygges motorveger på det nasjonale motorvegnettet. Harwood et al. (2014) utførte en spørreundersøkelse der statlige motorvegbyråer i USA ble spurt om å rangere betydningen av utformingsvariablene for restaurerings- og rehabiliteringsprosjekter. Resultatet fra undersøkelsen viste at kjørefeltbredde ble rangert som den viktigste variabelen, etterfulgt av skulderbredde og designhastighet.

De forskjellige utformingsvariablene har ulik betydning for vegens ytelse avhengig av sammenhengen mellom variablenes utformingskrav og påvirkning på framkommelighet og trafikksikkerhet. Det kan forventes noen forskjeller i vurderinger av utformingsvariablenes betydning som følge av variasjoner i lokale faktorer som terreng og klima. Av de ti nevnte variablene er designhastighet, kjørefeltbredde og skulderbredde de mest avgjørende og de som har størst påvirkning på framkommeligheten og trafikksikkerheten på vegen (Harwood et al., 2014). En annen utformingsvariabel som ikke inngår i de nevnte variablene, men som er en avgjørende del i bredden på tverrprofilen, er vegens midtdeler. For å bli bedre kjent med disse variablene og tilhørende kriterier, er de nærmere beskrevet nedenfor. I tillegg er det sett nærmere på arealmessige forutsetninger som ligger til grunn for de utvalgte variablene. Her inngår blant annet dimensjonerende kjøretøy og tilhørende bevegelsesprofil, nødsone og objektavstand (Vejdirektoratet, 2012a). Konsekvenser knyttet til framkommelighet og trafikksikkerhet blir grundigere gjennomgått i henholdsvis kapittel 3.2 og 3.3.

## **Designhastighet**

Designhastighet er en valgt hastighet som brukes som en forutsetning for å bestemme vegens geometriske egenskaper og bør reflektere den hastigheten trafikantene kan forvente å holde på strekningen. Dette er bestemt av trafikken på strekningen, samt vegens fysiske begrensninger. Valg av designhastighet har en indirekte effekt på vegens utforming og vil blant annet påvirke hvilke verdier som velges for bredden på ulike variabler i tverrprofilen. Å endre designhastighet vil ikke i seg selv ha stor påvirkning på framkommeligheten og trafikksikkerheten. Effekten kommer av andre utformingsvariabler som påvirkes av designhastigheten. Erfaring viser at en endring i fartsgrensen ikke vil ha en spesiell effekt på trafikantenes valg av hastighet, men at det behøves en justering av flere faktorer for å kunne påvirke hastigheten (Harwood et al., 2014).

## **Kjørefeltbredde**

Vegens kjørefeltbredde omfatter det området hvor et kjøretøy kan bevege seg sidevegs innenfor vegskulderen uten å komme i konflikt med andre kjøretøy. På veger med flere kjørefelt i hver retning er dette arealet mellom ytre og indre vegskulder. Bredden på kjørefeltene vil påvirke vegens trafikksikkerhet, kapasitet og framkommelighet. Dette gjelder spesielt for veger med høy hastighet (Stein & Neuman, 2007).

## **Skulderbredde**

Et tverrprofil kan bestå av både ytre og indre skulder. Indre skulder skiller indre kjørefelt fra midtdeler, mens ytre skulder skiller ytre kjørefelt fra vegens sideområde. Vegskulderens rolle er kompleks og satt sammen av en flere funksjoner som er viktige for vegens framkommelighet og trafikksikkerhet (Foss, 2019). Foss skriver at skulderen blant annet skal

- gi rom for at kjøretøy kan stanse utenfor kjørebanelen ved nødstop
- gi plass til stans av kjøretøy i overtredelse av vegtrafikkloven
- gi plass til utføring av nødvendig vedlikeholdsarbeid, samt midlertidig lagring av snø ved brøyting
- gi rom til gjenvinning av kontroll for villfarende kjøretøy og uoppmerksomme trafikanter
- gi trafikanter mulighet til å svinge unna farlige situasjoner dersom behovet oppstår
- sørge for tilstrekkelig plass til utrykningskjøretøy i perioder med mye trafikk
- sørge for tilstrekkelig bredde som ikke har negativ påvirkning på trafikantenes hastighet eller plassering i kjørefeltet
- gi økt avstand til sidehindringer, som vil sørge for bedre komfort for sjåførere
- gi mulighet til å ha et ekstra kjørefelt i perioder med kø eller når det utføres vedlikeholdsarbeid på strekningen
- gi bedre stoppsikt i de minste horisontalkurvene

## **Midtdeler**

Midtdelerens funksjon avhenger av type midtdeler. For tverrprofilene som undersøkes i denne oppgaven er vegens midtdeler relativt smal og utstyrt med fysisk midtrekkverk. Hovedfunksjonen for en slik midtdeler er å separere motgående trafikkstrømmer og minske risikoen for frontkollisjoner. Midtrekkverket skal utformes for å tåle påkjenninger fra begge sider og skal ikke bøyes for langt inn i motgående kjørefelt ved påkjørsel (NYSDOT, 2020).

## **Arealbehov på vegstreknings**

For å bedre forstå grunnlaget for krav til bredder på ovennevnte utformingsvariabler er det undersøkt hva som er det faktiske arealbehovet på vegstreknings. Et kjøretøys arealbehov under normale forhold er avhengig av kjøretøyets dimensjoner, bevegelsesrom og avstand til objekter. Kjøretøyets dimensjoner vil også være avgjørende for hva som er tilstrekkelig nødsone. Verdier er hentet fra den danske håndboken «Grundlag for udforming af trafikarealer» (Vejdirektoratet, 2012a). Selv om kjøretøyenes dimensjoner i stor grad er like, kan det være variasjoner i hva som oppfattes som nødvendige og tilstrekkelige bredder mellom ulike land.

### *Dimensjonerende kjøretøy*

Tunge kjøretøy som vogntog og busser kan ha en bredde på opptil 2,60 m, mens en personbil har en bredde på rundt 1,80 m (Statens vegvesen, 2019b). I tillegg til kjøretøyets bredde kreves en ekstra bredde for å gi plass til de horisontale bevegelsene som oppstår under kjøring. Kjøretøyets fysiske bredde, inkludert de horisontale bevegelsene som oppstår under fart, kalles kjøretøyets bevegelsesprofil. Med en hastighet på 80 km/t vil et vogntogs bevegelsesprofil være 3,20 m. En personbil med hastighet mellom 90 og 130 km/t har et bevegelsesprofil på 3,00 m (Vejdirektoratet, 2012a).

De horisontale bevegelsene under fart avhenger av restbredden, som er lik kjørefeltbredden minus bredden på kjøretøyet. Dersom restbredden er liten kan føreren ha en krampeaktig styring som gir store avvik fra den ideelle kjørelinjen, men dersom restbredden er stor kan det også oppstå avvik fra den ideelle linjen på grunn av at føreren kan bli mindre oppmerksom. Det er dermed viktig å unngå situasjoner der restbredden er veldig liten eller stor. Den optimale restbredden for personbiler ligger mellom 1,10 og 1,60 m avhengig av hastigheten. Med restbredde på 1,60 m viser undersøkelser at 85 % av trafikantene velger å kjøre langsommere enn 120 km/t, mens for en restbredde på 1,10 m velger 85 % av trafikantene å ikke kjøre fortere enn 90 km/t. Restbredden bør derfor bestemmes basert på den planlagte hastigheten på vegen. På grunn av lastebilsjåførers kjøreerfaring og fartssperrer vil en restbredde på 0,60 m være tilstrekkelig for lastebiler med hastighet på 80 km/t (Vejdirektoratet, 2012a).

### Nødsone

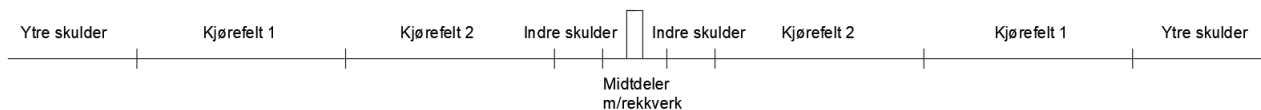
Nødsonen består av den ytre skulderen samt det området utenfor skulderen som skal gi rom for stansede kjøretøy. På motorveger vil nødsonen ofte tilsvare det samme som ytre skulder. Det kreves normalt en bredde på 2,00 m for at en personbil skal kunne stanse utenfor kjørebanelen, og en bredde på 2,55 m for at føreren kan stige ut av kjøretøyet uten å benytte deler av kjørebanelen. For at en lastebil skal kunne gjøre det samme må bredden normalt være 3,35 m (Vejdirektoratet, 2012a).

### Objektavstand

Av frykt for å kjøre på faste gjenstander vil trafikanter holde en viss avstand mellom kjøretøyet og objekter langs kjørebanelen. Denne avstanden kalles objektavstand og vil variere avhengig av førerens hastighet, erfaring og grad av risikoaksept. Ved høyere hastighet vil objektavstanden øke. Objekter langs vegbanen kan kategoriseres som kontinuerlige eller enkeltstående objekter. Et kontinuerlig objekt, som for eksempel autovern, vil ha mindre påvirkning på sjåføren enn et enkeltstående objekt, som for eksempel stolper, skilt og brufundament. For kontinuerlige objekter er det gitt en veiledende og minimum objektavstand på henholdsvis 1,00 og 0,60 m. For enkeltstående objekter øker disse til henholdsvis 1,50 og 1,00 m (Vejdirektoratet, 2012a).

## 3.1.2 Tverrprofil 4-felts veg og motorveg

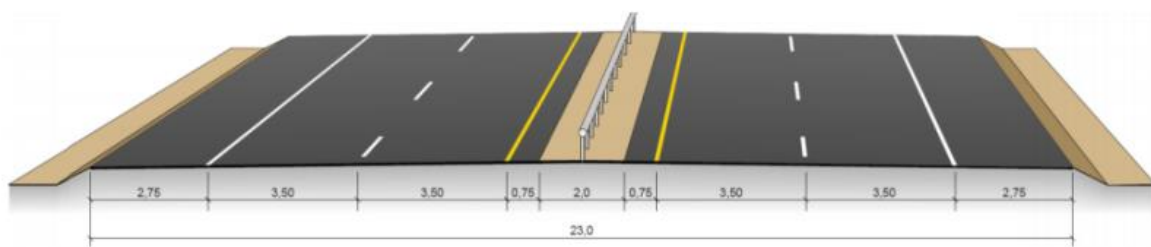
En 4-felts motorveg består av to kjørefelt i hver kjøreretning som separeres med en midtdeler. I tillegg har vegen en indre skulder som separerer kjørebanelen fra midtdeler og en ytre skulder utenfor kjørefeltene. Hvilke krav som gjelder for utforming av veger varierer mellom ulike land. På grunn av varierende krav i nasjonale publikasjoner om utformingen av veger vil det finnes ulikheter i de tverrprofilene som er gjeldende, selv om inngangsparameterne for bestemmelsene i stor grad er like. For å få et innblikk i praksisen rundt utforming av 4-felts veg og motorveg er det tatt utgangspunkt i håndbøker fra Norge, Danmark, Sverige og Tyskland. Figur 1 viser et generelt tverrprofil for en 4-felts motorveg.



Figur 1: Generelt tverrprofil 4-felts motorveg

## Norge – N100 Veg- og gateutforming

For utforming av veger og gater i Norge benyttes håndbok N100 «Veg- og gateutforming». I denne håndboken er det definert ulike dimensjoneringsklasser som gir krav til utformingen av vegens tverrprofil. Dimensjoneringsklassene er satt sammen av ulike krav til verdier for årsgjennomsnittlig trafikktetthet (ÅDT), fartsgrense og nødvendig bredde på de ulike variablene i tverrprofilen. Den nyeste utgaven av N100 utgitt i 2019 har én dimensjoneringsklasse, H3, for 4-felts motorveg. Tverrprofilen for en H3-veg har en total bredde på 23,0 m og er illustrert i Figur 2. Denne dimensjoneringsklassen gjelder for veger med  $\text{ÅDT} > 12\,000$  og maksimal fartsgrense 110 km/t (Statens vegvesen, 2019b).

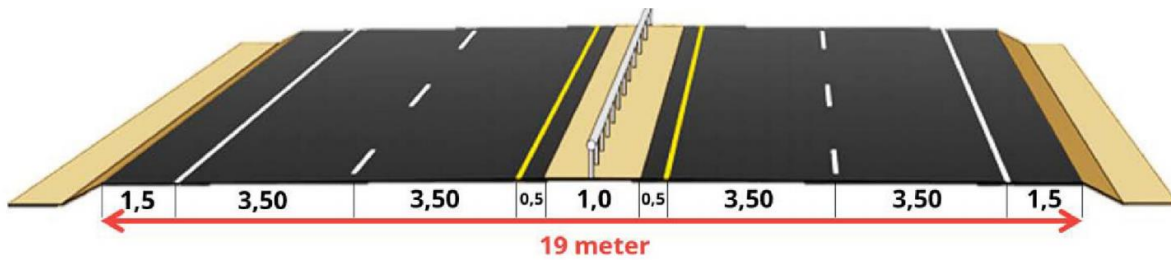


Figur 2: H3-profil (Statens vegvesen, 2019b)

Kravet til utforming av 4-felts motorveg i Norge har endret seg over tid. I den forrige utgaven av håndbok N100 utgitt i 2013 var det to ulike dimensjoneringsklasser, H8 og H9, for landlig 4-felts motorveg. H9 var utformet med samme tverrprofil som dagens H3-profil på 23,0 m, men gjaldt for  $\text{ÅDT} > 20\,000$  og maksimal fartsgrense 100 km/t, mens H8 hadde et tverrprofil på totalt 20,0 m og gjaldt for  $\text{ÅDT} 12\,000 - 20\,000$  og maksimal fartsgrense 100 km/t (Statens vegvesen, 2014b).

Den siste utviklingen innen utforming av 4-felts motorveg i Norge er at Samferdselsdepartementet, på bakgrunn av anbefalinger fra Statens vegvesen, har innført muligheter for å bygge smalere tverrprofil på 19,0 – 23,0 m for veger med  $\text{ÅDT} 6\,000 - 20\,000$ . I neste utgave av N100 vil følgende retningslinjer fastsettes: 4-felts motorveg med  $\text{ÅDT} 6\,000 - 12\,000$  skal ha en bredde mellom 19,0 og 21,5 m, og en bredde mellom 20,0 og 23,0 m for  $\text{ÅDT} 12\,000 - 20\,000$ . Avbøtende tiltak skal benyttes ved skulderbredde smalere enn 2,0 m for  $\text{ÅDT} 6\,000 - 12\,000$  og 2,75 m for  $\text{ÅDT} 12\,000 - 20\,000$  (Regjeringen, 2020). Bredden på midtdeler kan reduseres til 0,5 m ved  $\text{ÅDT} < 20\,000$ , forutsatt at løsninger for rekkverk, skilting og arbeid på veg tilfredsstilles (Slinde, 2021). Det smaleste tverrprofilen på 19,0 m, som er vist i Figur 3, ble anbefalt og gitt som et forslag av Nye Veier. Den reduserte bredden kommer av en reduksjon av ytre og indre skulder, samt smalere midtdeler. Bredden på kjørefeltene er lik for alle tverrprofilene.



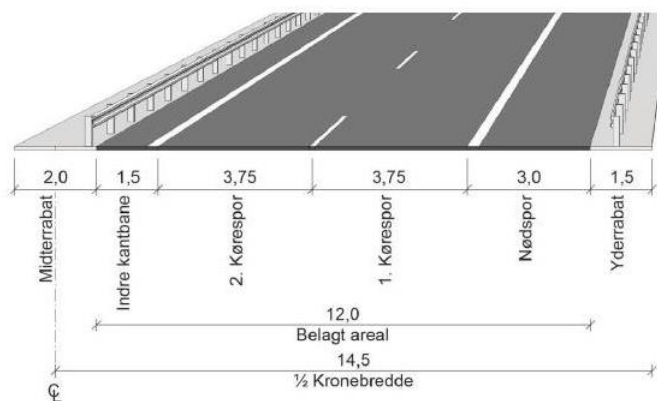


Figur 3: Forslag til tverrprofil for smal 4-felts motorveg (Nye Veier, 2020a)

### **Danmark – Tverrprofiler i åbent land**

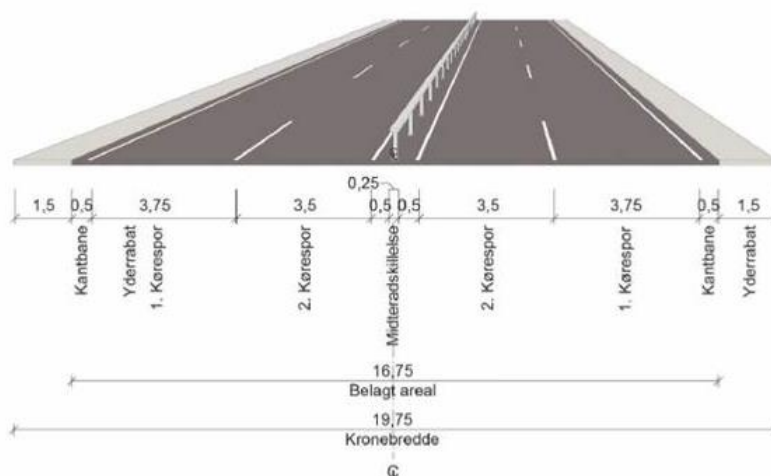
I den danske håndboken «Tverrprofiler i åbent land» er det utviklet flere basistverrprofil som benyttes som utgangspunkt for valg av tverrprofil (Vejdirektoratet, 2018). I 2013 oppdaterte det danske vegdirektoratet håndboken for å gi større frihet for den prosjekterende i valg av tverrprofil. Med utgangspunkt i basistverrprofilene kan vegmyndigheten vurdere behov for justeringer basert på lokale forhold og prioriteringer. For hvert basistverrprofil er det beskrevet hvilke forutsetninger som ligger til grunn for tverrprofilet og hvordan det kan tilpasses spesifikke forhold (Vejdirektoratet, 2013).

Basistverrprofilet for en 4-felts motorveg er 29,0 m bredt og kan planlegges for fartsgrense 110 og 130 km/t. Figur 4 viser basistverrprofilet for en 4-felts motorveg. Tverrprofilet er utformet for å kunne avvike trafikk på fire kjørefelt under vegarbeid ved å ha fire smale kjørefelt på ene halvdel av profilet. Ytre skulderbredde på 3,0 m er valgt for at en personbil kan stanse og åpne bildøren uten å komme i konflikt med kjørebanelen. I håndboken påpekes det at det er visse muligheter for å redusere basistverrprofilets bredde, men at det vil føre til at profilet mister noen av sine funksjoner. Det nevnes at det mest vesentlige er at enhver reduksjon i bredde vil frata tverrprofilet muligheten til å avvike to kjørefelt i hver retning på den ene halvdel av tverrprofilet under vegarbeid. Mulige reduksjoner som nevnes er at indre kjørefelt reduseres til 3,25 m med oppsett av forbikjøringsforbud for lastebiler, samt at indre skulder settes til 1,0 m. Med disse reduksjonene vil tverrprofilet få en bredde på 26,0 m (Vejdirektoratet, 2018).



Figur 4: Basistverrprofil for 4-felts motorveg (Vejdirektoratet, 2018)

En 4-felts veg som ikke er kategorisert som motorveg kan utformes med et basistverrprofil på 19,75 m med en fartsgrense på 100 km/t. Her er det også mulig å redusere bredden på indre kjørefelt til 3,25 m med forbikjøringsforbud for lastebiler (Vejdirektoratet, 2018). Figur 5 viser basistverrprofilet for en 4-felts veg.



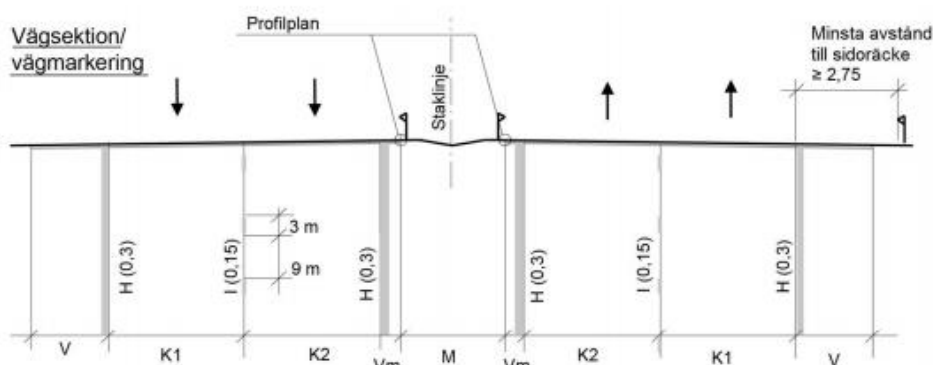
Figur 5: Basistverrprofil for 4-felts veg (Vejdirektoratet, 2018)

### **Sverige – Vägars och gators utformning**

I Sverige benyttes håndboken «Vägars och gators utformning» (VGU) ved bygging av nye veger. Håndboken består av to separerte dokumenter markert med «KRAV» og «RÅD». Det ene dokumentet omhandler krav for vegers funksjon og utforming, mens det andre dokumentet omhandler råd som kan kobles til kravene (Trafikverket, 2020a).

I «KRAV»-dokumentet er det beskrevet hvordan vegens tverrprofil skal utformes. En 4-felts motorveg skal bygges med et tverrprofil på totalt 21,5 m og kan planlegges for fartsgrense 110 og 120 km/t

(Trafikverket, 2020a). Fartsgrense 120 km/t kan benyttes for motorveger med ÅDT mellom 15 000 og 30 000, mens 110 km/t kan benyttes ved ÅDT mellom 15 000 og 50 000. Dersom ÅDT er under 20 000 eller fartsgrensen er 120 km/t må det utføres særskilte utredninger (Trafikverket, 2020b). Figur 6 og Figur 7 viser henholdsvis utforming av tverrprofilen og tilhørende krav til bredder for landlig motorveg fra den svenske håndboken.



Figur 6: Tverrprofil for landlig motorveg (Trafikverket, 2020a, s. 49)

	K1 (yttre körfält) (m)	K2 (inre körfält) (m)	Vm (mittvägren) (m)	V (vägren) (m)	M *) (mittremsa) (m)	Räffling **) (se kap. 13.2.1.7.2)
<b>Nybyggnad</b>						
Väg	3,5	3,5	0,5	2,0	2,5	Vägren och mittvägren
Bro	3,5	3,5	0,5	2,0		
Tunnel	3,5	3,5	1,0	2,0		

\*) Undantag: Mittremsans bredd får vid behov ökas för att inrymma exempelvis brostöd, belysning eller driftvändplats. Mittremsans bredd får vid behov ökas av vägarkitektoniska och naturmiljömässiga skäl, för att spara naturliga terrängformationer, unika träd etc. Undantag ska motiveras och godkännas av Beställaren.

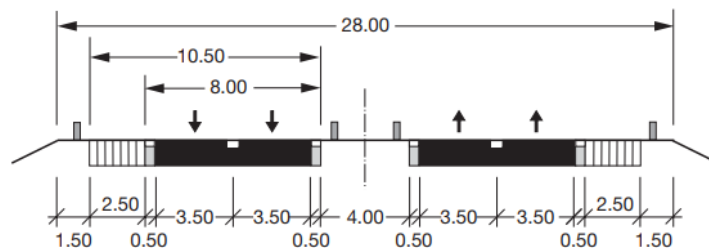
\*\*) Undantag får göras i de fall restriktioner med hänsyn till buller finns efter godkännande av Beställaren.

Figur 7: Krav til bredder på motorveg (Trafikverket, 2020a, s. 50)

Før oppdateringen av VGU i 2012 var det i tillegg et alternativ for smal 4-felts motorveg med total bredde på 18,5 m og fartsgrense 110 km/t. Dette alternativet utgikk blant annet på grunn av problemer med sporslitasje, manglende mulighet for avvikling på tre kjørefelt ved vegarbeid, økning i ulykkestall og dreneringsproblemer (Trafikverket, 2012).

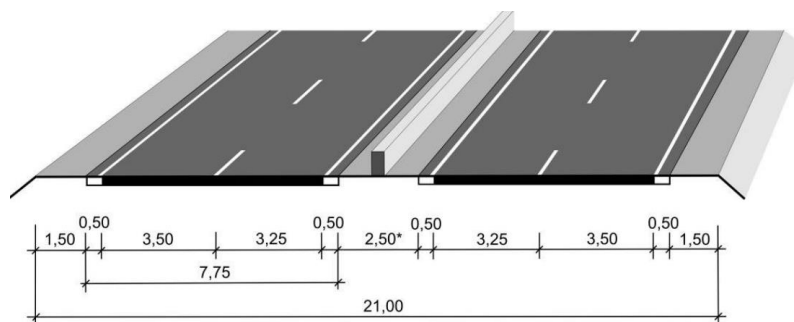
## Tyskland – RAL og RAA

Det er utviklet to håndbøker for utforming av veger i Tyskland. Håndboken RAA, som står for retningslinjer i utforming av motorveg, oppgir fire dimensjoneringsklasser (EKA 1 – 4) for ulike typer motorveger. Motorveger utenfor urbane strøk kan utformes med et minste tverrprofil på 28,0 m for ÅDT mindre enn 30 000. Med ÅDT over 30 000 må bredden på tverrprofilet økes til 31,0 m for å sikre tilstrekkelig framkommelighet ved vegarbeid. En årsak til de brede tverrprofilene er at det ikke er satt hastighetsbegrensning på motorvegene (FGSV, 2008). Tverrprofilet på 28,0 m er vist i Figur 8.



Figur 8: Tverrprofil RQ 28 (FGSV, 2008, s. 24)

Håndboken RAL, som står for retningslinjer i utforming av landeveger, oppgir dimensjoneringsklasser for landeveger som ikke inkluderer motorveger. I håndboken er det anbefalt å bruke et tverrprofil på 21,0 m for en 4-felts veg med høy ÅDT som ikke overstiger 30 000 og med en maksimal fartsgrense på 120 km/t. For dette tverrprofilet bør det etableres regelmessige stopplommer med en avstand på 500 til 1 000 m mellom disse. Dersom ÅDT er over 30 000 bør vegen utformes som motorveg jamfør krav i RAA (Buch, Jensen & Griebe, 2018). Figur 9 viser tverrprofilet på 21,0 m.



Figur 9: Tverrprofil RQ 21 (Buch et al., 2018, s. 58)

## Sammenligning av tverrprofil fra ulike land

En gjennomgang av håndbøker og standarder fra ulike land viser variasjoner i tverrprofilens utforming. Tabell 1 lister opp forskjellige tverrprofil for 4-felts veg og motorveg på bakgrunn av anbefalinger og krav til utforming fra Norge, Danmark, Sverige og Tyskland. Total asfaltert bredde på tverrprofilen, som i dette tilfellet er lik total bredde minus bredden av ytre skulder som ikke er asfaltert, er oppgitt i parentes bak tverrprofilens totale bredde. For ytre skulder er den bredden som ikke er asfaltert, og som kommer i tillegg til asfaltert skulder, oppgitt i parentes.

Tabell 1: Sammenligning av tverrprofil for 4-felts veg og motorveg fra ulike land

<b>Tverrprofil</b>	<b>Total bredde (m)</b>	<b>Ytre skulder (m)</b>	<b>Kjørefelt 1 (m)</b>	<b>Kjørefelt 2 (m)</b>	<b>Indre skulder (m)</b>	<b>Middeler (m)</b>
Norge – H3	23,0	2,75	3,5	3,5	0,75	2,0
Norge – Smal	19,0	1,5	3,5	3,5	0,5	1,0
Danmark – Motorveg	29,0 (26,0)	3,0 (1,5)	3,75	3,75	1,5	2,0
Danmark – Motortrafikkveg	19,75 (16,75)	0,5 (1,5)	3,75	3,5	0,5	0,25
Sverige	21,5	2,0	3,5	3,5	0,5	2,5
Tyskland – Landeveg	21,0 (18,0)	0,5 (1,5)	3,25	3,5	0,5	2,5
Tyskland – Motorveg	28,0 (25,0)	2,5 (1,5)	3,5	3,5	0,5	4,0

I tverrprofilene inngår utformingsvariablene kjørefelt, ytre og indre skulder og middeler. Fra tabellen over som viser alternative tverrprofil fra ulike land er det tydelig at det er mindre vanlig å gjøre endringer i bredden på kjørefeltene og indre skulder, mens bredden på ytre skulder og middeler varierer i større grad. Som beskrevet under håndbøkene fra hvert land er hastighetsbegrensninger og ÅDT-grenser litt forskjellige mellom tverrprofilene, noe som kan påvirke de breddene som er valgt.

### 3.1.3 Fleksibilitet i utforming

Økt fleksibilitet i utforming av tverrprofil er ønskelig for å kunne bygge smartere løsninger som gir mer trafiksikker veg for pengene (Nye Veier, 2020b). I en ideell situasjon vil vegens utforming følge de krav som er gitt i vegnormaler og standarder, men en slik løsning vil ikke i alle tilfeller være like praktisk. I en analyse utført av Nye Veier (2020a) er det funnet at det ikke finnes ett optimalt profil for en bestemt trafikkmengde, og at det derfor bør være en viss frihetsgrad i valg av utforming.

Det er et økende behov for å finne en god balanse mellom de forskjellige utformingsvariablene for å kunne levere et resultat som legger vekt på å redusere den negative effekten på samfunnet og miljøet. For å gjøre dette må faktorer knyttet til sikkerhet, miljø, mobilitet, nytte og kostnad balanseres mot hverandre for å finne de mest optimale løsningene. En slik prosess krever et høyere nivå av forståelse og vurdering av risiko og konsekvenser knyttet til utformingsbeslutningene enn dersom det bare brukes krav direkte fra normaler og standarder. Det finnes begrenset data som kan kvantifisere effekter knyttet til avveininger mellom ulike utformingsvalg. Dette kan skape usikkerhet for de som har ansvar for vegens utforming (Psarianos, 2014). I håndbøker for utforming av veger er det heller ikke lagt særlig vekt på hvilke konsekvenser fravik i anbefalte utformingsverdier vil medføre.

#### CSS/D og PBPD

Det er utviklet flere konsepter som legger vekt på å utøve mer fleksibilitet i utformingen av veger. Et av konseptene som er mye omtalt og brukt i USA er Context Sensitive Solutions/Design (CSS/D). CSS/D er en utformingsprosess, eller et sett med prinsipper, med hensikt å vektlegge flere aspekter i utformingen av vegprosjekter. Et nøkkelement i CSS/D er prosjektets kontekst som er definert av terrenget og topografien prosjektet befinner seg i, samfunnet rundt, brukerne og omkringliggende arealbruk. Basert på konteksten rundt prosjektet vurderes også konsekvenser som strekker seg utenfor funksjoner relatert til trafikk og transport. Et annet element som står sentralt i CSS/D er inkludering og samhandling med alle involverte interessenter for å komme frem til en akseptabel løsning (Carlson et al., 2002). En slik tilnærming legger ekstra vekt på fleksibilitet i utformingskrav for å imøtekomme prosjektspesifikke behov.

Et annet konsept som belyser fleksibilitet i utformingsprosessen, og som på flere måter kan koples til CSS/D, er Performance Based Practical Design (PBPD). Denne praksisen benytter en kombinasjon av ytelsesbasert design og praktisk utforming. Praktisk utforming er basert på å gjennomføre prosjekter med god framkommelighet og trafiksikkerhet, samtidig som prosjektets totale kostnader reduseres. Besparelsene kan dermed brukes til å gjennomføre flere prosjekter innenfor budsjetttrammene. På denne måten kan bruk av tilgjengelige midler til infrastrukturprosjekter, som ofte er begrenset, maksimeres. Konseptet tar utgangspunkt i at det er bedre å utvikle flere prosjekter med «god» standard enn færre prosjekter med «høy» standard innenfor et fast budsjett. Det er antatt at en slik strategi totalt sett vil gi

et bedre transportsystem enn dersom en «standard»-tilnærming benyttes, men det finnes lite informasjon som kan validere at dette faktisk vil være tilfellet (McGee & Brustlin, 2013). Ytelsesbasert design handler om å ta gode beslutninger i utformingsprosessen basert på kunnskap om hvilke effekter ulike utformingsvariabler vil ha på vegens ytelse. Ytelse omfatter faktorer som sikkerhet, service-nivå, drift og vedlikehold, tilgjengelighet og pålitelighet. Beslutninger som blir tatt i utformingsprosessen skal belyse de problemer som kommer frem av prosjektet og bidra til å oppnå bestemte mål basert på ønsket ytelse og viktige egenskaper (Minnesota Department of Transportation, 2017).

Utformingskrav og standarder er ikke ment som en erstatning for tekniske vurderinger og kontekstspesifikke hensyn. Både CSS/D og PBPD vil i flere tilfeller være avhengig av fleksibilitet for å oppnå resultater som oppfyller prosjektets formål og behov (Neudorff, Jenior, Dowling & Nevers, 2016). For å gjøre avveininger i utformingsprosessen er det viktig å være kjent med grunnleggende kriterier knyttet til hver utformingsvariabel og hva som er konsekvensen av å endre kriteriets dimensjon. Federal Highway Administration (1997) publiserte en rapport om fleksibilitet i utforming av motorveger der følgende kritiske kontrollfaktorer ble nevnt:

- Funksjonell vegklasse
- Designhastighet
- Akseptabelt service-nivå
- Dimensjonerende kjøretøy
- Den typiske sjåførs kjøreevner
- Eksisterende og forventet trafikkmengde

### **Fravik**

Fravik oppstår dersom verdien til en utformingsvariabel faller utenfor det normale utvalgsområdet for de kravene som er presentert i håndbøker og standarder. Å søke om fravik kan være ønskelig når vurderinger tilsier at det å følge aksepterte krav og standarder vil være upraktisk for de gjeldende forholdene for et prosjekt. Dersom slike fravik benyttes i utformingen av veier er det spesielt viktig å utføre grundige risikovurderinger av tiltaket. Det første som bør erkjennes når det ønskes å innføre fravik er at manglende evne til å oppfylle utformingskrav kan ha negativ effekt på framkommeligheten og trafiksikkerheten på veger (Stein & Neuman, 2007).

Som nevnt under de to prosessene CSS/D og PBPD er det et mål om å gjennomføre prosjekter som ivaretar behov knyttet til flere aspekter. Som følge av store variasjoner i prosjektspesifikke forhold vil det for noen prosjekter være et større behov for å introdusere alternative utformingsverdier og fravik for å imøtekomme prosjektets behov. Det finnes flere grunner til at fravik vurderes. Barrierer som gjør det utfordrende å tilfredsstille utformingskrav kan blant annet være høye kostnader, begrenset budsjett, arealkonflikter og negative påvirkninger på miljø og samfunn. Typiske utformingsvariabler som det

søkes fravik om i slike situasjoner er skulderbredde, kjørefeltbredde, horisontal- og vertikalkurvatur (Dorothy & Thieken, 2011). Ettersom ulike prosjekter ofte har forskjellige behov, vil en fravikssøknad alltid være tilpasset det enkelte prosjektet. Dette gir stor variasjon i søknader som sendes inn og gjør det vanskelig å definere og standardisere hvordan konsekvensene for fravik skal vurderes (Molland, Slettemark & Rørlien, 2016). Dersom det gjøres en beslutning om å gå videre med fravik i utformingen bør avbøtende tiltak vurderes og, dersom det er hensiktsmessig, implementeres for å hindre negative konsekvenser for framkommelighet og trafikksikkerheten på strekningen (Stein & Neuman, 2007).

Å innføre fravik krever at det på forhånd utføres vurderinger som kan verifisere at ønsket løsning er den mest praktiske for det spesifikke tilfellet. I USA er det utarbeidet en manual som beskriver ulike steg som bør gjennomgås ved vurdering av fravik fra utformingskrav (Stein & Neuman, 2007). Prosessen består av følgende seks steg:

### **Steg 1: Fastslå kostnader og konsekvenser av å møte utformingskravene**

Før et fravik vurderes må det gjøres en vurdering av hvilke implikasjoner et design som fullt ut oppfyller utformingskravene medfører. Dette inkluderer implikasjoner for omgivelsene, miljøet, samfunnet rundt, kostnader, sikkerhet, framkommelighet og drift.

### **Steg 2: Utvikle og vurdere flere alternativer**

Flere alternativer, inkludert det som møter utformingskravene, bør utvikles, vurderes og sammenlignes for best mulig å forstå de ulike valgmulighetene. På denne måten kan konsekvenser fra alternativene vektas mot hverandre for å finne den løsningen som er mest praktisk for et spesifikt prosjekt.

### **Steg 3: Vurdering av risiko**

Ved håndtering av fravik er det to fundamentale former for risiko som de som har beslutningsansvaret må ta høyde for. Det første er risikoen for at løsningen ikke fungerer som forventet og gir uønskede effekter. Det andre er evnen til å kunne forsvare seg mot mulige rettslige handlinger som resultat av beslutningen.

### **Steg 4: Vurder avbøtende tiltak**

Med forståelse for de negative konsekvenser av ett eller flere fravik bør det vurderes tiltak som er rettet mot å redusere de negative virkningene. Avbøtende tiltak kan være økt bruk av varslingsystem eller forbedringer i utformingen av andre geometriske variabler for å kompensere for et fravik.

### **Steg 5: Dokumenter, gjennomgå og godkjenn**

God dokumentering gir oversikt og kontroll over beslutninger og resultater. I fremtidige prosjekter kan dokumentene brukes til å dra nytte av tidligere erfaringer. Som en kvalitetskontroll må fraviksdokumenter gjennomgås og godkjennes av noen som ikke er en del av teamet som foreslo et fravik.



## **Steg 6: Overvåk og vurder ytelse**

Etter at et fravik er implementert må anlegget overvåkes. Dette gjøres både for å undersøke om det oppstår problemer og for å få kunnskap om hvilke effekter et fravik medfører. Denne kunnskapen åpner for bedre beslutningsgrunnlag i fremtidige prosjekter.

### **Enhetlig utforming og standard**

En fordel med bruk av håndbøker og standardkrav er at det fremmer konsistens i utformingen. I utformingen av veganlegg er det et klart ønske om å bidra til et overordnet vegnett med enhetlig standard over lengre strekninger. Dette vil gjøre det enklere for trafikanter å forholde seg til vegen og kan ha positiv påvirkning på framkommeligheten og trafikksikkerheten på veganlegget. Økt fokus på fleksibilitet i utformingskrav kan medføre mindre sammenhengende standarder som vil gi hyppigere standardsprang på vegnettet (Statens vegvesen, 2019a).

I hvilken grad en endring av en spesifikk geometrisk variabel kan oppleves som et standardsprang avhenger blant annet av hvilken variabel det er snakk om og hvor hyppig det forekommer endringer i variabelens utforming. De ulike utformingsvariablene vil ha ulik betydning for trafikantenes atferd på vegen. For eksempel vil det å fjerne eller legge til et ekstra kjørefelt på en strekning være et tydeligere og mer kritisk standardsprang enn en endring i skulderbredden. Hvor kritiske de ulike utformingsvariablene er for å sikre tilstrekkelig konsistens i utformingen kan måles basert på hastighet, sikkerhet og ytelse. Det mest brukte kriteriet for konsistens i utforming med hensyn til hastighet er utformingsvariabelens effekt på forventet kjørehastighet. Dette kan måles ved å sammenligne vegens designhastighet og den faktiske kjørehastigheten. For sikkerheten på en strekning er det vist at god trafikksikkerhet kan assosieres med enhetlig utforming. Utformingsvariablenes effekt på sikkerheten måles ut fra endring i ulykkestall. For vegens ytelse adresseres hvilken effekt utformingsvariablene vil ha på sjåførens arbeidsbelastning og forventninger på vegen (Gibreel, Easa, Hassan & El-Dimeery, 1999). Trafikanter har en tendens til å bygge opp forventninger til hva som kommer basert på tidligere erfaringer på strekningen (Messer, 1980).

## **3.2 Framkommelighet**

Når vegsystemer planlegges er det ønskelig å sikre god framkommelighet. Dette innebærer et robust og pålitelig transportsystem med tilstrekkelig kapasitet (Statens vegvesen, 2019b). Flere land har utviklet egne håndbøker som tar for seg teori og metoder som kan benyttes til å analysere vegens evne til å avvikle trafikk. I Norge er det tidligere håndbok 159 som har blitt brukt (Statens vegvesen, 1991). Denne har ikke blitt oppdatert siden den ble utgitt i 1991 og er i tillegg utgått fra Statens vegvesens systemer. Den amerikanske håndboken HCM ble sist oppdatert i 2016 og har i lang tid vært et ledende dokument for analyse av framkommelighet. I HCM er det beskrevet metoder og prosedyrer for å fastsette vegens

kapasitet og kvalitet på avviklingen. En annen håndbok som beskriver teori og metoder knyttet til framkommelighet er den danske håndboken «Kapacitet og Serviceniveau». I dette kapitlet er det valgt å undersøke og sammenligne verdier og metoder fra de to håndbøkene som senere vil bli brukt til å utføre analyser og beregninger presentert i kapittel 4.

### **3.2.1 Grunnleggende motorvegsegment**

HCM presenterer grunnleggende konsepter for trafikk på motorveg, samt metoder for analysering av motorvegens ytelse. Hvilke metoder som benyttes avhenger av om analysen omfatter motorveganlegg eller motorvegsegmenter. I denne oppgaven er det sett nærmere på det som defineres som et grunnleggende motorvegsegment. Trafikken på et grunnleggende motorvegsegment kan karakteriseres som uforstyrret trafikk med av- og påkjøring som styres gjennom planskilte kryss og ramper. Det grunnleggende motorvegsegmentet vil ha en avstand til av- og påkjøringsramper som gjør at trafikken vil være upåvirket av trafikken som kommer fra eller skal inn på rampene. Vegen må også ligge utenfor influensområdet til eventuelle signaliserte kryss og fartsmålere. Slike motorvegsegmenter vil vanligvis utformes med totalt fire eller flere kjørefelt og ha fartsgrenser mellom 80 og 120 km/t (Transportation Research Board, 2016).

For grunnleggende motorvegsegmenter med uforstyrret trafikk legges det til grunn en sammensetning av ideelle forhold. Disse forholdene inkluderer blant annet fint vær, god sikt, ingen uønskede hendelser eller ulykker, ingen tunge kjøretøy, ingen arbeidssoner og nødvendig bredde på tverrprofilet. Nødvendig bredde oppgis for kjørefeltbredden og fri sidebredde. Fri sidebredde er bredden fra kjørefeltets ytterkant til hindringer på siden av vegen eller i midtdeler. I HCM er ideell bredde 3,66 m for kjørefelt og 1,83 m for fri sidebredde mot høyre (Transportation Research Board, 2016). Dette er forskjellig fra den danske håndboken som opererer med 3,50 m for kjørefelt og 1,00 m for fri sidebredde. I forrige utgave av den danske håndboken fra 2015 ble det brukt grunnleggende fri sidebredde på 1,80 m, men dette ble korrigert basert på ny kunnskap på fagområdet (Vejdirektoratet, 2019). Dersom segmentet ikke oppfyller de ideelle forholdene, vil vegens evne til å avvike trafikk reduseres. Hvordan evnen til å avvike trafikk påvirkes kan beskrives gjennom endringer i fri-flyt hastighet og kapasitet.

### **3.2.2 Fri-flyt hastighet**

Fri-flyt hastighet (FFH) er den gjennomsnittlige hastigheten på et segment der trafikanter kan kjøre i ønsket hastighet uten å bli påvirket av andre kjøretøy. Under ideelle forhold er det i HCM indikert at FFH på et motorvegsegment vil holdes konstant dersom trafikkmengden er under 1 000 personbiler per time per kjørefelt (pbe/t/felt). Hastigheten kan påvirkes selv ved lav trafikkmengde. Dette kan blant annet være på grunn av stor andel tunge kjøretøy i trafikken som ikke kan holde samme hastighet som personbiler, eller at utformingsvariabler ikke oppfyller de ideelle forholdene (Transportation Research Board, 2016, s. 10-10).

## Hastighetsjustering

I HCM benyttes hastighetsjusteringsfaktorer for å estimere FFH på strekninger der utformingsvariabler fraviker de grunnleggende forholdene for vegens utforming. FFH justeres for endringer i kjørefeltbredde, fri sidebredde og rampetetthet (Transportation Research Board, 2016).

### *Kjørefeltbredde*

Bredden på kjørefeltene kan ha stor innvirkning på trafikantenes FFH. I HCM benyttes en justeringsfaktor når gjennomsnittlig kjørefeltbredde i en retning er mindre eller lik 3,66 m (Transportation Research Board, 2016, s. 12-28). Dette kan være et resultat av at smalere kjørefeltbredde gir trafikantene mindre bevegelsesrom og fører til at kjøretøy må bevege seg nærmere hverandre. Figur 10 viser reduksjon i FFH for gjennomsnittlig kjørefeltbredde. I Tabell 8, som inngår i kapittel 4.2.1, er verdiene i figuren omgjort fra ft og mi/h til m og km/t og interpolert for å representere de verdier som inngår i analysen.

Average Lane Width (ft)	Reduction in FFS, $f_{LW}$ (mi/h)
≥12	0.0
≥11-12	1.9
≥10-11	6.6

Figur 10: Justering av FFH for kjørefeltbredde (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29)

### *Fri sidebredde*

I HCM benyttes en justeringsfaktor når fri sidebredde er mindre enn 1,83 m. Dette måles fra høyre kjørefeltkant til nærmeste hindring mot høyre. En hindring på høyre side av vegen kan føre til at trafikanter i høyre kjørefelt beveger seg mot venstre. Dette kan påvirke trafikantene i venstre kjørefelt og ha en negativ effekt på trafikkflyten. Det kan være vanskelig å avgjøre i hvor stor grad trafikantenes atferd vil påvirkes av hindringer langs vegbanen. En faktor som spiller inn, er sidehinderets karakter. Det skilles mellom kontinuerlige og enkeltstående hindringer. Kontinuerlige hindringer som rekkverk er enklere for trafikanter å venne seg til, noe som fører til at hindringene vil ha mindre innflytelse på trafikantenes hastighet (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29). Figur 11 viser reduksjon i FFH for ulike fri sidebredde mot høyre. I Tabell 9, som inngår i kapittel 4.2.1, er verdiene i figuren omgjort fra ft og mi/h til m og km/t og interpolert for å representere de verdier som inngår i analysen.

Right-Side Lateral Clearance (ft)	Lanes in One Direction			
	2	3	4	≥5
≥6	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.6	0.4	0.2	0.1
4	1.2	0.8	0.4	0.2
3	1.8	1.2	0.6	0.3
2	2.4	1.6	0.8	0.4
1	3.0	2.0	1.0	0.5
0	3.6	2.4	1.2	0.6

Note: Interpolate for noninteger values of right-side lateral clearance.

Figur 11: Justering av FFH for fri sidebredde mot høyre (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29)

I HCM er det ikke tatt med justeringsfaktor for fri sidebredde mot hindringer på venstre side av kjørefeltene. Dette er fordi fri sidebredde på 0,60 m eller mer til en hindring i midtdeler generelt sett vil ha liten påvirkning på trafikken og at situasjoner der fri sidebredde mot midtdeler er mindre enn 0,60 m sjeldent oppstår på slike motorveger (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29).

#### Rampetetthet

På motorvegsegmenter med på- og avkjøringsramper vil trafikkstrømmen påvirkes av kjøretøy som kommer fra eller skal inn på ramper langs vegen. Effekten dette har på FFH måles med rampetetthet, som er det totale antallet på- og avkjøringsramper innenfor en bestemt lengde (Transportation Research Board, 2016, s. 12-30).

#### Hastighetsjusteringsfaktor (SAF)

I HCM er det ikke tatt hensyn til effekten av uforutsette og uønskede hendelser på FFH på grunn av manglende tilgjengelig informasjon (Transportation Research Board, 2016, s. 11-44). Alsharari (2019) estimerte justeringsfaktorer for FFH på motorveg-segmenter der det hadde oppstått hendelser. FFH ble målt som gjennomsnittlig hastighet gjennom hendelsesperioden forutsatt at hendelsen ikke førte til sammenbrudd i trafikkflyten. Han kom frem til en justeringsfaktor på 0,94 for 4-felts motorveg ved hendelser som fører til ett stengt kjørefelt.

### 3.2.3 Kapasitet

Kapasiteten på en veg er det maksimale antall kjøretøy som passerer et punkt eller en strekning innenfor en bestemt periode under gitte forhold (Aakre, 2014). For et motorvegsegment med flere kjørefelt refererer kapasiteten til den gjennomsnittlige verdien på tvers av alle feltene. I HCM er det gitt en grunnleggende kapasitet på 2 400 pbe/t/felt når FFH er større eller lik 112 km/t. Når FFH synker vil også kapasiteten reduseres. For å oppnå grunnleggende kapasitet må segmentet oppfylle de ideelle forholdene. Dersom dette ikke er tilfellet, og segmentet påvirkes av kapasitetsreduserende effekter, vil den reelle kapasiteten være lavere enn den grunnleggende kapasiteten (Transportation Research Board,

2016, s. 12-8). På grunn av dette vil vegens kapasitet variere over tid og sted, avhengig av hvilke forhold som er gjeldende.

Den grunnleggende kapasiteten vil sjeldent oppnås eller opprettholdes i praksis. En kapasitet på 2 400 pbe/t/felt tilsvarer en gjennomsnittlig tidsluke på 1,5 sek/pbe. Dette innebærer en mer aggressiv kjørestil enn det som er anbefalt i flere land. I Norge er regelen tre sekunder til forankjørende kjøretøy. Ifølge Politidirektoratets «Instrukser for politiets trafikkteneste» (2016) vil kjøretøy med tillatt totalvekt under 3 500 kg med en tidsluke mindre eller lik 2,0 sekunder risikere muntlig advarsel. Dersom tidsluken er under 1 sekund, kan de risikere forenklet forelegg eller anmeldelse. I tillegg til at det er ulovlig å holde så kort avstand til forankjørende trafikanter, vil slike tilfeller ofte føre til sammenbrudd i trafikken på grunn av at trafikanter ikke evner å holde en kontinuerlig trafikkflyt i så tett trafikk.

En undersøkelse av verdier fra ulike land viser signifikante forskjeller i grunnleggende kapasitetsverdier. Verdiene som benyttes i HCM er generelt sett høyere enn de verdier som vanligvis benyttes i Europa (Bennett & Naznin, 2020). I den danske håndboken benyttes en grunnleggende kapasitet på 2 300 pbe/t/felt for veger med totalt fire eller flere felt. Dette etter å først ha blitt redusert fra 2 300 til 2 200 pbe/t/felt i bokens 2015-utgave, og deretter justert tilbake til 2 300 pbe/t/felt i 2019-utgaven (Vejdirektoratet, 2019).

## **Kapasitetsjustering**

### *Korreksjonsfaktor*

I den danske håndboken er det gitt korreksjonsfaktorer for strekningens kapasitet med hensyn til kjørefeltbredde og fri sidebredde. Kapasitetsreduksjonen kan forklares ved at mindre kjørefeltbredde og manglende fri sidebredde fører til at trafikanter kjører nærmere vegkanten eller kjøretøy i kjørefeltet ved siden av. Dette medfører at trafikantene øker avstanden til forankjørende kjøretøy og kapasiteten reduseres. Ved valg av korreksjonsfaktor skilles det mellom kjørespor med nesten kun person- og varebiler, som er typisk venstre kjørefelt, og kjørefelt der det også er tunge kjøretøy, som er vanlig i høyre kjørefelt (Vejdirektoratet, 2019). Hvilke korreksjonsfaktorer som er gjeldende for ulike sammensetninger av kjørefeltbredde og fri sidebredde er vist i Figur 12.

Spor med kun person-/varebiler				
Fri sidebredde, meter	Sporbredde, meter			
	≥ 3,50	3,25	3,00	2,75
1,0	1,00	1,00	1,00	0,95
0,5	1,00	1,00	1,00	0,93
0,0	1,00	1,00	0,95	0,90
Spor hvor det også forekommer lastbiler og andre store kjøretøyer				
Fri sidebredde, meter	Sporbredde, meter			
	≥ 3,50	3,25	3,00	2,75
1,0	1,00	0,95	0,90	-
0,5	1,00	0,95	0,90	-
0,0	0,95	0,90	0,85	-

Figur 12: Korreksjonsfaktorer for kjørefeltbredde og fri sidebredde ved kjørefelt med henholdsvis nesten kun person- og varebiler, og kjørefelt hvor det også er tunge kjøretøy (Vejdirektoratet, 2019)

### Ulykker og hendelser

Kortvarig arbeid og ulykker er noen av årsakene som oftest fører til redusert kapasitet på vegstrekninger. Den vanligste grunnen til hindringer i den normale trafikkflyten er fysisk blokkering av kjørefelt. I tillegg til blokkering av kjørefelt kan fysiske hindringer på vegskulder også virke distraherende på trafikanter og føre til endringer i trafikantatferd. Eksempler på arbeid som fører til stengt skulder eller kjørefelt er vedlikeholdsarbeid, reparasjon av vegkonstruksjon, vasking og vinterdrift. En undersøkelse av en motorvegstrekning i Tyskland viste at ulykker var den største årsaken til stengt kjørefelt, tett etterfulgt av vedlikehold og reparasjon. Varigheten av stengt kjørefelt var derimot klart størst for vedlikehold og reparasjon (Margreiter, Imhof, Grosanic & Motamedidehkordi, 2016).

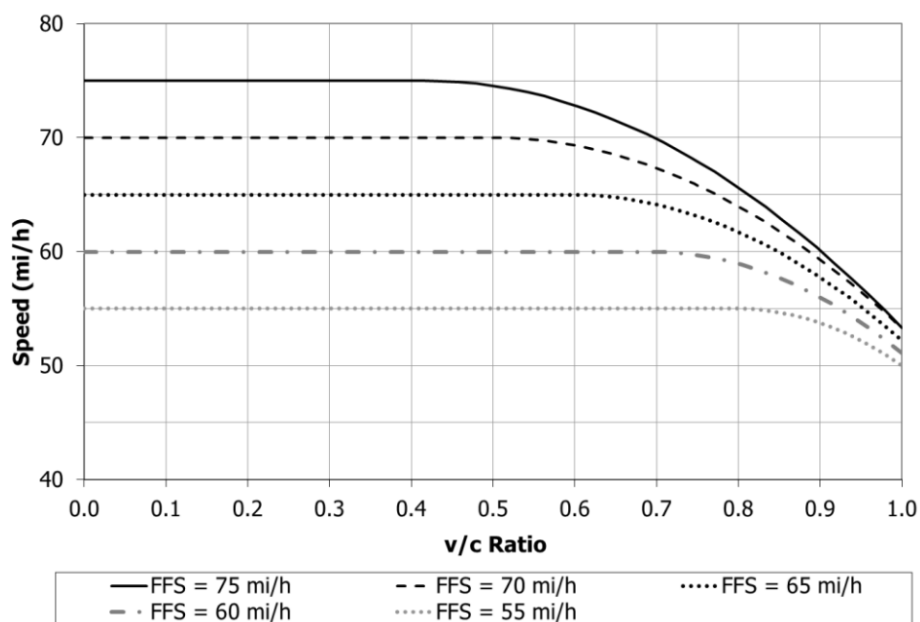
Hvilke konsekvenser ulike hendelser kan ha for framkommeligheten på strekningen avhenger blant annet av alvorlighet, tidspunktet hendelsen oppstår, synlighet for trafikanter, varighet, trafikkmengde og vegens geometriske utforming. I HCM benyttes en kapasitetsjusteringsfaktor for å korrigere strekningens kapasitet basert på den kapasitetsreducerende effekten av en hendelse. For en motorveg med to kjørefelt i hver retning benyttes en faktor på 0,81 ved stengt skulder og 0,70 ved ett stengt kjørefelt. Verdiene reflekterer gjenværende relativ kapasitet per åpent kjørefelt. For eksempel vil en hendelse som fører til at ett kjørefelt stenges på en motorveg med to kjørefelt per retning resultere i tap av kapasiteten for det stengte kjørefeltet, i tillegg til at gjenværende kapasitet på det åpne kjørefeltet reduseres med en verdi lik kapasitetsjusteringsfaktoren. Det er funnet en gjennomsnittlig varighet på 34 – 35 min for hendelser som fører til stengt skulder eller kjørefelt (Transportation Research Board, 2016, s. 11-44).

Lignende faktorer er også omtalt i den danske håndboken. Dersom strekningen kun i liten grad er påvirket av hendelsen kan justeringsfaktoren settes høyt, mens det for hendelser med stor intensitet og

oppmerksomhetsskapende forhold kan settes en lavere verdi (Vejdirektoratet, 2015). I den danske håndboken er det foretatt undersøkelser av framkommeligheten forbi steder der det har oppstått trafikkulykker eller andre lignende hendelser. For en veg med to kjørefelt i hendelsesretningen er det observert en gjennomsnittlig kapasitet forbi hendelsesstedet på 1 400 pbe/t/felt dersom skulderen er stengt, og 1 150 pbe/t/felt dersom ett kjørefelt er stengt. I undersøkelsene ble det observert store forskjeller. Det bør dermed tas forbehold om at verdiene kan variere for ulike situasjoner (Vejdirektoratet, 2019).

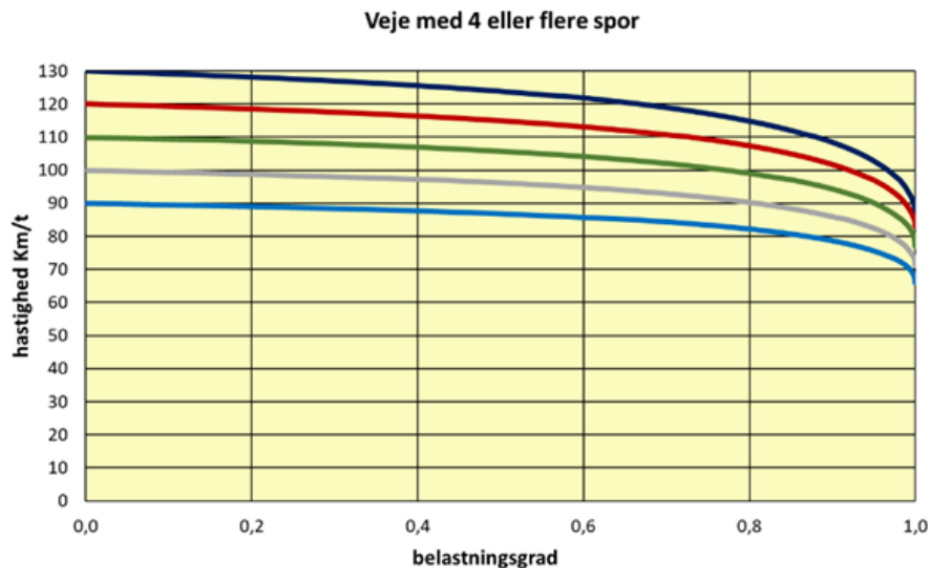
### **Belastningsgrad**

Når kapasiteten på et segment er kjent, kan forholdet mellom etterspørselsintensitet (pbe/t/felt) og kapasitet beregnes for å gi et mål på vegens evne til å avvike trafikk. Dette forholdet omtales som vegens belastningsgrad. Dersom etterspørselsintensiteten overstiger vegens kapasitet vil det oppstå kø og framkommeligheten vil betydelig forverres (Transportation Research Board, 2016, s. 10-13). Ved normale forhold vil det sjeldent oppstå situasjoner der etterspørselsintensiteten overstiger kapasiteten, men ved påvirkning av hendelser som fører til stengt skulder eller kjørefelt kan dette endres. Figur 13 viser forholdet mellom belastningsgrad og hastighet på et grunnleggende motorvegsegment. Figuren viser at hastigheten vil begynne å avta når belastningsgraden er mellom 0,42 og 0,8, avhengig av segmentets grunnleggende FFH. Hastigheten avtar gradvis frem til belastningsgraden er lik 1,0. En belastningsgrad over dette indikerer at strekningen er overbelastet.



Figur 13: Sammenheng mellom belastningsgrad og hastighet for personbiler på et grunnleggende motorvegsegment (Transportation Research Board, 2016, s. 12-47)

I den danske håndboken er det oppgitt egne hastighetskurver for veger med totalt fire eller flere kjørefelt som viser sammenhengen mellom belastningsgrad og strekningsmiddelshastighet. Sammenlignet med hastighetskurvene fra HCM i Figur 13, viser Figur 14 at hastigheten avtar ved lavere belastningsgrader, og at den vil avta mer gradvis helt fram til en bratt knekk like før strekningen er overbelastet.



Figur 14: Sammenheng mellom belastningsgrad og strekningsmiddelshastighet for personbiler på veger med fire eller flere felt (Vejdirektoratet, 2019, s. 41)

Så lenge belastningsgraden er under et visst nivå vil effekter på reisetid og forsinkelse være små. Det er først når belastningsgraden stiger over 1,0 og vegen er overbelastet at det oppstår større negative konsekvenser. Kjøddannelser og medfølgende forsinkelse fører til store samfunnsøkonomiske tap. I Danmark er det beregnet et samlet tap på 630 mill. DKK (851 mill. NOK) i 2018 på grunn av kø i forbindelse med stengte kjørefelt på motorveger (Vejdirektoratet, 2020). En plutselig reduksjon i kapasitet på et punkt på en vegstrekning kan føre til at det dannes en flaskehals. Flaskehalsen oppstår når trafikktilstrømningen overstiger kapasiteten på et punkt langs strekningen og trafikken som avvikles gjennom punktet vil være mindre enn trafikken som ankommer punktet. Dette kan føre til at det periodevis vil oppstå kjøddannelser. Kjøddannelser vil oppstå i det øyeblikket trafikkintensiteten mot flaskehalsen overstiger kapasiteten gjennom punktet, og vil fortsette å vokse så lenge trafikkintensiteten er større enn kapasiteten (Transportation Research Board, 2016).

### 3.2.4 Service-nivå

Service-nivå er et kvantitativt mål på avviklingskvaliteten på en strekning. Det er definert seks service-nivå fra A til F, der nivå A tilsvarer de mest optimale trafikkforholdene, mens nivå F tyder på sammenbrudd i trafikken. Hensikten med service-nivå er å omgjøre komplekse mål til et enkelt system som representerer trafikantenes oppfatning av avviklingskvaliteten. Dette kan gjøre det enklere å



beslutte om et veganlegg leverer tilstrekkelig ytelse og om en endring på veganlegget vil oppfattes som signifikant (Transportation Research Board, 2016).

Selv om service-nivå A gir den beste avviklingskvaliteten vil det ikke være ønskelig å dimensjonere en veg med hensikt å avvikle trafikk med service-nivå A. For å levere nivå A i perioder med mye trafikk kreves høy kapasitet, noe som ofte innebærer større finansielle kostnader og negative konsekvenser for miljøet. Av hensyn til dette er det heller ønskelig å dimensjonere vegen for lavere service-nivå (C-D) som balanserer trafikantenes ønsker mot kostnader og behov fra samfunnet (Transportation Research Board, 2016). Videre er det gitt en nærmere beskrivelse av de ulike service-nivåene fra HCM. Eksempler på trafiksituasjoner for de ulike nivåene er vist i Figur 15.

**Nivå A:** Trafikantenes evne til å manøvrere seg gjennom trafikkstrømmen er lite påvirket av andre trafikanter og de kan dermed holde FFH. Effekten av ulykker og andre nødsituasjoner absorberes fort og vil kun medføre små konsekvenser for trafikkflyten (Transportation Research Board, 2016, s. 12-17).

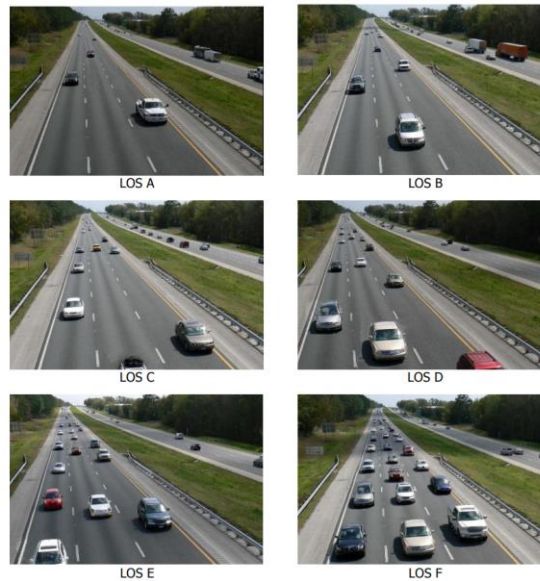
**Nivå B:** Trafikantenes evne til å manøvrere seg gjennom trafikkstrømmen er i litt større grad påvirket av andre trafikanter, men det er fortsatt mulig å opprettholde FFH. Effekten av mindre hendelser absorberes fortsatt raskt (Transportation Research Board, 2016, s. 12-17).

**Nivå C:** Muligheten til å manøvrere fritt i trafikken vil være merkbart begrenset og trafikantene vil oppleve at de til tider må tilpasse hastigheten til andre trafikanter. Ved mindre hendelser kan det dannes køer som fører til signifikant nedgang i kvaliteten på avviklingen (Transportation Research Board, 2016, s. 12-18).

**Nivå D:** Hastigheten reduseres ved økende trafikkmengde. Muligheten til å manøvrere fritt i trafikken er sterkt begrenset og trafikanter opplever redusert kjørekomfort. Kødannelse kan oppstå ved små hendelser på grunn av mangel på rom til å absorbere effekten av hendelsen (Transportation Research Board, 2016, s. 12-18).

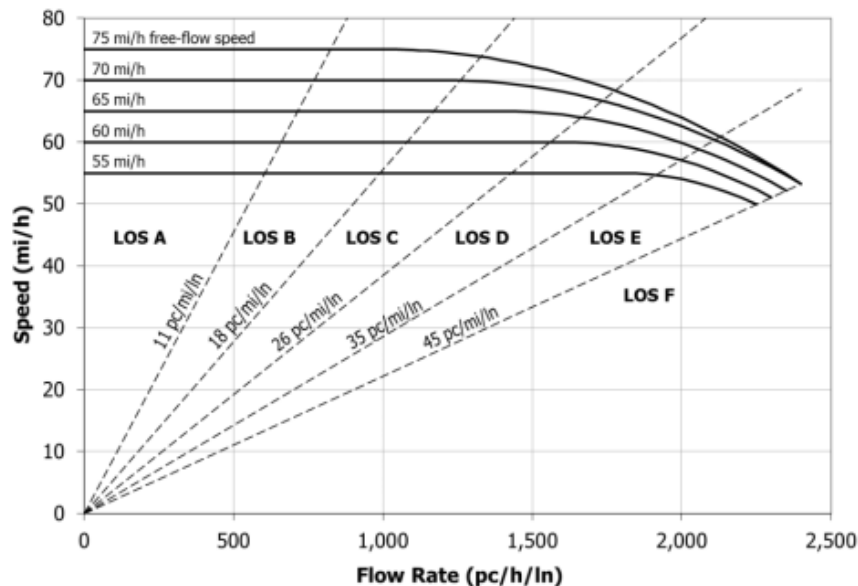
**Nivå E:** Trafikkmengden på vegen nærmer seg kapasitetsnivå. Det er lite rom for manøvrering i trafikken og små forstyrrelser kan dermed føre til at det oppstår kødannelse. Mot øvre grense av nivå E vil trafikkstrømmen ikke ha evnen til å jevne ut selv den minste forstyrrelsen, og enhver hendelse kan gi alvorlige sammenbrudd og betydelige kødannelse. Slike nivå reduserer den fysiske og psykiske komforten til sjåførene (Transportation Research Board, 2016, s. 12-18).

**Nivå F:** Trafikkflyten bryter sammen og trafikkstrømmen er ustabil. Dette skjer når etterspørselen overstiger vegens kapasitet. Slike sammenbrudd kan oppstå dersom antall kjøretøy som ankommer et punkt er større enn antall kjøretøy som kjører gjennom punktet (Transportation Research Board, 2016, s. 12-18).



Figur 15: Eksempler på trafikksituasjoner for ulike service-nivå på et motorvegsegment (Transportation Research Board, 2016, s. 12-17)

Et grunnleggende motorvegsegment kan karakteriseres med tre ytelsesmål: tetthet i antall personbiler per km, strekningsmiddelshastighet og forholdet mellom etterspørselsintensitet og kapasitet. I HCM er kriteriet for å oppfylle de ulike service-nivåene basert på trafikkens tetthet på segmentet (Transportation Research Board, 2016, s. 12-19). Figur 16 viser sammenhengen mellom hastighet og etterspørselsintensitet med tilhørende krav til tetthet på et motorvegsegment. Figuren viser at etter hvert som trafikkmengden nærmer seg verdien for vegens kapasitet, vil hastigheten reduseres og tettheten stige.



Figur 16: Service-nivå-kriterium og hastighet-volum-kurve for motorvegsegment (Transportation Research Board, 2016, s. 12-20)

En grunn til at HCM har utelukket belastningsgrad som krav til service-nivå er at det vanskelig lar seg måle i felt, i tillegg til at ulike belastningsgrader ikke vil være direkte merkbare for trafikanter. Dette

gjelder ikke når belastningsgraden er større eller lik 1,0, som brukes som en indikasjon på service-nivå F (Transportation Research Board, 2016, s. 5-9). I den danske håndboken er belastningsgrad og strekningsmiddelshastighet valgt som overordnede mål for service-nivået. På samme måte som HCM beskriver service-nivå fra A til F, beskriver den danske håndboken service-nivå uttrykt med belastningsgrader fra 0,2 til 1,0 (Vejdirektoratet, 2019). Ved å sammenstille de to beskrivelsene av ulike service-nivå kan sammenhengen fremstilles som i Tabell 2. Nedre og øvre grenseverdi på belastningsgrad for service-nivå A – E kan variere noe fra situasjon til situasjon, men kan tenkes å ligge omtrent rundt verdiene i tabellen.

*Tabell 2: Sammenheng service-nivå beskrevet for A-F fra HCM og belastningsgrad fra håndboken «Kapacitet og Serviceniveau»*

<b>Nivå A – F</b>	<b>Belastningsgrad</b>
A	< 0,4
B	0,4 – 0,6
C	0,6 – 0,8
D	0,8 – 0,9
E	0,9 – 1,0
F	> 1,0

I den svenske håndboken VGU er det også oppgitt belastningsgrad som indikator på service-nivå. Vegen må utformes slik at krav til service-nivå oppfylles for den trafikkmengden som forventes på strekningen under dimensjonerende time og makstime i år 20 etter åpning, eller et dimensjonerende år tilpasset vegens trafikkprognoser. Service-nivået på en vegstrekning, uttrykt som belastningsgrad under dimensjonerende time, bør være mindre eller lik 0,8. Grensen er satt til 0,8 fordi dette vil gi tilstrekkelig reservekapasitet på strekningen. Samtidig bør ikke hastighetsreduksjonen som oppstår på grunn av tett trafikk synke mer enn 10 km/t under referansehastigheten. Unntak kan godtas dersom investeringen fortsatt anses å være samfunnsøkonomisk lønnsom og i tilfeller der vegnettet har begrensninger som ikke er mulige eller ønskelige å endre (Trafikverket, 2020a). I Danmark har det vært en utbredt praksis å tilstrebe en kapasitetsutnyttelse for et trafikkanlegg på ca. 70 %, som tilsvarer belastningsgrad 0,7, ved dimensjonerende timetrafikk i prognoseåret som er utgangspunktet for planleggingen (Vejdirektoratet, 2015). Basert på data fra Tyskland vil den optimale belastningsgraden ligge rundt 0,9. Ved høyere belastningsgrad vil sannsynligheten for sammenbrudd være for høy. I Nederland er det i likhet med Sverige valgt å ha krav til belastningsgrad mindre eller lik 0,8 som grunnlag for utforming av veger. Når belastningsgraden er under 0,8 vil det være mindre enn 1,0 % sannsynlighet for at det oppstår kø innen

en periode på 30 min på grunn av stor trafikkmengde. Sannsynligheten kan øke opp til 20 % for belastningsgrad 0,9 – 1,0, og vil være 100 % når belastningsgraden er større eller lik 1,0 (Bennett & Naznin, 2020).

### **3.3 Trafikksikkerhet**

Ulykker i trafikken utgjør et stort samfunnsproblem. Et av hovedmålene i den nasjonale transportplanen er å redusere trafikkulykker i tråd med nullvisjonen. Nullvisjonen er en visjon om at det ikke skal forekomme ulykker med drepte eller hardt skadde i trafikken. Dette er et langsiktig mål som innebærer at det legges stor vekt på trafikksikre løsninger i utformingen av nye veger, og at det settes inn tiltak som hindrer de mest alvorlige ulykkene (Regjeringen, 2017). Endringer som vil føre til flere ulykker som involverer drepte og hardt skadde vil være motstridende til Regjeringens nullvisjon. Et viktig tema i utformingen av tverrprofil er hvordan alternative utforminger vil påvirke sikkerheten på strekningen.

Det finnes flere forskjellige måter å vurdere risiko og sikkerhetseffekter på. I dette kapitlet er litteratur tilknyttet trafikksikkerhet på motorveger gjennomgått. Det er undersøkt hva som karakteriserer ulykkesrisikoen på motorveger og hvordan endringer i bredden på kjørefelt, ytre og indre skulder og midtdeler påvirker sikkerheten på vegen. I tillegg er det sett på effekten av variasjoner i hastighet og trafikkmengde. For å beskrive konsekvensene av å endre bredden på tverrprofilet er bruk av sikkerhetsfaktorer nærmere studert. Utvalgt litteratur og faktorer som legger grunnlaget for senere analyse er grundigere gjennomgått.

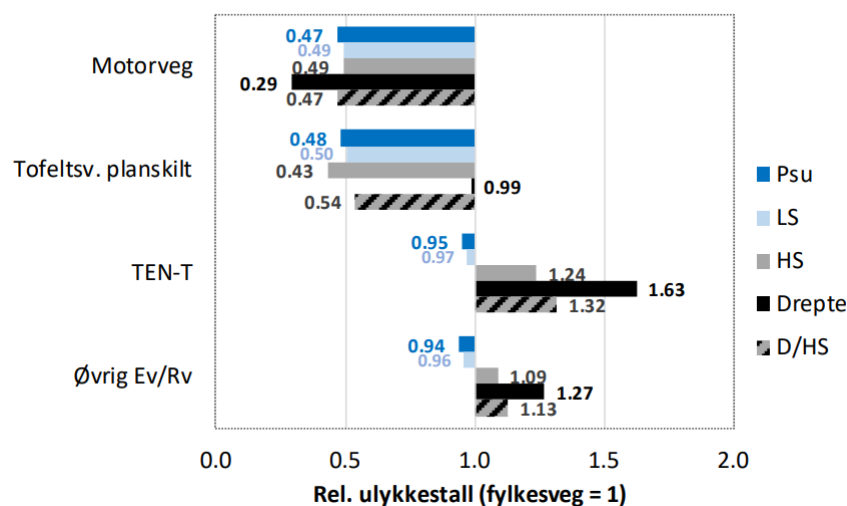
#### **3.3.1 Nominell og substansiell sikkerhet**

Sikkerheten på en veg kan klassifiseres som nominell eller substansiell. Nominell sikkerhet avhenger av om vegens utforming følger utformingskravene. For eksempel vil en veg som møter kravet om tilstrekkelig bredde på tverrprofilet være nominell sikker, mens en veg som har et tverrprofil med kjørefeltbredde under det som er kravet for den gjeldende vegtypen vil være nominell usikker. Substansiell sikkerhet er den faktiske sikkerheten på vegen og kan måles som ulykkesfrekvens, ulykkestype og ulykkes alvorlighetsgrad over en lengre periode (Stein & Neuman, 2007).

For at en strekning skal være nominell sikker må alle utformingsvariablene imøtekomme utformingskravene. Selv om strekningen er nominell sikker kan den samtidig være substansiell usikker med høyere ulykkesrisiko enn normalt for lignende strekninger. På samme måte kan også en veg som er nominell usikker, ved at en eller flere utformingsvariabler fraviker utformingskravene, ha god substansiell sikkerhet (Stein & Neuman, 2007). En måte å måle den substansielle sikkerheten på er ved hjelp av ulykkesmodeller og sikkerhetsfaktorer. Ulykkesmodeller og sikkerhetsfaktorer kan utvikles for ulike vegnett med lokale faktorer og data. Bruken av slike modeller og faktorer øker forståelsen om hvordan vegegenskaper og ulykker henger sammen (Scurry, 2014).

### 3.3.2 Ulykkesrisiko og ulykkestyper

Kravet om god trafiksikkerhet er en avgjørende faktor for hvordan veger utformes. Ulykkesrisikoen på en strekning påvirkes av en rekke faktorer som kan knyttes til variabler i vegens utforming, trafikanter og kjøretøytyper på vegen. Et godt samspill mellom vegens geometri, trafikanter og kjøretøyeigenschaften er viktig for å skape et trygt transportsystem. Noen av faktorene som har stor innvirkning på sikkerheten er utforming av tverrprofil, linjeføring, fartsgrense og ÅDT. Disse faktorene varierer avhengig av hvilken vegtype som er valgt. På grunn av disse variasjonene vil det være store ulikheter i ulykestall og ulykkesrisiko for ulike vegtyper. Figur 17 viser en oversikt over sammenhengen mellom noen vegtyper og forventet ulykestall, der fylkesveg er brukt som referansekategori. De ulike vegtypene er valgt fordi det finnes generelle forskjeller i vegstandard, blant annet for bredde på kjørefelt og skulder. (Høye, 2016). I figuren vises ulikheter i ulykestall for personskadeulykker (Psu), lett skadde (LS), hardt skadde (HS), drepte og samlet antall drepte eller hardt skadde (D/HS).



Figur 17: Sammenheng mellom vegtype og predikerte ulykestall (Høye, 2016, s. 19)

Figuren viser at motorveger har færre ulykker enn andre vegtyper. Forskjellen er spesielt stor når det gjelder antall drepte og hardt skadde i trafikken. Dette til tross for at motorveger har høyere hastighet og trafikkmengde enn andre veger. I perioden 2006 – 2011 var ulykkesfrekvensen på motorveger 0,059 personskadeulykker per million kjøretøykilometer, mens ulykkesrisikoen for øvrige riks- og fylkesveger lå mellom 0,133 og 0,186 personskadeulykker per million kjøretøykilometer (Elvik, 2017). Figur 17 viser at andelen hardt skadde er 51 % lavere for motorveg enn for det øvrige fylkesvegnettet, mens andelen drepte er 71 % lavere. Dersom motorveg sammenlignes med øvrig Europa- og riksveg er forskjellen enda større. En nyere studie som er basert på data fra 2014 til 2019 viser at ulykkesfrekvensen på 4-felts motorveg med fartsgrense 110 km/t var 0,021 i denne perioden. På to-felts motortrafikkveg

var ulykkesfrekvensen 0,041 i samme periode, noe som betyr at det på slike veger nesten er dobbelt så mange ulykker som på 4-felts motorveg med fartsgrense 110 km/t (Statens vegvesen, 2020b).

Ulykkestypene som fører til flest trafikkulykker som involverer alvorlig skadde og/eller drepte er møteulykker og utforkjøringsulykker (SSB, 2020). Analyser utført av ulykkesanalysegruppene hos Statens vegvesen viser at blant 2 385 dødsulykker i perioden 2005 – 2019 var 36,0 % av ulykkene møteulykker og 34,0 % utforkjøringsulykker. De to ulykkestypene utgjør dermed totalt 70,0 % av de registrerte dødsulykkene på det norske vegnettet (Ringen jr., 2020). På motorveger er antall møteulykker svært lavt på grunn av vegens midtdeler som ofte er utstyrt med fysisk midtrekkverk. En undersøkelse av ulykkestyper på motorveger i trafikkulykkesregisteret til Statens Vegvesen, «TRINE», viser at de fleste ulykkene oppstår i samme kjøretretning i form av påkjøring bakfra og feltskifte. En studie fra USA kom frem til at 63,0 % av personskadeulykkene som involverer flere kjøretøy på landlige motorveger skyldtes påkjøring bakfra, mens 23,7 % skyldtes sidevegs sammenstøt. Slike sammenstøt fra siden oppstår ofte på grunn av feltskifte. Av eneulykker skyldtes 56,7 % av personskadeulykkene kollisjon med et fast objekt (Bonneson, Geedipally, Pratt & Lord, 2012).

En form for ulykker som kan oppstå som et resultat av tverrprofilens utforming er sekundære ulykker. Sekundære ulykker oppstår som et indirekte resultat av en annen ulykke eller hendelse. Blokkering av vegskulderen eller et kjørefelt vil gi økt risiko for sekundære ulykker. Slike ulykker kan forekomme på grunn av at sjåføren ikke klarer å bremse eller svinge unna før hendelsespunktet eller køen som danner seg på grunn av overbelastet kapasitet på strekningen. En annen grunn kan være at sjåføren blir distraheret av ulykkessituasjonen. På urbane motorveger i perioder med høy trafikkandel kan sannsynligheten for sekundære ulykker øke med ca. 1,0 % for hvert andre til tredje minutt den ordinære ulykken fortsetter å være en hindring for andre trafikanter. I perioder med liten trafikk kan risikoen øke med 1,0 % for hvert femte minutt (Goodall, 2017). Det er vist at bredere skulder, bredere midtdeler og flere kjørefelt gir færre sekundære ulykker, mens økt trafikkmengde, høyere fartsgrense og større andel tunge kjøretøy øker antall sekundære ulykker (D. Chimba & Kutela, 2014).

### **3.3.3 Sammenheng mellom utformingsvariabler og sikkerhet**

For å forstå hvordan sikkerheten på vegen påvirkes av forskjellige utformingsvariabler er sammenhengen mellom enkelte variabler og ulykkesrisiko undersøkt. Av utformingsvariabler i tverrprofilen er det sett nærmere på kjørefelt, ytre og indre skulder og midtdeler. Det er også undersøkt hvordan hastighet og trafikkmengde påvirker sikkerheten.

#### **Kjørefelt**

Undersøkelser av kjørefeltbreddens påvirkning på antall ulykker viser varierende resultater. Litteraturen som er undersøkt i Trafikksikkerhetshåndboken viser at en økning i kjørefeltbredden fører til økt ulykkesrisiko i den ene halvparten av undersøkelsene, og redusert ulykkesrisiko i den andre halvparten

(Høye, 2007). Bonneson et al. (2012) analyserte sammenhengen mellom kjørefeltbredde og ulykkers alvorlighetsgrad på motorveger i USA. Resultatet indikerte at en økning i kjørefeltbredde fører til en reduksjon i antall personskadeuhell. En grunn til dette kan være at bredere kjørefelt gir trafikanter større mulighet til å unngå påkjørsel bakfra.

Bredere kjørefelt kan også føre til økt sikkerhetsfølelse og høyere hastigheter. Økt sikkerhetsfølelse kan oppstå som et resultat av at bredere kjørefelt vil gi trafikanter større rom til å gjenvinne kontroll og unngå ulykker. Samtidig kan de positive virkningene av økt kjørefeltbredde motvirkes av en økning i FFH som et resultat av at trafikanter føler seg tryggere (Hauer, 2000). Studier som har undersøkt sammenhengen mellom kjørefeltbredde og ulykkesfrekvens har vist at fartsgrensen på strekningen er en signifikant faktor (Lee, Abdel-Aty, Park & Wang, 2015). På strekninger med høy fartsgrense kreves en viss bredde på kjørefeltet for at trafikanter skal klare å holde seg innenfor kjørefeltet uten å komme for nærme kjøretøy i andre kjørefelt eller være nødt til å benytte skulderen. Risikoen av å redusere bredden på kjørefelt er ikke like stor på strekninger med lavere fartsgrenser. Lavere hastighet gir trafikantene større kontroll over kjøretøyet og reduserer faren for at kjøretøyet havner utenfor kjørefeltet. I tillegg til fartsgrensen kan samspillet mellom bredden på kjørefelt og skulderen påvirke effekten av å endre kjørefeltbredden. Å redusere kjørefeltbredden på en strekning med høy fartsgrense og smal skulder vil føre til økt risiko sammenlignet med en strekning som enten har lavere fartsgrense, bredere skulder, eller begge deler (Stein & Neuman, 2007).

## **Skulder**

En vegskulder har flere funksjoner som er viktig for trafiksikkerheten. Skulderbreddens virkning på trafiksikkerheten har blitt undersøkt i flere studier. De fleste studiene viser at det er signifikant lavere ulykkesrisiko på vegstrekninger med bred skulder, og at risikoen er større for smale skuldre med bredder mindre enn 1,50 m (Høye, 2007). Valg av skulderbredde kan i flere tilfeller påvirke sannsynligheten for ulykker og hvilken alvorlighetsgrad ulykkene vil ha. Når skulderbredden er mindre enn bredden på kjøretøyet er det en fare for at en del av kjøretøyet vil stå i kjørebanelen ved nødstop.

I en undersøkelse utført av Statens vegvesen (2020a), ble det sett på dødsulykker som følge av kjøretøy på eller nær ytre skulder på veger med fartsgrense 90, 100 og 110 km/t i Norge. Det ble funnet seks dødsulykker i en periode fra 2015 til utgangen av mai 2020. To av ulykkene er kategorisert som «Påkjøring bakfra», mens de fire andre ulykkene går under kategorien «Fotgjenger stod stille eller oppholdt seg for øvrig i kjørebanelen». For flere av ulykkene er det beskrevet at kjøretøyet stod delvis på kantlinjen og i kjørebanelen på grunn av plassmangel på vegskulderen. I ulykkene fra den siste kategorien har trafikanter oppholdt seg utenfor kjøretøy som har stanset på skulderen. Grunner til at trafikanter velger å stanse kjøretøyet på skulderen kan blant annet være mekaniske problemer på kjøretøy, mangel på drivstoff eller menneskelige problemer (Deo Chimba, Kutela, Ogletree, Horne & Tugwell, 2014).

Faremomenter kan også knyttes til økt bredde på vegskulderen. Et eksempel på dette er situasjoner der trafikanter bruker skulderen unødvendig, enten til stopp eller som ekstra kjørefelt. Unødvendig stopp på skulder vil mest sannsynlig ikke oppstå dersom skulderen er for smal til at hele kjøretøyet kan parkeres utenfor kjørebanelen. På samme måte som for brede kjørefelt, kan bredere skulder også medføre høyere hastigheter på grunn av en økning i trafikantenes sikkerhetsfølelse (Stamatiadis & Pigman, 2009). Dette kan øke risikoen for alvorlige ulykker og kan medføre større spredning i fartsnivå. Netto sikkerhetseffekt av skulderen kan dermed tenkes på som en sum av flere motstående tendenser.

### **Midtdeler**

Det viktigste målet med bruk av midtdeler er å separere trafikkstrømmene i ulike kjøreretninger. En motorveg med fysisk midtdeler vil i stor grad hindre møteulykker ved at motgående trafikkstrømmer separeres med et midtrekkverk. Midtrekkverket vil også føre til en reduksjon i antall utforkjøring ved at det effektivt hindrer muligheten for utforkjøring på motsatt side av vegen. Ved innstallering av midtdeler med midtrekkverk finnes det mange ulike alternativer. Det kan skilles mellom rekkverkstyper som betongrekkverk, stålrekkverk og wirerekkverk. De ulike rekkverkstypene tilbyr ulik grad av stivhet som påvirker rekkverkets utbøying ved sammenstøt. Fastmontert betongrekkverk er den minst ettergivende rekkverkstypen og vil gi størst sikkerhet for å hindre kjøretøy fra å krysse midtdeler, men vil samtidig også utgjøre den største faren for kjøretøy som kolliderer med midtrekkverket (Høye, 2014). Selv om midtrekkverk vil hindre møteulykker og kjøretøy fra å havne i motsatt kjøreretning vil det ikke hindre påkjørsler som oppstår i samme kjøreretning. Midtrekkverket kan også virke som en hindring i vegkanten, og som følge av rekkverkets nærhet til kjøretøy i de indre kjørefeltene vil det være en fare for sammenstøt.

I en studie av sammenhengen mellom utformingen av midtdeler og effekt på sikkerhet konkluderte Tarko, Villwock og Blond (2008) med at valg av utforming på midtdeler i ulik grad vil påvirke ulykkesfrekvens og alvorlighetsgrad for forskjellige ulykkestyper. Analyser indikerte at å redusere bredden på midtdeler, samtidig som det settes opp fysisk midtrekkverk, førte til at eneulykker økte betraktelig, mens ulykker mellom flere kjøretøy i samme kjøreretning ikke ble påvirket. De oppdaget også at innstallering av betongrekkverk reduserte de mest alvorlige front-mot-front ulykkene, men førte til en økning i andre typer ulykker.

### **Hastighet (fartsgrense)**

Hastighet er en viktig risikofaktor, og det er en tydelig sammenheng mellom trafikkens gjennomsnittshastighet og sikkerheten på en strekning. Med forskjellige modeller og undersøkelser er det fremvist at økt hastighet medfører økt skadegrad for trafikanter som er involvert i ulykker. Dette betyr at når fartsgrensen økes vil en andel av ulykkene med lavere skadegrad i perioden før endringen gå over til ulykker med høyere skadegrad i perioden etter økt fartsgrense. Det er også undersøkt om økt hastighet



medfører større sannsynlighet for å være involvert i en ulykke, men dette forholdet er mer uklart. Noen studier har funnet en økt sannsynlighet for kollisjon, mens andre har funnet det motsatte (Gargoum & El-Basyouny, 2016).

De siste årene har det vært rettet et fokus på å innføre høyere fartsgrenser på norske motorveger ved å øke fra 110 til 120 km/t. Vadeby og Forsman (2018) gjennomførte en evaluering av effekten ved å øke og redusere ulike fartsgrenser i Sverige. De fant at en økning i fartsgrense til 120 km/t på motorveger førte til en økning i antall hardt skadde, mens antall drepte var uforandret. Økning i antall hardt skadde gjaldt for alle typer motorveger, men utviklingen var verst for smale motorveger med en bredde på 21,5 m. En undersøkelse av fartsgrenseendring fra 100 til 110 km/t på norske motorveger viste også en tydelig økning i andel ulykker med alvorlig skadegrad. Antall alvorlig skadde og drepte økte med 26,0 %, mens antall lettere skadde ble redusert med 10,0 %. Samtidig var den totale økningen i antall ulykker bare 3,6 % (Bjerkan, Ragnøy & Engebretsen, 2019). Dette stemmer med teorien om at økt fartsgrense medfører en forflytning av ulykker med lav skadegrad til ulykker med mer alvorlig skadegrad.

Flere motorveger i Danmark har tidligere fått hevet fartsgrense fra 110 km/t til 120 km/t og 130 km/t (Andersen, 2018). I en studie av motorvegnettet i Danmark ble det undersøkt ulykkesdata fra 380 strekninger og totalt 746,3 km veg med fartsgrense 130 km/t og 400 strekninger og totalt 445,1 km veg med fartsgrense 110 km/t. Ulykkesfrekvensen viste seg å være tilnærmet lik for de to hastighetene, men dersom kun personskader tas til betraktning viser statistikken at skadefrekvensen er høyere for 130 km/t enn for 110 km/t med en skadefrekvens på henholdsvis 0,029 og 0,019 personskader per million kjøretøykilometer. I tillegg er gjennomsnittlig trafikkmengde på strekninger med 130 km/t en god del lavere (Jensen, 2015).

### **Trafikkmengde (ÅDT)**

På motorveger vil forholdet mellom ulykkesfrekvens og trafikkmengde normalt være U-formet med en ulykkesfrekvens som er høy for veger med lav og høy ÅDT, og lavere for mellomliggende nivå av ÅDT. Dette var også tilfellet i en analyse av et datasett som inneholdt ulykkesdata fra 4-felts motorveg og motortrafikkveg i Norge. I denne analysen ble det observert at ulykkesfrekvensen var høy på veger med ÅDT 6 555 – 14 999 og 35 000 – 65 201, og lav på veger med ÅDT 15 000 – 34 999 (Jensen, 2020).

Sammenhengen mellom trafikkmengde og forventet antall ulykker med personskade viser at ulykkestallene øker når trafikkmengden øker. Det forventes at denne økningen vil avta ved økende trafikkmengde, spesielt for alvorlige ulykker (Høye, 2016). I en analyse av ulykkesdata på danske motorveger erfarte Jensen (2015) at en dobling av trafikkmengden omtrent medførte en dobling av det totale antallet ulykker, mens det bare medførte ca. 1,4 ganger så mange personskader. Det ikke-lineære forholdet betyr at selv om det totale antallet ulykker øker, vil risikoen for personskadeulykker reduseres

når trafikkmengden øker. Basert på ulykkesmodeller fra flere studier ble det i Trafikksikkerhets- håndboken estimert at en økning i trafikkmengde på 1,0 % førte til en økning i antall ulykker på 0,88 %. Dette gjaldt for alle vegtyper og ved alle trafikkmengder. For eneulykker ble det estimert en økning i antall ulykker på 0,4 % ved 1,0 % økning i trafikkmengde. Antall eneulykker øker dermed mindre enn andre typer ulykker. Selv om det generelt sett vil være en økning i ulykkestallet når trafikkmengden stiger, vil denne økningen variere veldig mellom ulike vegter på grunn av ulik fordeling av trafikken gjennom døgnet og vegens kapasitet (Høye, 2008).

Forholdet mellom trafikkmengde og ulykkesfrekvens er komplekst og er vanskelig å fange opp i en ulykkesmodell. På en 4-felts motorveg er det vanlig at FFH begynner å avta ved en trafikkmengde som tilsvarer en trafikktensitet på omtrent 1 000 pbe/t/felt. Når trafikkmengden stiger over dette, vil tettheten øke samtidig som gjennomsnittshastigheten avtar. Dette vil typisk føre til en høyere ulykkesfrekvens, men med mindre alvorlig utfall (Jensen, 2015).

### **Andre variabler**

Det finnes også flere andre variabler som i kombinasjon med ovennevnte variabler kan påvirke ulykkesfrekvens og alvorlighet, men som ikke er valgt å undersøke nærmere i denne oppgaven. Eksempler på slike variabler er:

- Linjeføring (horisontal- og vertikalgeometri)
- Vegens dekkekvalitet
- Klimatiske og værmessige forhold
- Arbeidssoner eller andre forstyrrende forhold langs strekningen

### **3.3.4 Sikkerhetsfaktorer**

For å beskrive sikkerhetseffekten av endringer i verdien på utformingsvariablene som inngår i tverrprofilen, kan sikkerhetsfaktorer benyttes. En faktor lavere enn 1,0 indikerer en forventet nedgang i antall ulykker, mens en faktor over 1,0 indikerer en forventet økning i antall ulykker (CMFclearinghouse, u.å.). Sikkerhetsfaktorer kan brukes i kombinasjon med ulykkesmodeller for å estimere ulykkestall for alternative tverrprofil. Resultater fra en slik analyse kan benyttes til å sammenligne sikkerhetsprestasjonen til ulike løsninger. For å beregne sikkerhetsprestasjonen til et segment med grunnleggende forhold kreves det en modell. Dersom det gjøres endringer i verdier for utformingsvariablene som inngår i de grunnleggende forholdene vil resultatet fra modellen justeres med sikkerhetsfaktorer. Fordelen med en slik metode er blant annet at den ikke er avhengig av tilgjengelig ulykkesdata fra strekningen som undersøkes for å beregne forventet sikkerhetsprestasjon. I stedet brukes faktorer som er satt sammen på grunnlag av lignende strekninger og som dermed kan gi et estimat for nye strekninger der det enda ikke foreligger tilstrekkelig med data (Scurry, 2014).

En sikkerhetsfaktor kvantifiserer sammenhengen mellom verdien på en eller flere utformingsvariabler og ulykkesfrekvensen. De er ofte basert på en begrenset mengde data. Forskjeller i innsamlet data vil dermed føre til at sikkerhetsfaktorer vil variere avhengig av tid og sted. Faktorene kan være aktuelle for flere ulykkestyper og forhold, eller kun for spesifikke scenarier. For noen utformingsvariabler kan det finnes flere sikkerhetsfaktorer som representerer ulike ulykkestyper og alvorlighetsgrader, mens det i andre tilfeller kun er én tilgjengelig faktor som representerer samlet effekt på alle ulykkestyper eller alvorlighetsgrader. Det bør velges sikkerhetsfaktorer som representerer de forholdene som har størst likhet med de aktuelle forholdene som vurderes. Sikkerhetsfaktorer bør ikke benyttes for scenarier der den aktuelle utformingen på en strekning er forskjellig fra utformingen på strekningene som inngår i faktorenes beregningsgrunnlag (Gross, Persaud & Lyon, 2010).

I denne oppgaven er det valgt å se nærmere på sikkerhetsfaktorer som er utledet fra tverrsnittsdata. Slike faktorer vil være spesielt nyttige dersom det er mangel på data som viser effekten av å endre verdien på en utformingsvariabel i tverrprofilen. For eksempel kan det være få tilfeller der ytre skulderbredde har blitt redusert fra 3,0 til 1,5 m, noe som gjør det vanskelig å trekke en konklusjon om hvordan en slik endring påvirker sikkerheten. Det kan likevel være mange tilfeller av strekninger der skulderen enten er 3,0 eller 1,5 m. Ved å samle inn ulykkesdata fra tilstrekkelig antall strekninger med de forskjellige utformingene kan det dermed være mulig å estimere sikkerhetsfaktorer som viser effekten av å velge den ene bredden i stedet for den andre. For at faktorene skal bli mest mulig nøyaktige er det viktig at alle de andre variablene som påvirker sikkerheten på strekningene er like (Gross et al., 2010).

En vanlig praksis for å estimere sikkerhetsprestasjonen til et tverrprofil er å multiplisere sikkerhetsfaktorer for ulike utformingsvariabler for å estimere en samlet effekt av flere endringer på samme strekning. Dette vil kun gi et reelt estimat dersom de utformingsvariablene som endres opererer uavhengig av hverandre og ikke vil ha en påvirkning på de samme ulykkestypene. Dersom dette ikke er tilfellet, og flere av variablene er avhengig av hverandre, vil det være stor sannsynlighet for å overestimere effekten av endringene. Sannsynligheten for overestimering øker når flere faktorer inkluderes i beregningen (Gross et al., 2010).

Det er utført en rekke studier som undersøker hvordan forskjellige utformingsvariabler påvirker trafiksikkerheten. Utvalgte rapporter fra Danmark og USA er undersøkt for å sammenligne verdier fra ulike land. I rapporten *Safety Prediction Methodology and Analysis Tool for Freeways and Interchanges* utviklet Bonneson et al. (2012) metoder for å beregne ulykkestall med data fra motorveger i USA. En lignende rapport, *Uheldsmodeller, sikkerhetsfaktorer og værktøjer for strækninger* av Jensen (2015), ble utarbeidet for motorvegnettet i Danmark. Jensen lagde også en lignende rapport med data fra 4-felts motorveg og motortrafikkveg i Norge (Jensen, 2020).

I den amerikanske rapporten undersøkte Bonneson et al. (2012) ulykkesdata fra perioden 2005 – 2007 i statene California og Washington, og perioden 2004 – 2006 i delstaten Maine. Det ble brukt en

analyseperiode på tre år for å minimere sannsynligheten for endringer i geometri, trafikk og miljø gjennom perioden. I ulykkesdatabasen ble det undersøkt motorveger med total fire til åtte kjørefelt, i tillegg til noen få med 10 kjørefelt, for urbane og landlige forhold. I rapporten er «urbane forhold» definert som steder innenfor bygrenser med mer enn 5 000 innbyggere, mens «landlige forhold» er definert som steder med færre enn 5 000 innbyggere utenfor bygrenser. Den største andelen av de undersøkte strekningene er motorveger med totalt fire eller seks kjørefelt. Det ble undersøkt totalt 438 km motorveg med fire felt, oppdelt i 305 km landlig og 133 km urban motorveg. På strekningene med totalt fire felt varierte trafikkmengden fra 11 300 til 83 700 på de landlige motorvegsegmentene og fra 11 400 til 98 300 på de urbane. Det er registrert totalt 899 og 772 personskadeulykker med en samlet ulykkesfrekvens på 0,088 og 0,113 personskadeulykker per million kjøretøykilometer for henholdsvis landlige og urbane motorveger med fire felt.

Jensen (2015) undersøkte ulykkesdata fra perioden 2005 – 2012 på motorvegnettet i Danmark. Det ble undersøkt motorveger med to til fire gjennomgående kjørefelt per retning, med klart størst andel av veger med to felt. Fokuset var på landlige veger, og det ble totalt undersøkt 1 317 km motorveg med to gjennomgående kjørefelt per retning og registrert 1 404 personskader. Trafikkmengden varierte mellom 2 481 til 47 289 i undersøkt retning, med et gjennomsnitt på 14 765 for veger med to gjennomgående felt. Det er beregnet en samlet skade- og ulykkesfrekvens på 0,025 personskader og 0,017 personskadeulykker per million kjøretøykilometer for strekningene. Det er ofte flere personskader i en ulykke, og følgelig vil ulykkesfrekvensen for personskadeulykker være noe lavere enn for antall personskader. Jensen har også analysert et datasett fra 4-felts motorveg og motortrafikkveg i Norge. Datasettet omfatter totalt 300 km veg med 265 registrerte ulykker og 430 personskader. Med et samlet trafikkarbeid på 11,322 million kjøretøykilometer er det beregnet en skade- og ulykkesfrekvens på 0,038 personskader og 0,023 ulykker per million kjøretøykilometer for strekningene. I motsetning til det amerikanske og danske studiet er det begrenset med data fra lignende motorveger i Norge. Etersom antall strekninger og ulykker er såpass lavt er det ikke oppstilt ulykkesmodeller eller sikkerhetsfaktorer for dette datasettet (Jensen, 2020).

Fra den danske og amerikanske rapporten er det undersøkt sikkerhetsfaktorer for bredde på kjørefelt, ytre og indre skulder og midtdeler. Sikkerhetsfaktorer vil omtales som CMF (Crash Modification Factor) i videre beregninger og tabeller. Videre vil sikkerhetsfaktorer som er funnet fra en gjennomgang av de to rapportene beskrives. Alle formler som er hentet fra den amerikanske rapporten er direkte gjengitt slik de er skrevet i kilden. Det betyr at bredder som inngår i formlene er oppgitt med imperiske måleenheter (feet), mens det gjennom oppgaven er benyttet metriske enheter (meter). For å kunne benytte metrisk breddeenhet i formlene må bredden multipliseres med en faktor på 3,2808, som tilsvarer antall feet per meter. Antall meter kan dermed omregnes til feet med Formel 1.

$$ft = m * 3,2808$$

Formel 1

### Kjørefelt

En sammenligning av sikkerhetsfaktorer som er funnet fra USA og Danmark viser at det opereres med en faktor lik 1,0 for kjørefeltbredder på 3,66 m i USA og 3,50 m i Danmark. I Danmark er det funnet at en økning i kjørefeltbredde over 3,50 m ikke har innvirkning på antall ulykker, mens det i USA vil være en reduksjon i antall ulykker når bredden økes inntil 3,96 m (Jensen, 2015). CMF er beregnet med Formel 2 for de amerikanske forholdene. Formelen er aktuell for kjørefeltbredder mellom 3,20 og 3,66 m (Bonneson et al., 2012, s. 141). For å benytte metrisk breddeenheter i formelen må bredden omregnes til feet med Formel 1.

$$CMF_{lw} = e^{-0,0376(W_l-12)}$$

Formel 2

der

$CMF_{lw}$  = sikkerhetsfaktor for kjørefeltbredde; og

$W_l$  = gjennomsnittlig kjørefeltbredde i en retning (ft)

Tabell 3 viser CMF-verdier for ulike kjørefeltbredder.

Tabell 3: Sikkerhetsfaktorer for kjørefeltbredde på 4-felts motorveg i Danmark og USA

Kjørefelt (m)	3,25	3,38	3,50	3,66
Danmark	1,030	1,015	1,000	1,000
USA	1,052	1,035	1,020	1,000

### Ytre skulder

Sikkerhetsfaktorene for ytre skulder viser at det benyttes en faktor lik 1,0 når bredden er 3,00 m for danske forhold og 3,05 m for amerikanske forhold. Studien fra Danmark viser at en ytterligere økning i bredden ikke vil ha noen særlig effekt på sikkerheten, mens studien fra USA viser at antall ulykker reduseres ved en økning i bredde inntil 3,66 m (Jensen, 2015). Bonneson et al. (2012) kom frem til at ytre skulder kun var signifikant for eneulykker. CMF for eneulykker på rette strekninger er beregnet med Formel 3 for de amerikanske forholdene. Formelen gjelder for skulderbredder mellom 1,20 og 4,30 m (Bonneson et al., 2012, s. 142). For å benytte metrisk breddeenheter i formelen må bredden omregnes til feet med Formel 1.

$$CMF_{sv,osw} = e^{-0,0647(W_{os}-10)}$$

Formel 3

der

$CMF_{sv,osw}$  = sikkerhetsfaktor ytre skulderbredde;

$sv$  = eneulykker; og

$W_{os}$  = ytre skulderbredde (ft)

For at CMF for ytre skulder skal kunne representere den totale ulykkesfrekvensen, og ikke bare eneulykker, må faktoren konverteres. Ved å benytte Formel 4 kan faktoren konverteres fra å gjelde en spesifikk ulykkestype til å gjelde for det totale antall ulykker.

$$CMF_{i|agg} = (1,0 - P_{mv})CMF_{sv,i} + P_{mv}CMF_{mv,i}$$

Formel 4

der

$CMF_{i|agg}$  = samlet CMF for element  $i$ ;

$mv$  = ulykker med flere kjøretøy involvert;

$P_{mv}$  = andel av ulykker med flere kjøretøy; og

$CMF_{j,i}$  = sikkerhetsfaktor for utformingsvariabel  $i$  og ulykkestype  $j$  ( $j = mv, sv$ )

(Bonneson et al., 2012, s. 140)

$CMF_{sv,osw}$  er beregnet i Formel 3, mens  $CMF_{mv,osw}$  settes lik 1,00. Andelen av ulykkene som involverer flere kjøretøy er oppgitt som 0,363 og 0,591 for henholdsvis landlig og urban 4-felts motorveg (Bonneson et al., 2012, s. 140). Tabell 4 viser CMF-verdier for ulike bredder på ytre skulder.

Tabell 4: Sikkerhetsfaktorer for ytre skulderbredde på 4-felts motorveg i Danmark og USA

Ytre skulder (m)	1,25	1,50	2,00	2,50	3,00	3,05
Danmark	1,165	1,140	1,090	1,050	1,000	1,000
USA landlig	1,296	1,248	1,159	1,079	1,007	1,000
USA urban	1,190	1,159	1,102	1,050	1,004	1,000

## Indre skulder

En sammenligning av sikkerhetsfaktorer for indre skulder viser at det er store forskjeller mellom verdiene fra USA og Danmark. Mens det i den amerikanske rapporten er gitt en faktor lik 1,0 for indre skulderbredde på 1,88 m, er det i den danske rapporten gitt en faktor lik 1,0 for bredder helt ned til 0,50 m. På det danske motorvegnettet vil antall ulykker og personskader reduseres ved en økning i indre skulderbredde inntil 3,00 m. For hver meter reduseres antall ulykker og personskader med 4,0 % (Jensen, 2015). CMF er beregnet med Formel 5 for de amerikanske forholdene. Formelen er aktuell for indre skulderbredder mellom 0,60 og 3,70 m (Bonneson et al., 2012, s. 143). For å benytte metrisk breddeenheter i formelen må bredden omregnes til feet med Formel 1.

$$CMF_{isw} = e^{-0,0172(W_{is}-6)}$$

Formel 5

der

$CMF_{isw}$  = sikkerhetsfaktor for indre skulderbredde; og

$W_{is}$  = indre skulderbredde (ft)

Tabell 5 viser CMF-verdier for ulike kjørefeltbredder.

Tabell 5: Sikkerhetsfaktorer for indre skulderbredde på 4-felts motorveg i Danmark og USA

Indre skulder (m)	0,50	0,75	1,00
Danmark	1,000	0,990	0,980
USA	1,078	1,063	1,048

Formelen som brukes til å beregne sikkerhetsfaktorer for amerikanske motorveger gjelder kun for bredder på indre skulder ned til 0,60 m, og er derfor ikke kompatibel med en bredde på 0,50 m. Med Formel 5 vil en endring i bredden fra 0,60 til 0,50 m gi en reduksjon i personskadeulykker på 0,6 %. Ifølge Jensen (2015) kan det antas en reduksjon i antall personskadeulykker på 1,0 % når bredden reduseres med 0,25 m fra 0,75 til 0,50 m. Dette tilsvarer 0,4 % per 0,10 m. Det kan dermed virke som at bredden på 0,50 m gir et realistisk resultat selv om så smale bredder ikke inngår i formelens grunnlagsdata.

## **Midtdeler**

Rapporten fra Danmark viser tendenser til at bredere midtdeler fører til færre ulykker, men at ulykkene blir mer alvorlige. Sikkerhetsfaktorer er bestemt for bredde på midtdeler fra 2,00 til 11,00 m. Det er antatt at å redusere bredden med 1,00 m fører til 1,0 % økning i materialskade- og ekstraulykker, mens personskadeulykker er uendret (Jensen, 2015). I rapporten fra USA er breddene på midtdeler enda større og varierer fra 2,75 til 42,70 m (Bonneson et al., 2012). Bredden på midtdeler som inngår for tverrprofilene i analysene utført i denne oppgaven er mindre enn det som er undersøkt i rapportene. På grunn av dette, og at det er antatt at bredden på midtdeler har liten effekt på personskadeulykker, er det valgt å utelate sikkerhetsfaktorer for midtdeler i analysen.



## 4 Analyse og resultat

I dette kapitlet er utformingsvariablenes effekt på trafikksikkerheten og vegens evne til å avvike trafikk analysert. Analysen bygger på teori og litteratur som er gjennomgått i kapittel 3. Formler og inngangsverdier som brukes i analysen er presentert her. I tillegg er andre forutsetninger som er nødvendige for å utføre ønskede beregninger kommentert. Effektene som analyseres er et resultat av endringer i bredden på tverrprofilen og ulike scenarier som oppstår på et motorvegsegment. Utformingsverdier, tverrprofil og scenarier som inngår i analysen er nærmere beskrevet i den første delen av kapitlet.

### 4.1 Valg av tverrprofil og scenarier

For å optimalisere tverrprofilen for 4-felts motorveg må ulike alternativer analyseres. Et sentralt element i planleggingen av en slik analyse er å bestemme hvilke variasjoner i verdiene til utformingsvariablene som skal vurderes. Det må identifiseres typiske intervaller for utformingsverdier som benyttes i utforming av 4-felts motorveg, slik at disse videre kan benyttes i analysen.

Først er valg av bredder på de utvalgte utformingsvariablene kjørefelt, ytre og indre skulder og midtdeler grunnlagt. Deretter er disse breddene satt sammen til alternative tverrprofiler. To av tverrprofilene representerer øvre og nedre grenseverdi for bredde på tverrprofil som er inkludert i Samferdselsdepartementets anbefaling om økt fleksibilitet i utforming (Regjeringen, 2020). I tillegg er det satt sammen to tverrprofiler der ett ligger innenfor rammene knyttet til økt fleksibilitet, mens ett er smalere enn hva som er anbefalt. Tilknyttet tverrprofilene er det konstruert tre scenarier som kan oppstå på et motorvegsegment: normal drift, stengt skulder og stengt kjørefelt.

#### Utformingsvariabler

##### **Kjørefeltbredde**

Nedre grense for kjørefeltbredde er satt til 3,25 m. Dette vil gi en restbredde for personbiler på  $3,25 - 1,80 = 1,45$  m som vil føre til at 85 % av personbilførerne ikke kjører raskere enn 110 km/t (Vejdirektoratet, 2012a). For at lastebiler skal kunne benytte kjørefeltet må bredden være minimum 3,50 m. På 4-felts motorveger som ikke er overbelastet og som har relativt lav ÅDT vil en større andel av trafikken kjøre i ytre kjørefelt. På grunn av hastighetsbegrensninger på tunge kjøretøy vil det ved lav ÅDT være svært få tunge kjøretøy som benytter indre kjørefelt. Dersom det i tillegg er satt opp forbud mot tunge kjøretøy i indre kjørefelt vil breddebehovet være mindre i dette feltet. Med varebil eller personbil som dimensjonerende kjøretøy vil indre kjørefeltbredde på 3,25 m være tilstrekkelig (Thorud, 2020).

## **Ytre skulderbredde**

Nedre grense for ytre skulderbredde er satt til 0,75 m. Dette vil kun være mulig for strekninger med lav ÅDT. Med hensyn på dimensjonerende kjøretøybredder vil en bredde på 2,75 være tilstrekkelig til at et vogntog kan stanse på skulderen uten å være i direkte kontakt med kjørebanelen.

## **Indre skulderbredde**

Nedre grense for indre skulder er satt til 0,50 m. Med en bredde på 0,50 m vil indre skulder, sammen med en del av bredden på midtdeler, oppfylle minimum objektavstand på 0,60 m mellom kjøretøy i indre kjørefelt og et kontinuerlig objekt som for eksempel midtrekkverk.

## **Bredde på midtdeler**

I de nye retningslinjene for økt fleksibilitet kan bredden på midtdeler reduseres til 0,50 m. På grunn av manglende studier som har undersøkt tilsvarende bredder på 4-felts motorveg er det i denne analysen valgt en nedre grense for midtdeler på 1,00 m. En bredde på 1,00 m vil sørge for at minimum objektavstand oppfylles dersom minste bredde velges for både indre skulder og midtdeler.

## **Tverrprofil**

Det er valgt å fremstille flere tverrprofil som er sammensatt av bredder som vil ha ulik påvirkning på framkommeligheten og trafiksikkerheten på vegen. I analysen er det valgt å se på tverrprofil med total bredde mellom 17 og 23 m.

### **Profil 23**

Tverrprofil med total bredde på 23 m tilsvarer samme bredde som dimensjoneringsklasse H3. H3-profilet er standard dimensjoneringsklasse for 4-felts motorveg i N100 og velges derfor som basisprofilet i analysen. Ved sammenligning av alternative tverrprofil tas det utgangspunkt i dette profilet som referansealternativ.

### **Profil 21**

Sammenlignet med profilet på 23 m har dette profilet redusert bredde på midtdeler fra 2,00 til 1,00 m, indre skulder fra 0,75 m til 0,50 m og indre kjørefelt fra 3,50 til 3,25 m. Resterende bredder er like.

### **Profil 19**

Sammenlignet med profilet på 23 m har dette profilet redusert bredde på midtdeler fra 2,00 til 1,00 m, indre skulder fra 0,75 m til 0,50 m og ytre skulder fra 2,75 til 1,50 m. Resterende bredder er like. Dette er det smaleste profilet som inngår i de nye føringene for økt fleksibilitet i utforming av 4-felts motorveg i Norge.

## Profil 18/17

Det er valgt å inkludere et profil på 18/17 m, som er smalere enn det smaleste alternativet i de nye føringene. Sammenlignet med profilet på 23 m har dette profilet redusert bredde på midtdeler fra 2,00 til 1,00 m, indre skulder fra 0,75 m til 0,50 m, indre kjørefelt fra 3,50 til 3,25 m og ytre skulder fra 2,75 til 1,25/0,75 m. Den eneste bredden som holdes uendret er bredden på ytre kjørefelt. Grunnen til at det er oppgitt to ulike bredder på ytre skulder som gir forskjellig total bredde, er at det i analysen av sikkerhetseffekter på motorveger i USA ikke er inkludert data fra strekninger med ytre skulderbredde mindre enn 1,20 m. Derfor er profilet på 18 m brukt i analysen av sikkerhet, mens profilet på 17 m er brukt i analysen av kapasitet og service-nivå.

Bredder på utformingsvariablene i tverrprofilene som inngår i analysen er oppsummert i Tabell 6.

Tabell 6: Bredder på utformingsvariabler i tverrprofilet brukt i analysen

Profil (m)	23	21	19	18/17
Kjørefelt 1 (m)	3,50	3,25	3,50	3,25
Kjørefelt 2 (m)	3,50	3,50	3,50	3,50
Ytre skulder (m)	2,75	2,75	1,50	1,25/0,75
Indre skulder (m)	0,75	0,50	0,50	0,50
Midtdeler (m)	2,00	2,00	1,00	1,00

## Scenarioer

Det er valgt å definere tre scenarioer som representerer ulike forhold på en strekning. De tre scenarioene vil brukes i analysen av konsekvenser på framkommelighet og kan knyttes til valg av bredde på tverrprofilet.

### **Scenario 1: Normal drift**

Strekninger som opererer i scenario 1 vil ha normale forhold. Med normale forhold menes forhold som ikke gir kapasitetsreducerende effekter i form av uforutsette og uønskede hendelser.

### **Scenario 2: Stengt skulder**

Scenario 2 innebærer situasjoner der den ytre vegskulderen er stengt. Dette kan oppstå i forbindelse med hendelser som nødstop og mindre ulykker. Med stengt skulder menes situasjoner der det kun er skulderen som er stengt, og trafikken fortsatt kan holdes gående på de to kjørefeltene i hver retning. For at det skal oppstå situasjoner der det kun er ytre vegskulder som stenges kreves en tilstrekkelig bred

skulder. I dette tilfellet er det sett på skulderbredder som gjør det mulig for kjøretøy å stanse utenfor kjørebanelen uten å komme i konflikt med nærmeste kjørefelt. Kjøretøybredden og hvor kjøretøyet står på skulderen vil påvirke hendelsesforholdene på stedet. I analysen er det tenkt at hele skulderbredden på 2,75 m oppfattes som stengt. Scenario 2 er gjeldende for profilet på 23 og 21 m som har ytre skulderbredde på 2,75 m.

### **Scenario 3: Stengt kjørefelt**

Scenario 3 representerer situasjoner der ett kjørefelt stenges. Dette kan på samme måte som i scenario 2 oppstå i forbindelse med hendelser som nødstop og mindre ulykker. Med stengt kjørefelt menes situasjoner der både ytre vegskulder og ytre kjørefelt er stengt, og trafikken fortsatt holdes gående i indre kjørefelt. På tverrprofil med smal skulderbredden er det større fare for at hendelser fører til at deler av ytre kjørefelt blokkeres. For slike tverrprofil kan det oftere oppstå situasjoner der ett kjørefelt må stenges enn for profiler med tilstrekkelig bred skulder. I scenario 2 er hele skulderbredden på 2,75 m stengt. På strekninger med smal skulderbredde, som i denne analysen vil gjelde for skulderbredder mindre eller lik 1,50 m, vil slike scenarioer føre til at hele skulderbredden i tillegg til en del av det ytterste kjørefeltet blokkeres. I dette scenarioet er det tenkt at dette vil føre til at hele kjørefeltet oppfattes som stengt. Scenario 3 er gjeldende for profilet på 19 og 17 m som har ytre skulderbredde mindre eller lik 1,50 m.

De tre scenarioene er oppsummert i Tabell 7.

*Tabell 7: Oppsummering av scenarioer*

<b>Scenario</b>	<b>Beskrivelse</b>	<b>Gjeldende profil</b>
1	Normal drift	23, 21, 19, 17
2	Stengt skulder	23, 21
3	Stengt kjørefelt	19, 17

## 4.2 Framkommelighet

HCM og den danske håndboken «Kapacitet og Serviceniveau» bygger mye på de samme prinsippene, men er noe forskjellige i grunnleggende verdier og framgangsmåte. I analysen er det valgt å utføre beregninger med grunnlag i begge håndbøkene og undersøke hvordan dette spiller inn på resultatet. I første del av analysen estimeres effekter på kapasitet og service-nivå for belastningsgrad mindre enn 1,0. Deretter estimeres effekter på kø og forsinkelse som oppstår når belastningsgraden overstiger 1,0.

### 4.2.1 Kapasitet og service-nivå

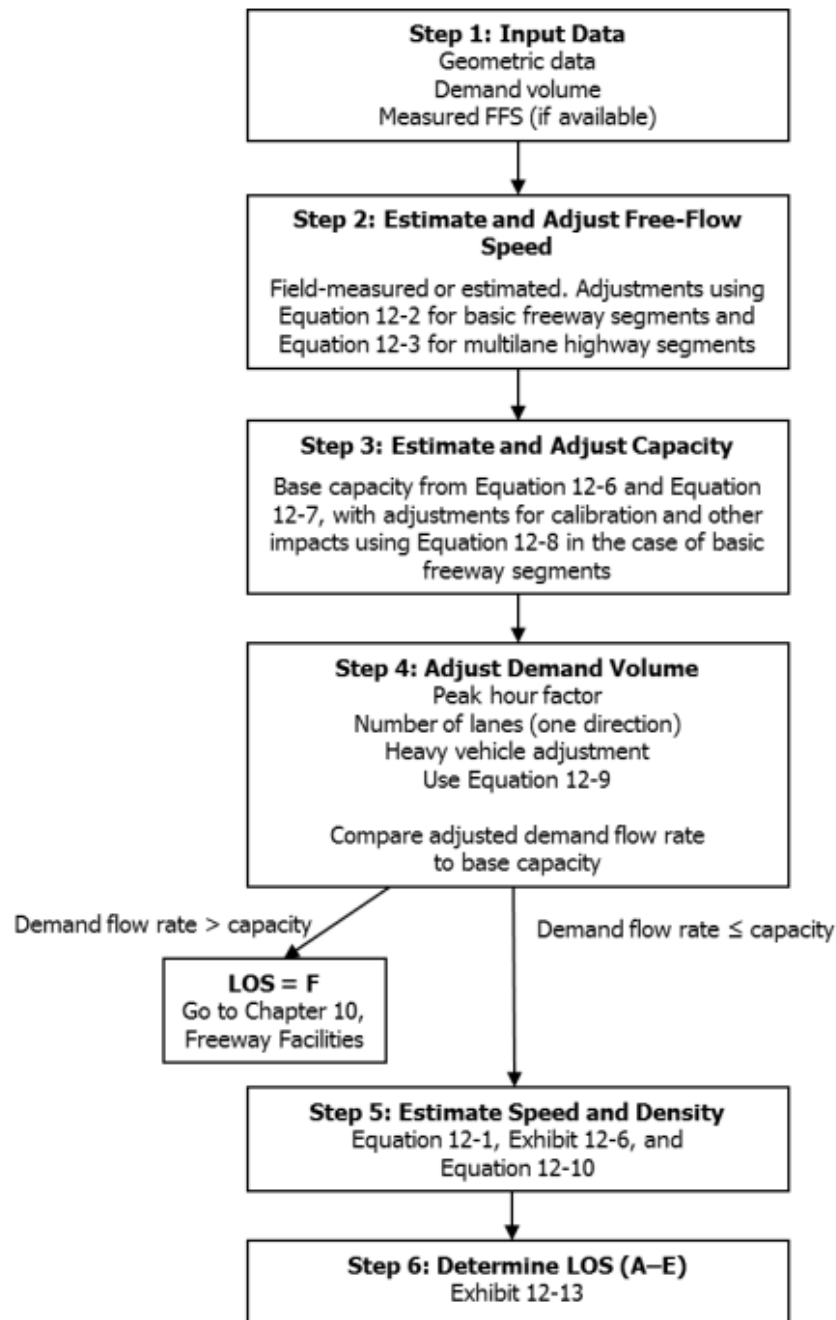
I HCM er det utviklet en operasjonell analysemetode for å beregne service-nivået på et grunnleggende motorvegsegment med en FFH mellom 90 og 120 km/t (Transportation Research Board, 2016). Figur 18 viser en oversikt over metodikken for de seks stegene som inngår i metoden. Analysens framgangsmåte vil i stor grad følge metoden beskrevet i HCM, men deler av metoden er omgjort og tilpasset denne oppgaven. Videre i dette kapitlet vil framgangsmåten og hvilke forutsetninger som ligger til grunn for beregningene i de ulike stegene nærmere beskrives.

Noen av formlene som inngår i metoden er utviklet for HCM-verdier. Det betyr at bredder og hastigheter som inngår i formlene er oppgitt med imperiske måleenheter (feet og miles), mens det gjennom oppgaven er benyttet metriske enheter (meter og kilometer). For å kunne benytte metrisk hastighetsenhet (km/t) i disse formlene må hastighetsverdier multipliseres med en faktor på 0,6214, som tilsvarer antall miles per kilometer. Km/t kan dermed omregnes til mi/h med Formel 6. Omregning av antall meter til feet kan gjøres med Formel 1 som er forklart tidligere.

$$mi = km * 0,6214$$

*Formel 6*

Oppsettet på regnearket som er brukt til å utføre beregninger er vist i Vedlegg 1. I dette regnearket er omregningsfaktorer inkludert i formlene, og det er dermed mulig å benytte metriske verdier direkte i regnearket.



Figur 18: Oversikt over metode for beregning av service-nivå (Transportation Research Board, 2016, s. 12-26)

### Steg 1: Inngangsdata

Det første steget er innsamling av data som brukes som input i analysen (Transportation Research Board, 2016, s. 12-27). For å utføre analysen kreves detaljer om geometriske egenskaper og etterspørselskarakteristikk i analyseperioden. Under er det gitt en beskrivelse av inngangsparametere og forhold som benyttes i videre beregninger.

## **Geometrisk utforming**

Grenseverdier for de geometriske egenskapene som inngår i analysen er gjennomgått i delkapittel 4.1. Tabell 6 gir en oversikt over tverrprofilene og tilhørende utformingsverdier som i forskjellig grad vil påvirke FFH og kapasiteten på strekningen.

## **Grunnleggende FFH**

Det er tatt utgangspunkt i at motorvegsegmentene har en fartsgrense på 110 km/t. Grunnleggende FFH for et motorvegsegment med ideelle forhold er i HCM anslått til 121,3 km/t. Denne hastigheten virker i overkant høy når fartsgrensen er 110 km/t. Videre i analysen er det valgt å sette grunnleggende FFH lik skiltet hastighet.

## **Etterspørselsintensitet**

I HCM er etterspurt trafikkmengde i antall kjøretøy per time benyttet som inngangsverdi. I denne analysen er det heller valgt å benytte etterspørselsintensitet i antall personbiler per time per kjørefelt, som deretter omregnes til etterspurt trafikkmengde for bestemte forhold. Etterspørselsintensiteten kan settes lik en verdi fra null til maksimal kapasitet.

## **ÅDT-T**

ÅDT-T angir hvor stor andel av trafikken som er tunge kjøretøy. Denne andelen vil ha stor betydning for avviklingskvaliteten på strekningen.

## **Rampetetthet**

I HCM er rampetettheten definert som gjennomsnittlig antall på- og avkjøringsramper per 1,6 km, som tilsvarer en mile, i den aktuelle kjøreretningen. I analysen er det valgt å se på motorvegsegmenter som ikke påvirkes av på- og avkjøringsramper. Rampetettheten settes dermed lik 0,0.

## **Dimensjonerende timefaktor (PHF)**

PHF representerer variasjon i trafikkmengde i den mest trafikkerte timen. Faktoren identifiserer de 15 minuttene med høyest volum i den mest trafikkerte timen og tar høyde for at de 15 minuttene med høyest volum ikke opprettholdes gjennom hele timen. En faktor lik 1,00 indikerer at hvert 15-minutters intervall i den dimensjonerende timen har lik trafikkmengde. Typiske verdier for PHF på motorveger ligger mellom 0,85 og 0,98. Lave verdier, og mer variabel trafikkstrøm, er vanligere for landlige forhold med lavere trafikkmengde, mens høye verdier er vanlig for mer urbane forhold. I HCM benyttes en standardverdi på 0,94 for motorvegsegmenter (Transportation Research Board, 2016).

## **Terreng**

Terreng deles inn i to typer: flatt og kupert. De to terrenntypene kan karakteriseres som følger:

- Flatt terreng tilsvarer en kombinasjon av stigning og horisontal- og vertikalkurvatur som tillater tunge kjøretøy å holde jevn høy hastighet. Består vanligvis av korte stigninger opp mot 2 %
- Kupert terreng tilsvarer en kombinasjon av stigning og horisontal- og vertikalkurvatur som fører til at tunge kjøretøy ikke klarer å opprettholde samme hastighet over tid

Terrenntype har stor effekt på hvordan tunge kjøretøy vil påvirke trafikken. For å ta høyde for denne effekten benyttes en omjusteringsfaktor  $E_T$ . En trafikkstrøm som består av en blanding av personbiler og tunge kjøretøy omformes til en uniform strøm med en faktor som angir hvor mange personbiler som er ekvivalent med ett tungt kjøretøy. For flatt terreng er  $E_T$  lik 2,0, og for kupert terreng er  $E_T$  lik 3,0 (Transportation Research Board, 2016, s. 12-35).

## **Trafikanttype**

Hvilke typer trafikanter som befinner seg i trafikken påvirker vegens kapasitet og FFH. Når en større mengde ukjente trafikanter befinner seg i en trafikkstrøm kan det forventes en reduksjon i FFH. Det kan i perioder gi redusert kapasitet på strekningen og lavere service-nivå. For å reflektere disse effektene brukes justeringsfaktorer. En faktor med verdi lik 1,00 reflekterer en trafikkstrøm sammensatt av pendlere og andre «vanlige» trafikanter som kjører regelmessig (Transportation Research Board, 2016). Siden det ikke foreligger noen spesifikk data om trafikanttype i denne analysen, vil faktoren settes lik 1,0.

## **Kapasitets- og hastighetsjusteringer**

I analysen benyttes kapasitetsjusteringsfaktorer for ulike scenarioer. Omstendighetene rundt kapasitets-reducerende effekter er grundigere forklart i kapittel 3.2.3.

Det er valgt å ikke ta høyde for hastighetsjusteringer for de ulike scenarioene. Hastigheten vil indirekte påvirkes av justeringer av kapasiteten på segmentet.

## **Andre forhold**

Det finnes flere forhold som kan spille en rolle for kapasitetsberegningen, men som ikke inngår her. Dette kan for eksempel være værmessige forhold, vegens tekniske standard og arbeidssoner på eller langs veien.



## Steg 2: Estimer og juster FFH

Det neste steget går ut på å estimere og justere FFH. FFH kan enten bestemmes direkte fra feltobservasjoner eller estimeres fra beregninger. I denne oppgaven er det ikke mulig å fastsette FFH fra observasjoner. Formel 7, hentet fra HCM, er dermed brukt for å beregne FFH for et motorveg-segment. I formelen er leddet for total rampetetthet fjernet som følge av at det i analysen bare blir sett på motorvegsegmenter uten påvirkning fra på- og avkjøringsramper. En annen forskjell er at symbolet for fri-flyt hastighet i HCM er FFS, mens det gjennom oppgaven er benyttet FFH. For å unngå forvirring er det valgt å benytte FFH i formlene som beskrives her.

$$FFH = BFFH - f_{LW} - f_{RLC}$$

Formel 7

der

$FFH$  = fri-flyt hastighet på motorvegsegment (km/t);

$BFFH$  = grunnleggende fri-flyt hastighet for et motorvegsegment med ideelle forhold (km/t);

$f_{LW}$  = hastighetsjustering for bredde på kjørefelt (km/t); og

$f_{RLC}$  = hastighetsjustering for fri sidebredde mot høyre som her tilsvarende ytre skulderbredde (km/t)

(Transportation Research Board, 2016, s. 12-27)

Hvilke verdier som brukes til å justere FFH etter kjørefeltbredde og fri sidebredde er vist i Tabell 8 og Tabell 9. Som en forenkling i denne analysen er det valgt å sette fri sidebredde lik ytre skulderbredde. For å gjøre det enklere å benytte verdiene fra HCM er de omgjort fra mi/h og ft til km/t og m. Ved å interpolere verdiene fra HCM er det funnet justeringsverdier som representerer de breddene som sammenfaller med tverrprofilene som analyseres. Justeringsverdien for kjørefeltbredde gjelder for gjennomsnittlig kjørefeltbredde i hver retning.

Tabell 8: Justering av FFH for gjennomsnittlig kjørefeltbredde (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29)

Kjørefeltbredde (m)	$f_{LW}$ (km/t)
3,66	0,00
3,50	1,58
3,38	2,84

Tabell 9: Justering av FFH for fri sidebredde mot høyre (Transportation Research Board, 2016, s. 12-29)

Fri sidebredde (m)	$f_{RLC}$ (km/t)
1,83	0,00
1,50	1,04
0,75	3,42

Med de hastighetsreducerende effektene fra Tabell 8 og Tabell 9 kan FFH estimeres for bredden på tverrprofilet. Estimert FFH for de fire tverrprofilene er vist i Tabell 10. I tabellen observeres det at profilet på 21 m vil ha en litt lavere FFH enn profilet på 19 m. Dette fordi en reduksjon fra 3,50 til 3,25 m på indre kjørefelt vil ha en større påvirkning på FFH enn en reduksjon i skulderbredde og midtdeler. Det minste profilet på 17 m vil ha en FFH som er 6,3 km/t under grunnleggende FFH. Dette er en stor forskjell sammenlignet med profilet på 19 m som kun har en reduksjon på 2,6 km/t.

Tabell 10: Estimert FFH for ulike tverrprofil under normale forhold

Profil (m)	FFH (km/t)
23	108,4
21	107,2
19	107,4
17	103,7

Redusert FFH avhenger av vegens utforming. I tillegg kan det tenkes at scenario 2 (stengt skulder) og 3 (stengt kjørefelt) vil ha en større påvirkning på trafikantenes valg av hastighet. Spesielt for scenario 3 vil det være flere faktorer som påvirker FFH som for eksempel andel tunge kjøretøy, feltskifte i forkant av sperring og redusert skiltet hastighet. I HCM er det ingen tilgjengelig informasjon om hvilken effekt kapasitetsreducerende hendelser vil ha på FFH. Det er dermed valgt å ikke ta hensyn til justert FFH for scenario 2 og 3 (Transportation Research Board, 2016, s. 11-44).

### **Steg 3: Estimer og juster kapasitet**

I HCM kan grunnleggende kapasitet for et grunnleggende motorvegsegment estimeres fra Formel 8. Kapasiteten er en funksjon av segmentets FFH og kan ikke overstige en grunnleggende kapasitet på 2 400 pbe/t/felt. For å benytte metrisk hastighetsenhet i formelen må hastigheten omregnes til mi/h med Formel 6.

$$c = 2\,200 + 10 \cdot (\text{MIN}(70; FFH - 50))$$

Formel 8

der  $c$  er grunnleggende kapasitet i antall personbiler per time per felt.

(Transportation Research Board, 2016, s. 12-32)

Den danske håndboken har satt grunnleggende kapasitet lik 2 300 pbe/t/felt. I motsetning til HCM, som justerer grunnleggende kapasitet for justert FFH, blir den grunnleggende kapasiteten i den danske håndboken direkte justert med korreksjonsfaktorer for kjørefeltbredde og fri sidebredde. Det skilles mellom korreksjonsfaktorer for kjørefelt med nesten kun person- og varebiler og kjørefelt der det også er tunge kjøretøy. Figur 12 viser at kjørefelt med nesten kun person- og varebiler vil ha en korreksjonsfaktor lik 1,00 for bredder på kjørefeltet mellom 3,50 og 3,25 m og fri sidebredde større eller lik 0,00 m. Det vil dermed ikke være nødvendig å korrigere grunnleggende kapasitet på slike kjørefelt. For kjørefelt med tunge kjøretøy vil det være større behov for å korrigere kapasiteten. Her justeres kapasiteten for kjørefeltbredder mindre eller lik 3,25 m uavhengig av fri sidebredde og for kjørefeltbredde på 3,50 m dersom fri sidebredde er lik 0,00 m.

#### *Kapasitetsjusteringsfaktor*

Den estimerte kapasiteten kan deretter justeres for lokale variasjoner og andre faktorer som påvirker kjøreforholdene. Dette gjøres ved å benytte en kapasitetsjusteringsfaktor som vist i Formel 9.

$$c_{adj} = c \cdot CAF$$

Formel 9

der

$c_{adj}$  = justert kapasitet på segmentet (pbe/t/felt);

$c$  = grunnleggende kapasitet på segmentet (pbe/t/felt); og

$CAF$  = kapasitetsjusteringsfaktor

(Transportation Research Board, 2016, s. 12-33).

For ideelle forhold vil CAF settes lik 1,00. I HCM medfører scenario 2 og 3 en kapasitetsjustering på henholdsvis 0,81 og 0,70 av den grunnleggende kapasiteten på gjenværende kjørefelt. Nedsatt kapasitet for de samme scenarioene er i den danske håndboken oppgitt som 1 400 og 1 150 pbe/t/felt. Kapasitetsjusteringsfaktorer, som tilsvarer verdien på den nedsatte kapasiteten, kan beregnes som forholdet mellom nedsatt kapasitet og grunnleggende kapasitet. CAF-verdiene for de ulike tverrprofilene og scenarioene med danske kapasitetsverdier blir dermed som vist i Tabell 11.

Tabell 11: Kapasitetsjusteringsfaktor for kapasitetsverdier fra dansk håndbok

Scenario	$c_{adj}$	$c$	CAF ( $c_{adj}/c$ )
Stengt skulder	1 400	2 300	0,61
Stengt kjørefelt	1 150	2 300	0,50

I Tabell 12 og Tabell 13 er kapasiteten beregnet med framgangsmåten og verdier fra HCM og den danske håndboken. Beregnet kapasitet er gjennomsnittlig kapasitet for kjørefeltene i samme retning.

Tabell 12: Grunnleggende kapasitet for ulike scenarioer basert på HCM

Profil (m)	Kapasitet (pbe/t/felt)		
	Normal drift	Stengt skulder	Stengt kjørefelt
23	2 374	1 923	-
21	2 366	1 916	-
19	2 367	-	1 657
17	2 345	-	1 641

Tabell 13: Grunnleggende kapasitet for ulike scenarioer basert på dansk håndbok

Profil (m)	Kapasitet (pbe/t/felt)		
	Normal drift	Stengt skulder	Stengt kjørefelt
23	2 300	1 400	-
21	2 300	1 400	-
19	2 300	-	1 150
17	2 300	-	1 150

#### **Steg 4: Juster etterspørselsintensitet**

I motsetning til HCM, som justerer etterspurt trafikkmengde oppgitt som  $kjt/t$  til etterspørselsintensitet oppgitt som  $pbe/t/felt$ , er det i denne analysen valgt å gå motsatt veg. Her vil etterspurt trafikkmengde beregnes ut fra en valgt etterspørselsintensitet. Dette gjøres med Formel 10 som er hentet fra HCM, men omformet med hensyn på  $V$ .

$$V = v_p \cdot (PHF \cdot N \cdot f_{HV})$$

Formel 10

der

$V$  = etterspurt trafikkmengde under aktuelle forhold (kjt/t);

$v_p$  = etterspørselsintensitet under tilsvarende forhold (pbe/t/felt);

$PHF$  = dimensjonerende timefaktor (desimal);

$N$  = antall kjørefelt i den analyserte retningen (felt); og

$f_{HV}$  = justeringsfaktor for tilstedeværelse av tunge kjøretøy (desimal)

(Transportation Research Board, 2016, s. 12-33)

For å beregne ÅDT må etterspurt trafikkmengde omgjøres fra kjøretøy per time til kjøretøy per døgn. Dette gjøres ved å benytte Formel 11. Denne formelen er også hentet fra HCM, men omformet med hensyn på ÅDT.

$$\text{ÅDT} = \frac{DDHV}{K \cdot D} = \frac{V}{K \cdot D}$$

Formel 11

der

$\text{ÅDT}$  = gjennomsnittlig døgntrafikk (kjt/d);

$DDHV$  = retningsbestemt trafikkmengde i dimensjonerende time (kjt/t);

$K$  = andel av ÅDT i dimensjonerende time (desimal); og

$D$  = andel av trafikkmengde i dimensjonerende time i mest trafikkerte retning (desimal)

(Transportation Research Board, 2016, s. 12-50)

*K- og D-faktor*

For K-faktoren benyttes høye prosentandeler på strekninger med konsentrert rushtrafikk og lave prosentandeler på strekninger med mindre utpreget rushtrafikk. Vanligvis vil faktoren ligge mellom 0,08 og 0,10 på urbane motorveger og mellom 0,09 og 0,13 på landlige motorveger (Transportation Research Board, 2016, s. 12-50). En verdi på 0,12 vil i de fleste tilfeller gi tilstrekkelig nøyaktighet for motorveger utenfor tettbygd strøk. I denne analysen er det valgt å benytte en K-faktor lik 0,10 i videre beregninger. D-faktoren vil også variere avhengig av trafikkstrømmen på strekningen. På strekninger med utpreget rushtrafikk vil det ofte være en skjev fordeling av trafikkstrømmene. I HCM er det angitt en vanlig

retningsfordeling for både urban og landlig motorveg på 45/55 %. I Norge er det vanligere å anta en fordeling på 33/67 % dersom retningsfordelingen ikke er kjent (Statens vegvesen, 2014a). Dette gir en D-faktor lik 0,55 i HCM og 0,67 i Norge. Det er valgt å benytte en D-faktor lik 0,67 i videre beregninger. Både K- og D-faktoren har signifikant påvirkning på den estimerte døgntrafikken.

#### *Justering for tunge kjøretøy*

For å justere for andel tunge kjøretøy benyttes Formel 12. Beregnet justeringsfaktor for ulike andeler tunge kjøretøy i trafikken er vist i Tabell 14.

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1)}$$

*Formel 12*

der

$f_{HV}$  = justeringsfaktor for tunge kjøretøy (desimal);

$P_T$  = andel tunge kjøretøy i trafikken (desimal); og

$E_T$  = personbilekvivalent av ett tungt kjøretøy i trafikken (pbe)

(Transportation Research Board, 2016, s. 12-34)

*Tabell 14: Justeringsfaktor for andel tunge kjøretøy*

$P_T$ (%)	$f_{HV}$
10	0,91
15	0,87
20	0,83

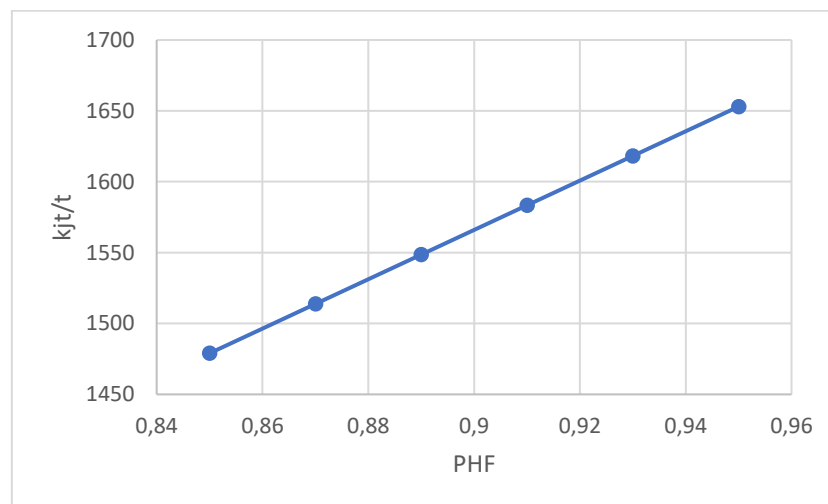
Alle beregninger i analysen utføres for en fast andel tungtrafikk på 15 %. Det benyttes følgelig en justeringsfaktor lik 0,87 i videre beregninger.

#### *Dimensjonerende timefaktor*

Dimensjonerende timefaktor vil normalt ligge mellom 0,85 og 0,98. Faktoren er avhengig av etterspørselsintensiteten på segmentet, og vil vanligvis øke når intensiteten øker og service-nivået faller. Dersom faktoren settes lavere i beregningsmodellen enn hva som er målt verdi fra en virkelig strekning, kan beregnet service-nivå også bli lavere enn det virkelige service-nivået. Siden det i denne analysen kun velges en enkelt PHF er det valgt å benytte en dimensjonerende timefaktor lik 0,94, som også er standard verdi i HCM. En studie som samlet inn 28 394 PHF-verdier fra forskjellige daglige,

sesongmessige og operasjonelle forhold fra motorveger i Wisconsin, USA, estimerte hvordan PHF-verdiene varierte avhengig av etterspørselsintensitet og service-nivå. Variasjonen var betraktelig større for service-nivå A (0,7563 – 0,9942) enn for nivå E (0,8935 – 0,9972). Det vil dermed være mindre sannsynlighet for at den virkelige PHF-verdien er signifikant lavere enn valgt PHF-verdi dersom service-nivået er nærmere E enn A (Dehman & Drakopoulos, 2016). En verdi på 0,94 vil være tilstrekkelig høy til at resultatet ikke avviker for mye fra virkelige verdier når etterspørselsintensiteten er høy.

Hvilke verdier som velges for faktorene K, D og PHF vil ha en innvirkning på estimert etterspurt trafikkmengde og døgnetrafikk. Faktorene vil dermed også påvirke belastningsgraden og service-nivået på segmentet. Variasjoner i PHF vil dessuten påvirke estimert etterspurt trafikkmengde. Figur 19 viser hvordan etterspurt trafikkmengde endres når PHF øker fra 0,85 til 0,95 for en etterspørselsintensitet på 1 000 pbe/t/felt og normale forhold på strekningen. PHF lik 0,85 vil gi en trafikkmengde rundt 1 475 kjt/t, mens PHF lik 0,95 vil gi en trafikkmengde rundt 1 650 kjt/t.



Figur 19: Variasjon i estimert etterspurt trafikkmengde avhengig av valgt PHF

For etterspørselsintensitet på 1 000 pbe/t/felt og standardverdi på PHF lik 0,94 vil etterspurt trafikkmengde være lik 1 635 kjt/t. I en omregning fra kjt/t til kjt/d vil variasjoner i K- og D-faktor ha stor påvirkning. Tabell 15 viser estimert ÅDT med forskjellige K- og D-verdier for en etterspørsels-intensitet på 1 000 pbe/t/felt og PHF lik 0,94.

Tabell 15: Variasjon i estimert ÅDT avhengig av valgt K- og D-faktor

<b>K/D</b>	<b>0,55</b>	<b>0,60</b>	<b>0,67</b>
<b>0,13</b>	22 864	20 959	18 769
<b>0,11</b>	27 021	24 769	22 182
<b>0,09</b>	33 026	30 274	27 111

En kombinasjon av K lik 0,13 og D lik 0,67 gir ÅDT på 18 769 kjt/d. I motsatt ende, med en kombinasjon av K lik 0,09 og D lik 0,55, vil ÅDT være nesten dobbelt så stor på 33 026 kjt/d. Med andre ord vil faktorene være avgjørende når det estimeres døgntrafikk basert på valgt etterspørselsintensitet.

### **Steg 5: Estimer hastighet og tetthet**

Tidligere er FFH justert for geometriske egenskaper. Videre vil FFH også påvirkes av etterspørselsintensiteten på segmentet. FFH vil avta gradvis etter hvert som intensiteten øker. Den etterspørselsintensiteten som fører til at FFH begynner å avta kalles bruddpunktet og oppgis som pbe/t/felt. Bruddpunktet beregnes med Formel 13. For å benytte metrisk hastighetsenhet i formelen må hastigheten omregnes til mi/h med Formel 6.

$$BP = [1\ 000 + 40 \cdot (75 - FFH)] \cdot CAF^2$$

der *BP* er bruddpunktet i antall personbiler per time per felt. Andre variabler er tidligere forklart.

*Formel 13*

(Transportation Research Board, 2016, s. 12-10)

Når både FFH og CAF er kjent kan bruddpunktet beregnes. Tabell 16 og Tabell 17 viser beregnet bruddpunkt for alle tverrprofil og scenarioer for både HCM og den danske håndboken. Her er det benyttet samme FFH både for HCM og dansk håndbok. Forskjellen i CAF-verdier mellom de to håndbøkene gjør at beregnet bruddpunkt er mye lavere for scenario 2 og 3 med danske verdier. Det er knyttet noe usikkerhet til beregnet bruddpunkt med danske verdier. Denne usikkerheten er nærmere beskrevet mot slutten av steg 5 og i kapittel 5.2.



Tabell 16: Beregnet bruddpunkt for ulike scenarier basert på verdier fra HCM

Profil (m)	Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)		
	Normal drift	Stengt skulder	Stengt kjørefelt
23	1 305	856	-
21	1 337	877	-
19	1 331	-	652
17	1 422	-	697

Tabell 17: Beregnet bruddpunkt for ulike scenarier basert på verdier fra dansk håndbok

Profil (m)	Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)		
	Normal drift	Stengt skulder	Stengt kjørefelt
23	1 305	483	-
21	1 337	495	-
19	1 331	-	333
17	1 422	-	355

Så lenge etterspørselsintensiteten er mindre eller lik bruddpunktet ( $v_p \leq BP$ ) vil FFH holdes konstant og Formel 14 benyttes for å estimere hastighet.

$$S = FFH$$

Formel 14

Dersom etterspørselsintensiteten ligger i området mellom bruddpunktet og kapasiteten ( $BP < v_p \leq c$ ) benyttes Formel 15 til å beregne den nye hastigheten på segmentet.

$$S = FFH - \frac{\left(FFH - \frac{c_{adj}}{D_c}\right)(v_p - BP)^a}{(c_{adj} - BP)^a}$$

Formel 15

der

$S$  = trafikkstrømmens gjennomsnittlige hastighet (km/t);

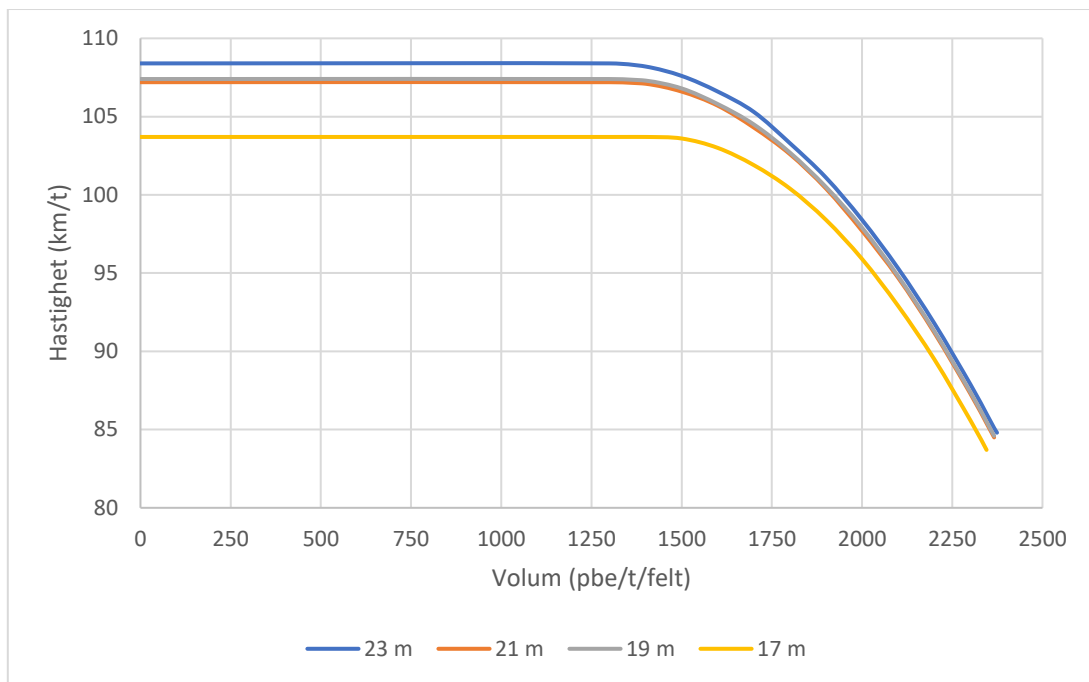
$D_c$  = tetthet ved kapasitet (= 28 pbe/km/felt); og

$a$  = kalibreringsparameter (= 2,0 for motorveg)

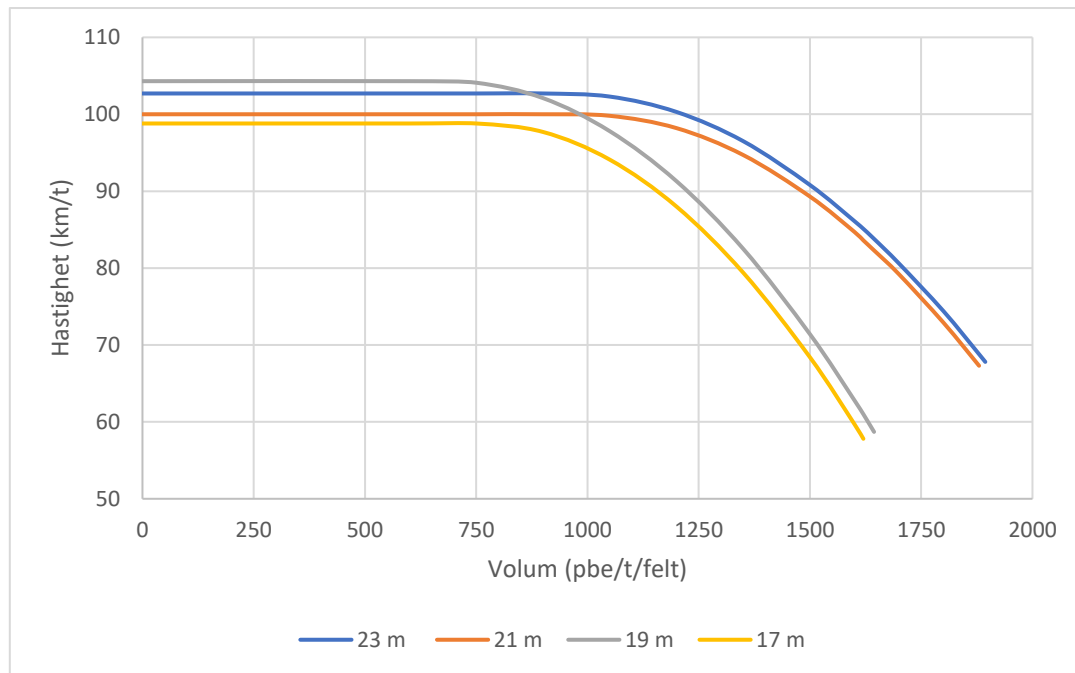
Andre variabler er tidligere forklart.

(Transportation Research Board, 2016, s. 12-10)

Figur 20 viser hastighetskurver estimert for de ulike tverrprofilene under normal drift med HCM-verdier, mens Figur 21 viser hastighetskurver estimert for tverrprofilene på 23 og 21 m med stengt skulder og tverrprofilene på 19 og 17 m med stengt kjørefelt med HCM-verdier.



Figur 20: Hastighet-volum-kurve scenario 1 HCM



Figur 21: Hastighet-volum-kurve scenario 2 + 3 HCM

Sammenlignet med hastighetskurvene for scenario 1 kan det observeres at den estimerte hastigheten begynner å avta ved lavere etterspørselsintensitet for scenario 2 og 3. I tillegg synker hastighetskurvene til lavere hastigheter ved høy etterspørselsintensitet enn ved normale forhold. Kurvene viser en tendens til at jo større den kapasitetsreducerende effekten er, desto brattere og lavere vil kurven falle etter bruddpunktet.

Med teori og verdier fra den danske håndboken vil det ikke oppstå kapasitetsreducerende effekter som følge av de forskjellige breddene på tverrprofilene som er analysert. Siden kapasiteten er konstant for alle tverrprofilene under samme scenario, betyr dette at FFH også vil holdes lik for de analyserte tverrprofilene. Å anta en justert FFH som for HCM vil dermed bli feil når kapasiteten holdes uendret. På grunn av stor usikkerhet knyttet til estimering av FFH for danske verdier ved bruk av HCM-metoden er det valgt å kun fremstille hastighetskurver for de ulike scenarioene med verdier fra HCM.

Etter at hastigheten er estimert beregnes tettheten for trafikkstrømmen med Formel 16.

$$D = \frac{v_p}{S}$$

Formel 16

der  $D$  er tettheten oppgitt som antall personbiler per km per felt. Andre variabler er tidligere forklart.

(Transportation Research Board, 2016, s. 12-39)

## **Steg 6: Fastslå service-nivå**

I det siste steget fastslås strekningens service-nivå. Service-nivået kan finnes ved å sammenligne beregnet verdi for tetthet med verdiene i Tabell 18 som viser krav til maksimal tetthet ved ulike service-nivå.

*Tabell 18: Tetthetskrav for ulike service-nivå på motorvegsegment omgjort fra mi til km (Transportation Research Board, 2016, s. 12-19)*

<b>Service-nivå</b>	<b>Tetthet (pbe/km/felt)</b>
A	0 – 7
B	7 – 11
C	11 – 16
D	16 – 22
E	22 – 28
F	> 28

Med tetthet som krav til service-nivå er det i Tabell 19 til 21 beregnet belastningsgrad, hastighet og etterspørselsintensitet ved maksimal tetthet for hvert service-nivå. Tabellene gir et estimat på hvilke service-volum som kan avvikles på et motorvegsegment under bestemte forhold. Service-volumet kan estimeres både for timesvolum (kjt/t) og daglig volum (kjt/d). Service-volum for en time er det maksimale timesvolumet som kan avvikles for et service-nivå i den 15-min-perioden med mest trafikk i løpet av en analysert time, mens daglig service-volum er det største daglige volumet som kan avvikles basert på den 15-min-perioden med mest trafikk i løpet av et analysert døgn. Timesvolumet representerer service-volum for en bestemt retning, mens daglig volum er oppgitt som totalt volum i begge retninger (Transportation Research Board, 2016).

Forholdene som ligger til grunn for de estimerte resultatene er 15 % tunge kjøretøy, flatt terreng, PHF = 0,94, D = 0,67 og K = 0,10. På grunn av stor usikkerhet knyttet til bruk av danske verdier i formler fra HCM-metoden tilpasset HCM-verdier, er det ikke laget service-volum-tabeller for de danske verdiene basert på service-nivå med tetthetskrav.

Tabell 19: Service-volum-tabell HCM scenario 1

	<b>Service-nivå</b>				
<b>Kriterium</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Profil 23</b>					
Belastningsgrad (v/c)	0,32	0,50	0,71	0,88	1,00
Hastighet (km/t)	108,4	108,4	105,4	95,3	84,8
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	760	1 190	1 685	2 100	2 374
Service-volum (kjt/t)	1 242	1 945	2 755	3 433	3 881
Daglig service-volum (kjt/d)	18 544	29 036	41 114	51 239	57 925
<b>Profil 21</b>					
Belastningsgrad (v/c)	0,32	0,50	0,71	0,88	1,00
Hastighet (km/t)	107,2	107,2	104,7	95,0	84,5
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	750	1 180	1 675	2 090	2 366
Service-volum (kjt/t)	1 226	1 929	2 738	3 417	3 868
Daglig service-volum (kjt/d)	18 300	28 792	40 870	50 995	57 730
<b>Profil 19</b>					
Belastningsgrad (v/c)	0,32	0,50	0,71	0,88	1,00
Hastighet (km/t)	107,4	107,4	104,9	95,1	84,6
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	750	1 180	1 679	2 094	2 367
Service-volum (kjt/t)	1 226	1 929	2 738	3 417	3 870
Daglig service-volum (kjt/d)	18 300	28 792	40 870	50 995	57 754
<b>Profil 17</b>					
Belastningsgrad (v/c)	0,31	0,48	0,70	0,88	1,00
Hastighet (km/t)	103,7	103,7	102,6	94,0	83,7
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	725	1 140	1 640	2 065	2 345
Service-volum (kjt/t)	1 185	1 864	2 681	3 376	3 834
Daglig service-volum (kjt/d)	17 690	27 816	40 016	50 385	57 217

Tabell 19 viser estimerte verdier for ulike tverrprofil under scenario 1 med kapasitetsverdier fra HCM. Forskjellen i FFH mellom profilene er størst for service-nivå A, og minker jo lavere service-nivået blir. Ved maksimalt utnyttet kapasitet er estimert FFH tilnærmet lik for alle profilene.

Tabell 20: Service-volum-tabell HCM scenario 2

	<b>Service-nivå</b>				
<b>Kriterium</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Profil 23</b>					
Belastningsgrad (v/c)	0,40	0,60	0,78	0,92	1,00
Hastighet (km/t)	108,4	105,2	93,9	79,9	68,6
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	760	1 160	1 500	1 760	1 923
Service-volum (kjt/t)	1 242	1 896	2 452	2 877	3 144
Daglig service-volum (kjt/d)	18 544	28 304	36 600	42 944	46 921
<b>Profil 21</b>					
Belastningsgrad (v/c)	0,39	0,60	0,78	0,92	1,00
Hastighet (km/t)	107,2	104,5	93,5	79,5	68,5
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	750	1 150	1 495	1 755	1 916
Service-volum (kjt/t)	1 226	1 880	2 444	2 869	3 132
Daglig service-volum (kjt/d)	18 300	28 060	36 478	42 822	46 750

Tabell 21: Service-volum-tabell HCM scenario 3

	<b>Service-nivå</b>				
<b>Kriterium</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Profil 19</b>					
Belastningsgrad (v/c)	0,45	0,65	0,81	0,93	1,00
Hastighet (km/t)	106,9	98,4	84,1	69,8	59,2
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	750	1 085	1 350	1 540	1 657
Service-volum (kjt/t)	613	887	1 103	1 259	1 354
Daglig service-volum (kjt/d)	9 150	13 237	16 470	18 788	20 215
<b>Profil 17</b>					
Belastningsgrad (v/c)	0,44	0,65	0,81	0,93	1,00
Hastighet (km/t)	103,7	96,9	83,5	69,0	58,6
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	725	1 065	1 330	1 525	1 641
Service-volum (kjt/t)	593	871	1 087	1 247	1 341
Daglig service-volum (kjt/d)	8 845	12 993	16 226	18 605	20 020

Tabell 20 og 21 viser estimerte verdier for ulike tverrprofil under scenario 2 og 3 med kapasitetsverdier fra HCM. En sammenligning av estimerte verdier for hvert service-nivå for scenario 2 og 3 viser at det er store forskjeller i service-volum. For eksempel kan det med hensyn på service-nivå C observeres at maksimalt service-volum er estimert til ca. 2 450 kjt/t for et profil på 23 m med stengt skulder, sammenlignet med ca. 1 100 kjt/t for et profil på 19 m med stengt kjørefelt.

Med utgangspunkt i tidligere gjennomgått teori om forholdet mellom service-nivå og belastningsgrad bør belastningsgraden ligge innenfor intervallene i Tabell 2 som viser omtrentlig øvre og nedre grenseverdi for de ulike service-nivåene. Resultatene i Tabell 21 for scenario 3 viser at den estimerte belastningsgraden overstiger anbefalte verdier for både service-nivå A, B, C og D. For å få verdier som bedre gjenspeiler de ulike service-nivåene, og for å sammenligne service-nivå med kapasitetsverdier fra HCM og dansk håndbok, er det i Tabell 22 og Tabell 23 beregnet maksimal etterspørselsintensitet og service-volum for scenario 2 og 3 med utgangspunkt i belastningsgradene fra Tabell 2. Nye beregninger er kun utført for tverrprofil på 23 og 19 m ettersom det vil være små forskjeller i resultatet mellom de ulike profilene som inngår i hvert scenario. Med belastningsgrad som indikator, uten å ta høyde for

endringer i FFH, kan danske verdier direkte sammenlignes med HCM-verdier. Videre er «DK» benyttet for å omtale verdier basert på dansk håndbok.

Tabell 22: Service-volum-tabell basert på belastningsgrad for scenario 2 og profil 23

	<b>Belastningsgrad (v/c)</b>				
<b>Kriterium</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>
<b>DK</b>					
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	560	840	1 120	1 260	1 400
Service-volum (kjt/t)	915	1 373	1 831	2 060	2 289
Daglig service-volum (kjt/d)	13 657	20 493	27 328	30 746	34 164
<b>HCM</b>					
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	769	1 154	1 538	1 731	1 923
Service-volum (kjt/t)	1 257	1 887	2 514	2 830	3 144
Daglig service-volum (kjt/d)	18 763	28 157	37 527	42 236	46 921

Tabell 23: Service-volum-tabell basert på belastningsgrad for scenario 3 og profil 19

	<b>Belastningsgrad (v/c)</b>				
<b>Kriterium</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>
<b>DK</b>					
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	460	690	920	1 035	1 150
Service-volum (kjt/t)	376	564	752	846	940
Daglig service-volum (kjt/d)	5 612	8 418	11 224	12 627	14 030
<b>HCM</b>					
Etterspørselsintensitet (pbe/t/felt)	663	994	1 326	1 491	1 657
Service-volum (kjt/t)	542	812	1 084	1 219	1 354
Daglig service-volum (kjt/d)	8 089	12 127	16 177	18 190	20 215

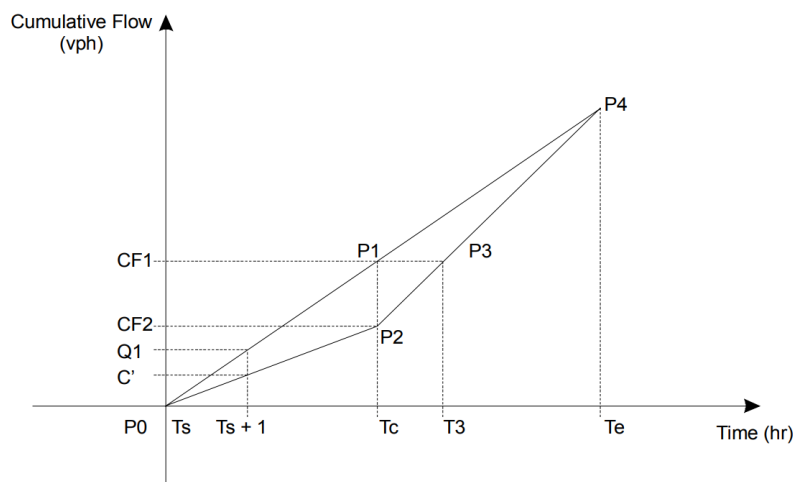
Resultatene viser at for scenario 2 og profil 23 vil service-volumet som kan avvikles for en belastningsgrad mellom 0,9 og 1,0 ligge i et intervall på ca. 2 060 – 2 289 kjt/t med DK-verdier og 2 830 – 3 144 kjt/t med HCM-verdier. For scenario 3 og profil 19 vil service-volumet ligge i et intervall på ca.



846 – 940 kjt/t med DK-verdier og 1 219 – 1 354 kjt/t med HCM-verdier for belastningsgrad mellom 0,9 og 1,0. Forskjellen i service-volum mellom de to håndbøkene er ca. 770 – 850 kjt/t for scenario 2 og 370 – 410 kjt/t for scenario 3. Hvilke konsekvenser forskjellene i evnen til å avvike trafikk vil ha for kødannelse og forsinkelse er beregnet i neste delkapittel.

#### 4.2.2 Kø og forsinkelse

Konsekvenser for kø og forsinkelse gjelder for overbelastede strekninger der etterspurt trafikkmengde i perioder overstiger vegens kapasitet. Figur 22 viser hvordan en reduksjon i kapasitet over tid vil påvirke trafikken på et motorvegsegment. Ved hjelp av figuren kan det utledes formler til å beregne køens totale varighet som følge av en hendelse, maksimal kølengde, antall kjøretøy som er involvert i køen, total forsinkelse og gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy (Chin, Franzese, Greene, Hwang & Gibson, 2004). Formlene kan deretter brukes til å beregne konsekvenser av en hendelse med kapasitets-reducerende effekt for ulike tverrprofil og scenarioer. Oppsettet på regnearket som er brukt til å utføre beregninger er vist i Vedlegg 2.



Figur 22: Akkumulert trafikkmengde over tid for overbelastet motorvegsegment (Chin et al., 2004, s. 11)

I figuren er  $Q1$  en konstant trafikkstrøm i antall kjt/t. Ved tiden  $T_s$  oppstår det en hendelse som reduserer kapasiteten på motorvegsegmentet fra normal kapasitet til redusert kapasitet  $C'$ . Linjen  $P0 - P4$  representerer akkumulert etterspurt trafikkmengde over hele perioden med overbelastning fra  $T_s$  til  $T_e$ . Hendelsen som fører til redusert kapasitet, slutter i tidspunktet  $T_c$ . Varigheten med redusert kapasitet  $C'$  kan dermed uttrykkes som  $T_c - T_s$ . Linjen  $P0 - P2$  representerer den akkumulerte trafikken som avvikes i perioden med redusert kapasitet. Når hendelsen er over, går kapasiteten på motorvegsegmentet tilbake

til normal kapasitet. Akkumulert trafikk i perioden med normal kapasitet etter hendelsen er representert med linje P2 – P4 (Chin et al., 2004).

Når kapasiteten går tilbake til normal kapasitet i tidspunktet  $T_c$ , vil det ha samlet seg opp en kø med en lengde lik forskjellen i koordinatene til punkt P1 og P2. Den maksimale kølengden som har samlet seg opp i dette punktet kan beregnes med Formel 17.

$$Lk\emptyset = CF1 - CF2$$

*Formel 17*

der

$Lk\emptyset$  = maksimal kølengde ved  $T_c$ ;

$CF1$  = akkumulert etterspurt trafikkmengde ved  $T_c$ ; og

$CF2$  = akkumulert avviklet trafikkmengde ved  $T_c$

Tiden det tar for køen å oppløses når kapasiteten går tilbake til normal kapasitet etter hendelsen er lik  $T_e - T_c$ . Den totale varigheten av konsekvensene fra hendelsens kapasitetsreducerende effekt kan dermed beregnes som  $T_e - T_s$ . For å finne tidspunktet  $T_e$ , der køen oppløses og trafikken ikke lenger er påvirket av hendelsen, må skjæringspunktet mellom linjene for ankommet og avviklet trafikk beregnes. Køens varighet etter at kapasiteten går tilbake til normal kapasitet kan finnes ved å sette opp funksjonsuttrykk for linjene ved tidspunktet  $T_c$ . Ved å sette funksjonsuttrykkene for de to linjene lik hverandre kan følgende likning formuleres:

$$(P2 - P4) * t + CF2 = (P1 - P4) * t + CF1$$

der  $P2 - P4$  og  $P1 - P4$  representerer linjene for henholdsvis akkumulert avviklet og akkumulert ankommet trafikk etter punktet  $T_c$ . Ved å løse likningen med hensyn på tiden  $t$  kan følgende uttrykk utledes:

$$t = \frac{CF1 - CF2}{(P2 - P4) - (P1 - P4)} = \frac{Lk\emptyset}{C - V}$$

der  $C$  er normal kapasitet etter punktet  $T_c$  og  $V$  er etterspurt trafikkmengde. Total varighet kan dermed beregnes med Formel 18.

$$T_e = T_c + \frac{Lk\emptyset}{C - V}$$

*Formel 18*

Arealet mellom linjen P0 – P4 og linjen P0 – P2 – P4 gir den totale forsinkelsen. Total forsinkelse kan beregnes med Formel 19.

$$Tf = \frac{(Q_1 - C') \cdot (Tc - Ts) \cdot (Te - Tc)}{2}$$

*Formel 19*

(Chin et al., 2004, s. 12)

Gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy kan deretter finnes ved å dele total forsinkelse på antall kjøretøy påvirket av hendelsen. Antall kjøretøy påvirket av hendelsen beregnes ved å multiplisere den konstante etterspurte trafikkmengden V med total varighet Te beregnet i Formel 18.

### **Hendelse**

For å illustrere den reduserte kapasitetens effekt på kødannelse og forsinkelse er det tatt utgangspunkt i at det oppstår en hendelse med varighet på en halv time. Etter en halv time vil kapasiteten på vegen gå tilbake til kapasiteten for normal drift. Det er antatt at hendelsen vil føre til stengt skulder på veger med skulderbredde på 2,75 m (profil 23 og 21), mens for veger med skulderbredde mindre eller lik 1,50 m vil hendelsen føre til stengt kjørefelt (profil 19 og 17). Scenarier for stengt skulder og stengt kjørefelt er tidligere definert i kapittel 4.1. Som en forenkling er det valgt å benytte en konstant etterspørselsintensitet på 1 500 pbe/t/felt gjennom hele perioden som inngår i beregningene. Etterspørselsintensiteten kan enkelt endres i vedlagt regneark for å undersøke konsekvenser med andre verdier. En etterspørselsintensitet på 1 500 pbe/t/felt vil på en strekning med normale forhold gi en belastningsgrad lik 0,63 med grunnleggende kapasitet fra HCM, og 0,65 med grunnleggende kapasitet fra dansk håndbok. En belastningsgrad rett i overkant av 0,60, som med tidligere antakelser i Tabell 2 normalt sett vil tilsvare service-nivå C, medfører at trafikanter til tider vil oppleve at de må tilpasse hastighet til andre trafikanter og at mindre hendelser kan føre til en signifikant nedgang i service-nivå. Valgt etterspørselsintensitet vil dermed være så stor at det for hendelser med større kapasitets-reducerende effekt vil oppstå kø og forsinkelse, mens mindre hendelser kan absorberes før det får konsekvenser for framkommeligheten.

Kapasitet er tidligere i analysen av kapasitet og service-nivå beregnet som pbe/t/felt og oppgitt i Tabell 12 og Tabell 13. Total kapasitet på segmentet kan beregnes til kjt/t med Formel 20. Formelen kan også brukes til å beregne total etterspurte trafikkmengde ved å bytte ut C med V og c med  $v_p$  som i Formel 10.

$$C = c \cdot (PHF \cdot N \cdot f_{hv})$$

*Formel 20*

der C er total kapasitet i kjt/t og c er kapasitet i antall pbe/t/felt. De andre variablene er tidligere forklart i kapittel 4.2.1.

### **Scenario 1 (normal drift)**

Tabell 24 viser kapasitetsverdier for scenario 1. Som tidligere vil normal kapasitet med DK-verdier være uavhengig av valgt profil. Med HCM-verdier er det små forskjeller i normal kapasitet mellom de ulike profilene. Normal kapasitet for profil 23 er brukt i beregninger for hendelsen i scenario 2, mens normal kapasitet for profil 19 er brukt i beregninger for hendelsen i scenario 3. Trafikken vil alltid avvikles på to felt i forkant av hendelsespunktet. Med Formel 10 blir total etterspurt trafikkmengde dermed  $1\,500 \cdot 0,94 \cdot 2 \cdot 0,87 = 2\,453$  kjt/t uavhengig av scenario og bruk av HCM- eller DK-verdier.

Tabell 24: Kapasitetsverdier scenario 1 for DK- og HCM-verdier

	<b>DK</b>	<b>HCM 23 m</b>	<b>HCM 19 m</b>
<b>Kapasitet c</b>	2 300	2 374	2 367
<b>Total kapasitet C</b>	3 762	3 883	3 870

### **Scenario 2 (stengt skulder)**

I scenario 2 er det sett på profil 23 som har skulderbredde på 2,75 m. Trafikken vil fortsatt avvikles på to kjørefelt gjennom hendelsespunktet. Tabell 25 gir en oversikt over de reduserte kapasitetsverdiene som inngår i beregningene. Den reduserte kapasiteten for HCM vil være større enn valgt etterspurt trafikkmengde med en belastningsgrad på 0,78. I dette tilfellet vil trafikken dermed være upåvirket for HCM-verdier.

Tabell 25: Kapasitetsverdier scenario 2 for DK- og HCM-verdier

	<b>DK</b>	<b>HCM</b>
<b>Kapasitet c'</b>	1 400	1 923
<b>Total kapasitet C'</b>	2 290	3 145

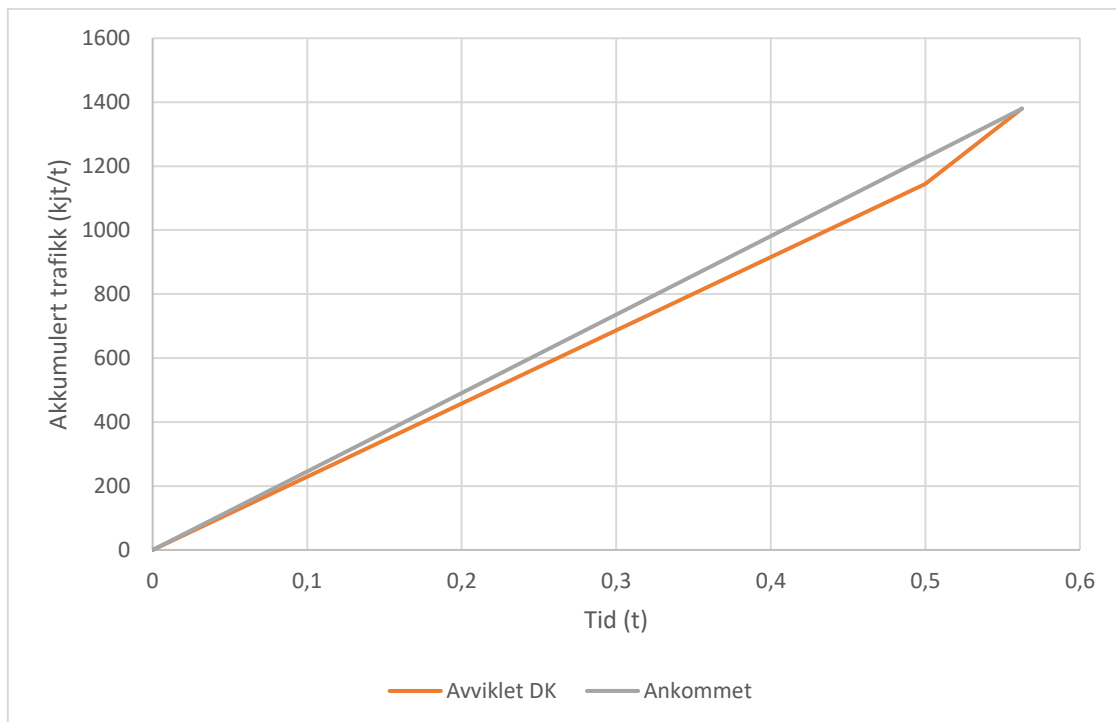
### **Scenario 3 (stengt kjørefelt)**

I scenario 3 er det sett på profil 19 som har skulderbredde på 1,50 m. Her vil det kun være ett kjørefelt tilgjengelig til å avvikle ankommet trafikk gjennom hendelsespunktet. Tabell 26 gir en oversikt over kapasitetsverdier som inngår i analysen.

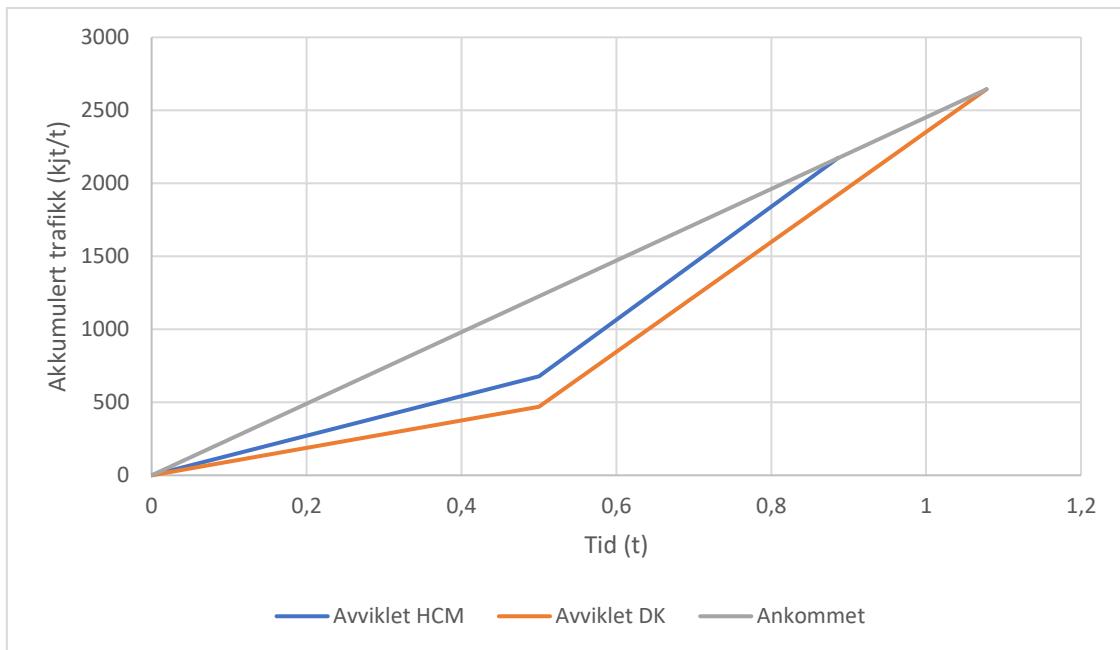
Tabell 26: Kapasitetsverdier scenario 3 for DK- og HCM-verdier

	DK	HCM
Kapasitet $c'$	1 150	1 657
Total kapasitet $C'$	940	1 354

Figur 23 og Figur 24 viser hvordan hendelsen utspiller seg for de to scenarioene. Den grå linjen for ankommet trafikk viser akkumulert trafikkmengde som ankommer hendelsespunktet i løpet av den analyserte perioden. Blå og oransje linje for avviklet trafikk viser akkumulert trafikkmengde som avvikles gjennom hendelsespunktet i løpet av den analyserte perioden for henholdsvis HCM og DK-verdier.



Figur 23: Akkumulert trafikkmengde over tid for scenario 2



Figur 24: Akkumulert trafikkmengde over tid for scenario 3

I Tabell 27 er resultater oppsummert. Resultatene som er beregnet er maksimal kølengde i antall kjøretøy, total varighet på konsekvenser fra hendelsens kapasitetsreducerende effekt, antall kjøretøy berørt av hendelsen, total forsinkelse og gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy. Tabellen viser at det er store forskjeller både mellom de to kapasitetsreducerende scenarioene og de to håndbøkene. Med DK-verdier vil total forsinkelse og gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy øke fra 23,00 t og 1,00 min/kjt ved stengt skulder til 407,78 t og 9,25 min/kjt ved stengt kjørefelt. HCM-verdier gir en økning fra ingen forsinkelse til totalt 243,24 t og gjennomsnittlig 6,71 min/kjt. Hvordan de ulike resultatene er beregnet er tidligere forklart med utgangspunkt i Figur 22.

Tabell 27: Sammenlignet kø og forsinkelse for DK- og HCM-verdier

	Scenario 2		Scenario 3	
	DK	HCM	DK	HCM
Maks kølengde (kjt)	82	0	756	549
Total varighet (t)	0,56	0,00	1,08	0,89
Antall kjøretøy berørt (kjt)	1380	0	2645	2177
Total forsinkelse (t)	23,00	0,00	407,78	243,62
Gj. forsinkelse per kjøretøy (min)	1,00	0,00	9,25	6,72

### 4.3 Trafikksikkerhet

Det er valgt å bruke sikkerhetsfaktorer til å analysere sikkerhetseffekter for ulike tverrprofil. I kapittel 3.3.4 ble sikkerhetsfaktorer fra to rapporter som omfatter motorveger i Danmark og USA undersøkt. Det ble forsøkt å finne faktorer som representerer mest mulig like forhold. Alle faktorene som er omtalt i 3.3.4, og som brukes videre her, gjelder for personskaadeulykker. Videre inndeling etter alvorlighetsgrad er ikke mulig med faktorene som er funnet.

Sikkerhetsfaktorene kan oppgis både hver for seg slik at de representerer en spesifikk utformingsvariabel, eller som en kombinert faktor for å representere en sammensetning av flere variabler i et tverrprofil. Tabell 28 og Tabell 29 viser en oversikt over sikkerhetsfaktorer fra henholdsvis Danmark og USA for alternative tverrprofil sammensatt av forskjellige bredder på kjørefelt, ytre og indre skulder og midtdeler. Rapporten fra USA skiller mellom urbane og landlige motorveger. Dette er markert ved å sette «L» for landlig og «U» for urban i parentes der dette gjelder.

Tabell 28: Sikkerhetsfaktorer fra Jensen (Danmark) tilknyttet bredder på tverrprofilet

Utformingsvariabel	Profil 23		Profil 21		Profil 19		Profil 18	
	Bredde	CMF	Bredde	CMF	Bredde	CMF	Bredde	CMF
Kjørefelt 1	3,50	1,000	3,25	1,030	3,50	1,000	3,25	1,030
Kjørefelt 2	3,50	1,000	3,50	1,000	3,50	1,000	3,50	1,000
Ytre skulder	2,75	1,025	2,75	1,025	1,50	1,140	0,75	1,210
Indre skulder	0,75	0,990	0,50	1,000	0,50	1,000	0,50	1,000
Midtdeler	2,00	-	2,00	-	1,00	-	1,00	-

Tabell 29: Sikkerhetsfaktorer fra Bonneson (USA) tilknyttet bredder på tverrprofilen

Utformings- variabel	Profil 23		Profil 21		Profil 19		Profil 18	
	Bredde	CMF	Bredde	CMF	Bredde	CMF	Bredde	CMF
Kjørefelt 1	3,50	1,020	3,25	1,052	3,50	1,020	3,25	1,052
Kjørefelt 2	3,50	1,020	3,50	1,020	3,50	1,020	3,50	1,020
Ytre skulder (L)	2,75	1,042	2,75	1,042	1,50	1,248	1,25	1,296
Ytre skulder (U)	2,75	1,027	2,75	1,027	1,50	1,159	1,25	1,190
Indre skulder	0,75	1,063	0,50	1,078	0,50	1,078	0,50	1,078
Midtdeler	2,00	-	2,00	-	1,00	-	1,00	-

Ved å beregne forholdet mellom to sikkerhetsfaktorer med forskjellig verdi, men som representerer samme utformingsvariabel, kan relativ endring i predikerte ulykker som følge av en endring i verdien til utformingsvariabelen undersøkes. Relativ endring kan beregnes med Formel 21.

$$\Delta N = \frac{CMF_2}{CMF_1} - 1$$

Formel 21

der

$\Delta N$  = relativ endring i ulykker; og

$CMF_1$  og  $CMF_2$  = sikkerhetsfaktorer for to ulike verdier på en utformingsvariabel

(Stamatiadis & Pigman, 2009, s. 31)

Forholdet mellom sikkerhetsfaktorer for alternative bredder er beregnet og oppstilt i Tabell 30 og Tabell 31. De beregnede forholdstallene viser effekten på personskadeulykker for ulike bredder på kjørefelt og ytre og indre skulder. I Tabell 31, som representerer verdier for motorveger i USA, er det for ytre skulder oppgitt faktorer for både landlige og urbane forhold. Alternativ 1 og 2 representerer to ulike verdier for bredden på utformingsvariabler på et motorvegsegment. For alternativ 2 er det valgt bredder som er smalere, og som har større negativ effekt på sikkerheten, enn alternativ 1.  $\Delta N$  er beregnet med Formel 21 og estimerer effekten av å velge alternativ 2 i stedet for alternativ 1 i utformingen av tverrprofilen på et motorvegsegment. For bredden på kjørefelt er det valgt å se på gjennomsnittlig bredde av de to kjørefeltene i én retning.



Tabell 30: Sikkerhetsfaktorer fra Jensen (Danmark) for alternative bredder på utformingsvariabler

Alt. 1 (m)	Alt. 2 (m)	CMF 1	CMF 2	$\Delta N$	%-endring
<b>Kjørefelt</b>					
3,50	3,25	1,000	1,030	0,030	3,00
3,50	3,38	1,00	1,015	0,015	1,50
<b>Ytre skulder</b>					
2,75	1,50	1,025	1,140	0,112	11,22
2,75	1,25	1,025	1,165	0,137	13,66
<b>Indre skulder</b>					
0,75	0,50	0,990	1,000	0,010	1,00

Tabell 31: Sikkerhetsfaktorer fra Bonneson (USA) for alternative bredder på utformingsvariabler

Alt. 1 (m)	Alt. 2 (m)	CMF 1	CMF 2	$\Delta N$	%-endring
<b>Kjørefelt</b>					
3,50	3,25	1,020	1,052	0,031	3,14
3,50	3,38	1,020	1,035	0,156	1,56
<b>Ytre skulder (L)</b>					
2,75	1,50	1,042	1,248	0,198	19,78
2,75	1,25	1,042	1,296	0,244	24,38
<b>Ytre skulder (U)</b>					
2,75	1,50	1,027	1,159	0,129	12,85
2,75	1,25	1,027	1,190	0,159	15,87
<b>Indre skulder</b>					
0,75	0,50	1,063	1,078	0,014	1,41

Tabellen viser at ytre skulder helt klart er den variabelen som alene har størst påvirkning på trafikk-sikkerheten. Det er også tydelig at påvirkningen av en reduksjon i bredden på ytre skulder er mest kritisk for landlige motorveger i USA som har en økning i antall personskadeulykker på 24,38 % når bredden

reduseres fra 2,75 til 1,25 m. Samme breddereduksjon fører til en økning i personskadeulykker på 13,66 % for danske motorveger og 15,87 % for urbane motorveger i USA. Det er også ulikheter i påvirkningen fra endringer i indre skulder, men her er påvirkningen mindre med en økning på 1,00 % for motorveger i Danmark og 1,41 % for motorveger i USA når bredden reduseres fra 0,75 til 0,50 m. En reduksjon i bredden på et kjørefelt fra 3,50 til 3,25 m er omtrent identisk for Danmark og USA med en reduksjon på henholdsvis 3,00 og 3,14 %. Med en gjennomsnittlig kjørefeltbredde på 3,38 m vil økningen bare være 1,50 og 1,56 %.

Ved å kombinere de enkelte sikkerhetsfaktorene kan den samlede sikkerhetseffekten av gjeldende forhold estimeres. For veger med to kjørefelt per retning benyttes CMF-verdi for gjennomsnittlig kjørefeltbredde i én retning. Den kombinerte sikkerhetsfaktoren beregnes med Formel 22. Resultater er oppsummert i Tabell 32.

$$CMF_k = CMF_1 \cdot CMF_2 \cdot \dots \cdot CMF_n$$

Formel 22

der

$CMF_k$  = sikkerhetsfaktor for et kombinert sett av utformingsvariabler;

$CMF_n$  = sikkerhetsfaktor for en individuell utformingsvariabel; og

$n$  = antall individuelle utformingsvariabler

Tabell 32: Kombinert sikkerhetsfaktor for ulike tverrprofil

Profil	23	21	19	18
CMF <sub>k</sub> Danmark	1,015	1,040	1,140	1,182
CMF <sub>k</sub> USA (L)	1,129	1,163	1,371	1,447
CMF <sub>k</sub> USA (U)	1,113	1,146	1,274	1,328

Når de kombinerte sikkerhetsfaktorene er beregnet kan sikkerhetsprestasjonen til de ulike tverrprofilene undersøkes. For å gjøre dette er det valgt å ta utgangspunkt i profil 23. Med Formel 21 beregnes forholdet mellom kombinert sikkerhetsfaktor for profil 23 og de andre profilene på samme måte som ble gjort for hver enkelt CMF tidligere. Resultater er oppsummert i Tabell 33, der forholdstallet er oppgitt som %-endring sammenlignet med profil 23.

Tabell 33: Beregnet sikkerhetsprestasjon for alternative tverrprofil med et tverrprofil på 23 m som referanseprofil

Profil (m)	Danmark		USA (L)		USA (U)	
	CMF <sub>k</sub>	%-endring	CMF <sub>k</sub>	%-endring	CMF <sub>k</sub>	%-endring
23	1,015	-	1,129	-	1,113	-
21	1,040	2,46	1,163	3,01	1,146	2,96
19	1,140	12,32	1,371	21,43	1,274	14,47
18	1,182	16,45	1,447	28,17	1,328	19,32

Sammenlignet med et tverrprofil på 23 m har alle de andre tverrprofilene en reduksjon i bredden på indre skulder fra 0,75 til 0,50 m og midtdeler fra 2,00 til 1,00 m. Endringer i bredden på midtdeler antas å ikke ha påvirkning på antall personskadeulykker. Beregningene viser at å endre bredden på tverrprofilet fra 23 til 21 m vil føre til økning i antall personskadeulykker på 2,46 % for landlige motorveger i Danmark, og rundt 3,00 % for motorveger i USA som følge av reduksjon i gjennomsnittlig kjørefeltbredde og indre skulder. En endring på tverrprofilet fra 23 til 19 m medfører at ytre skulder reduseres fra 2,75 til 1,50 m. Dette vil ha en større påvirkning på sikkerheten og vil sammen med en indre skulder på 0,50 m gi en økning i antall personskadeulykker på 12,32 % for danske motorveger. Landlige og urbane motorveger i USA vil få en økning på henholdsvis 21,43 og 14,47 %. Dersom bredden på tverrprofilet reduseres fra 23 til 18 m, som medfører en videre reduksjon i bredden på ytre skulder til 1,25 m i tillegg til indre kjørefelt og skulder på 3,25 og 0,50 m, vil ulykkesfrekvensen øke med 16,45 % for danske motorveger og 28,17 og 19,32 % for henholdsvis landlige og urbane motorveger i USA.

## 5 Diskusjon

Gjennom litteraturstudien og analysen i oppgaven er det sett nærmere på hvordan det kan legges opp til økt fleksibilitet i utforming av tverrprofilen for en 4-felts motorveg, og hvordan valg av alternative bredder vil påvirke framkommeligheten og trafiksikkerheten på veggen. Verdier fra dansk og amerikansk litteratur er sammenlignet i analyser av kapasitet og service-nivå, kø og forsinkelse og trafiksikkerhet. I dette kapitlet vil funn fra litteraturstudien, samt beregninger og resultater fra kapittel 4 diskuteres. Mulige feilkilder og forhold som påvirker usikkerheten og nøyaktigheten til resultatene vil også inngå i diskusjonen.

### 5.1 Økt fleksibilitet i utforming

En gjennomgang av håndbøker og standarder fra ulike land viser at det i forskjellig grad er kommentert og tatt høyde for fleksibilitet i utformingskrav. For eksempel er det i den danske håndboken for utforming av motorveger kommentert hvilke tilpasninger som kan gjøres på et basistverrprofil for å tilpasse dette til behov i et spesifikt prosjekt, og at det må tas hensyn til at tilpasninger kan svekke noen av vegens opprinnelige funksjoner og egenskaper (Vejdirektoratet, 2018). I andre håndbøker, som for eksempel 2019-utgaven av den norske håndboken N100, blir ikke dette temaet nevnt. Håndbøker oppdateres periodevis med nye krav og retningslinjer. Håndbok N100 beskriver krav for utforming av veier, men refererer ikke til hvilke undersøkelser og vurderinger som legger grunnlaget for de kravene som er gitt. Det er dermed vanskelig å vite hvorfor utformingsvariabler endres og hvilke analyser og vurderinger som underbygger endringene. Når det legges opp til økt fleksibilitet er det enda viktigere å framheve hvilke effekter dette vil ha for vegens framkommelighet og trafiksikkerhet, og at grundige analyser og vurderinger bør utføres for å identifisere eventuelle implikasjoner.

Det er kjent at bruk av fravik og fleksibilitet i utformingsprosessen krever en grundigere form for analyse av konsekvenser enn dersom utformingskrav som er gitt i håndbøker og standarder benyttes. Når et fravik innføres må det utføres vurderinger som tilsier at ønsket løsning er den mest praktiske for et spesifikt tilfelle. Økt fleksibilitet i utformingskravene reduserer antall variabler som har behov for fravik, og kan dermed gjøre det mer lettvent å velge utformingsverdier som tidligere ikke var et alternativ i utformingskravene. Dette vil forenkle prosessen rundt bruk av prosjektspesifikke løsninger, men kan samtidig fjerne noe av fokuset rettet mot vurderinger av hvilke implikasjoner valg av alternative utformingsverdier kan ha på framkommeligheten og trafiksikkerheten. Smalere tverrprofil vil føre til lavere investeringskostnader, og en byggherre som ønsker å redusere kostnader vil derav se på de smalere tverrprofilene som mest attraktive. For å sikre at alle aspekter ved et vegprosjekt vektlegges i henhold til deres betydning må beslutningsprosessen følgelig støttes med utvetydige krav og retningslinjer.

Økt fleksibilitet kan implementeres ved å oppgi øvre og nedre grenseverdier for ulike utformingsvariabler. Basert på referanseprofilen H3 på 23 m er bredden på indre skulder allerede relativt smal og det er dermed ikke mulig å gjøre store justeringer på denne av hensyn til minimal avstand til hindringer i midtdeler. Av den totale bredden er det kjørefeltbredden som opptar den største delen, men på grunn av dimensjonerende kjøretøybredder og horisontale bevegelser på kjøretøy under fart er det lite aktuelt å gjøre store endringer i bredden på kjørefeltene. De to gjenværende variablene, midtdeler og ytre skulder, er de som er mest fleksible med tanke på justeringer i bredden. En gjennomgang av tverrprofil fra ulike land i kapittel 3.1.2 viste også at de største variasjonene i valg av bredder gjelder for ytre skulder og midtdeler, mens bredder på kjørefelt og indre skulder i større grad er like. På grunn av etablerte dimensjoneringsklasser og krav til utforming vil kombinasjoner av bredden på kjørefelt, ytre og indre skulder og midtdeler ofte ikke variere uavhengig av hverandre. Med økt fleksibilitet i valg av bredder på tverrprofilen kan det i større grad oppstå kombinasjoner som tidligere har vært mindre vanlig og som det dermed er begrensede erfaringer med. Dette skaper større usikkerhet i valg av bredder som ikke inngår i utformingskravene som følge av manglende dokumentasjon på hvilke konsekvenser dette kan medføre.

I siste revisjon av håndbok N100 i 2019 ble antall dimensjoneringsklasser redusert fra ni til tre for å unngå at vegbyggere tar utgangspunkt i ulike utformingsverdier i valg av vegstandard og at det dermed kan oppstå hyppige standardsprang på vegnettet (Statens vegvesen, 2019a). Med få alternative standardvalg i vegnormalen er det vanskeligere å ta hensyn til prosjektspesifikke behov som kan bidra til å oppnå økt samfunnsøkonomisk lønnsomhet (Nye Veier, 2020b). Det vil også oppstå større behov for fravik fra de utformingskrav som er gitt. Kun få år etter at antall dimensjoneringsklasser ble redusert anbefaler Samferdselsdepartementet å innføre nye retningslinjer som gir mulighet for økt fleksibilitet (Regjeringen, 2020). Det kan dermed virke som om målet om et vegsystem med enhetlig standard i mindre grad er vektlagt til fordel for å oppnå besparelser i utbygging av vegen. Det kan diskuteres om små variasjoner i bredden på tverrprofilen for en 4-felts motorveg medfører en endring som er signifikant nok til at det fører til et ugunstig standardsprang på vegnettet. Det ble derfor undersøkt hva som gjør at en endring i vegens utforming kan oppfattes som et standardsprang. Gibreel et al. (1999) trekker frem endringer i hastighet, sikkerhet og sjåførens arbeidsbelastning og forventninger når de kjører på vegen som faktorer som er viktige å ta hensyn til i en vurdering av enhetlig utforming. Litteraturstudien og analyser viser at estimerte hastighetsjusteringer og ulykkestall vil variere avhengig av ulike bredder på tverrprofilen og litteratur fra ulike land. En endring i utformingen som medfører en større reduksjon i hastighet eller økning i ulykkestall impliserer et mer alvorlig standardsprang.

## 5.2 Framkommelighet

På en 4-felts motorveg med moderat trafikkmengde vil det under normale forhold ikke oppstå problemer for framkommeligheten. Det er først når det oppstår uforutsette og uønskede hendelser som trafikkulykker og nødstopp at framkommeligheten utfordres. En konsekvens av å bygge smalere tverrprofil med mindre skulderbredde er en økt fare for at hendelser fører til at deler av et kjørefelt blokkeres. For scenarioene som er definert i kapittel 4.1 vil et tverrprofil med ytre skulderbredde mindre eller lik 1,50 m kunne føre til stengt kjørefelt for en hendelse som bare ville ført til stengt skulder for et tverrprofil med ytre skulderbredde på 2,75 m. Basert på dette er det innlysende å tenke at konsekvenser for framkommeligheten på strekningen er større for alternativet med smal ytre skulder.

### Kapasitet og service-nivå

I analysen av kapasitet og service-nivå er resultater oppstilt i service-volum-tabeller som viser både service-volum per time og døgn for en indikator med bestemte grenseverdier. Først ble det brukt en metode fra HCM til å estimere service-volum for service-nivå A – F med tetthet som indikator. En sammenligning av beregningsresultatene fra HCM-metoden viser en klar tendens til at jo større den kapasitetsreducerende effekten fra et scenario er, desto mer øker estimert maksimal belastningsgrad for hvert service-nivå fram til nivå E som har maksimal belastningsgrad lik 1,0. Med høyere belastningsgrad følger også en større reduksjon i estimert hastighet. I Tabell 21, som gjelder for profil 19 i scenario 3 (stengt kjørefelt), kan det observeres at estimert hastighet er mindre enn FFH for nivå A, og at hastigheten reduseres ytterligere med 8,5 km/t fra nivå A til B og 22,8 km/t fra nivå A til C. Service-nivå B er i HCM definert som et nivå der det vil være mulig å opprettholde FFH, mens nivå C kun tidvis vil føre til at trafikanter må justere hastigheten etter andre trafikanter (Transportation Research Board, 2016). Dette tyder på at estimerte hastigheter for scenarioer med stor kapasitetsreducerende effekt ikke stemmer overens med de definerte service-nivåene, og at de forholdene som forventes på strekningen basert på resultater i service-volum-tabellen ikke samsvarer med forholdene i definisjonen av service-nivåene.

Analysemetoden som er brukt til å fastslå service-nivå A – F er avhengig av grunnleggende verdier og justeringsmetoder som er oppgitt i HCM. Dette gjør det utfordrende å sammenligne resultater fra HCM-metoden for to håndbøker som ikke tar utgangspunkt i de samme forutsetningene. Det første som skiller den danske håndboka fra HCM er at de oppgir forskjellig grunnleggende kapasitet på et motorveg-segment med ideelle forhold. De to håndbøkene benytter også forskjellige metoder for å justere kapasiteten på segmenter som ikke oppfyller ideelle breddeforhold. Justeringen i HCM skjer gjennom en reduksjon i FFH med justeringsfaktorer som representerer forventet reduksjon i hastighet, mens den danske håndboken justerer kapasiteten direkte med korreksjonsfaktorer. De grunnleggende verdiene og justeringsfaktorene i HCM er statistiske estimater eller forventede verdier. Metodene som er benyttet

kan gi gode tilnæringer til endringer i for eksempel FFH, men hva som er den virkelige effekten av å endre bredden på tverrprofilen kan ikke fastslås helt sikkert (Federal Highway Administration, 2020). Det er også viktig å ta i betraktning hva som kjennetegner ideelle forhold på et motorvegsegment. I HCM er ideelle forhold 3,66 m kjørefeltbredde og 1,83 m fri sidebredde mot høyre. I den danske håndboken gjelder henholdsvis 3,50 m og 1,00 m. Breddene fra HCM er opprinnelig oppgitt i «feet», mens breddene i den danske håndboken er oppgitt i «meter». Dette vil automatisk føre til at det oppstår små ulikheter når verdier avrundes. At de ideelle breddene i den danske håndboken er smalere indikerer at trafikanter kjører mer effektivt og kontrollert på veger med smalere kjørefelt og mindre fri sidebredde enn det som er utgangspunktet i HCM. Dermed vil smalere tverrprofil ha mindre kapasitetsreducerende effekt på trafikken under normale forhold med utgangspunkt i den danske håndboken. Som følge av en høyere grunnleggende kapasitet i HCM vil den justerte kapasiteten likevel være høyere enn i den danske håndboken for de tverrprofilene som er analysert.

På grunn av usikkerhet knyttet til beregningsresultatene fra HCM-metoden for scenarioer med stor kapasitetsreducerende effekt, og forskjeller i grunnleggende verdier og justeringsmetoder i de to håndbøkene, ble det besluttet å gjennomføre beregninger med belastningsgrad som indikator og uten å ta hensyn til endringer i estimert hastighet. I Tabell 22 og Tabell 23, som viser estimert service-volum med belastningsgrad som indikator, er det beregnet forskjeller i vegens evne til å avvike trafikk for scenario 2 (stengt skulder) på et tverrprofil med 23 m bredde og scenario 3 (stengt kjørefelt) på et tverrprofil med 19 m bredde. Resultatene viser at service-volumet er 58,9 % lavere for scenario 3 sammenlignet med scenario 2 med verdier fra dansk håndbok, og 56,9 % lavere med verdier fra HCM. Dersom de to håndbøkene sammenlignes viser resultatene at service-volumet for scenario 2 er 27,2 % lavere med verdier fra dansk håndbok sammenlignet med verdier fra HCM. For scenario 3 er forskjellen 30,6 %. Disse funnene tilsier at forholdet mellom service-volum for scenario 2 og 3 er omtrent det samme i begge håndbøkene, men at den kapasitetsreducerende effekten i scenarioene er større i den danske håndboken enn i HCM. Service-volumet som kreves for å oppnå et bestemt service-nivå er dermed lavere for den danske håndboken.

I tillegg til å beregne service-volum for antall kjt/t ble det i analysen sett på daglig service-volum. Service-volumet i kjt/t time kan tolkes som etterspurt trafikkmengde i dimensjonerende time og retning. Daglig service-volum kan dermed representere maksimal ÅDT på en strekning med en etterspurt trafikkmengde i dimensjonerende time og retning som tilsvarer estimert service-volum per time. Et krav om belastningsgrad mindre enn 0,8 på en vegstrekning benyttes i flere land på grunn av økt sannsynlighet for sammenbrudd i trafikken når belastningen stiger over dette (Bennett & Naznin, 2020; Trafikverket, 2020a). Med en antakelse om at belastningsgrad på 0,8 sjeldent vil føre til kø og forsinkelse på grunn av trafikkmengden, kan det teoretisk sett tenkes at en strekning med ÅDT mindre enn estimert daglig service-volum for en belastningsgrad på 0,8 vil ha tilstrekkelig kapasitet til å avvike trafikken på den aktuelle strekningen. I Tabell 22 og Tabell 23 er daglig service-volum estimert for ulike

belastningsgrader. Med estimerte verdier for en belastningsgrad på 0,8 kan det observeres at det daglige service-volumet som kan avvikles på et tverrprofil på 23 m i scenario 2 vil ligge rundt 27 500 for dansk håndbok og 37 500 for HCM. For et tverrprofil på 19 m i scenario 3 er det daglige service-volumet rundt 11 000 og 16 000 for henholdsvis dansk håndbok og HCM. At service-volumet blir såpass kraftig redusert, viser at det smale tverrprofilet må dimensjoneres for en lavere ÅDT enn tverrprofilet på 23 m for å unngå store konsekvenser for framkommeligheten i hendelsesscenarioet. I de nye retningslinjene med økt fleksibilitet kan vegen utformes med et tverrprofil på 19 m dersom ÅDT ligger mellom 6 000 og 12 000 (Regjeringen, 2020). De daglige service-volumene som er estimert for et tverrprofil på 19 m i scenario 3 og belastningsgrad 0,8 viser at HCM-verdiene gir et daglig-service volum som er godt over kravet om maksimal ÅDT på 12 000. Med danske verdier vil det daglige service-volumet derimot ligge litt under kravet.

Det daglige service-volumet og service-volumet per time er avhengig av en rekke inngangsverdier som påvirker de estimerte resultatene. Ettersom analysene i denne oppgaven er utført for et generelt motorvegsegment, og ikke en spesifikk strekning, er det brukt standardverdier som inngangsverdier i beregningene. En standardverdi er en representativ verdi som kan benyttes for å estimere en parameter dersom lokale data ikke foreligger. Standardverdier benyttes vanligvis ved planlegging, innledende prosjektering og andre prosesser som ikke krever detaljerte vurderinger. I virkeligheten vil det være en tilfeldig variasjon rundt verdiene for inngangsparameterne i modellen. Den virkelige verdien vil trolig ligge innenfor et konfidensintervall som strekker seg over og under den estimerte verdien (Transportation Research Board, 2016, s. 5-4). Figur 19 og Tabell 15 viser hvor store variasjoner som kan oppstå på grunn av valgte verdier for faktorene PHF, K og D. Ulike verdier på K- og D-faktoren kan gi store utslag på estimert daglig service-volum selv om service-volumet som kan avvikles gjennom et hendelsespunkt per time med en bestemt belastningsgrad holdes konstant. Dette gjør det utfordrende å bruke daglig service-volum som et generelt mål på vegens evne til å avvikle trafikk. For spesifikke prosjekter der det er utført målinger som kan underbygge valg av faktorverdier, kan daglig service-volum derimot i større grad benyttes som en veiledende verdi. I tillegg vil inngangsverdier som kapasitet og etterspørselsintensitet på en strekning variere avhengig av tid og sted. Dette er verdier som inngår i beregningene som deterministiske verdier, men som det vil være mer riktig å betrakte som stokastiske fordi verdiene vil variere avhengig av gjeldende forhold på forskjellige strekninger. En årsak til dette, som er vanskelig å fange opp i analyser og beregninger, er variasjoner i form av brukeropfatning. Trafikanter som erfarer identiske forhold kan oppfatte disse forholdene ulikt, noe som vil føre til store forskjeller i valg av hastighet og trafikantatferd gjennom et hendelsespunkt. Et annet usikkerhetsmoment er manglende spesifikasjoner i beregningsmetodene som gjør at det ikke tas høyde for alle faktorer som kan påvirke resultatet (Transportation Research Board, 2016, s. 7-5). Dette kan være på grunn av komplekse forhold som gjør det vanskelig å fastsette hvordan ulike faktorer påvirker hverandre og at det vanskelig lar seg gjøre å utføre empirisk forskning.



## Kø og forsinkelse

Dersom en kapasitetsreducerende effekt fra en hendelse er så stor at kapasiteten gjennom hendelsespunktet er lavere enn etterspurt trafikkmengde, vil det oppstå negative konsekvenser som kødannelse og forsinkelse. De tverrprofilene og scenarioene som har lavest service-volum for en belastningsgrad lik 1,0 vil oppleve de største kødannelsene og forsinkelsene. I analysen av kø og forsinkelse ble det sett på en hendelse med kapasitetsreducerende effekt i en periode på en halv time og med konstant etterspørselsintensitet på 1 500 pbe/t/felt. Å benytte en konstant og homogen etterspørselsintensitet gjør at det ikke blir tatt hensyn til at det kan være store variasjoner i trafikkmengden fra time til time og i løpet av en time. Analysemetoden vil heller ikke fange opp effekten av variasjoner i reisetid på grunn av trafikanter som kjører i forskjellig hastighet og en blandet trafikkstrøm. Det vil derimot gjøre det enklere å sammenligne resultater for variasjoner i kapasitetsverdier fra forskjellige håndbøker.

Beregninger av kø og forsinkelse ble gjort med utgangspunkt i grunnleggende og estimerte kapasitetsverdier fra analysen av kapasitet og service-nivå. Figur 23 og Figur 24, som viser forløpet av hendelsen for scenario 2 (stengt skulder) og scenario 3 (stengt kjørefelt), og Tabell 27, som oppsummerer beregningsresultatene, gir en indikasjon på betydningen av valg av kapasitetsverdier i en vurdering av hendelsens effekt på kødannelse og forsinkelse. Variasjoner i resultatene kommer av forskjeller i grunnleggende kapasitet og størrelsen på de kapasitetsreducerende effektene. En sammenligning av de to kapasitetsreducerende scenarioene viser at scenario 3 potensielt vil ha store konsekvenser for framkommeligheten på strekningen sammenlignet med scenario 2. Konsekvensene er også betraktelig mye større for verdier fra den danske håndboken enn fra HCM på grunn av forskjellen i kapasitetsreducerende effekt mellom de to håndbøkene. Å se på HCM-verdiene som veiledende i utformingen av tverrprofilen vil dermed gi en større indikasjon på at et smalt tverrprofil vil gi tilstrekkelig kapasitet for høyere trafikkmengder enn dersom verdiene fra den danske håndboken er sett på som veiledende. Det er beregnet fem forskjellige resultatverdier som representerer konsekvenser for kø og forsinkelse på en strekning. Hvilke verdier som er av størst interesse vil være avhengig av perspektivet til den som tolker resultatene. For trafikanter som har som mål å komme frem i tide vil gjennomsnittlig forsinkelse per kjøretøy være av interesse, mens det for vurderinger av konsekvenser for samfunnet og ved dimensjonering av veger vil være mest interessant å undersøke den totale forsinkelsen, varigheten, antall kjøretøy involvert og maksimal kølengde.

Hovedårsaken til at estimerte konsekvenser for framkommeligheten på et motorvegsegment for de to scenarioene er større basert på dansk håndbok er forskjellen i kapasitetsreducerende effekt. Dette er også kanskje den faktoren i analysen som det er knyttet størst usikkerhet til. Forholdene rundt hendelser som fører til stengt skulder eller kjørefelt vil være veldig ulike fra situasjon til situasjon. I oppgavens analyse ble det tatt utgangspunkt i de kapasitetsjusteringene som er omtalt i håndbøkene. Dette er verdier som er estimert fra en mengde innsamlet data fra utvalgte hendelser, og vil dermed være avhengig av hvor

mange og hvilke typer hendelser det er sett på. For eksempel kan en større andel av de hendelsene som inngår i vurderingsgrunnlaget av redusert kapasitet i den danske håndboken ha et mer alvorlig og omfattende hendelsesforløp enn vurderingsgrunnlaget i HCM. Det har ikke vært mulig å undersøke grunnlagsdata fra den danske håndboken og fastslå hva som er årsaken til at der er gitt større kapasitetsreduserende effekt enn i HCM.

### **5.3 Trafikksikkerhet**

Endringer i vegens utforming kan påvirke trafikksikkerheten. Hvor stor økningen i ulykkesfrekvensen er, avhenger av hvilken utformingsvariabel som endres. Med de breddene som inngår i analysen, og tilhørende sikkerhetsfaktorer funnet fra undersøkt litteratur, er det tydelig at bredden på ytre skulder vil ha den største påvirkningen på ulykkesfrekvensen. En grunn til dette er at mulige justeringer i bredden på indre skulder og kjørefelt er små sammenlignet med mulige justeringer på ytre skulder. For eksempel vil en reduksjon i bredden på tverrprofilen fra 23 til 18 m, som er det smaleste profilet som inngår i analysen av trafikksikkerhet, komme av en reduksjon i bredden på ytre skulder på 1,50 m per side, mens indre skulder og kjørefelt reduseres med 0,25 m per side. Ytterligere reduksjoner i kjørefeltbredde vil være mindre aktuelt som følge av kjøretøys bevegelsesprofil og ideell restbredde under fart. Disse forholdene er nærmere forklart i kapittel 3.1.1. I tillegg er det antatt at de breddene som inngår for midtdeler vil ha liten, eller ingen, påvirkning på antall personskadeulykker. Ved å interpolere verdier for sikkerhetsfaktorer for ytre skulderbredde på landlige motorveger i Danmark og USA, som er oppgitt i Tabell 4, kan det finnes at å redusere bredden på ytre skulder med 0,25 m vil medføre en økning i antall personskadeulykker mellom 2,00 og 2,50 % for verdiene fra Danmark og mellom 3,5 og 5,0 % for verdiene fra USA. I Tabell 30 og Tabell 31 er det funnet at en reduksjon i bredden på et kjørefelt fra 3,50 til 3,25 m vil medføre en økning på 3,00 og 3,14 % for motorveger i henholdsvis Danmark og USA. Med hensyn til gjennomsnittlig kjørefeltbredde vil økningen bare være 1,50 og 1,56 %. Dette betyr at en reduksjon i ytre skulderbredde på landlige motorveger i Danmark og USA vil være mer kritisk enn en tilsvarende reduksjon i gjennomsnittlig kjørefeltbredde.

Totalt sett viser sikkerhetsfaktorene som er benyttet i analysen av konsekvenser for trafikksikkerheten at endringen i antall personskadeulykker når bredden på tverrprofilen reduseres fra et referanseprofil på 23 m er minst for landlige motorveger i Danmark og størst for landlige motorveger i USA. Resultater i Tabell 33 viser at økningen i antall personskadeulykker for landlige og urbane motorveger i USA vil være henholdsvis 8,28 og 2,13 % større enn økningen for landlige motorveger i Danmark når bredden på tverrprofilen reduseres fra 23 til 19 m. Forskjellene blir større når ytre skulder reduseres ytterligere. Det kan dermed forventes en signifikant forskjell i økt ulykkesfrekvens på landlige motorveger i USA sammenlignet med landlige motorveger i Danmark for et smalt tverrprofil. De to rapportene fra Danmark og USA oppgir en sikkerhetsfaktor lik 1,0 for tilnærmet lik bredde på 3,00 og 3,05 m. Etter

hvert som bredden på ytre skulder reduseres, kan det observeres at avstanden mellom verdien på de danske og amerikanske faktorene i Tabell 4 øker. Når bredden reduseres til 1,25 m er faktoren for landlige motorveger i USA 11,25 % større enn den danske faktoren, mens faktoren for urbane motorveger i USA kun er 2,15 % større. De verdiene som er funnet gjennom litteraturstudien og resultater fra analysen viser at sikkerhetsprestasjonen på urbane motorveger i USA vil utvikle seg omtrent som for landlige motorveger i Danmark, mens de landlige motorvegene i USA vil ha en mer alvorlig økning. Den store forskjellen mellom faktorene for landlige og urbane motorveger i USA kommer av at andelen ulykker som involverer flere kjøretøy er større på urbane motorveger sammenlignet med landlige motorveger. Siden sikkerhetsfaktoren for ytre skulder i rapporten fra USA kun påvirker eneulykker, vil en reduksjon i ytre skulder dermed ha mindre påvirkning på en urban motorveg.

En begrensning i bruk av sikkerhetsfaktorer ligger i at det kreves faktorer som reflekterer de forholdene som er ønsket for analysen. Et krav for gode sikkerhetsfaktorer er at analyserte strekninger med og uten aktuelle verdier for en spesifikk utformingsvariabel skal være mest mulig like på de andre områdene. For at dette skal være mulig kreves en stor mengde innsamlet data som representerer relevante forhold, men dette kan av og til by på utfordringer. Sikkerhetsfaktorene i denne oppgaven tar kun høyde for effekten av å endre bredden på tverrprofilet, men i en reell situasjon vil det være flere andre variabler som kan påvirke sikkerheten. Slike forstyrrende variabler kan for eksempel være vegens linjeføring, klima og værforhold, dekkekvalitet og utforming av sideområde. På grunn av etablerte dimensjoneringsklasser og utformingskrav er det også mange kombinasjoner av verdier på utformingsvariabler som normalt ikke er i bruk. Dette kan gjøre det utfordrende å samle inn data fra strekninger med ønsket utforming. Der det foreligger liten mengde data som kan undersøkes, er det utfordrende å kvantifisere pålitelige effekter ved valg av alternative utformingsverdier. For eksempel finnes det få motorveger med fartsgrense 110 km/t eller høyere utformet med smale kjørefelt og skuldre, noe som kan gjøre det krevende å fastslå med tilstrekkelig nøyaktighet hvordan dette påvirker sikkerheten. Av den grunn vil det være ekstra stor sannsynlighet for at de dataene som finnes kan være påvirket av lokale forhold og tilfeldigheter.

I undersøkt litteratur tilknyttet sikkerhetseffekter for ulike bredder på tverrprofilet, er det stor enighet om at ulykkesfrekvensen vil være høyere for et smalt tverrprofil, men hvor mye ulykkesfrekvensen endres på grunn av en reduksjon i bredden varierer mellom de ulike studiene. En årsak til dette kan være forskjeller i lokale forhold på strekninger som inngår i datagrunnlaget. For å se på forskjellen i datagrunnlaget i de to rapportene som inngår i analysen ble innsamlet data avgrenset til de forhold som karakteriserer strekninger som omtales i denne oppgaven. Ved å kun se på motorvegsegment med totalt fire felt, uten påvirkning fra på- og avkjøringsfelt, ble det fra rapporten for motorveger i USA funnet en ulykkesfrekvens på 0,088 og 0,113 personskadeulykker per million kjøretøykilometer for henholdsvis landlige og urbane motorveger. Grunnlagsdata fra den danske rapporten gir en betraktelig lavere

ulykkesfrekvens på 0,017 personskadeulykker per million kjøretøykilometer. En årsak til den store forskjellen kan være at det i den danske rapporten kun er 14 av 886 undersøkte motorvegstrekkninger som ikke har midtrekkverk, mens andelen av 4-felts motorveg uten midtrekkverk ligger mellom 35 og 44 % for landlige og mellom 20 og 37 % for urbane motorveger i de tre statene i USA. Møteulykker er en av ulykkestypene som forårsaker flest personskadeulykker med alvorlig skadde eller drepte i trafikken (Ringen jr., 2020; SSB, 2020). Andelen av strekkninger med og uten midtrekkverk i datagrunnlaget kan dermed ha stor påvirkning på ulykestall for antall personskader og personskadeulykker.

Andre forskjeller i forhold på strekkninger i innsamlet datagrunnlag som kan være en årsak til forskjellene i beregnet sikkerhetsprestasjon basert på sikkerhetsfaktorer er hastighet og trafikkmengde. Litteraturstudien finner at en økning i fartsgrense medfører en forflytning av ulykker med lav skadegrad til ulykker med mer alvorlig skadegrad (Bjerkan et al., 2019; Gargoum & El-Basyouny, 2016; Vadeby & Forsman, 2018). I den danske rapporten er den største andelen av innsamlet data fra strekkninger med fartsgrense på 110 og 130 km/t. I den amerikanske rapporten er det ikke oppgitt fartsgrense på strekkningene som er undersøkt. Det er dermed ikke mulig å vurdere om forskjeller i sikkerhetsfaktorene kan ha en sammenheng med ulike hastighetsforhold. Angående variasjoner i trafikkmengde er det i litteraturstudien funnet at en økning i trafikkmengde typisk vil føre til en høyere ulykkesfrekvens, men med mindre alvorlig utfall (Jensen, 2015). I den danske rapporten er trafikkmengden på strekkningene som er undersøkt oppgitt for kjørefelt i én retning og som gjennomsnittlig verdi for veger med to kjørefelt i én retning, mens den amerikanske rapporten ser på total trafikkmengde i begge retninger og oppgir minimum og maksimal verdi for veger med totalt fire kjørefelt. Dette gjør det litt utfordrende å sammenligne forhold for trafikkmengde i de to rapportene. Med utgangspunkt i de verdiene som er gitt for trafikkmengder kan det likevel antas at de mengdene som inngår i datagrunnlaget ikke skiller seg altfor mye fra hverandre, og at trafikkmengden dermed ikke er en hovedårsak til forskjeller i beregnet sikkerhetsprestasjon basert på sikkerhetsfaktorene fra de to rapportene.

## **5.4 Hvilket tverrprofil er mest hensiktsmessig?**

En vurdering av de ulike tverrprofilene mot hverandre viser at de smale tverrprofilene på 17 – 19 m potensielt vil ha store konsekvenser for framkommeligheten og trafikksikkerheten sammenlignet med referanseprofilen på 23 m. En sammenligning av et tverrprofil på 23 og 21 m viser derimot at forskjellen i konsekvenser for trafikksikkerheten er liten. I tillegg har tverrprofilen på 21 m samme bredde på ytre skulder som tverrprofilen på 23 m, noe som gjør at de estimerte konsekvensene for framkommeligheten i scenario 2 (stengt skulder) vil være identiske for de to profilene. I valg av bredde på tverrprofilen kan det være mer hensiktsmessig å redusere bredden på midtdeler fra 2 til 1 m i stedet for en reduksjon i kjørefeltbredden. Med de sikkerhetsfaktorer som er funnet, og en antakelse om at bredden på midtdeler

vil ha liten effekt på antall personskadeulykker, vil dette medføre at forskjellen i ulykkesfrekvens mellom et tverrprofil på 23 og 21 m bare vil være 0,99 % for landlige motorveger i Danmark, og 1,42 og 1,35 % for henholdsvis landlige og urbane motorveger i USA. Å unngå en reduksjon i bredden på indre kjørefelt vil også gjøre det mer aktuelt for tunge kjøretøy å benytte seg av dette kjørefeltet, noe som vil være nødvendig på strekninger med relativt høy ÅDT. De estimerte konsekvensene indikerer at forskjellene for framkommelighet og trafikksikkerhet vil være små mellom et tverrprofil på 23 og 21 m. Å redusere bredden på tverrprofilen med 2 m over en lengre strekning vil trolig medføre sparte kostnader i utbyggingen. Hvor store besparelser som oppnås vil variere veldig fra prosjekt til prosjekt, men for en veg i krevende terreng kan det oppnås store besparelser ved en reduksjon i veggbredden. Dette antyder at det i flere tilfeller kan være gunstig å velge et tverrprofil på 21 m fremfor 23 m, spesielt dersom reduksjonen i bredde skjer gjennom midtdeler og indre skulder. De smaleste alternativene på 17 – 19 m vil derimot kreve en grundigere vurdering av fordeler og ulemper for å fastslå om de kan velges til fordel for et bredere tverrprofil. Disse tverrprofilene vil i større grad være avhengig av dimensjonerende ÅDT og avbøtende tiltak for å unngå store konsekvenser for framkommeligheten og trafikksikkerheten.

## 6 Konklusjon

Gjennom oppgaven er det sett på hvilke konsekvenser innføring av økt fleksibilitet og valg av alternative bredder på tverrprofilen for en 4-felts motorveg vil ha for utformingen, framkommeligheten og trafikksikkerheten på en strekning. Det er store variasjoner i verdier som inngår i litteratur fra ulike land. For å undersøke hvordan disse variasjonene kan påvirke framkommeligheten og trafikksikkerheten når bredden på tverrprofilen blir smalere, er det utført analyser og beregninger med verdier fra håndbøker og rapporter som er basert på motorveger i Danmark og USA. Funnene viser at en reduksjon i bredden på tverrprofilen vil medføre større konsekvenser for framkommeligheten med verdier fra Danmark, mens det vil medføre større konsekvenser for trafikksikkerheten med verdier fra USA.

Økt fleksibilitet i utforming av tverrprofil åpner for flere alternative bredder på utformingsvariablene som inngår i tverrprofilen. Med økt fleksibilitet i valg av bredder på tverrprofilen kan det i større grad oppstå kombinasjoner med et begrenset erfaringsgrunnlag fra tidligere. Fleksibilitet i utformingskrav er i varierende grad implisert i håndbøker og standarder fra ulike land. Når det legges opp til økt fleksibilitet er det særlig viktig å framheve hvilke konsekvenser dette kan ha for trafikken på vegen. De nye mulighetene for økt fleksibilitet i utforming av 4-felts motorveg krever strenge retningslinjer og tydelige rammer for å sikre løsninger som ivaretar framkommelighets- og trafikksikkerhetsbehov.

En konsekvens av å bygge smalere tverrprofil med mindre skulderbredde er økt fare for hendelser som fører til at deler av et kjørefelt blokkeres. Et stengt kjørefelt på en strekning med smalt tverrprofil medføre signifikant dårligere framkommelighet sammenlignet med en strekning hvor tilstrekkelig bredde på ytre skulder hindrer at kjørefeltet blokkeres. Dersom hendelsen kun fører til stengt skulder, vil det være mulig å avvikle et høyere service-volum gjennom hendelsespunktet og -perioden enn dersom et kjørefelt er stengt. Resultatene i oppgaven viser at service-volumet som gir en bestemt belastningsgrad er 56,9 – 58,9 % lavere for scenario 3 (stengt kjørefelt) sammenlignet med scenario 2 (stengt skulder) med de verdier som er oppgitt i de to håndbøkene fra Danmark og USA. Ved sammenligning av de to håndbøkene viser funnene at service-volumet for scenario 2 og 3 er henholdsvis 27,2 % og 30,6 % lavere med verdier fra Danmark enn med verdier fra USA. I en periode med høy etterspurt trafikkmengde som overstiger redusert kapasitet på strekningen, vil den reduserte kapasiteten i hendessscenarioet føre til negative konsekvenser som kø og forsinkelse. Estimert kø og forsinkelse er signifikant større for scenario 3 sammenlignet med scenario 2. Verdier og metoder, undersøkt i litteraturstudien og benyttet i analysen, viser store variasjoner mellom håndbøkene fra Danmark og USA. Resultatene indikerer at et smalere tverrprofil vil føre til lavere service-volum og økt kødannelse og forsinkelse i et hendessscenario med verdier fra Danmark sammenlignet med verdier fra USA. Under normale forhold er det kun små forskjeller i framkommelighet for de analyserte tverrprofilene og håndbøkene.

Ulike sikkerhetsfaktorer er funnet fra to rapporter som har undersøkt effekten av å endre bredden på tverrprofilen med utgangspunkt i tverrsnittsdata fra motorveger i Danmark og USA. Med hensyn på å

redusere bredden på tverrprofilet for en 4-felts motorveg fra 23 til 19 m, vil undersøkte sikkerhetsfaktorer fra landlige motorveger i USA medføre en økning i antall personskadeulykker på 21,4 %, sammenlignet med en økning på 12,3 % med sikkerhetsfaktorer fra landlige motorveger i Danmark. Dette viser en signifikant forskjell mellom landlige motorveger i Danmark og USA. Urbane motorveger i USA vil også oppleve en større økning, men her er forskjellen betraktelig mindre med en økning på 14,5 %. Den klart største årsaken til økningen i antall personskadeulykker, og til den signifikante forskjellen i økningen på landlige motorveger i Danmark og USA, kommer av konsekvensen av å redusere bredden på ytre skulder. For landlige motorveger i USA vil antall personskadeulykker øke med 19,8 % når bredden reduseres fra 2,75 til 1,50 m. Samme breddereduksjon fører til en økning på 11,2 % for landlige motorveger i Danmark og 12,9 % for urbane motorveger i USA. Bredden på kjørefelt og indre skulder har en mindre påvirkning på ulykkesfrekvensen. En grunn til dette er at mulige justeringer i bredden på indre skulder og kjørefelt er små sammenlignet med mulige justeringer på ytre skulder. Ulikheter i datagrunnlaget som er benyttet til å fastslå sikkerhetsfaktorene kan ha en påvirkning på estimert økning i ulykkesfrekvens ved bruk av faktorer fra to ulike rapporter. Begrensninger knyttet til sammenlignbarheten av datagrunnlaget i de to rapportene, medfører noe usikkerhet til forskjellen i estimert sikkerhetsprestasjon mellom alternative bredder på tverrprofilet med sikkerhetsfaktorer fra motorveger i Danmark og USA.

Estimerte konsekvenser for framkommelighet og trafikkikkerhet vil variere avhengig av bredden på tverrprofilet og hvilken litteratur som er valgt. Det eksisterer en viss usikkerhet i inngangsdataene i analysen av konsekvensene, og små justeringer i analysens forutsetninger vil føre til endringer i beregningsresultatene. Derfor bør det utvises forsiktighet med å basere generelle overordnede beslutninger i håndbøker og standarder på slike analyser.

## 7 Videre arbeid

Ved bruk av smale tverrprofil må det legges opp til avbøtende tiltak (Regjeringen, 2020). Som et videre studie kan det være interessant å undersøke hvilken effekt ulike avbøtende tiltak vil ha på framkommeligheten og trafikksikkerheten, og om disse tiltakene kan redusere de negative konsekvensene som er analysert i denne oppgaven. Eksempler på mulige avbøtende tiltak er:

- Etablering av flere havarilommer for å styrke sikkerheten og øke sannsynligheten for at havarilommer benyttes i stedet for skulderen
- Variable trafikkskilt som gir tidlig varsling om å senke hastighet ved stengt skulder eller kjørefelt og redusert kapasitet
- ITS-løsninger som gjør det enklere å varsle om og oppdage hendelser i god tid før hendelsestidspunktet

Det vil også være interessant å se på det økonomiske aspektet ved bruk av smalere tverrprofil med de funnene som er gjort i oppgaven. Dette gjelder både for kostnader ved utbygging og de samfunnsøkonomiske konsekvensene som vil følge av mer kø og flere ulykker.



## Kilder

- Alsharari, A. (2019). *Estimation of the Effect of Rain and Incidents on Freeway Capacity and Free-Flow Speed* (B.Sc. Civil Engineering). Aljouf University, Saudi Arabia. Hentet fra [https://kuscholarworks.ku.edu/bitstream/handle/1808/29699/Alsharari\\_ku\\_0099M\\_16680\\_DA\\_TA\\_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://kuscholarworks.ku.edu/bitstream/handle/1808/29699/Alsharari_ku_0099M_16680_DA_TA_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Andersen, U. (2018). Faktatjek: Kan vi køre hurtigere på motorveje uden at risikere flere ulykker? Hentet 5. februar 2021 fra <https://ing.dk/artikel/faktatjek-kan-vi-koere-hurtigere-paa-motorveje-uden-at-risikere-flere-ulykker-210331>
- Bennett, P. & Naznin, F. (2020). *Improved traffic management guidance: freeway capacity analysis*. Sydnet, Australia Austroads Ltd. Hentet fra <https://austroads.com.au/publications/traffic-management/ap-r644-20>
- Bjerkan, A. M., Ragnøy, A. & Engebretsen, A. (2019). *Endring av fartsgrenser: en før-og etteranalyse av fartsgrenseendring fra 100 km/t til 110 km/t* (SVV rapport 285). Hentet fra <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/2613858>
- Bonneson, J., Geedipally, S., Pratt, M. & Lord, D. (2012). *Safety prediction methodology and analysis tool for freeways and interchanges*. Hentet fra [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/nchrp17-45\\_fr.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/nchrp17-45_fr.pdf)
- Buch, T. S., Jensen, S. U. & Griebe, P. (2018). *Tværsprofil og tracé for landeveje* [Notat].
- Carlson, E. D., Giuliano, G., Hoel, L. A., Horsley, J. C., Peters, M. E., Samuels, J. M. & Skinner JR, R. E. (2002). NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Hentet fra [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_480.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_480.pdf)
- Chimba, D. & Kutela, B. (2014). Scanning secondary derived crashes from disabled and abandoned vehicle incidents on uninterrupted flow highways. *Journal of safety research*, 50, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2014.05.004>.
- Chimba, D., Kutela, B., Ogletree, G., Horne, F. & Tugwell, M. (2014). Impact of abandoned and disabled vehicles on freeway incident duration. *Journal of transportation engineering*, 140(3), 04013013. Hentet fra <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000635>
- Chin, S.-M., Franzese, O., Greene, D. L., Hwang, H.-L. & Gibson, R. (2004). *Temporary losses of highway capacity and impacts on performance: Phase 2*. United States. Dept. of Energy. Office of Scientific and Technical Information. Hentet fra <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/37083>
- CMFclearinghouse. (u.å.). INTRODUCTION TO CRASH MODIFICATION FACTORS. Hentet 18. mai 2021 fra [http://www.cmfclearinghouse.org/userguide\\_CMF.cfm](http://www.cmfclearinghouse.org/userguide_CMF.cfm)
- Coffta, M. (2020). Literature Review. Hentet 31. mai 2021 fra <https://guides.library.bloomu.edu/litreview>
- Dehman, A. & Drakopoulos, A. (2016). Investigation of Peak-Hour Factor at Freeway Segments: Urban and Suburban Vicinities. *Transportation research record*, 2553(1), 117-127. <https://doi.org/10.3141/2553-13>
- Dorothy, P. B. & Thieken, S. L. (2011). *Trade-Off Considerations in Highway Geometric Design*. <https://doi.org/10.17226/22842>
- Elvik, R. (2017). *Trafikksikkerhetshåndboken: 1.2 Motorveger* Hentet fra <https://tsh18.x.dittweb.no/del-2/1-vegutforming-og-vegutstyr/doc618/>
- Federal Highway Administration. (1997). *Flexibility in Highway Design*. U.S. Department of Transportation. Hentet fra <https://www.fhwa.dot.gov/environment/publications/flexibility/flexibility.pdf>

- Federal Highway Administration. (2016). *Revision of Thirteen Controlling Criteria for Design and Documentation of Design Exceptions*. Hentet fra <https://www.federalregister.gov/documents/2016/05/05/2016-10299/revision-of-thirteen-controlling-criteria-for-design-and-documentation-of-design-exceptions>
- Federal Highway Administration. (2020). Use of Narrow Lanes and Narrow Shoulders on Freeways: A Primer on Experiences, Current Practice, and Implementation Considerations. Hentet 16. februar 2021 fra <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop16060/ch4.htm>
- FGSV. (2008). *Guidelines for the Design of Motorways*. Hentet fra [https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/202\\_E\\_PDF.v.pdf](https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/202_E_PDF.v.pdf)
- Foss, T. (2019). *Effekten av vegskulder mht. trafikksikkerhet og avvikling* [Notat]. Trondheim: SINTEF.
- Gargoum, S. A. & El-Basyouny, K. (2016). Exploring the association between speed and safety: A path analysis approach. *Accident Analysis & Prevention*, 93, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.029>
- Gibreel, G., Easa, S., Hassan, Y. & El-Dimeery, I. (1999). State of the art of highway geometric design consistency. *Journal of transportation engineering*, 125(4), 305-313. Hentet fra [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1999\)125:4\(305\)?casa\\_token=w73vTsSoQSAAAAAA:VEa7VMNNCj0eWApMuZdp7Jv4paDth1R4tk87JZSkOHxWaAbFAMePCzZO-Ojkke8xCM\\_4fl5UgWA](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:4(305)?casa_token=w73vTsSoQSAAAAAA:VEa7VMNNCj0eWApMuZdp7Jv4paDth1R4tk87JZSkOHxWaAbFAMePCzZO-Ojkke8xCM_4fl5UgWA)
- Goodall, N. J. (2017). Probability of secondary crash occurrence on freeways with the use of private-sector speed data. *Transportation research record*, 2635(1), 11-18. <https://doi.org/10.3141/2635-02>
- Gross, F., Persaud, B. N. & Lyon, C. (2010). *A guide to developing quality crash modification factors*. United States: Federal Highway Administration. Office of Safety. Hentet fra [http://www.cmfclearinghouse.org/collateral/CMF\\_Guide.pdf](http://www.cmfclearinghouse.org/collateral/CMF_Guide.pdf)
- Harwood, D. W., Hutton, J. M., Fees, C., Bauer, K. M., Glen, A. & Ouren, H. (2014). *Evaluation of the 13 Controlling Criteria for Geometric Design*. Hentet fra <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/171358.aspx>
- Hauer, E. (2000). *Lane width and safety* [Notat]. Hentet fra <https://ezrahauer.files.wordpress.com/2012/08/lane-width-and-safety.pdf>
- Høyve, A. (2007). *Trafikksikkerhetshåndboken: 1.11 Utbedring av vegers tverrprofil*. Hentet fra <https://www.tshandbok.no/del-2/1-vegutforming-og-vegutstyr/doc627/>
- Høyve, A. (2008). *Trafikksikkerhetshåndboken: 10.5 Regulering av trafikkmengde (eksponering)*. Hentet fra <https://www.tshandbok.no/del-2/10-overordnede-virkemidler/doc604/>
- Høyve, A. (2014). *Trafikksikkerhetshåndboken: 1.15 Vegrekkverk og støtputer*. Hentet fra <https://www.tshandbok.no/del-2/1-vegutforming-og-vegutstyr/doc631/>
- Høyve, A. (2016). *Utvikling av ulykkesmodeller for ulykker på riks- og fylkesvegnettet i Norge (2010-2015)*. Hentet fra <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=44939>
- Jensen, S. U. (2015). *Uheldsmodeller, sikkerhetsfaktorer og værktøjer for strækninger*. Hentet fra [https://www.trafitec.dk/dwnl/uheldsmodeller%20for%20motorvejsnettet\\_august%202015.pdf](https://www.trafitec.dk/dwnl/uheldsmodeller%20for%20motorvejsnettet_august%202015.pdf)
- Jensen, S. U. (2020). *Trafikksikkerhet på 4-felts motorveg og motortrafikkveg*. Trafitec.
- Lee, C., Abdel-Aty, M., Park, J. & Wang, J.-H. (2015). Development of crash modification factors for changing lane width on roadway segments using generalized nonlinear models. *Accident Analysis & Prevention*, 76, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.007>
- Margreiter, M., Imhof, H., Grosanic, S. & Motamedidehkordi, N. (2016). *Effects of Short-Term Lane Closure on the Traffic Flow of Freeways*. Innlegg presentert ved Transportation Research Board 96th Annual Meeting, Washington, D.C., USA. Abstract hentet fra

[https://www.researchgate.net/publication/312472366\\_Effects\\_of\\_Short-Term\\_Lane\\_Closures\\_on\\_the\\_Traffic\\_Flow\\_of\\_Freeways](https://www.researchgate.net/publication/312472366_Effects_of_Short-Term_Lane_Closures_on_the_Traffic_Flow_of_Freeways)

- McGee, H. & Brustlin, V. (2013). *NCHRP Synthesis 443: Practical Highway Design Solutions*. Hentet fra <https://www.nap.edu/catalog/22636/practical-highway-design-solutions>
- Messer, C. J. (1980). *Methodology for evaluating geometric design consistency*. Hentet fra <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/tr/1980/757/757-002.pdf>
- Minnesota Department of Transportation. (2017). Performance-Based Practical Design. Hentet 16. februar 2021 fra <http://www.dot.state.mn.us/policy/operations/op012.html>
- Molland, B. I. B., Slettemark, S. & Rørlien, L. (2016). *Vegdirektoratets behandling av fravik fra krav i normaler* Hentet fra [https://vegtilsynet.com/tilsyn/tilsynsrapporter/vegdirektoratets-behandling-av-fravik-fra-krav-i-normaler/\\_attachment/inline/99bc6bfd-15ab-4741-9acc-a32367beca2e:31aff8355bda6e9211f78c7ce230163570695121/Tilsynsrapport%202016-06.pdf](https://vegtilsynet.com/tilsyn/tilsynsrapporter/vegdirektoratets-behandling-av-fravik-fra-krav-i-normaler/_attachment/inline/99bc6bfd-15ab-4741-9acc-a32367beca2e:31aff8355bda6e9211f78c7ce230163570695121/Tilsynsrapport%202016-06.pdf)
- Neudorff, L. G., Jenior, P., Dowling, R. G. & Nevers, B. L. (2016). *Use of Narrow Lanes and Narrow Shoulders on Freeways: A Primer on Experiences, Current Practice, and Implementation Considerations*. Hentet fra <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42439>
- Nye Veier. (2020a). *Høring fartsgrense på motorveier og standarder på veier med trafikkmengder mellom ÅDT 6.000 – 20.000* [Høringsuttalelse].
- Nye Veier. (2020b). SMART firefelt gir mer trafiksikker vei for pengene. Hentet November 9 2020 fra <https://www.nyeveier.no/nyheter/nyheter/smart-firefelt-gir-mer-trafiksikker-vei-for-pengene/>
- NYSDOT. (2020). *HIGHWAY DESIGN MANUAL*. Hentet fra [https://www.dot.ny.gov/portal/page/portal/divisions/engineering/design/dqab/hdm/hdm-repository/chapt\\_10.pdf](https://www.dot.ny.gov/portal/page/portal/divisions/engineering/design/dqab/hdm/hdm-repository/chapt_10.pdf)
- Politidirektoratet. (2016). *Instrukser for POLITIETS TRAFIKKTJENESTE*. Hentet fra <https://docplayer.me/17325021-Instrukser-for-politiets-trafikkjeneste.html>
- Psarianos, B. (2014). *DESIGN EXCEPTIONS AND SAFETY*. Innlegg presentert ved 6th National Road safety Conference, Athens, Greece. Abstract hentet fra [https://www.researchgate.net/publication/273887777\\_DESIGN\\_EXCEPTIONS\\_AND\\_SAFE TY](https://www.researchgate.net/publication/273887777_DESIGN_EXCEPTIONS_AND_SAFE TY)
- Regjeringen. (2017). *Nasjonal transportplan 2018 - 2029*. Hentet fra <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-33-20162017/id2546287/?ch=1>
- Regjeringen. (2020). Smal firefelts veg gir større fleksibilitet Hentet 10. desember 2020 fra <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/smal-firefelts-veg-gir-storre-fleksibilitet/id2789930/>
- Ringen jr., S. (2020). *Dybdeanalyse av dødsulykker i vegtrafikken 2019* Statens vegvesen. Hentet fra [https://www.vegvesen.no/\\_attachment/3028829/binary/1376245?fast\\_title=Dybdeanalyser+av+d%C3%B8dsulykker+i+vegtrafikken+2019.pdf](https://www.vegvesen.no/_attachment/3028829/binary/1376245?fast_title=Dybdeanalyser+av+d%C3%B8dsulykker+i+vegtrafikken+2019.pdf)
- Scurry, K. (2014). *Using CMFs to Quantify the Safety Performance of Design Decisions and Exceptions*. New Jersey, Washington, DC: Federal Highway Administration, Office of Safety. Hentet fra <https://safety.fhwa.dot.gov/tools/crf/resources/cmfs/docs/dde.pdf>
- Slinde, M. (2021). *Dimsjoneringsklasse H3 -oppdaterte regler* [Upublisert materiale].
- SSB. (2020). Trafikkulykker med personskade. Hentet 8. oktober 2020 fra <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/statistikker/vtu/aar>
- Stamatiadis, N. & Pigman, J. (2009). *Impact of shoulder width and median width on safety*. Hentet fra <http://www.cmfclearinghouse.org/studydocs/NCHRP%20Report%20633%20Impact%20of%20Shoulder%20Width%20and%20Median%20Width%20on%20Safety.pdf>

- Statens vegvesen. (1991). *Kapasitet på vegstrekninger - Håndbok 159*. Hentet fra <https://www.vegvesen.no/attachment/61458/binary/14165>
- Statens vegvesen. (2014a). *Trafikkberegninger*. Hentet fra [https://www.vegvesen.no/attachment/61445/binary/964059?fast\\_title=H%C3%A5ndbok+V713+Trafikkberegninger+\(5+MB\).pdf](https://www.vegvesen.no/attachment/61445/binary/964059?fast_title=H%C3%A5ndbok+V713+Trafikkberegninger+(5+MB).pdf)
- Statens vegvesen. (2014b). *Veg- og gateutforming - Håndbok N100* vegvesen.no: Statens vegvesen. Hentet fra [https://www.vegvesen.no/attachment/2650377/binary/1320039?fast\\_title=Tidligere+utgave+av+h%C3%A5ndbok+N100+Veg-og+gateutforming+%288+MB%29.pdf](https://www.vegvesen.no/attachment/2650377/binary/1320039?fast_title=Tidligere+utgave+av+h%C3%A5ndbok+N100+Veg-og+gateutforming+%288+MB%29.pdf)
- Statens vegvesen. (2019a). *Utredning av smal 4-felts veg og standarder på veger med ÅDT 6 000 - 20 000*. Hentet fra [https://www.vegvesen.no/attachment/2846680/binary/1349437?fast\\_title=Utredning+smal+4+felt+ved+%C3%85DT+6000-20000.pdf](https://www.vegvesen.no/attachment/2846680/binary/1349437?fast_title=Utredning+smal+4+felt+ved+%C3%85DT+6000-20000.pdf)
- Statens vegvesen. (2019b). *Veg- og gateutforming - Håndbok N100*. vegvesen.no: Statens vegvesen. Hentet fra <https://www.vegvesen.no/attachment/61414>
- Statens vegvesen. (2020a). *Dødsulykker som følge av kjøretøy på eller nær skulder på veger med fartsgrense 90, 100 og 110 km/t* [Notat].
- Statens vegvesen. (2020b). *Oppsummering av ulykkesstatistikk mm for firefelts motorveg og 2/3-felts veger* [Notat].
- Stein, W. J. & Neuman, T. R. (2007). *Mitigation strategies for design exceptions*. Hentet fra <https://www.wsdot.wa.gov/publications/fulltext/ProjectDev/Manuals/MitigationManual.pdf>
- Tarko, A. P., Villwock, N. M. & Blond, N. (2008). Effect of median design on rural freeway safety: flush medians with concrete barriers and depressed medians. *Transportation research record*, 2060(1), 29-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/2060-04>
- Thorud, R. (2020). *FARTSGRENSE PÅ MOTORVEGER OG STANDARDER PÅ VEGER MED TRAFIKMENGDER MELLOM ÅDT 6 000 – 20 000* [Høringsuttalelse]. Oslo: Statens Vegvesen.
- Trafikverket. (2012). *Nya VGU - TrV Krav o råd - Vägutformning*. Hentet fra <https://nmfv.dk/wp-content/uploads/2012/12/VGU-2012.pdf>
- Trafikverket. (2020a). *Krav - VGU, Vägors och gators utformning* Hentet fra [https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/71830/Ineko.Product.RelatedFiles/2020\\_029\\_vagar\\_och\\_gators\\_utformning\\_krav.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/71830/Ineko.Product.RelatedFiles/2020_029_vagar_och_gators_utformning_krav.pdf)
- Trafikverket. (2020b). *Råd - VGU, Vägars och gators utformning*. Hentet fra [https://trafikverket.ineko.se/Files/en-US/71833/Ineko.Product.RelatedFiles/2020\\_031\\_vagar\\_och\\_gators\\_uformning\\_rad.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/en-US/71833/Ineko.Product.RelatedFiles/2020_031_vagar_och_gators_uformning_rad.pdf)
- Transportation Research Board. (2016). *Highway Capacity Manual*
- Vadeby, A. & Forsman, Å. (2018). *Traffic safety effects of new speed limits in Sweden*. Hentet fra [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457517300532?casa\\_token=qSinsFQb5NYAAAAA:VU5CYz2uy2GindRGPHtZwqKY4MORPkDNuG522S5s6efD9tDMjrjVGoV1jD7R9vwXzH2klNyLn0Y](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457517300532?casa_token=qSinsFQb5NYAAAAA:VU5CYz2uy2GindRGPHtZwqKY4MORPkDNuG522S5s6efD9tDMjrjVGoV1jD7R9vwXzH2klNyLn0Y)
- Vejdirektoratet. (2012a). *Grundlag for udformning af trafikarealer*. Hentet fra <https://nmfv.dk/wp-content/uploads/2012/12/Grundlag-for-udformning-af-trafikarealer-H%C3%A5ndbog.pdf>
- Vejdirektoratet. (2012b). *Planlægning af veje og stier åbent land*. Hentet fra <https://nmfv.dk/wp-content/uploads/2012/12/Planl%C3%A6gning-af-veje-og-stier-i-%C3%A5bent-land-H%C3%A5ndbog.pdf>
- Vejdirektoratet. (2013). *Større frihed til valg af tværprofil*. Hentet 4. mars 2021 fra <https://www.vejdirektoratet.dk/nyhed/stoerre-frihed-til-valg-af-tvaerprofil>

- Vejdirektoratet. (2015). *Kapacitet og serviceniveau*. Hentet fra <https://nmfv.dk/wp-content/uploads/2015/11/H%C3%A5ndbog-for-Kapacitet-og-serviceniveau-2015-09.pdf>
- Vejdirektoratet. (2018). *Tværfiler i åbent land* Hentet fra <http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?q=tv%c3%a6rprofiler+&docId=vd20180113-full#pkt5.1>
- Vejdirektoratet. (2019). *KAPACITET OG SERVICENIVEAU*. Hentet fra <http://vejregler.lovportaler.dk/showdoc.aspx?q=h%c3%a5ndbog+for+kapacitet+og+serviceniveau&docId=vd20190071-full>
- Vejdirektoratet. (2020). *Statsvejnettet 2020*. Hentet fra <https://www.ft.dk/samling/20191/almdel/TRU/bilag/490/2249966/index.htm>
- Aakre, A. (2014). *Avvikling på 2+1 veg med midtdeler - grunnlag for vurdering av ÅDT grense for 4-felts veg*. NTNU Trafikktknisk senter.

## **Vedlegg**

Vedlegg 1 – Regneark kapasitet og service-nivå

Vedlegg 2 – Regneark kø og forsinkelse

## Vedlegg 1 – Regneark kapasitet og service-nivå

Regneark kapasitet og service-nivå					
Valgt scenario:	x = valgt				
Scenario 1: Normal drift	x				
Scenario 2: Stengt skulder					
Scenario 3: Stengt kjørefelt					
Beskrivelse	Symbol	Formel	Enhet	Verdi	
<b>Steg 1: Inngangsdata</b>					
Antall kjørefelt per retning	N		stk	2	
Fartsgrense			km/t	110	
Andel tunge kjt	P_T		desimal	15 %	
Kjørefeltbredde	LW		m	3,50	
Ytre skulderbredde	RLC		m	2,75	
Dimensjonerende timefaktor	PHF		desimal	0,94	
Terrengefaktor	E_T		pbe	2,00	
<b>Steg 2: Estimer og juster fri-flyt hastighet</b>					
Grunnleggende fri-flyt hastighet	BFFH		km/t	110	
Justeringsfaktor kjørefeltbredde	f_LW		km/t	1,58	
Justeringsfaktor fri sidebredde	f_RLC		km/t	0,00	
Fri-flyt hastighet	FFH	$BFFH \cdot f_{LW} \cdot f_{RLC}$	km/t	108,4	
<b>Steg 3: Estimer og juster kapasitet</b>					
				<b>HCM</b>	<b>DK</b>
Grunnleggende kapasitet	c	$2200 + 10 \cdot (\text{MIN}(70; FFH) - 50)$	pbe/t/felt	2374	2300
Kapasitetsjusteringsfaktor	CAF			1,00	1,00
Justert kapasitet	c_adj	$c \cdot CAF$	pbe/t/felt	2374	2300
<b>Steg 4: Juster etterspørselsintensitet</b>					
Etterspørselsintensitet	v_p		pbe/t/felt	1000	1000
Justeringsfaktor tunge kjt	f_HV	$1 / (1 + P_T \cdot (E_T - 1))$	desimal	0,87	0,87
Andel ÅDT i dim. time	K		desimal	0,10	0,10
Retningsfordelt ÅDT i dim. time	D		desimal	0,67	0,67
Etterspurt trafikkmengde	V	$v_p \cdot PHF \cdot N \cdot f_{HV}$	kjt/t	1635	1635
ÅDT	ÅDT	$V / (K \cdot D)$	kjt/d	24400	24400
<b>Steg 5: Estimer hastighet og tetthet</b>					
Belastningsgrad	v/c	v/c	desimal	0,42	0,43
Bruddpunkt	BP	$[1000 + 40 \cdot (75 - FFH)] \cdot CAF^2$	pbe/t/felt	1305	1305
Hastighet (vp <= BP)	S1	$S = FFH$	km/t	108,4	108,4
Hastighet (BP < vp <= c)	S2	Se formel i rapport	km/t	106,5	105,9
Tetthet (S1)	D	$v_p / S1$	pbe/km/felt	9	9
Tetthet (S2)	D	$v_p / S2$	pbe/km/felt	9	9
<b>Steg 6: Fastslå service-nivå</b>					
Service-nivå (S1)				B	B
Service-nivå (S2)				B	B



## Vedlegg 2 – Regneark kø og forsinkelse

### Regneark kø og forsinkelse

Beskrivelse	Symbol	Formel	Enhet	Verdi
<b>Valgt hendelse:</b>				
Stengt skulder (S2)	x			
Stengt kjørefelt (S3)	x			
<b>Valgt hendelse:</b>				
Stengt skulder (S2)	x			
Stengt kjørefelt (S3)	x			
<b>Beskrivelse</b>				
Antall felt	N		stk	2
Dimensjonerende timefaktor	PHF		desimal	0,94
Justeringsfaktor tunge kjt	f_HV		desimal	0,87
Etterspørselsintensitet	v_p		pbe/t/felt	1500
Etterspurt trafikkmengde	V	$v_p * PHF * 2 * f_{HV}$	kjt/t	2453
Normal kapasitet	c		pbe/t/felt	2300
Total normal kapasitet	C	$c * PHF * 2 * f_{HV}$	kjt/t	3762
<b>Hendelse</b>				
Redusert kapasitet	c'		pbe/t/felt	1400
Total redusert kapasitet	C'	$c' * PHF * N * f_{HV}$	kjt/t	2290
Varighet hendelse	Tc		t	0,50
Ankommet trafikk	CF1	$V * Tc$	kjt	1227
Avviklet trafikk	CF2	$C * Tc$	kjt	1145
<b>Resultater</b>				
Maks kølengde	Lkø	$CF1 - CF2$	kjt	82
Total varighet kø	Te	$Tc + (Lkø / (C - V))$	t	0,56
Antall kjøretøy berørt	Nkjt	$V * Te$	kjt	1380
Total forsinkelse	Tf	$((V - C') * Tc * Te) / 2$	t	23,00
Maksimal forsinkelse	Tm	$((CF1 - CF2) / C) * 60$	min	1,30
Gj. forsinkelse per kjt	Tgj	$(Tf * 60) / Nkjt$	min	1,00



