

Intelligent styrning av trafiksignaler

– Trafiksignalstyrningens påverkan på
tidsfördröjningar och utsläpp i trafiken

Intelligent control of traffic signals

– *Traffic signal control and its impact on delays and
emissions in traffic*

Filip Tammergård

Handledare Sweco: Magnus Hjalmdahl

Examinator: Patrik Thollander

Handledare Linköpings universitet: Maria Andersson

Sammanfattning

Inrikes transporter står för en tredjedel av Sveriges totala växthusgasutsläpp. Detta gör transportsektorn till ett strategiskt viktigt område för utsläppsnedskärningar om regeringens målsättning att Sverige senast år 2045 inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser ska kunna nås. En strategi för att minska transportsektorns klimatpåverkan är att göra miljövänliga transporttyper mer attraktiva genom att minska fördröjningstiden för kollektivtrafik, cyklister och fotgängare.

Ett kostnadseffektivt sätt att minska fördröjningar och utsläpp i trafiken är att optimera styrningen av trafiksignaler. I korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden i Uppsala finns det behov av att undersöka vilken potential intelligenta trafiksignaler har att minska fördröjningar och utsläpp inför ett eventuellt teknikbyte.

Fördröjningar och utsläpp undersöktes i den här studien genom att först analysera nuläget i korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden med hjälp av programmet PTV Vissim. Därefter genomfördes samma analys med en optimerande trafiksignalsstyrning med olika grader av prioritering av bussar, cyklister och fotgängare.

Den optimerande styrningen visade sig ha potential att minska fördröjningstider för bussar med 57 procent, för cyklister med 53 procent och för fotgängare med 9 procent med de mest fördelaktiga prioriteringsgraderna. Även fördröjningstiden för personbilar och tunga lastbilar visade sig ha potential att reduceras. De mest fördelaktiga prioriteringsgraderna resulterade i minskade utsläpp av koldioxid med 4 procent, kväveoxider med 6 procent och minskad uppkomst av PM10 med 5 procent. Om minskningen av fördröjningstider resulterar i att några bilister framöver väljer att ta buss, cykel eller att gå i stället bedöms införandet av optimerande signalstyrning ha potential att minska utsläppen ytterligare.

Minskning av fördröjningstider och utsläpp i korsningen uppskattas resultera i inbesparade kostnader som uppgår till nästan fem miljoner kronor per år. Uppsala kommun uppskattar att det åtminstone finns nio korsningar i Uppsala som liknar Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden och sannolikt skulle ge liknande resultat. Förmodligen finns det därför många liknande korsningar i Sverige och stor potential att reducera fördröjningstider och utsläpp.

Abstract

Domestic transportation constitutes a third of the total greenhouse gas emissions in Sweden. This makes the transportation sector an important strategic target for reduction of emission if the governmental aim that Sweden is to have no net emissions of greenhouse gases before 2045 shall be achieved. One strategy to reduce the climate impact of the transportation sector is to make environmentally friendly transportation types more attractive. Increased attraction can be achieved for example by reducing the delay for public transport, cyclists and pedestrians.

A cost-effective means to reduce delays and emissions in traffic is to optimize the traffic signal control. In the intersection between Tycho Hedéns väg and Fåhlhagsleden in Uppsala there is a need to examine what potential intelligent traffic signals have to reduce delays and emissions before a possible switch of signal control technique.

Delays and emissions were examined in this study by firstly analyzing the current traffic situation. Thereafter, the same analysis is carried through with optimizing signal control with different levels of priority of buses, cyclists and pedestrians.

The optimizing signal control turned out to have the potential to reduce delays for buses by 57 percent, for cyclists by 53 percent and for pedestrians by 9 percent with the most advantageous priority levels. The delays for cars and heavy goods vehicles turned out to have potential to be reduced as well. The most advantageous priority levels resulted in reduced carbon dioxide emissions by 4 percent, nitrogen oxides emissions by 6 percent and reduced generation of PM10 by 5 percent. If the reduction of delays causes a certain amount of car travelers to choose to travel by bus, bike or to walk instead, the optimizing signal control is considered to have an even larger potential to reduce emissions.

The reduction of delays and emissions in the intersection is estimated to result in saved costs of almost five million SEK per year. Uppsala municipality estimates that there are at least nine intersections in Uppsala that are similar to Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden and probably would give similar results. Therefore, there are presumably many similar intersections in Sweden and a great potential for reductions of delays and emissions.

Förord

Detta examensarbete har varit mycket spännande och lärorikt. Jag har fått sätta mig in i ett ämne som jag hade begränsad kunskap inom innan arbetets start och som visade sig vara både mer komplicerat och roligare än vad jag hade kunnat ana.

Jag vill rikta ett särskilt tack till tre personer som har haft en officiell inblandning och följt mitt arbete på nära håll:

- Magnus Hjalmdahl, Sweco, handledare
- Patrik Thollander, Linköpings universitet, examinator
- Maria Andersson, Linköpings universitet, handledare

Från början var tanken att göra en generell utvärdering av potentialen med intelligenta trafiksignaler. Under arbetets gång kom jag dock i kontakt med Uppsala kommun som visade sig ha stort intresse av en utvärdering för en specifik korsning som underlag för ett eventuellt teknikbyte. Uppsala kommuns intresse konkretiserade examensarbetet och gav en känsla av att arbetet var efterfrågat, vilket jag är glad för. Jag vill tacka två personer som var särskilt behjälpliga och bidrog med dataunderlag till korsningen i Uppsala:

- Sampo Hinnemo, Uppsala kommun
- Magnus Lind, WSP

Tack till Sweco som erbjöd kontorsplats, umgänge och hjälp från alla möjliga håll under arbetets gång. Ett särskilt tack till min kontorslandskapsgranne Marcus som visade stort engagemang och erbjöd sin hjälp otaliga gånger.

Slutligen vill jag rikta ett tack till mina opponenter Oscar och Jesper för konstruktiv kritik och till min fru Ida som stöttar i allt.

Linköping, juni 2019

Filip Tammergård

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Trafiksignalsstyrning	2
1.2	Fyrstegsprincipen.....	4
1.3	Syfte och frågeställningar	5
1.4	Omfattning och avgränsningar	5
1.5	Fallstudie	5
1.6	Struktur	7
2	Teoretisk referensram.....	8
2.1	Trafiksignalsstyrning	8
2.2	Trafiksignalsstyrning i Sverige.....	12
2.3	Trafikdetektering	13
2.4	Trafikfördröjning	14
2.5	Prioritering av kollektivtrafik	15
2.6	Trafikmodellering.....	17
2.6.1	Mikrosimulering.....	17
2.7	Det adaptiva signalstyrningssystemet PTV Epics	17
2.8	Metodbeskrivning vid trafiksimulering	20
2.8.1	Problemformulering	21
2.8.2	Datainsamling.....	22
2.8.3	Uppbyggnad av basmodell	26
2.8.4	Verifiering	26
2.8.5	Kalibrering	27
2.8.6	Validering.....	28
2.8.7	Analys av alternativ.....	28
2.8.8	Dokumentering.....	29
2.9	Emissionsmodellering	29
2.9.1	VERSIT+.....	30
3	Metod och genomförande.....	33
3.1	Trafiksimulering	33
3.1.1	Problemformulering	33
3.1.2	Datainsamling.....	34
3.1.3	Uppbyggnad av basmodell	43

3.1.4	Verifiering	43
3.1.5	Kalibrering	44
3.1.6	Analys av alternativ	45
3.2	Emissionsmodellering	46
4	Resultat	49
5	Diskussion	55
6	Slutsatser	64
	Referenser	65
	Bilaga A Bygghandling för Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden	71
	Bilaga B Tidmatris	72
	Bilaga C Detektorplaceringar	73
	Bilaga D Detektorfunktioner	74

Figurförteckning

Figur 1. Principutseende för trafiksignaler enligt konventionen om vägmärken och signaler. Bild används med tillåtelse från Harshal Desai.	2
Figur 2. En del av Tycho Hedéns väg i Uppsala. Tre korsningar med planerad samordnad adaptiv styrning är streckat rödmarkerade medan korsningen Tycho Hedéns väg– Fåhlhagsleden planeras för oberoende adaptiv styrning och är heldraget grönmarkerad. © OpenStreetMaps bidragsgivare	6
Figur 3. Exempel på primär- respektive sekundärkonflikter.....	8
Figur 4. Signalgrupp A för fordon och signalgrupp B för fotgängare.	9
Figur 5. Uppbyggnad av ett signalprogram med signalfaser och signalgrupper.....	9
Figur 6. Signalväxlingsschema i trafiksignaler för fordon och cyklister i Sverige.....	10
Figur 7. Signalväxlingsschema i trafiksignaler för fotgängare i Sverige.....	10
Figur 8. Schematisk beskrivning av begreppen säkerhetstid, spärrtid och rödtid för trafiksignaler för fordon och cyklister.....	11
Figur 9. Schematisk beskrivning av begreppet mellantid i trafiksignaler för fordon och cyklister.	11
Figur 10. Schematisk beskrivning av begreppet mellantid i trafiksignaler för fotgängare.	12
Figur 11. Spår efter placering av en induktiv slinga under asfalten i anslutning till en korsning.	13
Figur 12. Jämförelse mellan markytan som tas i anspråk av 40 bilar, en buss med 40 passagerare respektive 40 cyklister. Används med tillåtelse från Gävle kommun.	15
Figur 13. De fyra prioriteringsfunktionerna förlängning, avkortning, extrafas och återtagen start. Pilarna som pekar neråt representerar tidpunkten när en buss detekteras. De vertikala sträckan representerar tidpunkten när fasväxlingen normalt hade skett. Pilen uppåt representerar tidpunkten när bussen passerar stopplinjen vid signalanläggningen.....	16
Figur 14. Optimeringsprocess för styrningsstrategin PTV Epics.....	18
Figur 15. Två alternativa utformningar av ett signalprogram som kan utvärderas av PTV Epics.....	19
Figur 16. Trafikverkets rekommendation för arbetsprocess vid trafiksimulering. Inspirerat av Bång et al. (2014).	21
Figur 17. Exempel på svängandelar för ett inflöde till en korsning	24
Figur 18. Exempel på ett vägnät med fyra korsningar.	25
Figur 19. Utformning av studiekorsningen. © OpenStreetMaps bidragsgivare.....	33
Figur 20. Tycho Hedéns väg och närliggande vägnät med numrerade startpunkter. Studiekorsningen återfinns längst ner till höger i bilden.....	35
Figur 21. Utseende av studiekorsningen isolerat från resten av vägnätet.	37
Figur 22. Svängandelar i studiekorsningen. De nummer som visas vid utkanten av varje väg motsvarar numreringen i Figur 21.....	39
Figur 23. Studiekorsningen med gångbana, cykelbana, busshållplatser, trafiksignaler och detektorer utritade.	40
Figur 24. Signalgrupper för studiekorsningen. Signalgruppsetiketteringen motsvarar etiketteringen i ritningen i Bilaga A.....	41

Figur 25. Signalprogram för studiekorsningen. Numrering utifrån Figur 21 och Figur 23.	41
Figur 26. Överensstämmelse mellan modell och trafikmätningar efter kalibrering.	44
Figur 27. Placering av detektorer enligt ungefärliga rekommendationer av PTV AG (2017).	45
Figur 28. Jämförelse av fördröjningstider för de olika fallen.	50
Figur 29. Jämförelse av koldioxidutsläpp för de olika fallen.	51
Figur 30. Jämförelse av kväveoxidutsläpp för de olika fallen.	53
Figur 31. Jämförelse av uppkomst av PM10 för de olika fallen.	54
Figur 32. Fördröjningstider för de alternativ som antingen resulterar i en fördröjningsminskning eller maximalt en femprocentig ökning för fotgängare.	56
Figur 33. Fördröjningstider för de alternativ från Figur 32 där bussviktningen är 50 eller 100.	57
Figur 34. Fördröjningstider för nuläget och fallet B50, Ö25 som kan anses vara det bästa alternativet.	57

Tabellförteckning

Tabell 1. Ett urval av Uppsala kommuns trafikrelaterade mål från översiktsplanerna år 2006, 2010 och 2016.	6
Tabell 2. Approximativa placeringar av detektorer för respektive LHOVRA-funktionalitet. .	14
Tabell 3. OD-matris för exempelvägnätet i Figur 18.	25
Tabell 4. Inflöde av trafik i respektive startpunkt i Figur 20.	35
Tabell 5. OD-matris från matrisestimering i programmet Aimsun.	36
Tabell 6. Antal fordon från respektive startpunkt som väljer någon av målpunkterna 10, 11 eller 12.	38
Tabell 7. Inflöde av trafik i studiekorsningens respektive startpunkter. Startpunkterna definieras i Figur 21.	38
Tabell 8. Antal fordon från någon av startpunkterna 10, 11 eller 12.	38
Tabell 9. OD-matris för nätverket i Figur 21. Diagonalen, som är gråmarkerad, representerar andelen fordon som har samma start- och målpunkt.	39
Tabell 10. Svängandelar för nätverket i Figur 21.	39
Tabell 11. Inflöde av fotgängare och cyklister vid studiekorsningen. Startpunkterna definieras i Figur 23.	40
Tabell 12. Grönblinktid, rödtid, rödgultid, gultid och mellantid för respektive fasbyte studiekorsningen.	42
Tabell 13. Mellantider för respektive fasbyte i studiekorsningen. Faserna är definierade i Figur 24.	43
Tabell 14. Detektorers avstånd från stopplinjen för varje startpunkt i Figur 27 enligt ungefärliga rekommendationer av PTV AG (2017). Inom parentes anges körfältsdetektion. I kolumnen 30 betyder exempelvis 70 m (västerut) att detektorn som detekterar fordon i svängkörfältet där fordon ska svänga västerut är placerad 70 m från stopplinjen.	46
Tabell 15. Nio alternativ som ska utvärderas i form av alla möjliga kombinationer av tre olika bussprioriteringsgrader (B) respektive tre övergångsställesprioriteringsgrader (Ö). Viktningen av fotgängare och cyklister representerar närvaro av dessa och multipliceras inte med antalet väntande.	46
Tabell 16. Uppsala kommuns fordonspark uppdelad på använda drivmedel.	47
Tabell 17. Andel personbilar, bussar respektive tunga lastbilar som drivs med olika drivmedel.	47
Tabell 18. Andelen personbilar, bussar och tunga lastbilar som drivs med respektive drivmedel enligt EnViVers kategorier.	48
Tabell 19. Andel personbilar, bussar och tunga lastbilar nyare än ett år.	48
Tabell 20. Genomsnittliga fördröjningstider i sekunder [s] i de olika fallen.	49
Tabell 21. Procentuell förändring i fördröjningstider jämfört med nuläget för de olika fallen.	49
Tabell 22. Genomsnittliga koldioxidutsläpp i kilogram per timme [kg/h] i de olika fallen. ...	50
Tabell 23. Procentuell förändring av koldioxidutsläpp jämfört med nuläget för de olika fallen.	51
Tabell 24. Genomsnittliga kväveoxidutsläpp i gram per timme [g/h] i de olika fallen.	52

Tabell 25. Procentuell förändring av kväveoxidutsläpp jämfört med nuläget för de olika fallen.....	52
Tabell 26. Genomsnittlig uppkomst av PM10 i gram per timme [g/h] i de olika fallen.....	53
Tabell 27. Procentuell förändring i uppkomst av PM10 jämfört med nuläget för de olika fallen.....	54
Tabell 28. Utsläppsminskningar för fallet B50, Ö25 jämfört med nuläget, antaget en 25-procentig minskning av personbilstrafik. De totala utsläppsminskningarna representerar minskningen sett till korsningen som helhet.	58
Tabell 29. Beräkning av total inbesparad tid och total inbesparad kostnad i studiekorsningen. Variabeln h_f står för förseningstimme, s_f för förseningssekund och h för timme.	59
Tabell 30. Inbesparade kostnader för koldioxidutsläpp, kväveoxidutsläpp och uppkomst av PM10 samt den totala inbesparade kostnaden för studiekorsningen.....	60

1 Inledning

År 2015 antog FN:s medlemsstater Agenda 2030, som infattar 17 globala mål för hållbar utveckling (FN, 2015). Försök till att definiera begreppet hållbar utveckling kan resultera i vitt skilda koncept (Daly, 2006). Världskommissionen för miljö och utveckling definierade hållbar utveckling år 1987 i rapporten Vår gemensamma framtid (FN, 1987) som följande:

”En hållbar utveckling är en utveckling som tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov.”

De 17 globala målen för hållbar utveckling baseras på tre dimensioner av hållbarhet, nämligen ekologisk, ekonomisk respektive social hållbarhet (FN, 2015). Samtliga tre dimensioner kan relateras till trafikutveckling. Några kopplingar mellan de tre dimensionerna av hållbar utveckling och trafik presenteras i följande stycken.

Ekologisk hållbarhet

Ett av de 17 globala målen inom Agenda 2030 är att bekämpa klimatförändringarna (FN, 2015). Enligt regeringens handlingsplan för Agenda 2030 (Regeringen, 2018a) ska Sverige vara ett föregångsland i genomförandet av agendan, bland annat genom målet att Sverige ska bli världens första fossilfria välfärdsland och senast år 2045 inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser.

Enligt Naturvårdsverket (2017b) står inrikes transporter för en tredjedel av Sveriges totala utsläpp, vilket gör transportsektorn till ett strategiskt viktigt område för utsläppsnedskärningar om regeringens utsläppsmål för år 2045 ska kunna nås.

Ekonomisk hållbarhet

Utvecklingen av uppkopplade och självkörande fordon går snabbt. Det råder oenighet bland forskare kring när självkörande fordon kommer att vara allmänt tillgängliga på marknaden (Greenblatt & Shaheen, 2015). Enligt en prognos av IHS Automotive (2014) kommer fullständigt automatiska fordon vara möjliga att köpa och använda i trafiken senast år 2030 och stå för 90 procent av fordonsflottan år 2055. Det stundande skiftet till självkörande trafik ställer nya typer av krav på att infrastrukturen förbereds och utvecklas på ett sätt som är kompatibelt även i en framtid med självkörande fordon (Regeringen, 2018b). För att säkerställa en långsiktig ekonomisk hållbarhet i dagens investeringar i, och utveckling av, trafikteknik behöver kompatibilitet med självkörande och uppkopplade fordon eftersträvas. Denna aspekt inkluderas i mål 9 inom Agenda 2030, som också innefattar kostnadseffektivitet (FN, 2015).

Social hållbarhet

Mål 11 inom Agenda 2030 lyder ”hållbara städer och samhällen” (FN, 2015). I dag bor mer än hälften av världens människor i städer, en andel som väntas öka till nästan 70 procent till år 2050 (FN, 2018). Att städer blir folktätare ställer höga krav på utveckling av bland annat

infrastruktur och transportsystem. Utifrån mål 11 har ett antal delmål definierats, varav delmål 2 tydligt berör kopplingen mellan trafik och social hållbarhet (FN, 2015):

”Senast 2030 tillhandahålla tillgång till säkra, ekonomiskt överkomliga, tillgängliga och hållbara transportsystem för alla. Förbättra vägtrafiksäkerheten, särskilt genom att bygga ut kollektivtrafiken, med särskild uppmärksamhet på behoven hos människor i utsatta situationer, kvinnor, barn, personer med funktionsnedsättning samt äldre personer.”

Enligt WHO (2018) har trafikolyckor ökat från att vara den tionde vanligaste dödsorsaken i världen år 2000 till en åttondeplats år 2016. Utvecklad trafiksäkerhet är därför av stor vikt för den sociala hållbarheten.

Enligt Trafikverket (2014) utgör resor kortare än 5 kilometer ungefär hälften av alla bilresor i Sverige. I tätorter uppskattas 80 procent bilresorna vara kortare än 4 kilometer. Just de korta resorna i tätorter bedöms ha störst potential att ersättas med kollektivtrafik eller cykel, vilket skulle vara positivt för flera aspekter av hållbar utveckling, men inte minst för den sociala hållbarheten i form av ökad motion och mindre trängsel och buller (Trafikverket, 2010).

1.1 Trafiksignalsstyrning

Trafiksignaler används i Sverige för att styra trafiken och tidsseparera trafikanter vars vägar korsar varandras (Al-Mudhaffar, 2006). Enligt konventionen om vägmärken och signaler ska rött, gult och grönt ljus användas i fordonstrafiksignaler i den vertikala ordning som visas i Figur 1 (UNECE, 2006). I förlängningen är syftet med trafiksignaler att öka trafiksäkerheten (Trafikverket, 2004). Enligt Trafikverket (2015b) minskar antalet olyckor i en fyrvägskorsningar med i genomsnitt 30 procent vid införandet av trafiksignaler.



Figur 1. Principutseende för trafiksignaler enligt konventionen om vägmärken och signaler. Bild används med tillåtelse från Harshal Desai.

Världens första trafiksignalanläggning installerades år 1868 i London och använde sig av mekaniska armar med flaggor tillsammans med röda och gröna gaslyktor (Al-Mudhaffar, 2006). Dessa exploderade så småningom och det dröjde ett halvt sekel innan nästa trafiksignalanläggning installerades (Webster & Cobbe, 1966).

I och med tekniska framsteg finns i dag stora möjligheter att samla in data i trafiken i form av bland annat trafikflöden och att använda dessa data för att bättre anpassa styrningen av trafiksignalerna efter den rådande trafiksituationen. De tekniska framstegen parallellt med den ökade medvetenheten kring miljöproblem kopplade till utsläpp i trafiken har utvidgat syftet med trafiksignaler till att också innefatta förbättrad miljö (Al-Mudhaffar, 2006).

Styrningen av trafiksignaler kan ske på olika sätt. Transportforskningskommissionen (1982) har grupperat olika styrningsstrategier enligt följande:

- **Oberoende styrning**, genom vilken trafiksignalerna vid en korsning styrs utan hänsyn till trafiksituationen i närliggande korsningar.
- **Samordnad styrning**, genom vilken styrningen av trafiksignalerna vid en korsning sker med hänsyn till trafiksignalstyrningen i närliggande korsningar.

Med anledning av komplexiteten i samordnade styrningsstrategier kommer endast oberoende styrning att undersökas i denna studie. Oberoende styrningsstrategier kan i sin tur delas in i kategorierna tidsfixerad styrning, fordonsaktiverad styrning eller optimerande realtidsstyrning (Transportforskningskommissionen, 1982).

Tidsfixerad styrning

Tidsfixerad styrning, även kallad tidsstyrning, är den äldsta och enklaste typen av oberoende styrning och introducerades i Sverige år 1930 (Al-Mudhaffar, 2006). Med tidsstyrning är ordningen och tidslängderna för grönt, gult respektive rött ljus fixerat i förväg och ingen realtidsinformation från trafiken används (Courage et al., 1996). Vid korsningar med tidsstyrda trafiksignaler kan inte signalknappar för fotgängare användas. Eftersom styrningssekvensen är fixerad i förväg kan det bli rött ljus i en riktning där trafikflödet är stort samtidigt som det är grönt i en korsande riktning där behovet är litet eller obefintligt.

Fordonsaktiverad styrning

Fordonsaktiverad styrning, även kallad fordonsstyrning, utgår till skillnad från tidsstyrning inte endast från ett fixerat tidsschema, utan utifrån att fordon som närmar sig en korsning detekteras (Ravikumar & Mathew, 2011). Med fordonsstyrning kan grönt ljus initieras vid ankommande trafik och tidslängden för grönt ljus kan förlängas tills hela kön i en riktning har passerat. Enligt Courage et al. (1996) kan fordonsstyrning markant reducera väntetider och bränsleåtgång i anslutning till korsningar jämfört med tidsstyrning. Vid hög trafikbelastning, däremot, beter sig fordonsstyrda signaler på samma sätt som tidsstyrda signaler (Bång et al., 2014).

Den första ansatsen till fordonsstyrning installerades på 1930-talet i USA (Al-Mudhaffar, 2006). Där användes mikrofoner vid sidan av vägen och ankommande fordon behövde använda signalhornen för att detekteras och få grönt ljus. Av naturliga skäl var efterfrågan för en icke ljudbaserad lösning stor och så småningom uppfanns pneumatiska och elektriska trafikdetektorer som ligger till grund för dagens fordonsstyrningsteknik (Al-Mudhaffar, 2006).

Optimerande realtidsstyrning

Fordonsstyrning tar endast ankommande trafik i den aktuella riktningen i beaktning när beslut kring initiering eller förlängning av grönt ljus ska tas, vilket betyder att eventuell köbildning i korsande trafik inte beaktas (Al-Mudhaffar, 2006). Trots potentiell förbättring jämfört med tidsstyrning är fordonsstyrning förknippat med en rad brister som kräver en mer avancerad styrningsteknik för att lösa (Vincent & Peirce, 1988).

På 1960-talet presenterade Miller (1963) en styrningsteknik vars mål var att minimera total väntetid baserat på ankommande trafik i en hel korsning. Med Millers styrningsteknik som grund har flera styrningstekniker utvecklats som använder trafikläget i en korsning för att optimera olika parametrar i hela korsningen (Al-Mudhaffar, 2006). Dessa styrningstekniker har fått samlingsnamnet optimerande realtidsstyrning eller adaptiv styrning.

1.2 Fyrstegsprincipen

Problem med ökande trafikmängder och köbildning i anslutning till korsningar kan angripas genom att exempelvis bygga ut vägen med nytt körfält. Om samma resultat i stället kan nås genom att förbättra styrningen av korsningens trafiksignaler är det generellt sett ett mer kostnadseffektivt alternativ (Al-Mudhaffar, 2006).

Med tanke på de stora investeringskostnaderna vid om- och nybygge beslutade regeringen år 2002 om den så kallade fyrstegsprincipen, som syftar till att fastslå en prioriteringsordning vid utredning av trafikrelaterade åtgärder (Regeringen, 2008). Enligt fyrstegsprincipen ska åtgärder utvärderas med en prioriteringsordning enligt följande ordning (J.-E. Nilsson, Pyddoke, & Swärdh, 2012):

1. **Tänk om**, vilket bland annat inkluderar planering och prissättning som kan resultera i en förändrad trafikdynamik.
2. **Optimera**, vilket innebär att undersöka om det går att använda de system och anläggningar som redan finns på ett effektivare sätt, genom exempelvis trafikstyrning.
3. **Bygg om**, som innefattar att lägga till ett körfält vid en hårt trafikerad korsning.
4. **Bygg nytt**, genom att exempelvis bygga helt nya vägar.

Enligt Trafikverket (2018b) är det ofta mest kostnadseffektivt att utveckla och optimera de anläggningar som redan finns. Motiveringen till prioriteringsordningen är alltså främst ekonomisk men kan också utvidgas till att vara ekologisk, i form av att det av naturliga skäl också är mer resurseffektivt att utveckla och optimera det som finns jämfört med att bygga om eller bygga nytt. I en rapport från VTI (Janhäll & Carlson, 2017) bedöms trafikstyrning ha

stor påverkan på utsläpp av växthusgaser, inte minst när det gäller styrning av trafiksignaler, vilket tyder på att optimering av trafiksignaler kan vara en effektiv åtgärd ur en ekologisk synvinkel.

Med anledning av fyrstegsprincipen är det motiverat att undersöka effekterna av att justera och optimera styrningen av trafiksignaler i en korsning innan korsningen exempelvis byggs om eller byggs ut.

1.3 Syfte och frågeställningar

Syftet med studien är att utvärdera effekter av att byta från fordonsstyrning till optimerande realtidsstyrning i en medelstor korsning. Utifrån syftet har dessa frågeställningar formulerats:

- Hur påverkas tidsfördröjningen och utsläppen vid införandet av en optimerande realtidsstyrningsteknik i en korsning?
- Vad finns det för möjlighet att minska tidsfördröjningen för linjebussar genom trafiksignalsstyrning och hur påverkar det resten av trafiken i korsningen?

1.4 Omfattning och avgränsningar

Studien omfattar en fallstudie för korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden i Uppsala. Fallstudien beskrivs i avsnitt 1.5.

I avsnitt 3.1.1 presenteras de avgränsningar som är relaterade till trafiksimuleringsprocessen. Studiens övergripande avgränsningar innefattar följande:

- Korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden studeras isolerat och eventuella konsekvenser för trafik i närliggande korsningar beaktas inte.
- En museijärnväg går genom korsningen, men järnvägen används sällan och bortses från i den här studien (Lennakatten, 2019).

1.5 Fallstudie

År 2006 antog Uppsala kommun och Kollektivtrafikförvaltningen (KFT) gemensamt målet att antalet kollektivtrafikresor per år i kommunen ska fördubblas från 30 miljoner resor till 60 miljoner år 2020 (Uppsala kommun, 2014). Även om antalet kollektivtrafikresor har ökat varje år sedan 2006, kommer enligt en prognos av KTF ungefär 6 miljoner resor att saknas för att målet ska uppfyllas (SVT, 2019). Fördubblingsmålet kompletterades i 2010 års översiktsplan med målet att minst hälften av de motoriserade resorna ska ske med kollektivtrafik år 2030 (Uppsala kommun, 2010). I översiktsplanen från 2016 tillkom målet att kollektivtrafik, gång och cykeltrafik ska utgöra minst 75 procent av resandet inom staden år 2050 (Uppsala kommun, 2016). När översiktsplanen antogs utgjorde dessa kategorier endast ungefär 40 procent av resorna, vilket betyder att andelen nästan måste fördubblas innan år 2050 (Region Uppsala, 2017). I Tabell 1 visas en sammanfattning av dessa trafikrelaterade mål.

Tabell 1. Ett urval av Uppsala kommuns trafikrelaterade mål från översiktsplanerna år 2006, 2010 och 2016.

Översiktsplan	Mål
2006	60 miljoner kollektivtrafikresor år 2020
2010	Hälften av de motoriserade resorna sker med kollektivtrafik år 2030
2016	Kollektivtrafik, gång och cykeltrafik utgör 75 procent av resandet år 2050

Målen i Tabell 1 syftar till att minska andelen biltrafik till förmån för kollektivtrafik, gång och cykeltrafik (Uppsala kommun, 2016). Målen är en del i arbetet för en långsiktigt hållbar utveckling av Uppsala kommun.

Vid flera av signalanläggningarna på Tycho Hedéns väg i Uppsala planerar Uppsala kommun att byta styrningsstrategi från fordonsstyrning till adaptiv styrning. Figur 2 visar en del av Tycho Hedéns väg.



Figur 2. En del av Tycho Hedéns väg i Uppsala. Tre korsningar med planerad samordnad adaptiv styrning är streckat rödmarkerade medan korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden planeras för oberoende adaptiv styrning och är heldraget grönmarkerad. © OpenStreetMaps bidragsgivare

Signalanläggningar som ska byta styrningsstrategi inkluderar anläggningar vid korsningar mellan Tycho Hedéns väg och Råbyvägen, Vaksalagatan respektive Hjalmar Brantingsgatan,

som alla tre är markerade med en röd streckad ring i Figur 2. Dessa korsningar planeras styras samordnat, vilket innebär att korsningarnas signalanläggningar kan kommunicera med varandra för att i större utsträckning kunna generera så kallade gröna vågor, där fordon som ska passera alla tre korsningar kan göra det utan att få rött ljus vid någon av korsningarna. Vid ytterligare en signalanläggning planeras byte till adaptiv signalstyrning, men i stället för samordnad ska den vara oberoende. Korsningen är heldraget grönmarkerad i Figur 2. Anledningen att den inte planeras vara samordnad med övriga korsningar i Figur 2 är att den ligger på ett stort avstånd från närmaste korsning, vilket gör det svårt att generera gröna vågor. Därför önskar Uppsala kommun undersöka effekterna av att byta till oberoende adaptiv styrning i korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden, vilket är vad som kommer att göras i den här studien. Uppsala kommun är främst intresserade av att undersöka parametrarna tidsfördröjning och utsläpp. Det finns också ett intresse av att undersöka möjligheter till att minska tidsfördröjningen för linjebussar specifikt.

1.6 Struktur

I avsnitt 2 presenteras en teoretisk referensram som innefattar den teori som förutsätts i resterade delar av studien. I sista delen av den teoretiska referensramen presenteras den rekommenderade metodologin för trafiksimulering och emissionsmodellering som har hämtats från litteraturen. I avsnitt 3 presenteras studiens metod och genomförande parallellt för att undvika upprepningar. Därefter följer resultat, diskussion och slutsatser i respektive kommande avsnitt.

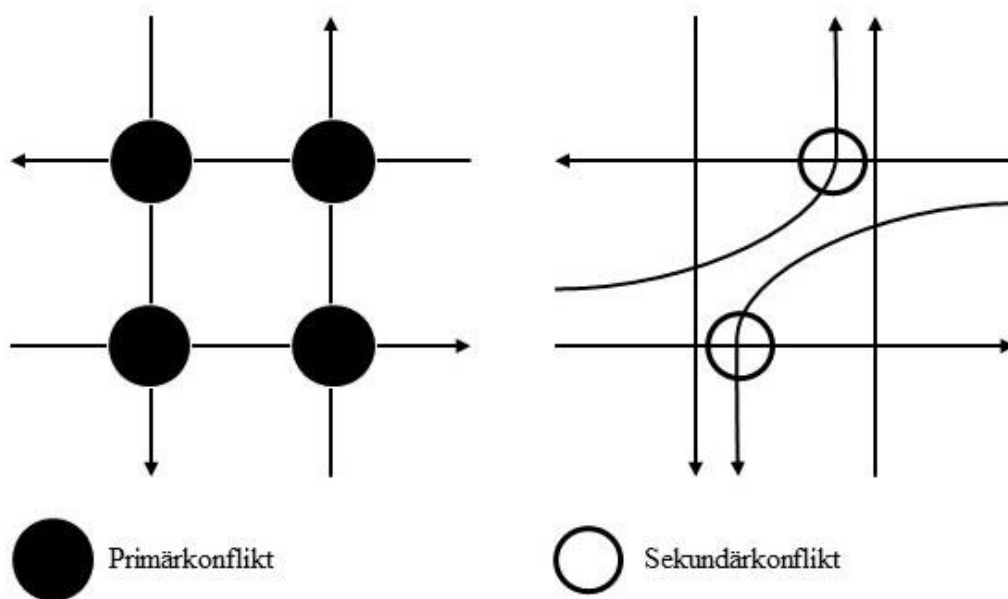
2 Teoretisk referensram

I det här avsnittet redogörs för den teori som krävs för att kunna tillgodogöra sig studiens metod och resultat.

2.1 Trafiksignalsstyrning

I signalreglerade trafikorsningar finns det alltid en eller flera körbanor som korsar varandra, vilket brukar benämnas konflikterande körbanor (van Hout, 2017). Utan konflikterande körbanor finns inget behov av trafiksignaler. Två raka körbanor som korsar varandra brukar benämnas primärkonflikt medan konflikter mellan svängande och annan trafik kallas för sekundärkonflikt (Trafiksäkerhetsverket, 1989). Se Figur 3. Två primärkonflikterande körbanor kan aldrig få grönt ljus samtidigt. Detsamma gäller för sekundärkonflikterande körbanor när signal med pil används. Grön signal med fylld cirkel betyder att det vid sväng kan förekomma mötande trafik som ska ges företräde, vilket betyder att vissa typer av sekundärkonflikterande körbanor kan få grönt ljus samtidigt (Torstensson, 2007).

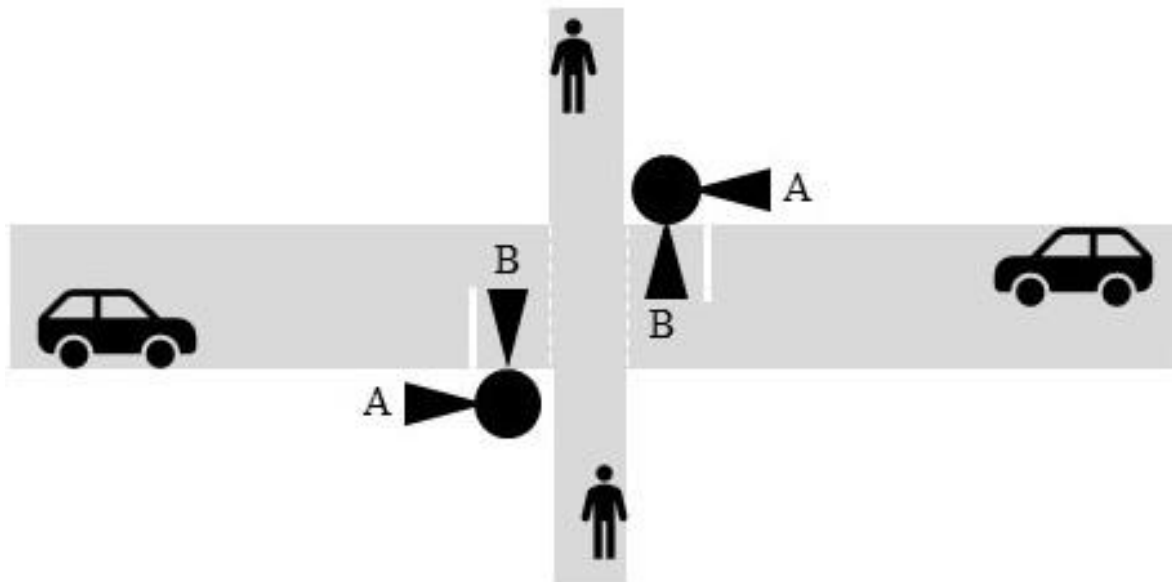
Enligt Trafikverket (2015a) ska trafiksignaler inte användas för korsande vägar med en hastighetsbegränsning på 70 km/h eller högre. För korsningar med hastighetsbegränsningar mellan 50 km/h och 70 km/h ska vänstersvängande trafik separatregleras.



Figur 3. Exempel på primär- respektive sekundärkonflikter.

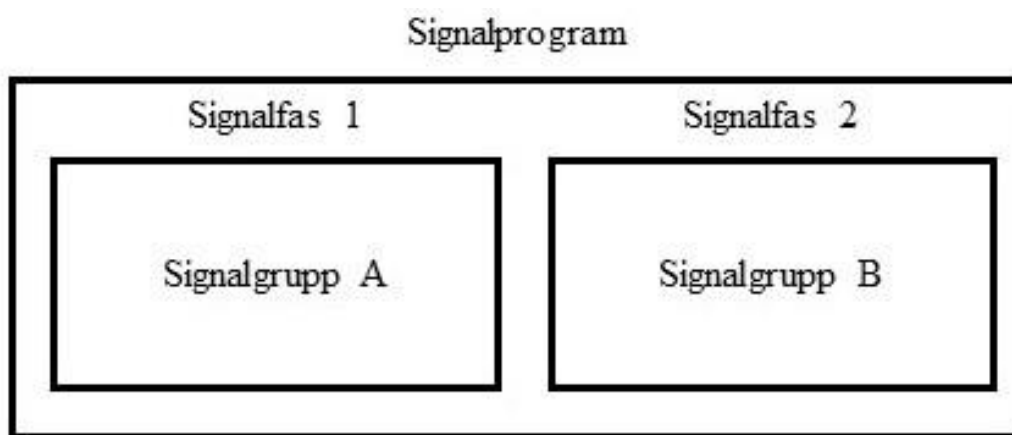
Varje trafiksignal ingår i en signalgrupp, där de ingående trafiksignalerna i en signalgrupp med nödvändighet visar samma ljussignal vid varje givet tillfälle (PTV AG, 2018). Vid ett övergångsställe, till exempel, finns vanligtvis en trafiksignal för fotgängare i respektive riktning. Dessa trafiksignaler ingår i samma signalgrupp och kan inte visa inbördes olika signaler. Varje signalgrupp, i sin tur, ingår i en eller flera signalfaser vilka fördelar tiden mellan olika kombinationer av signalgrupper. Signalfaserna ordnas i önskad ordning och

bildar tillsammans ett signalprogram. Tiden det tar för ett fullständigt signalprogram att köras kallas för omloppstid, varpå programmet börjar om (A. Nilsson, 2014). I en enkel korsning som i Figur 4 finns det två signalgrupper, var den ena signalgruppen utgörs av signalerna för fotgängare vid övergångsstället och den andra av signalerna för den korsande fordonstrafiken.



Figur 4. Signalgrupp A för fordon och signalgrupp B för fotgängare.

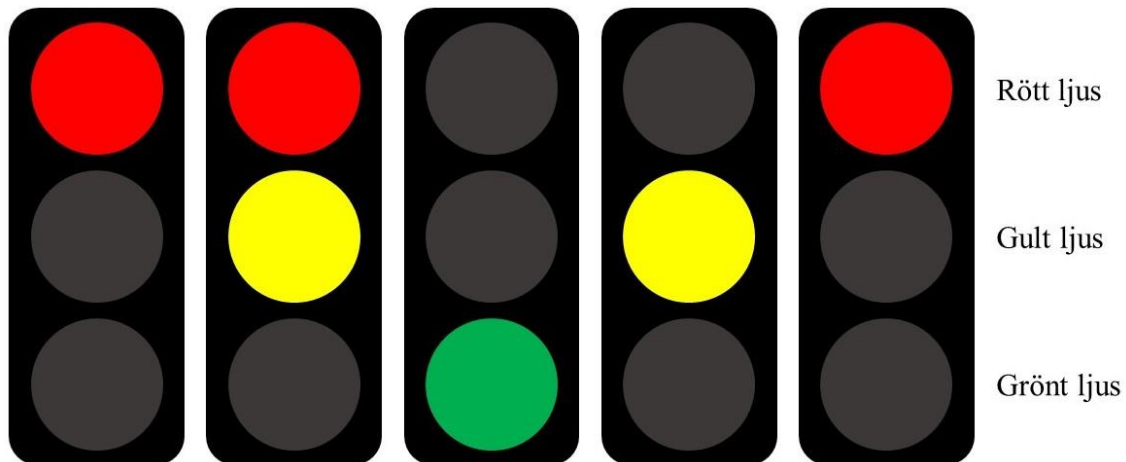
Signalfaserna för signalanläggningen i Figur 4 utgörs lämpligtvis av en fas där signalgrupp A inkluderas och en fas där signalgrupp B inkluderas. Se Figur 5 för en schematisk förklaring för hur ett signalprogram är uppbyggt. Vid mer komplexa korsningar kan flera signalgrupper förekomma i samma signalfas och ett signalprogram kan utgöras av många faser.



Figur 5. Uppbyggnad av ett signalprogram med signalfaser och signalgrupper.

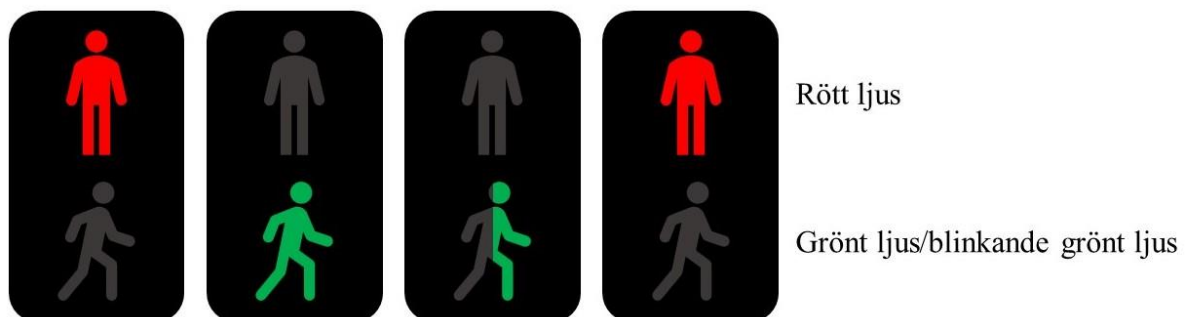
I Sverige och stora delar av Europa används ett signalväxlingsschema enligt Figur 6 i trafiksignaler för fordon och cyklister (Torstensson, 2007). Ett signalväxlingsschema definierar vilka ljus som visas i vilken ordning när en trafiksignal har gått ett helt varv från

rött till grönt och tillbaka till rött. Signalväxling från rött ljus till grönt ljus föregås alltså av rödgult ljus, medan signalväxling från grönt ljus till rött ljus föregås av gult ljus.



Figur 6. Signalväxlingsschema i trafiksignaler för fordon och cyklister i Sverige.

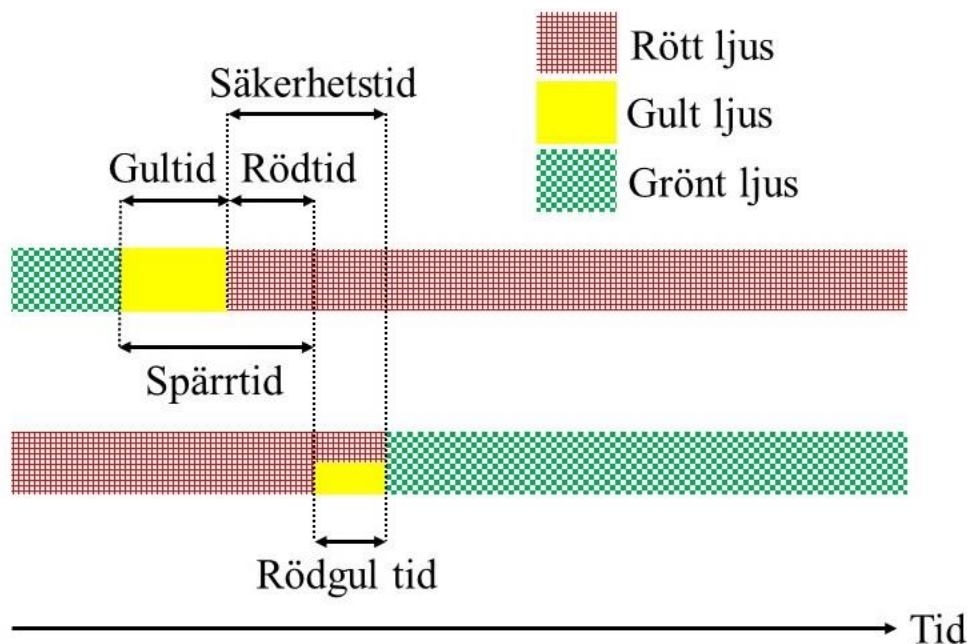
Trafiksignaler för fotgängare består till skillnad från övriga trafiksignaler endast av rött och grönt ljus (Torstensson, 2007). Eftersom gult ljus inte finns att tillgå är signalväxlingsschemat i trafiksignaler för fotgängare inte uppbyggt enligt Figur 6. Dock finns möjligheten för grönt ljus att blinka i trafiksignaler för fotgängare, vilket skulle kunna likställas med gult ljus. Signalväxlingsschemat i trafiksignaler för fotgängare är utformat enligt Figur 7 (Torstensson, 2007).



Figur 7. Signalväxlingsschema i trafiksignaler för fotgängare i Sverige.

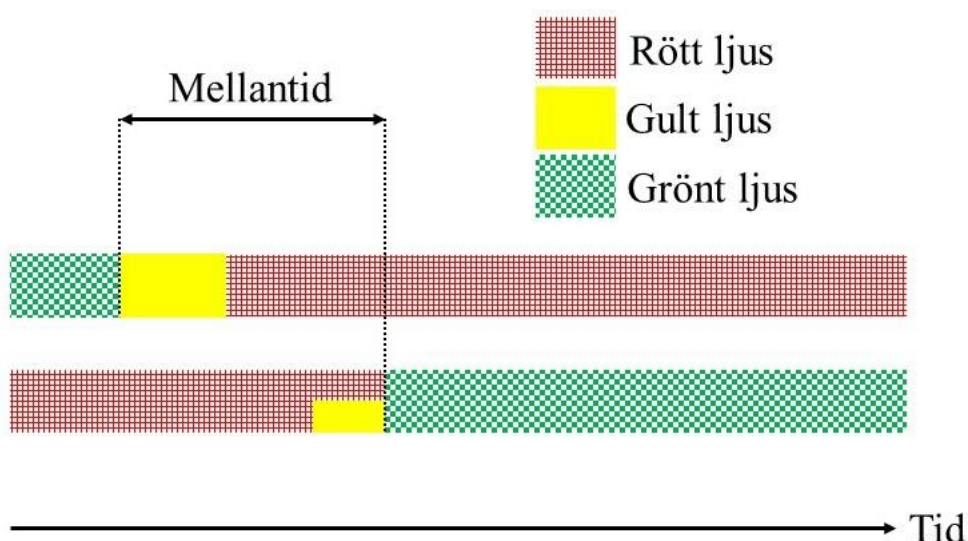
Säkerhetstid, spärrtid och rödtid är tre begrepp som har med signalprogrammets utformning av göra. Begreppen kan visualiseras enligt Figur 8 i trafiksignaler för fordon och cyklister (Li & Wu, 2011). Figuren representerar konflikterande signalgrupper i en korsning.

Säkerhetstiden är alltså tiden från att det har blivit rött ljus i en riktning till att det blir grönt ljus i den konflikterande riktningen. Spärrtid representerar tiden från att det har blivit gult ljus i en riktning till att det har blivit rödgult i den konflikterande korsningen. Rödtid är tiden det är rött i båda riktningarna i samband med byte av signalfas (Li & Wu, 2011).



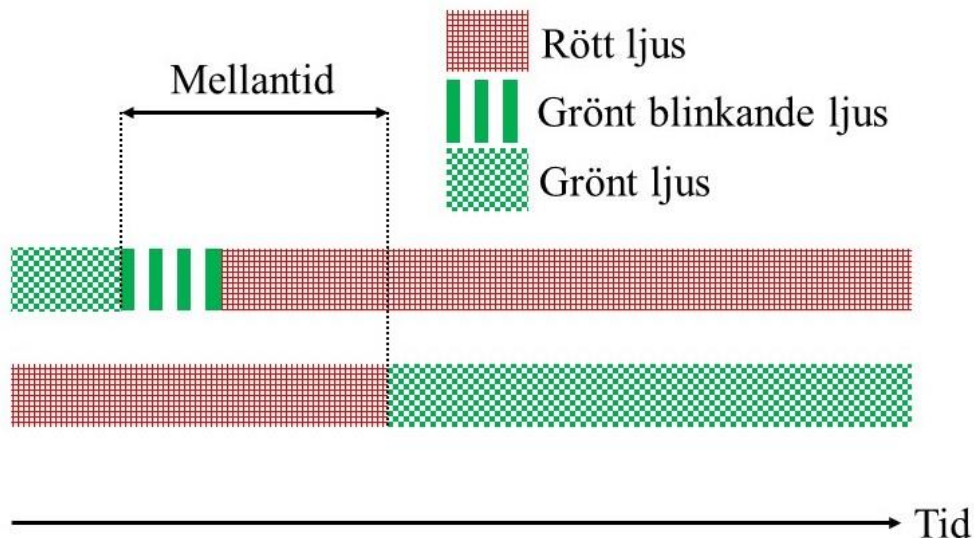
Figur 8. Schematisk beskrivning av begreppen säkerhetstid, spärrtid och rödtid för trafiksignaler för fordon och cyklister.

Ytterligare ett begrepp kopplat till signalprogrammets utformning är mellantid (eng. *intergreen time*), som avser tiden från att det inte längre är grönt i en riktning tills att det är grönt i den konflikerande riktningen. Se Figur 9. Med andra ord representerar mellantid ”tiden mellan grönt”, precis som det engelska namnet antyder. Internationellt är mellantid ett vanligt förekommande begrepp, medan begreppen i Figur 8 används i Sverige i större utsträckning (Moore, 2011). Eftersom mellantid används i trafiksimuleringsprogram är det ett viktigt begrepp att förstå även om det inte används i signalanläggningsritningar i Sverige. Vid jämförelse mellan Figur 8 och Figur 9 kan mellantid avläsas vara lika med summan av gultid, rödtid och rödgtid.



Figur 9. Schematisk beskrivning av begreppet mellantid i trafiksignaler för fordon och cyklister.

Mellantiden i trafiksignaler för fotgängare visualiseras i Figur 10. I det här fallet är mellantiden lika med summan av blinkande gröntid och rödtid.



Figur 10. Schematisk beskrivning av begreppet mellantid i trafiksignaler för fotgängare.

2.2 Trafiksignalsstyrning i Sverige

Den vanligaste signalstyrningstekniken som används i Sverige är en typ av fordonsstyrning som kallas för LHOVRA (Al-Mudhaffar, 2006). Varje bokstav i akronymen LHOVRA står för en funktionalitet som kan, men inte måste, implementeras för en given signalanläggning med LHOVRA-styrning. Funktionerna är följande (Peterson, Bergh, & Steen, 1986):

- **Lastbilsprioritet**, som ger prioritet till lastbilar och bussar.
- **Huvudledsprioritet**, som ger prioritet till fordon på huvudleden i en korsning.
- **Olycksreduktion**, som försöker undvika att växla från grönt till gult när ankommande fordon befinner sig på ett sådant avstånd från korsningen som innebär en svår avvägning mellan att köra eller att bromsa hårt.
- **Variabel gultid**, som varierar tidslängden för gult ljus för att minska tidsfördröjningen när inga fordon är inkommande i korsande vägbana och gultiden därmed inte är nödvändig av säkerhetsskäl.
- **Rödkörningskontroll**, som kan förlänga tiden för rött ljus för att minska riskerna vid avsiktlig körning mot rött.
- **Allrödvändning**, som när grönt ljus har övergått till gult kan se till att det blir grönt igen i stället för rött när trafik detekteras.

Den sista funktionen, allrödvändning, kan till viss del lösa ett problem som brukar kallas för nervösa vändningar (Åkerström, 2004). Vid låg trafikefterfrågan brukar allrött tillämpas, vilket betyder att samtliga signaler vid en anläggning växlar till viloläget rött ljus, för att växla till grönt först när efterfrågan detekteras. Traditionell styrteknik kräver att samtliga signalljus i en sekvens visas innan sekvensen kan börja om. Om ett fordon detekteras medan växling till allrött pågår, kommer alltså signalsekvensen att bli grönt-gult-rött-rödgult-grönt (Åkerström,

2004). Detta kan upplevas som att signalstyrningen är osäker, vilket allrödvändning avser att lösa.

En mindre andel av Sveriges signalanläggningar med oberoende styrning är tidsstyrda (Al-Mudhaffar, 2006).

2.3 Trafikdetektering

För att kunna styra trafiksignaler baserat på det momentana trafikläget måste fordon kunna detekteras på något sätt. En uppdelning kan göras mellan temporära respektive permanenta detektortekniker, där temporära tekniker innefattar pneumatiska slangar som läggs ut på en väg under exempelvis en vecka för att få en uppfattning av trafikflödet (Ivdal & Molin, 2007). Med hjälp av slangmätningar kan dataunderlag till att bestämma signalfasernas längd i en tidsstyrd korsning erhållas (Al-Mudhaffar, 2006). Vid fordonsstyrning eller optimerande styrning, däremot, krävs kontinuerlig information om det aktuella trafikläget, vilket betyder att permanenta detektortekniker används.

Induktiv slinga

Den mest använda trafikdetektortekniken bygger på att en metallslinga placeras under asfalten där fordonsdetekteringen ska ske (Klein, Mills, Gibson, & Klein, 2006). När ett fordon passerar ovanför asfalten där slingan är placerad sker en förändring i slingans induktans, varpå registrering av fordonet kan göras (M. Nilsson & Karlsson, 2017). Om flera slingor placeras efter varandra kan även data såsom fordonsklass och hastighet erhållas (Ivdal & Molin, 2007). Det går att se spåren efter placeringen av en induktiv slinga enligt Figur 11.



Figur 11. Spår efter placering av en induktiv slinga under asfalten i anslutning till en korsning.

Trafikdetektering med LHOVRA

De olika funktionerna i en LHOVRA-styrd korsning kräver trafikdetektering vid olika avstånd till en given korsning (Peterson et al., 1986). På en väg med hastighetsbegränsningen 70 km/h kräver exempelvis lastbilsprioritet detektion ungefär 250 m innan korsningen, medan variabel gultid kräver detektion både 80 m och 10 m innan korsningen. Eftersom användning av hela LHOVRA:s funktionalitet kräver installation och service av många detektorer är det också dyrt och det är därför vanligt att endast en eller några av funktionerna används (Al-Mudhaffar, 2006).

För att kunna realisera olika delar av LHOVRA:s funktionalitet krävs detektering av trafik på approximativt bestämda avstånd från stopplinjen vid korsningen enligt Tabell 2 (Trafikverket, 2004).

Tabell 2. Approximativa placeringar av detektorer för respektive LHOVRA-funktionalitet.

L	L				
H		H	H		
O			O	O	
V				V	V
R				R	
A			A	A	A
Avstånd från stopplinjen [m]	250	180	130	80	10

De exakta avstånden för detektion av trafik beror på korsningens utformning, hastighetsbegränsningar i anslutning till korsningen med mera.

Framtidens trafikdetektering

I och med en allt högre grad av uppkoppling av fordon öppnas nya möjligheter för trafikdetektortekniken. Om fordon kan kommunicera med sin omgivning kan de själva fungera som detektorer och exempelvis meddela trafiksignalanläggningar att de närmar sig korsningen i fråga (Grumert, 2018). Redan i dag används GPS-teknik vid bussprioritering för att meddela en signalanläggning att en buss närmar sig (Sveriges Radio, 2013). I en framtid där alla fordon är uppkopplade och har möjlighet att kommunicera sin position och hastighet med omgivningen behövs ingen stationär detektering av trafik. Fordon skulle också kunna ha möjlighet att kommunicera med trafiksignalersanläggningarna som befinner sig i anslutning till angiven rutt så att fordonet själv skulle kunna välja den väg som exempelvis tar kortast tid eller resulterar i minst koldioxidutsläpp (Grumert, 2018).

2.4 Trafikfördröjning

En av studiens frågeställningar innefattar fenomenet tidsfördröjning i trafiken, vilket kräver en tydlig definition. Till skillnad från väntetid eller kötid, som avser stillastående tid, definieras tidsfördröjning som skillnaden mellan tiden det skulle ta att åka en sträcka i maximalt tillåten hastighet och tiden det faktiskt tog att åka samma sträcka (van Hout, 2017). En matematisk definition presenteras i Ekvation 1.

$$T_{\text{fördröjning}} = \frac{s}{v_{\text{verklig}}} - \frac{s}{v_{\text{max}}} = \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{verklig}}}{v_{\text{max}} * v_{\text{verklig}}} * s \quad (1)$$

En komplikation när det gäller trafikfördröjningar är att det generellt är betydligt fler människor i en buss jämfört med en bil. Därför kan det vara intressant att mäta tidsfördröjning per person snarare än per fordon (Trafikverket, 2012).

2.5 Prioritering av kollektivtrafik

I översiktsplanen för Gävle kommun (2013) presenteras en illustrativ bild, se Figur 12, där ytan som tas i anspråk av 40 bilar jämförs med en buss med 40 passagerare respektive 40 cyklister. Enligt Linköpings kommun (2017) har busstrafik en timkapacitet på 8 000 personer per timme, jämfört med biltrafik som har en timkapacitet på 900 personer per timme. Framför allt i tätbefolkade områden är det därför väsentligt att kollektivtrafiken är effektiv och välfungerande för att motivera trafikanter att färdas kollektivt i stället för med bil (Trafikverket, 2012). Ett tillgängligt styrmedel för att uppnå effektivitet i kollektivtrafiken är att använda prioritering i trafiksignaler.



Figur 12. Jämförelse mellan markytan som tas i anspråk av 40 bilar, en buss med 40 passagerare respektive 40 cyklister. Används med tillåtelse från Gävle kommun.

Prioritering av kollektivtrafik kan ske passivt eller aktivt. Passiva prioriteringsmetoder inkluderar exempelvis separata kollektivtrafikkörfält, medan aktiv prioritering sker genom att en trafiksignalanläggning får reda på att en buss närmar sig, vilken i sin tur påverkar signalprogrammet till förmån för den ankommande bussen (A. Nilsson, 2014). Prioritering realiseras enligt Trafikverket (2012) med hjälp av någon av dessa signaltekniska funktioner, beroende på när bussen detekteras:

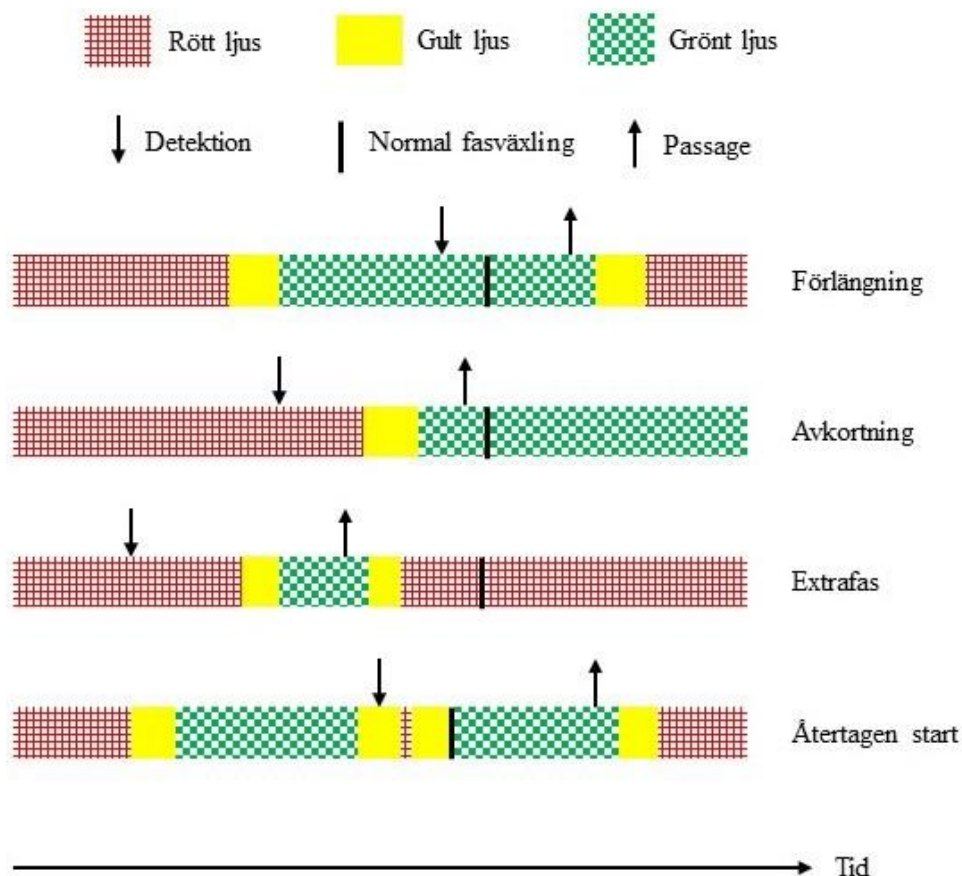
- **Förlängning** (vid grönt ljus): Gröntider förlängs tills bussen har hunnit passera stopplinjen.

- **Avkortning** (vid rött ljus): Gröntiden för konflikterande trafikflöden som har, eller ska få grönt ljus innan bussen i signalprogrammet förkortas.
- **Extrafas** (vid rött ljus): Signalprogrammet justeras så att en signalfas där bussens trafikflöde får grönt ljus inkluderas tidigare än vad det hade gjorts annars.
- **Återtagen start** (vid pågående växling från grönt till rött ljus): Signalprogrammet justeras så att en växling från grönt till rött ljus direkt följs av grönt ljus igen, innan någon annan signalfas har hunnit aktiveras.

De fyra prioriteringsfunktionerna illustreras i Figur 13, som visar vad som händer i signalprogrammet när en buss detekteras beroende på vilket signalljus som visas för tillfället.

Bussarna detekteras ofta genom induktiva slingor, enligt diskussionen i avsnitt 2.3, som har förmåga att skilja ut bussar från andra fordon (Trafikverket, 2012). En strategi som blir mer och mer vanlig är att bussen som närmar sig en korsning använder GPS- och radioteknik för att kommunicera sin position med signalanläggningen vid korsningen (Sveriges Radio, 2013).

Vid studier har implementering av bussprioritet visat sig vara mycket kostnadseffektivt med en samhällsekonomisk återbetalningstid på mellan 3 och 16 månader (Trafikverket, 2012).



Figur 13. De fyra prioriteringsfunktionerna förlängning, avkortning, extrafas och återtagen start. Pilarna som pekar neråt representerar tidpunkten när en buss detekteras. De vertikala sträckorna representerar tidpunkten när fasväxlingen normalt hade skett. Pilen uppåt representerar tidpunkten när bussen passerar stopplinjen vid signalanläggningen.

2.6 Trafikmodellering

För att kunna utföra en trafiksimulering krävs att en modell av verkligheten byggs upp. Trafikmodellering brukar delas upp i de tre olika nivåerna makroskopisk, mesoskopisk respektive mikroskopisk (A. Nilsson, 2014). Vid makroskopisk modellering byggs en översiktlig modell för ett vägnät upp och används bland annat för att få en uppfattning om hur fordon kan komma att fördelas på de olika vägarna utan att ta hänsyn till interaktionen mellan olika fordon (Helbing, Hennecke, Shvetsov, & Treiber, 2002). Mikroskopisk modellering, å andra sidan, används för mindre områden men innefattar mer detaljer jämfört med makroskopisk modellering. Mikroskopisk modellering kan exempelvis användas för att få en uppfattning om effekter för trafikanter vid ombyggnation av en korsning till en cirkulationsplats (Kim, Galiza, & Ferreira, 2013). Mesoskopisk modellering är ett mellanting mellan makroskopisk och mikroskopisk simulering med en större detaljrikedom men mindre omfattning jämfört med makroskopisk och tvärtom jämfört med mikroskopisk (Casas, Perarnau, & Torday, 2011).

Eftersom den här studien syftar till att göra en analys av en enskild korsning kommer en mikroskopisk modell att byggas upp och därefter mikroskopiska simuleringar att köras. Därför behandlas mikroskopisk simulering vidare i avsnitt 2.6.1.

2.6.1 Mikrosimulering

I en mikrosimulering studeras bland annat interaktionen mellan fordon och dess inverkan på kötider (A. Nilsson, 2014). Interaktion mellan fordon innefattar exempelvis vilka effekter ett filbyte har på den omgivande trafiken och kan modelleras med algoritmer med syftet att efterlikna verklighetens trafikdynamik så väl som möjligt (Barceló, 2010). Denna typ av algoritmer kallas för fordonspåverkansmodeller (eng. *car-following models*).

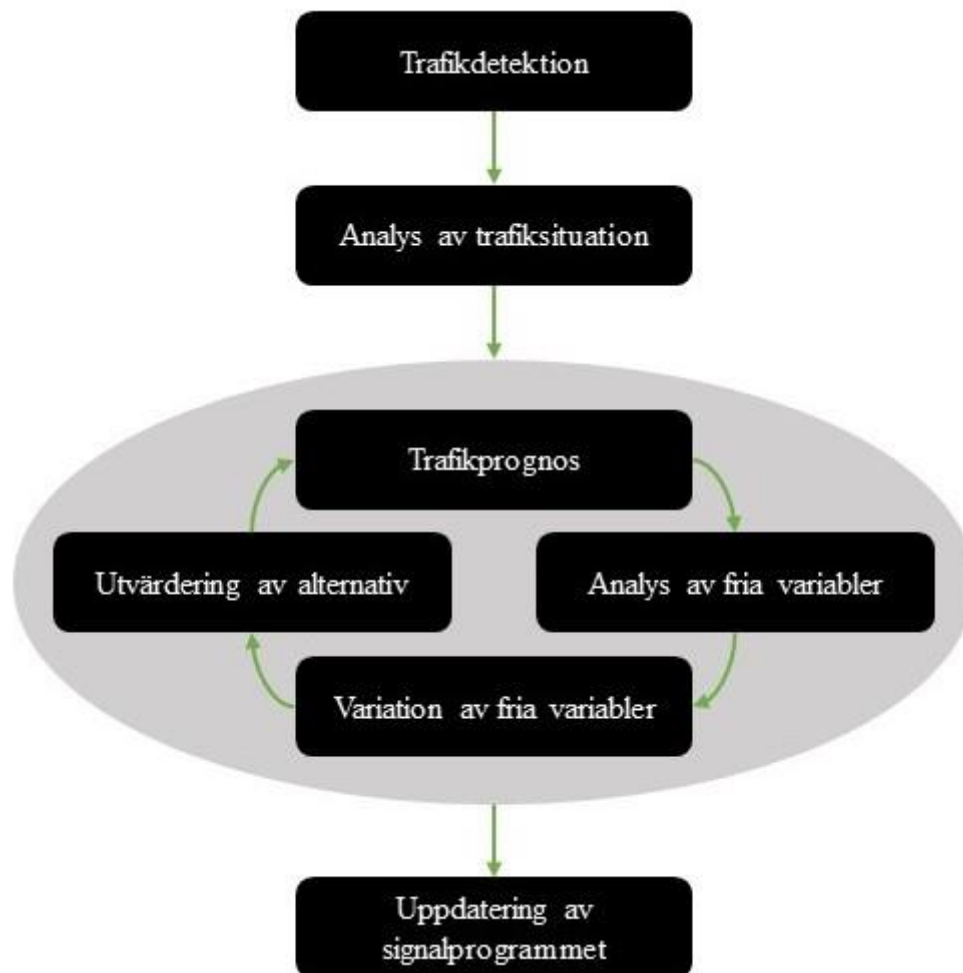
Från 1950-talet har flera fordonspåverkansmodeller utvecklats. Ett exempel på sådan fordonspåverkansmodell är Weidemann (Barceló, 2010). I sin tur har det utvecklats många trafiksimuleringsprogram som alla bygger på en viss fordonspåverkansmodell, men i stället för att behöva använda algoritmerna manuellt görs alla trafikdynamiska beräkningar automatiskt i trafiksimuleringsprogrammen (A. Nilsson, 2014). I Sverige är det mest använda programmet för att utföra mikrosimuleringar Vissim (Bång et al., 2014). Vissim är utvecklat i Tyskland och bygger på den tidigare nämnda fordonspåverkansmodellen Weidemann (PTV AG, 2018).

2.7 Det adaptiva signalstyrningssystemet PTV Epics

Det finns många olika typer av adaptiva system som har utvecklats av olika företag. För att kunna använda dessa system krävs dyra licenser från respektive företag. PTV, som har utvecklat simuleringsprogrammet Vissim, erbjöd en tillfällig kostnadsfri licens till att använda deras adaptiva system PTV Epics inom ramen för den här studien. Därför har PTV Epics använts i den här studien och en redogörelse för dess övergripande funktionalitet presenteras

här. All information i detta stycke hämtas från den officiella manualen för PTV Epics skriven av PTV AG (2017).

PTV Epics är en så kallad modellbaserad adaptiv signalstyrningsmetod. Att den är modellbaserad betyder att den utgår från en styrningsmodell med en tillhörande målfunktion. PTV Epics hämtar information från detektorer i trafiken varje sekund för att kontinuerligt skapa prognoser för trafikläget de närmaste 100 sekunderna. Varje sekund testas systemet möjliga förändringar i signalprogrammet och utvärderas dem baserat på vilket alternativ som presterar bäst i prognoserna utifrån målfunktionen. Det alternativ som är bäst enligt målfunktionen väljs och signalprogrammet justeras därefter. Lite förenklat kan processen beskrivas i form av flödesschemat i Figur 14. Indata består av en analyserad trafiksituation som i sin tur baseras på samlade data från trafikdetektorer. Processen består av att optimera signalstyrningen genom att utvärdera möjliga alternativ, varpå signalprogrammet kontinuerligt kan uppdateras.

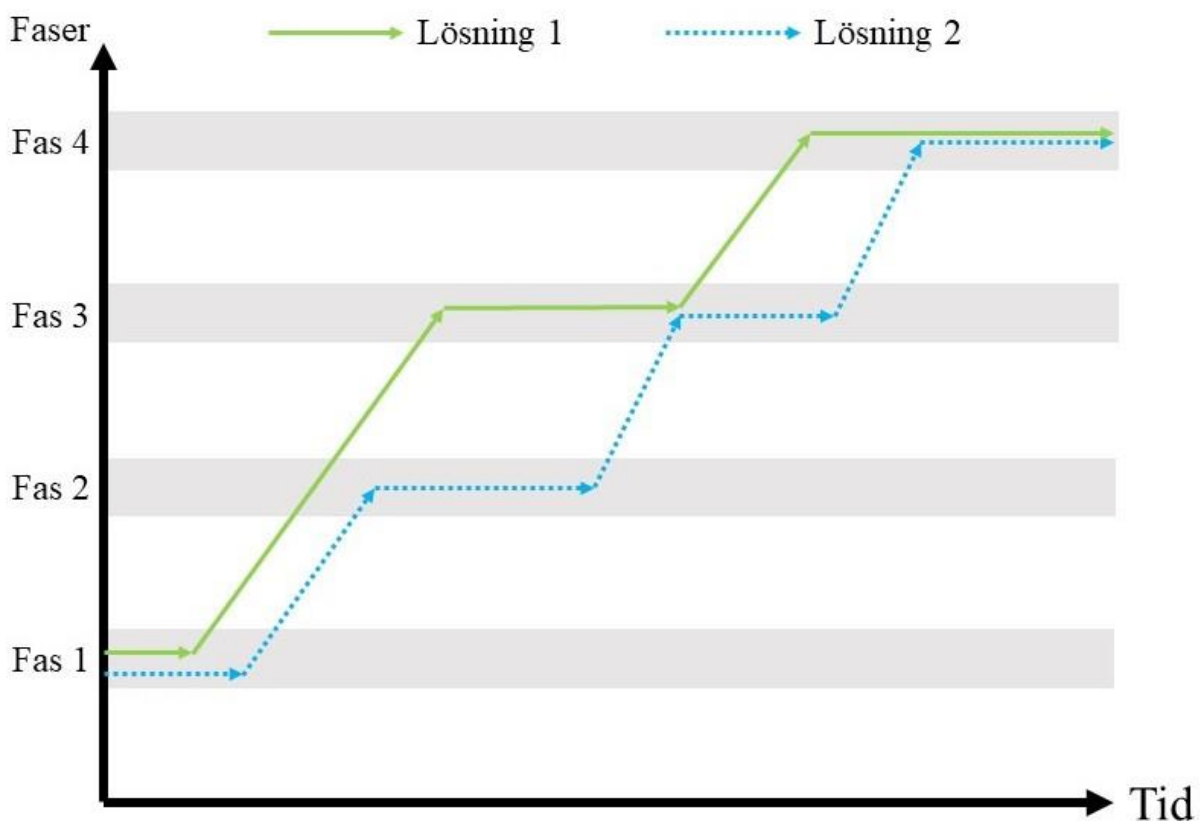


Figur 14. Optimeringsprocess för styrningsstrategin PTV Epics.

Det går att bestämma hur stor möjlighet PTV Epics ska ha att ändra signalprogrammet. Exempelvis går det att specificera maximal och minimal tid för respektive signalfas, vilket

PTV Epics behöver förhålla sig till även om optimeringen resulterar i att byta signalfas tidigare eller senare. Det finns också möjlighet att prioritera olika trafikslag såsom bussar och cyklister genom att tilldela dessa vikter i form av att exempelvis en buss viktas som 50 personbilar. I Figur 15 presenteras ett exempel på hur PTV Epics kan modellera prognoser för olika fasföljder och därefter utvärdera hur bra lösningarna presterar i förhållande till styrningsmodellens målfunktion. I verkligheten utvärderas mängder av alternativa lösningar parallellt.

För att PTV Epics optimeringsprocess ska fungera krävs specifik placering av trafikdetektorer. När det gäller prioritering av bussar krävs att bussarna inte bara registreras utan även avregistreras. Anledningen till att de behöver avregistreras är att PTV Epics ska kunna ha information om ifall en buss väntar vid ett trafikljus eller om den hann åka när det blev grönt senast. Avregistreringen realiseras genom att detektorer placeras direkt efter respektive stopplinje i korsningen. Detektorerna för registrering och avregistrering paras ihop och tilldelas en specifik signalfas. För andra fordonstyper används endast detektorer för registrering och genomsnittlig tidsåtgång per fordon att lämna korsningen vid grönt anges.



Figur 15. Två alternativa utformningar av ett signalprogram som kan utvärderas av PTV Epics.

Registreringen av fordon sker, på samma sätt som för LHOVRA, genom att detektorer placeras på valfria avstånd från stopplinjen. Med fördel kan en detektor placeras långt från stopplinjen (exempelvis 200 m) och en placeras nära stopplinjen (exempelvis 50 m).

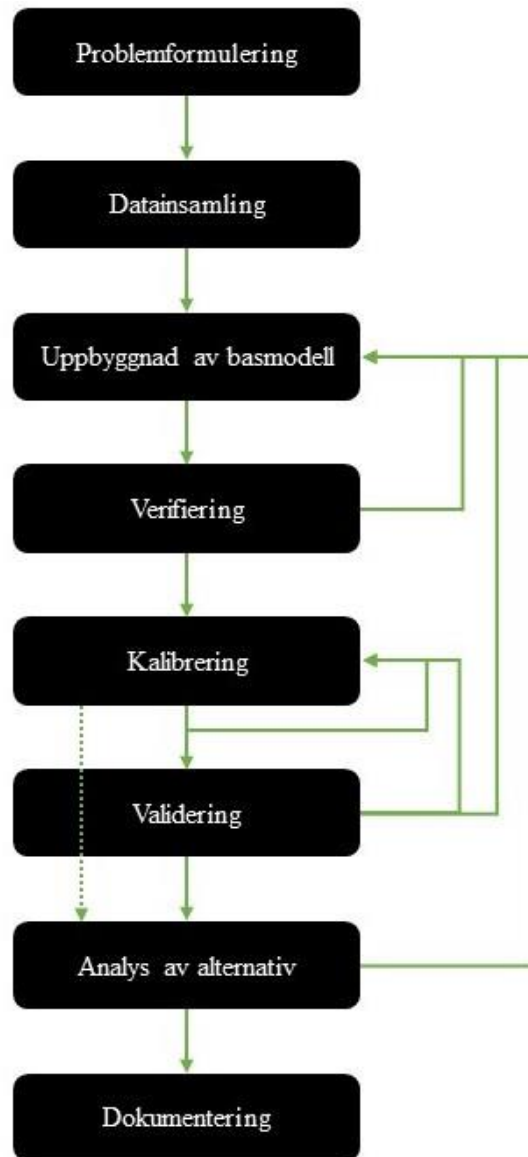
Genomsnittlig tidsåtgång för respektive fordonstyp att färdas från varje detektor till stopplinjen definieras i Vissim.

I dagsläget sker ingen automatisk detektering av fotgängare som anländer till ett övergångsställe. Fotgängare anmäler i stället sin närvaro genom att klicka på en signalknapp vid signalanläggningen. Signalknappsfunktionen implementeras i Vissim genom att en detektor placeras precis framför trafiksignalen och ställs in för att inte registrera antal detekterade fotgängare utan endast information om ifall det finns fotgängare som väntar eller inte. Det förutsätts alltså att fotgängare alltid klickar på signalknappen när de anländer till övergångsstället. Med anledning av den binära informationen behöver en viktning av närvaro av fotgängare anges. PTV AG (2017) rekommenderar att närvaro av fotgängare viktas som minst fem personbilar.

De inställningar som krävs för tidsstyrning och fordonsstyrning krävs till stor del även i PTV Epics. Exempelvis behöver rödtider, säkerhetstider och minimala gröntider att anges. Det finns en uppsjö av mer komplicerade inställningar i PTV Epics, vilka inte redogörs för här eftersom det skulle bli alltför omfattande. Fullständig information om möjliga inställningar finns i manualen (PTV AG, 2017).

2.8 Metodbeskrivning vid trafiksimulering

Trafikverket har utvecklat en rekommenderad metodbeskrivning för utförande av en trafiksimulering (Bång et al., 2014). Metodbeskrivningen presenterar först generella rekommendationer för att sedan behandla anläggningsspecifika rekommendationer för trafiksimulering av trafikplatser, motorvägar, landsvägar, signalreglerade korsningar och cirkulationsplatser. Eftersom den här studien innefattar trafiksimulering av olika signalstyrningsstrategier vid en korsning är rekommendationerna relaterade till signalreglerade korsningar samt de generella rekommendationerna relevanta. Ett flödesschema som presenterar den av Bång et al. (2014) rekommenderade arbetsprocessen ses i Figur 16 och innefattar momenten problemformulering, datainsamling, uppbyggnad av basmodell, verifiering, kalibrering, validering, analys av alternativ och dokumentation. Momenten beskrivs i detalj i avsnitten 2.8.1–2.8.8. Pilarna i Figur 16 representerar momentens inbördes ordning och även eventuella iterationer.



Figur 16. Trafikverkets rekommendation för arbetsprocess vid trafiksimulering. Inspirerat av Bång et al. (2014).

2.8.1 Problemformulering

I det första momentet vid utförande av en trafiksimulering görs en problemformulering där simuleringens syfte och avgränsningar definieras. Enligt Bång et al. (2014) kan syftet med en trafiksimulering delas in i någon av kategorierna

- utvärdering av nybyggnadsåtgärd,
- utvärdering av förbättringsåtgärd,
- visualisering.

Avgränsningar som ska definieras innefattar systemgränser i form av område och tidsperiod som ska studeras. Problemformuleringen ska i stora drag förklara vilka frågor simuleringstudien förväntas ge svar på. Enligt Dowling, Skabardonis, and Alexiadis (2004) bör dessa delar innefattas i problemformuleringen:

- **Bakgrund**, vilket innefattar
 - trafiksystemet som ska undersökas och dess utformning
 - den aktuella trafiksituationen och eventuella problem med det nuvarande utformningen
 - typ av förändring som ska visualiseras.
- **Syfte**, vilket innefattar
 - motivering till studien
 - frågor som studien ska ge svar på
 - vilka utformningar som ska jämföras och förväntade resultat av de alternativa utformningarna.
- **Analysbehov**, vilket innefattar
 - definition av vilka analyser som krävs för att uppnå syftet (exempelvis framkomlighetsanalys eller kapacitetsanalys)
 - definition av vilka resultat som bedöms vara mest intressanta (exempelvis körlängder och bränsleförbrukning)
 - definition av acceptabel felmarginal och därmed osäkerhet förknippade med resultaten.

För att definiera motiverade avgränsningar kan enligt Dowling et al. (2004) bland annat följande frågeställningar vara till hjälp:

- I vilket område och under vilka tider pågår problemen som studien syftar till att lösa?
- Vilket område kan de alternativa utformningarna komma att påverka?
- För vilken tid på dygnet ska trafikdata användas i simuleringarna?

Om de alternativa utformningarna bedöms ha potential att markant påverka exempelvis närliggande korsningar behöver avvägningar göras mellan att inte låta modellen växa för mycket och att säkerställa en god representation av verkligheten (Bång et al., 2014).

I momentet problemformulering ingår också att välja analysmetod. De två huvudsakliga analysmetoderna är att använda sig av analytiska modeller respektive simuleringsmodeller. Analytiska modeller har fördelarna att de ofta är snabba och överskådliga att använda (Bång et al., 2014). Däremot saknar analytiska modeller möjligheten att ta hänsyn till trafikdynamik i exempelvis närliggande korsningar och även att ta hänsyn till fordonsstyrda eller optimerande trafiksignaler. Med analytiska modeller finns heller inte möjligheten att visuellt presentera resultaten i det undersökta vägnätet. Simuleringsmodeller kräver ofta betydligt mer tid att bygga upp och de kräver också ofta mer detaljerade data för att representera verkligheten väl. Som fördelar har simuleringsmodellen möjlighet att exempelvis beakta trafikdynamikens oregelbundenhet och att modellera fordonsstyrda och optimerande trafiksignaler.

2.8.2 Datainsamling

När problemformuleringen är gjord tar momentet datainsamling vid. Behovet av data beror på syftet och avgränsningarna som har definierats i problemformuleringen. Oberoende av syftet

innefattar databehovet detaljerad information om trafikefterfrågan, utformning av vägar och liknande, i området som trafiksimuleringen ska omfatta.

Enligt Bång et al. (2014) kan databehovet delas in i följande områden:

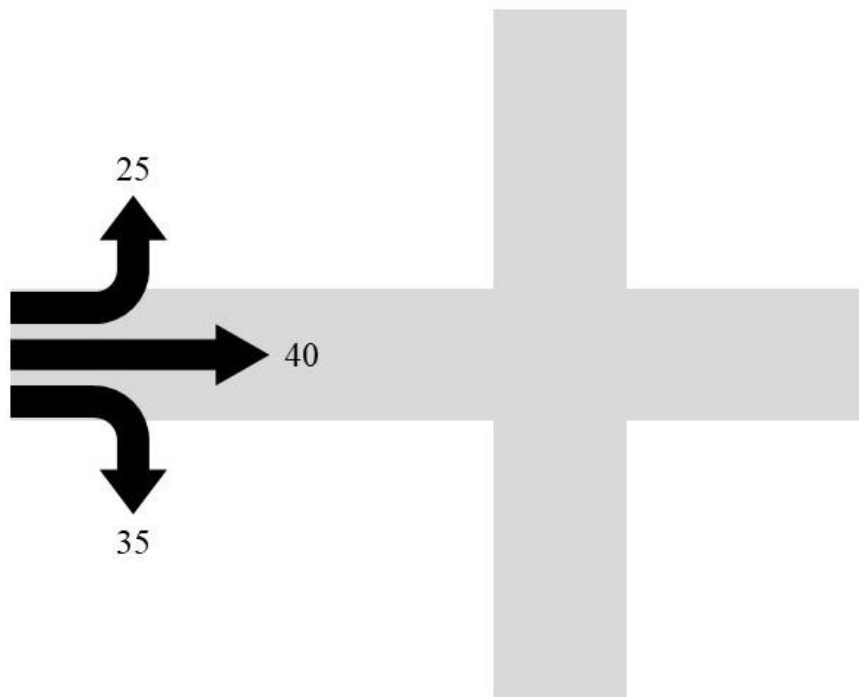
- **Väggeometri**, vilket innefattar de aktuella vägarnas och korsningarnas utformning.
- **Trafikstyrning**, i form av exempelvis hur trafiksignalerna i korsningen styrs.
- **Föraregenskaper**, som till exempel behandlar förarens önskade hastigheter och avstånd till fordon framför.
- **Fordonsegenskaper**, vilket innefattar exempelvis accelerations- och retardationsmönster.
- **Trafikefterfrågan**, som byggs upp av exempelvis trafikräkningar per fordonstyp och hur stor andel av fordon som ankommer till en korsning som väljer respektive riktning ut ur korsningen.
- **Kalibrerings- och valideringsdata**, vilket erhålls med hjälp av trafikräkningar, uppmätning av kölängder och hastigheter eller liknande.

Beroende på vilken typ av åtgärd som ska analyseras krävs olika typer av data. När en nybyggnationsåtgärd ska utvärderas behöver en prognos över trafikefterfrågan i nybyggnationen tas fram. Vid utvärdering av en förbättringsåtgärd kan i stället trafikefterfrågan i det nuvarande systemet användas för att tillgodose det databehovet. Viss data kopplad till bland annat väggeometri och trafikefterfrågan behövs för att över huvud taget kunna köra en simulering, medan annan data i form av bland annat förar- och fordonsegenskaper kan köras med de förinställda värdena för att sedan justeras när basmodellen ska kalibreras (Bång et al., 2014).

Trafikräkningar kan genomföras på många sätt. Det är vanligt att någon av de i avsnitt 2.3 nämnda trafikdetekteringstyperna används för att samla in data om trafikmängder (Bång et al., 2014).

Data för kalibrering och validering kan insamlas manuellt genom att exempelvis observera fördröjningar och köbildning i det studerade området.

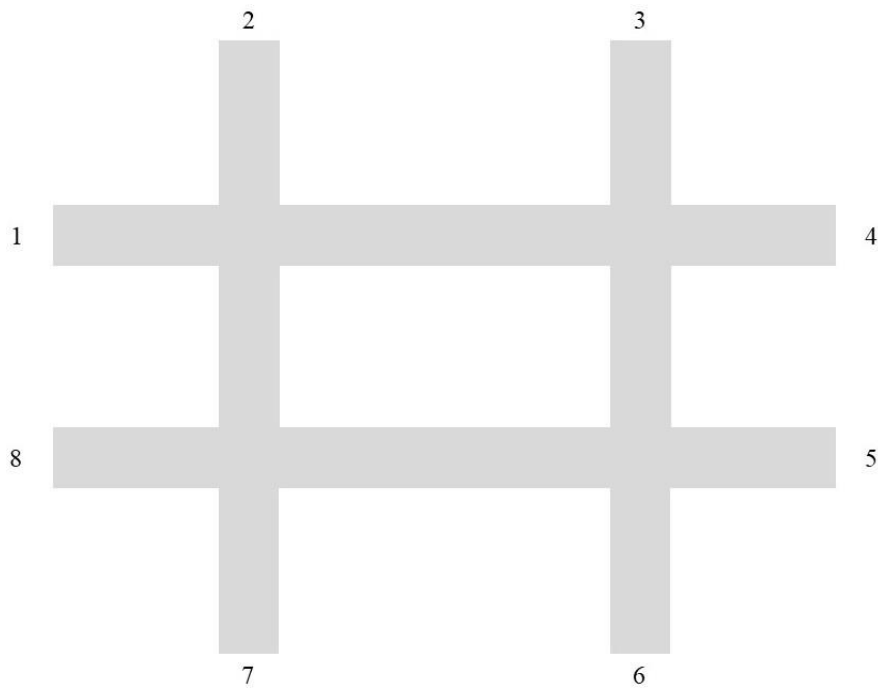
För att presentera hur fordonen fördelar sig i ett vägnät utifrån inflödena av trafik kan svängandelar beräknas. Svängandelar för en korsning beskriver hur stor andel av inflödet från respektive håll som väljer respektive väg ut ur korsningen (A. Nilsson, 2014). I Figur 17 visas ett exempel på hur svängandelar för en korsning kan visas. I exemplet är det totala trafikflödet från vänster 100 och det går därför att utläsa att 40 procent av fordonen kör rakt fram i korsningen.



Figur 17. Exempel på svängandelar för ett inflöde till en korsning.

När svängandelar används vid simulering i ett vägnät med många korsningar kan det hända att en oproportionerligt stor andel av fordonen kör i cirklar i vägnätet (Bång et al., 2014). Vilken väg ett fordon tar i en korsning beror nämligen enbart på svängandelarna i just den korsningen och ingen hänsyn tas till vilken väg fordonet valde i tidigare korsningar. Därför kan det hända att ett fordon väljer att svänga höger i varje korsning den passerar och på så sätt snart komma tillbaka till den första korsningen. För att undvika problemet med detta osannolika körmönster kan en så kallad OD-matris användas i stället för svängandelar. OD står för *origin-destination*, alltså startpunkt-målpunkt, och specificerar andelen fordon i respektive startpunkt som ska till respektive målpunkt (A. Nilsson, 2014). Att samla in exakta data till en OD-matris kan vara en tidskrävande och dyr process, eftersom det kräver att målpunkt för varje fordon som inkommer i systemet registreras. I stället brukar ofta en OD-matrisestimering genomföras, där matrisen utgör en uppskattning baserat på storleken av svängandelarna i respektive korsning, ofta med hjälp av en programvara (Peterson, 2007). Ett exempel på programvara som kan användas för OD-matrisestimering är Aimsun (Aimsun, u.d.).

När en isolerad korsning analyseras, som i Figur 17, bidrar svängandelar och en OD-matris med samma information och det spelar ingen roll vilken metod som används. I ett större vägnät, som i Figur 18, har en OD-matris information om andelen fordon från varje startpunkt som ska till respektive målpunkt, vilket svängandelar saknar. Användning av svängandelar bör därför begränsas till analys av en isolerad korsning, eller i alla fall kompletteras med en OD-matris.



Figur 18. Exempel på ett vägnät med fyra korsningar.

Ett exempel på en OD-matris för vägnätet i Figur 18 presenteras i Tabell 3. Cellerna med grå bakgrund som utgör diagonalen i Tabell 3 innehåller antalet fordon för varje startpunkt som har samma start- och målpunkt. Dessa värden har alltså möjligheten att begränsa eller helt eliminera rundkörning i vägnätet, vilket inte går att åstadkomma om svängandelar används. Från en OD-matris kan mycket information avläsas. Till exempel representerar summan av alla värden i rad 1 antalet fordon som har 1 som startpunkt, medan summan av alla värden i kolumn 8 representerar antalet fordon som har 8 som målpunkt.

Tabell 3. OD-matris för exemplvägnätet i Figur 18.

OD	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	22	30	103	4	12	37	3
2	51	0	0	35	20	46	82	64
3	46	4	0	74	29	109	182	17
4	95	18	35	0	12	11	47	46
5	49	31	96	28	0	2	41	68
6	26	13	80	42	1	0	2	13
7	22	73	61	20	21	4	0	51
8	0	23	30	29	50	43	29	0

Ett fordon med exempelvis startpunkten 1 och målpunkten 5 i Figur 18 kan välja flera rutter i vägnätet för att nå sitt mål. OD-matrisen innehåller ingen information om vilken rutt som väljs och i simuleringar kan ruttvalet antingen ske slumpmässigt eller i form av att den snabbaste eller kortaste vägen alltid väljs (Bång et al., 2014).

Ett alternativ till OD-matriser är att använda fördefinierade rutter, där varje möjlig rutt i vägnätet definieras med associerad andel fordon som väljer just den vägen (Bång et al., 2014).

2.8.3 Uppbyggnad av basmodell

Uppbyggnad av basmodell görs i ett trafiksimuleringsprogram med ett grafiskt gränssnitt (Bång et al., 2014). Att bygga upp en basmodell innefattar att definiera vägars utformning, korsningars uppbyggnad, trafikefterfrågan och hur eventuella trafiksignaler styrs.

Tillvägagångssättet vid uppbyggande av en basmodell skiljer sig beroende på vilket trafiksimuleringsprogram som används, varför det aktuella trafiksimuleringsprogrammets manual bör användas för att få en bild av den precisa metoden (Dowling et al., 2004). Enligt A. Nilsson (2014) är arbetsprocessen för många av programmen snarlika och kan översiktligt beskrivas med samma huvudsakliga instruktioner. Utgångspunkten när en basmodell ska byggas upp är antingen en ritning eller ett flygfoto. Med ritningen eller flygfotot som underlag ritas vägar, som brukar kallas för länkar, ut i det grafiska gränssnittet. I och med att länkarna ritas ut definieras antalet filer, körfält, hastighetsbegränsningar och liknande. Om en vägs vertikala lutning anses ha en betydande påverkan på fordons accelerationsmönster är det viktigt att även lutningen definieras.

När vägnätets geometri är uppbyggt implementeras trafikstyrningen som infattas i vägnätet (Bång et al., 2014). Exempel på trafikstyrning är trafiksignaler och väjnings- eller stopplikt som ofta förekommer vid korsningar och cirkulationsplatser. Där olika trafikflöden korsar varandras vägar behöver en konfliktmatris definieras, med information om vilket trafikflöde som har företräde framför det andra flödet. Vid signalreglerade korsningar behövs information om hur signalerna styrs i form av signalscheman som redovisar för i vilken ordning de olika riktningarna får grönt ljus. Vid trafikstyrda signaler behöver också trafikdetektorer definieras i programmet med rätt geografiska placeringar. Implementation av signalstyrningsalgoritmer kan enligt A. Nilsson (2014) bli komplext, till exempel vid samordnad signalstyrning som diskuterades i avsnitt 1.1, och det kan vara motiverat med avvägda förenklingar.

Trafikefterfrågan, alltså mängden fordon som önskar använda en väg under exempelvis en timme, läggs till i utkanten av det definierade vägnätet och representerar intilliggande delar av trafiksystemet och dess inverkan på det definierade vägnätet (Bång et al., 2014). Beroende på vilket program som används implementeras trafiketerfrågan på olika sätt (A. Nilsson, 2014). Vanligtvis används antingen svängandelar, alltså andelen fordon som väljer respektive väg i en korsning, eller fördefinierade rutter, alltså vilka rutter från start till slut som ska användas i vägnätet och andelen trafik som väljer respektive rutt.

2.8.4 Verifiering

När en basmodell är uppbyggd ska den verifieras för att säkerställa att den fungerar som planerat (Bång et al., 2014). Så länge logiska fel upptäcks görs iterationer till det föregående momentet, vilket är representerat i Figur 16 med pilen tillbaka till momentet ”uppbyggnad av

basmodell". När inga fel kan hittas kan basmodellen bedömas fungera korrekt och inga fler iterationer behöver göras.

Verifiering, som också skulle kunna kallas modellkontroll eller felsökning, kan enligt Bång et al. (2014) delas upp i dessa tre områden:

- **Mjukvarukontroll**, vilket innefattar att undersöka om det finns några kända problem med den använda versionen av programvaran och hur de i så fall kan lösas eller eventuellt påverkar modellen.
- **Granskning av data**, vilket enligt Dowling et al. (2004) bör innefatta kontroll av att dessa kategorier av det uppbyggda nätverket fungerar som de ska:
 - Sammankopplingar av länkar.
 - Antalet filer, körfält, länkars bredd och längd respektive förbjudna körfält.
 - Trafikstyrningen i form av definition av vilka trafikflöden som har företräde, signalstyrning och väjnings- och stopplikter.
 - Inmatning av trafikefterfrågan och kollektivtrafik.
- **Granskning av simulering**, vilket möjliggör att se trafikdynamiken som den uppbyggda basmodellen med tillhörande data resulterar i. Enligt Bång et al. (2014) kan följande parametrar beaktas vid granskning av simulering:
 - Körning av simulering med mycket låg trafikefterfrågan gör det lättare att undersöka om något oväntat händer med något av fordonen, exempelvis om det plötsligt sänker hastigheten.
 - Körning av simulering med ungefär hälften av den verkliga trafikefterfrågan gör eventuella köbildningar enkla att undersöka och felsöka.
 - Jämförelse mellan fordonsbeteende i simulering och i fält kan ge svar på eventuella avvikelser som kan bero på företeelser som inte går att se på en ritning eller ett flygfoto.

2.8.5 Kalibrering

Momentet kalibrering innefattar att justera modellens parametrar så att modellen representerar verkligheten så väl som möjligt (Bång et al., 2014). Kalibrering utförs genom att jämföra resultat från trafiksimuleringar med trafikmätningar av det verkliga systemet. Även momentet kalibrering är iterativt och så länge simuleringsresultatet inte representerar verkligheten tillräckligt väl görs parameterjusteringar för att öka överensstämmelsen. När avvikelser från verkligheten bedöms godtagbara avslutas momentet.

Vid utvärdering av nybyggnationsåtgärd kan av naturliga skäl inte data från rådande trafiksituation användas, varför i stället liknande trafiksituationer får fungera som dataunderlag (A. Nilsson, 2014).

Enligt Dowling et al. (2004) delas justeringsparametrar med fördel upp i säkra respektive osäkra parametrar. Säkra parametrar innefattar de parametrar som antingen med stor sannolikhet bedöms vara korrekt inmatade eller som inte bedöms påverka resultaten. De säkra parametrarna, som exempelvis kan vara väggeometri eller trafiksignalsstyrning, behöver

sålades inte ändras. De osäkra parametrarna, däremot, bedöms ha potential att påverka resultatet och kan inte med säkerhet bedömas vara korrekt inmatade. Exempel på potentiellt osäkra parametrar är acceleration och önskad hastighet.

Kalibreringen kan ta mycket tid i anspråk och kan, beroende på kraven kring noggrannhet, förenklas och förkortas. För att undvika extra arbete krävs en strukturerad kalibreringsprocess och att noggrant anteckna resultaten av varje kalibreringsiteration (Bång et al., 2014). Enligt Smith and Blewitt (2010) kan följande arbetsgång användas för att erhålla en strukturerad kalibreringsprocess:

1. Definiera de osäkra parametrarna.
2. Specificera lägsta och högsta tillåtna värde för respektive osäker parameter.
3. Kontrollera att alla osäkra parametervärden är korrekt inmatade.
4. Justera de osäkra parametrar som påverkar trafikkapacitet.
5. Justera de osäkra parametrar som påverkar ruttval.
6. Justera de osäkra parametrar som påverkar hastigheter, kölängder och liknande.

Steg 4, 5 och 6 utförs iterativt där simulering körs efter varje enskild justering, varpå resultaten jämförs mot hur det verkliga trafiksystemet ser ut. En notering görs angående hur väl simuleringsresultaten stämmer överens med verkligheten, varpå en ny justering görs och samma process upprepas tills överensstämmelsen är tillräcklig.

2.8.6 Validering

Under kalibreringsprocessen kalibreras modellen mot ett givet dataunderlag som kan vara insamlat under en specifik trafikmätning (Bång et al., 2014). Valideringsprocessen är identisk med kalibreringsprocessen, med skillnaden att ett nytt dataunderlag används (A. Nilsson, 2014). Detta görs för att kontrollera att kalibreringsprocessen inte har resulterat i parametrar som stämmer överens med enbart ett givet dataunderlag.

Begränsningar i form av tidsramar och liknande resulterar ofta i att validering inte kan genomföras. Enligt Bång et al. (2014) är resultaten användbara även om de inte har validerats, men det kräver att resultaten tolkas med större försiktighet.

I samband med valideringen kan också en känslighetsanalys genomföras, där storleken av små parameterjusteringar av modellen analyseras och bedöms. Om en liten justering av en osäker parameter resulterar i en stor effekt på resultaten bör en diskussion föras kring tillförlitligheten av resultaten och flera parameterinställningar bör användas för resultatunderlaget (Bång et al., 2014).

2.8.7 Analys av alternativ

När modellen är verifierad, kalibrerad och validerad kan den användas för att analysera alternativ till basmodellens utformning (Bång et al., 2014). Utifrån problembeskrivningen justeras basmodellen på önskade sätt varpå resultat från simuleringar av den justerade basmodellen jämförs med basmodellens simuleringsresultat. Exempel på resultat som kan

vara intressant att jämföra är köbildning och medelfördröjning. Vissa typer av omfattande förändringar kan kräva att en ny basmodell byggs upp enligt iterationspilen i Figur 16.

Om många alternativ ska jämföras kan en jämförelsehierarki skapas för att definiera vilka alternativ som ska jämföras mot varandra. I det här stadiet är det också viktigt att definiera vilka effektmått som ska ingå i jämförelsen. Exempel på effektmått är fördröjning, kölängder och medelhastighet (A. Nilsson, 2014).

2.8.8 Dokumentering

Det sista momentet i en trafiksimulering är dokumentering. Dokumenteringen utgör en sammanställning av simuleringsstudiens arbetsprocess, antaganden och resultat. Enligt Bång et al. (2014) kan med fördel respektive moment i Figur 16 presenteras och sammanfattas i dokumenteringen. Det är väsentligt att dokumenteringen innefattar en diskussion kring de antaganden som har gjorts och förslag kring hur simuleringsresultaten kan tolkas (Bång et al., 2014).

2.9 Emissionsmodellering

Enligt Världsnaturfonden (2018) är koldioxid den gas som bidrar mest till växthuseffekten. Internationellt står transporter av en sjundedel av växthusgasutsläppen, medan de står för en tredjedel i Sverige (Världsnaturfonden, 2018). Med tanke på långsiktig ekologisk hållbarhet är koldioxid därför intressant att modellera och se hur mängden utsläpp påverkas lokalt av exempelvis justerad signalstyrning i en korsning.

Enligt Gustafsson et al. (2018) överskrider halterna av några föroreningar vid gaturum de miljökvalitetsnormer som gäller för utomhusluft. Kväveoxider och luftburna partiklar är de föroreningar som överskrider normerna i störst utsträckning. Kväveoxider är giftigt och kan vid inandning påverka både slemhinnor och luftvägar negativt (Naturvårdsverket, 2018a). Dessutom är kväveoxider, tillsammans med svaveloxider, de föroreningar som bidrar mest till försurning och övergödning. När kväveoxider exponeras av solljus bildas marknära ozon, som begränsar skogens förmåga att binda koldioxid och bidrar till ohälsa och förhöjd dödlighet (Gustafsson et al., 2018).

Luftburna partiklar brukar mätas i PM₁₀ och PM_{2,5}, vilka är mått som representerar massan av partiklar i luften som har en diameter mindre än 10 respektive 2,5 mikrometer (Naturvårdsverket, 2018b). Med anledning av att partiklarna är små kan de nå in till lungorna vid inandning. Enligt Naturvårdsverket (2017a) uppkommer PM₁₀ främst i samband med friktion mellan däck och asfalt. PM_{2,5} förekommer i viss mån i fordonsavgaser, men har inte en lika tydlig koppling till trafiken. PM_{2,5}-halterna har minskat mycket de senaste decennierna och understiger miljökvalitetsnormen i Sverige, medan problematiken med PM₁₀ är större och miljökvalitetsnormen för denna partikelstorlek har visat sig vara den svåraste normen att uppnå i Sverige (Naturvårdsverket, 2018b). Därför är trafikrelaterad uppkomst av PM₁₀ av stort intresse att minska i Sverige. Sammanfattningsvis kan uppkomst av gaserna

koldioxid och kväveoxider samt partikeltypen PM10 anses vara av särskilt intresse att studera i samband med en trafiksimuleringsstudie.

Enligt Gustafsson et al. (2018) kan hälsoeffekter, endast med anledning av förhöjda halter av kväveoxider och luftburna partiklar, konservativt uppskattas ha orsakat över 50 miljarder kr i samhällsekonomiska kostnader bara under år 2015. Om de samhällsekonomiska kostnaderna kopplade till miljöeffekter av samma förhöjda halter skulle inkluderas skulle siffran naturligtvis bli betydligt större. Detta är ett exempel på hur ekologisk, ekonomisk och social hållbarhet på ett tydligt sätt hänger ihop.

Med tanke på att faktiska mätningar av utsläpp i trafiken ofta är dyra och komplicerade att åstadkomma brukar i stället emissionsmodeller användas för att få en uppfattning om utsläppsmängder (Smit, Smokers, & Rabé, 2007). En emissionsmodell är en modell för hur mängden utsläpp kan relateras till parametrar som fordonstyp, acceleration och hastighet (Joumard, Jost, Hickman, & Hassel, 1995). Användning av en emissionsmodell kan också vara komplicerad och förknippad med många potentiella felkällor när uppskattningar av hastighets- och accelerationsmönster ska matas in (Hirschmann, Zallinger, Fellendorf, & Hausberger, 2010). De senaste åren har ett flertal verktyg utvecklats som ger möjlighet att använda resultaten från en trafiksimulering som indata till ett emissionsmodelleringsprogram. Eftersom resultaten från en korrekt utförd simuleringsstudie innefattar hastighetsmönster och fordonstyper och annat som behövs som indata i emissionsmodellen kan både enkelheten och emissionsuppskattningarna vid användandet av sådan metod förbättras avsevärt jämfört med tidigare (Hirschmann et al., 2010).

2.9.1 VERSIT+

Ett exempel på trafikemissionsmodell är VERSIT+ (Ligterink & Lange, 2009). VERSIT+ bygger på data från över 20 000 utsläppsmätningar och hundratals hastighetsprofiler, vilket är ett stort dataunderlag jämfört med många liknande emissionsmodeller (Smit et al., 2007). En fördel med VERSIT+ är att det finns ett program som, enligt diskussionen i avsnitt 2.9, kan kopplas samman med trafiksimuleringsprogrammet Vissim (Quaassdorff, Kwak, Borge, & Lee, 2017). Programmet heter EnViVer och använder resultaten från en simulering i Vissim till att generera en detaljerad modellering av utsläppt koldioxid och kväveoxider samt uppkomst av PM10 (PTV AG, u.å.).

För att kunna importera resultaten från Vissim till EnViVer, och på så vis genomföra en emissionsmodellering, krävs att dessa data registreras minst en gång per sekund och inkluderas i Vissims resultat (Eijk, Ligterink, & Inanc, 2014):

- simuleringstid
- koordinater för respektive fordon
- ID för respektive fordon
- hastighet för respektive fordon
- fordonstyp för respektive fordon
- vägens lutning på den position där respektive fordon befinner sig för tillfället.

Dessa data registreras inte per automatik utan måste specificeras manuellt i Vissims inställningar.

Vissim tillhandahåller alltså information om körmonster för respektive fordonstyp. Däremot saknas information om i vilket utsträckning olika drivmedel används för de olika fordonstyperna, vilket också krävs för att göra en emissionsmodellering. I EnViVer baseras emissionsmodelleringen antingen på fördefinierade eller skräddarsydda emissionsklasser för varje fordonstyp (Eijk et al., 2014). De fördefinierade emissionsklasserna gäller för Nederländernas fordonspark och kan användas även för andra länder med liknande fordonsparker. Med hjälp av möjligheten att skapa skräddarsydda emissionsklasser kan emissionsmodellen anpassas till en lokal fordonspark. När skräddarsydda emissionsklasser skapas kan de fördefinierade fordonsklasserna användas som referens för att kontrollera rimligheten (Eijk et al., 2014).

Den information som krävs när en skräddarsydd emissionsklass skapas är följande:

- **Vägtyp**, vilket inkluderar något av alternativen
 - stadsväg
 - motorväg.
- **Fordonstyp**, vilket inkluderar något av alternativen
 - lätt fordon
 - buss
 - tungt fordon.
- **Årtal** som emissionsmodellen gäller för.
- **Drivmedel**, vilket inkluderar procentuell användning av drivmedlen
 - bensin
 - diesel
 - motorgas
 - naturgas
 - elektricitet.
- **Fordonsåldersfördelning**, vilket inkluderar
 - andel fordon nyare än ett år
 - genomsnittlig fordonsålder
 - genomsnittligt utgångsår.
- **Utsläppslagstiftning**, vilket inkluderar
 - introduktionsår för Euro 1 (år 1992)
 - introduktionsår för Euro 2 (år 1996)
 - introduktionsår för Euro 3 (år 2000)
 - introduktionsår för Euro 4 (år 2005)
 - introduktionsår för Euro 5 (år 2009)
 - introduktionsår för Euro 6 (år 2014).

- Genomsnittliga **regionala CO2-utsläpp** per sträcka, vilket inkluderar genomsnittliga utsläpp för
 - bensin
 - diesel.

Utsläppslagstiftningen med tillhörande introduktionsår inom parentes ovan är gemensamma för alla EU-länder och dessa årtal behöver därför inte ändras (Eijk et al., 2014).

3 Metod och genomförande

Studiens frågeställningar undersöks genom en fallstudie för korsningen Tycho Hedéns väg–Fålhagsleden i Uppsala. Trafiksimuleringsprogrammet Vissim används för att göra en trafiksimulering. Därefter används programmet EnViVer för att estimerera utsläppen i trafiksimuleringarna med hjälp av emissionsmodellen VERSIT+.

3.1 Trafiksimulering

Utförandet för trafiksimuleringen följer i stora drag metodbeskrivningen som presenterades i avsnitt 2.8.

3.1.1 Problemformulering

Korsningen Tycho Hedéns väg–Fålhagsleden, härnäst kallad studiekorsningen, är hårt trafikerad med stor köbildning och fördröjning och Uppsala kommun önskar därför att undersöka om något kan göras för att minska problematiken i korsningen. Dessutom sträcker sig en busslinje längs Fålhagsleden och det finns ett behov av att minska fördröjningen för dessa bussar. I Figur 19 visas studiekorsningens utformning. Enligt Trafikverkets fyrstegsprincip, som diskuterades i avsnitt 1.2, bör förbättringsåtgärder utvärderas före nybyggnadsåtgärder. Studiekorsningen styrs i dagsläget med fordonsstyrning med LHOVRA och Uppsala kommun önskar analysera byte av signalstyrningsstrategi och undersöka om det kan förbättra trafiksituationen.



Figur 19. Utformning av studiekorsningen. © OpenStreetMaps bidragsgivare

För att undersöka effekterna av byte av signalstyrning till en adaptiv styrning behöver en trafiksimulering genomföras. Enligt önskan från Uppsala kommun ska studiekorsningen undersökas för olika grader av bussprioritering.

Syftet med den här trafiksimuleringen kan placeras i kategorin ”utvärdering av förbättringsåtgärd” eftersom studien syftar till att just utvärdera en förbättringsåtgärd snarare än en nybyggnadsåtgärd. Trafiksimuleringen väntas ge svar på hur tidsfördröjningen för personbilar, bussar, tunga lastbilar, cyklister och fotgängare vid studiekorsningen påverkas av att byta signalstyrningsstrategi från dagens fordonsstyrning med LHOVRA till en adaptiv styrningsstrategi. Utöver det väntas svar ges på effekter av att implementera bussprioritering i den adaptiva styrningsstrategin. Med resultaten från trafiksimuleringarna kommer sedan utsläppen vid korsningen att modelleras.

De resultat som är intressanta för Uppsala kommun är skillnaden i medeltidsfördröjning och utsläpp.

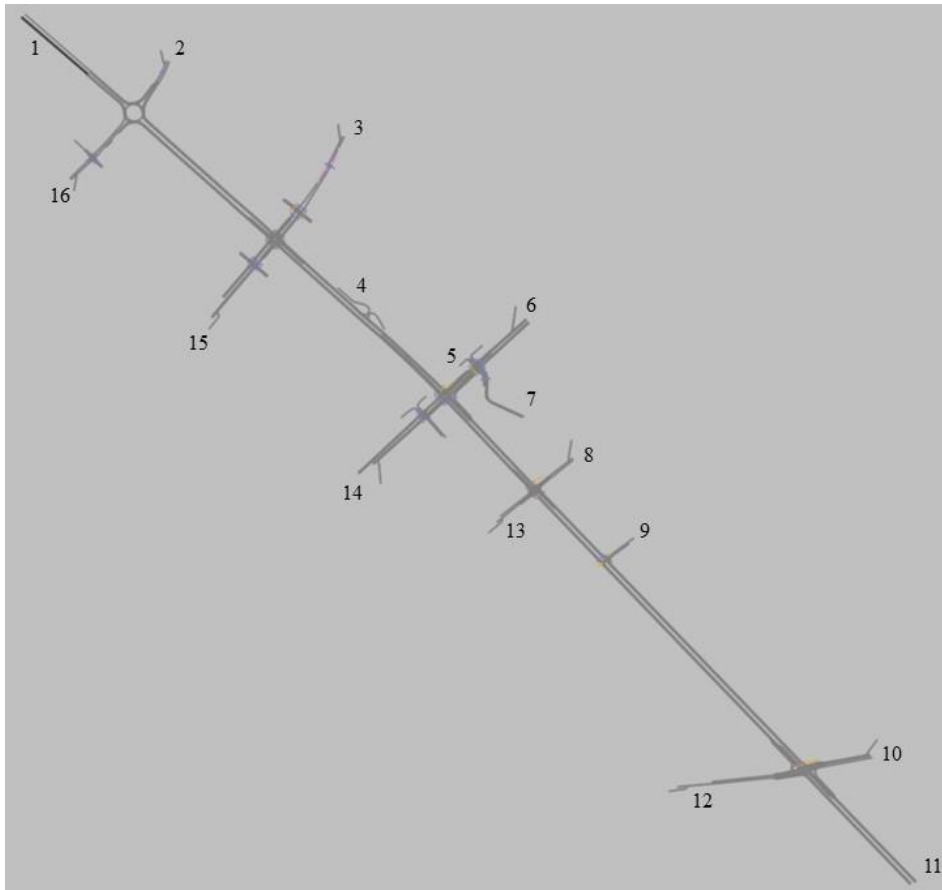
Tidsfördröjningarna vid studiekorsningen är som störst under morgonrusningstrafiken kl. 8–9.30.

Studiens avgränsningar innefattas dessa punkter:

- Trafiksimuleringen görs baserat på trafikdata från morgonrusningstrafiken på en vardagsmorgon, då trafikflödet är som störst.
- Vissim-modellen som Uppsala kommun har skapat antas, utifrån deras verifiering och kalibrering, motsvara verkligheten och ingen ytterligare kalibrering genomförs.

3.1.2 Datainsamling

Datainsamlingen har genomförts av Uppsala kommun. Trafikflödesdata har samlats in med hjälp av kameramätningar på en mängd platser längs Tycho Hedéns väg i Figur 2. Alla kameramätningen genomfördes 2018-12-11 mellan kl. 07.30 och kl. 16.30. I Figur 20 har en del av Tycho Hedéns väg och närliggande vägnät isolerats och startpunkter har numrerats. Några startpunkter med relativt sett små inflöden av trafik har exkluderats. Studiekorsningen återfinns längst ner till höger i bilden.



Figur 20. Tycho Hedéns väg och närliggande vägnät med numrerade startpunkter. Studiekorsningen återfinns längst ner till höger i bilden.

Datansamlingen av trafikflöden för respektive startpunkt i Figur 20 presenteras i Tabell 4.

Tabell 4. Inflöde av trafik i respektive startpunkt i Figur 20.

Startpunkt	Inflöde av trafik [fordon/timme]
1	808
2	265
3	330
4	69
5	151
6	387
7	154
8	212
9	243
10	277
11	745
12	307
13	182
14	344
15	436
16	330

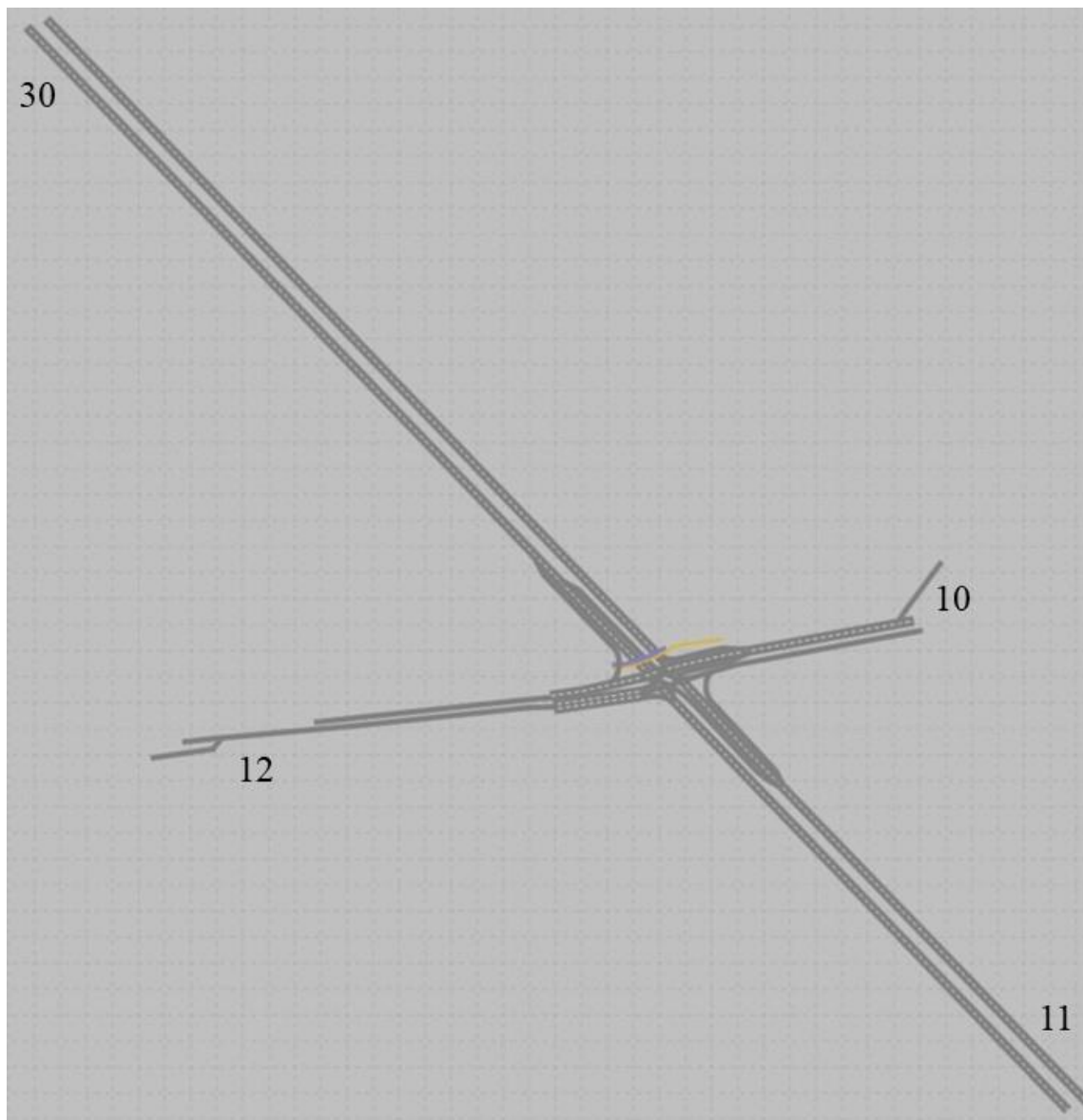
I vägnätet antas att 95 procent av fordonen är personbilar och övriga 5 procent är tunga lastbilar. Utöver inflödet av fordon i Tabell 4 tillkommer flödet av bussar, som i stället baseras på information från busstidtabeller.

En OD-matrisestimering genomfördes av Uppsala kommun med hjälp av programmet Aimsun, baserat på uppmätta svängandelar i respektive korsning. Erhållen OD-matris presenteras i Tabell 5. Värdena representerar absoluta tal per timme och summan av varje rad motsvarar därför det totala inflödet från respektive startpunkt i Tabell 4. Eftersom det bara finns en möjlig väg från respektive startpunkt till varje målpunkt sammanfaller informationen i OD-matrisen med informationen från andelen fordon som väljer varje möjlig rutt i vägnätet.

Tabell 5. OD-matris från matrisestimering i programmet Aimsun.

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	63	61	0	25	71	27	41	3	55	97	116	23	47	51	129
2	33	0	2	0	0	6	6	0	0	7	118	12	0	0	3	78
3	22	3	0	0	0	0	0	0	2	8	104	19	0	0	163	9
4	31	9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	28
5	3	2	1	0	0	37	16	0	3	2	36	6	0	37	1	8
6	6	6	3	0	17	0	40	0	3	5	59	13	0	209	6	20
7	3	2	1	0	10	31	0	0	3	3	41	7	0	43	2	9
8	13	10	3	0	0	0	0	0	2	0	113	1	32	0	5	32
9	1	3	18	1	0	2	0	0	0	0	168	1	0	1	37	10
10	0	0	12	5	2	4	2	1	0	0	101	119	1	8	23	0
11	0	0	46	59	20	38	21	58	0	32	0	122	97	164	90	0
12	0	0	12	5	2	4	2	1	0	148	102	0	1	7	24	0
13	17	13	3	0	0	0	0	21	2	0	74	1	0	0	7	43
14	19	19	1	0	10	103	12	0	3	3	84	7	0	0	3	64
15	41	5	126	0	0	0	0	0	3	15	192	36	0	0	0	18
16	40	13	3	0	5	19	6	10	3	27	106	82	5	7	3	0

I och med att enbart studiekorsningen ska undersökas i den här studien behöver trafikflödesdata i Tabell 4 och Tabell 5 bearbetas om för att kunna användas som underlag till simulering av korsningen isolerat från resten av vägnätet. Modellens utseende när studiekorsningen har isolerats visas i Figur 21. Numreringen för startpunkterna 10, 11, och 12 har behållits från tidigare, medan startpunkt 30 representerar ett sammanlagt resulterande inflöde från resten av vägnätet.



Figur 21. Utseende av studiekorsningen isolerat från resten av vägnätet.

Inflöde och OD-matris för korsningen

För att generera inflödesdata och en OD-matris för vägnätet i Figur 21 kan Tabell 5 användas. Från samtliga startpunkter i vägnätet som isolerades i Figur 21 kommer en viss andel av fordonen, enligt OD-matrisen i Tabell 5, att välja någon av målpunkterna 10, 11 och 12. Detta representeras av kolumn 10, 11 och 12 i Tabell 5 som visas separat i Tabell 6. Eftersom raderna 10, 11, 12 med den gråa diagonalen representerar flöden från startpunkterna 10, 11 respektive 12 kan dessa exkluderas och ges en grå textfärg. Summan av resterande cellvärden ger det totala antalet fordon per timme med startpunkterna skilda från 10, 11 och 12 som har 10, 11 eller 12 som målpunkt. Detta resulterar i att startpunkten 20 i Figur 21 får inflödet 1 105.

Tabell 6. Antal fordon från respektive startpunkt som väljer någon av målpunkterna 10, 11 eller 12.

OD	10	11	12
1	55	97	116
2	7	118	12
3	8	104	19
4	1	0	0
5	2	36	6
6	5	59	13
7	3	41	7
8	0	113	1
9	0	168	1
10	0	101	119
11	32	0	122
12	148	102	0
13	0	74	1
14	3	84	7
15	15	192	36
16	27	106	82

I och med en genomförd generation av inflöde i startpunkt 20 kan en inflödestabell för vägnätet i Figur 21 skapas. Inflödet i punkterna 10, 11 och 12 är lika som i Tabell 4.

Tabell 7. Inflöde av trafik i studiekorsningens respektive startpunkter. Startpunkterna definieras i Figur 21.

Startpunkt	Inflöde av trafik [fordon/timme]
30	1620
10	277
11	745
12	307

En OD-matris kan skapas för vägnätet i Figur 21 genom att addera alla värden i respektive kolumn i Tabell 6, förutom de gråmarkerade raderna 10, 11 och 12. Detta ger OD-värden för startpunkt 20. På motsvarande sätt kan OD-värden för respektive startpunkt med målpunkt 20 erhållas genom att summera alla värden i respektive rad i Tabell 8, förutom de gråmarkerade kolumnerna 10, 11 och 12. Övriga OD-värden är oförändrade.

Tabell 8. Antal fordon från någon av startpunkterna 10, 11 eller 12.

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10	0	0	12	5	2	4	2	1	0	0	101	119	1	8	23	0
11	0	0	46	59	20	38	21	58	0	32	0	122	97	164	90	0
12	0	0	12	5	2	4	2	1	0	148	102	0	1	7	24	0

Den resulterande OD-matrisen för vägnätet i Figur 21 visas i Tabell 9.

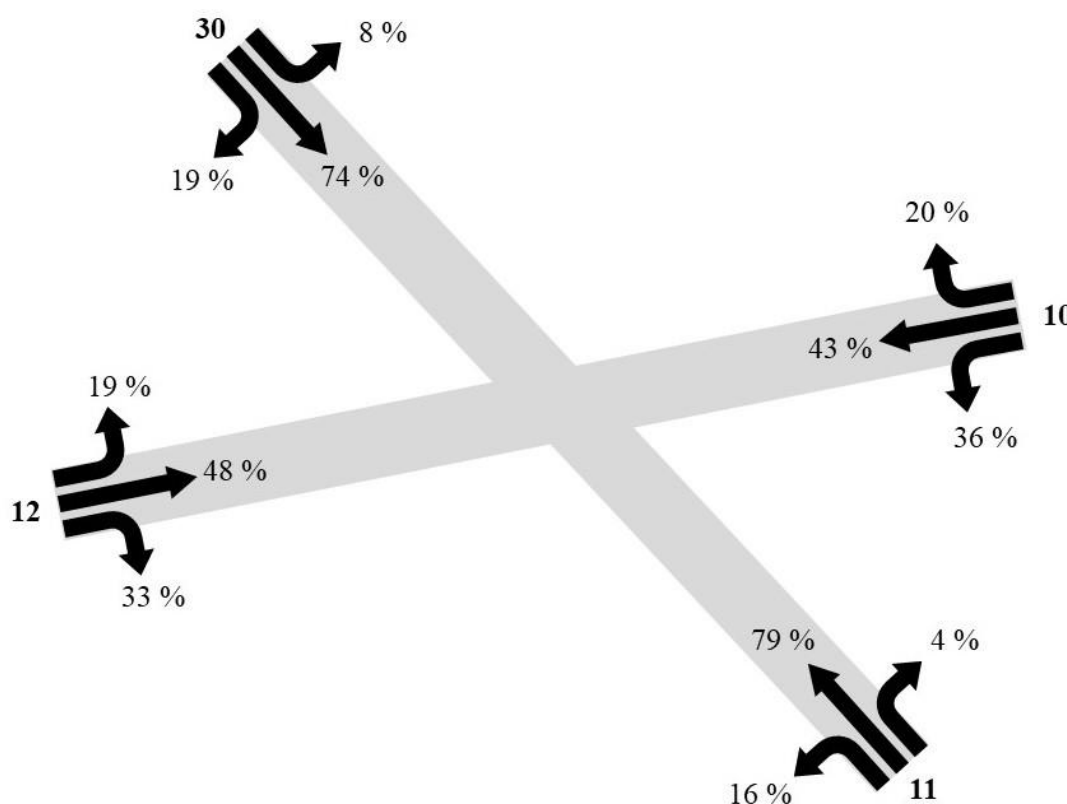
Tabell 9. OD-matris för nätverket i Figur 21. Diagonalen, som är gråmarkerad, representerar andelen fordon som har samma start- och målpunkt.

OD	30	10	11	12
30	0	128	1193	300
10	57	0	101	119
11	591	32	0	122
12	57	148	102	0

Eftersom OD-matrisen i Tabell 9 gäller för en isolerad korsning sammanfaller informationen med svängandelar i korsningar. Svängandelar kan beräknas för varje startpunkt genom att dividera antalet fordon för en målpunkt med samtliga fordon från den aktuella startpunkten. Detta resulterar i svängandelar enligt Tabell 10, eller Figur 22 som kan upplevas enklare att överskåda.

Tabell 10. Svängandelar för nätverket i Figur 21.

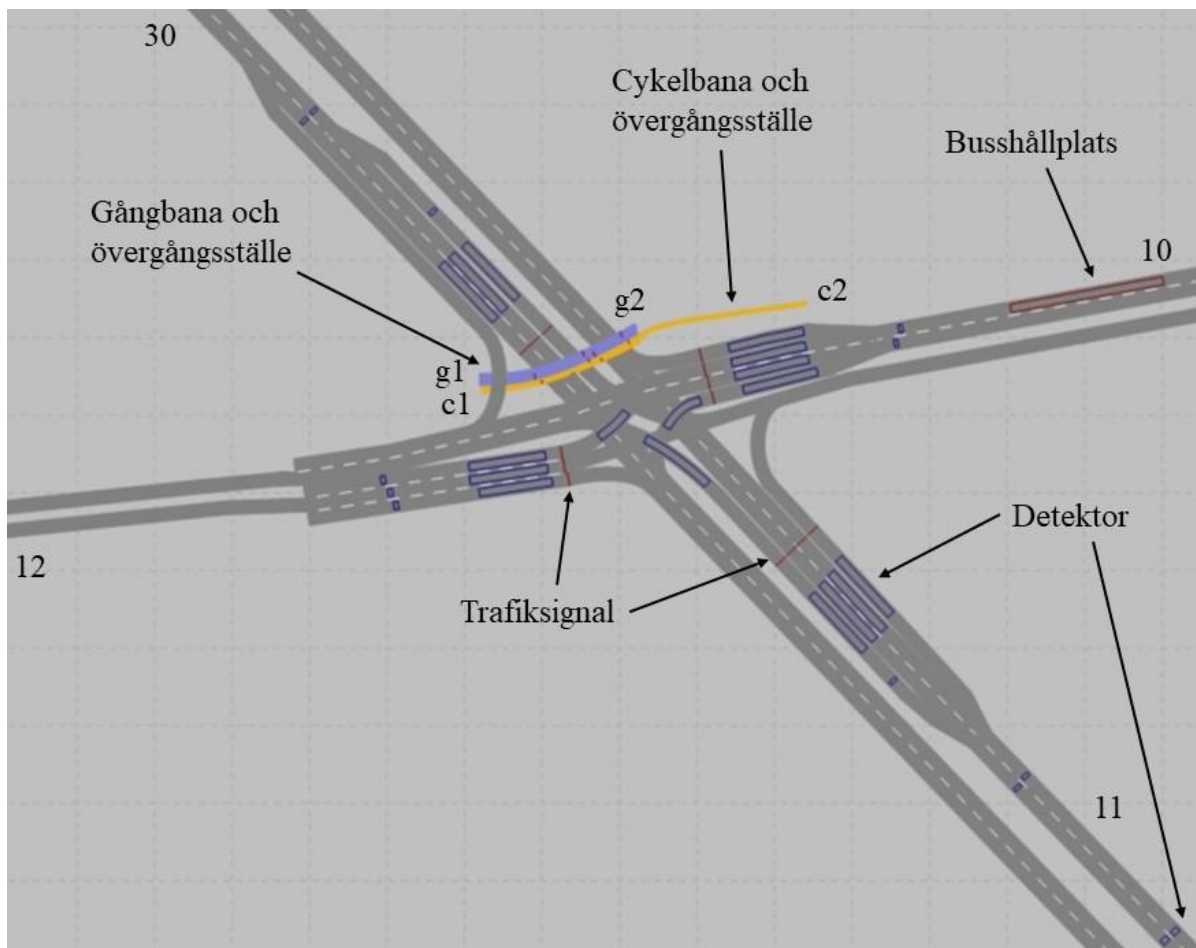
Svängandelar	30	10	11	12
30	0 %	8 %	74 %	19 %
10	20 %	0 %	36 %	43 %
11	79 %	4 %	0 %	16 %
12	19 %	48 %	33 %	0 %



Figur 22. Svängandelar i studiekorsningen. De nummer som visas vid utkanten av varje väg motsvarar numreringen i Figur 21.

Trafikflöde för fotgängare och cyklister

Medelflöde av fotgängare och cyklister har också mätts upp med hjälp av kameramätningar för hela det stora vägnätet i Figur 20. Eftersom fotgängare och cyklister endast passerar övergångsställen lokalt vid en korsning är endast data för studiekorsningen av intresse i den här studien. I Figur 23 visas en mer detaljerad ritning av korsningen som bland annat inkluderar gång- och cykelbana. Gångbanan har startpunkterna g1 och g2 medan cykelbanan har startpunkterna c1 och c2 i Figur 23.



Figur 23. Studiekorsningen med gångbana, cykelbana, busshållplatser, trafiksignaler och detektorer utritade.

Inflöde för fotgängare och cyklister i korsningen i respektive startpunkt presenteras i Tabell 11.

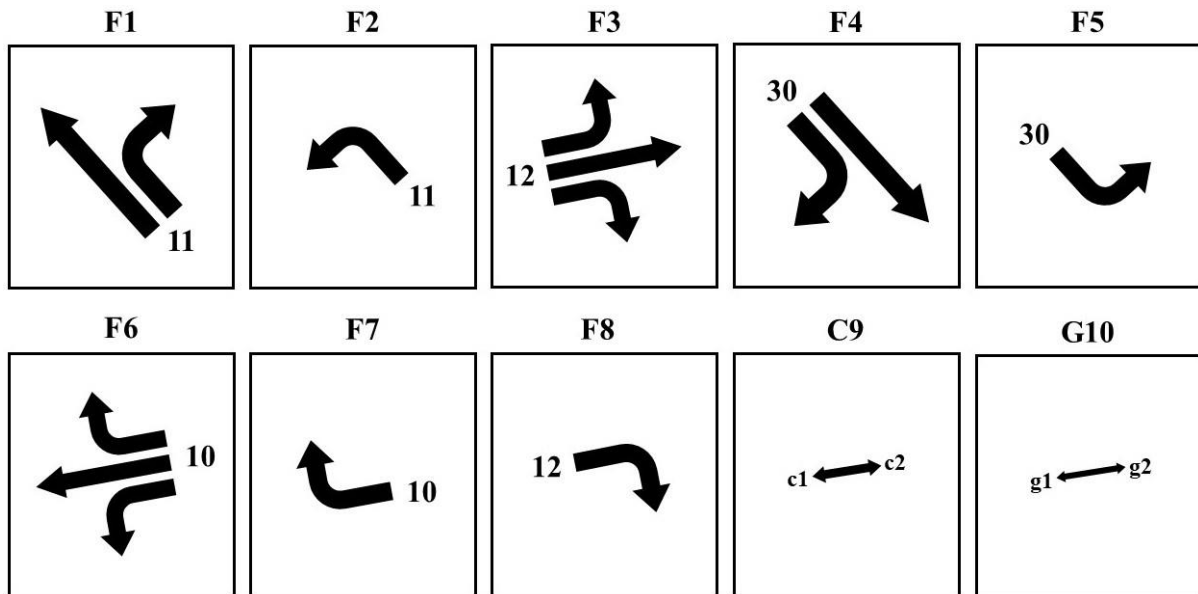
Tabell 11. Inflöde av fotgängare och cyklister vid studiekorsningen. Startpunkterna definieras i Figur 23.

Startpunkt	Inflöde [personer/timme]
g1	14
g2	14
c1	109
c2	119

Eftersom det endast finns ett möjligt ruttval för fotgängare och cyklister över vägen behövs ingen OD-matris.

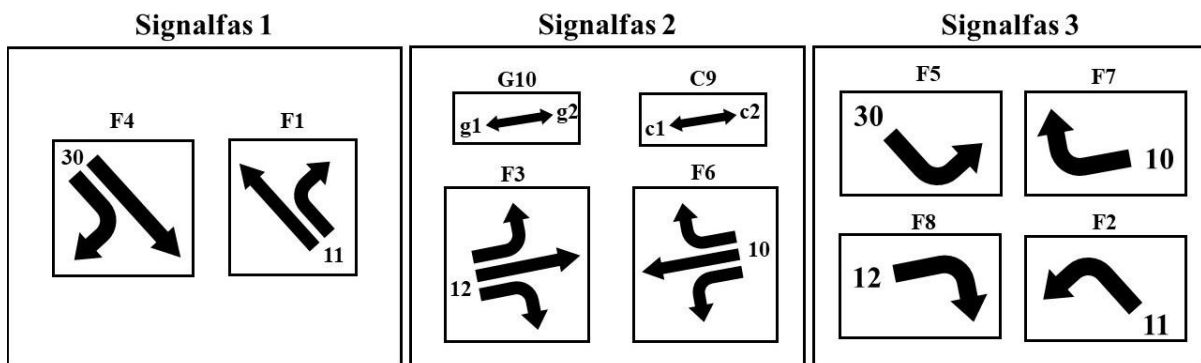
Signalgrupper och signalprogram

Signalgrupper för studiekorsningen presenteras i Figur 24.



Figur 24. Signalgrupper för studiekorsningen. Signalgruppsetiketteringen motsvarar etiketteringen i ritningen i Bilaga A.

Signalprogram med tillhörande signalfaser och signalgrupper för studiekorsningen presenteras i Figur 25 och har hämtats från ritningen i Bilaga A.



Figur 25. Signalprogram för studiekorsningen. Numrering utifrån Figur 21 och Figur 23.

Fasbytestider

Intressant data från tabellen med fasbytestider i Bilaga B presenteras i Tabell 12. Faserna är definierade i Figur 24.

Tabell 12. Grönblinktid, rödtid, rödgultid, gultid och mellantid för respektive fasbyte studiekorsningen.

Från	Till	Grönblinktid [s]	Gultid [s]	Rödgultid [s]	Rödtid [s]	Mellantid [s]
F1	F3	0	4	1,5	2,4	7,9
F1	F5	0	4	1,5	2,0	7,5
F1	F6	0	0,1	1,5	2,1	3,7
F1	F7	0	4	1,5	3,1	8,6
F1	C9	0	4	1,5	3,8	9,3
F1	G10	0	4	0	5,3	9,3
F2	F3	0	4	1,5	2,3	7,8
F2	F4	0	4	1,5	2,9	8,4
F2	F6	0	4	1,5	3,2	8,7
F3	F1	0	4	1,5	2,2	7,7
F3	F2	0	3	1,5	2,0	6,5
F3	F4	0	4	1,5	0,2	5,7
F3	F5	0	4	1,5	2,9	8,4
F3	F7	0	4	1,5	2,0	7,6
F4	F2	0	4	1,5	0,7	6,2
F4	F3	0	4	1,5	1,6	7,1
F4	F6	0	4	1,5	0,1	5,6
F4	F8	0	4	1,5	1,6	7,1
F4	C9	0	4	1,5	0,1	5,6
F4	G10	0	4	0	0,6	4,6
F5	F1	0	4	1,5	1,8	7,3
F5	F3	0	4	1,5	2,0	7,5
F5	F6	0	4	1,5	1,1	6,6
F5	C9	0	4	1,5	0,1	5,6
F5	G10	0	4	0	0,8	4,8
F6	F1	0	4	1,5	0,1	5,6
F6	F2	0	4	1,5	0,5	6,0
F6	F4	0	4	1,5	1,7	7,2
F6	F5	0	4	1,5	1,1	6,6
F6	F8	0	4	1,5	1,8	7,3
F7	F1	0	4	1,5	0,1	5,6
F7	F3	0	4	1,5	0,1	5,6
F7	C9	0	4	1,5	1,1	6,6
F7	G10	0	4	0	2,6	6,6
F8	F4	0	4	1,5	0,3	5,8
F8	F6	0	4	1,5	0,8	6,3
C9	F1	0	3	1,5	2,6	7,1
C9	F4	0	3	1,5	2,6	7,1
C9	F5	0	3	1,5	2,8	7,3
C9	F7	0	3	1,5	2,5	7,0
G10	F1	5	0	1,5	1,9	8,4
G10	F4	5	0	1,5	3,9	10,4
G10	F5	5	0	1,5	4,1	10,6
G10	F7	5	0	1,5	1,8	8,3

Mellantiderna, som behöver anges i trafiksimuleringsprogrammet Vissim, presenteras i matrisform i Tabell 13.

Tabell 13. Mellantider för respektive fasbyte i studiekorsningen. Faserna är definierade i Figur 24.

	F1 [s]	F2 [s]	F3 [s]	F4 [s]	F5 [s]	F6 [s]	F7 [s]	F8 [s]	C9 [s]	G10 [s]
F1			7,9		7,5	3,7	8,6		9,3	9,3
F2			7,8	8,4		8,7				
F3	7,7	6,5		5,7	8,4		7,6			
F4		6,2	7,1			5,6		7,1	5,6	4,6
F5	7,3		7,5			6,6			5,6	4,8
F6	5,6	6,0		7,2	6,6			7,3		
F7	5,6		5,6						6,6	6,6
F8				5,8		6,3				
C9	7,1			7,1	7,3		7,0			
G10	8,4			10,4	10,6		8,3			

Busslinjer

Den enda busslinjen som passerar korsningen är linje 6, som går längs Fåhlhagsleden. Under morgontrafiken, som simuleringen avser, anländer bussar var tionde minut från respektive håll (UL, 2018), vilket alltså ger totalt tolv bussar per timme.

Övrig datainsamling

Samtliga detektorers placering går att avläsa på ritningen i Bilaga C. Detektorernas funktioner vad gäller bland annat prioriteringsfunktionerna i Figur 13 återfinns i Bilaga D. Funktionerna har implementerats av Uppsala kommun i Vissim och ytterligare fördjupning kring respektive funktion undviks.

3.1.3 Uppbyggnad av basmodell

Uppbyggnad av basmodellen för hela vägnätet enligt Figur 20 genomfördes av Uppsala kommun. Basmodellen inkluderar all information som presenterades i avsnitt 3.1.2. Från basmodellen raderades allt förutom studiekorsningen. Justeringar som krävdes till följd av borttagning av resten av nätverket genomfördes. Dessa justeringar inkluderade inflöde av trafik enligt Tabell 7 och ruttval enligt OD-matrisen i Tabell 9. I övrigt ändrades inga inställningar eller trafikparametrar.

3.1.4 Verifiering

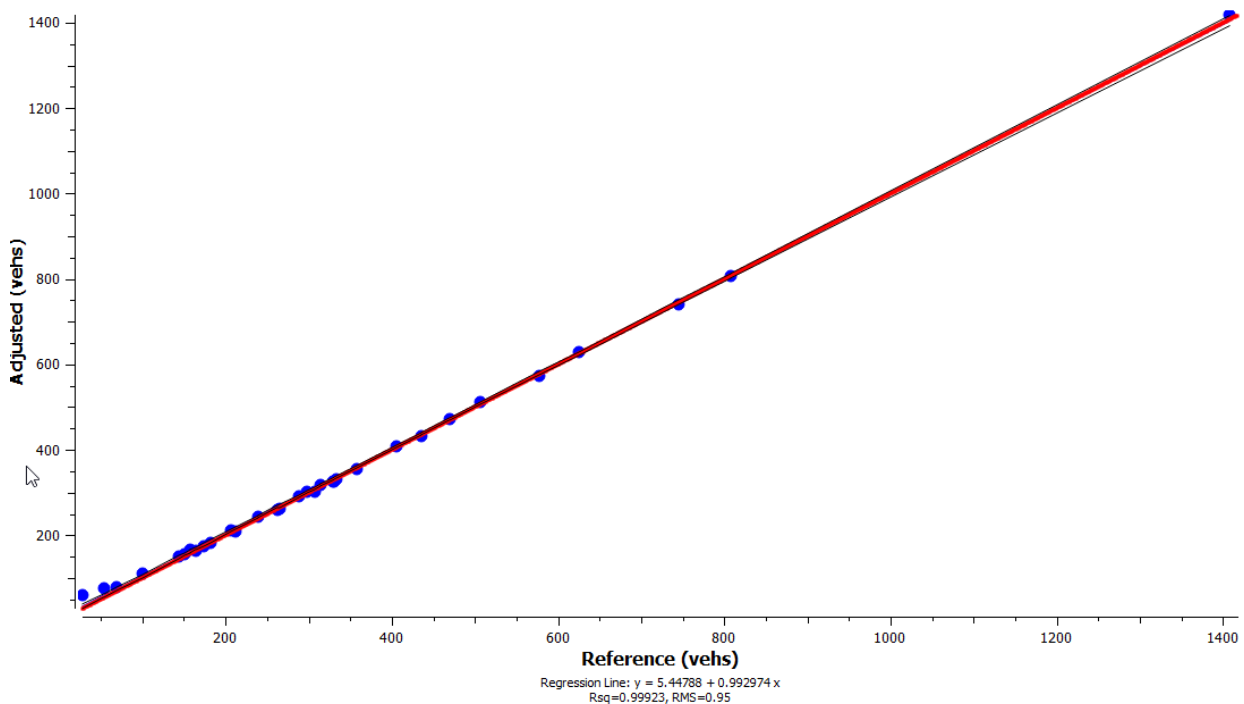
Verifiering av modellen genomfördes av Uppsala kommun. Medan simuleringen kördes kontrollerades modellen för eventuella oegentligheter såsom fordon som plötsligt försvinner, fordon som oväntat byter hastighet. Dessa fel åtgärdades tills inga fler logiska fel kunde hittas.

3.1.5 Kalibrering

Kalibrering av modellen genomfördes av Uppsala kommun. Dessa parametrar justerades för att öka överensstämmelsen med trafikmätningarna:

- Önskad hastighet i korsningen sattes till 30 km/h för personbilar och 25 km/h för bussar och lastbilar.
- Önskad hastighet i övrigt sattes till 40 km/h för alla fordonstyper längs Fåhlhagsleden och 60 km/h för alla fordonstyper längs Tycho Hedéns väg.

Efter justering av parametrar jämfördes trafikflödet i modellen vid bestämda mätpunkter med trafikflödet från trafikmätningar i verkligheten i samma punkter. I Figur 26 jämförs trafikflöden i modellen (y-axeln) med uppmätta trafikflöden (x-axeln), vilka tillsammans bildar punkter i grafen. Därefter har den regressionslinje som bäst motsvarar punkterna ritats ut. Med hjälp av minsta kvadraten-metoden har överensstämmelsen beräknats till 99,923 procent.

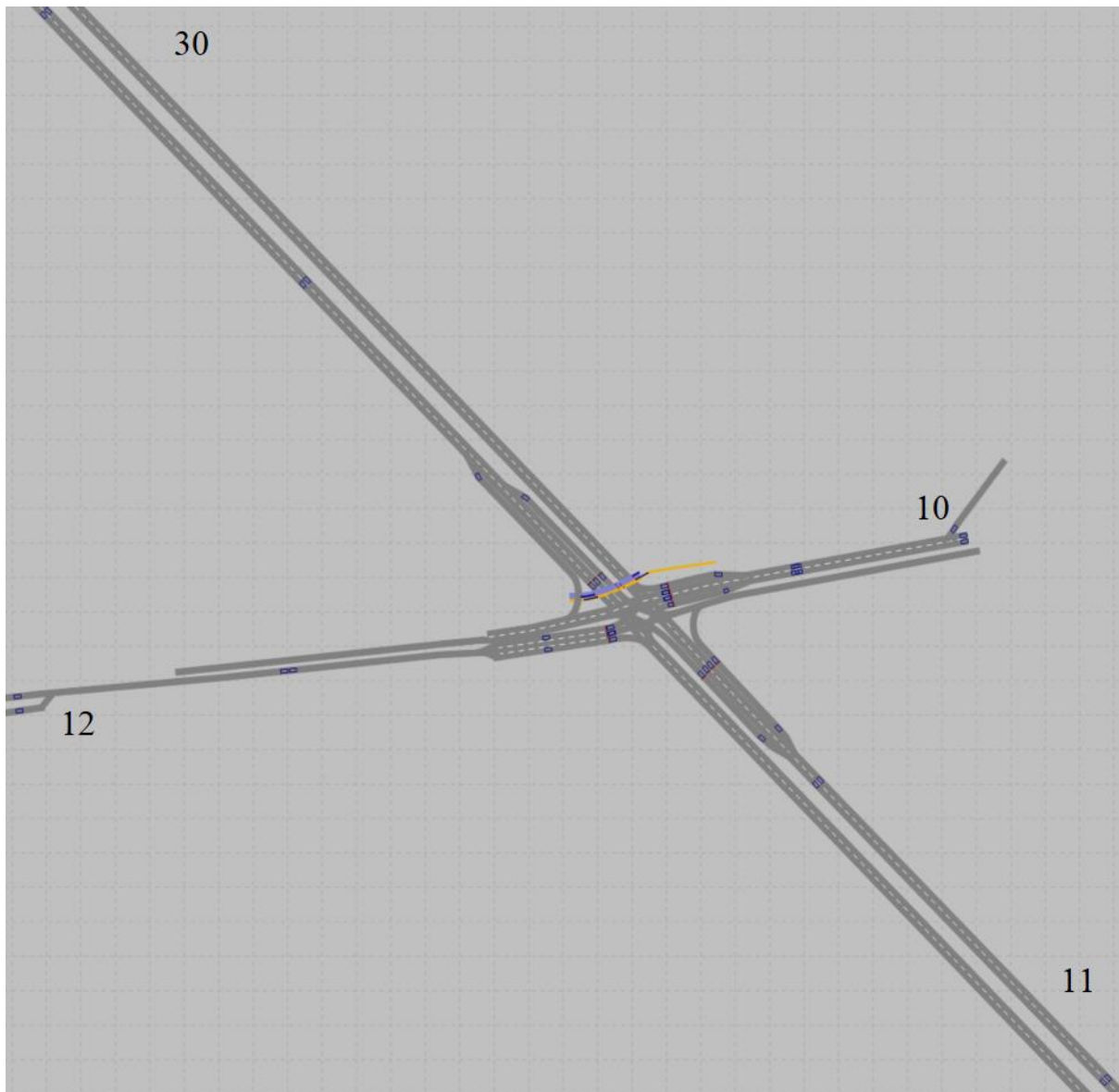


Figur 26. Överensstämmelse mellan modell och trafikmätningar efter kalibrering.

Med anledning av den goda överensstämmelsen avslutades kalibreringen i och med detta. Eftersom trafikflöden i verkligheten kan variera från vecka till vecka, från dag till dag och beroende på vilken årstid det är med mera, kan modellen sägas representera den uppsättning av trafikmätningar som har använts för kalibreringen snarare än trafiksituationen generellt. Av tids- och budgetskäl genomfördes dock ingen validering.

3.1.6 Analys av alternativ

Det alternativ som analyseras i den här studien utgör att byta signalstyrningssystem från dagens signalstyrningssystem LHOVRA till det adaptiva systemet Epics. Detektorer för avregistrering placerades direkt efter respektive stopplinje och på varierande avstånd innan stopplinjen för registrering enligt ungefärliga rekommendationer av PTV AG (2017). Se Figur 27 och Tabell 14. Utöver detektorerna i Tabell 14 finns en detektor direkt efter varje stopplinje samt en detektor innan cykelbanans övergångsställe i varje riktning. Det totala antalet detektorer blir 40 stycken, med tanke på att det krävs en detektor i varje körfält.



Figur 27. Placering av detektorer enligt ungefärliga rekommendationer av PTV AG (2017).

Tabell 14. Detektorers avstånd från stopplinjen för varje startpunkt i Figur 27 enligt ungefärliga rekommendationer av PTV AG (2017). Inom parentes anges körfältsdetektion. I kolumnen 30 betyder exempelvis 70 m (västerut) att detektorn som detekterar fordon i svängkörfältet där fordon ska svänga västerut är placerad 70 m från stopplinjen.

30 [m]	10 [m]	11 [m]	12 [m]
70 (västerut)	30 (norrut)	60 (österut)	30 (norrut)
90 (österut)	30 (söderut)	60 (västerut)	30 (söderut)
250	80	90	180
450	180	340	340

För varje signalfas definierades parametrar och detektorer för fotgängare, bilar och bussar beroende på vilka fordonstyper som inkluderas i gällande signalfas. Samma mellantider som för nuläget angavs. Enligt problemformuleringen ska både adaptiv styrning utan bussprioritering och adaptiv styrning med olika grader av bussprioritering utvärderas. Frånvaro av bussprioritering implementerades genom att vikta en buss som en personbil. Därmed görs ingen skillnad i signalstyrningen om en personbil eller en buss närmar sig korsningen. PTV AG (2017) rekommenderar att bussar viktas som 50–100 personbilar. För att få en så stor spridning som möjligt inom rekommendationerna kommer bussprioritering med viktningarna 50 och 100 att utvärderas. Närvaro av fotgängare respektive cyklister viktas som minst fem personbilar enligt rekommendation av (PTV AG, 2017). För att undersöka möjligheterna till att minska fördröjningstider för fotgängare och cyklister utförs simuleringar där fotgängare och cyklister viktas som 5, 10 respektive 15 personbilar. Därmed kommer analysen av alternativ bestå av nio fall enligt matrisen i Tabell 15.

Tabell 15. Nio alternativ som ska utvärderas i form av alla möjliga kombinationer av tre olika bussprioriteringsgrader (B) respektive tre övergångsställesprioriteringsgrader (Ö). Viktningen av fotgängare och cyklister representerar närvaro av dessa och multipliceras inte med antalet väntande.

	Buss = 1 personbil	Buss = 50 personbilar	Buss = 100 personbilar
Fotgängare och cyklist = 5 personbilar	B1, Ö5	B50, Ö5	B100, Ö5
Fotgängare och cyklist = 15 personbilar	B1, Ö15	B50, Ö15	B100, Ö15
Fotgängare och cyklist = 25 personbilar	B1, Ö25	B50, Ö25	B100, Ö25

3.2 Emissionsmodellering

För att kunna genomföra en emissionsmodellering krävs information om den aktuella fordonsparken och hur stor andel som drivs med olika typer av drivmedel. Standardvärden finns för personbilar, bussar och tunga lastbilar som avspeglar Nederländernas fordonspark, men för att erhålla en emissionsmodellering som avspeglar en korsning i Uppsala så väl som möjligt bör data anpassas till Uppsalas fordonspark.

Enligt Trafikanalys (2019b) var Uppsala kommuns fordonspark uppbyggd enligt Tabell 16 vid slutet av år 2018.

Tabell 16. Uppsala kommuns fordonspark uppdelad på använda drivmedel.

Drivmedel	Antal personbilar	Antal bussar	Antal tunga lastbilar
Bensin	46 615	1	15
Diesel	29 160	289	1 156
El	333	31	1
Elhybrider	1 990	0	0
Laddhybrider	827	14	0
Etanol	4 994	0	0
Gas	812	115	4
Övriga	5	0	0
Totalt	84 736	450	1 176

Om antalet fordon i varje cell i respektive kolumn i Tabell 16 divideras med det totala antalet fordon i tillhörande fordonstyp fås andelen personbilar, bussar och tunga lastbilar som drivs med respektive drivmedel enligt Tabell 17.

Tabell 17. Andel personbilar, bussar respektive tunga lastbilar som drivs med olika drivmedel.

Drivmedel	Andel personbilar	Andel bussar	Andel tunga lastbilar
Bensin	55,0 %	0,2 %	1,3 %
Diesel	34,4 %	64,2 %	98,3 %
El	0,4 %	6,9%	0,1 %
Elhybrider	2,3 %	0,0 %	0,0 %
Laddhybrider	1,0 %	3,1 %	0,0 %
Etanol	5,9 %	0,0 %	0,0 %
Gas	1,0 %	25,6 %	0,3 %
Övriga	0,0 %	0,0 %	0,0 %

I EnViVer finns endast alternativen bensin, diesel, motorgas, naturgas och elektricitet. Eftersom el- och laddhybrider ofta använder sig av elmotorn i stadsmiljö, vilket studiefallet representerar, räknas dessa fordonstyper till drivmedlet elektricitet. Etanol räknas till bensin i EnViVer, eftersom bensin innehåller etanol och vice versa. Drivmedlet gas i Tabell 17 innefattar både biogas och naturgas som båda till största del innehåller metan (Malmkvist, 2019). Gas räknas därför till drivmedlet naturgas i EnViVer. Kategorin övriga i Tabell 17 bortses ifrån. Med avseende på dessa justeringar av kategorier blir andelarna som kan användas i EnViVer enligt Tabell 18.

Tabell 18. Andelen personbilar, bussar och tunga lastbilar som drivs med respektive drivmedel enligt EnViVers kategorier.

Drivmedel	Andel personbilar	Andel bussar	Andel tunga lastbilar
Bensin	60,9 %	0,2 %	1,3 %
Diesel	34,4 %	64,2 %	98,3 %
Motorgas	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Naturgas	1,0 %	25,6 %	0,3 %
Elektricitet	3,7 %	10,0 %	0,1 %

Fordonsparkens åldersfördelning behöver också specificeras i EnViVer i form av följande data:

- Andelen av fordonen i fordonsflottan som är nyare än ett år
- Genomsnittlig fordonsålder
- Genomsnittlig utgångsålder

Enligt Trafikanalys (2019a) var totala antal personbilar, bussar och tunga lastbilar i trafik år 2018 och antal nyregistrerade fordon år 2018 enligt Tabell 19, vilket ger andelen fordon som är nyare än ett år.

Tabell 19. Andel personbilar, bussar och tunga lastbilar nyare än ett år.

	Personbilar	Bussar	Tunga lastbilar
Totalt antal i trafik år 2018	4 870 783	14 378	83 997
Nyregistreringar år 2018	365 535	1 003	7 738
Andel nyare än ett år	7,5 %	7,0 %	9,2 %

År 2015 var den genomsnittliga åldern för personbilar 10,0 år och för tunga lastbilar 10,9 år (Trafikanalys, 2016). Enligt Trafikanalys (2015) var den genomsnittliga åldern år 2014 för bussar 6,2 år.

Inga tillförlitliga data för genomsnittlig utgångsålder kunde hittas, varför standardvärdet i EnViVer som gäller för Nederländerna används.

4 Resultat

Resultat i form av fördröjning, koldioxidutsläpp, kväveoxidutsläpp och uppkomst av PM10 för de olika fallen presenteras först var för sig i tabellform. Därefter presenteras jämförelser i diagramform.

Fördröjning

Fördröjningstider för de olika fallen presenteras i Tabell 20.

Tabell 20. Genomsnittliga fördröjningstider i sekunder [s] i de olika fallen.

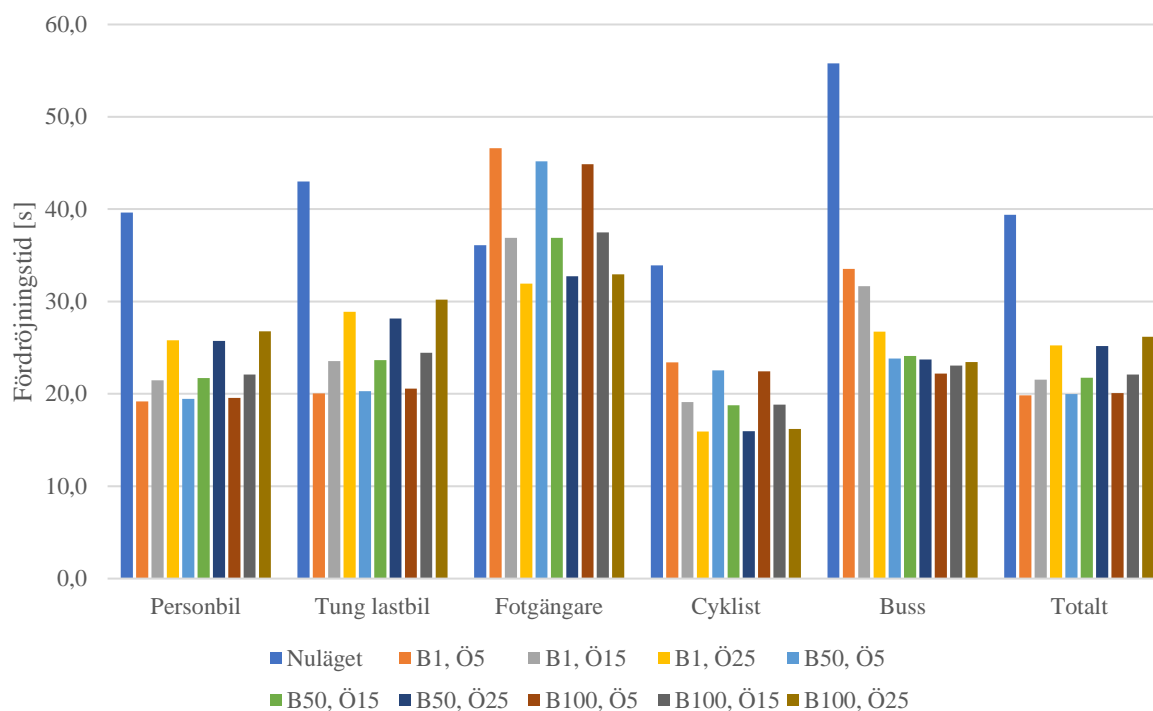
	Personbil	Tung lastbil	Fotgängare	Cyklist	Buss	Totalt
Nuläget	39,7	43,0	36,1	33,9	55,8	39,4
B1, Ö5	19,2	20,0	46,6	23,4	33,5	19,9
B1, Ö15	21,5	23,6	36,9	19,1	31,7	21,6
B1, Ö25	25,8	28,9	31,9	15,9	26,7	25,3
B50, Ö5	19,5	20,3	45,2	22,6	23,8	20,0
B50, Ö15	21,7	23,6	36,9	18,8	24,1	21,7
B50, Ö25	25,7	28,2	32,7	16,0	23,7	25,2
B100, Ö5	19,6	20,6	44,9	22,5	22,2	20,1
B100, Ö15	22,1	24,4	37,5	18,8	23,1	22,1
B100, Ö25	26,8	30,2	32,9	16,2	23,4	26,2

Procentuella förändringar jämfört med nuläget presenteras i Tabell 21.

Tabell 21. Procentuell förändring i fördröjningstider jämfört med nuläget för de olika fallen.

	Personbil	Tung lastbil	Fotgängare	Cyklist	Buss	Totalt
Nuläget	0 % Referens	0 % Referens	0 % Referens	0 % Referens	0 % Referens	0 % Referens
B1, Ö5	-52 %	-53 %	29 %	-31 %	-40 %	-50 %
B1, Ö15	-46 %	-45 %	2 %	-44 %	-43 %	-45 %
B1, Ö25	-35 %	-33 %	-12 %	-53 %	-52 %	-36 %
B50, Ö5	-51 %	-53 %	25 %	-34 %	-57 %	-49 %
B50, Ö15	-45 %	-45 %	2 %	-45 %	-57 %	-45 %
B50, Ö25	-35 %	-35 %	-9 %	-53 %	-57 %	-36 %
B100, Ö5	-51 %	-52 %	24 %	-34 %	-60 %	-49 %
B100, Ö15	-44 %	-43 %	4 %	-44 %	-59 %	-44 %
B100, Ö25	-32 %	-30 %	-9 %	-52 %	-58 %	-34 %

En jämförelse av fördröjningstider för de olika fallen presenteras i Figur 28.



Figur 28. Jämförelse av fördröjningstider för de olika fallen.

Något som kan noteras direkt är att fördröjningstiderna generellt är mindre i alternativen jämfört med nuläget. Det verkar också finnas ett motsatsförhållande mellan fördröjningstiden för personbilar och tunga lastbilar, å ena sidan, och fotgängare och cyklister, å andra sidan. När fördröjningstiden är liten för personbilar och tunga lastbilar är den nämligen stor för fotgängare och cyklister och tvärtom.

Koldioxid

Koldioxidutsläpp för de olika fallen presenteras i Tabell 22.

Tabell 22. Genomsnittliga koldioxidutsläpp i kilogram per timme [kg/h] i de olika fallen.

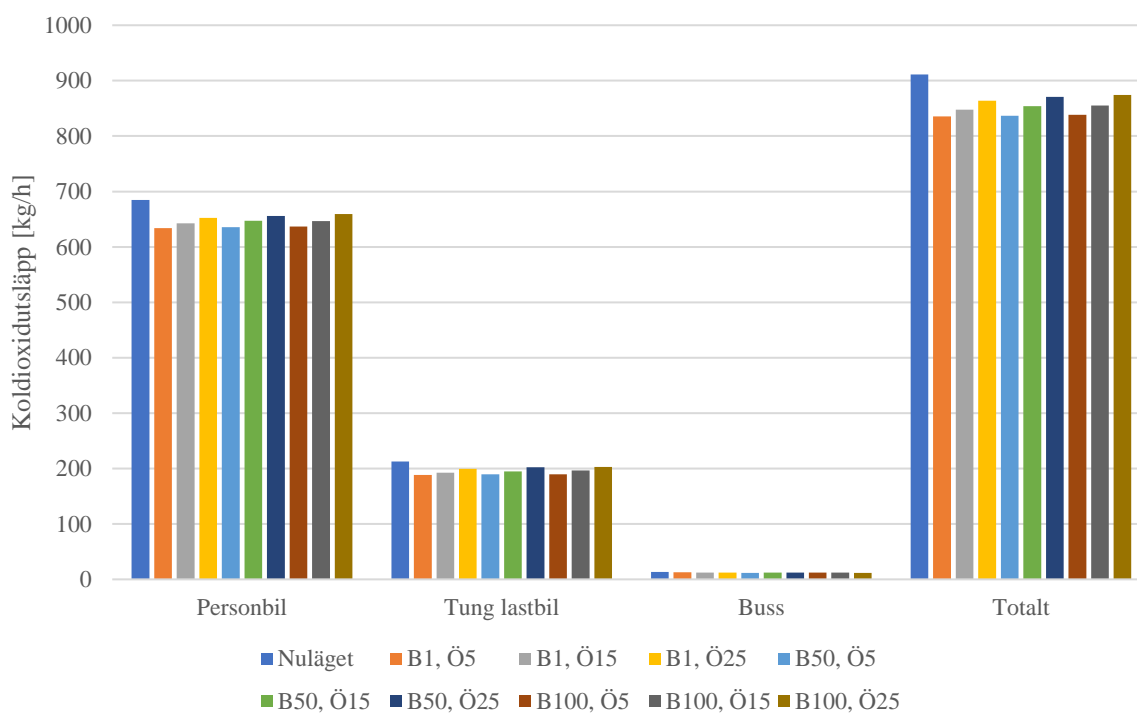
	Personbil	Tung lastbil	Buss	Totalt
Nuläget	684,6	212,9	13,5	910,9
B1, Ö5	634	188,5	12,9	835,4
B1, Ö15	642,6	192,4	12,5	847,6
B1, Ö25	652,3	199,5	12,3	864
B50, Ö5	635,4	189,5	11,8	836,7
B50, Ö15	646,9	194,6	12,3	853,8
B50, Ö25	655,9	202,5	12,1	870,6
B100, Ö5	637	189,6	12	838,5
B100, Ö15	646,5	196,6	12	855,1
B100, Ö25	659,1	203	11,9	874

Procentuella förändringar jämfört med nuläget presenteras i Tabell 23.

Tabell 23. Procentuell förändring av koldioxidutsläpp jämfört med nuläget för de olika fallen.

	Personbil	Tung lastbil	Buss	Totalt
Nuläget	0 % Referens	0 % Referens	0 % Referens	0 % Referens
B1, Ö5	-7 %	-11 %	-4 %	-8 %
B1, Ö15	-6 %	-10 %	-7 %	-7 %
B1, Ö25	-5 %	-6 %	-9 %	-5 %
B50, Ö5	-7 %	-11 %	-13 %	-8 %
B50, Ö15	-6 %	-9 %	-9 %	-6 %
B50, Ö25	-4 %	-5 %	-10 %	-4 %
B100, Ö5	-7 %	-11 %	-11 %	-8 %
B100, Ö15	-6 %	-8 %	-11 %	-6 %
B100, Ö25	-4 %	-5 %	-12 %	-4 %

En jämförelse av koldioxidutsläpp för de olika fallen presenteras i Figur 29.



Figur 29. Jämförelse av koldioxidutsläpp för de olika fallen.

Skillnaderna i koldioxidutsläpp är betydligt mindre för alternativen jämfört med för fördröjningstiden. En högre grad av buss- eller övergångsställesprioritering verkar resultera i större koldioxidutsläpp.

Kväveoxider

Kväveoxidutsläpp för de olika fallen presenteras i Tabell 24.

Tabell 24. Genomsnittliga kväveoxidutsläpp i gram per timme [g/h] i de olika fallen.

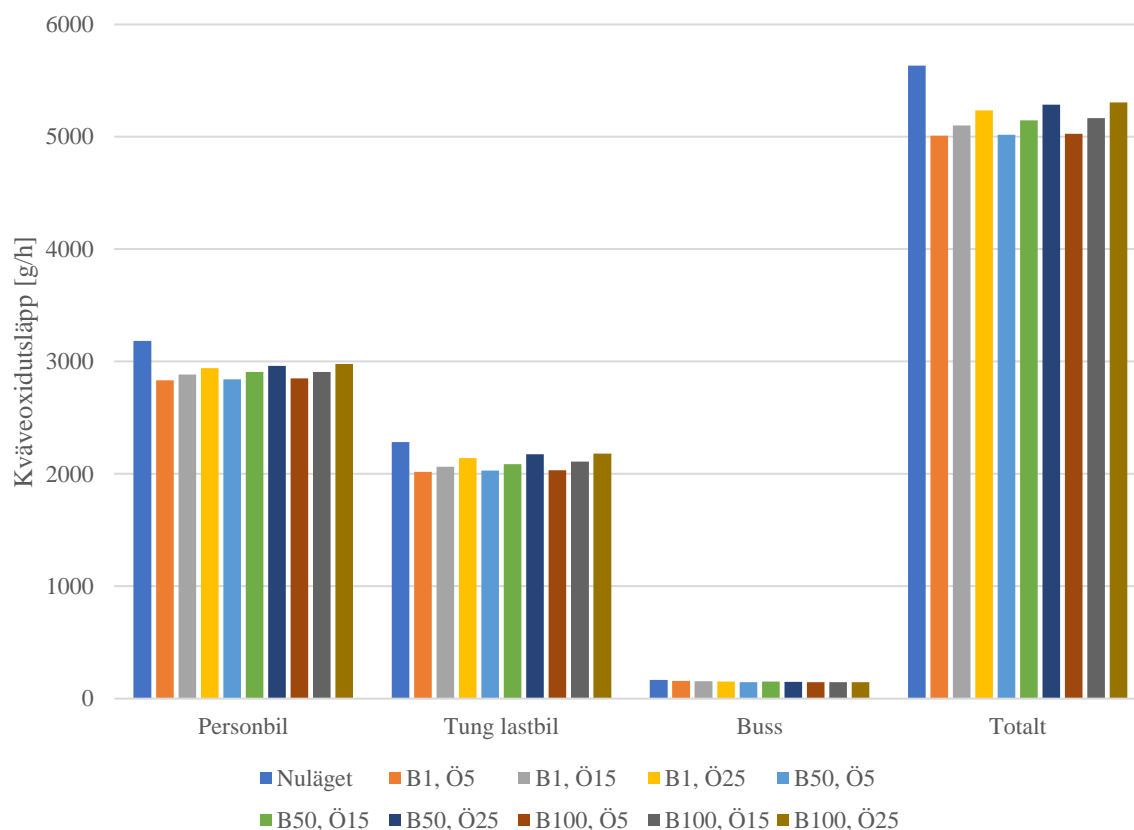
	Personbil	Tung lastbil	Buss	Totalt
Nuläget	3183	2283,9	165,7	5632,6
B1, Ö5	2832,9	2019,3	159,2	5011,3
B1, Ö15	2883,4	2062,6	154,5	5100,5
B1, Ö25	2941,1	2141,4	151,2	5233,8
B50, Ö5	2842,4	2029,1	145,6	5017,1
B50, Ö15	2908,5	2087,4	151,8	5147,7
B50, Ö25	2960,1	2175,3	149,5	5284,9
B100, Ö5	2850	2031,3	147,3	5028,4
B100, Ö15	2907,7	2110,1	147,4	5165,3
B100, Ö25	2979,2	2180,2	146,1	5305,5

Procentuella förändringar jämfört med nuläget presenteras i Tabell 25.

Tabell 25. Procentuell förändring av kväveoxidutsläpp jämfört med nuläget för de olika fallen.

	Personbil	Tung lastbil	Buss	Totalt
Nuläget	0% Referens	0% Referens	0% Referens	0% Referens
B1, Ö5	-11 %	-12 %	-4 %	-11 %
B1, Ö15	-9 %	-10 %	-7 %	-9 %
B1, Ö25	-8 %	-6 %	-9 %	-7 %
B50, Ö5	-11 %	-11 %	-12 %	-11 %
B50, Ö15	-9 %	-9 %	-8 %	-9 %
B50, Ö25	-7 %	-5 %	-10 %	-6 %
B100, Ö5	-10 %	-11 %	-11 %	-11 %
B100, Ö15	-9 %	-8 %	-11 %	-8 %
B100, Ö25	-6 %	-5 %	-12 %	-6 %

En jämförelse av kväveoxidutsläpp för de olika fallen presenteras i Figur 30.



Figur 30. Jämförelse av kväveoxidutsläpp för de olika fallen.

Kväveoxidutsläppen följer samma mönster som koldioxidutsläppen, förutom att de tunga lastbilarnas bidrag till de totala kväveoxidutsläppen är större jämfört med för koldioxidutsläppen.

PM10

Uppkomsten av PM10 för de olika fallen presenteras i Tabell 26.

Tabell 26. Genomsnittlig uppkomst av PM10 i gram per timme [g/h] i de olika fallen.

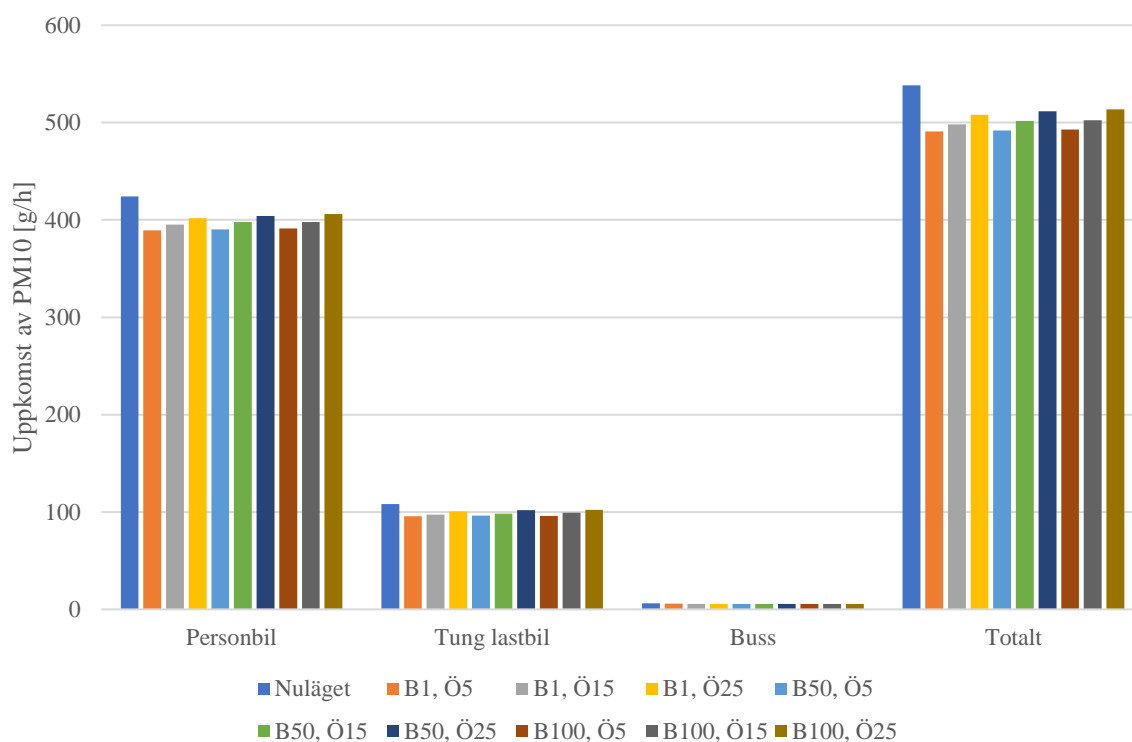
	Personbil	Tung lastbil	Buss	Totalt
Nuläget	424,1	108	6,1	538,2
B1, Ö5	389,3	95,6	5,9	490,8
B1, Ö15	395,2	97,4	5,7	498,3
B1, Ö25	401,7	100,6	5,5	507,9
B50, Ö5	390,2	96,3	5,4	491,9
B50, Ö15	397,9	98,4	5,6	501,9
B50, Ö25	404,1	102	5,5	511,5
B100, Ö5	391,3	96,1	5,4	492,9
B100, Ö15	397,8	99,2	5,4	502,4
B100, Ö25	406,2	102,2	5,4	513,7

Genomsnittlig förändring jämfört med nuläget presenteras i Tabell 27.

Tabell 27. Procentuell förändring i uppkomst av PM10 jämfört med nuläget för de olika fallen.

	Personbil	Tung lastbil	Buss	Totalt
Nuläget	0% Referens	0% Referens	0% Referens	0% Referens
B1, Ö5	-8 %	-11 %	-3 %	-9 %
B1, Ö15	-7 %	-10 %	-7 %	-7 %
B1, Ö25	-5 %	-7 %	-10 %	-6 %
B50, Ö5	-8 %	-11 %	-11 %	-9 %
B50, Ö15	-6 %	-9 %	-8 %	-7 %
B50, Ö25	-5 %	-6 %	-10 %	-5 %
B100, Ö5	-8 %	-11 %	-11 %	-8 %
B100, Ö15	-6 %	-8 %	-11 %	-7 %
B100, Ö25	-4 %	-5 %	-11 %	-5 %

En jämförelse av uppkomst av PM10 för de olika fallen presenteras i Figur 31.



Figur 31. Jämförelse av uppkomst av PM10 för de olika fallen.

Uppkomsten av PM10 följer ungefär samma mönster som för de andra utsläppen.

5 Diskussion

Resultaten från analysalternativen visar på halter av utsläpp och partiklar som ibland överskrider utsläppskraven för nytillverkade fordon (Naturvårdsverket, 2018c). Halterna baseras endast på trafik i direkt anslutning till en korsning, vilket innebär låga hastigheter och ett stort antal stopp jämfört med exempelvis en motor- eller landsväg, och kan ses som en förklaring till de höga halterna. Att halterna överstiger utsläppskraven för nytillverkade fordon kan också förklaras utifrån att majoriteten av fordonsparken tillverkades innan utsläppskraven infördes och därför faktiskt har utsläpp som överskrider de senare utsläppskraven.

Med tanke på att en personbil och en buss inte görs skillnad på i de tre *B1*-fallen, skulle det kunna upplevas märkligt att bussarnas fördröjning är större än personbilarnas i dessa fall. En förklaring till skillnaden är att busslinjen endast går längs Fåhlhagsleden, som har betydligt mindre trafikflöde än Tycho Hedéns väg och därmed har grönt ljus mindre andel av tiden. Mindre andel grönt ljus leder till större risk för att få vänta vid korsningen. Skillnaden kan också delvis förklaras med att fordonspåverkansmodeller skiljer sig mellan personbilar och bussar och både accelerationen och retardationen är mindre för bussar jämfört med personbilar, vilket betyder att ett stopp resulterar i en större fördröjning för bussar jämfört med personbilar.

Något annat som kan noteras är att fördröjningstiderna för bussar varierar även för fallen där bussprioriteringsvikten är densamma. Det är alltså inte endast bussprioriteringsvikten som påverkar bussfördröjningstider utan prioriteringsvikten för övriga trafikslag har också inflytande.

Den totala medelfördröjningstiden är i samtliga fall mycket lik fördröjningstiden för personbilar. Likheten beror på att flödet av personbilar är betydligt större än övriga flöden och att personbilarnas påverkan på totalen därför är proportionerligt större än övriga flödens påverkan. Flödet av trafik är i genomsnitt enligt datainsamlingen i avsnitt 3.1.2 som följer:

- 2 802 personbilar per timme
- 147 tunga lastbilar per timme
- 28 fotgängare per timme
- 128 cyklister per timme
- 12 bussar per timme (var tionde minut i vardera riktningen)

Flödet av personbilar är alltså ganska precis hundra gånger större än flödet av fotgängare. Att prioritera fotgängare på bekostnad av personbilar kommer med nödvändighet att påverka den totala medelfördröjningen negativt eftersom ett stort antal personbilar då får vänta på en eller få fotgängare.

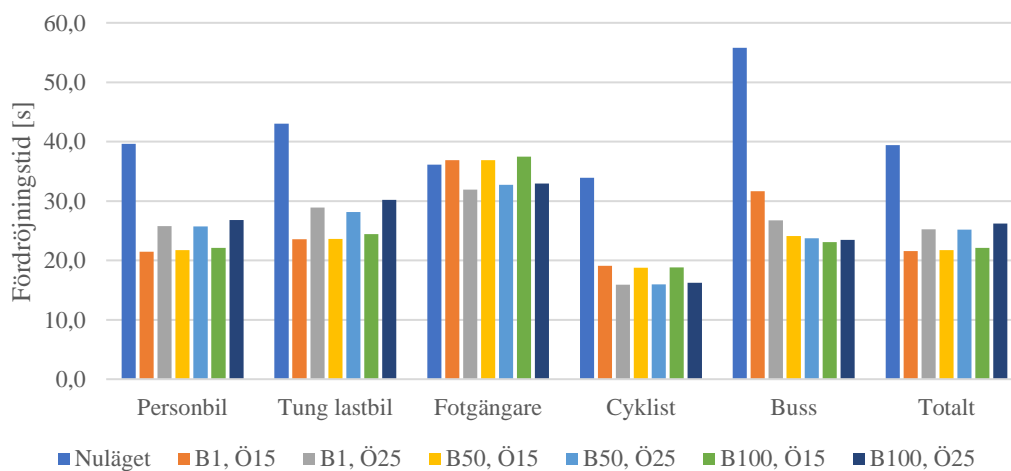
Om den totala fördröjningstiden avses minimeras är det effektivast att prioritera personbilar över andra trafikslag. När det gäller utsläpp står personbilar också för en stor andel av de totala utsläppen, inte minst när det gäller koldioxidutsläpp och uppkomst av PM10. Eftersom

fortgångare och cyklister över huvud taget inte bidrar till utsläpp skulle minimering av utsläpp åstadkommas effektivast genom att prioritera personbilar på bekostnad av fotgångare och cyklister.

Med anledning av den vid första ögonkastet effektiva strategin att endast gynna personbilar är det viktigt att sätta resultaten i ett sammanhang. Genom att gynna personbilar på bekostnad av bussar, fotgångare och cyklister kommer sannolikt färre trafikanter välja att gå, cykla eller ta buss och fler kommer att välja att ta bilen. En större andel personbilar kommer i sin tur resultera i mer utsläpp, i motsats till den tidigare diskussionen om att utsläppen kan minskas med prioritering av personbilar. Enligt samma argumentation kommer sannolikt några bilister långsiktigt att välja att åka buss, cykla eller gå i stället om dessa trafikslag prioriteras framför personbilar. Det verkar som att prioritering ger motsatta resultat beroende på tidshorisonten som undersöks.

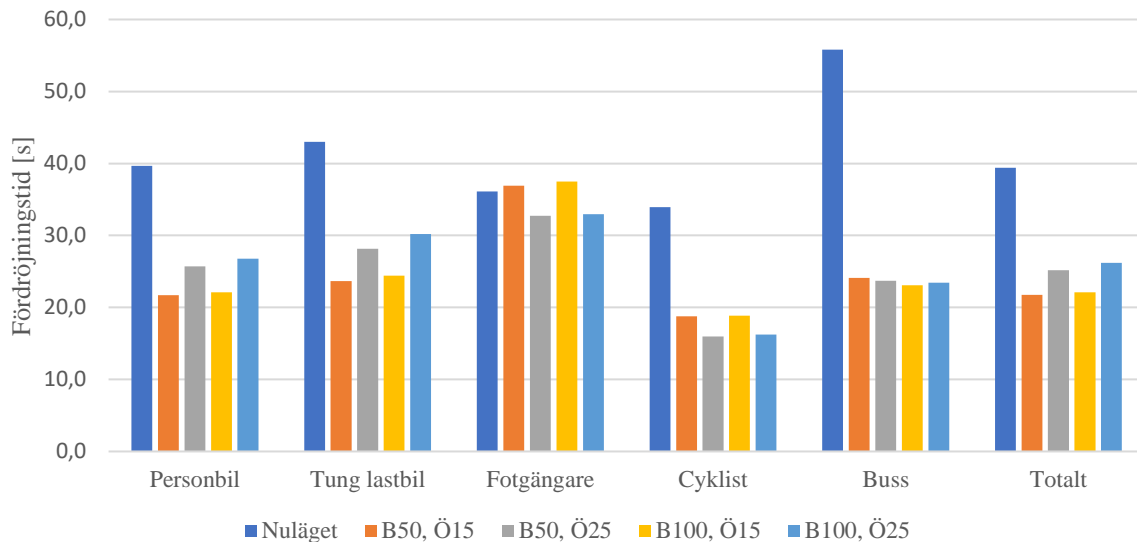
Om ökade fördröjningstider för personbilar resulterar i att fler personer väljer miljövänliga transporttyper skulle det kunna argumenteras för att med avsikt öka fördröjningstiderna för personbilar extra mycket. I verkligheten ses ökade fördröjningstider för personbilar dock aldrig som ett egenvärde, utan målsättningen är att gynna miljövänligare alternativ med en så liten negativ påverkan på övrig trafik som möjligt. Ökade fördröjningstider resulterar nämligen i mer tomgångskörning och ökad trängsel och andra liknande negativa följder.

I Uppsala kommun, i likhet med många andra kommuner, finns en målsättning att minska andelen biltrafik till förmån för kollektivtrafik, gång och cykeltrafik (Uppsala kommun, 2016). Med tanke på den målsättningen kan alla signalstyrningar som resulterar i en fördröjningsökning för bussar, fotgångare eller cykeltrafik jämfört med nuläget anses vara otänkbara. Alla alternativa signalstyrningar resulterade i en fördröjningsminskning för bussar och cyklister, medan fallen med den lägsta graden av prioritering av fotgångare och cyklister resulterar i en påtaglig fördröjningsökning för fotgångare. Övriga fall resulterar antingen i en fördröjningsminskning eller en ökning om maximalt fem procent för fotgångare. Se Figur 32.



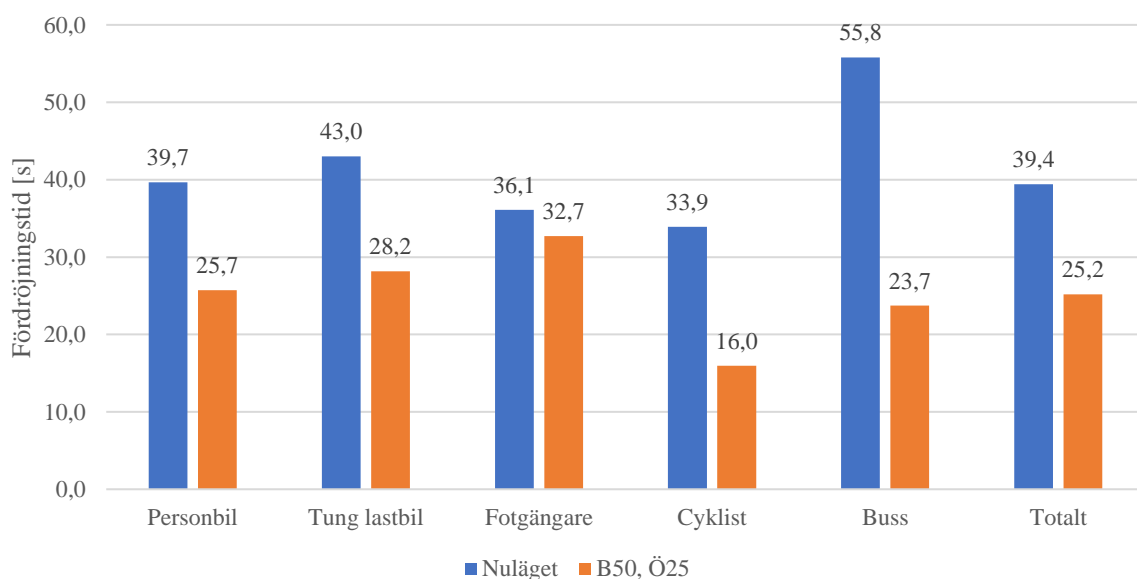
Figur 32. Fördröjningstider för de alternativ som antingen resulterar i en fördröjningsminskning eller maximalt en femprocentig ökning för fotgångare.

Av de fall som återstår i Figur 32 är det en bedömningsfråga vilket som är bäst. I fråga om bussfördröjningstider är *B100, Ö15* bäst. Fördröjningen för fotgängare är dock störst i det fallet. Fördröjningstiden för bussar är snarlik i samtliga fall med bussviktningen 50 och 100. Om övriga fall sorteras bort återstår alternativen enligt Figur 33.



Figur 33. Fördröjningstider för de alternativ från Figur 32 där bussviktningen är 50 eller 100.

Av dessa fyra fall är fördröjningstiden för fotgängare och cyklister lägst i *Ö25*-fallen, där fördröjningstiden för personbilar och tunga lastbilar dock är större än för övriga fall. Utifrån målet att gynna fotgängare och cyklister anses dock en fördröjningsminskning för fotgängare och cyklister väga tyngst. Av *Ö25*-fallen är fördröjningstiderna för personbilar, tunga lastbilar, fotgängare och cyklister lägst i fallet *B50, Ö25*, som därmed kan bedömas vara det bästa alternativet. Se Figur 34.



Figur 34. Fördröjningstider för nuläget och fallet *B50, Ö25* som kan anses vara det bästa alternativet.

I fallet *B50, Ö25* har fördröjningstiden för bussar och cyklister mer än halverats jämfört med nuläget, medan fördröjningstiden för personbilar och tunga lastbilar har minskat med över 30 procent. Fördröjningstiden för fotgängare har minskat med knappt 10 procent. Det är otvetydigt att fallet *B50, Ö25* är bättre än nuläget, eftersom samtliga trafiktider har fått minskade fördröjningstider.

I fråga om utsläpp är fallet *B1, Ö5* bäst och i allmänhet leder mindre prioritering av bussar, fotgängare och cyklar till mindre utsläpp utifrån den tidigare diskussionen att personbilar står för det överlägset största bidraget av utsläpp. Emissionsmodelleringen skulle med fördel kunna kompletteras med välgrundade prognoser av framtidens fordonsflotta, vilket dock inte ryms inom ramen för den här studien. Vad som ändå kan sägas är att samtliga fall resulterar i utsläppsminskningar med 4–11 procent jämfört med nuläget för alla typer av utsläpp. Om minskningen i fördröjningstider för bussar, fotgängare och cyklister skulle bidra till en minskning av personbilstrafik skulle genomslaget bli ännu större. Om exempelvis flödet av personbilar skulle minska med 25 procent med motsvarande ökning av fotgängare, cyklister och busspassagerare skulle utsläppsminskningen jämfört med nuläget i stället vara mellan 19 och 24 procent enligt Tabell 28.

Tabell 28. Utsläppsminskningar för fallet *B50, Ö25* jämfört med nuläget, antaget en 25-procentig minskning av personbilstrafik. De totala utsläppsminskningarna representerar minskningen sett till korsningen som helhet.

	Personbil	Tunga lastbilar	Buss	Totalt
Koldioxid	-28 %	-5 %	-10 %	-22 %
Kväveoxider	-30 %	-5 %	-10 %	-19 %
PM10	-29 %	-6 %	-10 %	-24 %

Hur olika trafikslag ska prioriteras beror bland annat på den aktuella korsningens läge, egenskaper och flöden. Tycho Hedéns väg är en form av ringled som ligger utanför Uppsalas stadskärna, vilket kanske innebär att en viss del av fordonstrafiken kör längre sträckor, som inte skulle kunna ersättas med gång eller cykel – och kanske inte heller kollektivtrafik – jämfört med trafiken i innerstaden. Eftersom alla korsningar är en del av ett större system skulle en fördröjningsökning för personbilar i studiekorsningen kunna resultera i att bilister väljer en väg genom stadskärnan i stället, vilket skulle resultera i ökad luftkvalitet och trängsel. En minskning av fördröjningstider för personbilar skulle å andra sidan kunna resultera i att bilister som i nuläget kör genom stadskärnan i stället väljer Tycho Hedéns väg, vilket skulle resultera i ökade utsläpp i studiekorsningen, men kanske ändå vara positivt ur ett systemperspektiv. Eftersom fördröjningstiden för alla transporttyper minskade i fallet *B50, Ö25* jämfört med nuläget, är det dock ingen risk att flödet av personbilar flyttas från studiekorsningen till stadskärnan som en följd av byte till PTV Epics.

Inbesparade kostnader

För att få en uppskattning om inbesparade kostnader till följd av bytet till adaptiv styrning i studiekorsningen görs här en översiktlig analys av med hjälp av schablonvärden från

rapporten *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn* som är framtagen av Trafikverket (2018a).

Inbesparad tid av normal åktid för regionala och lokala resor för 2014 års prisnivå och penningvärde värderas till 63 kr/h/person för personbilar och 35 kr/h/person för bussar.

Det finns även värderingar av reducerad fördröjning och värderingar av nationella och långväga resor som alla överstiger dessa värden och som förmodligen skulle kunna göra sig gällande i studiekorsningen. I avsaknad av nödvändiga data används dock de lägsta möjliga värderingarna så att en försiktig uppskattning erhålls. Värderingarna gäller icke-arbetsrelaterade resor eftersom arbetsrelaterade värderas högre enligt samma resonemang. Antalet personer per fordon är enligt Uppsala kommun i snitt 1,24 personer per personbil och 11 personer per buss. Baserat på antal fordon enligt avsnitt 3.1.2, antal personer per fordon samt inbesparad tid i korsningen i Tabell 20 för fallet *B50, Ö25* jämfört med nuläget, kan personflödet, den inbesparade tiden per timme och den totala inbesparade kostnaden per timme beräknas enligt Tabell 29.

Tabell 29. Beräkning av total inbesparad tid och total inbesparad kostnad i studiekorsningen. Variabeln h_f står för förseningstimme, s_f för förseningssekund och h för timme.

	Personbil	Buss
Antal fordon [fordon/h]	2808	12
Antal personer per fordon [personer/fordon]	1,24	11
Antal personer [personer/h]	3481,92	132
Inbesparad tid [s_f/person]	14	32,1
Total inbesparad tid [h_f/h]	13,54	1,18
Värdering av inbesparad tid [kr/h_f]	63	35
Total inbesparad kostnad [kr/h]	853,07	41,20

Trafikverket (2018a) rekommenderar att kostnaden för koldioxidutsläpp för 2014 års prisnivå och penningvärde värderas till 1,14 kr/kg. Vad gäller kväveoxidutsläpp och uppkomst av partiklar i tätortsmiljö, vilket gäller för studiekorsningen, rekommenderas att regionala och lokala kostnader summeras. De regionala kostnaderna för 2014 års prisnivå och penningvärde är 86 kr/kg för kväveoxidutsläpp och 0 kr/kg för uppkomst av PM10. PM10 antas alltså inte ha någon regional kostnad. De lokala kostnaderna är 20 kr/kg för kväveoxidutsläpp och 5 884 kr/kg för uppkomst av PM10 i Uppsala (Trafikverket, 2018a). Summan för kostnaderna blir 106 kr/kg för kväveoxidutsläpp och 5 884 kr/kg för uppkomst av PM10.

Baserat på de insparade koldioxidutsläppen i Tabell 22, kväveoxidutsläppen i Tabell 24 och uppkomsten av PM10 i Tabell 26 – alla för fallet *B50, Ö25* jämfört med nuläget – kan den totala inbesparade kostanden beräknas enligt Tabell 30.

Tabell 30. Inbesparade kostnader för koldioxidutsläpp, kväveoxidutsläpp och uppkomst av PM10 samt den totala inbesparade kostnaden för studiekorsningen.

Inbesparade koldioxidutsläpp [kg/h]	40,3
Värdering av inbesparade koldioxidutsläpp [kr/kg]	1,14
Inbesparad kostnad för koldioxidutsläpp [kr/h]	45,942
Inbesparade kväveoxidutsläpp [kg/h]	0,3477
Värdering av inbesparade kväveoxidutsläpp [kr/kg]	106
Inbesparad kostnad för kväveoxidutsläpp [kr/h]	36,8562
Inbesparad uppkomst av PM10 [kg/h]	0,0267
Värdering av inbesparad uppkomst av PM10 [kr/kg]	5884
Inbesparad kostnad för PM10 [kr/h]	157,1028
Total inbesparad kostnad [kr/h]	239,90

Den totala inbesparade kostnaden, alltså summan av inbesparingen för reducerad fördröjningstid för personbilar och bussar samt minskningen av utsläpp, är $853,07 + 41,20 + 239,90 = 1\,133$ kr/h.

Eftersom trafikflödena i studien gäller för morgonrusningstrafik är medelflödena för ett dygn lägre. Å andra sidan ger ett lägre trafikflöde större möjligheter för effektivare optimeringar och fördröjningstiderna skulle därför sannolikt kunna minskas ytterligare jämfört med nuläget när flöden är lägre, vilket i sin tur också skulle minska utsläppen ytterligare jämfört med nuläget. I beräkningarna har inte de inbesparade kostnaderna för reducerad fördröjningstid för tunga lastbilar, fotgängare och cyklister beaktats. Flertalet ytterligare inbesparade kostnader, exempelvis kostnad för trängsel, förseningar, trafiksäkerhet och buller, har inte heller beaktats. Därför kan den summerade inbesparingen på 1 133 kr/h sannolikt anses vara en låg uppskattning. Om inbesparingen antas gälla för 12 av dygnets timmar blir inbesparingen 13 598 kr/dag och 4 963 285 kr/år bara för studiekorsningen. Även om beräkningen är en grov uppskattning som innefattar stor osäkerhet ges en uppfattning om inbesparingens storleksordning.

Manualen för PTV Epics (PTV AG, 2017) användes i den här studien för att placera ut sammanlagt totalt 40 detektorer på fördelaktiga avstånd från stopplinjerna enligt Tabell 14. Nulägets detektorer enligt Figur 27 skulle troligtvis i viss mån kunna användas, vilket skulle reducera kostnaden för implementation men med risken att optimeringarna blir sämre. Installation av detektorer kan med fördel ske när asfalten ändå behöver läggas om för att därmed undvika höga kostnader för detektorläggningen.

Av tidsskäl görs ingen utförlig uppskattning av kostnaderna till följd av byte till det adaptiva signalstyrningssystemet PTV Epics. Däremot presenteras de kostnader som antas ingå i listform, vilket kan ses som ett underlag för egen beräkning av den samhällsekonomiska nettovinsten. De kostnader som ingår är enligt följande:

- Mjukvaran för PTV Epics. Enligt uppgift från PTV AG knappt € 2 000 för en korsning.
- Underhållningskostnad för PTV Epics. Enligt uppgift från PTV AG knappt € 200 per år.
- Trafikdetektorer. Uppsala kommun har tidigare använt kameror för trafikdetektion. En infraröd kamera av det dyrare slaget som används i nuläget kostar enligt uppgift av Uppsala kommun 34 250 kr/st och kan detektera fordon över flera körfält.
- Detektormottagare. Enligt uppgift från Uppsala kommuns detektorleverantör Swarco kostar en mottagare 6 750 kr/st och kan hantera upp till 4 st kameror.
- Detektortekniker. Enligt uppgift från Uppsala kommuns ramavtal med Swarco 648 kr/h.
- Schaktning. Enligt uppgift från Uppsala kommun 2 000 kr/meter för hårdgjorda ytor och 1 000 kr/meter för mjuka ytor.

Koppling till hållbar utveckling

Resultatet visar att införandet av adaptiv signalstyrning skulle minska utsläppen av koldioxid, kväveoxider och PM10 i anslutning till korsningen och därmed positivt bidra till ekologisk hållbarhet. Enligt diskussionen om en potentiell minskning av personbilstrafik i och med fördröjningsminskningar för fotgängare, cyklister och bussar skulle den adaptiva styrningen långsiktigt kunna bidra ytterligare till ekologisk hållbarhet.

Byte av signalstyrningssystem till PTV Epics är förknippade med kostnader i form av själva mjukvaran och exempelvis de omplaceringar av detektorer som skulle krävas. Att byta signalstyrningssystem kan i stor grad ses som en optimering av befintlig infrastruktur, eftersom ingen ombyggnation skulle krävas utöver detektorplaceringar. Enligt Trafikverkets fyrstegsprincip är därför bytet av signalstyrningssystem en prioriterad åtgärd som sannolikt är mer kostnadseffektiv än den ombyggnation eller nybyggnation av vägnätet som skulle krävas för att erhålla liknande fördröjnings- och utsläppsminskningar (Trafikverket, 2018b). Se även den tidigare diskussionen kring den samhällsekonomiska analysen.

Enligt Trafikverket (2010) är 80 procent av bilresorna i svenska tätorter kortare än 4 km, vilket är de resor som har störst potential att ersättas med kollektivtrafik, cykel eller gång. Denna potential behöver tas vara på genom att göra det effektivt att ta sig fram med buss, cykel och till fots. Bytet till adaptiv signalstyrning har i den här studien visat sig kunna reducera fördröjningstider för alla de miljövänliga transporttyperna markant. Om fördröjningsminskningarna visar sig ha effekten av en viss andel bilister långsiktigt i stället väljer att ta buss, cykla eller gå skulle det ha positiva effekter för både miljön och för hälsan. Trängsel och buller skulle också minska. Dessa effekter bidrar positivt till social hållbarhet.

Kritisk granskning av studien

En avgränsning som gjordes var att modellen av nuläget från Uppsala kommun antogs avspegla verkligheten tillräckligt väl. Därför lades ingen vikt vid att kontrollera eller validera modellen för nuläget. Kalibreringen som genomfördes av Uppsala kommun tyder på god

överensstämmelse med den uppsättning trafikmätningar som finns. Om dagen när trafikmätningarna genomfördes inte representerar genomsnittliga trafikflöden väl betyder det att modellen inte heller representerar den genomsnittliga verkligheten väl. Detta är en brist som inte går att kringgå i trafiksimuleringar som endast baseras på en uppsättning trafikmätningar. I verkligheten genomförs sällan validering av ekonomiska skäl och enligt Bång et al. (2014) är resultaten från en trafiksimulering användbara trots att modellen inte har validerats, men det kräver en diskussion kring felkällor och att extra slutsatser görs med extra försiktighet. Vidare är kameramätningar i sig en potentiell felkälla, där kvaliteten av mätningarna beror på kamerorna som används och den mjukvara som används för att exempelvis särskilja en cyklist från en fotgängare.

I den här studien har en korsning isolerats från ett större vägnät. En avgränsning som gjordes var att inte beakta hur trafiken utanför den isolerade korsningen påverkas av bytet av signalstyrning. Fördröjningsminskningarna i studiekorsningen skulle potentiellt kunna visa sig jämnas ut med lika stora fördröjningsökningar i närliggande korsningar till följd av bytet av signalstyrning. Om signalstyrningen i flera korsningar i ett vägnät skulle bytas till PTV Epics kan styrningen byggas ut med en programvara som kallas för PTV Balance (PTV AG, 2017). PTV Balance har till uppgift att ur ett makroperspektiv koordinera den lokala optimeringen i flera närliggande korsningar så att optimal styrning säkerställs för vägnätet som helhet.

De nio alternativa fallen bidrar till kontroll av modellen i form av en känslighetsanalys. Resultaten från de nio fallen kan anses vara rimliga eftersom fördröjningstiden för bussar exempelvis reduceras när bussar prioriteras mera. Att justeringarna som gjordes i de olika fallen resulterar i effekter som verkar logiska ger skäl att tro att modellens uppbyggnad är korrekt utförd.

För att fullt ut behärska de programvaror som användes i studien och förstå hur alla inställningar påverkar resultatet krävs många års erfarenhet. PTV Epics har en uppsjö av möjligheter till finjustering av parametrar som på olika sätt kan förbättra resultaten. Flera av dessa parametrar har inte justerats i den här studien, vilket tyder på att det eventuellt finns ytterligare potential för bättre resultat. På samma sätt kan det dock finnas potential till förbättring av nuläget med befintlig teknik.

Generaliserbarhet

I den här studien har effekter av byte till oberoende adaptiv styrning studerats genom en fallstudie för korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden i Uppsala. De resultat som har presenterats gäller specifikt för studiekorsningen, men korsningar med liknande storlek och trafikflöden skulle sannolikt ge resultat i samma storleksordning. Uppsala kommun hjälpte till med att undersöka vilka andra korsningar i Uppsala som uppfyller dessa kriterier:

- Signalstyrningen är oberoende.
- Trafikflöden är i samma nivå som studiekorsningen.
- Korsningen har separerade svängkörvägar.

Uppsala kommun kom fram till att det finns fyra korsningar som är direkt likvärdiga studiekorsningen och fem korsningar som har lite mindre trafikflöden men är likvärdiga i övrigt. Det finns alltså sammanlagt nio korsningar i Uppsala som skulle kunna studeras med metodologin i den här studien och som sannolikt skulle ge liknande resultat.

Uppsala är Sveriges fjärde största tätort med 160 462 invånare (SCB, 2019). Om korsningar motsvarande studiekorsningen antas potentiellt återfinnas i tätorter i Sverige som är minst hälften så stora och maximalt dubbelt så stora som Uppsala beträffande folkmängd resulterar det i tio andra städer (SCB, 2019). Resonemanget tyder på att metodologin i den här studien skulle kunna genomföras för många korsningar i Sverige som motsvarar studiekorsningen.

Både fördröjningstider och utsläpp har potential att reduceras vid införande av optimerande realtidsstyrning i korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden. Denna insikt, vid sidan av diskussionen om generaliserbarhet, besvarar den första frågeställningen. Utgående från jämförelsen mellan det bästa fallet Ö50, B25 och nuläget i Figur 34 är det uppenbart att det finns stora möjligheter att minska tidsfördröjningen för linjebussar. Fördröjningsminskningen kan också ske trots att alla andra fordonstyper också får reducerade fördröjningstider, vilket besvarar den andra frågeställningen.

Förslag till fortsatt arbete

Om flera fallstudier genomfördes med samma metodologi som i den här studien skulle generaliserbarheten och tyngden i resultaten av den här studien stärkas. Fortsatta studier skulle med fördel kunna innefatta fallstudier för korsningar som motsvarar studiekorsningen, enligt det tidigare resonemanget. Exempel på städer där likvärdiga korsningar sannolikt finns är Malmö, Västerås, Örebro, Linköping, Helsingborg och Jönköping (SCB, 2019).

Fortsatta studier skulle också kunna innefatta utvärdering av signalstyrningsoptimering på makronivå med PTV Balance eller motsvarande programvara för att undersöka hur fördröjningar och utsläpp kan minska i ett vägnät som helhet. Detta skulle exempelvis kunna genomföras för hela Tycho Hedéns väg i Figur 2. En annan aspekt som skulle vara intressant att gå vidare med är att göra en mer detaljerad samhällsekonomisk analys, eventuellt parallellt med en livscykelkostnadsanalys, för att få en tydlig bild av återbetalningstiden för det teknikbyte som den här studien avser.

6 Slutsatser

Resultaten visar att införandet av adaptiv signalstyrning i korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden i Uppsala har potential att minska fördröjningstider för alla fordonstyper med upp till 50 procent i genomsnitt jämfört med nuläget. Angående koldioxidutsläpp, kväveoxidutsläpp och uppkomst av PM10 finns reduktionspotential med upp till 8 procent, 11 procent respektive 9 procent. Om minskningen av fördröjningstider resulterar i att några bilister framöver väljer att ta buss, cykel eller att gå i stället bedöms införandet av adaptiv signalstyrning ha potential att minska utsläppen ytterligare.

Förutsatt att minskade fördröjningstider för bussar, cyklister och fotgängare prioriteras över minskade fördröjningstider för personbilar och tunga lastbilar verkar det lämpligast att vikta en buss som 50 personbilar och cyklister och fotgängare som 25 personbilar. Med dessa viktningar reduceras fördröjningstiden för bussar med 57 procent, för cyklister med 53 procent och för fotgängare med 9 procent. Även fördröjningstiden för personbilar och tunga lastbilar reduceras. De mest fördelaktiga prioriteringsgraderna resulterade i minskade utsläpp av koldioxid med 4 procent, kväveoxider med 6 procent och minskad uppkomst av PM10 med 5 procent. Minskning av fördröjningstider och utsläpp i studiekorsningen uppskattas resultera i inbesparade kostnader som uppgår till nästan fem miljoner kronor per år. Dessa slutsatser besvarar den första frågeställningen kring hur tidsfördröjningar och utsläpp påverkas vid införandet av optimerande realtidsstyrning. Den andra frågeställningen infattar vad det finns för möjlighet att minska tidsfördröjningen för linjebussar och hur det påverkar resten av trafiken. Resultaten visar att det finns potential att minska tidsfördröjningen för linjebussar med 57 procent jämfört med nuläget utan att fördröjningstiden för någon annan fordonstyp ökar.

Syftet med den här studien var att utvärdera effekter av att byta från fordonsstyrning till optimerande realtidsstyrning i en medelstor korsning. Resultaten för korsningen Tycho Hedéns väg–Fåhlhagsleden kan sammanfattas med att de potentiella effekterna är goda. Eftersom det finns många liknande korsningar både i Uppsala och i Sverige bedöms potentialen i intelligent trafiksignalstyrning generellt vara god.

Det rekommenderas att slutsatser dras utifrån storleksordningen av resultaten snarare än de exakta värdena eftersom trafikmodellen inte har validerats med en oberoende uppsättning trafikmätningar.

Referenser

- Aimsun. (u.d.). Move Brilliantly. Retrieved in March from <https://www.aimsun.com/>
- Al-Mudhaffar, A. (2006). *Impacts of traffic signal control strategies*. KTH, Retrieved from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:11539/FULLTEXT01.pdf>
- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of traffic simulation* (Vol. 145): Springer.
- Bång, K.-L., Olstam, J., Köhler, J., Wahlstedt, J., Andersson, J., & Tapani, A. (2014). *Handbok för kapacitetsanalys med hjälp av simulering*. Retrieved from https://www.trafikverket.se/contentassets/18ab6d1957f04fa49039b11998c7c016/handbok_for_kapacitetsanalys_med_hjalp_av_simulering.pdf
- Casas, J., Perarnau, J., & Torday, A. (2011). The need to combine different traffic modelling levels for effectively tackling large-scale projects adding a hybrid meso/micro approach. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 251-262. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187704281101411X>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.031>
- Courage, K. G., Fambro, D. B., Akcelik, R., Lin, P. S., Anwar, M., & Vilorio, F. (1996). *Capacity analysis of traffic-actuated intersections*. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/476630>
- Daly, H. E. (2006). Sustainable development—definitions, principles, policies. In *The future of sustainability* (pp. 39-53): Springer.
- Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). *Traffic analysis toolbox volume III: guidelines for applying traffic microsimulation modeling software*. Retrieved from https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol3/vol3_guidelines.pdf
- Eijk, A., Ligterink, N., & Inanc, S. (2014). *EnViVer 4.0 Pro and Enterprise Manual*. Retrieved from
- FN. (1987). *Our common future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development*. Retrieved from <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>
- FN. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>
- FN. (2018). *2018 Revision of World Urbanization Prospects*. Retrieved from <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Greenblatt, J. B., & Shaheen, S. (2015). Automated Vehicles, On-Demand Mobility, and Environmental Impacts. *Current sustainable/renewable energy reports*, 2(3), 74-81. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s40518-015-0038-5>. doi:10.1007/s40518-015-0038-5

Grumert, E. F. (2018). *Using Connected Vehicles in Variable Speed Limit Systems*. (Doctor), Linköping University, Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1196452&dswid=8941>

Gustafsson, M., Lindén, J., Tang, L., Forsberg, B., Orru, H., Sjöberg, K., & Åström, S. (2018). *Quantification of population exposure to NO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ and estimated health impacts in Sweden*. Retrieved from <https://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b76b7/1446478779885/B2197.pdf>

Gävle kommun. (2013). *Översiktsplan Gävle kommun år 2030*. Retrieved from http://old.gavle.se/PageFiles/255178/Antagandehandlingar/%C3%96P%20G%C3%A4vle%20kommun_bok_2018_WEB.pdf

Helbing, D., Hennecke, A., Shvetsov, V., & Treiber, M. (2002). Micro- and macro-simulation of freeway traffic. *Mathematical and Computer Modelling*, 35(5), 517-547. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089571770280019X>. doi:[https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(02\)80019-X](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(02)80019-X)

Hirschmann, K., Zallinger, M., Fellendorf, M., & Hausberger, S. (2010, 2010). *A new method to calculate emissions with simulated traffic conditions*.

IHS Automotive. (2014). Emerging technologies: Autonomous cars-not if, but when [Press release]. Retrieved from <https://news.ihsmarket.com/press-release/automotive/self-driving-cars-moving-industrys-drivers-seat>

Ivdal, M., & Molin, A. (2007). *Kvalitetskontroll av trafikmätningssystem—En studie om noggrannheten hos induktiv slinga, slang, KomFram, video och radar i olika trafikmiljöer*. (Master), Chalmers tekniska högskola, Retrieved from <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/64513.pdf>

Janhäll, S., & Carlson, A. (2017). *Möjligheter till minskade koldioxidutsläpp genom trafikledning: en förstudie*. Retrieved from <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:1077929/FULLTEXT01.pdf>

Joumard, R., Jost, P., Hickman, J., & Hassel, D. (1995). Hot passenger car emissions modelling as a function of instantaneous speed and acceleration. *Science of The Total Environment*, 169(1), 167-174. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004896979504645H>. doi:[https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04645-H](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04645-H)

Kim, I., Galiza, R., & Ferreira, L. (2013). Modeling pedestrian queuing using micro-simulation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 49, 232-240. Retrieved from <https://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.018>. doi:10.1016/j.tra.2013.01.018

Klein, L. A., Mills, M. K., Gibson, D., & Klein, L. A. (2006). *Traffic detector handbook: Volume II*. Retrieved from <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/936>

Lennakatten. (2019). Upsala-Lenna Jernväg 2019. Retrieved from https://www.lennakatten.se/images/images/tdt/Anslagstidtabell_2019_v2.pdf

- Li, M., & Wu, T. (2011). *Prediction and evaluation of traffic quality by static and dynamic simulation*.
- Ligterink, N. E., & Lange, R. d. (2009). Refined vehicle and driving-behaviour dependencies in the VERSIT+ emission model.
- Linköpings kommun. (2017). *Trafikplan för Linköpings innerstad*. Retrieved from <https://weblisher.textalk.se/linkoping/20170405-t/paper.pdf>
- Malmkvist, M. (2019). Naturgas och miljön. Retrieved from <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/naturgas/naturgas-och-miljoen/>
- Miller, A. J. (1963). A Computer-Controlled System for Traffic Networks.
- Moore, P. (2011). *Streamlining phase intergreen measurement for traffic signal junctions*. Retrieved from http://www.jctconsultancy.co.uk/Software/quickGreen/JCT_quickGreen_Article_TEC_July2011.pdf
- Naturvårdsverket. (2017a). *Luft & miljö*. Retrieved from <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-1303-5.pdf?pid=21462>
- Naturvårdsverket. (2017b). *Utsläpp av växthusgaser från inrikes transporter*. Retrieved from <http://naturvardsverket.se/Sta-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-transporter/>
- Naturvårdsverket. (2018a). Fakta om kväveoxider i luft. Retrieved from <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftforeoreningar/Kvaveoxider/>
- Naturvårdsverket. (2018b). Fakta om partiklar i luft. Retrieved from <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftforeoreningar/Partiklar/>
- Naturvårdsverket. (2018c). *Utsläpp av kväveoxider till luft från vägtransporter*. Retrieved from <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Kvaveoxider-utslapp-till-luft-fran-vagtransporter/>
- Nilsson, A. (2014). *Actions to Decrease Delay for Public Transport in Linköping*. (Master Student thesis), Linköpings universitet, Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-110900> DiVA database.
- Nilsson, J.-E., Pyddoke, R., & Swärdh, J.-E. (2012). *Fyrstegsprincipen i praktiken: tre underlagsrapporter för Riksrevisionens granskning av transportpolitiken*. Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A669290&dsid=-9906>
- Nilsson, M., & Karlsson, P. (2017). *Kartläggning av trafiktekniska mätningar och hur kommuner använder dem*. (Master), Lunds universitet, Retrieved from <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOid=8918020&fileOid=8918022>

- Peterson, A. (2007). *The origin-destination matrix estimation problem: analysis and computations*. Linköpings universitet, Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A23558&dswid=-5006>
- Peterson, A., Bergh, T., & Steen, K. (1986). *LHOVRA, a new traffic signal control strategy for isolated junctions*. Paper presented at the International Conference on Road Traffic Control.
- PTV AG. (2017). *PTV Epics user manual*. Retrieved from
- PTV AG. (2018). *PTV Vissim user manual*. In.
- PTV AG. (u.å.). *Emissions Modelling*. Retrieved from <http://vision-traffic.ptvgroup.com/nl/products/ptv-vissim/use-cases/emissions-modelling/>
- Quaassdorff, C., Kwak, K.-H., Borge, R., & Lee, S.-B. (2017). *Traffic emission simulation and validation with measured data in South Korea*.
- Ravikumar, P., & Mathew, T. V. (2011). Vehicle-actuated signal controller for heterogeneous traffic having limited lane discipline. *81*(5), 44. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/259533291_Vehicle-Actuated_Signal_Controller_For_Heterogeneous_Traffic_Having_Limited_Lane_Discipline.
- Regeringen. (2008). *Framtidens resor och transporter*. Retrieved from <https://data.riksdagen.se/fil/C20E249C-8F99-4CFC-8A7C-D51F55AC1D5B>
- Regeringen. (2018a). *Handlingsplan Agenda 2030*. Retrieved from <https://www.regeringen.se/49e20a/contentassets/60a67ba0ec8a4f27b04cc4098fa6f9fa/handlingsplan-agenda-2030.pdf>
- Regeringen. (2018b). *Vägen till självkörande fordon - introduktion*. Retrieved from https://www.regeringen.se/49381d/contentassets/0fc1ef6f51794961b20c0c9a965164f6/sou-2018_16_dell_webb.pdf
- Region Uppsala. (2017). *Statistisk årsbok 2016*. Retrieved from <http://www.lul.se/Global/UL/Dokument/Statistisk%20%20C3%A5rsbok%20UL%202016.pdf>
- SCB. (2019). *Tätorter*. Retrieved from <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/tatorter/>
- Smit, R., Smokers, R., & Rabé, E. (2007). A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *12*(6), 414-422. Retrieved from <https://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2007.05.001>. doi:10.1016/j.trd.2007.05.001
- Smith, J., & Blewitt, R. (2010). *Traffic modelling guidelines*. 3.
- Sveriges Radio. (2013). *Företräde till bussar sparar pengar*. Retrieved from <https://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=160&artikel=5404217>

SVT. (2019). UL missar trafikmål – men satsar hårt på riksväg 55. Retrieved from <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/uppsala/ul-missar-trafikmal-men-satsar-hart-pa-riksvag-55>

Torstensson, Å. (2007). Vägmarkesförordning. In: Näringsdepartementet.

Trafikanalys. (2015). *Lokal och regional kollektivtrafik 2014*. Retrieved from <https://www.trafa.se/globalassets/statistik/kollektivtrafik/kollektivtrafik/2009-2015/2014/lokal-och-regional-kollektivtrafik-2014.pdf>

Trafikanalys. (2016). *Statistik över fordonsflottans utveckling – delredovisning av regeringsuppdrag*. Retrieved from <https://www.trafa.se/globalassets/rapporter/2016/rapport-2016-13-statistik-over-fordonsflottans-utveckling---delredovisning-av-regeringsuppdrag.pdf>

Trafikanalys. (2019a). *Fordon 2018*. Retrieved from <https://www.trafa.se/vagtrafik/fordon/>

Trafikanalys. (2019b). *Fordon i län och kommuner 2018*. Retrieved from <https://www.trafa.se/vagtrafik/fordon/>

Trafiksäkerhetsverket. (1989). Trafiksäkerhetsverkets föreskrifter om trafiksignaler, flerfärgssignaler; allmänna föreskrifter.

Trafikverket. (2004). *Vägar och gator utformning–Trafiksignaler*. Retrieved from <https://www.trafikverket.se/contentassets/3cc1b03a7ab7491988d46796c2c5ddf2/trafiksignaler/trafiksignaler.pdf>

Trafikverket. (2010). *Hållbart resande*. Retrieved from https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10551/RelatedFiles/100098_hallbart_resande.pdf

Trafikverket. (2012). *Bussprioritering i trafiksignaler*. Retrieved from https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11116/RelatedFiles/2012_234_bussprioritering_i_trafiksignaler_planering_inforande_och_drift.pdf

Trafikverket. (2014). *Resor till och från skolan*. Retrieved from <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/planera-person--och-godstransporter/Planera-persontransporter/Hallbart-resande/Resor-till-och-fran-skolan/>

Trafikverket. (2015a). *Krav för vägars och gators utformning*. Retrieved from https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/12046/RelatedFiles/2015_086_krav_for_vagars_och_gators_utformning.pdf

Trafikverket. (2015b). *Trafiksignaler*. Retrieved from <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/vag/Utformning-av-vagar-och-gator/vgu/aldre/pub/trafiksignaler/>

Trafikverket. (2018a). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1*. Retrieved from https://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/asek-6.1/asek_6_1_hela_rapporten_180412.pdf

Trafikverket. (2018b). *Fyrstegsprincipen*. Retrieved from <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/Planerings--och-analysmetoder/fyrstegsprincipen/>

Transportforskningskommissionen. (1982). *Signalhandboken: Utformning Och Drift Av Trafiksignalanläggningar*: Transportforskningskommissionen.

UL. (2018). Slavsta - Årsta södra - City - Kungsgärdet - Flogsta. Retrieved from https://www.ul.se/globalassets/tidtabeller/nya/Stadsbuss/181209_190616/Stadsbuss_Uppsala_6_181209_190616.pdf

UNECE. (2006). *Vienna Convention on Road Signs and Signals*. Retrieved from https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/Conv_road_signs_2006v_EN.pdf

Uppsala kommun. (2010). *Översiktsplan 2010 för Uppsala kommun*. Retrieved from https://www.uppsala.se/contentassets/886fdc4d05614bcba2fa6191580c725f/oversiktsplan_2010_200dpi.pdf

Uppsala kommun. (2014). *Handlingsplan för kollektivtrafik i Uppsala stad 2015-2030*. Retrieved from <https://www.uppsala.se/contentassets/83590085d8824b068b450b1fb428e420/handlingsplan-for-kollektivtrafik-i-uppsala-stad-31-mars-2014.pdf>

Uppsala kommun. (2016). *Översiktsplan 2016 för Uppsala kommun*. Retrieved from <https://www.uppsala.se/contentassets/7d682210066f491ba5236651b03f253e/op-2016-del-a-huvudhandling.pdf>

van Hout, T. (2017). Smart Traffic.

Webster, F. V., & Cobbe, B. M. (1966). Traffic Signals. *Road Research Technical Paper*(56). Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140136808930975>.

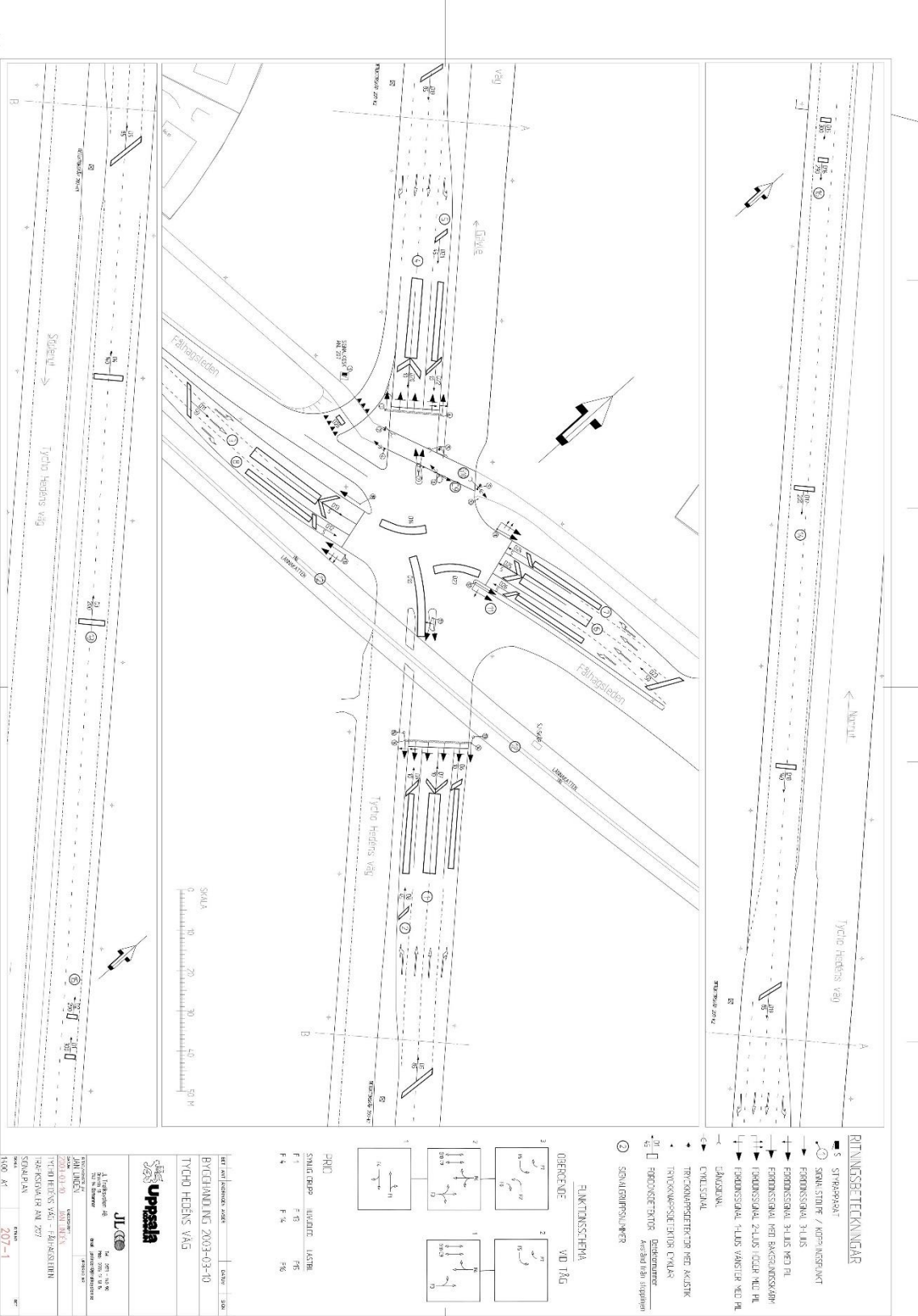
WHO. (2018). *The top 10 causes of death*. Retrieved from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>

Vincent, R. A., & Peirce, J. R. (1988). 'MOVA': *Traffic Responsive, Self-optimising Signal Control for Isolated Intersections* (0266-5247). Retrieved from <https://trl.co.uk/reports/RR170>

Världsnaturfonden. (2018). *Mänsklig påverkan*. Retrieved from <https://www.wwf.se/klimat/mansklig-paverkan/>

Åkerström, E. (2004). *Korsningen Industrigatan-Östgötagatan i Linköping: analys och åtgärder*. (Master), Linköpings universitet, Retrieved from <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:19813/FULLTEXT01.pdf>

Bilaga A Bygghandling för Tycho Hedéns väg– Fålhagsleden



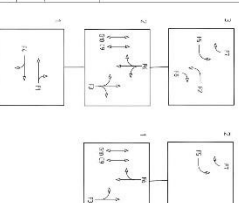
RÄKNINGSBETECKNINGAR

- 5 STRÄSKAPAT
- SPRÅLSTRIKE / KÖRPLANSMARK
- FORNINGSBÄL
- FORNINGSBÄL MED RÄ
- FORNINGSBÄL MED BÄCKENRÄSKÄM
- FORNINGSBÄL 2-PÅS OCH RÄ
- FORNINGSBÄL 3-PÅS VÄNSTER VED RÄ
- CHALKSVAL
- TÄRSKÄRPERTEKTION MED ÅKERIK
- TÄRSKÄRPERTEKTION CYKLAR
- FORNINGSBÄL 2-PÅS
- ÅKERIK
- SKALLRÄNSLÅN

ELANLÖSNINGSPLAN
VÄD TRÅG

ÖVERGÅNG

1 2 3



PROF

SNITT OCH PROF

INRIKTNING

F 1 F 5 F 6 F 7 F 8 F 9

F 4 F 9

UPPSALA


JLCC

Bygghandling 2003-03-10

Tycho Hedéns Väg

Proj. nr. 207-1

Bilaga B Tidmatrix

	Titel/Kapitelrubrik Säkerhetstidsberäkningar / Beräkningar					Kapitelbokstav/Sidor 2 (8)	
	Projektnamn Uppdatering av säkerhetstider pga nya hastigheter, Anl 207					Projekt nummer	
	Uppdatering av säkerhetstider Anl 207		Kombrerad av Magnus Lind		Granskad av Igor Zarev	Datum 2019-03-29	

Från	Utrymmande	RG	Rödgrul
Typ	Typ av signal	Vf	Framryckande hastighet (m/s)
Dim	Dimensionerande fordon typ	Sf	Framryckningssträcka (m)
GB	Grönblink	R	Rödtd
G	Tot, Gultid	S	Säkerhetstid
T	Passagetid	Sp	Spärrtid
Vu	Utrymmande hastighet (m/s)	Int	Intergreen/Mellantid
Su	Utrymningssträcka (ekklusive fordonlängd) (m)	F	Fordon
FI	Fordonslängd	B40	Buss 40 (km/t)
Till	Framryckande	C	Cykel
Typ	Typ av signal	G/GB	Fotgängare

För fotgängarna ingår inte gröblink i spärrtiden och inte rödgult i säkerhetstiden +0,5

	Från	Typ	Dim	GB	G	Vu	Su	FI	Till	Typ	RG	Vf	Sf	R	S	Sp	Int
1	1	F	F	0	4	12	55	6	3	F	1,5	10	12	2,4	3,9	6,9	7,9
2	1	F	F	0	4	12	46	6	5	F	1,5	14	12	2,0	3,5	6,5	7,5
3	1	F	F	0	0,1	12	52	6	6	F	1,5	10	12	2,1	3,6	2,7	3,7
4	1	F	F	0	4	12	64	6	7	F	1,5	10	12	3,1	4,6	7,6	8,6
5	1	F	F	0	4	12	69	6	9	C	1,5	5	5	3,8	5,3	8,3	9,3
6	1	F	F	0	4	12	69	6	10	G	0	2	2	5,3	5,3	9,8	9,3
7	2	F	F	0	4	12	54	6	3	F	1,5	10	12	2,3	3,8	6,8	7,8
8	2	F	F	0	4	12	60	6	4	F	1,5	14	15	2,9	4,4	7,4	8,4
9	2	F	F	0	4	12	65	6	6	F	1,5	10	12	3,2	4,7	7,7	8,7
10	3	F	F	0	4	8	32	6	1	F	1,5	14	15	2,2	3,7	6,7	7,7
11	3	F	C	0	3	5	20	2	1	F	1,5	14	12	2,0	3,5	5,5	6,5
12	3	F	C	0	3	5	20	2	2	F	1,5	14	12	2,0	3,5	5,5	6,5
13	3	F	F	0	4	8	16	6	4	F	1,5	14	15	0,2	1,7	4,7	5,7
14	3	F	F	0	4	8	36	6	5	F	1,5	14	12	2,9	4,4	7,4	8,4
15	3	F	F	0	4	8	32	6	7	F	1,5	10	12	2,1	3,6	6,6	7,6
16	4	F	F	0	4	12	31	6	2	F	1,5	14	12	0,7	2,2	5,2	6,2
17	4	F	F	0	4	12	45	6	3	F	1,5	10	12	1,6	3,1	6,1	7,1
18	4	F	F	0	4	12	25	6	6	F	1,5	10	12	0,1	1,6	4,6	5,6
19	4	F	F	0	4	12	45	6	8	F	1,5	10	12	1,6	3,1	6,1	7,1
20	4	F	F	0	4	12	13	6	9	C	1,5	5	5	0,1	1,6	4,6	5,6
21	4	F	F	0	4	12	13	6	10	G	0	2	2	0,6	0,6	5,1	4,6
22	5	F	F	0	4	12	47	6	1	F	1,5	14	15	1,8	3,3	6,3	7,3
23	5	F	F	0	4	12	50	6	3	F	1,5	10	12	2,0	3,5	6,5	7,5
24	5	F	F	0	4	12	40	6	6	F	1,5	10	12	1,1	2,6	5,6	6,6
25	5	F	F	0	4	12	15	6	9	C	1,5	5	5	0,1	1,6	4,6	5,6
26	5	F	F	0	4	12	15	6	10	G	0	2	2	0,8	0,8	5,3	4,8
27	6	F	F	0	4	8	11	6	1	F	1,5	14	15	0,1	1,6	4,6	5,6
28	6	F	F	0	4	8	17	6	2	F	1,5	14	12	0,5	2,0	5,0	6,0
29	6	F	F	0	4	8	28	6	4	F	1,5	14	15	1,7	3,2	6,2	7,2
30	6	F	F	0	4	8	22	6	5	F	1,5	14	12	1,1	2,6	5,6	6,6
31	6	F	F	0	4	8	30	6	8	F	1,5	10	12	1,8	3,3	6,3	7,3
32	7	F	F	0	4	8	15	6	1	F	1,5	14	15	0,1	1,6	4,6	5,6
33	7	F	F	0	4	8	15	6	3	F	1,5	10	12	0,1	1,6	4,6	5,6
34	7	F	F	0	4	8	23	6	9	C	1,5	5	5	1,1	2,6	5,6	6,6
35	7	F	F	0	4	8	23	6	10	G	0	2	2	2,6	2,6	7,1	6,6
36	8	F	F	0	4	8	17	6	4	F	1,5	14	15	0,3	1,8	4,8	5,8
37	8	F	F	0	4	8	22	6	6	F	1,5	10	12	0,8	2,3	5,3	6,3
38	9	C	C	0	3	5	24	2	1	F	1,5	14	15	2,6	4,1	6,1	7,1
39	9	C	C	0	3	5	24	2	4	F	1,5	14	15	2,6	4,1	6,1	7,1
40	9	C	C	0	3	5	24	2	5	F	1,5	14	12	2,8	4,3	6,3	7,3
41	9	C	C	0	3	5	24	2	7	F	1,5	10	12	2,5	4,0	6,0	7,0
42	10	G	G	5	0	2	9	0	1	F	1,5	14	15	1,9	3,4	7,4	8,4
43	10	G	G	5	0	2	13	0	4	F	1,5	14	15	3,9	5,4	9,4	10,4
44	10	G	G	5	0	2	13	0	5	F	1,5	14	12	4,1	5,6	9,6	10,6
45	10	G	G	5	0	2	9	0	7	F	1,5	10	12	1,8	3,3	7,3	8,3
46	12	T															
47	13	F															
48	14	F															
49	15	F															
50	16	F															

Bilaga D Detektorfunktioner

1 (4)

DETEKTORFUNKTIONER

Uppsala kommun

Tycho Hedéns väg - Fålhagsleden

Anl: 207

Datum: 2002-09-18

Rev datum: 2015-12-01

GRP	DETEKTOR		ANMÅLER			FÖRLÅNGER				Från tids-reduk	Vid fel		ANMÄRKNING
	Närv. det	DL - Grupp	Grupp	KMG + VMG+MMG	Grupp	Status	Ater-uppt	Ej Ater-uppt	Ater-anm.		Till	Från	
F1/ F13/ F15	D1	1-15	15									X	LB=Längd > 60 km/h
	D2	2-15	15									X	LB=Längd
		30-15	15	8	15	M	6,0					X	LB-prio
	D3	3-13	13	5	13	M		5,0				X	H-Funktion
		28-1	-	-	1	M		5,0				X	
	D4	4-1	1	4	1	M		4,0				X	
						F	4,0			4,0		X	
	D5	5-1	1	4	1	MG	3,5				X		
						F	3,0			2,0			
	D6	6-1	1	4	1	M	0,1				X		
					G	1,0		1,0					
D7	7-1	1	4	1	M	0,1				X			
					G	1,0		1,0					
F2	D8	8-2	2	6	2	MG	3,0				X		
						F	2,5		1,0				
	D9	9-2	2	6	2	MG	2,5		1,0		X		
						F	2,5						
D10	10-2	-	-	2	M	1,0					X		
					R	0,5							
F3/ F8	D11	11-3	3	4	3	M	3,5					X	
						F	3,0		2,0				
	D12	12-8	8	4	8	MF	0,5		1,0		X		
						G	1,0						
		29-3	-	-	3	MF	0,5		1,0			X	
						G	1,0						
D13	13-3	3	4	3	MF	0,1		1,0		X			
D14	14-3	-	-	3	R	0,1							U-funktion
F4/ F14/ F16	D15	15-16	16								X	LB=Längd > 60 km/h	
	D16	16-16	16								X	LB=Längd	
		30-16	16	8	15	M	6,0				X	LB-prio	
	D17	17-14	14	5	14	M		5,0			X	H-Funktion	
		31-4	-	-	4	M		5,0			X		
F4	D18	18-4	4	4	4	M		4,0			X		
						F	4,0		4,0		X		

DETEKTORFUNKTIONER

Uppsala kommun

Tycho Hedéns väg - Fålhagsleden

Anl: 207

Datum: 2002-09-18

Rev datum: 2015-12-01

GRP	DETEKTOR		ANMÄLER		FÖRLÄNGER					Från tids- reduk	Vid fel		ANMÄRKNING
	Närv. det	DL Grupp	Grupp	KMG + VMG+MMG	Grupp	Status	Åter- uppt	Ej Åter- uppt	Åter- anm.		Tjll.	Från	
	D19	19-4	4	4	4	MG	3,5				X		
						F	3,0			2,0			
	D20	20-4	4	4	4	M	0,1				X		
						G	1,0		1,0				
F5	D21	21-5	5	4	5	MG	3,0				X		
						F	2,5			1,0			
	D22	22-5	5	4	5	M	0,1		1,0		X		
						G	1,0						
F6/ F7	D23	23-6	6	4	6	M	3,5					X	
						F	3,0			2,0			
		32-7	-	-	7	M	3,5					X	
	D24	24-7	7	4	7	MF	0,5		1,0		X		
						G	1						
		33-6	-	-	6	MF	0,5		1,0			X	
					G	1,0							
	D25	25-6	6	4	6	M	0,1		1,0		X		
	D26	26-6	6	4	6	M	0,1		1,0		X		
	D27	27-6	-	-	6	R	0,1					X	U-funktion
D28												Räknedetektor	
D29												Räknedetektor	
C9	T9	-9	9	6									
G10	T10	-10	9,10	16									
		-9	-	-	9	M	0,1						Anmäler och förl. C9
F12	Ing ?	-12	Prio	4	Prio	MF							Anmäler Tågprio