

Projektet Smart trafikstyrning

Dynamisk
kapacitetsanpassning
Redovisning av resultat

2020-04-28

Handläggare
Lars Johansson

Dynamisk kapacitetsanpassning

Innehåll

Dynamisk kapacitetsanpassning	1
1 Sammanfattning	2
2 Inledning	3
3 Koncept och systemlösning	3
4 Trafik- och miljödata	9
5 Algoritmer	10
6 Hårdvara och installation	17
7 Utvärdering Trafikstyrning	19
8 Simulering av fullskalig implementering.....	23
9 Miljöstyrning.....	26
10 Appendix 1 Kalmanfilter	29
11 Appendix 2 Beräkning av NO ₂ -halter på Sankt Eriksgatan vid ”Smart trafikstyrning” (DynKap).....	31

1 Sammanfattning

Denna rapport beskriver delprojektet Dynamisk kapacitetsanpassning (DynKap) inom projektet Smart trafikstyrning. Projektet är en del av programmet Smart och uppkopplad stad, ett projekt inom området trafikstyrning med ett antal ekonomiska, sociala och ekologiska effektmål. Bland annat ska projektet uppnå:

- Ökad kostnadseffektivitet när analyser kan göras med realtidsdata
- Ökad kostnadseffektivitet när sensorer kan används till flera behov
- Nya tekniska lösningar och nya arbetssätt leder till förbättrad kostnadseffektivitet
- Ökad innovationsgrad när trafikdata delas till stadens gemensamma plattform och till en öppen plattform där nya tjänster kan utvecklas
- Förbättrad framkomlighet för alla trafikanter
- Förbättrad miljö och ökade möjligheter att möta kravet på förbättrad luftkvalitet
- Möjlighet att snabbt styra om trafiken, till exempel vid en krissituation

För att uppnå ovan nämnda effektmål ska projektet bland annat genomföra pilotinföranden av nya lösningar för trafikstyrning. Inom delprojektet Dynamisk kapacitetsanpassning utvecklas en modell för att styra inflödet av trafik till innerstaden efter aktuellt och predikterat trafikflöde, samt utifrån aktuella utsläppsnivåer i området.

Idag styrs tidplanebytena av fasta scheman utan möjlighet att anpassas efter oväntade variationer i trafikflödet. Dessa scheman programmeras om mycket sällan, och när så görs bygger de på tidigare uppmätta trafikflöden. Det nya systemet utgår från innovativa angreppssätt där nya datakällor används för att påverka trafikstyrningen i Stockholms stads befintliga anläggningar och öka framkomligheten för främst busstrafiken men även att placera bilköerna där de gör som minst skada.

I nuvarande tidplanescheman tas ingen hänsyn till utsläppsnivåer men med DynKap öppnas för en innovativ miljöstyrning i realtid. Förutom att placera köer på platser där de gör minst skada är det även möjligt att t.ex. begränsa och styra trafiken de dagar då luftkvalitetsnormerna överskrids på grund av meteorologiska förhållanden.

Det är även möjligt att komplettera dynamisk trafikstyrning med trafikantinformation och på det sättet kan även trafikefterfrågan påverkas till förmån för andra transportslag som kollektivtrafik eller cykel samt även göra restider mer tillförlitliga.

Konceptet har installerats och testats i en trafiksignalanläggning som styr delar av trafikflödet in till Sankt Eriksgatan på Kungsholmen. I simuleringsmiljö studeras även effekterna av en storskalig implementering.

Effekterna är relativt små sett till hela trafiksituationen och de miljöproblem som biltrafiken orsakar men i relation till kostnaden är åtgärderna som prövas i DynKap-projektet mycket effektiva. Den typiska nettonuvärdeskvoten (NNK) ligger över 10, vilket är ovanligt för investeringar i infrastruktur.

2 Inledning

I denna rapport presenteras resultaten från delprojektet Dynamisk kapacitetsanpassning (DynKap) inom projektet Smart trafikstyrning. Inom delprojektet utvecklas en modell för att styra inflödet av trafik till innerstaden efter aktuellt och predikterat trafikflöde, samt utifrån aktuella utsläppsnivåer i området. Den metod som utvecklas och testas öppnar med andra ord upp för mer innovativ miljöstyrning i realtid.

Rapporten är disponerad på följande sätt; inledningsvis presenteras koncept och den systemlösning som har satts upp samt den målarkitektur som tagits fram. Inom delprojektet för att övergå till den trafikdata som har använts. Det efterföljs av två relativt tekniska kapitel då algoritmerna, hårdvara och installation presenteras. I kapitel 6 presenteras utvärderingen som genomfördes, följt av ett kapitel som presenterar resultaten från simulering av fullskalig implementation. I det sista kapitlet presenteras resultaten från miljöstyrning.

3 Koncept och systemlösning

Idag är styrningen av signalanläggningen statisk med tidplaner som byter efter programmerade scheman, utan att någon aktiv styrning görs. För att begränsa trafikflödet in mot stadens centrala delar används traditionellt en fast begränsning av gröntiden i de trafiksignaler som finns på de större infarterna mot innerstaden, till exempel Drottningholmsvägen.

Denna fasta begräsning genom trafiksignaler kompletteras även med fysiska begräsningar av antalet inkommande körfält, se figuren nedan.

Syftet med kapacitetsbegränsningen är att på ett tillfredställande sätt hantera trafiken nedströms regleringspunkterna för att undvika omfattande köbildning på platser där köerna kan orsaka stora störningar. Målsättningen är att placera bilköerna där de har som minst påverkan på vägnätet som helhet. Det kan tyckas defensivt men när andra åtgärder som trängselskatt och begränsningar av parkeringsmöjligheter inte minskar biltrafiken i önskad omfattning, är detta en av de få lösningarna som kvarstår.

Begreppet kallas ”gating” på engelska och används i flera större städer runt om i världen. Det innebär att begränsa biltrafiken i vissa noder i vägnätet genom att medvetet minska kapaciteten i signalreglerade korsningar. Användningen av dynamisk ”gating” är dock ovanligt.



Bild 1 Begräsningar av kapaciteten görs oftast med en kombination av fysiska åtgärder, till exempel färre körfält, och en fast begränsande gröntid i trafiksignalen.

Den nya funktionaliteten som utvecklas inom ramen för smart och uppkopplad stad innebär att tidplanerna i signalanläggningen styrs mer aktivt. Styrningen baseras på predikterad köupbyggnad och aktuella utsläppsnivåer. Köerna på både inkommande länkar och

gator nedströms trafiksignalerna regleras så att en optimal trafiksituation givet förutsättningarna kan skapas i realtid.

De gatulänkar som skyddas från stillastående köer är normalt avsnitt med mycket kollektivtrafik som i vissa delar tar sig fram i blandtrafik, men även gator där luftkvaliteten riskerar att överskrida de normer som staden satt upp.

Det är också viktigt att kontrollera de väglänkar där köerna placeras så att dessa inte orsakar andra problem i vägnätet, till exempel att köerna blir så långa att ”kösvansen” når stadsmotorvägen som Essingeleden eller Södra länken.

Systemets uppbyggnad bygger på att DynKap-modellen får indata från olika källor, sedan nyttjas en algoritm för trafikstyrning i realtid. Beslutet kommuniceras ut till styrsåpet som styr den aktuella trafiksignalen. Under projektet ligger modellen på en server utanför Stadens it-miljö och kommunicerar med styrsåpet genom ett 4G-modem.

Modellen och funktionen byggs så att den vid ett breddinförande kan följa principerna i Stockholms stads Smart stad strategi, så som att dra nytta av stadens övergripande IoT-arkitektur och gemensamma system.

Tidigt i arbetet togs beslutet att använda restidsdata istället för sensorer. I försök att ta fram en DynKap-liknande modell i andra länder har sensorer som mäter inflödet till en stad använts för att utifrån detta räkna på köuppbyggnad och trängsel. Stockholms trafikkontor har tagit del av resultaten av dessa utvecklingsprojekt och gjort bedömningen att denna typ av flödesmätningar inte ger ett tillräckligt bra underlag att bygga modellen på. Projektet valde därför att låta modellen göra sina beräkningar utifrån restider, istället för utifrån flödesdata.

Olika leverantörer har olika källor för restidsdata, därför kan kvaliteten i data skilja mellan leverantörer. I tidigare mätningar har Googles restidsdata bedömts som tillförlitlig, varför data har köpts från Google för detta projekt. I en utvidgning av konceptet till en hel stadsdel bör även restidsdata från andra leverantörer övervägas.

Varken styrsåpen eller trafikkontorets styr- och övervakningssystem är anpassade för att programmeras och styra utifrån den komplexitet som DynKap-modellen innebär, varför modellen har utvecklats och driftsatt på en annan plats än övrig trafikstyrning.

Under projektiden ligger modellen som tidigare nämnts på en server hos de konsultbolag som deltar i utvecklingen av modellen. Modellen byggs däremot för att kunna implementeras på servrar i stadens gemensamma it-miljö samt för att kunna skalas upp vid ett breddinförande.

Lösningen bygger på APIer från Google och Stockholms stads miljöförvaltning och är byggd för att möjliggöra utbyte och delning av data via gemensamma plattformar när så blir aktuellt.

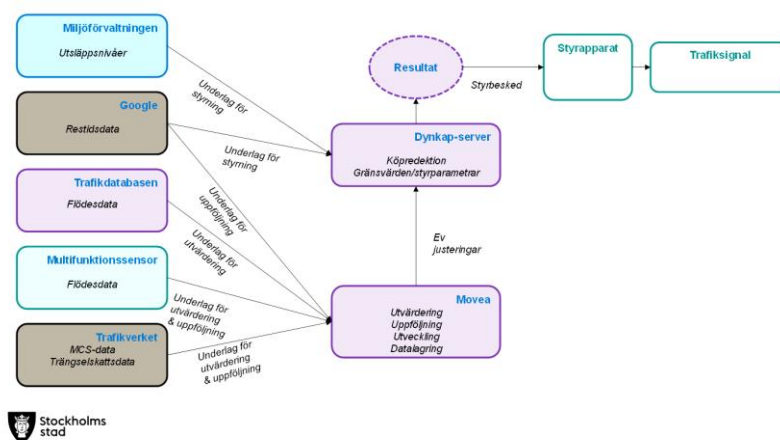
Själva grundfunktionen som utvecklats är en modell/algoritm som gör predikteringen av hur köerna kommer utvecklas inom det aktuella området. Predikteringen baseras på restidsdata på minutnivå från ett antal länkar, både från Sankt Eriksgatan och från de inkommande länkarna.

Utsläppsnivåerna ligger som en extra parameter i modellen och ger utslag när de uppnår en förutbestämd nivå. Modellen skickar styrbesked till signalanläggningens styrskåp när tidplanen ska slå om.

En mer aktiv och dynamisk styrning medför andra potentiella användningsfall, exempelvis skulle prognoser om höga utsläppsnivåer nästkommande dag kunna medföra ett mer återhållsamt genomflöde av trafik i signalanläggningen, vilket i sin tur skulle kunna kommuniceras ut i förväg.

Predikteringen av kö är en ny typ av information som skapas inom projektet. Denna information användas till att styra trafiksignalerna och för att justera DynKap-modellen. Köutvecklingen på Sankt Eriksgatan och vid den aktuella trafiksignalen följs upp på ett mer strukturerat och återkommande sätt än vad som görs idag. Denna information används även för uppföljning och utvärdering.

Prognoser om utsläppsnivåer inhämtas från miljöförvaltningens mätstation på Sankt Eriksgatan.

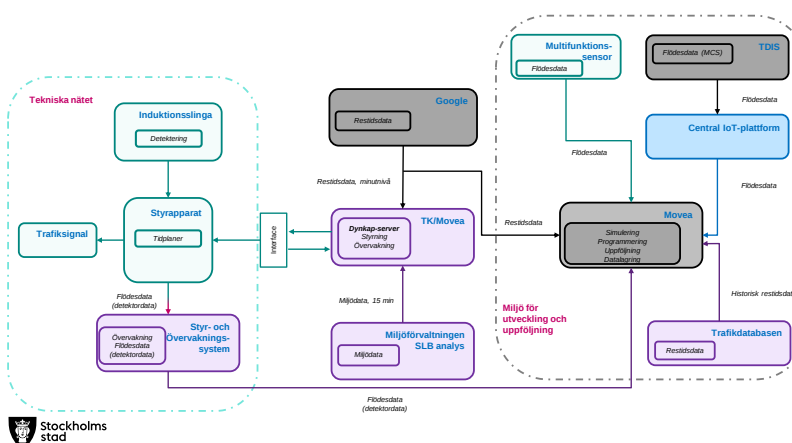


Figur 1 Principskiss för informationsflödet under försöksverksamheten

DynKap-systemet är programmerat i C#(sharp)-kod, som är ett objektorienterat programmeringsspråk där objekt skapas för att utföra beräkningar och hantera data. Där sker själva förfrågningarna för inhämtning av data från Google.

Till detta kopplas en databas som är av typen PostgreSQL som är i huvudsak en Open-source SQL-baserad databas men som också kan hantera JSON-objekt. Detta utgör datalagringen i systemet. Här sparas allt data som behövs för styrstrategin.

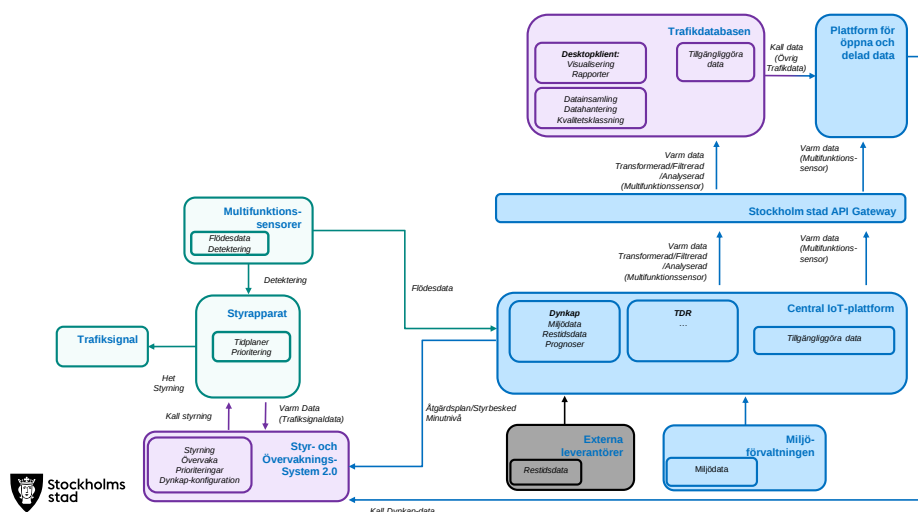
DynKap-servern kommunicerar med trafikkontorets styrschåp genom ett gränssnitt bestående av ett 4G-modem kopplat till styrapparatens I/O-kort. DynKap-servern påverkar grönstidsfördelningen i befintliga tidplaner, själva tidplanerna styrs inte och förändras inte under projektiden.



Figur 2 Vissa delar av systemlösningen under försöksverksamheten har sitt syfte att underlätta utvärderingen

Lösningsskissen i figur 2 visar hela lösningen och använder samma begrepp, färger och formspråk som Smart stads målararkitektur: Edge (grön), Gemensamma plattformar i staden (blå) och Verksamhets-system (lila). Bilden visar hur lösningen fungerar under projekt-tiden:

- Till vänster visas hur lösningen ser ut i gatumiljön, den enda förändringen här jämfört med hur en trafiksignalstyrd korsning vanligtvis ser ut är interfacet mellan DynKap-servern och styrskåpet. Induktionsslingorna kommer fortsatt att detektera trafik, men påverkar inte den styrning som kommer från DynKap-servern.
- I mitten av bilden visas hur miljön kring DynKap-servern ser ut. Servern konsumerar restidsdata från Google samt miljödata från miljöförvaltningen. Båda indatakällorna bygger på APIer.
- Till höger visas hur utveckling och uppföljningsmiljön för DynKap-modellen ser ut.
- Googles restidsdata som används för styrning lagras även i en databas i uppföljningssyfte.
- Flödesdata från en detektionsslinga på Sankt Eriksgatan används i uppföljningssyfte.
- Projektet använder även mätdata från Trafikverkets MCS-stationer (Motorway Control System) på kringlederna runt staden.
- Projektet ser även ett värde i att använda flödesdata från Trafikkontorets MCS-stationer för utvärdering. Detta bygger dock på att den centrala IoT-plattformen är i drift och kan dela denna data.



Figur 3 Målararkitekturen för DynKap

Projektet har tagit fram en målarkitektur för hur det skulle kunna se ut när DynKap skalas upp i flera korsningar och när den gemensamma IoT plattformen finns på plats. Målarkitekturen utgår från principerna i strategin för Smart stad. I målarkitekturen är DynKap en av flera funktioner i den centrala IoT-plattformen. Det nya styr- och övervakningssystemet drar nytta av resultatet från DynKap-funktionen snarare än att ha funktionen inbyggd i systemet. All data som krävs för styrning och utveckling av DynKap samlas in av den centrala IoT-plattformen.

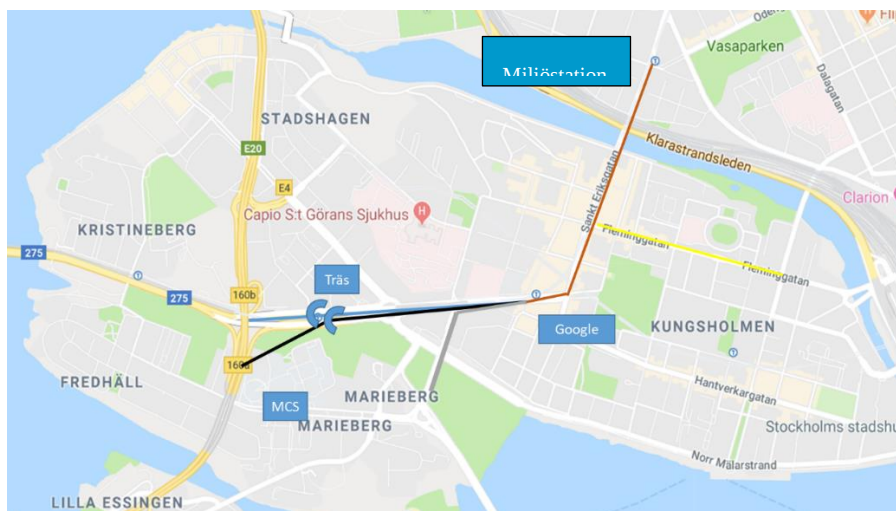
4 Trafik- och miljödata

Till skillnad från andra internationella ”gating”-koncept som enbart utnyttjar en större uppsättning räknande detektorer för att beräkna tillståndet i vägnätet (ofta genom s.k. MFD¹) bygger DynKap på en direkt registrering av försämringar i restider. Det finns nya tekniker för inmätning av restider som fått stor spridning de senaste åren. Vaghållarna i Stockholm har upphandlat olika leverantörer för att producera restider, både historiskt och i realtid. För testen på Kungsholmen har flera olika typer av indata diskuterats och under försöket samlas data in från flera datakällor:

1. MCS – Motorvägssystemet (både flöde och hastighet)
2. Detektorer – enbart flöde
3. Trängselskatteportaler
4. Google – enbart restidsdata
5. Kalibrerad Contram-modell för ”link select”
6. Miljömätningstation – NO_x och NO₂

För trafikstyrning användes i slutändan enbart restidsdata och övriga datakällor utnyttjas för kontroll och utvärdering.

¹ MFD = Macroscopic Fundamental Diagram



Figur 4 Datakällor som används i samband med försöksverksamheten

Restidsinformation i realtid hämtas via Google Directions API². Hanteringen har inbyggda kontroller av datamängd, fördröjningar etc. Antalet hämtningar under provet hamnade på 6000 per månad, vilket normalt kostar ca. 600 -700 kr, men totalt hamnade kostnaden inom den fria volymen per konto som motsvarar ca. 3000 kr.

Miljöstyrningen utnyttjar data från miljöförvaltningens mätstation på Sankt Eriksgatan. Via webb-scraping kan data hämtas var 15:e minut. Mätdata från andra delar av staden utnyttjas också i DynKap för att även mäta bakgrunds nivåerna. Det ger data för uppföljning och utvärdering.

5 Algoritmer

Den stora metodmässiga utmaningen i projektet har varit att utveckla en lämplig metod för prognoshantering och filterteknik. Prognosen används för att i god tid, helst 10–15 minuter i förväg, identifiera situationer som kan påverka köbildningen nedströms reglerpunkten.

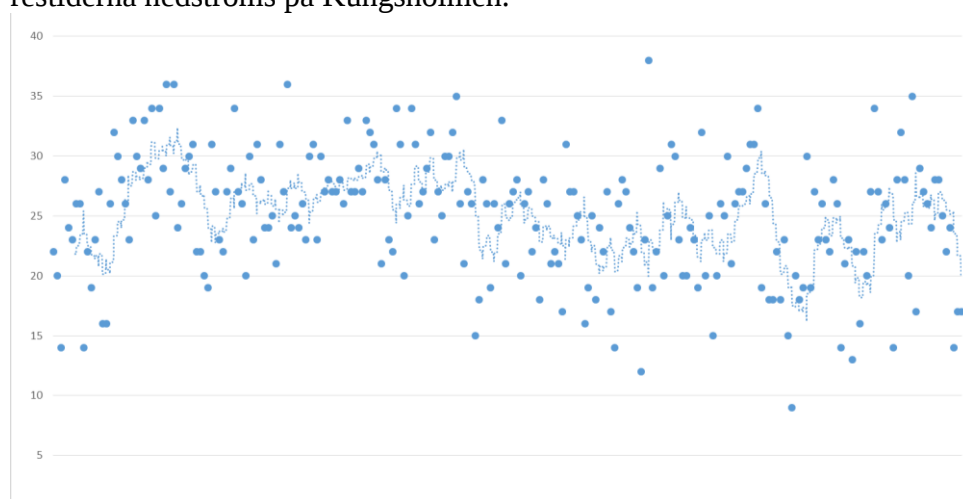
Inom detta forskningsområde som kallas JTP (Journey Time Prediction) har sedan 90-talet flera innovativa metoder tagits fram och omfattar avancerade beräkningsalgoritmer som till exempel Box Jenkins modellen och ANN-Artificial Neural Network. För linjära system benämns dessa metoder för Machine Learning eller AI-teknik. Tidigare utvärderingar har visat att Kalmanfilter är

² <https://cloud.google.com/maps-platform/routes/>

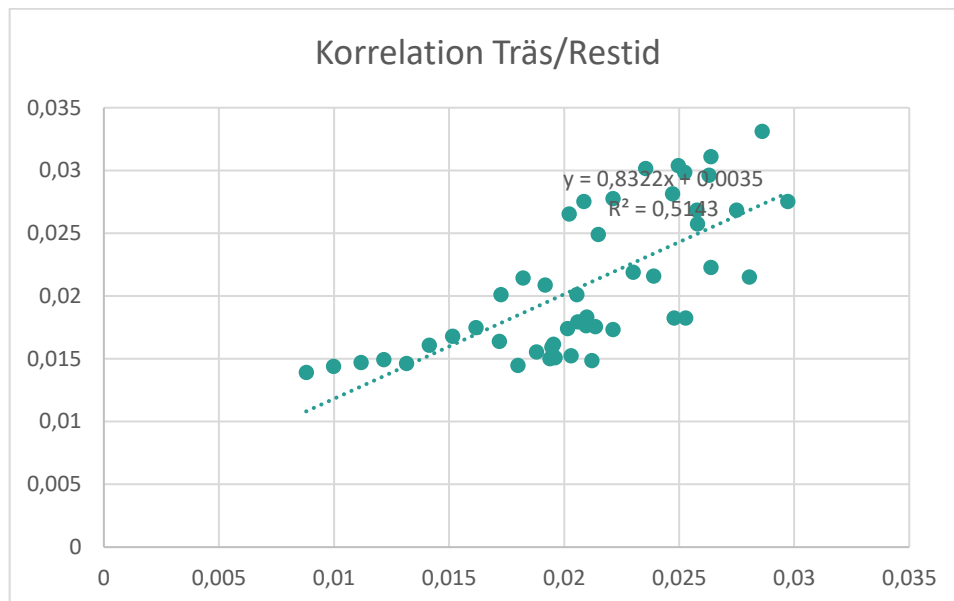
lämpligast för restidsestimat vid återkommande trängsel i tätortsmiljöer.

Utmaningen i filtertekniken är att ta fram lämpliga parametrar för DynKap-modellen. Genom att utnyttja historiska data kan prognosmetoden finkalibreras för den aktuella länken. I detta fall användes data från tio dagars insamling 2018 från teststräckan på Kungsholmen under hösten.

Den inledande datainsamlingen gjordes brett med trafikdata från samtliga mätsystem i området. Ganska snart stod det klart att korrelationen mellan MCS-data och tillståndet nedströms på innerstadsgatorna var svagt. I figur 5 nedan visas flödesdata på Essingeledens avfartsramp mot Kungsholmen under morgonrusningen. Nedströms avfarten ökar restiderna med upp till 500 % utan att flödet på avfartsrampen ökar. Motsvarande svaga korrelation erhålls mellan flödesdata från trängselskattaportalerna och restiderna nedströms på Kungsholmen.

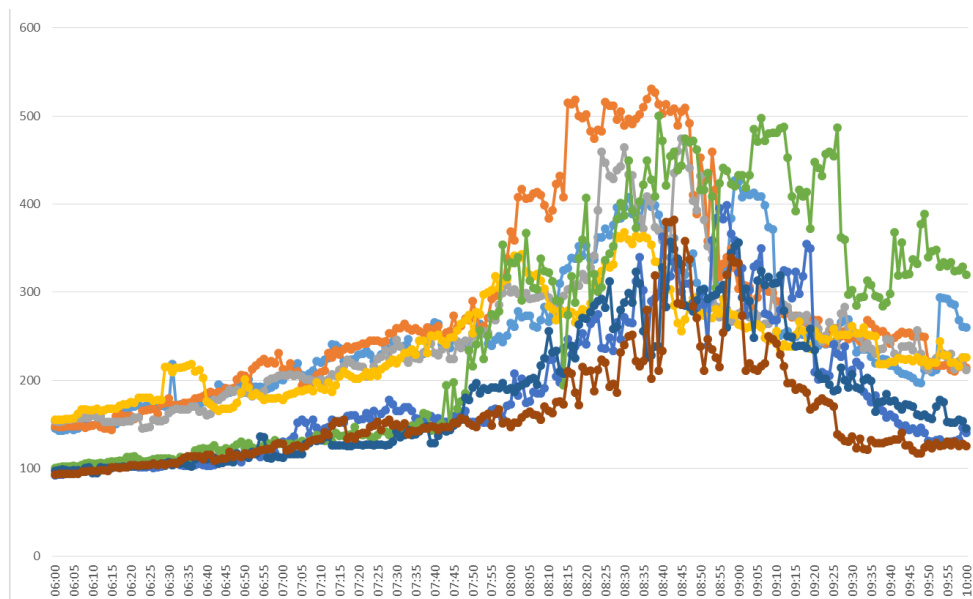


Figur 5 Kontroll av MCS-data motsvarande perioder visar svag variation

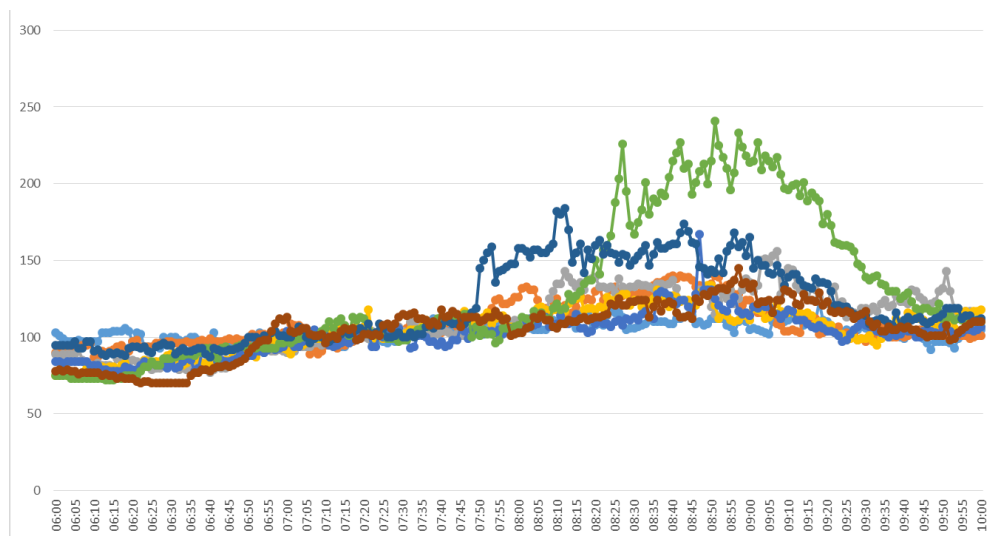


Figur 6 Även data från trängselskatteportalerna (Träs) och restider visar svag variation

Metodutveckling inriktades därför mot en direkt mätning av restidsdata på både inkommande länkar och de gator nedströms reglerpunkten som ska skyddas mot köbildning. Den ursprungliga fasta tidssättningen i reglerpunkten ger upphov till köbildning på Drottningholmsvägen. Med dynamisk anpassning kan risken öka för att köerna in mot Kungsholmen växer ytterligare och till sist även påverkar trafiken på till exempel Essingeleden.



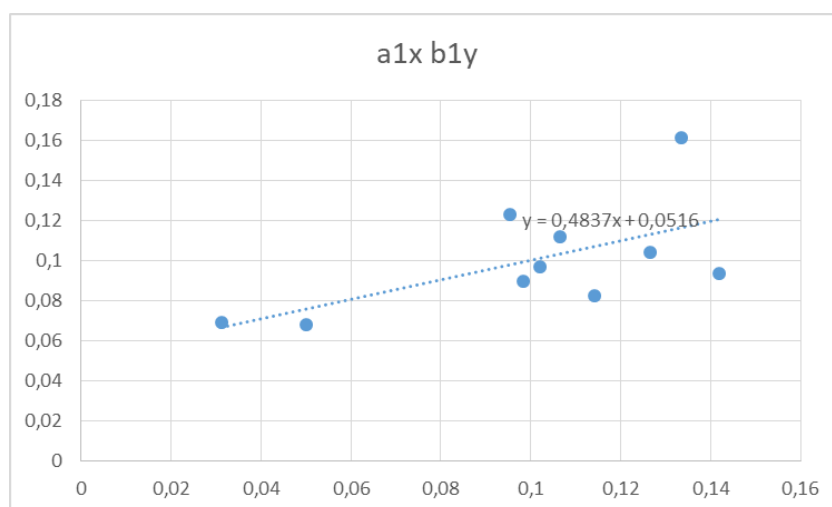
Figur 7 Restider i sekunder under olika dagar på inkommande väglänkar mot reglerpunkten vid fast tidsstyrning (bör inte överskrida 600s för att inte riskera att "kösvansen" når Essingeleden)



Figur 8 Restider i sekunder under förmiddagen olika dagar på utgående väglänk från reglerpunkten vid fast tidsstyrning

Syftet med dynamisk kapacitetsanpassning är att skydda gator nedströms reglerpunkten så att samordningen mellan trafiksignalerna och bussarnas framkomlighet prioriteras. I figuren nedan ser man hur restiderna varierar kraftigt mellan olika dagar med den fasta tidsstyrningen.

I arbetet med en prognosmetod studerades även korrelationen mellan restider på inkommande länkar med restiderna nedström för att tidigare kunna identifiera problematiska trafik tillstånd på denna del av Kungsholm. Om framgår av figuren nedan var korrelationen svag mellan de två rutterna.



Figur 9 Exempel på data som visar svag korrelation mellan matande länk och skyddad länk

Efter omfattande tester utvecklades en prognosmetod baserad på ett Kalmanfilter som beräknar restiderna för varje rutt var för sig. Utmaningen ligger i estimeringen av lämpliga konstanter i filtret som är unikt för varje rutt. Genom att utnyttja historiska data från 2018 kunde filtrets konstanter estimeras.

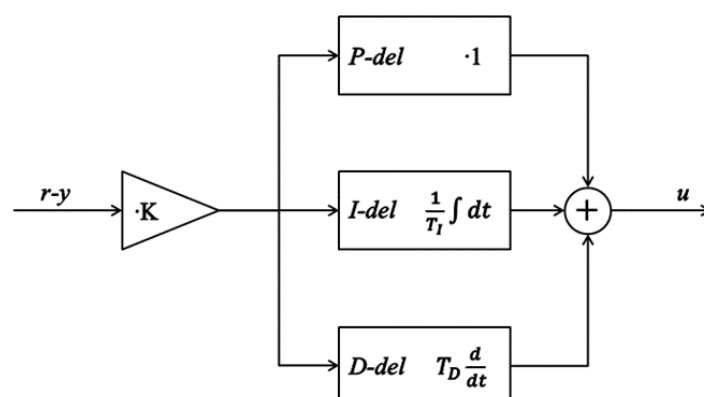
Parametrarna togs fram efter tester av olika optimeringsmetoder: linjär simplex, Generalized Reduced Gradient (icke-linjär) samt Evolutionary, där den sistnämnda metoden ger minsta fel i prediktionen.

Denna del av metodutvecklingen bör göras för varje ny länk i nätet och förmodligen behöver den uppdateras årligen. Ny indata avseende restider på minutnivå bör alltså samlas in och optimeringsalgoritmen körs om ”off-line” i ett standardmässigt förfarande. I Appendix 1 Kalmanfilter beskrivs metoden mer utförligt.

Efter att tillståndet och en korttidsprognos har beräknats på minutnivå med trafikdata och Kalmanfiltret kommer nästa steg DynKap-systemet, nämligen aktivering av styrfunktionen. Det är ett reglertekniskt problem där systemet påverkar styrfunktioner som sedan förväntas ge effekter i trafiken efter en viss tidsperiod.

Inledningsvis övervägdes en reglering baserad på ett enkelt tröskelvärde för restiderna på Drottningholmsvägen och Sankt Eriksgatan. I omvärldsanalysen ingick dock att följa upp det aktuella kunskapsläget inom området och diskussioner inleddes med forskare i bland annat Europa och Nya Zeeland där liknade system studeras.

Vid ett forskarseminarium vid KTH under 2019 föreslog forskare att en fullständig PID-regulator skulle introduceras vid denna typ av automatisk reglering av kapaciteten. Det har inte tidigare driftsatts i verklig gatumiljö utan bara testats i simulering.



$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d e'(t) \right]$$

Figur 8 Principskiss över PID-regulatorn

Där K , T_i och T_d kan skattas med olika reglermetoder, varav två stycken vanligt förekommande har använts i DynKap-projektet:

Alt 1 Ziegler-Nichols stegssvarsmetod

Alt 2 AMIGO-metoden

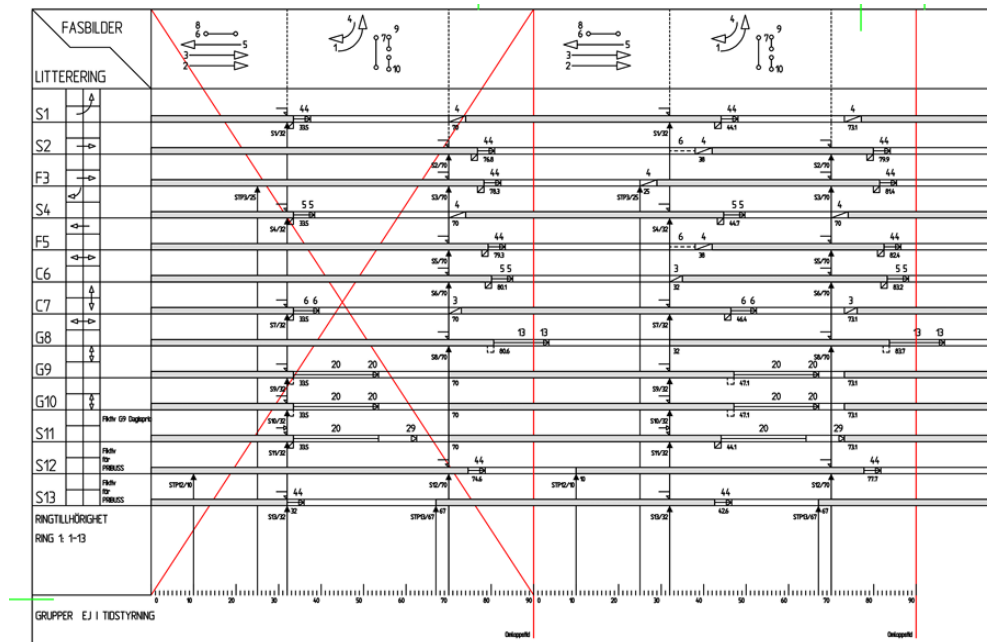
Vid regleringspunkten Drottningholmsvägen användes Ziegler-Nichols stegsvarsmetod. Ett Innovativt, och möjligen reglerteoretiskt tveksamt, steg är att vid beräkningen av derivatan och integralen i PID-regulatorn tas även hänsyn till prognos i form av utdata från Kalmanfilter.

[illegible]

Figur 9 Exempel på test av PID-regulatorns parametrar

Om prognosen för restider på matande länk medför att kömagasin överskrider (vid ca.80% vilket motsvarar restider på ca 600s.) avbryts den dynamiska anpassningen och tidssättningen återgår till den normal.

Det sista steget i DynKap-systemet är kopplingen mot trafiksignalen med syfte att i realtid justera gröntiden på inkommande länk och därigenom minska eller öka genomströmningen. Under testet utnyttjas enbart en reduktion av gröntiden under ett eller flera omlopp. Vid aktivering tas 10s bort i signalgrupp F3, vilket motsvarar en minskning av flödet med ca. 25% per omlopp. Detta innebär i praktiken att det blir en minskning av gröntiden från 40 till 30 sekunder. Genom att låta förändringen ligga kvar under flera omlopp påverkas det inkommande flödet i olika nivåer där återkopplingen ligger på minutnivå.



Figur 10 Signalgrupp 3 får en stoppuls ca 10s innan normal växling till gult

6 Hårdvara och installation

De viktigaste delarna av DynKap-systemet utvecklas på en server hos konsulterna i projektet. Testerna genomfördes på standarddatorer och med internet-koppling mot datakällorna.

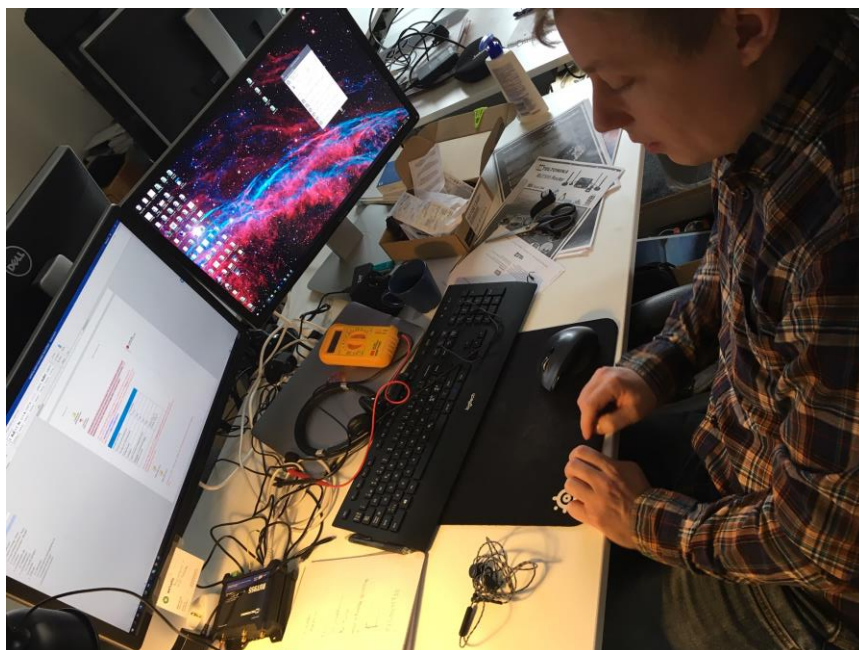


Bild 2 Utprovning av hårdvara

Styrsignalerna skickas till trafiksignalutrustningen via 4G-modem som kopplas in mot I/O-enheten i signalen. Trafikkontoret har avtal med leverantörer av utrustning kopplat till trafiksignalerna men under försöksverksamheten användes billigare standardprodukter för denna typ av uppkoppling.



Bild 3 Under projektet används ett 4G-modem för koppling mot trafiksignalen

Det finns olika programmeringstekniska sätt att begränsa gröntiden i en av trafiksignalens signalgrupper. En mer avancerad metod kan vara att ändra valet av program för hela samordningen om påverkan på trafikströmmarna blir omfattande.

För provet valdes en förenklad metod baserad på en stoppuls som avkortar en signalgrupp inom det ordinarie programmet.

Programmeringen av styrapparaten gjordes Trafikkontorets personal efter instruktioner från signalprojektören. Arbetsinsatsen var relativt liten och rör sig om några timmars arbete. Sedan tillkommer tester. För utvärderingen användes även räknande detektorer kopplade till styrapparaten på Sankt Eriksgatan och uttagen av data utfördes av Trafikkontoret.



Bild 4 Installationen är relativt enkel och i apparatskåpet finns även elförsörjning för tillkommande DynKap-utrustning

7 Utvärdering Trafikstyrning

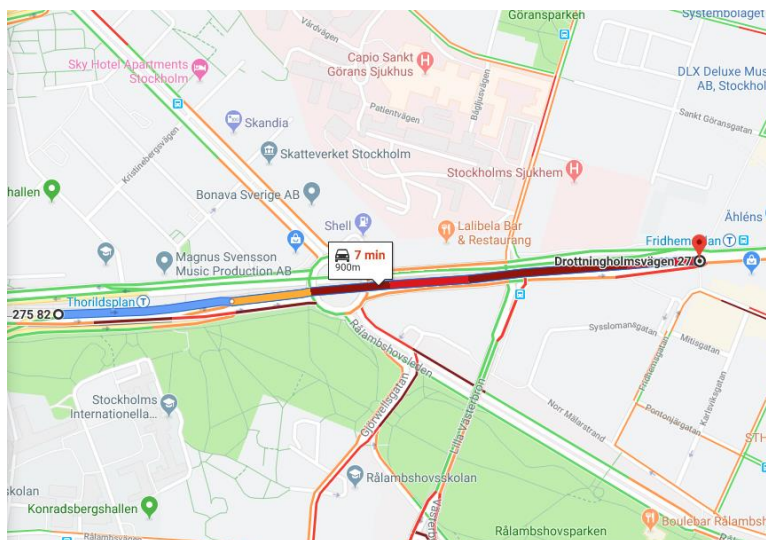
Under hösten 2019 installerades systemet på Kungsholmen och en sju veckor lång utvärdering genomfördes under perioden september till november. De första veckorna trimmades systemet in och provmätningar genomfördes för att kontrollera försöksupplägget.

Den 23 september inleddes försöket och systemet växlade veckovis mellan aktivt och avslaget samtidigt som data för utvärderingen samlades in. Normalt skedde växlingen mellan måndag och tisdag.

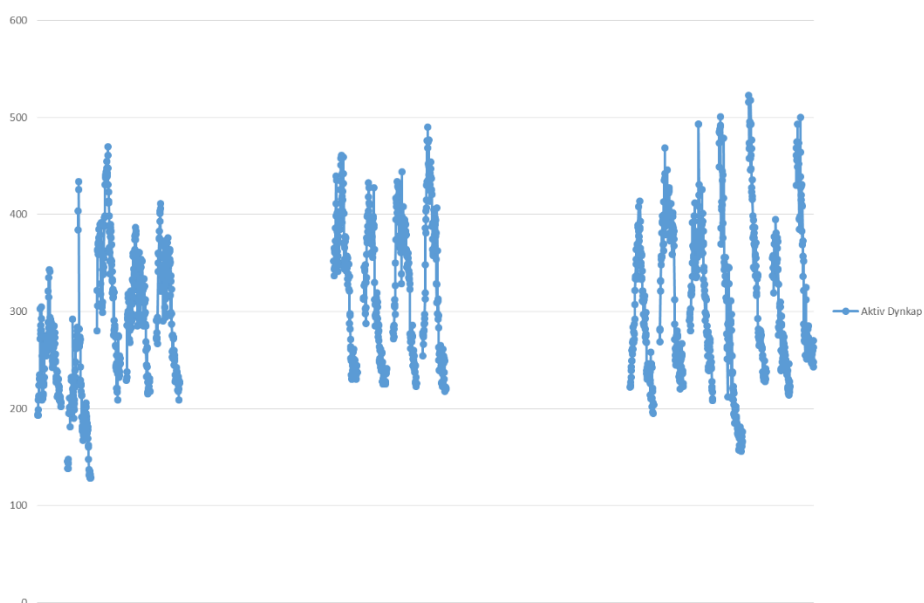


Bild 5 Restiderna nedströms reglerpunkten är den viktigaste variabeln som studerades under utvärderingen

Vid flera tillfällen filmades även aktiveringen på plats för demonstrationsändamål. Tydligast framgår effekten vid växling till rött i västra tillfarten i korsningen Fridhemsgatan och Drottningholmsvägen.



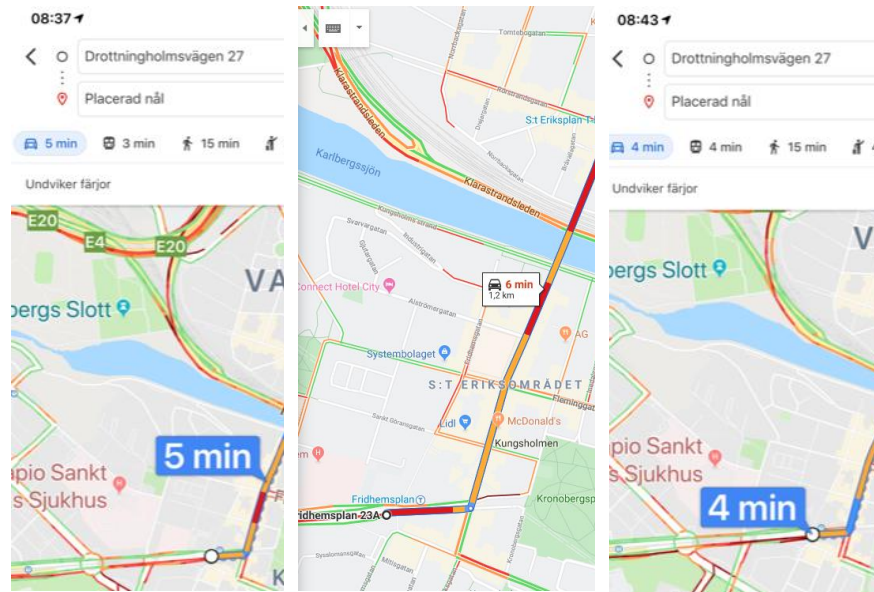
Figur11 Kölängderna på inkommande länkar registrerades med Google API



Figur 12 Kölängderna på Drottningholmsvägen skattas från observerade restider (figuren avser alla dagar under tre veckor med aktiv system). Inga observationer med restider som överskrider tröskelvärde på 600s.

Det var viktigt under provet att inte köppbyggnaden på inkommande länkar blev för omfattande. Genom kameraobservationer och uttag från Essingeledens MCS-system kunde inga tillfällen med köer som påverkar motorvägen eller Tranebergsbron observeras.

Restiderna på S:t Eriksgatan längs hela sträckningen mellan Fridhemsgatan och Torsgatan observerades kontinuerligt under provet. Trafikräkningar på S:t Eriksgatan loggades automatiskt under provperioden.



Figur 13 Restiderna som uppmättes på S:t Eriksgatan kan även användas för att skatta restider för buss i blandtrafik

Efter den inledande utprovningen av systemet, som bl a visade att systemet borde vara aktivt åtminstone fram till kl 9.30, kunde följande allmänna slutsatser dras av DynKap.

- Den ”fasta” gating som utgör jämförelsealternativet är bra intrimmad och ger en bra samordning nedströms
- Systemet gör mest nytta under fm rusningsperiod (7-9.30)
- Aktivering sker normalt varje dag mellan ca 3-10 ggr
- Antal minuter med reducerad gröntid ligger runt ca 20min per morgon
- DynKap kapar topparna i fördröjningen

Vissa av effekterna kan kvantifieras från de aktiva mätsystemen (restidsdata, MCS-data samt flödesdata) under fm rusningsperiod (kl 7-9.30), med följande resultat:

- Ingen köupbyggnad som inverkar negativt på Essingeleden (mer än 8000 datapunkter från MCS har loggats under mätperioden)
- Total minskning av trafikflödet på S:t Eriksgatan mellan kl 7-9.30 med -0,6%
- Trafikflödet på S:t Eriksgatan minskar med 1,4% mellan kl 7-9
- Trafikflödet på S:t Eriksgatan ökar med 2,7% mellan kl 9-9.30
- Medelfördröjning S:t Eriksgatan minskar från 45s till 36s (-20%)
- Fördröjning Drottningholmsvägen ökar från 87s till 89s (+2%) mellan kl 7-9.30
- 90-perc fördröjningar S:t Eriksgatan minskar från 81s till 51s (-37%)

Mätningarna vid aktivt system indikerar att flöde hålls igen något under rusningsperiodens inledning och sedan ökar något i slutet av perioden. Restiderna på S:t Eriksgatan jämnas ut och minskar med aktivt system. Intressantast är dock den stora påverkan på 90-percentilen, dvs de tidsperioder med den sämsta framkomligheten får en påtaglig förbättring med en minskning av fördröjningen på nära 40%.

En samlad effektbedömning baserat på mätdata och antagande om busstrafik för provet kan sammanfattas:

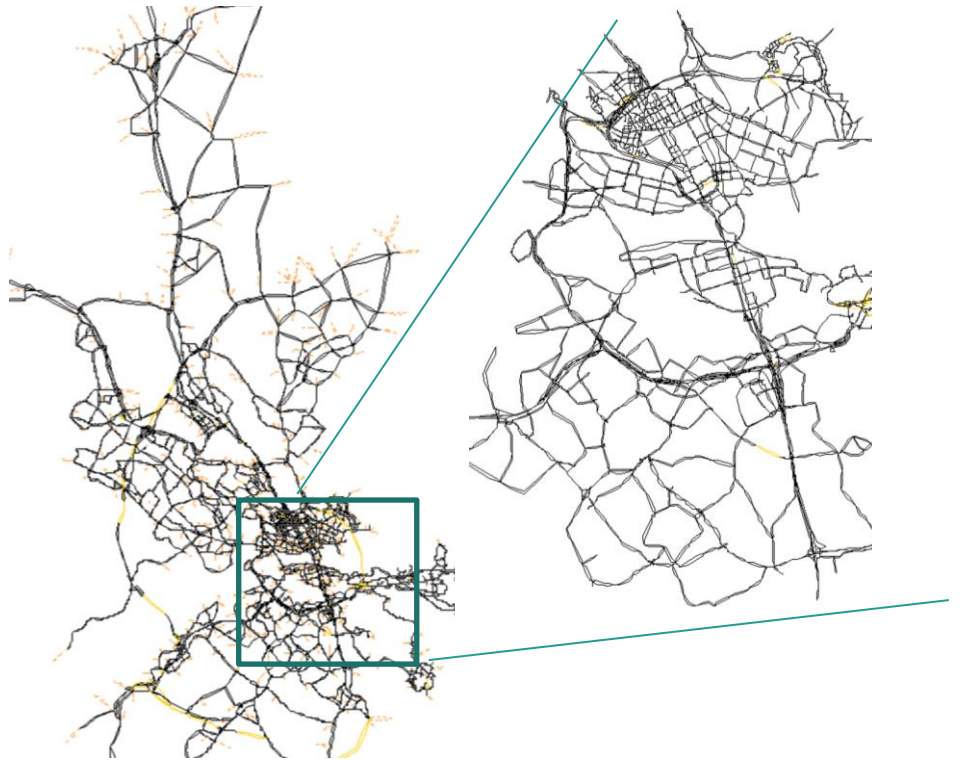
- Linje 4 och linje 77 antas få halva restidsvinsten jfr med bil pga bussfält
- Ingen effekter på övriga busslinjer (ex linje 3)
- Restidsvinsten motsvarar ca 2 pass.timmar/tim för både buss- och biltrafik
- Med ca 35pass/buss ger det restidsvinster som motsvarar ca 30 tkr per år
- Restidsvinsterna för biltrafiken motsvarar ca 110 tkr per år
- Skillnaden mellan bil och buss beror på tidsvärdet som är 3ggr högre för bil
- Driftkostnad är ca 5tkr/år
- Fortsatt drift har hög samhällsekonomisk lönsamhet (NNK>>10)

8 Simulering av fullskalig implementering

För att uppskatta effekterna av en fullskalig implementering av DynKap-systemet har en simuleringsmiljö använts. Målet är att överföra resultaten från testerna på Kungsholmen till ett fullt utbyggt system på Södermalm.

Simuleringen baseras i grunden på som efterfrågemodellen Sampers samt mesomodellen Contram. Trafikverket och Stockholms Stad har tidigare utarbetat prognoser för år 2040 där även en nulägesmodell ingår.

Den regionala modellen har överförs till en mindre modell som omfattar Södermalm med influensområde. Det är viktigt att inte missa omfördelningseffekten av dynamiska kapacitetsanpassning, t ex risken för ökade köer på Södra länken.



Figur 14 En ny "central" mesomodell har tagits fram som består av innerstaden och delar av närförtorter

Efterfrågematriserna för morgonens och eftermiddagens maxtimme omformas till 15-minuters trafik i mesomodellen Contram där trafiken simuleras mellan kl 06.45-9.15. Vägnätet är detaljerat modellerat för beräkning av kapaciteter i trafiksignaler och väjningsplikter där hänsyn tas till interaktionen med andra trafikantgrupper

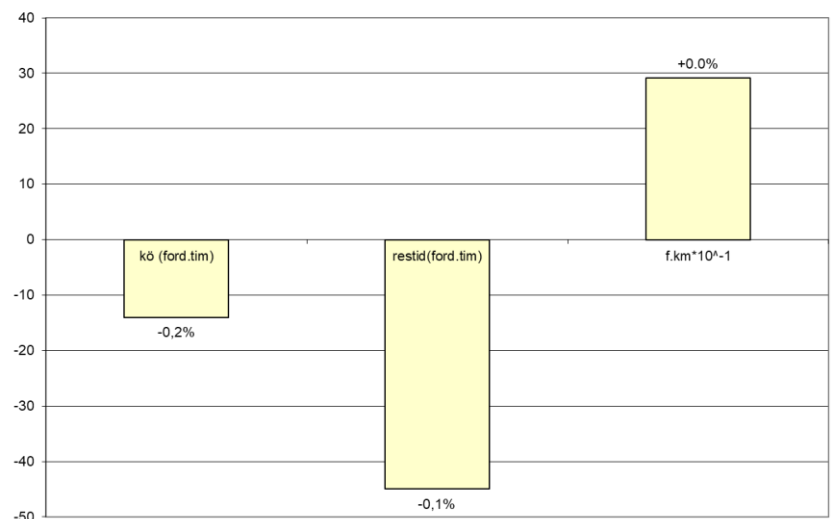
Vid simulering av dynamisk kapacitetsanpassning har gröntiderna reducerats på viktiga infarter i samma storleksordning som på Kungsholmen.



Figur 15 Ett större antal noder har detaljkodats

Restidsvinster för bil- och kollektivresor baserad på simulering, och schabloner från provverksamheten på S:t Eriksgatan, motsvarar ca 7,9Mkr/år.

Trafikanteffekter i söderort under fm (kl 7-9) med DynKap installerad på Södermalm
ca 14 tkr i minskade trafikantkostnader (bilresor)



Figur 16 Effekterna på hela söderort blir marginell men vinsterna lokalt är betydande

9 Miljöstyrning

Det koncept för dynamisk begränsning av inflödet av biltrafik till innerstaden som tagits fram i DynKap-projektet har inledningsvis inriktats mot att skydda gator med viktig busstrafik från köer. Samma metod kan med fördel även användas för att begränsa biltrafik när gränsvärden för miljökvaliteten håller på att överskridas. En betydande andel av de höga nivåerna kan hänföras till biltrafikens emissioner, speciellt dieselfordon och lastbilstrafik.

Längs den rutt som trafiken kan begränsas med DynKap-konceptet finns en av miljöförvaltningens mätstationer. Det har gjort det möjligt att utvidga försöksverksamheten i Smart trafikstyrning till att även omfatta miljöstyrning. Efter proven med trafikstyrning under hösten 2019 inleddes under vinter/våren 2020 ytterligare en försöksverksamhet där målet är att minska utsläppen på Sankt Eriksgatan med hjälp av en begränsning av inflödet från Drottningholmsvägen.

Styrsystem använder samma förändring av gröntiden i trafiksignalen som vid trafikstyrning men beslutet för aktivering beror enbart på aktuell utsläppsnivå. Det effektmått som systemet utgår ifrån är nivån på NO₂ som registreras varje kvart i mätstationen. Det finns ytterligare viktig information som hämtas i realtid från miljöförvaltningen, till exempel NO_x och bakgrunds nivåer från andra mätstationer. Här finns också registrering av vindriktning och vindstyrka.

Genom att utnyttja webb-baserad realtidsinformation kan DynKap-servern läsa in data varje 15-minutersperiod. En enkel beslutsprocess, som baseras på vissa gränsvärden, aktiverar styrningen av trafiksignalen på Drottningholmsvägen.



Figur 17 Mätstationen vid Sankt Eriksgatan

Mätningar av NOx och NO2 på St Eriksgatan 83. Projekt Dynkap

Dataset: St Eriksgatan 83, NOx och No2, 15 minutersvärden.

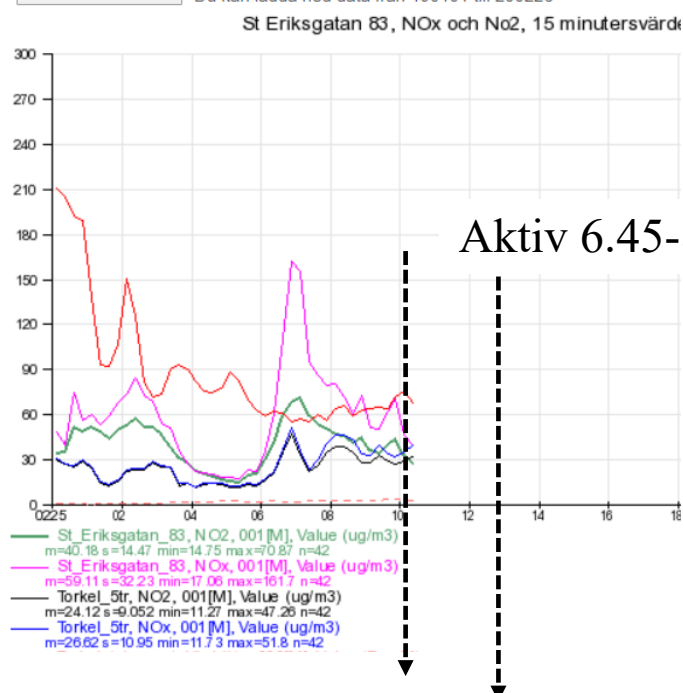
Från: (ÅÅMMDD) Till: (ÅÅMMDD)

Visa graf

Du kan titta på data från 190101 till 200226

Ladda ned data

Du kan ladda ned data från 190101 till 200226



Figur 18 Exempel från den 25 feb när systemet aktiverades under en och en halv timme

Under perioden 20 januari till den 13 mars var systemet i drift dagtid (kl. 7-18) efter en kortare intrimningsperiod. Några av mätveckor ströks på grund av sportlov samt under den inledande corona-krisen som påverkade den sista mätveckan. Den stora bakliggande variationen som beror på vädret gör det svårt att hitta skillnader som beror på direkt mätning av halterna. Nivån på halterna triggar trafikstyrningen och när den aktiveras loggas inverkan på trafikflödet på Sankt Eriksgatan.

Påverkan av bakgrunds-nivåerna är så pass stor att det är svårt att direkt mäta effekterna. Ser man till medelvärdet på bakgrunds-nivåerna (mätpunkt på Torkel Knutssongatan) under dagtid för veckor där systemet är aktivt jämfört med veckor utan aktiverat system, så ligger dessa värden ca 6% högre under de aktiva veckorna. Då påverkan med DynKap maximalt ligger i samma storleksordning kan direkt mätning av halterna bli missvisande.



Figur 19 Under proven med miljöstyrning övervakades kölängderna via Google maps

Genom att använda metoden som tagits fram av miljöförvaltningen (se Appendix 2) kan flöde och reshastigheten korreleras med utsläppsnivåerna som beror på trafiken längs Sankt Eriksgatan. Den differens mellan uppmätta bakgrunds nivåer och aktuell lokal nivå på halten NO_2 kan schablonmässigt korrigeras för att bedöma effekten av DynKap.

Under mätperioden aktiverades systemet för miljöstyrning helt eller delvis under 81 av 319 timmar, d.v.s. ca. 25 % av tiden. De aktiva perioderna varierar stort från ett par gånger till ett 20-tal aktiveringar per dag.

En jämförelse av trafikflödet under aktiverat system jämfört med utan styrning visar på små skillnader. Resultaten liknar effekten som uppmättes under hösten 2019 och ligger runt en minskning med ca. 1,2 %. Till det kommer en positiv inverkan på emissionerna som beror på att reshastigheten ökar något vid minskat flöde. Den svaga effekten på trafikflödet beror troligen på att det inkommande flödet ligger under belastningsgrad ett under stora delar av perioden med aktiverat system. Det gör att reduceringen av gröntiden inte påverkar flödet i någon större utsträckning. System är anpassat till att kapa toppar i det inkommande flödet och för miljöstyrning skulle begränsningen av gröntiden förmodligen vara större.

Det är också viktigt att påminna om att endast en av trafikriktningarna påverkas och att endast ett av ca. sex ruttflöden regleras vid miljöstyrningen. Från Contram-modellen som simulerar ruttvalen på Kungsholmen framgår att ca. 300 fordon/timme i reglerpunkten vid Drottningholmsvägen passerar miljöstationen på Sankt Eriksgatan där det totala flödet i båda riktningar är ca. 1.300

fordon/timme. Dynkap kan alltså påverka endast en fjärdedel av trafikflödet förbi mätstationen.

Under hela testperioden överstegs halten NO₂ i miljökvalitetsnormen på 60 µg/m³ 45 ggr. Med ett schablonmässigt samband skulle sex 15-minutersperioden istället hamna under gränsvärdet.

En motsvarande beräkning för överskridanden under hela 2019 ger något större genomslag. Antalet timmar med överskridande av gränsvärdet var 228 där den målet är att inte överskrida gränsvärdet fler än 175 ggr, d.v.s. det skulle behövas en reducering av antalet timmar med 53 för att uppnå målet. Om DynKap i reglerpunkten på Drottningholmsvägen varit aktiv under hela 2019 visar schablonmässiga beräkningar att 11 av dessa timmar istället skulle hamna under gräns-värdet. DynKap ger alltså ett bidrag men fortfarande skulle det vara 42 timmar med för höga värden för att uppfylla miljökvalitetsnormen.

10 Appendix 1 Kalmanfilter

Den generella modellen för ett Kalman-filter utgår från tillståndsekvationen:

$$y_t = \mathbf{H} \cdot x_t + e_t \quad t = 1, 2, \dots$$

där

y_t = observationer vid tidpunkt t

$\mathbf{H}$ = matris som transformerar tillståndsvektorn till observerade data

x_t = tillståndsvektorn vid tidpunkt t

e_t = ett normalfördelat brus (väntevärde=0)

$$TT_{t+1} \text{ pred} = ht * a + TT_{t+1} * ((mt - 1) * b + 1)$$

där

$$ht = ht-1 * a + \text{diff } t-1 * \text{quad}$$

där

diff t-1 = felet i skattningen av restid i föregående tidsperiod (ex 5min)

ht-1 = skattning av h i föregående tidsperiod (ex 5min)

TT_{t+1} = prediktionen föregående dag tidsperiod t+1

$$mt = mt-1 * b + \text{diff } t-1 * \text{guam} / Tt + (1-b)$$

där

mt-1 = skattning av m i föregående tidsperiod (ex 5min)

diff t-1 = felet i skattningen av restid i föregående tidsperiod (ex 5min)

$$Tt = \text{historisk profil från föregående dag} = 0.25 * Tt-1 + 0.5 * Tt + 0.25 * Tt+1$$

där

$$T_t = T_{old,t} + T_{old,t} * guap * (mt - 1)$$

mt = skattning av m i föregående dag för tidperiod t

a=0.91 (startvärde)

b=0.95 (startvärde)

guad=0.67 (startvärde)

guam=0.2 (startvärde)

guap=0.2 (startvärde)

Parametrarna tas fram efter tester av olika optimeringsmetoder (linjär simplex, Generalized Reduced Gradient (icke-linjär) samt Evolutionary där den sistnämnda metoden ger minsta fel i prediktionen.

	1 stegsprediktion			Z9	AC9	AD9				MAX av alla fel				
smooth	0,25 guad	1 smod	0	steg1	steg3	steg6				guad	1 smod	guad	1 smod	
	0,5 guam	0,38 smom	0,316831645	objektsfunktion						guam	0,2641 smom	guam	0,80479 smom	
0,25 guap	0,32			20,76%	5,78%	8,67%	6,32%	#NAMN?	6,92%	guap	0,45882	guap	0,6918	
a	0,27 smd			dag	MSPE	MSPE	MSPE	1 om den skall tas in i målfunktionen			a	0,98146 smd	a	0,14336 smd
b	0,99 smm	7	2018-10-14Dag1	1,40%	2,28%	2,54%	0	7,44% bra skit			b	0,77233 smm	b	0,95373 smm
		1	2018-10-15Dag2	5,04%	8,47%	8,67%	1							
		2	2018-10-16Dag3	4,30%	6,71%	3,58%	1				1,25%	2,30%	1,97%	
		4	2018-10-18Dag4	4,47%	6,72%	7,09%	1				3,84%	6,81%	8,81%	
	0,82	5	2018-10-19Dag5	3,21%	5,28%	3,03%	1				6,40%	7,61%	11,62%	
	0,3	1	2018-10-22Dag6	7,54%	11,20%	9,46%	1				4,55%	6,19%	10,39%	
	0,2	2	2018-10-23Dag7	7,34%	10,02%	7,79%	1				5,95%	7,57%	11,69%	
	0,87	4	2018-10-25Dag8	6,30%	9,53%	4,00%	1							
	1	5	2018-10-26Dag9	8,04%	11,40%	6,89%	1							
		7	2018-10-28Dag10	4,79%	6,01%	3,52%	0							

11 Appendix 2 Beräkning av NO₂-halter på Sankt Eriksgatan vid ”Smart trafikstyrning” (DynKap)



Beräkning av NO₂-halter på Sankt Eriksgatan vid ”Smart trafikstyrning” (DynKap)

Bakgrund

Stockholms stads projekt ”DynKap” syftar till att genom ”Smart trafikstyrning” styra trafikflödet på Sankt Eriksgatan genom att hålla kvar fordonen längre vid rödljusen på Drottningholmsvägen. Detta ska minska det totala trafikflödet och ge ett jämnare trafikflöde utan trafikstockningar på Sankt Eriksgatan där utvärderingen av luftföroreningar är sämre och luftföroreningshalterna högre.

Sankt Eriksgatan har idag ett trafikflöde på de mest trafikerade delarna på cirka 25 000 fordon per dygn en årsmedelvardag samt en andel tung trafik på cirka 7 %. Sankt Eriksgatan har stor betydelse som genomfartsgata eftersom den utgör huvudstråket till norra innerstaden väster och söder ifrån.

Beräkningsförutsättningar

Beräkningarna av förändrade utsläpp och halter har gjorts för kväveoxider, NO_x, och kvävedioxid, NO₂. Kvävedioxid, NO₂, är den miljö kvalitetsnorm som är svårast att klara i Stockholm och det gäller även de miljö kvalitetsmål som riksdagen har bestämt för ”Frisk luft”. Med hjälp av luftkvalitetsdata vid befintlig mätstation vid Sankt Eriksgatan 83 samt vägtrafikemissionsdata enligt HBEFA-modellen (Handbook Emission Factors for Road Transport, version 3.3), har halter på Sankt Eriksgatan beräknats utifrån de skillnader på trafikflöde och trafikrytm som smart trafikstyrning förväntas ha.

Vad gäller sammansättning av fordon med olika bränslen och euroklassning har kamera-registreringar på Hornsgatan år 2017 använts, vilka har anpassats till förhållandena på Sankt Eriksgatan år 2019. Även sammansättningen av s.k. trafikflödesklasser följer Hornsgatan där kontinuerliga hastighetsmätningar sker. Trafikflödesklasserna i HBEFA benämns Freeflow, Heavy, Saturated och Stop&go, vilka korresponderar till olika hastigheter för olika fordon beroende på trafiksituationen.

Luftkvalitén på Sankt Eriksgatan i nuläget

Mätningar av luftföroreningar i gatunivå vid Sankt Eriksgatan 83 (västra sidan) startade i slutet av år 2017 och omfattar halter av kväveoxider (NO₂ och NO_x) och partiklar (PM₁₀ och PM_{2.5}). Mätresultat år 2018

för kvävedioxid samt jämförelser med miljökvalitetsnorm och målvärden framgår av Tabell 1 på nästa sida.

Tabell 1. Resultat av mätningar av kvävedioxid, NO₂ vid Sankt Eriksgatan 83 år 2018.

Kvävedioxid, µg/m ³	Norm	Mål	Uppmätt år 2018
Årsmedelvärde	40	20	27
Dygnsmedelvärde	60 ¹	-	59 (7 dygn>60)
Timmedelvärde	90 ²	60 ²	84 (113 timmar>90, 616 timmar>60)

¹ 98-percentil, dvs får överskridas max 7 dygn per år

² 98-percentil, dvs. får överskridas/överstigas max 175 timmar per år

Som framgår av Tabell 1 klarades miljökvalitetsnormen för kvävedioxid på Sankt Eriksgatan år 2018. Marginalen var dock liten då norm för dygnsmedelvärde tangerades med 7 dygn över dygns-medelvärdet 60 µg/m³, vilket är det maximala antalet enligt luftkvalitetsförordningen (SFS 2010:477). Däremot översteg de uppmätta halterna de av riksdagen preciserade målvärdena för NO₂, både för årsmedelvärde och timmedelvärde.

Mätningar av kvävedioxid har även pågått under 2019 men eftersom normer gäller för kalenderår kan inte resultatet utvärderas fullt ut ännu. Hittills har dygnsmedelvärdet för NO₂ överskridits under 2 dygn (se aktuella värden på <http://slb.nu/slbanalys/mkn-info/>). Uppmätta halter av NO₂ under 2019 på Sankt Eriksgatan pekar mot något lägre halter i år än under 2018. Dessa prognoser för kvävedioxidhalter 2019 har använts för beräkningar av nuläget på Sankt Eriksgatan, dvs utan ”Smart trafikstyrning”.

Resultat av beräkningar av ”Smart trafikstyrning”

I Tabell 2 redovisas resultatet av beräkningarna för Sankt Eriksgatan, där ett nuläge år 2019 med uppmätta halter som förväntas i år jämförs med två olika scenarier vad gäller effekter på trafiken i den norrgående riktningen på Sankt Eriksgatan. Beräkningsresultatet avser dock effekter för den totala trafikens förändringar. Det första scenariot är att trafikflödet minskar med 10 % i norrgående körfält, vilket motsvarar ca 1 250 fordon per dygn, vilket är 5 % minskning för den totala trafiken. Det andra scenariot är att trafiken övergår till ”Freeflow” under hela dygnet, vilket för en väg som är skyltad 50 km/h innebär ca 45 km/h för lätta fordon och 25-30 km/h för tunga fordon, enligt Hbefa-modellen. För Sankt Eriksgatan saknas information om hastigheter i dagsläget men med Hornsgatans uppmätta hastighetssamband uppskattas att

medelhastigheten är ca 33 km/h för lätta fordon och 23-28 km/h för tunga fordon.

Tabell 2. Resultat av haltberäkningar av kvävedioxid, NO₂ för nuläget år 2019 och vad utsläpp och halter skulle kunna förändras med ”smart trafikstyrning” i projektet DynKap. Varje fordonskategori är vid beräkningarna uppdelad ytterligare i euroklasser.

		Beräknad effekt av ”Smart trafikstyrning” år 2019	
Sankt Eriksgatan	Nuläge år 2019	A. 10 %	B. Fritt flöde
Andelar av utsläpp och lokalt haltbidrag av NO _x :	utan ”Smart trafikstyrning”	minskning av trafiken i norrgående körfält	i norrgående körfält
Personbil bensin	16 %	16 %	16 %
Personbil diesel	36 %	36 %	36 %
Lätt lastbil bensin	0,8 %	0,8 %	0,8 %
Lätt lastbil diesel	7,8 %	7,8 %	7,8 %
Tunga lastbil diesel	32 %	32 %	32 %
Buss diesel	5,0 %	5,0 %	5,0 %
Buss gas	1,9 %	1,9 %	1,9 %
	100 %	100 %	100 %
Lokalt haltbidrag NO _x (µg/m ³)	29	27	25
		-5,0 %	-11 %
Bakgrundshalt NO _x (µg/m ³)	15	15	15
Totalhalt NO_x (µg/m³)	44	42	40
		-3,3 %	-7,2 %
NO₂, årsmedelvärde (µg/m³)	25	24,4	23,8
(Norm 40, mål 20)		-2,2 %	-4,8 %
NO₂, dygnsmedelvärde (µg/m³)	52	51	50
(Norm 60, mål finns ej)		-1,5 %	-3,5 %
NO₂, timmedelvärde (µg/m³)	72	71	70
(Norm 90, mål 60)		-1,5 %	-3,4 %

Utsläppen och det lokala haltbidraget av kväveoxider, NO_x, beräknas minska med ca 5 % på Sankt Eriksgatan med en 10 % minskning av trafiken i norrgående körfält. Halterna är beräknade för den totala trafiken och eftersom ungefär lika mycket trafik går i respektive körriktning kommer den minska med 5%. Enligt mätsambanden vid Sankt Eriksgatan 83 motsvarar detta ca 2 % minskning av årsmedelvärde av NO₂ (0,6 µg/m³). Minskningen av dygns- och timmedelvärde beräknas bli ca 1,5 %. Effekten av 100 % "Freeflow" i norrgående körfält beräknas bli något större, ca 11 % på utsläppen av NO_x och ca 5 % på årsmedelvärde av NO₂ (1,2 µg/m³). Minskningen av dygns- och timmedelvärde beräknas bli ca 3,5 %.