

**MÄTNINGAR AV
LUFTFÖRORENINGAR,
LUFTFLÖDEN OCH TRAFIK
I SÖDERLEDSTUNNELN**

**NOVEMBER - DECEMBER
1993**

Stockholms Miljöförvaltning och Vägverket, Region Stockholm

Juni 1994

Förord

Mätningar av luftföroeningar tillsammans med trafikmätningar och luftflöden har inte tidigare genomförts på ett systematiskt sätt i svenska vägtunnlar.

Under november-december 1993 utfördes en genomgripande mätserie av luftföroeningshalter i Söderledstunneln i Stockholm i syfte att bl a utröna haltförändringar i tunnelluften på olika avstånd från tunnelinfarten kopplat till trafikintensitet, olika fordonstyper och luftflöden.

Rapporten är en god nulägesbeskrivning av dagens tunnelmiljö. Resultaten har ökat kunskapsläget vilket kommer till nytta i utformningen av framtida planerade vägtunnlar.

Mätningarna har genomförts i ett samarbete mellan Miljöförvaltningen i Stockholm och Vägverket, Region Stockholm.

Luftföroenings- och luftflödesmätningarna har utförts av Slb-analys (Stockholms luft- och bulleranalys) medan trafikmätningarna gjorts av Vägverket Produktion.

Stockholm

Juni 1994

Innehållsförteckning

Sid

SAMMANFATTNING	4
MÄTNINGARNAS SYFTE:	5
MÄTOBJEKTET	5
MÄTNINGARNAS GENOMFÖRANDE	6
MÄTRESULTAT	8
TRAFIK	8
TUNNELVENTILATION	10
LUFTFÖRORENINGAR	11
<i>Ozon</i>	11
<i>Kväveoxider, NO_x</i>	13
<i>Kvävedioxid, NO₂</i>	15
<i>Kolmonoxid, CO</i>	17
<i>Polycykliska aromatiska kolväten, PAH</i>	19
<i>Flyktiga kolväten</i>	20
<i>Inandningsbart stoft, PM10</i>	21
LUFTFÖRORENINGSMÄTNINGAR UNDER BILRESOR GENOM TUNNELN	23
TEMPERATURMÄTNINGAR UNDER BILRESOR GENOM TUNNELN	24
ANDELEN NO₂ AV NO_x	25
VERIFIERING AV EVA-MODELLENS EMISSIONSFAKTORER FÖR NO_x OCH CO	29

Sammanfattning

I Söderledstunneln, röret för norrgående trafik, har under tiden 11 november- 28 december 1993 mätts kväveoxider (NO_x/NO₂), kolmonoxid (CO), bensen, toluen, etylbensen, xylener, totalhalten flyktiga kolväten och inandningsbara partiklar (PM10). Kväveoxider och kolmonoxid har mätts både i tunneln och i tunnelinfarten, övriga ämnen endast i tunneln. Dessutom har i tunneln mätts trafik- och luftflöden.

Söderledstunneln är längsventilerad. Erforderlig luftgenomströmning skapas normalt genom fordonens kolveffekt. Vid behov kopplas impulsfläktar på för att öka luftomsättningen.

Under mätperioden passerade norrut genom tunneln i genomsnitt ca 39 000 fordon per vardagsdygn. Av dessa var ca 95% personbilar, ca 3% lastbilar och ca 1% bussar.

Följande halter, timmedelvärden, har uppmätts 1 km in i tunneln under veckodagarna måndag-torsdag. Halterna uttrycks i µg/m³ med undantag för CO som anges i mg/m³.

NO _x		NO ₂		CO		PM10		bensen	toluen	etylben- sen	xyle- ner	kolväten totalt
98- perc	maxv	98- perc	maxv	98- perc	maxv	98- perc	maxv	maxv	maxv	maxv	maxv	maxv
6716	8247	377	516	41	57	1019	1991	231	637	131	588	2982

En km in i tunneln var under måndag-torsdag 99,5-percentilen, motsvarande 40:e timmen, för NO_x, NO₂ och PM10 7786, 461 respektive 1911 µg/m³ och för CO 53 mg/m³.

I mätpunkten 1 km in i tunneln var halterna av NO_x, NO₂ och CO storleksmässigt 5, 3 respektive 4 gånger högre än i tunnelinfarten och i relation till jämförbara halter på hårt trafikerade innerstadsgator av storleksordningen 5-10 gånger högre.

Halten av PM10 är starkt beroende av om körbanan är torr eller våt. Vid våt körbana var PM10-halten endast ca en fjärdedel av halten vid torr.

Andelen NO₂ av NO_x 1 km in i tunneln har, sett till enbart emissionen från fordonen i tunneln, uppmätts till 4,1% som medelvärde under måndag-torsdag och med ett högsta värde om 21%. Det senare värdet har uppmätts nattetid. En andel om 7,5% motsvarar 94-percentilen i den kumulativa frekvensfördelningen för kvoten mellan NO₂ och NO_x måndag-torsdag.

Avgasmätningar i bil har visat att avgasexponeringen vid resa genom tunneln kan reduceras kraftigt genom att minska ventilationslufttillförseln till bilen under tiden i tunneln.

Värme från fordonen åstadkommer en höjning av lufttemperaturen i tunneln. Under dagtid har en temperaturhöjning om 3-4 grader uppmätts 1 km in i tunneln jämfört med tunnelinfarten.

Utgående från emissionsfaktorer enligt EVA- modellen samt uppmätta trafik- och luftflöden har halterna av NO_x och CO beräknats och jämförts med uppmätta halter. För båda ämnena är uppmätta halter genomsnittligt ca 1,5 gånger högre än beräknade. Beträffande NO_x så är under morgonens högtrafik skillnaden mindre och uppmätt halt är endast ca 15% högre än beräknad. Tänkbara förklaringar till konstaterade skillnader finns som rör såväl de ansatta emissionsfaktorerna, t ex vad gäller andelen katalysatorbilar och kallstarttillägg, som bestämningen av ventilationsluftmängder och representativiteten hos uppmätta halter.

Mätningarnas syfte

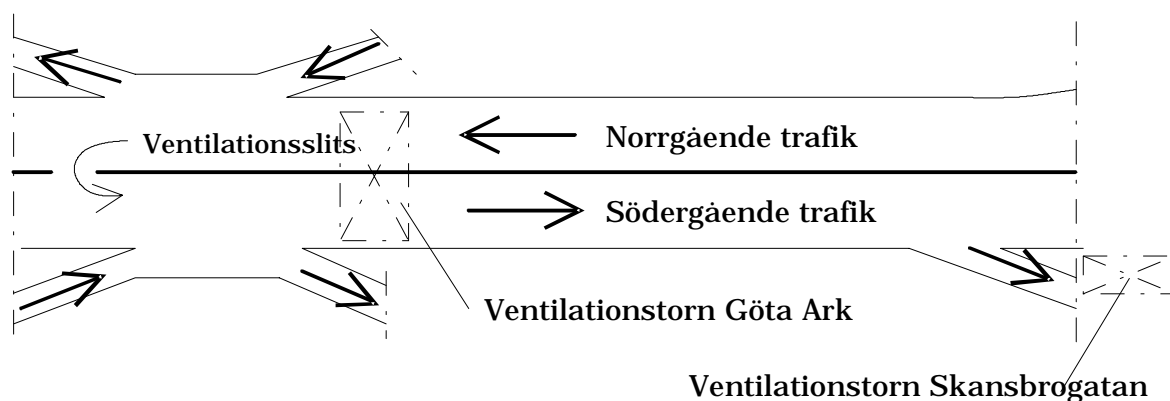
Avsikten med mätningarna har varit att:

- Beskriva förekommande halter av NO/NO₂/NO_x, CO, PM10, PAH och flyktiga kolväten (bensen, toluen och xylener) i tunnelluften samt temperaturdifferens tunnelluft-uteluft.
- Beskriva NO₂/NO_x-kvoten och dess beroende av olika faktorer till exempel trafikbelastning, ventilationsluftflöden och ozonhalt i tilluften.
- Beskriva halten inuti bilar av NO/NO₂/NO_x och CO vid olika förhållanden i tunneln.
- Karaktärisera trafiken i tunneln som antalet fordon fördelat på olika fordonstyper. Maskinell trafikräkning.
- Mäta ventilationssystemets effektivitet och bilarnas kolvverkan inklusive luftutsläpp genom ventilationstorn och mynning.
- Validera emissionsdata som kan användas i fortsättningen.

Mätobjektet

Söderledstunneln går i nordsydlig riktning under Södermalm i centrala Stockholm.

Tunneln som är cirka 1500 meter lång har två tunnelrör, ett för trafik norrut, östra tunnelröret och ett för trafik söderut, västra röret. Båda tunnelrören har på- och avfartsramper. Tunnelns principiella utseende framgår av figur 1



Figur 1: Söderledstunneln, planskiss.

Tunneln ventileras genom att friskluft tillförs genom tillfarts-mynningar och ramper och blåses ut genom ventilationstorn, utfarts-mynningar och ramper. Ventilationen, som sker enligt principen för längsventilation, hålls normalt igång genom fordonens kolvverkan. Vid behov kopplas impulsfläktar i tunnelrören på.

När avgashalten är låg går ventilationsluften ut direkt genom utfartsmynningarna. Om avgashalten överstiger en fastställd nivå, alternativt efter visst tidsschema, styrs ventilationsfläktarna så att tunnelluften sugas ut genom ventilationstornen i kvarteret Göta Ark och vid Skansbrogatan.

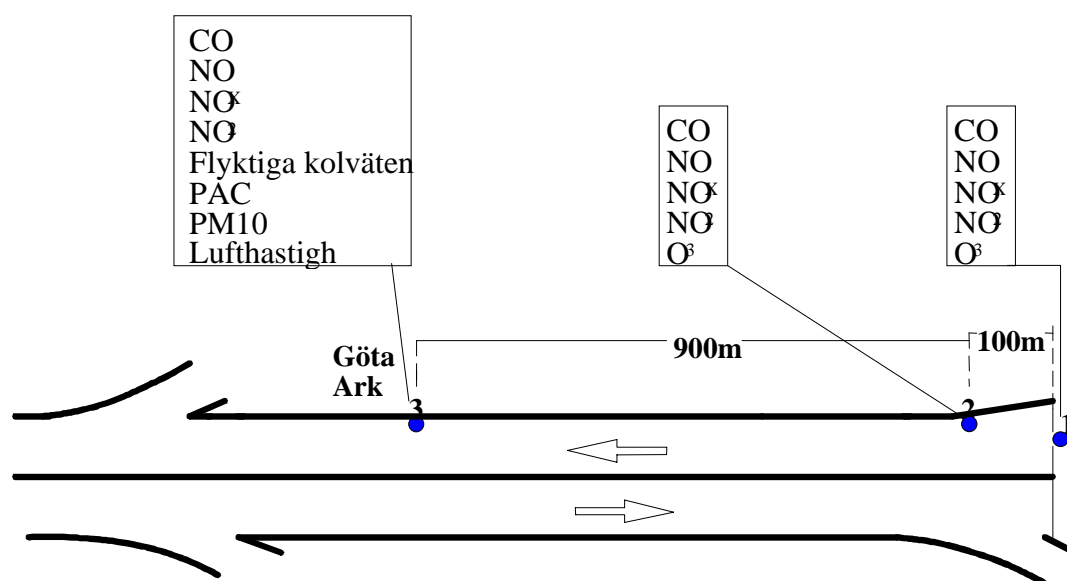
För att motverka luftutsläpp via norra utfartsmynningen finns cirka 100 meter före mynningen en slits i väggen mellan tunnelrören. Denna möjliggör överströmning av luft från östra till västra tunnelröret så att norrgående luftström här vänder söderut mot avsugnet vid Göta Ark.

Mätningarnas genomförande

Luftförorenings- och lufthastighetsmätningarna har genomförts under tiden 11/11 - 28/12 1993 med två av Slb-analys´ mobila mätstationer. Trafikmätningarna har gjorts under hela perioden.

Vid södra infarten till tunneln har mätts kväveoxider, NO/NO₂/NO_x, kolmonoxid, CO, och ozon, O₃, dels i infartsöppningen vid Ringvägen, mätpunkt 1, dels cirka 100 meter in i tunnelröret, mätpunkt 2. I mätpunkt 1 var mätsonden placerad hängande ca 1m ner från tunnel-taket och i mätpunkt 2 invid höger körfält på ca 1,5 m höjd.

I en punkt cirka 1000 meter in i tunnelröret, strax söder om luftavsugnet till Göta Ark-skorstenen, mätpunkt 3, har förutom CO och NO/NO₂/NO_x mätts inandningsbart stoft, PM10, samt tagits prov för analys av polycykliska kolväten, PAH, och flyktiga kolväten. Här har också gjorts lufthastighets- och trafikmätningar. Luftföroreningsmätningarna i mätpunkt 3 gjordes invid höger körfält på ca 1,7 m höjd. Mätpunkternas placering och mätkomponenter per mätpunkt framgår av figur 2.



Figur 2: Mätpunkter och mätkomponenter.

Kväveoxider, kolmonoxid, ozon och inandningsbara partiklar har mätts kontinuerligt med entimmesupplösning. PAH-prov har tagits dagsvis, vardagar kl. 06-20 medan provtagning på flyktiga kolväten gjorts entimmesvis, vardagar kl 08-09, 11-12 och 16-17. Lufthastighet och trafikflöde har mätts kontinuerligt med entimmesupplösning. Använd utrustning för luftförorenings- och lufthastighetsmätningarna framgår av tabell 1.

Tabell 1: Använd mätutrustning.

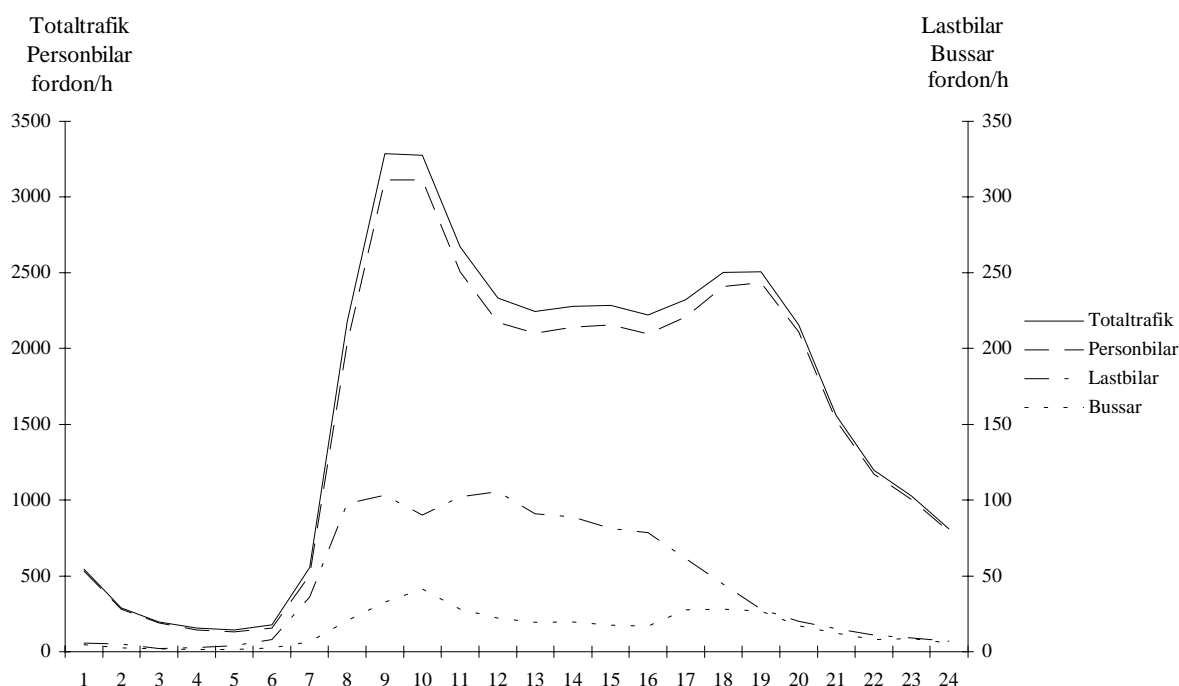
Mätkomponent	Instrument	Mätprincip
Kolmonoxid, CO	Thermo Elektron 48 Monitor Labs 8310	IR-absorbtion IR-absorbtion
Kväveoxider, NO,NO _x , NO ₂	Monitor Labs 8840 SA Environment AC30M SA Environment AC31M	Chemiluminiscens Chemiluminiscens Chemiluminiscens
Ozon, O ₃	Thermo Elektron 49	UV-absorbtion
Flyktiga kolväten	ATD-provtagare+luftpump	Absorbtion på T-nax, analys med kromatografi
Polyaromatiska kolväten, PAH	LIB-stoftsamlare	Provuppsamling på membranfilter och polyuretanpuffar. Analys med kromatografi och masspektrometri.
Partiklar, PM10	Rupprecht&Patashnick TEOM 1400	–
Lufthastighet	Solent Meteorological	Ultraljudanemometer

Mätresultat

Trafik

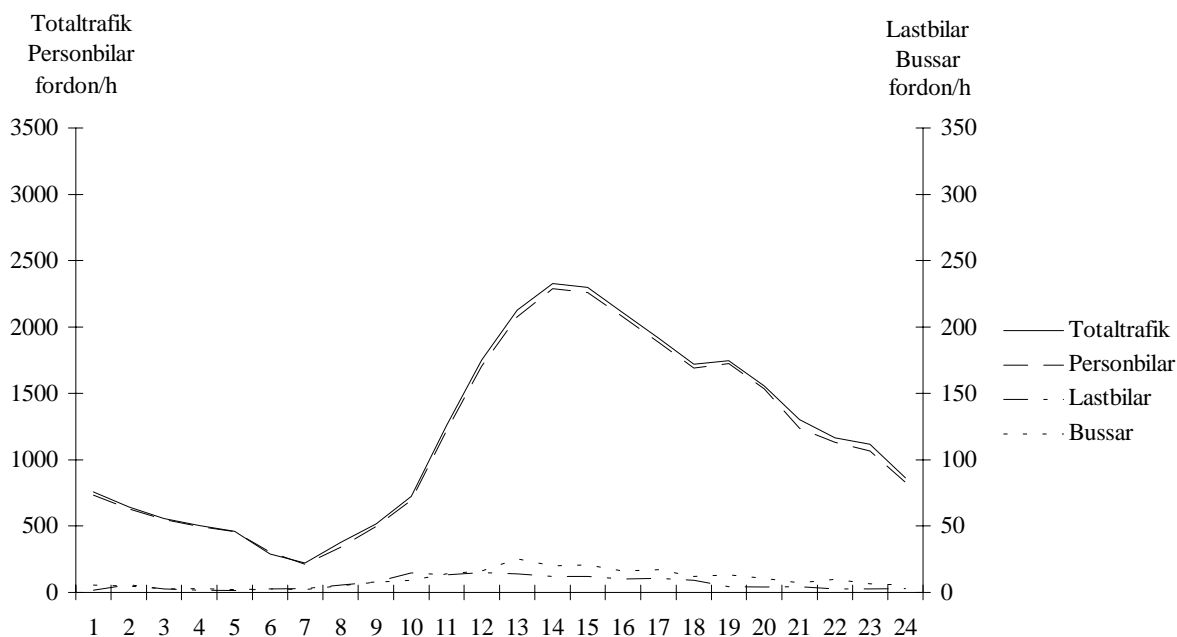
Vid upprepade bilresor i tunneln har konstaterats att trafikrytmen oftast varit jämn och att fordonshastigheter om 70-80 km/h varit vanliga. Tillfälligt under morgonrusningen har smärre köer uppstått vid infarten till tunneln och vid påfarten från Götgatan, respektive avfarten mot Hornsgatan. Långsamt rullande köer har då ibland förekommit vid mätplats 3. Fordonshastigheten i tunneln från infarten fram till Göta Ark har vid dessa tillfällen sjunkit till 50-60 km/h.

Trafikens dygnsvariation i tunneln framgår av figurerna 3, 4 och 5.



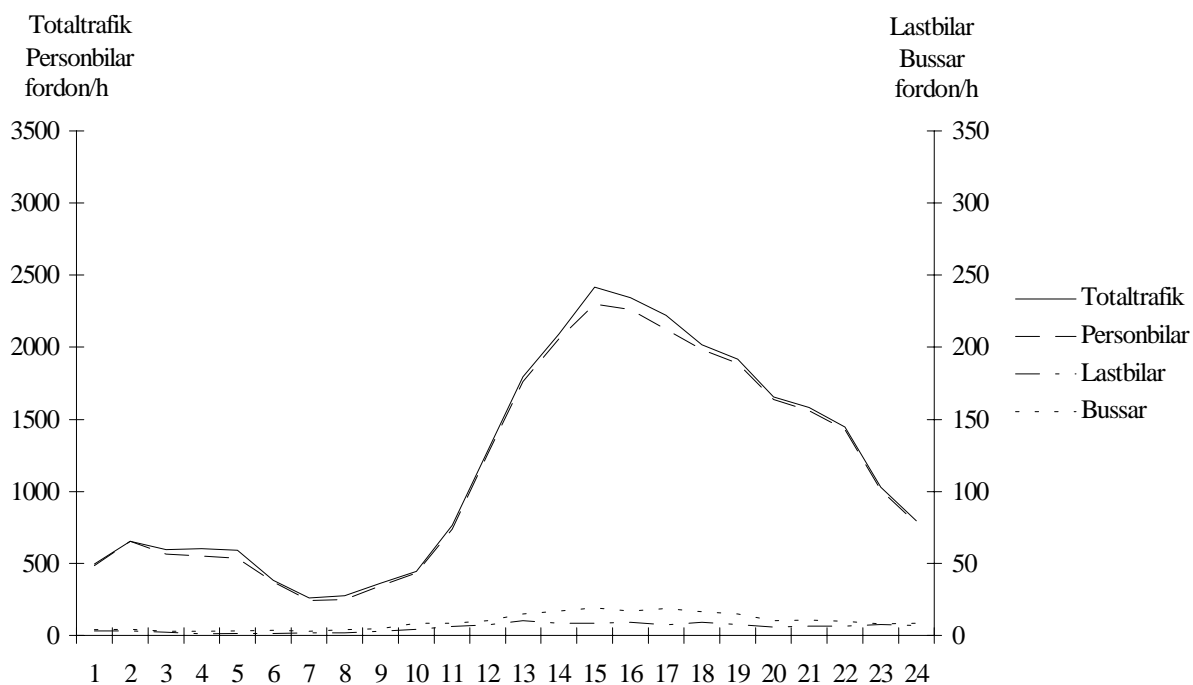
Figur 3: Genomsnittlig trafikrytm måndag - torsdag.

Under måndag till tisdag uppvisar alla fordonskategorier en tydlig morgontopp. För personbilar och lastbilar inträffar denna vid 8-tiden och för bussar vid 9-tiden. Personbilar och bussar har också en eftermiddagstopp, personbilar vid 18-tiden, och bussar kl. 16-18. Lastbilar har dessutom en tydlig topp på dagen vid 11-tiden. Måndagar- torsdagar trafikeras tunnelröret av totalt ca 39 000 fordon i genomsnitt. Mellan kl. 06 och 20 inträffar 83 % av vardagsdygnets samtliga fordonspassager.



Figur 4: Genomsnittlig trafikrytm lördagar.

För lördagar ses beträffande personbilarna en bred topp mitt på dagen kl. 13-15 och mindre toppar vid 18 och 22-tiden. För lastbilar och bussar är trafikmängden mer jämn under dagen. Under lördagar trafikeras norrgående tunnelrör av i genomsnitt 29 900 fordon.



Figur 5: Genomsnittlig trafikrytm söndagar.

Söndagstrafiken har beträffande personbilar en markant topp vid 14-tiden men är förhållandevis jämn vad gäller övriga fordonskategorier. Totala antalet fordon per söndagsdygn är i genomsnitt 28 000.

Fördelning på fordonskategorier i procent av totalantalet fordon visas i tabell 2.

Tabell 2: Olika fordonskategoriers andel av totaltrafiken, %.

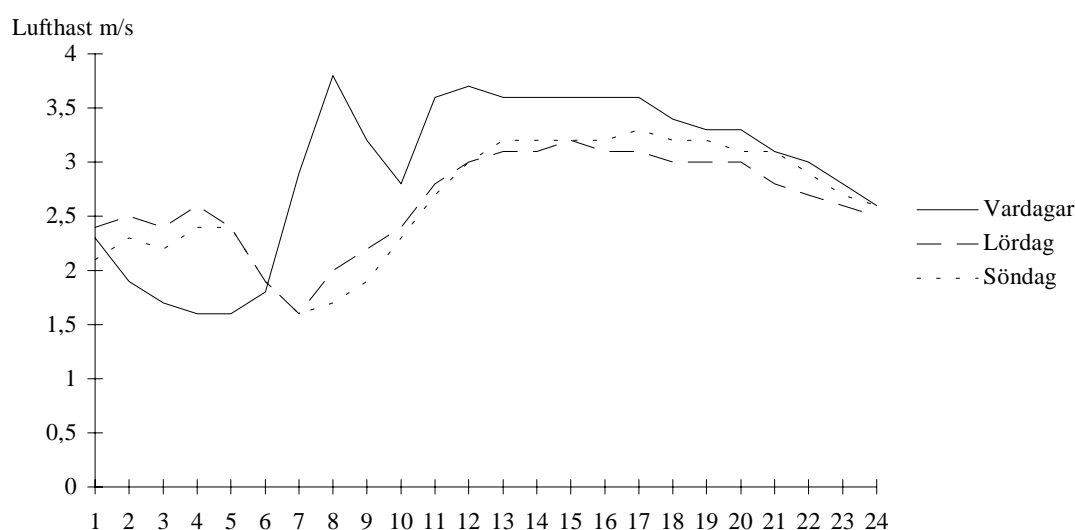
Fordonsslag	Måndag - Torsdag		Lördag	Söndag
	kl. 01 - 24	kl. 06 - 20	kl. 01 - 24	kl. 01 - 24
Personbil	95,1	94,0	98,0	98,3
Personbil med släp	0,8	0,8	0,4	0,4
Lastbil (axelavst. >3,3 meter)	2,8	2,9	0,6	0,5
Lastbil med släp	0,4	0,3	0,04	0,05
Buss	0,9	1,0	0,9	0,8
Övriga	0,02	0,02	0,01	0,03

Andelen personbilar är störst under lördagar och söndagar, cirka 98 % och lägst under vardagar dagtid, 94 %. Lastbilsandelen ligger runt 3 % under vardagar men är endast cirka 0,5 % under lördagar och söndagar. Andelen bussar är cirka 1 % under alla veckodagar.

Tunnelventilation

Tunnelns ventilationssystem, impulsfläktar och frånluftsfläktar, har med undantag för kortvarig drift under vissa dagar företrädesvis på morgon och eftermiddag, varit avstängt under mätperioden. Fordonens kolveffekt har oftast ensamt ombesörjt lufttransporten i tunneln. Luftflödet har hela tiden, även nattetid, varit riktat norrut, det vill säga i trafikriktningen.

Lufthastigheten vid mätpunkt 3 framgår av figur 6.



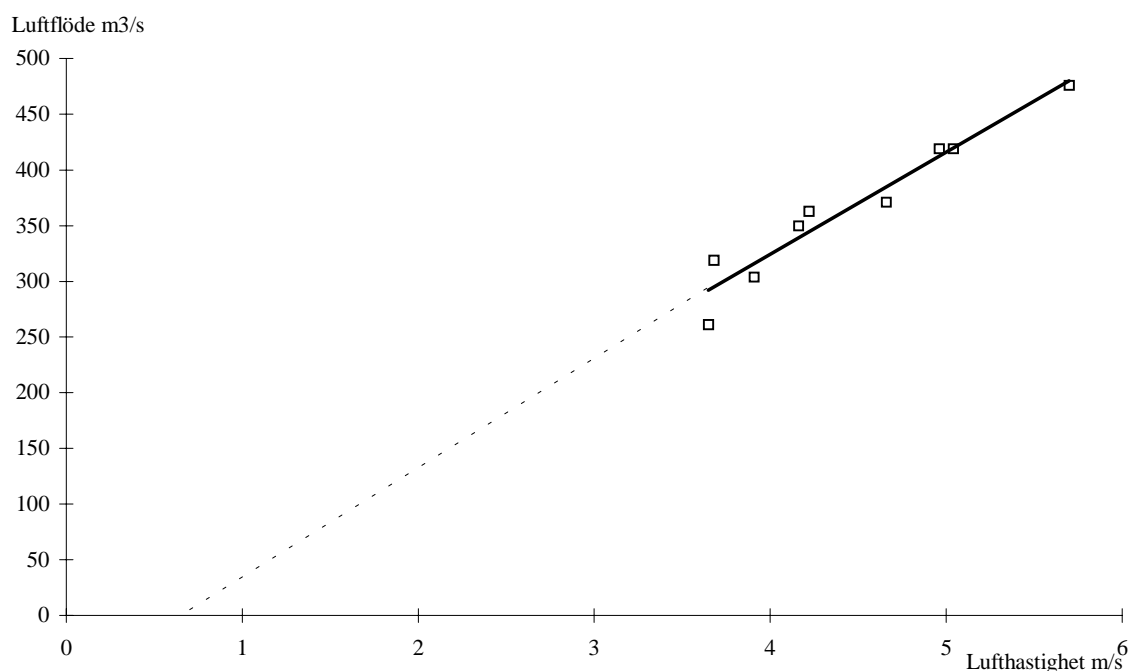
Figur 6: Genomsnittlig dygnsrytm måndag - torsdag, lördag och söndag.

Lufthastigheten uppvisar för lördagar och söndagar en dygnsrytm som i grova drag, motsvarar totaltrafikens. Under måndag-torsdag liknar lufthastighetens förlopp mest lastbilstrafikens. Andelen lastbilar är också mycket större under dessa dagar än under lördagar och söndagar. Lastbilar och även bussar har genom sina dimensioner och utformning naturligt nog mångdubbelt större kolveffekt per fordon än personbilar.

Luftens hastighet, både medel- och maxvärden, är tämligen lika, 2,7 - 2,9 respektive 3,4 - 4,0 meter per sekund oberoende av veckodag.

Den 20 december gjordes kompletterande luftflödesmätningar med spårgas, svavelhexafluorid (SF₆), i tunneln. Genom att i olika steg koppla på impulsfläktarna påverkades luftflödet genom tunneln. Lufthastigheten varierade under mätningarna inom intervallet 3,5-5,7 m/s och uppmätt luftvolym mellan 261 och 476 m³/s med avstängda respektive påslagna impulsfläktar.

I figur 7 ses uppmätt samband mellan lufthastighet och luftflöde. .



Figur 7: Samband mellan lufthastighet och luftflöde.

Luftflödet ökar linjärt med lufthastigheten inom området för uppmätta värden, heldraget linjestycke. Eftersom den extrapolerade linjen inte går genom origo gäller inte linjäriteten för låga värden på lufthastigheten.

Luftföroreningar

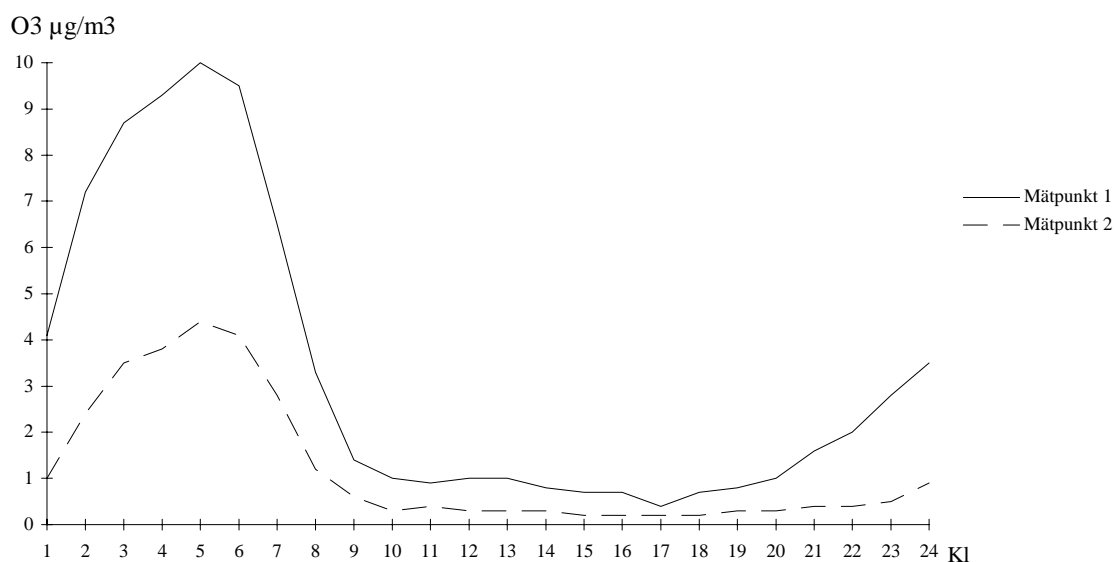
Ozon

Ozon i uteluften oxiderar NO till NO₂ och ökar därmed NO₂-halten i luften medan luftens ozonhalt då minskar.

Kväveoxiderna i fordonens avgasrör föreligger till övervägande del som NO. Andelen NO₂ är mindre. Ozon i ventilationsluften till tunneln kan öka NO₂- andelen i tunnelluften.

Ozonhalten i stadsluften är starkt beroende av halten i den luft som tillförs staden utifrån, "friskluften". Allteftersom stadens egna utsläpp av ozonförbrukande ämnen, t.ex. kvävemonoxid, blandas in i "friskluften" sjunker ozonhalten. Ju mera kvävemonoxid som släpps ut desto större ozonförbrukning och vanligen lägre ozonhalt. Därför uppvisar ozonhalten i stadsluften normalt en dygnsrytm med lägst halt under trafiktid då utsläppen är störst och högst ozonhalt efter midnatt då kvävemonoxidutsläppen är minst. Dessutom finns en årstidsvariation för ozon med högst halt under vår och sommar.

I figur 8 visas ozonhaltens genomsnittliga variation under dygnet måndag - torsdag i mät punkt 1 och 2.



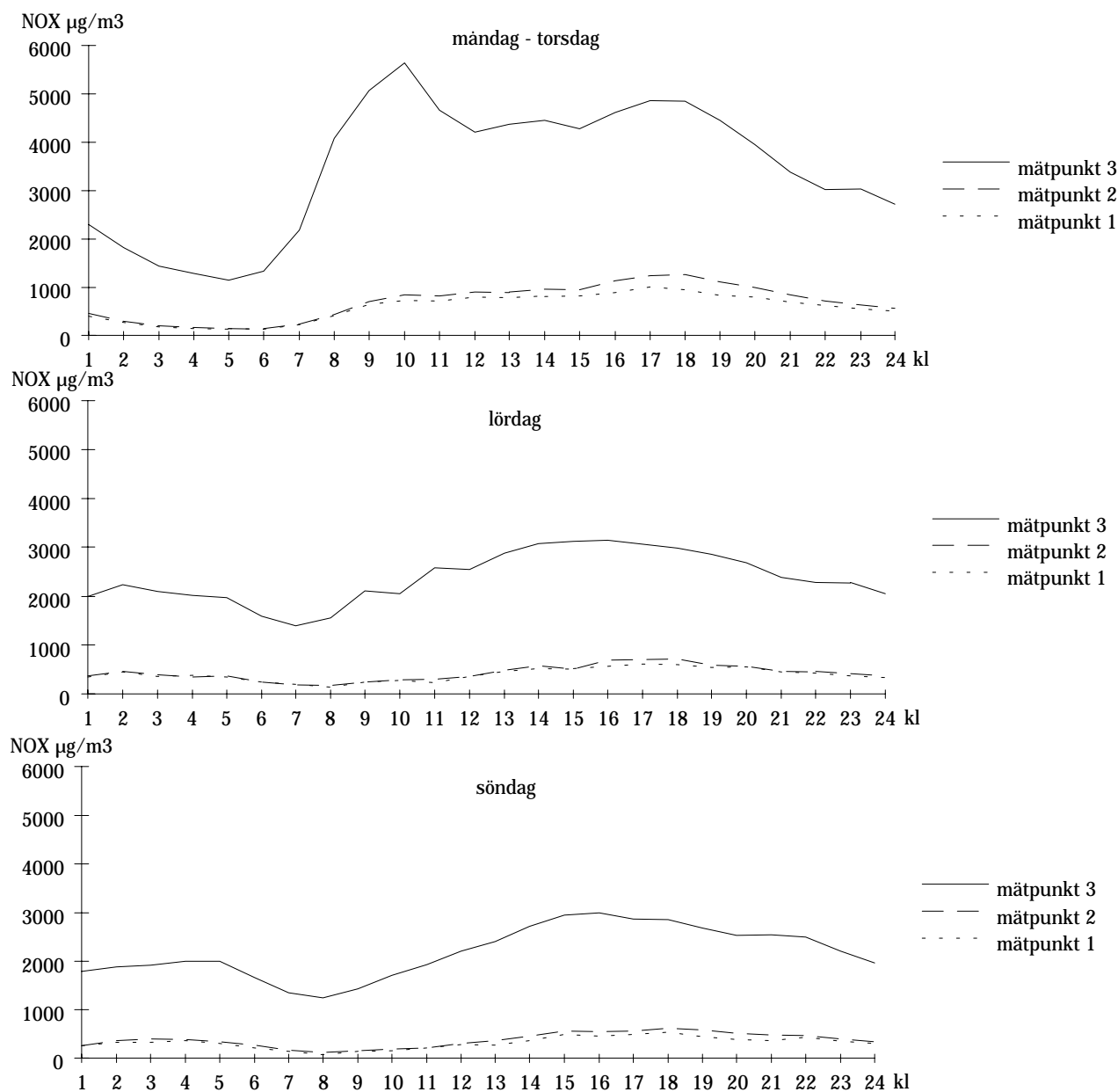
Figur 8: Genomsnittlig dygnsrytm, måndag - torsdag.

Ozonhalten måndag-torsdag är dagtid mycket låg i båda mät punkterna, genomsnittligt ett par $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i mät punkt 1 och nära noll i mät punkt 2. Nattetid ökar halten i båda punkterna och är högst vid 4-5 tiden. Genomsnittshalten i tunnelinfarten blev $3,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ och 100 m in i tunneln $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Motsvarande högsta timmedelvärden blev 22 och $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ozonet förbrukas således mycket snabbt i tunnelluften.

De låga ozonhalter som uppmätts i tilluften till tunneln under dagtid har inneburit att potentialen för omvandling av NO till NO_2 i tunnelluften då varit liten. Nattetid då ozonhalten varit högre har också omvandlingspotentialen varit större.

Kväveoxider, NO_x .

I figur 9 visas för kväveoxider haltvariationen under dygnet i mätpunkterna.



Figur 9: Genomsnittlig dygnsrytm, NO_x .

NO_x -halten i mätpunkt 3 har en dygnsvariation som mest överensstämmer med personbilstrafikens i tunneln, jfr fig 3. Exempelvis ses för måndag-torsdag markerade toppar under morgon och eftermiddag vilka motsvarar personbilstrafikens toppar. I mätpunkterna 1 och 2 är överensstämmelsen med trafiken i tunneln mindre. NO_x -halten i dessa mätpunkter är således starkt påverkad av även andra källor, t.ex. av trafiken på Ringvägen och av utsläppen från södergående trafikens tunnelrör.

NO_x- mätningarna sammanfattas i tabell 3.

Tabell 3 : Resultat av NO_x- mätningarna, µg/m³.

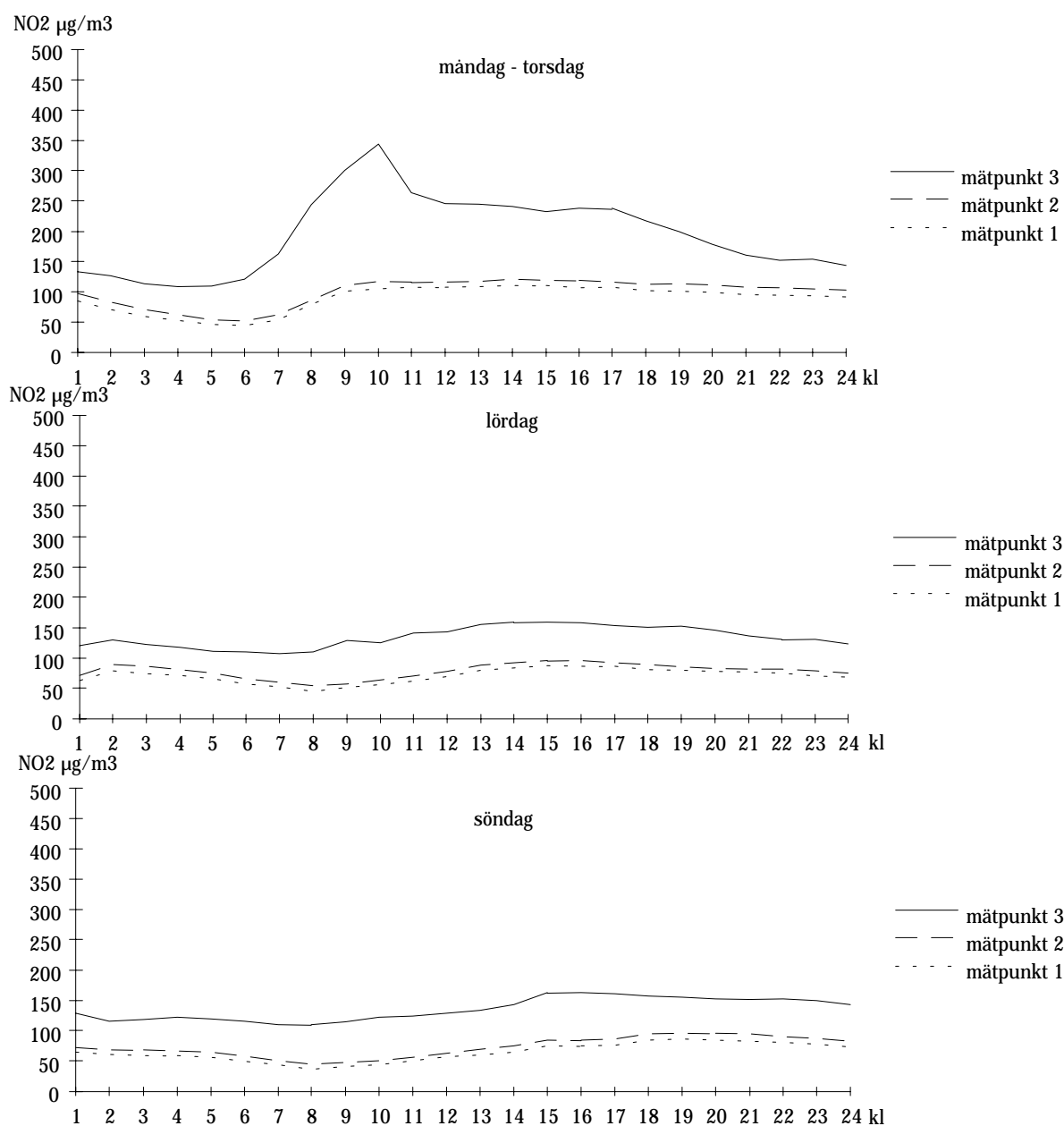
Mätpunkt	Måndag-torsdag				Lördag		Söndag	
	medelv.	98- perc.	99,5-perc.	maxv.	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.
1	582	1395	1627	1874	401	1184	316	1081
2	686	1704	1874	1939	433	1015	376	1086
3	3448	6716	7786	8247	2375	4366	2182	4363

Av tabell 3 framgår att NO_x- halten i mätpunkt 3 är storleksmässigt 5-6 gånger högre än i mätpunkterna 1 och 2.

Som jämförelse kan nämnas att i trafikmiljö vid Sveavägen 59 uppmättes under 1993, måndag - torsdag, NO_x - halter om 176, 548 och 1209 µg/m³ som medelvärde, 98-percentil respektive maxvärde.

Kvävedioxid, NO₂.

I figur 10 visas kvävedioxidhaltens variation vid mätpunkterna.



Figur 10: Genomsnittlig dygnsrytm, NO₂.

NO₂-halten uppvisar ett mindre tydligt samband med trafiken i tunneln, jfr figurerna 3,4 och 5. Endast för mätpunkt 3 måndag-torsdag ses en samvariation i form av en tydlig morgontopp som sammanfaller med personbilstrafikens. På eftermiddagen saknas dock den för personbilstrafikens markerade toppen. Snarast följer NO₂-halten då lastbilstrafikens förlopp. För de båda övriga mätpunkterna ses i det närmaste ingen samvariation mellan NO₂-halt och trafik i tunneln. Andra källor, som påverkar NO₂-halten i tilluften till tunneln dominerar här helt.

I tabell 4 sammanfattas NO₂- mätningarna i de tre mätpunkterna.

Tabell 4: Resultat av NO₂- mätningarna, µg/m³.

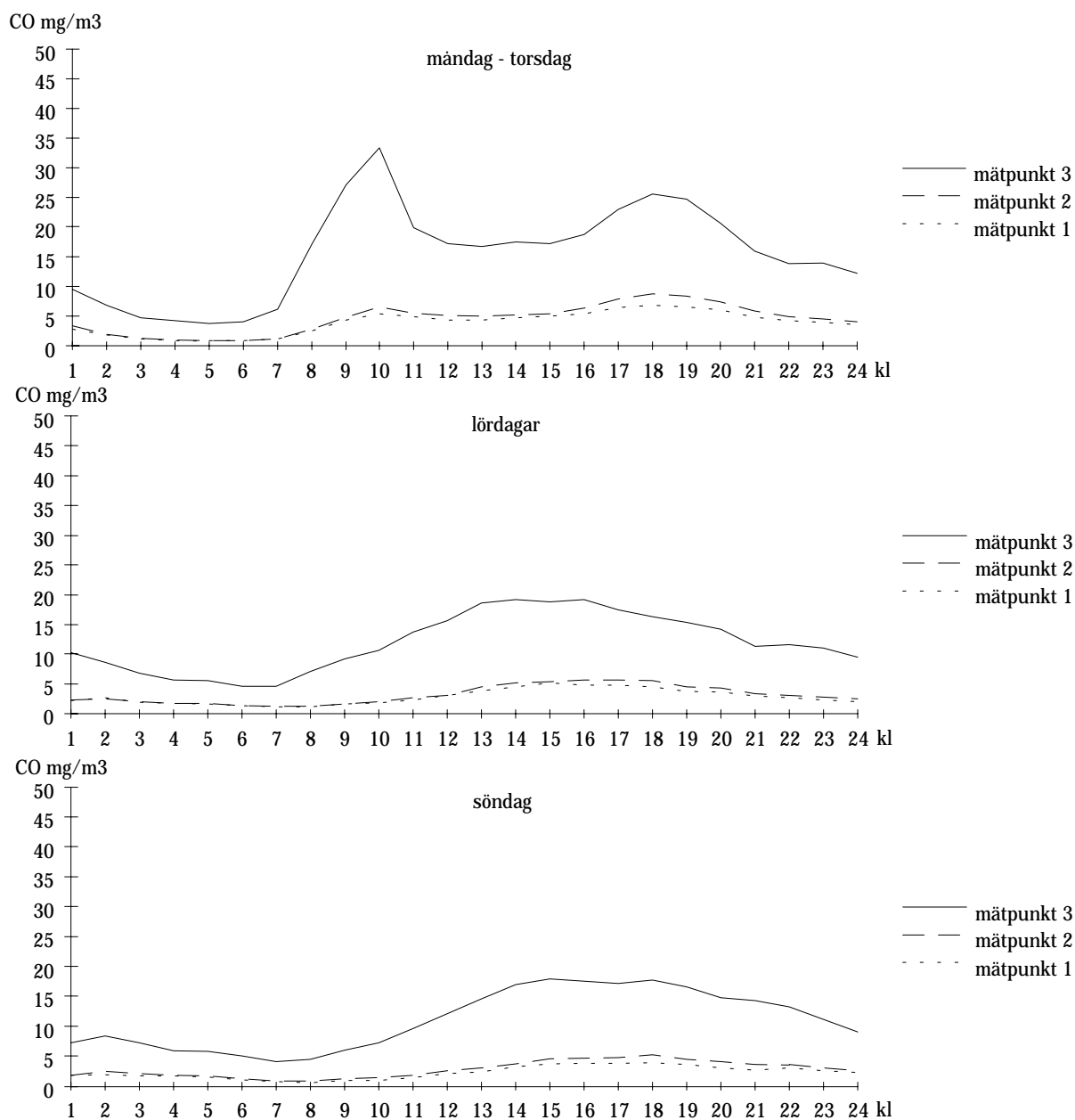
Mätpunkt	Måndag - torsdag				Lördag		Söndag	
	medelv.	98-perc.	99,5-perc.	maxv.	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.
1	89	132	140	143	71	119	64	118
2	99	140	144	152	79	121	73	121
3	195	377	461	516	134	250	136	220

Av tabell 4 framgår att NO₂- halten i mätpunkt 3 är av storleksordningen 2-3 gånger högre än i de två andra mätpunkterna.

Jämförelser kan göras med mätningar i trafikmiljö vid Sveavägen 59. Här har under 1993, måndag - torsdag uppmätts som medelvärde, 98-percentil respektive maxvärde 49, 100 och 164 µg NO₂/m³.

Kolmonoxid, CO.

I figur 11 visas kolmonoxidhaltens variation i de tre mätpunkterna.



Figur 11: Genomsnittlig dygnsrytm, CO.

CO- halten uppvisar i motsats till NO_x och NO_2 i samtliga mätpunkter ett förlopp som i huvudsak motsvarar personbilstrafikens i tunneln. Samvariationen ses särskilt tydligt för mät punkt 3, måndag-torsdag.

Resultatet från CO- mätningarna sammanfattas i tabell 5.

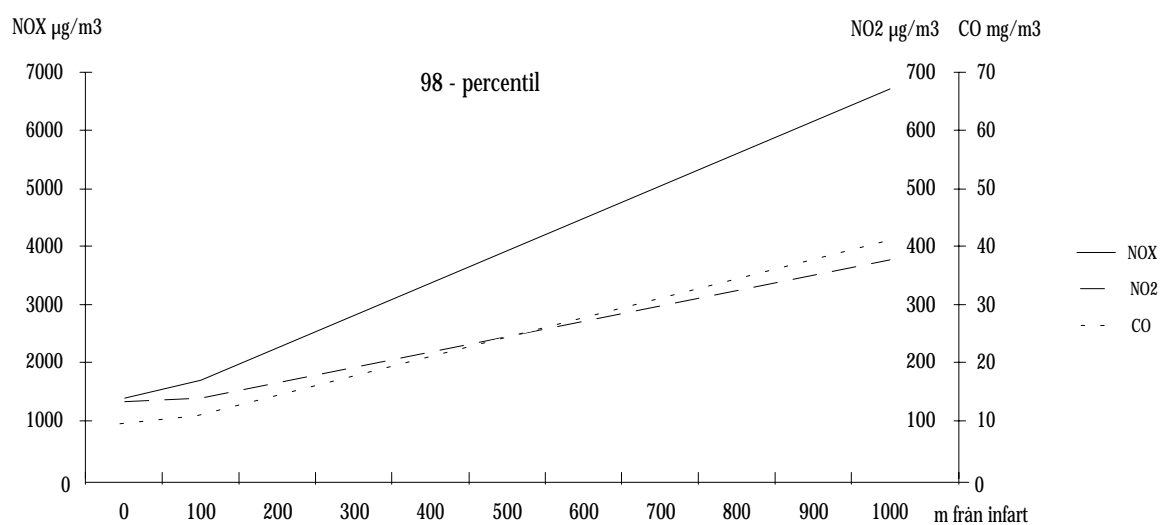
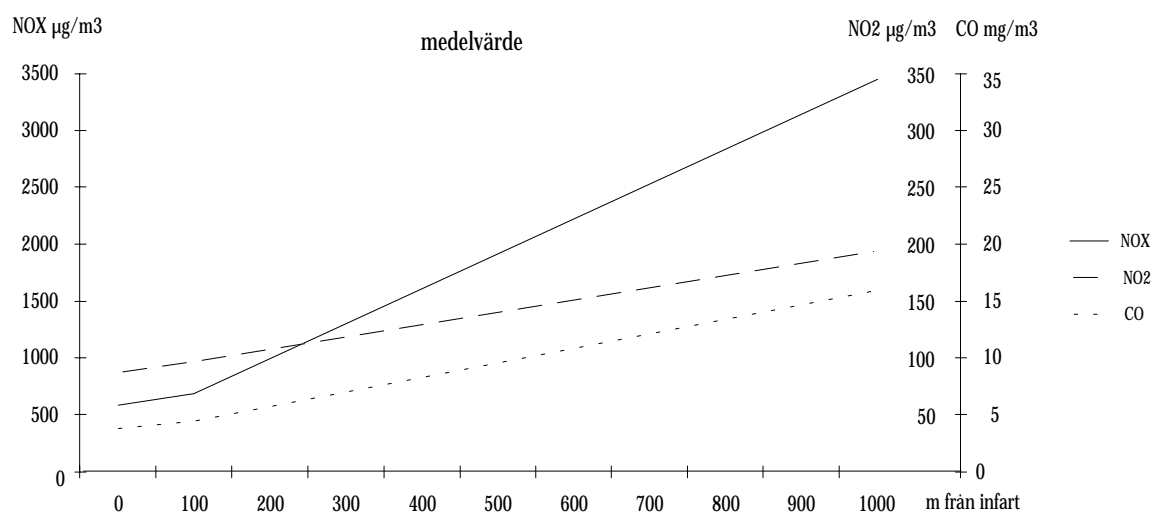
Tabell 5: Resultat från CO- mätningarna, mg/m³.

Mätpunkt	Måndag- torsdag				Lördag		Söndag	
	medelv.	98-perc.	99,5-perc.	maxv.	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.
1	3,8	9,4	9,9	11	2,8	7,5	2,3	8,2
2	4,5	11	12	15	3,2	9,3	3,2	8,4
3	15,6	41	53	57	11,9	31	11,0	24

CO- halten i mätpunkt 3 är storleksmässigt 4 gånger högre än i mätpunkt 1 och 2.

För jämförelse kan nämnas att vid Sveavägen 59 har under 1993, måndag - torsdag uppmätts 2,0 , 7,0 och 12 mg CO/m³ som medelvärde, 98-percentil respektive maxvärde.

I figur 12 visas uppmätta halter av NO_x, NO₂ och CO i relation till avståndet från tunnelinfarten för veckodagarna måndag-torsdag.



Figur 12: Medelvärde och 98-percentil i relation till avståndet från tunnelinfarten.

Halterna av de tre komponenterna ökar i det närmaste rätlinjigt från mätpunkt 1, till mätpunkt 3. Detta gäller både medel- och 98-percentilvärdena. Ett rätlinjigt förlopp är också det mest sannolika. De avvikelser som ses beror troligen på att luften vid mätpunkt 1 och sannolikt också vid mätpunkt 2 inte är homogen vad gäller luftföroreningarna. Värdena i mätpunkt 1 kan därför vara något för höga alternativt i mätpunkt 2 något för låga för att representera luftens halt av föroreningar.

Polycykliska aromatiska kolväten, PAH

PAH- provtagning omfattande partikel- och halvflyktig fas har gjorts i mätpunkt 3 under tio vardagar kl 06-20 med ett prov per dag. Sammanlagt 33 PAH- komponenter har analyserats per prov.

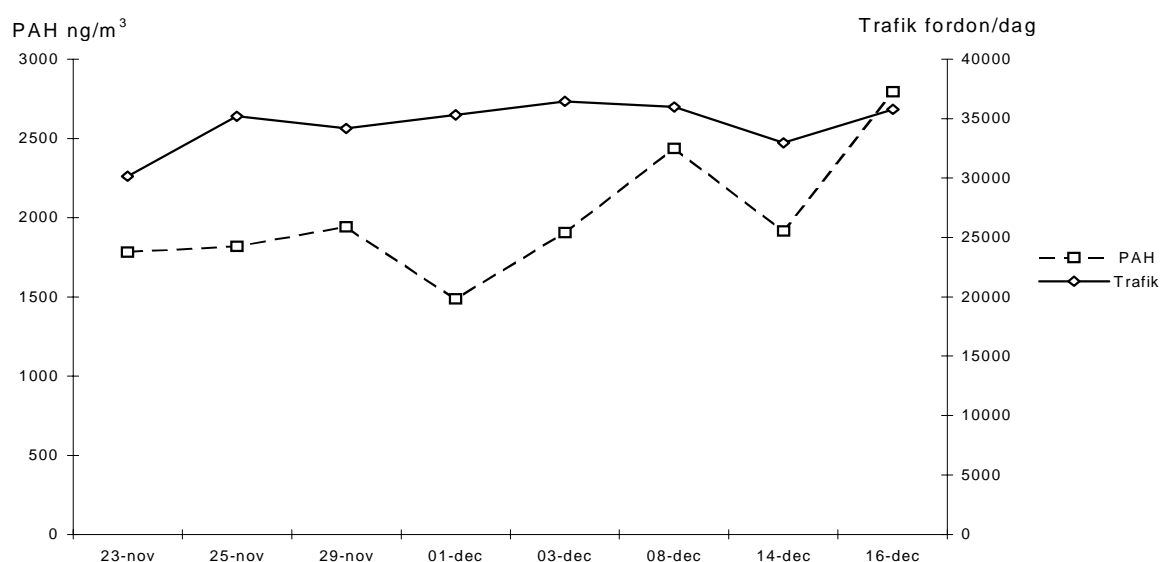
I tabell 6 visas genomsnitts- och maxvärden för Summa PAH och för bens(a)pyren, B(a)P, som är ett känt cancerogent ämne i PAH- gruppen.

Tabell 6: Resultat av PAH- mätningarna, ng/m³.

	Partikelfas		Halvflyktig fas		Partikel-+ halvflyktig fas	
	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.
PAH	790	1012	1220	1863	2010	2794
B(a)P	27	37	0	0	27	37

Andelen partikelbundet PAH av Summa PAH varierade i proven från 31 till 52 %. Bens(a)-pyren som återfanns endast i partikelfasen utgjorde mellan 1,1 och 1,9 % av Summa PAH med ett medelvärde om 1,3 %.

I figur 13 visas uppmätt Summa PAH-halt per dag och motsvarande trafikmängd i tunneln.



Figur 13: PAH- halt och trafikmängd.

En viss om än svag samvariation mellan PAH- halt och trafikmängd i tunneln kan ses.

Halten av PAH i tunneln kan jämföras med vad som uppmätts i trafikmiljö vid Sveavägen 59 under tiden oktober-december 1991. Provtagning gjordes här per hela dygn, dvs omfattade även nattetid. Medelvärdet per vardagsdygn blev för Summa PAH 233 och för B(a)P 1,2 ng/m³. Andelen partikelbundet PAH av Summa PAH uppgick till i genomsnitt 17%. Om skillnaden i tidstäckning per dygn beaktas så kan konstateras att halten av Summa PAH i tunneln är storleksmässigt 5-10 gånger högre och halten av B(a)P 10-20 gånger högre än i gatuluft vid Sveavägen 59.

Flyktiga kolväten.

Provtagning på flyktiga kolväten har gjorts i mät punkt 3 under 5 vardagar med 3 prov per dag. Proven har tagits kl 8 - 9, kl 11 - 12 och kl 16 - 17. Förutom totalhalten av flyktiga kolväten har halten av bensen, toluen, etylbensen och xylener analyserats.

I tabell 7 visas periodmedelvärden och maximala timmedelvärden för mätkomponenterna. Halterna anges som toluenekvivalenter och uttrycks i µg/m³

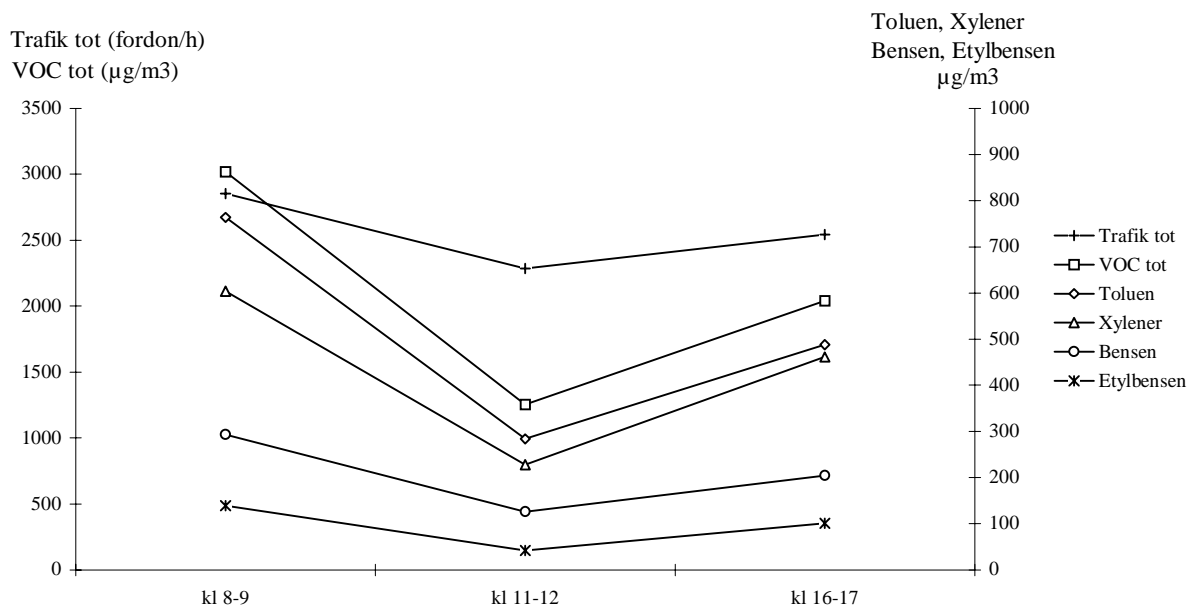
Tabell 7: Resultat av kolvätemätningarna, µg/m³.

kl	Bensen		Toluen		Etylbensen		Xylener		Kolväten totalt	
	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.
08-09	293	359	764	1181	140	194	604	819	3021	4295
11-12	126	151	284	349	43	56	228	296	1252	1819
16-17	204	231	488	637	101	131	461	588	2040	2982

Genomgående har de högsta kolvätehalterna uppmätts under morgonen och de lägsta mitt på dagen. Sett till genomsnittsvärden så utgör bensen ca 10%, toluen ca 25%, etylbensen ca 5% och xylener ca 20% av totala mängden flyktiga kolväten.

Jämförelser kan göras med förhållandena i trafikmiljö på S:t Eriksgatan. Här mäts kontinuerligt, således ej stickprovsmässigt som i tunneln, bensen och toluen. Under 1992, måndag-torsdag kl 06-20 dvs under trafiktid, var på S:t Eriksgatan medelvärdet för bensen 32 µg/m³ och för toluen 117 µg/m³. Timmedelvärden för bensen om uppemot 40 µg/m³ och för toluen om uppemot 180 µg/m³ var vanliga dagtid måndag - torsdag under året.

I figur 14 visas medelvärden för mätkomponenterna och motsvarande värden för totaltrafiken i tunneln.

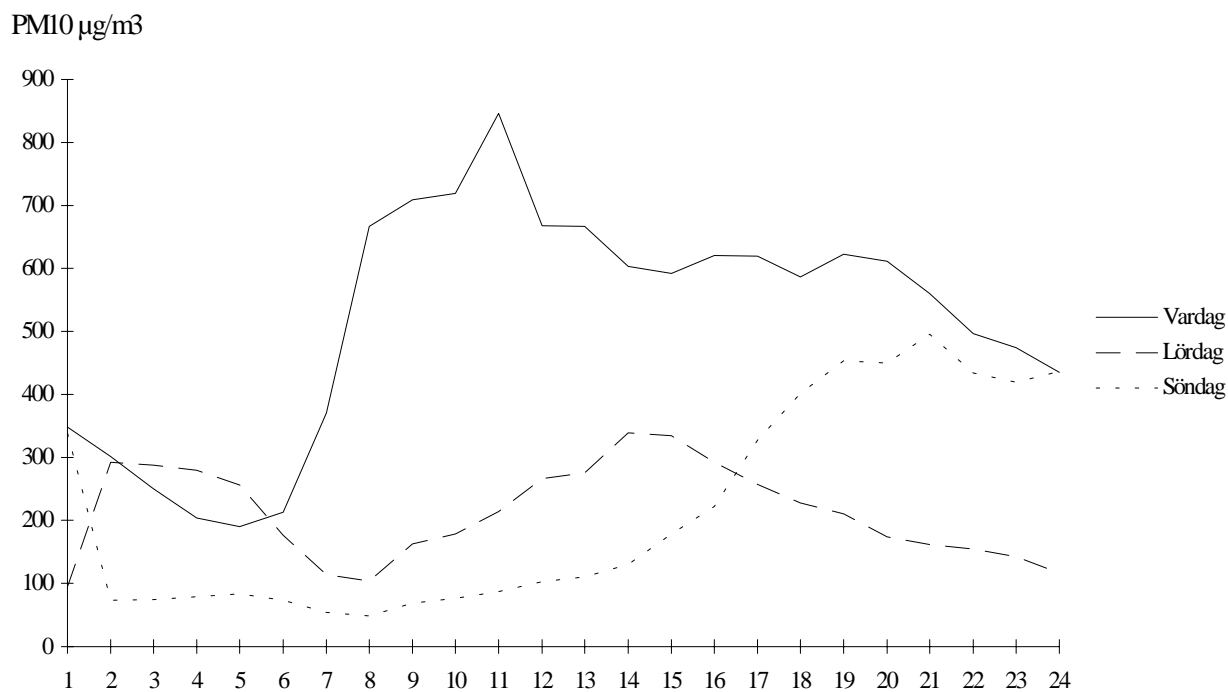


Figur 14: Kolvätehalter och trafikmängd

För samtliga komponenter ses en klar samvariation med trafiken i tunneln.

Inandningsbart stoft, PM10.

I figur 15 visas den genomsnittliga variationen av PM10 under veckans dagar.



Figur 15: Genomsnittlig dygnsrytm, PM10.

PM10- halten följer i mycket grova drag trafikrytmen, jfr fig 3, 4 och 5. Halten är låg under natten och börjar öka på morgonen, när trafiken kommer igång. Särskilt god överensstämmelse med trafiken ses beträffande Lördagar.

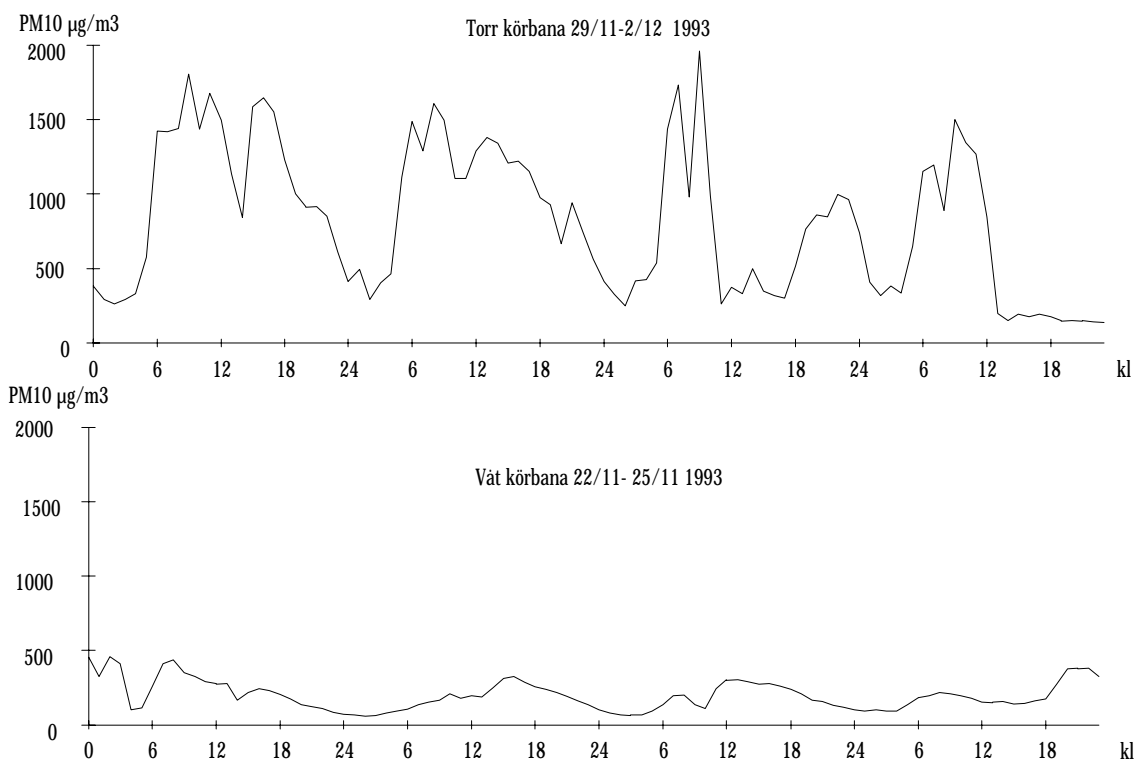
Resultatet av PM10 mätningarna sammanfattas i tabell 8.

Tabell 8: Resultat av PM10- mätningarna, $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Måndag - torsdag				Lördag		Söndag	
medelv.	98-perc.	99,5-perc.	maxv.	medelv.	maxv.	medelv.	maxv.
509	1019	1911	1991	213	1079	318	1172

Som jämförelse kan nämnas att på Hornsgatan var under 1992, måndag-torsdag, för PM10 medelvärdet 34, 98-percentilvärdet 148 och maxvärdet 464 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

PM10- halten i tunnelluften påverkas kraftigt av om vägbanan är torr eller våt. I figur 16 visas förändringen av PM10-halten mellan två perioder måndag-torsdag vilka skiljer sig åt vad gäller torr eller våt körbana.



Figur 16: PM10- halt vid torr och våt körbana.

Under perioden med våt körbana var PM10- halten i tunneln endast ca en fjärdedel av halten vid torr körbana.

Luftföroreningsmätningar under bilresor genom tunneln.

Halten av NO_x, NO₂ och CO har mätts dels utanför och dels i bil vid upprepade resor norrut genom tunneln. Resorna har gjorts den 14.12 kl 12-13, den 21.12 kl 14-15 och den 22.12 kl 8-9. För ändamålet har använts en Volvo 245 av 1992- års modell.

En mätsond var placerad i bilens front, i höjd med motorhuvu ca 0,8 m över mark. En annan sond placerades inuti bilen ovanför instrumentbrädan, nära förarens andningszon. Bilens ventilationsluft kom därmed att blåsa i det närmaste direkt på den senare mätsonden.

Bilens ventilationsreglage kan ställas i flera lägen för att variera ventilationsluftmängden. Dessutom finns ett läge för recirkulation. I detta läge är tilluftsmängden reducerad och luften i kupén recirkuleras. Vid körningarna i tunneln har fläktaglaget stått i läge 2 alternativt i läget för recirkulation.

Erfarenheterna från mätningarna vid körning i tunneln är att luftföroreningsförhållandena såväl utanför som i bilen kan påverkas kraftigt av trafiksituationen i närheten framför bilen under resan. Vid vissa tillfällen, när bilen t.ex. kommit att ligga omedelbart bakom eller blivit omkörd av en större lastbil har kväveoxidhalterna tillfälligt ökat markant. Om istället avståndet till framförvarande bilar hållits förhållandevis stort har halterna varit lägre.

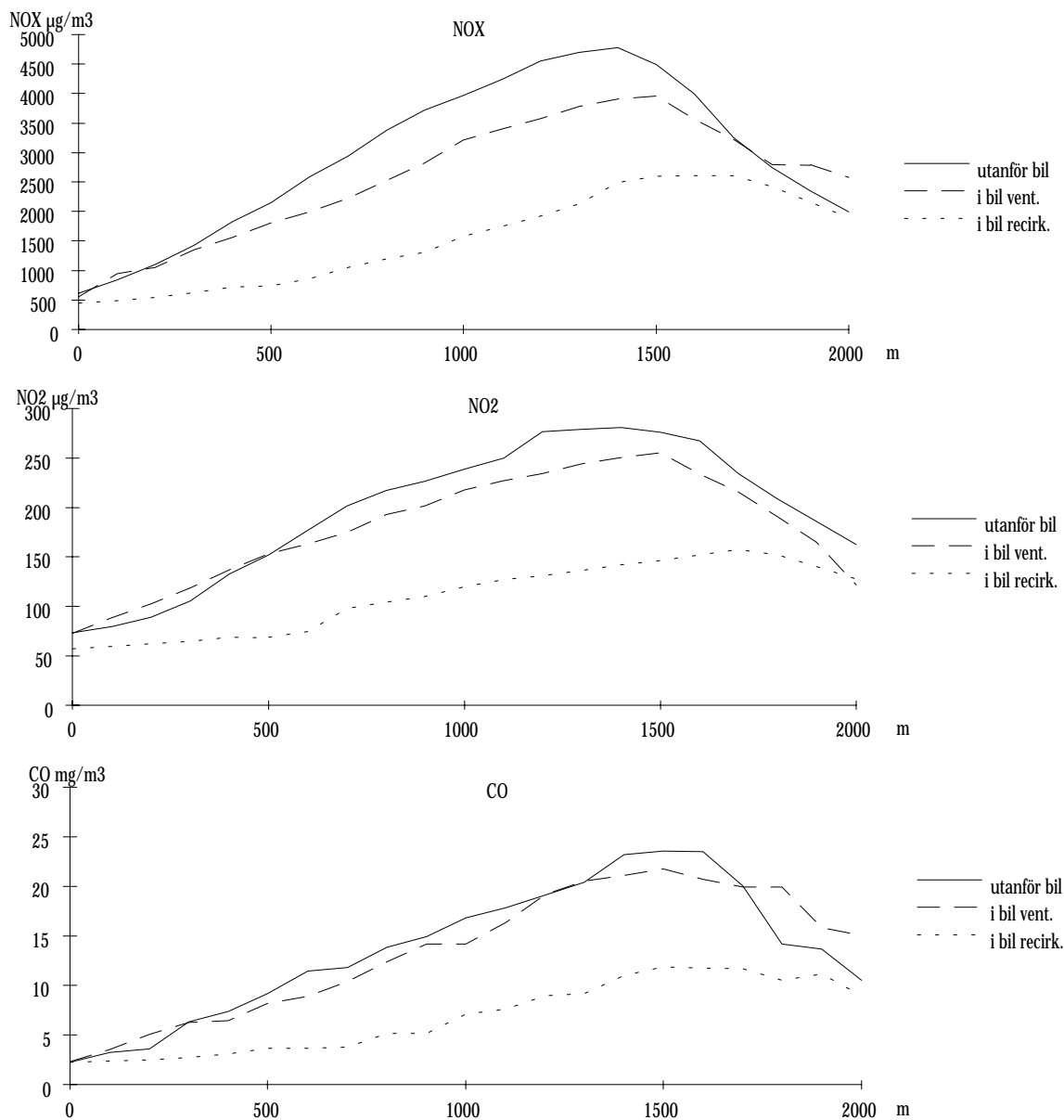
I figur 17 visas det genomsnittliga förloppet för NO_x-, NO₂- och CO- halterna i och utanför bilen vid resorna genom tunneln. Vertikala axeln anger koncentrationen och horisontella axeln avståndet från tunnelinfarten vid Ringvägen, där 0 m motsvarar infarten och 1500 m utfarten vid Söder Mälarstrand.

Gemensamt för de tre haltförloppen är att halterna ökar i stort sett kontinuerligt från in- till utfart såväl utanför som i bilen. Förloppen är i allmänhet snabbare utanför bilen än inuti.

Vid slutet av tunneln är halten av samtliga komponenter klart lägre i bilen än utanför.

Med ventilationsfläkten igång är vid tunnelns slut , 1500 m, halten av samtliga ämnen i genomsnitt ca 10 % lägre i bilen jämfört än utanför. Med fläktaglaget i recirkulationsläge är halten i bilen för de tre komponenterna storleksmässigt endast hälften av halten utanför bilen. Detta ventilationssätt innebär dock att luftföroreningshalten i bilen klingar av långsammare än vid normal ventilation

Ett sätt att minska exponeringen för bilavgaser vid resa genom trafiktunneln är således att hålla bra avstånd till framförvarande fordon samt att minska tilluftsmängden till kupén under tiden i tunneln och att därefter öka tilluften.



Figur 17: Genomsnittligt haltförlopp.

Temperaturmätningar under bilresor genom tunneln.

Av betydelse vid beräkning av avgasspridningen från trafiktunnelns ventilationstorn är ventilationsluftens övertemperatur relativt uteluften.

Lufttemperaturen i tunneln har mätts under resa norrut den 21 december dels på morgonen kl 08.30 dels på eftermiddagen kl 15.00. Termometern var placerad i höjd med bilens tak, ca 1,5 m över körbanan.

Resultatet från temperaturmätningarna visas i figur 18. Vertikala axeln anger temperaturen i $^{\circ}\text{C}$ och horisontella axeln avståndet i m från tunnelinfarten.



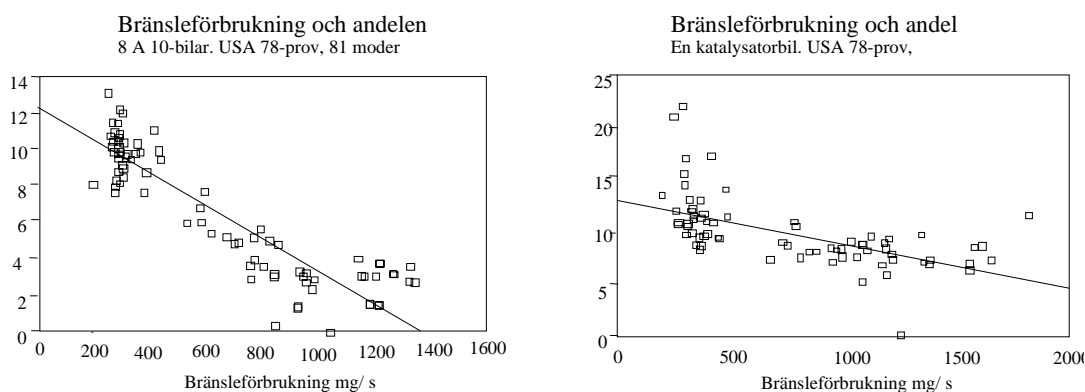
Figur 18: Temperaturförlopp i tunneln.

Temperaturen ökar kontinuerligt i tunneln från infarten fram till påfarten från Götgatan där uteluft tillförs tunneln via påfartsrampen. Därefter sjunker temperaturen något, vilket är särskilt markant under morgonmätningen. Temperaturen börjar sedan åter att öka fram till utfarten från tunneln. Temperaturförhöjningen i tunneln fram till ventilationstornet i Göta Ark, dvs 1000m in i tunneln, var under morgonens högttrafik 4,8 °C och under eftermiddagstrafiken 3,3 °C. Under en motsvarande temperaturmätning den 6 september 1993, vid 11- tiden, uppmättes en temperaturhöjning fram till Göta Ark om 3,6 °C.

Andelen NO₂ av NO_x

Få studier av andelen NO₂ av NO_x i fordonsavgaser finns tillgängliga. I rapport 3633 från naturvårdsverket "Utsläpp av kvävedioxid från personbilar, lastbilar och bussar" redovisas kvävedioxidmätningar utförda av verkets bilavgaslaboratorium i Studsvik avseende tunga fordon och ett mindre antal personbilar.

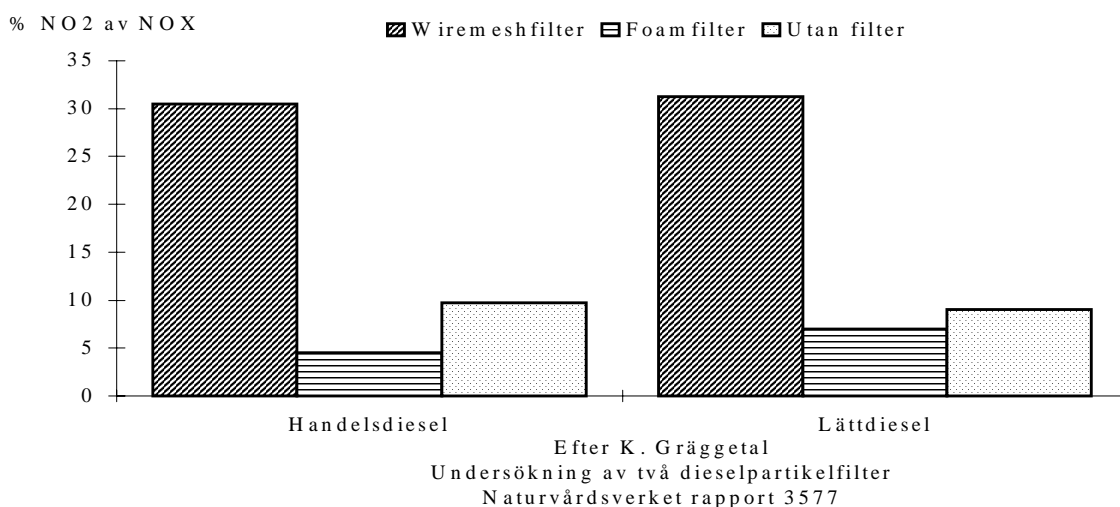
I figur 19 visas uppmätt andel NO₂ av NO_x för 8 orenade och en renad personbil.



Figur 19: Andelen NO₂ av NO_x för icke katalysator- och katalysatorbilar.

Körningen i Söderledstunneln kan uppskattas motsvara en bränsleförbrukning om 1100 mg/sekund, ca 0,75 l/mil. De åtta orenade bilarna visar då på en andel NO₂ av NO_x som är drygt 2 %. Den enda katalysatorbilen har då en andel om cirka 8 %.

I figur 20 ses andelen NO_2 av NO_x för en tung dieselmotor med och utan partikelfilter.



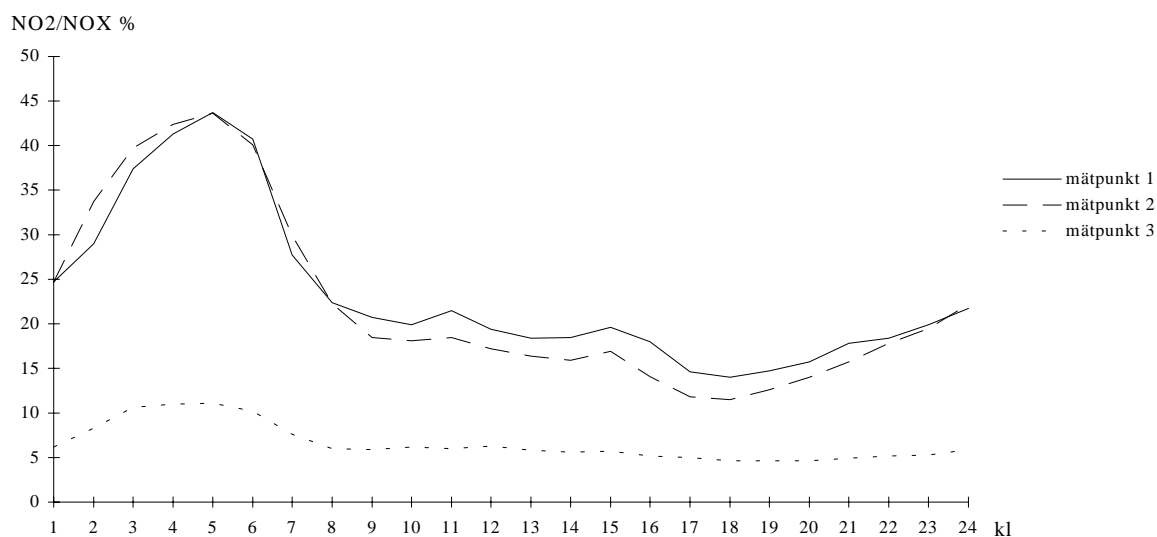
Figur 20: Andelen NO_2 av NO_x för dieselmotor utan och med partikelfilter.

Utan filter är NO_2 -andelen av NO_x cirka 10 %. Med det ena partikelfiltret ökar som synes NO_2 -andelen till ca 30 %. Med det andra filtret minskar andelen till ca 5 %.

Utifrån redovisade förhållanden kan antas att kvoten NO_2/NO_x i avgaserna från en trafikström kan variera från några procent till ett par tiotals procent beroende på körrytm och fordonssammansättning.

Trafiken i tunneln har, som konstaterats i trafikavsnittet, mestadels varit jämnt flytande 70-80 km/t och dominerats av personbilar, vardagar cirka 95 % och övriga dagar cirka 98 %. Ungefär 60 % av personbilarna har antagits ha katalysator.

I figur 21 visas hur kvoten NO_2/NO_x genomsnittligt varierat i de tre mätpunkterna under måndag - torsdag.



Figur 21: Genomsnittlig dygnsrytm NO_2/NO_x måndag - torsdag.

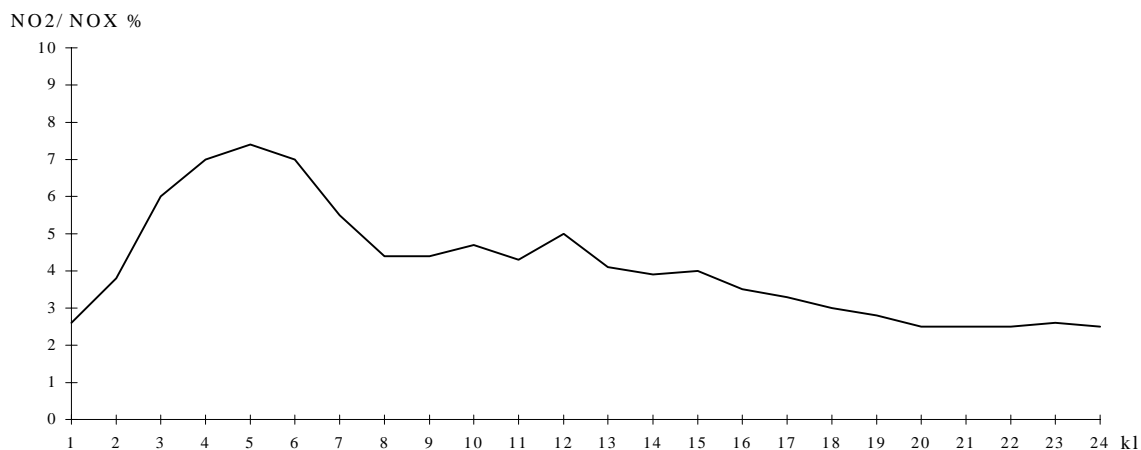
Andelen NO_2 av NO_x är högst i mätpunkt 1 och lägst i mätpunkt 3. Andelen är 1000m in i tunneln är endast ca en fjärdedel av andelen i tunnelmynningen. En tydlig samvariation ses för de tre mätpunkterna med förhöjd NO_2 -andel efter midnatt och lägre på dagen.

Genomsnittligt under dygnet, måndag-torsdag, är i mätpunkt 3 andelen NO_2 av NO_x 6,6 % Som högst uppgår andelen till 25 %. Det senare värdet har uppmätts nattetid.

Kvoten mellan NO_2 och NO_x är i mätpunkt 3 påverkad både av NO_2 - och NO_x -halterna i tilluften och av NO_2/NO_x -relationen i fordonens avgasutsläpp i tunneln. Eventuellt kan även ozonförekomsten i tilluften spela roll genom atmosfärskemiska reaktioner i tunnelluften.

För att få en mer renodlad bild av hur NO_2/NO_x -kvoten påverkas av trafiken i tunneln måste i beräkningarna hänsyn tas enbart till haltökningen av NO_2 och NO_x i tunneln. Från uppmätta halter i tunneln måste därför subtraheras halterna i tilluften. Kvoten NO_2/NO_x kommer då i princip att bygga enbart på emissionen i tunneln.

I figur 22 visas NO_2/NO_x -kvotens genomsnittliga dygnsvariation måndag- torsdag, i mätpunkt 3 baserad enbart på haltökningen i tunneln.



Figur 22: Genomsnittlig dygnsrytm NO_2/NO_x måndag - torsdag baserad enbart på emissionen i tunneln.

Under dagtid avtar NO_2/NO_x - kvoten i stort sett kontinuerligt efter morgontrafiken, med undantag för en svag uppgång mitt på dagen. Mest påminner förloppet om lastbilstrafikens utveckling under dagen. En studie av samvariationen mellan NO_2/NO_x - kvot och olika fordonsslag visar genomgående på låg samvariation. En högsta korrelationskoefficient om 0,32 erhöles för lastbilstrafiken under trafiktid kl 06-20..

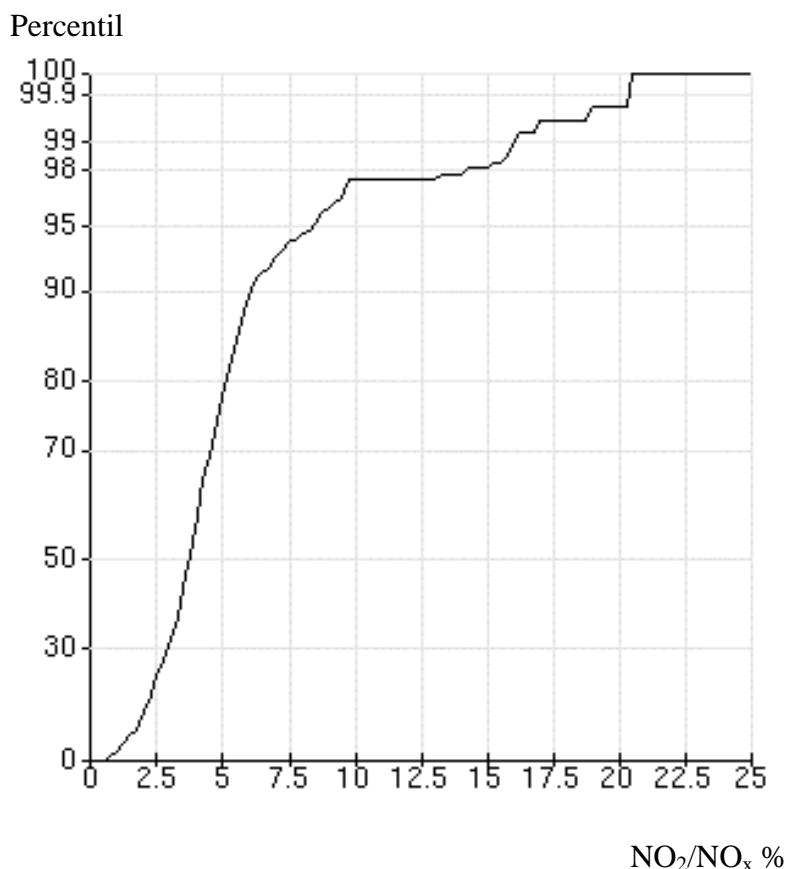
NO_2/NO_x - kvoten i mätpunkt 3, baserad på enbart emissionen i tunneln är under vardagsdygnet i genomsnitt 4,1%. Det högsta värdet 21% har uppmätts nattetid. Sett till dagtid kl 06-20 är kvotens medelvärde 3,9% och det högsta värdet 8,7 %.

Den erhållna genomsnittliga NO_2/NO_x -kvoten dagtid i tunnelluften om c:a 4% är högre än vad som redovisats i naturvårdsverkets rapport rörande orenade personbilar men lägre än värdena för katalysatorbilar och tunga dieselfordon. Här får dock hållas i minnet att körförhållandena i

tunneln i huvudsak motsvarar körning med relativt jämn hastighet 60-80 km/t medan jämförelsevärdena i rapporten avser olika körcykler.

Ökningen av kvotvärdena som sker under natten kan tolkas som en effekt av ozonet i tilluften. Det är först när ozonhalten i tilluften nått en relativt sett hög nivå och samtidigt emissionen i tunneln minskat till tillräckligt låg nivå som den atmosfärskemiska omvandlingen av NO till NO₂ får synbar effekt på kvotvärdena i mät punkt 3.

I figur 23 visas för mät punkt 3 NO₂/NO_x- kvotens kumulativa frekvensfördelning måndag-torsdag baserad på utsläppen i tunneln.



Figur 23: NO₂/NO_x- kvoten, kumulativ frekvensfördelning måndag-torsdag.

Det värde på NO₂- andelen om 7,5% som använts bl.a. för ventilationsberäkningarna avseende Södra Länkens trafiktunnlar motsvarar här 94- percentilen under måndag-torsdag. Kvotvärden högre än 7,5% har således uppmätts under 6% av tiden dessa veckodagar.

Verifiering av EVA-modellens emissionsfaktorer för NO_x och CO.

Trafikens hastighet i tunneln varierar under vardagsdygnet. Enligt trafikmätningarna var medelhastigheten under morgonens högtrafik 40-50 km/h och under dagen 60-75 km/h. De lägre värdena gäller för inre och de högre för yttre körfält. Under natten ökade medelhastigheten till 70-90 km/h. För emissionsberäkningarna antas tunneln närmast motsvara tätortsgata med jämnt flytande trafik 60-70 km/h. Andelen katalysatorbilar av personbilarna är enligt uppgift från Bilindustriföreningen 50% år 1993. Med hänsyn till att katalysatorbilarna är nyare än icke katalysatorbilar och nyare bilar används mer än äldre kan deras andel i tunneln antas vara 60%. Vad gäller åldersfaktorn för NO_x så sätts den till 1,1 för orenad personbil och till 1,3 för renad. Fordonen antas vara varmkörda varför *något kallstarttillägg ej görs*.

Med dessa förutsättningar erhålls emissionsfaktorer för NO_x och CO enligt tabell 8.

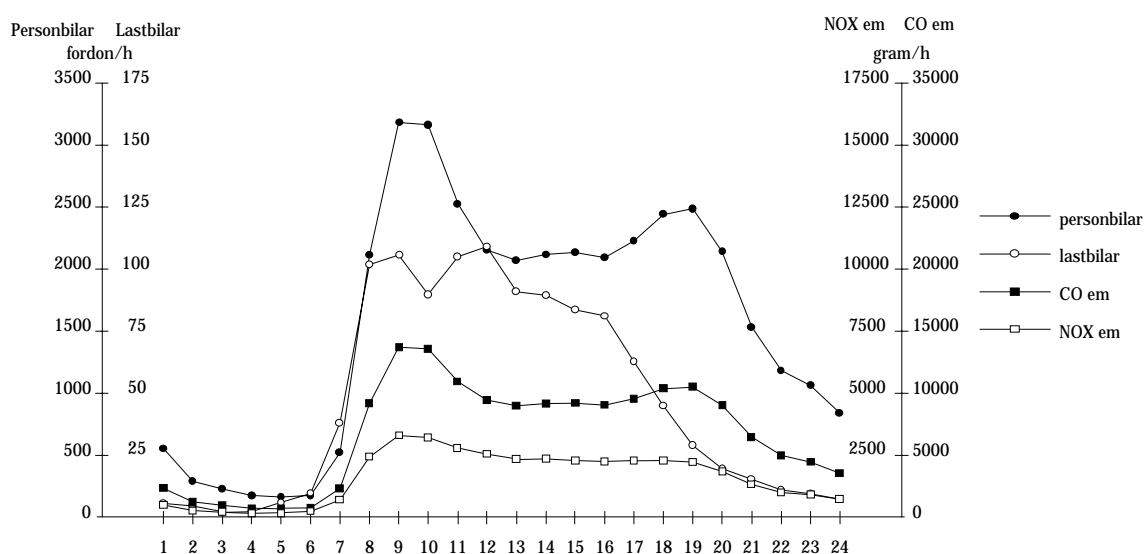
Tabell 9: Ansatta emissionsfaktorer.

Fordonskategori	Emissionsfaktor g/km	
	NO _x	CO
Personbil	0,74	4,15
Personbil med släp	0,8	4,2
Lastbil	5,8	2,5
Lastbil med släp	17,0	3,2
Buss	5,8	2,5

Emissionen i tunneln per fordonskategori beräknas som produkten av antal fordon och respektive emissionsfaktor. Totala emissionen är summan av produkterna.

Personbilarna och lastbilarna är de största emittenterna av NO_x och CO i tunneln.

I figur 24 visas det genomsnittliga antalet personbilar och lastbilar per timme samt den beräknade totala emissionen av NO_x och CO måndag-torsdag.

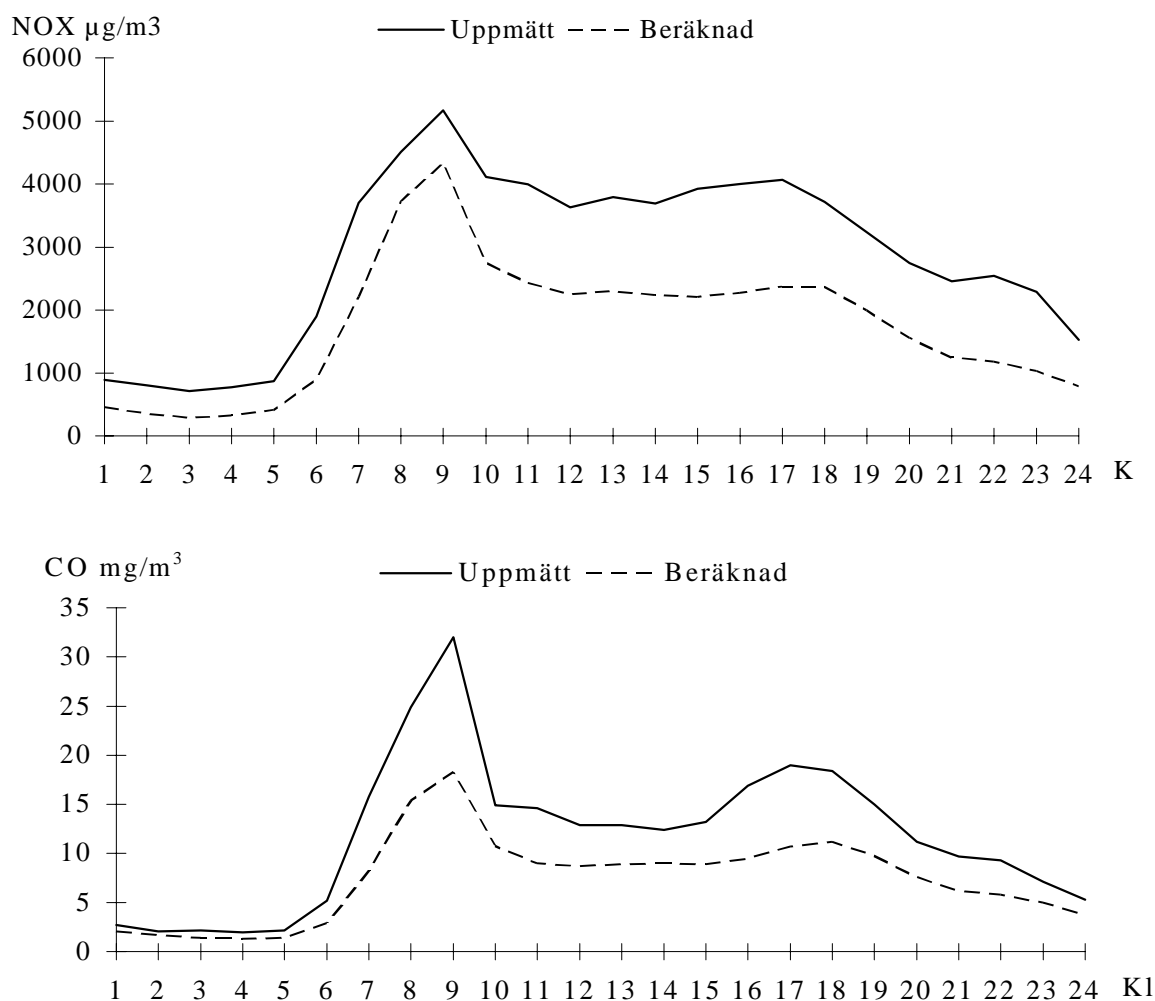


Figur 24: Genomsnittlig dygnsrytm för personbilar och lastbilar samt beräknade emissioner av NO_x och CO, måndag-torsdag.

Den beräknade CO-emissionens förlopp överensstämmer väl med personbilstrafikens med tydligt markerade morgon- och kvällstoppar. När det gäller NO_x -emissionen däremot så uppvisar den i likhet med lastbilstrafiken en mindre markerad morgontopp och ingen kvällstopp. Detta visar att personbilarna dominerar vad gäller CO- emissionen och att lastbilarna spelar en relativt sett större roll vad gäller NO_x - än CO-emissionen i tunneln.

För att beräkna halten av NO_x och CO i tunnelluften divideras emissionsvärdena med motsvarande värden på luftflödet genom tunneln. Luftflödet fås enligt det samband mellan luftmängd och lufthastighet som erhållits vid spårgasmätningarna.

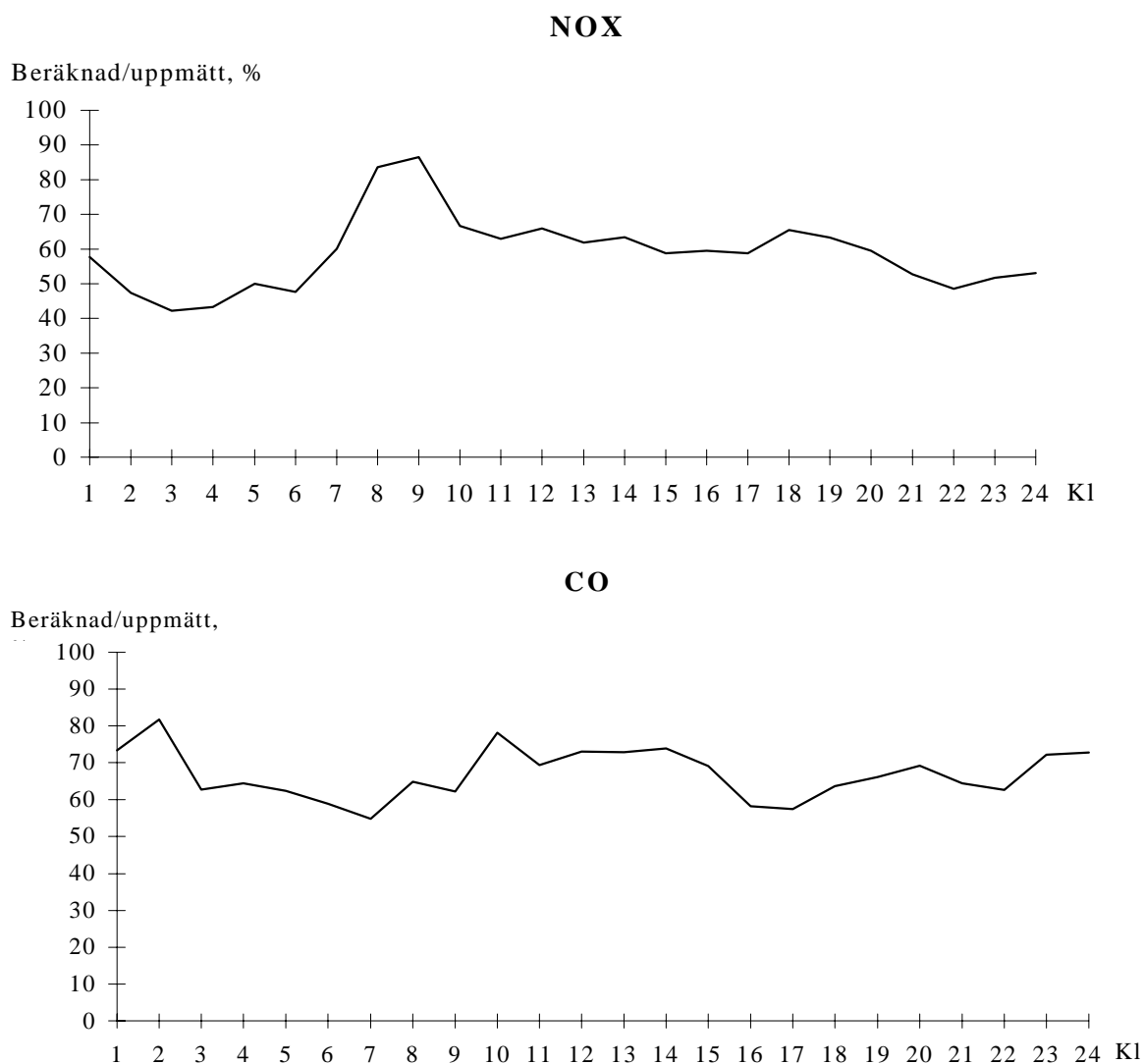
I figur 25 ses de på så sätt beräknade NO_x - och CO-halterna samt motsvarande uppmätta halter i mätpunkt 3. Uppmätta halter har korrigerats med avseende på halter i tilluften, mätpunkt 1, och utgör således haltökningen i tunneln.



Figur 25: Genomsnittlig dygnsvariation för beräknade och uppmätta CO- och NO_x -halter, måndag - torsdag.

Beräknade NO_x - och CO-halter följer väl uppmätta halter. Nivån på beräknade halter ligger dock lägre än på uppmätta. För NO_x är beräknad halt i genomsnitt cirka 60 % och för CO cirka 65 % av uppmätt halt.

Avvikelsen mellan beräknade och uppmätta halter varierar emellertid under dygnet. I figur 26 visas beräknade NO_x - och CO -halter i procent av uppmätta halter under måndag till torsdag.



Figur 26: Genomsnittlig dygnsrytm för kvoten mellan beräknade och uppmätta halter måndag-torsdag.

När det gäller NO_x så når kvoten mellan beräknad och uppmätt halt under morgontrafiken upp till cirka 85 %. Därefter sjunker kvoten och pendlar under dagen i stort sett mellan 60 och 65 %. Nattetid sjunker kvoten till något under 50 %. Ökningen av kvoten under morgontrafiken kan tolkas så att den specifika emissionen per fordon då är lägre, till exempel som följd av lägre medelhastighet, än under resten av dagen. Detta leder till att en relativt sett lägre NO_x -halt mäts upp. Minskningen av kvoten under natten kan bero på att medelhastigheten i tunneln då är hög.

Sett till CO så uppvisar kvoten mellan beräknad och uppmätt halt förhållandevis små variationer under genomsnittsdygnet. Värdena varierar mellan knappt 60 och drygt 70 %. Något klart uttalat mönster ses ej.

Uppmätta NO_x - och CO- halter är genomsnittligt sett av storleksordningen 1,5 gånger högre än beräknade. Avvikelseerna är något för stora för att emissionsfaktorerna skall anses vara verifierade. Tänkbara förklaringar till konstaterade skillnader finns emellertid som rör både beräknade och uppmätta halter.

När det gäller emissionsberäkningarna finns flera osäkerheter involverade som spelar roll för val av emissionsfaktorer, bl a antagandena om andelen katalysatorbilar och kallstarttillägget.

Andelen katalysatorbilar har i beräkningarna antagits vara 60 procent. Om andelen istället sätts till 50% så ökar beräknade halter av NO_x och CO med i genomsnitt 15 respektive 23%. För t ex NO_x innebär detta att beräknad halt under morgonens högtrafik kl 07-08 måndag- torsdag blir helt i nivå med uppmätt. Skillnaderna mellan uppmätta och beräknade halter minskar således om andelen katalysatorbilar sätts lägre.

Fordonen har i beräkningarna antagits vara varmkörda när de når tunneln varför något kallstarttillägg ej medtagits. Studier av kallstarteffekter beträffande NO_x och CO enligt EVA modellen har i efterhand gjorts av EVR & Wahlings på existerande mätmaterial. Andelen fordon som kan bidra med kallstartutsläpp har satts till 80%. Beräknade halter av NO_x ökar genom kallstartbidraget med ca 20 % i genomsnitt måndag-torsdag. För CO fördubblas halterna. Sett till högtafiken så ökar den beräknade NO_x -halten med ca 5% medan CO- halten i stort sett fördubblas. Även om studien får ses som ett räkneexempel med extremt stor andel ej varmkörda fordon visar den att antaganden beträffande andelen kalla fordon spelar stor roll för beräkningsresultatet. Detta gäller speciellt beträffande CO.

Vad gäller mätningarna av NO_x och CO så har mätnoggrannheten hållits på en hög nivå genom dagliga kalibreringar. Interkalibreringar av utrustningar och kalibrergaser har också gjorts under mätperioden. Det är därför uteslutet att fel i mätningarna av NO_x och CO kan vara annat än en marginell förklaring till konstaterade skillnader mellan beräknade och uppmätta halter.

Vad gäller ventilationsmätningarna med spårgas så menar konsulten, Pentiaq AB, att mätfelen är små.

En felmöjlighet kan ligga i antagandet att avgaskomponenterna är jämnt fördelade i luften vid mätplatsen 1000 meter in i tunneln. Det skulle kunna tänkas att NO_x -och CO-halterna vid mätpunkten som var belägen invid höger körfält på cirka 1,7 meters höjd är högre än medelhalten i tunneltvärsnittet. Detta skulle innebära att uppmätta halter blir systematiskt för höga .

En annan felmöjlighet kan finnas i ventilationsmätningarna med spårgas på så sätt att spårgasen, CF_6 , vilken har avsevärt högre densitet än luft ej blivit fullständigt omblandad. Uppmätt spårgashalt kan därför ha blivit för låg och beräknat luftflöde därmed för stort. Detta skulle i sin tur leda till att beräknade NO_x - och CO-halter blivit systematiskt för låga.

Hur pass rimliga förklaringarna till konstaterade haltskillnader är går ej att avgöra utan kompletterande luftmätningar och då i flera punkter i tunneltvärsnittet. Vidare kan det bli nödvändigt att genom manuella räkningar bestämma andelen katalysatorbilar i tunneln..

Under augusti-september 1994 kommer nya mätningar av luftföroreningar och trafik att utföras i Söderledstunneln. Även nya ventilationsmätningar med spårgas är inplanerade. Andelen katalysatorbilar skall beräknas manuellt och medelhastigheten bestämmas noggrannare för att på så sätt säkrare verifiera EVA- modellen.