

Tunnelluftmätningar

Underlag FUD-projekt, Vägverket Region Stockholm

Lars Burman

Innehållsförteckning

1. Inledning	3
2. Vad har mätts - historiska tunnelluftmätningar.....	3
3. Hälsorisker med exponering av luftföroreningar i tunnlar.....	6
4. Vad bör mätas - krav utifrån ett hälsoperspektiv	7
5. Vad mäts – luftföroreningsnivåer i Stockholm	9
5.1 Mätresultat i tunnelluft – halter av kväveoxider, NO _x	9
5.2 Mätresultat i tunnelluft – halter av kvävedioxid, NO ₂	15
5.3 Mätresultat i tunnelluft – andelen kvävedioxid, NO ₂ , av NO _x	21
5.4 Mätresultat i tunnelluft – halter av partiklar, PM10.....	23
6. Litteratur och referenser - tunnelluft	25

Bilagor

1. Inledning

Föreliggande rapport utgör en sammanställning av nationell och internationell litteratur på området tunnelluftmätningar. Dessutom redovisas mätresultat för luftföroreningshalter i främst Stockholms tunnlar. Rapporten har tagits fram av Lars Burman vid SLB-analys på Miljöförvaltningen i Stockholm på uppdrag av Vägverket Region Stockholm (Michelle Benyamine).

Den mesta litteraturen på området kommer från USA där tunnelmätningar har varit en viktig del i luftvårdsarbetet sedan 1970-talet. I Sverige och övriga Europa har tunnelmätningar utförts i mer begränsad omfattning. I Sverige genomfördes de första tunnelluftmätningarna under tidigt 1980-tal i Tingstadstunneln i Göteborg. I Stockholm påbörjades mätningar i Klaratunneln och i Söderledstunneln under början av 1990-talet.

Syftet med tunnelluftmätningar har i många fall varit att kunna bestämma emissioner och emissionsfaktorer för fordonsparken under verkliga förhållanden. Huvudsyftet har inte varit att studera eller följa upp luftföroreningshalter med tanke på hälsopåverkan och exponering som denna rapport fokuserar på. Hälsospekten har dock fått allt större uppmärksamhet under 2000-talet. Det återstår dock fortfarande mycket forskning beträffande olika befolkningsgruppers känslighet för luftföroreningar i vägtunnelmiljö (t.ex. barn, astmatiker) samt olika luftföroreningars hälsoeffekter, t.ex. vilken effekt de allra minsta partikelkomponenterna har. Exponering av luftföroreningar i tunnelmiljö består av väldigt höga halter under kort tid, högst 15-30 minuter.

2. Vad har mätts - historiska tunnelluftmätningar

Publicerade studier angående tunnelmätningar finns från länder som USA, Kanada, Schweiz, Tyskland, England, Belgien, Norge och Sverige. Endast ett fåtal studier finns utanför Nordamerika och Europa (t.ex. Australien och Japan). I de flesta fall har mätningarna använts till att härleda emissionsfaktorer eller utvärdera emissionsmodeller för vägtrafik. De första publicerade tunnelmätningarna är från tidigt 1960-tal och avser Sumner-tunneln i Boston och Blackwall-tunneln i London.

I Tabell 1 följer en översiktlig beskrivning av olika tunnelmätningar rapporterade i litteraturen fram till år 1999 [1]. Tunneln varierar vad gäller t.ex. längd, antal körfält, trafikflöde, körmönster och trafiksammansättning. Mätningar av partiklar i tunnlar; totalt (TSP) eller för storleksfraktionerna PM10 och PM2.5 har skett i begränsad omfattning.

Tabell 1. Översikt av tunnlar och utförda tunnelmätningar fram till 1999 [1]

Tunnel	Längd Rör x filer Lutning	Fordonsflöde varav tunga f. Hastighet	Mätår	Parametrar	Referenser
<i>Allegheny Mountain,</i> Pennsylvania	1850 m 2 x 2 -0.5 %	25-50,000 f/d 20% (10-50%) 76±7 km/h	1970-1981	CO, HC, NO _x , SO ₂ , sulfat, partiklar, 1-nitropyren, mutagenicitet	Pierson <i>et al.</i> , 1976, 1978abc, 1979, 1983, 1995; Japar <i>et al.</i> , 1981; Gorse <i>et al.</i> , 1981, 1983, 1984; Hampton <i>et al.</i> , 1983
<i>Tuscarora Mountain,</i> Pennsylvania	1623 m 2 x 2 < +0.3 %	≈15,000 f/d 18% (6-80%) ≈90 km/h	1970-81, 1992	CO, HC, NO _x , NO ₂ , CO ₂ , SO ₂ , sulfat, TSP, VOC, formaldehyd	Pierson <i>et al.</i> , 1976, 1978ab, 1983, 1994, 1996; Chang <i>et al.</i> , 1981; Sagebiel <i>et al.</i> , 1994, 1996; Knapp, 1994; Bishop <i>et al.</i> , 1994, 1996; Gertler <i>et al.</i> , 1995, 1996abc; Robinson <i>et al.</i> 1996; Zielinska <i>et al.</i> , 1996
<i>Fort McHenry,</i> Baltimore	2174 m 4 x 2 > -3.76 %, < +3.76 %	≈120,000 f/d < 1% - 73 % ≈80 km/h	1992	CO, HC, NO _x , CO ₂ , VOC, formaldehyd	Pierson <i>et al.</i> , 1994, 1996; Sagebiel <i>et al.</i> , 1994, 1996; Knapp, 1994; Bishop <i>et al.</i> , 1994, 1996; Gertler <i>et al.</i> , 1995, 1996abc; Robinson <i>et al.</i> 1996; Zielinska <i>et al.</i> , 1996
<i>Caldecott,</i> San Francisco	1100 m 3 x 2 +4.2 % (-4.2 %)	≈110,000 f/d < 1 % ≈70 km/h	1983, 1989, 1991, 1993, 1994, 1995, 1996	CO, HC, NO _x , NO ₂ , HNO ₂ , CO ₂ , VOC, aldehyder, partiklar, PAH	Hering <i>et al.</i> , 1984; Venkataraman <i>et al.</i> , 1994; Zielinska <i>et al.</i> , 1994; Kirchstetter <i>et al.</i> , 1994, 1995, 1996abc, 1997, 1999abc
<i>Van Nuys,</i> Los Angeles	222 m 2 x 3 > -1.7 %, < +1.0 %	50-60,000 f/d ≈3 % 60-80 km/h (→20 km/h)	1987, 1995	CO, HC, NO _x , CO ₂ , VOC, PM ₁₀ , PM _{2.5} , PAH	Ingalls, 1989; Pierson <i>et al.</i> , 1990, 1997; Gertler <i>et al.</i> , 1996c, 1997abc
<i>Sepulveda,</i> Los Angeles	582 m 2 x 3 ≈horisontell	≈100,000 f/d 2-3 % 70 km/h	1989, 1995, 1996	CO, HC, NO _x , CO ₂ , VOC, PM ₁₀ , PM _{2.5} , PAH	Venkataraman <i>et al.</i> , 1994; Gertler <i>et al.</i> , 1996c, 1997ac; Pierson <i>et al.</i> , 1997
<i>Lincoln,</i> New York	2280 - 2504 m 3 x 2 ingen uppgift	≈110,000 f/d 13% (9-22%) 40-45 km/h (→30 km/h)	1970, 1982, 1995	CO, HC, NO _x , CO ₂ , VOC	Louneman <i>et al.</i> , 1974, 1986; Gertler <i>et al.</i> , 1996c, 1997ac; Pierson <i>et al.</i> , 1997
<i>Callahan,</i> Boston	1545 m 1 x 2 ingen uppgift	≈50,000 f/d 4% (2-7%) 40 km/h (20-60 km/h)	1995	CO, HC, NO _x , CO ₂ , VOC	Gertler <i>et al.</i> , 1996, 1997ac; Pierson <i>et al.</i> , 1997
<i>Deck Park,</i> Phoenix	804 m 3 x 5 ingen uppgift	≈120,000 f/d 5% (2-8%) 90-100 km/h	1995	CO, HC, NO _x , CO ₂ , VOC	Gertler <i>et al.</i> , 1996c, 1997ac; Pierson <i>et al.</i> , 1997

Tabell 1 (forts). Översikt av tunnlar och utförda tunnelmätningar fram till 1999 [1]

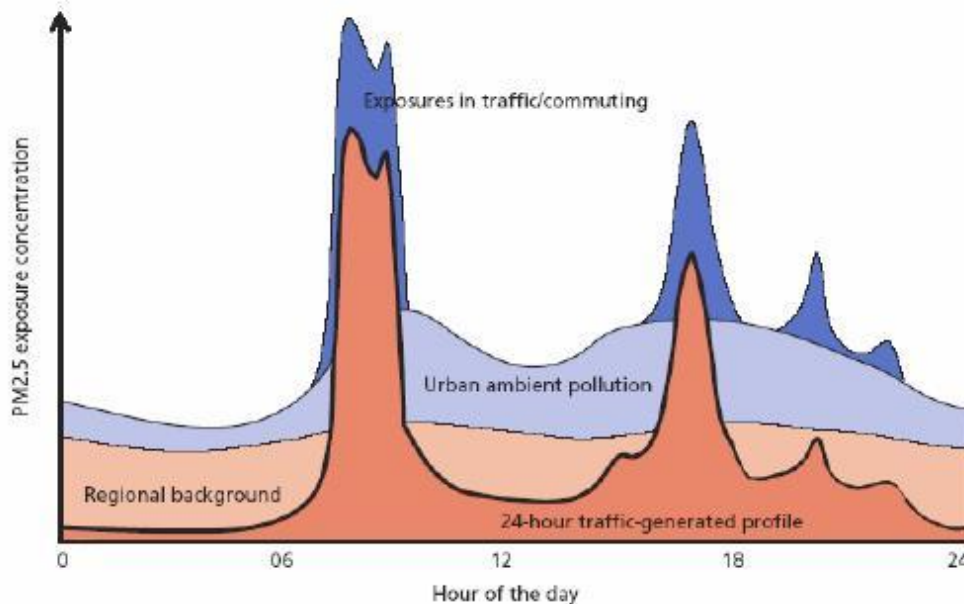
Tunnel	Längd Rör x filer Lutning	Fordonsflöde varav tunga f. Hastighet	Mätår	Parametrar	Referenser
<i>Baltimore Harbor, Baltimore</i>	2042 m 2 x 2 ingen uppgift	≈80,000 f/d 20% ingen uppgift	1973, 1975, 1985, 1986	Partiklar, PAH	Fox <i>et al.</i> , 1976; Ondov <i>et al.</i> , 1982; Benner <i>et al.</i> , 1989
<i>Cassiar, Vancouver, Kanada</i>	730 m < +1.66%, > -1.29 2 x 2	≈60,000 f/d 90 km/h 10% (4-20%)	1993, 1995, 1996	CO, HC, NO _x , CO ₂ , VOC, PM ₁₀ , PM _{2.5}	Gertler <i>et al.</i> , 1994, 1997d; McLaren <i>et al.</i> , 1996; Rogak, 1996; Rogak <i>et al.</i> , 1998ab
Två tunnlar i Chicago	inga uppgifter	inga uppgifter	1990-92	PAH	Khalili <i>et al.</i> , 1995
Tunnel i Atlanta	inga uppgifter	inga uppgifter 50-90 km/h	1990	VOC	Conner <i>et al.</i> , 1995
<i>Gubrist, Zürich</i>	ca. 3 km 2 x 2 +1.3%	ingen uppgift 10% (→30%) ≈90 km/h (80-100 km/h)	1993	CO, HC, NO _x , VOC, PM ₃ , PAH, sot	Stahelin <i>et al.</i> , 1995, 1997, 1998; Weingartner <i>et al.</i> , 1997
<i>Craeybeckx, Antwerpen</i>	1600 m 2 x 5 ≈horisontell	90,000 f/d 20% 90-120 km/h	1991	CO, HC, NO _x , VOC, PAH	De Fré <i>et al.</i> , 1992
<i>Vålerengatunneln, Oslo</i>	820 m 2 x 2-3 >-3.5%, <+3.5%	≈25,000 f/d 15% (rör 1), 19% (rör 2)	1989	CO, NO _x , NO ₂ , aldehyder, PM ₁₀ , PAH, PCDF	Larssen, 1990; Oehme <i>et al.</i> , 1991
<i>Tingstadstunneln, Göteborg</i>	454 m 2 x 3 >-4%, <+4%	≈100,000 f/d ≈70 km/h (→20 km/h)	1982, 1991, 1992, 1994	CO, HC, NO _x , NO ₂ , CO ₂ , VOC, formaldehyd, PAH	Steen <i>et al.</i> , 1984; Brorström-Lundén <i>et al.</i> , 1985; Barrefors <i>et al.</i> , 1992; Sjödin <i>et al.</i> , 1995, 1997ab
<i>Söderledstunneln, Stockholm</i>	1500 m 2 x 2 ≈horisontell	≈80,000 f/d 65-80 km/h (→30-40 km/h)	1993, 1994, 1995, 1996	CO, NO _x , NO ₂ , VOC	Westerlund <i>et al.</i> , 1994ab; Johansson <i>et al.</i> , 1996, 1997
<i>Elbtunnel, Hamburg</i>	2653 m 3 x 2 ingen uppgift	70-100,000 f/d 10% (→20%) 70-110 km/h	1989, 1992	partiklar, PAH, VOC, N ₂ O, CO ₂	Stechmann <i>et al.</i> , 1990; Berges <i>et al.</i> , 1993
<i>Klaratunneln, Stockholm</i>	500 m 2 x 2 horisontell	≈40,000 f/d 0% (+ bussar) 0-70 km/h	1991-	NO, NO ₂ , CO, CO ₂	Westerlund <i>et al.</i> , 1997
Citytunnel i Budapest	350 m 2 x 1 ingen uppgift	→2,000 f/h 0% (+ bussar) 15-60 km/h	1990	VOC	Laszlo <i>et al.</i> , 1994
<i>Queensway, Birmingham</i>	600 m 2 x 2 ingen uppgift	ingen uppgift ingen uppgift 65 km/h	1992	PAH	Smith <i>et al.</i> , 1996
<i>Sydney Harbour, Sydney</i>	2300 m 2 x 2 ingen uppgift	ingen uppgift ingen uppgift 75 km/h	1994	VOC	Duffy <i>et al.</i> , 1996
<i>Tsuburano, Japan</i>	1680 m ingen uppgift +0.4%	≈30,000 f/d <10%→80% ≈90 km/h	1978	PAH	Handa <i>et al.</i> , 1980
<i>Nihonzaka, Japan</i>	2045 m ingen uppgift -1.0%	≈30,000 f/d <10%→80% ≈90 km/h	1980	PAH	Handa <i>et al.</i> , 1984

3. Hälsorisker med exponering av luftföroreningar i tunnlar

Tunnelluften innehåller en mycket komplex blandning av gasformiga och partikelbundna luftföroreningar, som har väldigt olika kemiska och fysikaliska egenskaper. Såväl grova (2,5-10 μm) som fina (<2,5 μm) och ultrafina partiklar är skadliga för hälsan. Grova partiklar återfinns i vägdamm och påverkar andning och ger luftvägsbesvär medan fina och framförallt ultrafina partiklar orsakar ökad dödlighet i hjärt- och kärlsjukdomar och lungcancer.

Av betydelse för hälsoeffekterna är den **dos** som människor utsätts för. Dosen är produkten av luftföroreningshalter och exponeringstid. Även om exponeringstiden är kort, som i tunnlar, kan således dosen bli väldigt hög om luftföroreningshalterna är höga. Exponeringen kan därmed utlösa akuta hälsoeffekter. Särskilt utsatta är då människor som redan har sjukdomar i luftvägar, hjärta eller kärl samt äldre människor och barn. Den senare gruppen är extra känslig eftersom barns lungor är under utveckling samt att de blir mer exponerade per kilo kroppsvikt jämfört med vuxna [2].

Tunnelexponering kan även bidra till uppkomst av kroniska, d.v.s. långsiktiga hälsoeffekter som kan leda till förtida död. För de som dagligen använder tunnlar under lång tid, t.ex. arbetspendlare, adderas tunnelexponeringen till den övriga exponeringen och bidrar därmed till uppkomst av kroniska hälsoeffekter, som t.ex. cancer. De finns många cancerframkallande avgaskomponenter i tunnelluften som t.ex. bensen, formaldehyd och bens(a)pyren. För dessa antas risken bero av dosen utan några tröskelnivåer under vilka exponeringen är betydelselös. Varje exponeringsbidrag ökar sannolikheten för tumörutveckling.



Figur 1. Schematisk variation för exponeringen under ett dygn i en stad (partiklar, PM2.5). (Sanderson et al., 2005 [3]). Under dagtid förhöjs exponeringen kraftigt i samband med pendling till och från arbete samt även ökad exponering generellt på grund av den lokala trafikens bidrag. Sker arbetspendlingen via tunnlar ökar exponeringen ytterligare.

4. Vad bör mätas - krav utifrån ett hälsoperspektiv

Det saknas fortfarande mycket kunskap kring vilken luftkvalitet som finns i tunnlar och vilka krav som bör ställas på tunnelluften utifrån ett hälsoperspektiv. Det finns inte heller något EU-direktiv som reglerar luftkvaliteten i tunnlar. Gränsvärdena i det nya EU-direktivet (2008/50/EG) om luftkvalitet gäller inte på vägarnas körbana och mittremsa. De svenska miljökvalitetsnormerna gäller för utomhusluft vilket enligt 3§ i förordningen (2001:527) är ”utomhusluften med undantag av arbetsplatser samt väg- och tunnelbanetunnlar”. Normerna gäller enligt Naturvårdsverket inte heller för luften i fordonen (Naturvårdsverkets yttrande över Stockholms läns förslag till åtgärdsprogram, Dnr 543-4224-03).

Internationellt dimensioneras tunnelventilationen ofta utifrån WHO:s rekommenderade riktvärden för luftkvalitet. Historiskt sett har **kolmonoxid, CO**, varit den dimensionerande föroreningen vid reglering av tunnelluften. Men avgasernas sammansättning har ändrats och kommer att fortsätta att ändras när nya bränslen och fordon fasas in samtidigt som nya rön uppkommer vad gäller olika ämnens hälsopåverkan. CO-utsläppen har minskat kraftigt p.g.a. den katalytiska avgasreningen, mycket mer än utsläppen av andra komponenter som t.ex. avgasrelaterade partiklar. Detta gör CO mindre lämplig som exponeringsindikator. I Schweiz, Tyskland och Österrike idag kontrolleras tunnelluften genom att mäta och övervaka kolmonoxid [4].

I Stockholm idag, bl.a. i Södra Länken tillämpas riktvärden för **kvävedioxid, NO₂**. Halten 0,4 mg/m³ i tunnelluften får inte överskridas på någon plats i tunneln sett som ett medelvärde över en timme. I Göteborg (Götatunneln) får värdet på 0,4 mg NO₂/m³ överskridas 43 timmar per år (percentilvärde) och det avser medelvärdet längs hela tunnelsträckan. PIARC som är ett internationellt samarbetsorgan inom vägtrafiksektorn rekommenderar 2,0 mg NO₂/m³ som ett medelvärde i tunnlar som kan överskridas 2 % av tiden [5]. Under senare år har det dock uppmärksammats att NO₂ inte heller är en lämplig indikator för tunnelluften. Det beror på att relationen mellan NO₂ och andra avgaskomponenter kan skilja sig betydligt mellan tunnel- och omgivningsluft, vilket beror på att ozonet som oxiderar NO till NO₂ förbrukas i tunneln om det inte finns något inkommande flöde av frisk luft. Detta innebär mindre NO₂ som därigenom inte blir representativt för exponeringen.

En bättre exponeringsindikator på avgasemissionerna är den totala halten av **kväveoxider, NO_x** (d.v.s. summan av NO och NO₂). NO_x är reglerat i avgaslagstiftningen och emissionsfaktorerna för olika fordon är relativt väl kända och uppdateras kontinuerligt. NO_x är i stort sett inert i tunnelmiljön och mätinstrumenten oftast väl kontrollerbara och de ger bra precision och noggrannhet även för korttidsmedelvärden (15 minuter).

Mätningar av NO_x i tunnelluft har varit ganska vanligt förekommande både i Sverige och internationellt. Det beror på att det är en reglerad förorening och att emissionsfaktorer för vägtrafiken anges som summa kväveoxider. Det är dock ganska ovanligt med ventilationskrav för NO_x. I Norge har man s.k. designkriterier för ventilationsdimensionering av tunnlar, där bland annat summa kväveoxider ingår. Nivån är dock mycket hög - 15 ppm vilket motsvarar 29 mg/m³. Det framgår dock inte av litteraturen vad medelvärdetiden är för detta riktvärde (Tabell 1). Vägverket Region Stockholm har föreslagit för Miljöförvaltningen i Stockholm att övergå till NO_x som indikator på luftkvalitet i tunnlar och då i en första försöksperiod ha som mål i den dagliga driften att inte överskrida NO_x-halten 5 mg/m³ luft, som timmedelvärde.

Från hälsosynpunkt pekar forskningen på att det är **avgaspartiklar** som är mycket betydelsefulla. Mängden avgaspartiklar kan antingen mätas i form av masskoncentrationen eller antalskoncentrationen. Mätning av antal partiklar i tunnelluften är sannolikt betydligt mer komplicerat än mätning av massan partiklar eftersom instrumenten för antalsmätning kan komma att kräva mera tillsyn. NO_x-mätningar kan fungera som indikator för avgaspartiklar.

Mätningar av **partikelfractionen PM10** (masskoncentrationen av partiklar mindre än 10 µm i diameter) avspeglar främst mängden grova partiklar i luften, vilka kommer från slitage av vägbanor och bromsar. Variationerna i emissionerna av grova partiklar skiljer sig mycket från variationerna i avgaspartikelhalter både på kort och på lång sikt. Hälsoriskerna förknippade med korttidsexponering för de grova partiklarna är sannolikt också annorlunda än hälsoriskerna förknippade med avgaspartiklar. *PM10 är således mycket viktigt att mäta från hälsosynpunkt och utgör därmed ett komplement till NO_x och/eller avgaspartikelmätningar.*

Som tidigare nämndes har PM10-mätningar i tunnelmiljö skett i mycket begränsad omfattning. I Södra länkens tunnlar i Stockholm mäts dock PM10 kontinuerligt sedan tunneln invigdes 2004 (halter redovisas i avsnitt 5.4). Något riktvärde för PM10 i tunnelluften finns dock inte utan Södra länken är dimensionerat för att klara kvävedioxidnormerna och inte partikelhalter. Men enligt Bertil Forsberg, docent i yrkesmedicin vid Umeå universitet, bör inte partikelhalter över 400-800 mikrogram per kubikmeter överstigas i en tunnel med tanke på hälsan [6].

Tabell 2. Riktvärden för dimensionering av ventilation i tunnlar i olika länder.

Plats	Kolmonoxid, CO	Kvävedioxid, NO ₂	Kväveoxider, NO _x	Total mängd svävande partiklar, TSP	Kväve-monoxid, NO	Medelvärdesperiod
Norge ¹⁾	200 ppm (232 mg/m ³)	1,5 ppm (2,9 mg/m ³)	15 ppm (29 mg/m ³)	1,5 mg/m ³	-	?
Österrike	100 ppm (116 mg/m ³)	-	-	-	25 ppm (48 mg/m ³)	?
England ²⁾	200 ppm (232 mg/m ³)	5 ppm (9,6 mg/m ³)			35 ppm (44 mg/m ³)	15 minuter
Stockholm		0,4 mg/m ³	Förslag 5 mg/m ³			Maxvärde för alla platser i tunneln under en timme
Göteborg	30 mg/m ³	0,4 mg/m ³				Timmedelvärde för färd genom tunneln. Får överskridas 43 timmar per år.

¹⁾ Designkriterier för ventilationssystem.

²⁾ Maximalt tillåtna nivåer i tunnlar.

5. Vad mäts – luftföroreningsnivåer i Stockholm

De högsta luftföroreningshalterna i vägtunnlar är mycket högre än de som mäts upp på längs en starkt trafikerad gata eller väg. Exempelvis har den 4 kilometer långa tunneln i Södra Länken i Stockholm i genomsnitt ca 10 gånger högre luftföroreningshalter än vad som mäts upp på Hornsgatan och vid Essingeleden. Hur höga halterna blir i en tunnel beror förutom på trafiken och emissionerna också på tunnelns längd, och övrig utformning, t.ex. ventilationen. Halterna varierar avsevärt över tid samt med bakgrundsluft och väderleksförhållanden.

Nedan följer en sammanställning och jämförelse mellan olika tunnelluftmätningar i Stockholmsområdet under 2000-talet fram t.o.m. år 2009. Vid samtliga tunnlar mäts luften kontinuerligt. Redovisade data är preliminära och därför behäftade med osäkerheter men ger ändå en fingervisning om nivåer. En grov kvalitetsgranskning har gjorts vid framtagande av data.

Tabell 3. Översikt för redovisning av tunnelluftmätningar i Stockholm.

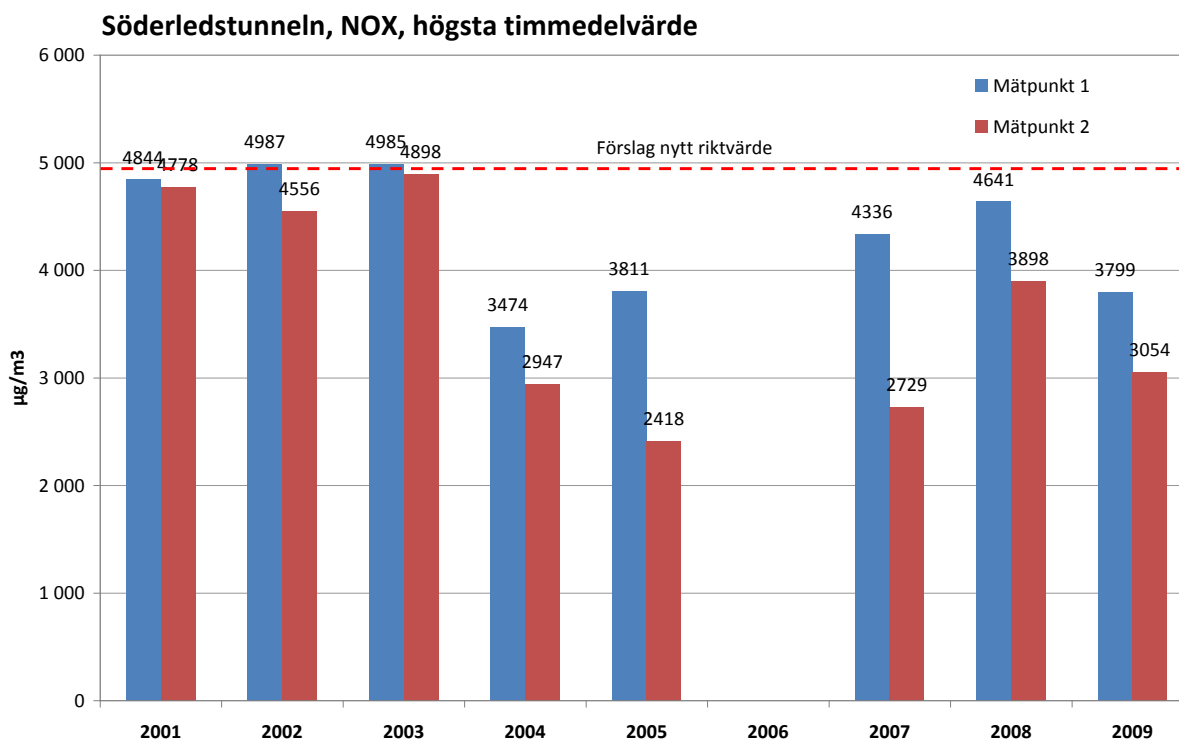
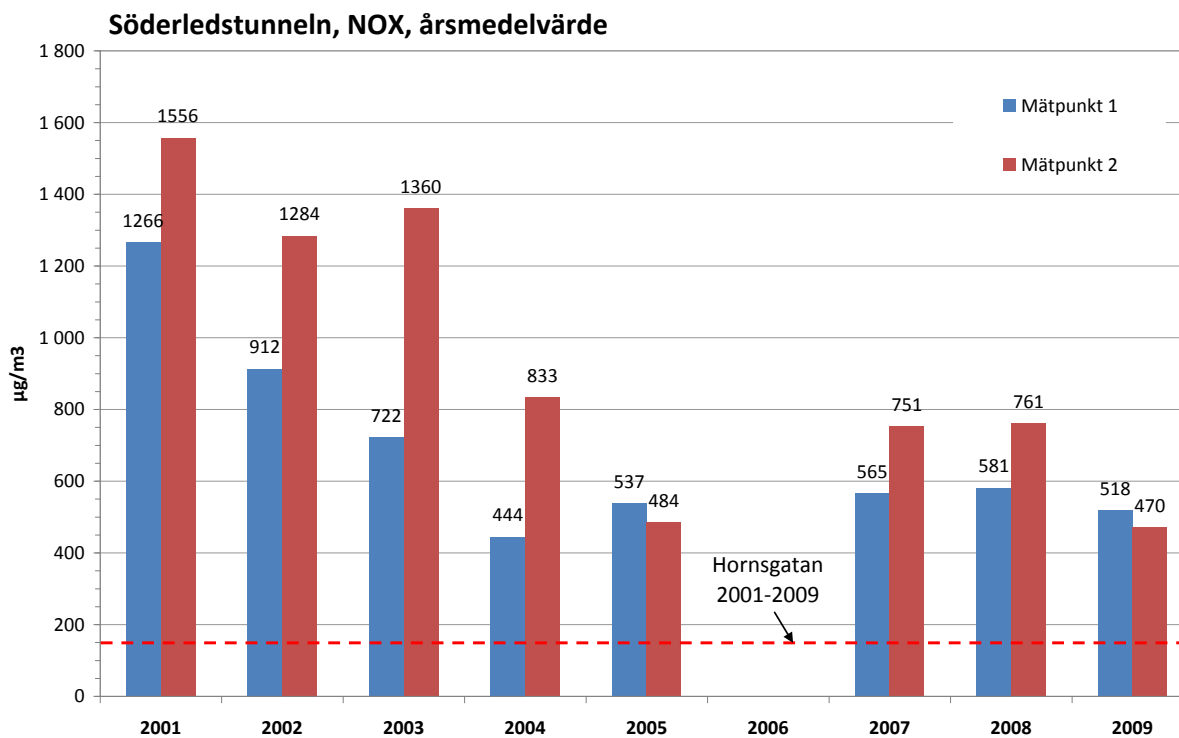
	Redovisning mätresultat	Mät- parametrar	Antal mät- punkter	Tunnellängd	Ung trafik- mängd per dygn
Söderledstunneln, Stockholm	2000-09-17- 2009-12-01	NOX, NO, NO ₂ , CO*	2	1520 m (Norr) 1580 m (Söder)	100 000
Blekhölmstunneln, Stockholm	2002-05-05 2009-12-01	NOX, NO, NO ₂	4	350 m	50 000
Klaratunneln, Stockholm	1999-05-06	NOX, NO, NO ₂	6	500 m/850 m	40 000
Södra Länken- tunneln, Stockholm	2009-02-01 2010-01-01	PM10, NOx, NO ₂	2 PM10 16 NOx/NO ₂	3,9 km	80 000-100 000

* redovisas inte i denna rapport

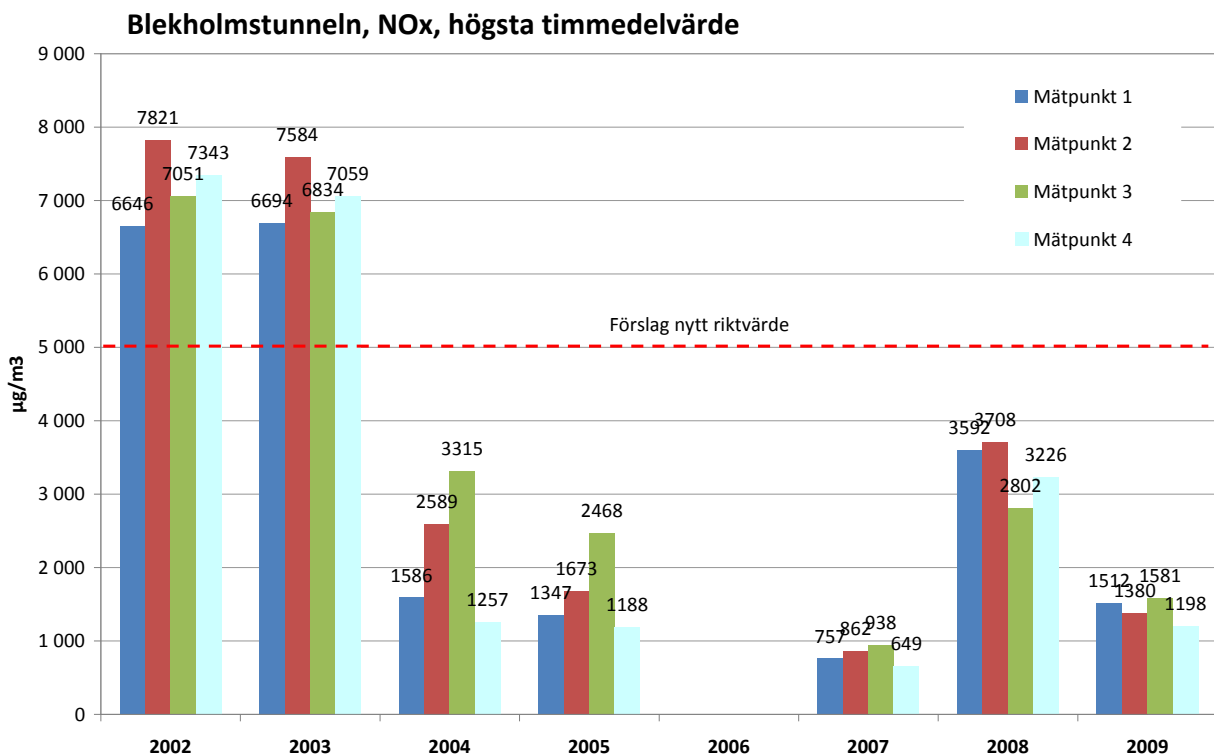
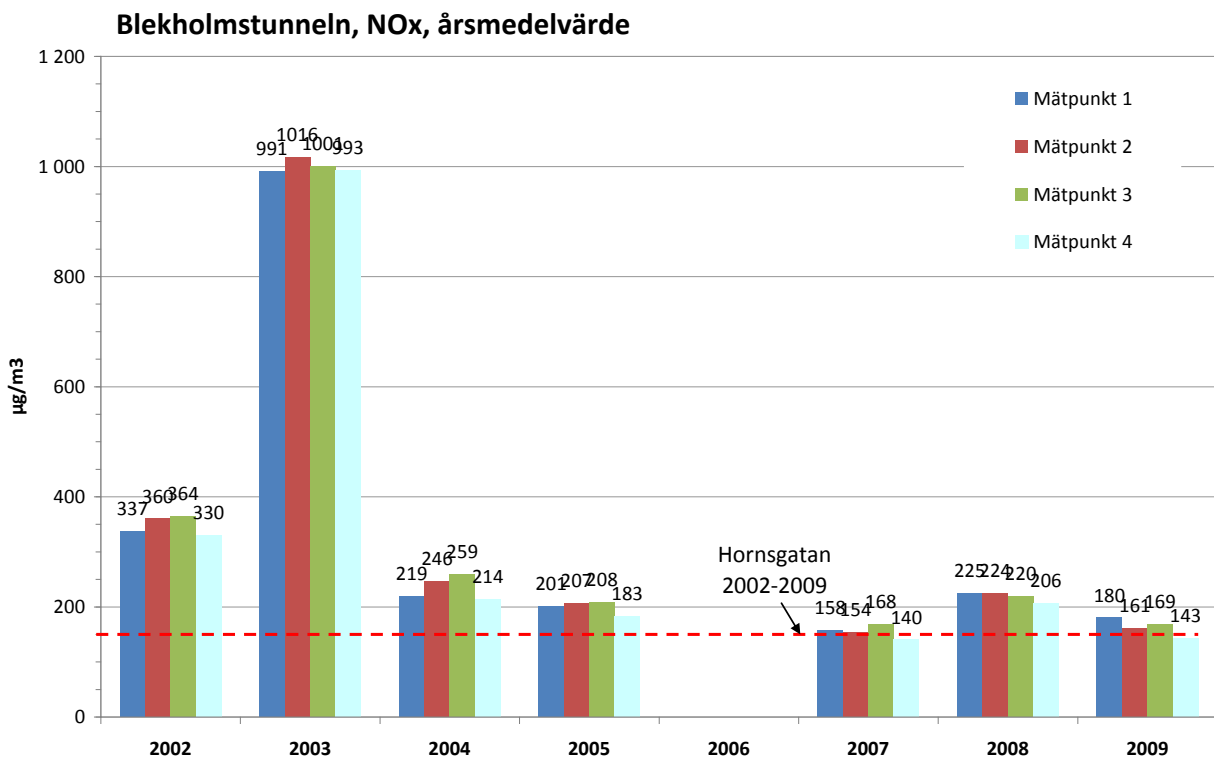
5.1 Mätresultat i tunnelluft – halter av kväveoxider, NOx

För summa kväveoxider följer en redovisning för årsmedelvärde och högsta timmedelvärde. Jämförelse för det senare har gjorts med Vägverkets nya förslag till målvärde för NOx – 5000 µg/m³ (5 mg/m³), som högsta timmedelvärde. Årsmedelvärdet för NOx jämförs med Stockholms mest luftförorenade gata vad gäller utomhusluft – Hornsgatan.

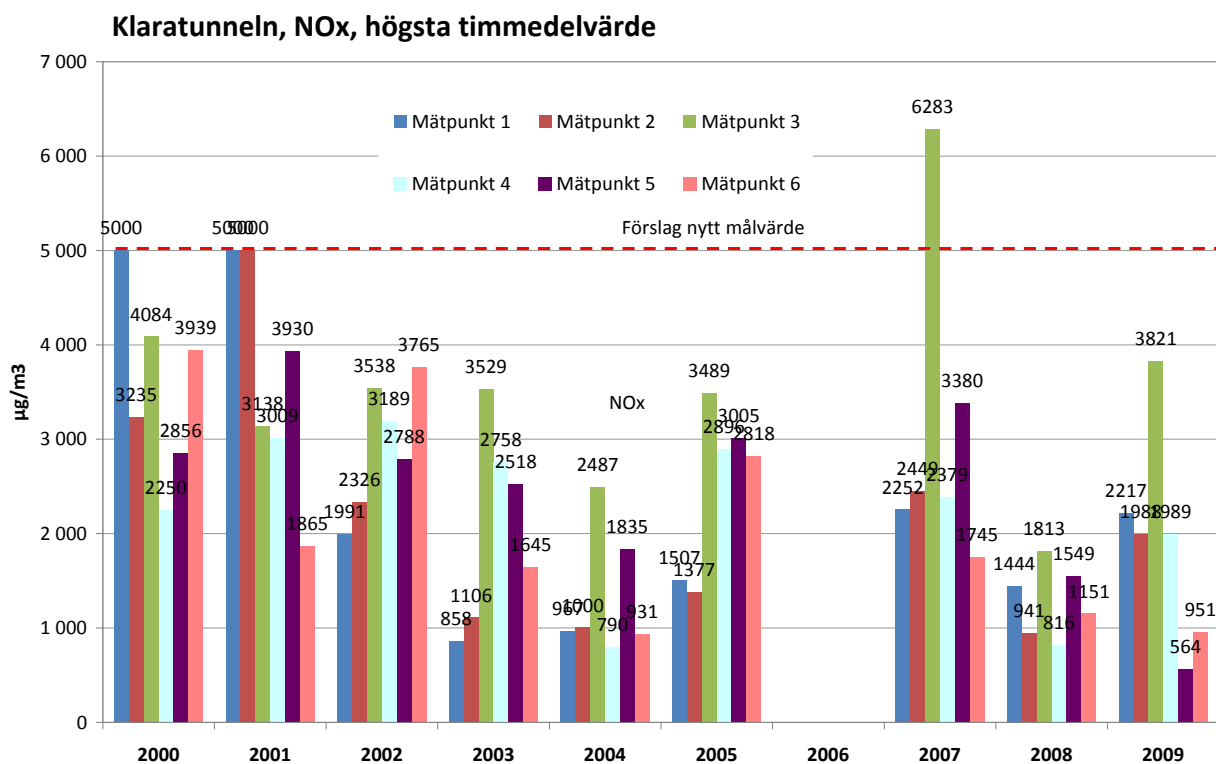
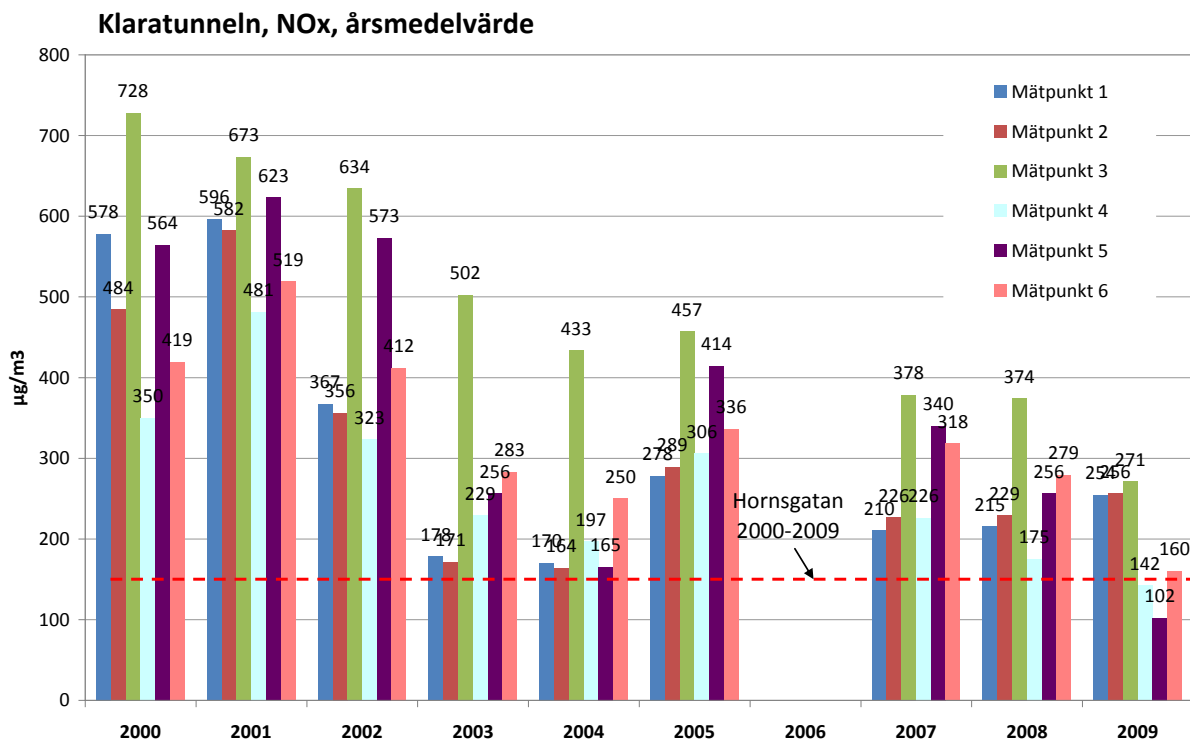
För samtliga tunnelmätningar som redovisas är trenden lägre halter av kväveoxider, NOx. I t.ex. Söderledstunneln uppmättes åren 2001-2003 genomsnittliga NOx-halter på över 1000 µg/m³. Dessa nivåer har i dagsläget halverats Motsvarande halter i Blekhölmstunneln och Klaratunneln är ännu lägre. Förklaringen till detta är att avgaskraven har skärpts. De högsta uppmätta NOx-halterna under en timme har också minskat om än inte lika mycket som för årsmedelvärdet. I Söderledstunneln tangerades tidigare (åren 2001-2003) Vägverkets nya förslag till målvärde på 5000 µg/m³. Under senare år har högsta timmedelvärdet legat runt 3000-4000 µg/m³. Under år 2009 uppmättes det högsta timmedelvärdet till ca 1600 i Blekhölmstunneln och ca 3800 i Klaratunneln. I Södra Länken är de högsta årsmedelhalterna ungefär 1500 µg/m³ och de högsta timmedelvärdena ungefär 5000 µg/m³.



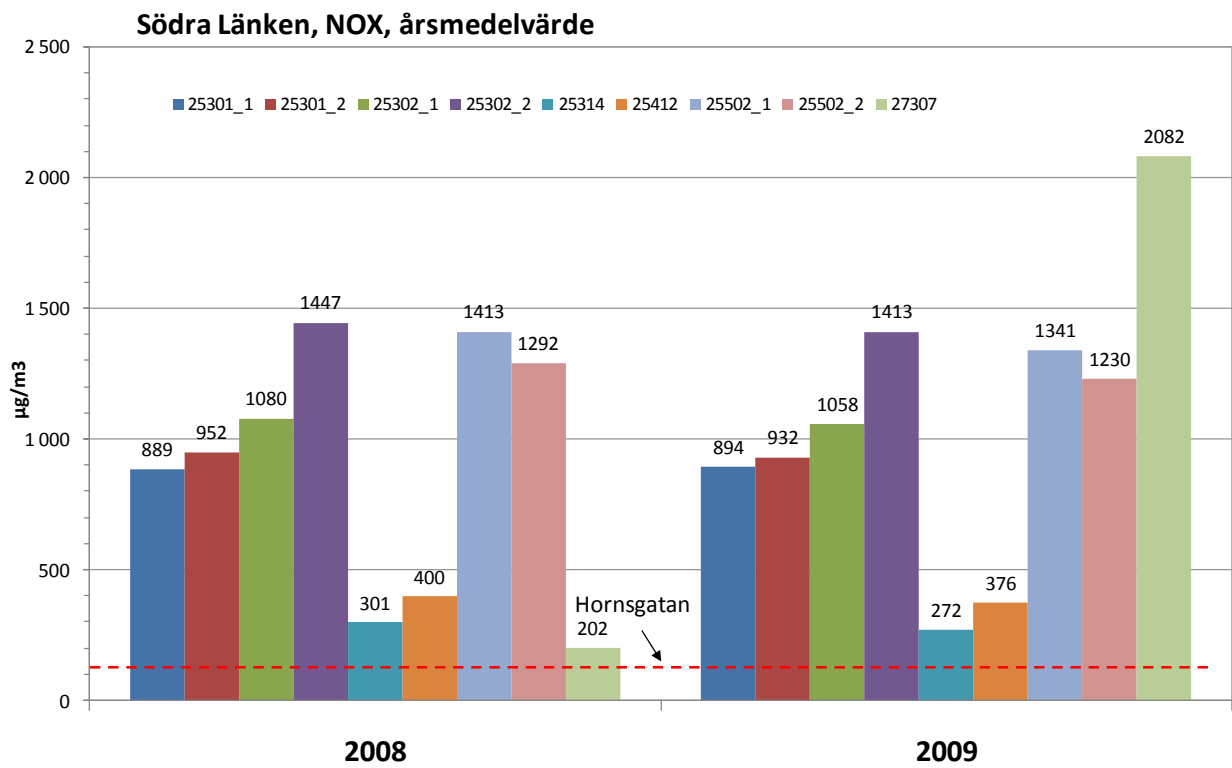
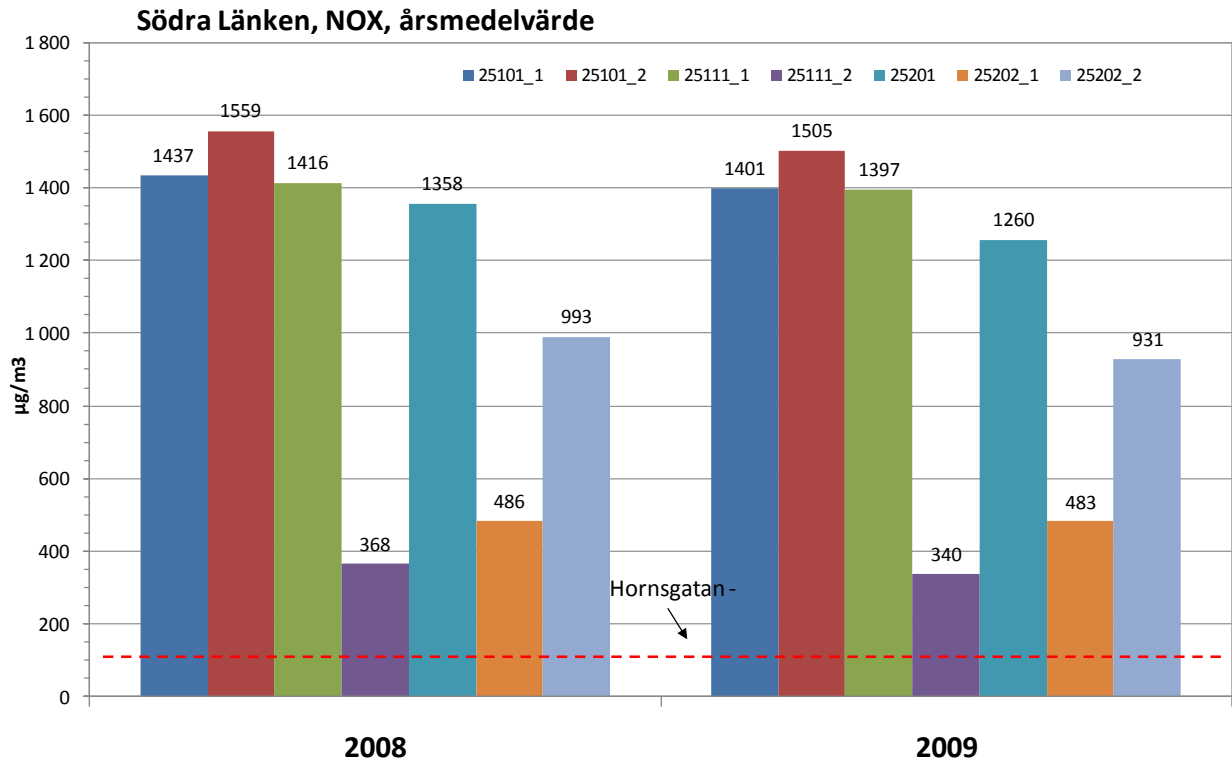
Figur 2. Uppmätta halter av summa kväveoxider i Söderledstunneln i Stockholm. Årsmedelvärde övre figuren respektive högsta timmedelvärde, åren 2001-2009. Preliminära data. Streckad linje anger nytt förslag till målvärde (Vägverket Region Stockholm) eller motsvarande nivå på Hornsgatan.

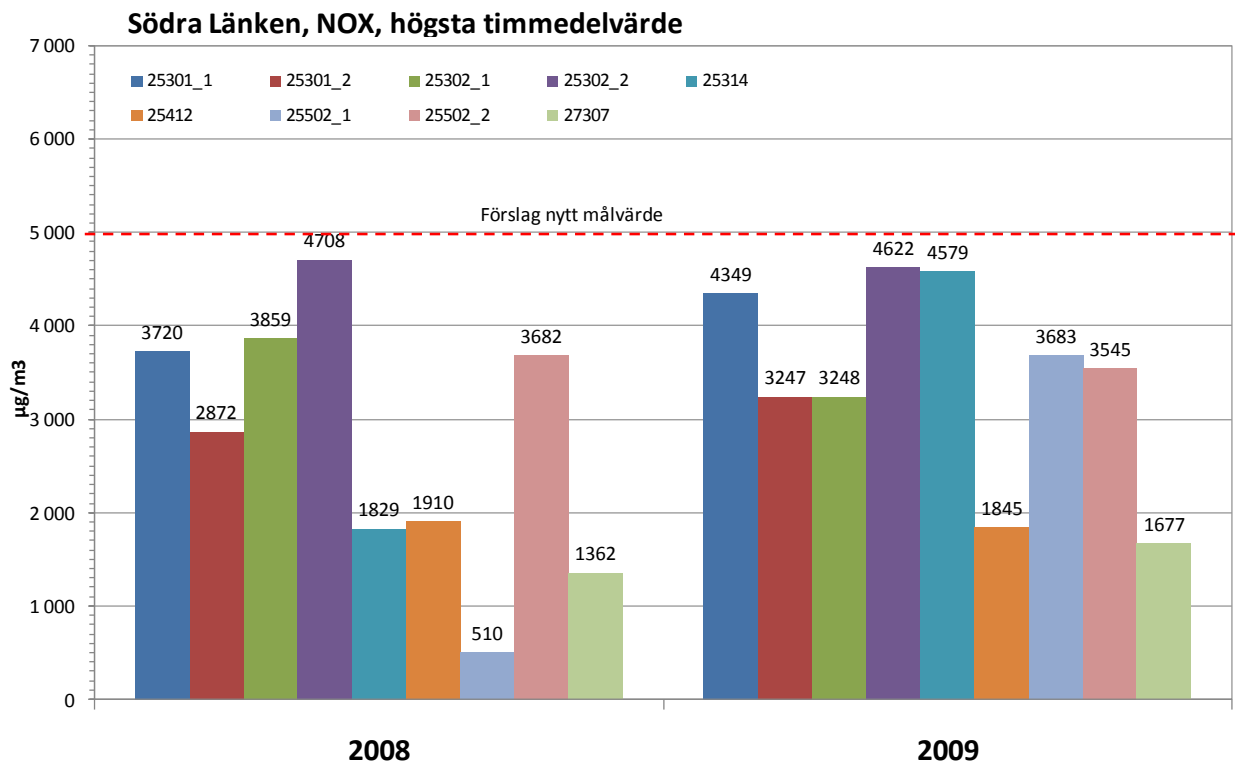
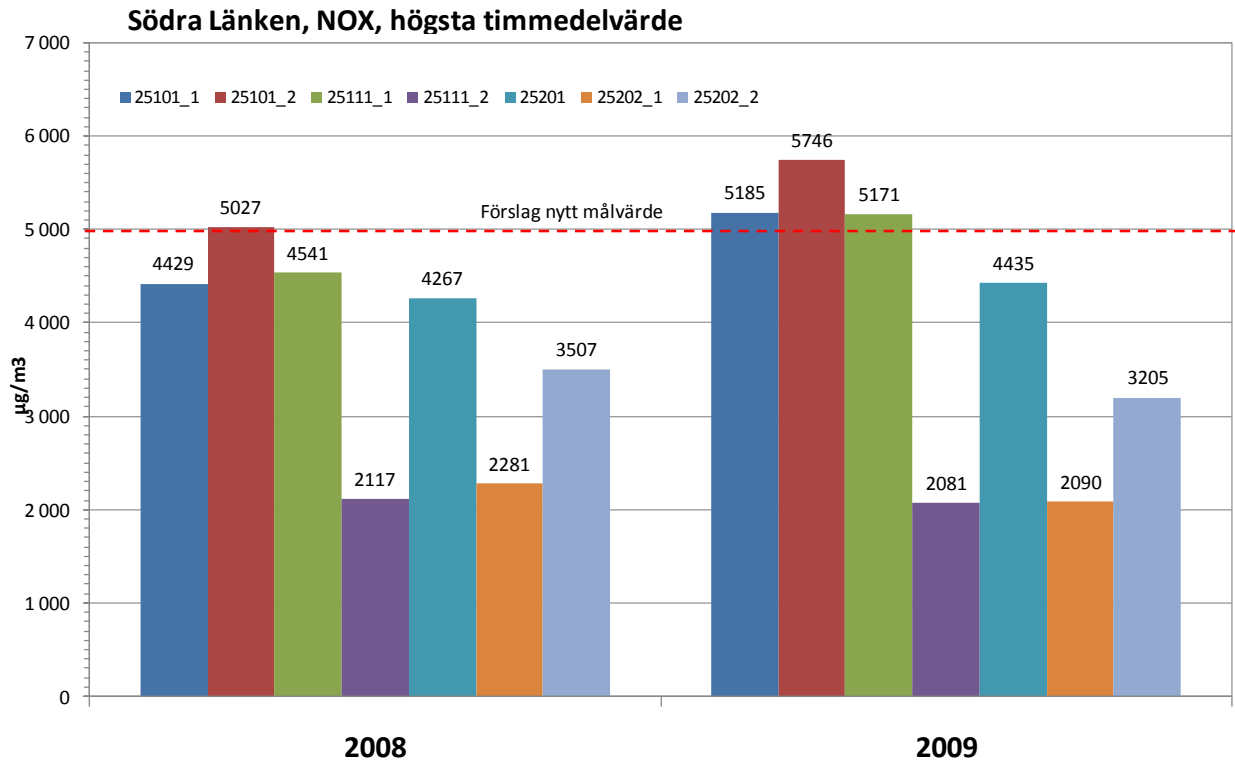


Figur 3. Uppmätta halter av summa kväveoxider i Bleholmstunneln i Stockholm. Årsmedelvärde övre figuren respektive högsta timmedelvärde, åren 2002-2009. Preliminära data. Streckad linje anger nytt förslag till målvärde (Vägverket Region Stockholm) eller motsvarande nivå på Hornsgatan.



Figur 4. Uppmätta halter av summa kväveoxider i Klaratunneln i Stockholm. Årsmedelvärde övre figuren respektive högsta timmedelvärde, åren 2000-2009. Preliminära data. Streckad linje anger nytt förslag till målvärde (Vägverket Region Stockholm) eller motsvarande nivå på Hornsgatan.





Figur 5. Uppmätta halter av summa kväveoxider i Södra Länken-tunneln i Stockholm. Årsmedelvärde (föregående sida) respektive högsta timmedelvärde, åren 2008-2009. Streckad linje anger nytt förslag till målvärde (Vägverket Region Stockholm), eller motsvarande nivå på Hornsgatan. Mätpunkternas placering har inte Vägverket kunnat ta fram.

5.2 Mätresultat i tunnelluft – halter av kvävedioxid, NO₂

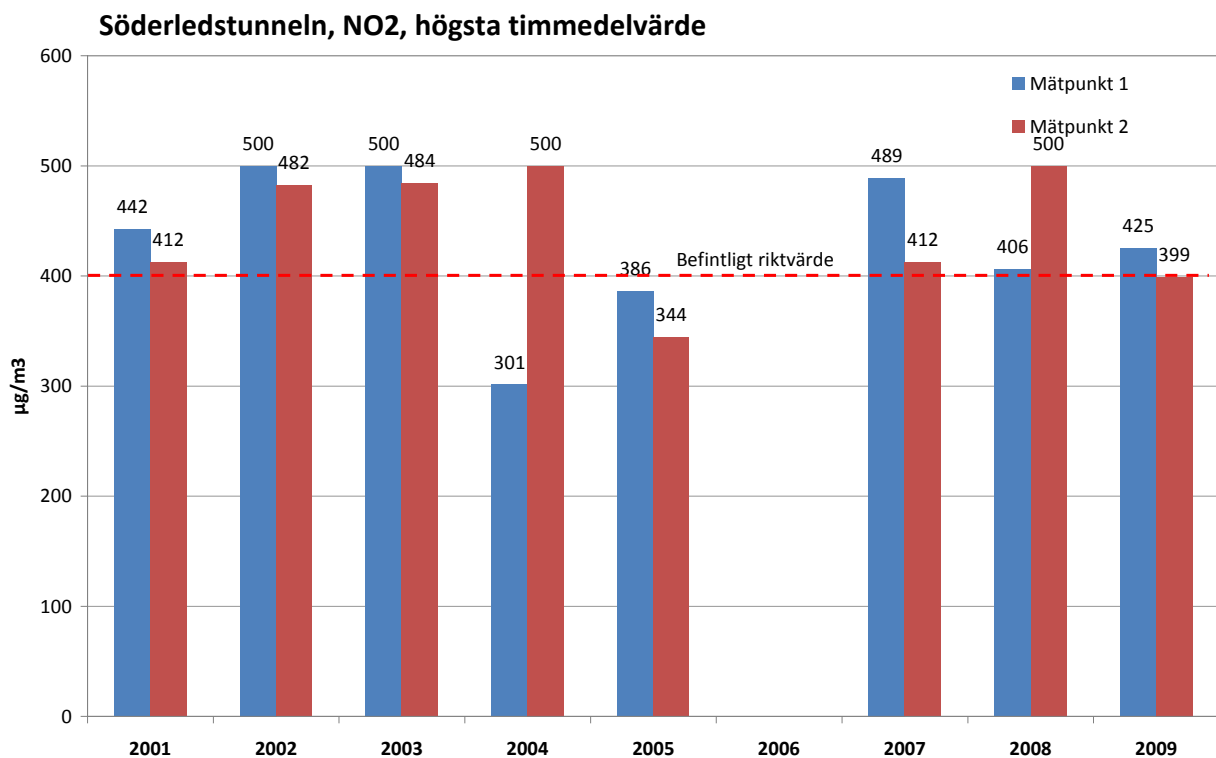
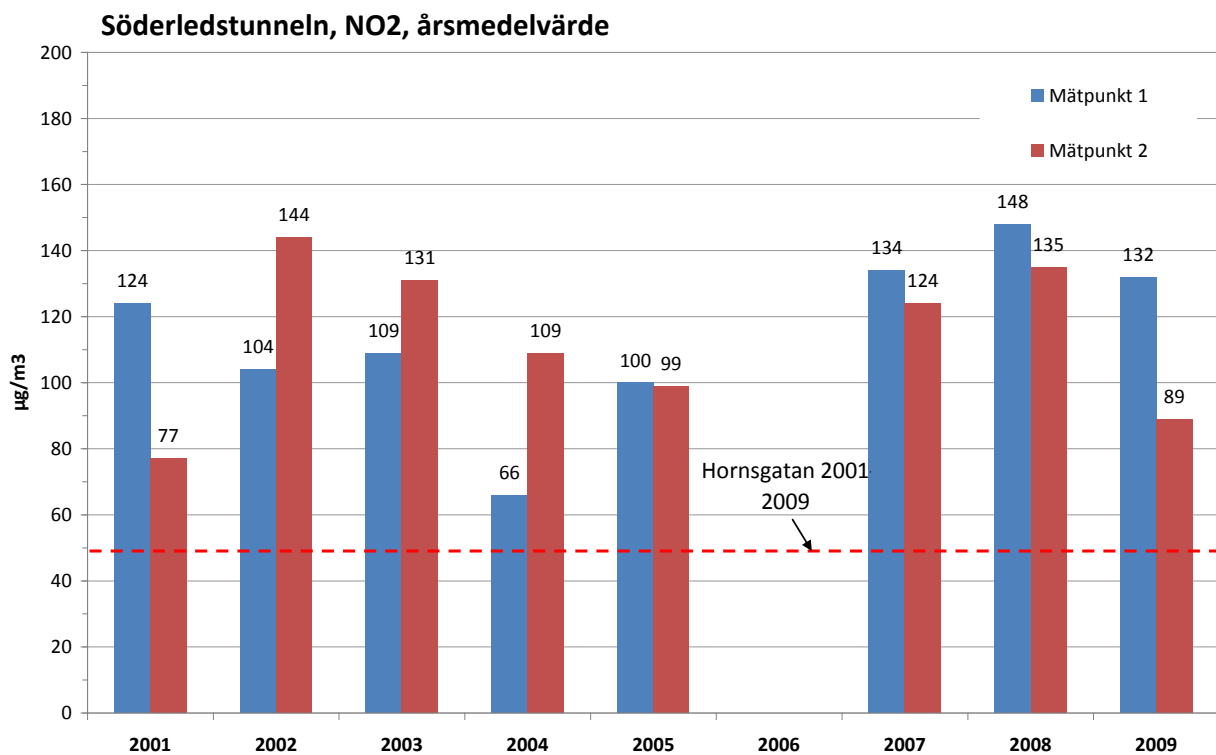
Även för kvävedioxid, NO₂, redovisas årsmedelvärde och högsta timmedelvärde. Jämförelse för det senare har gjorts med Vägverkets nuvarande riktvärde för NO₂ i Stockholm – 400 µg/m³ (0,4 mg/m³), som högsta timmedelvärde. Årsmedelvärdet för NO₂ jämförs med Hornsgatan.

För kvävedioxid är trenden i de studerade tunnlarna inte lika positiv som för summa kväveoxider, NO_x. En av anledningarna till det är att andelen NO₂ i vägtrafikens NO_x-utsläpp har ökat under de senaste 10-15 åren (Johansson & Forsberg, 2005). Andelen NO₂ i vägtunnlarna beror främst på fordonssammansättningen, där t.ex. dieselfordon har en högre andel än bensindrivna fordon. Andelen dieselfordon i fordonsparken har ökat kraftigt under 2000-talet både i Stockholm och i övriga Sverige.

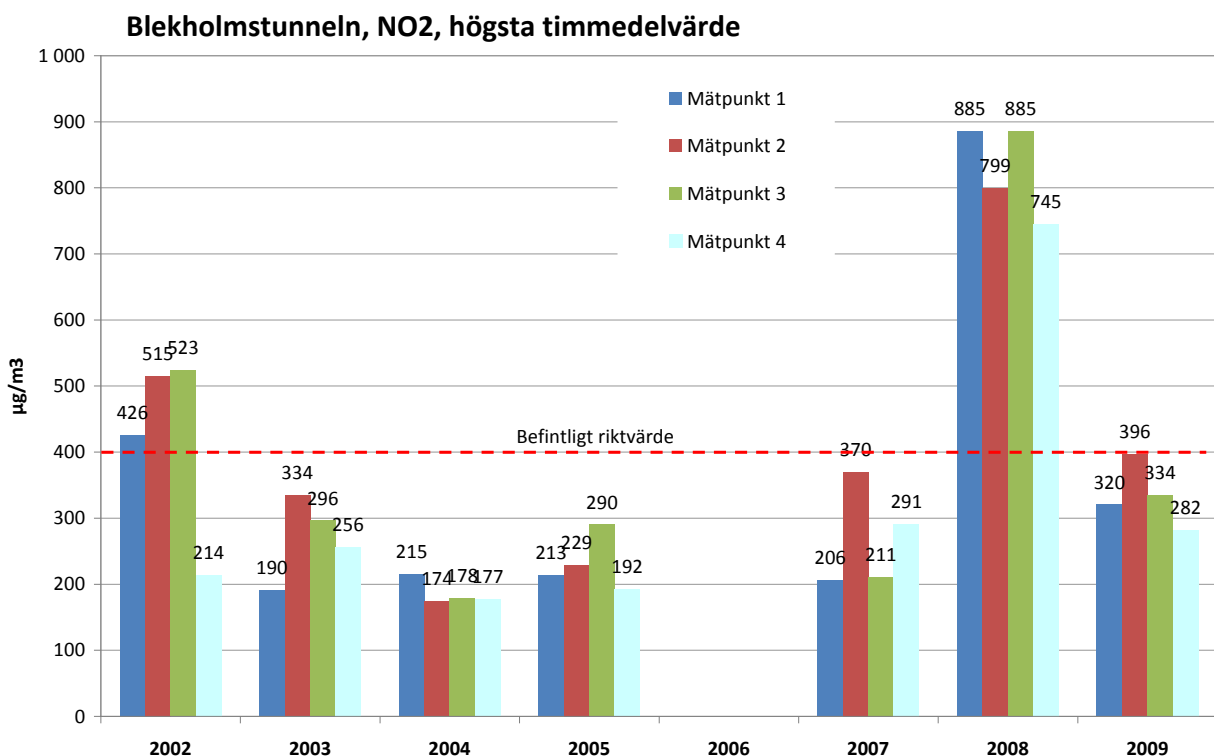
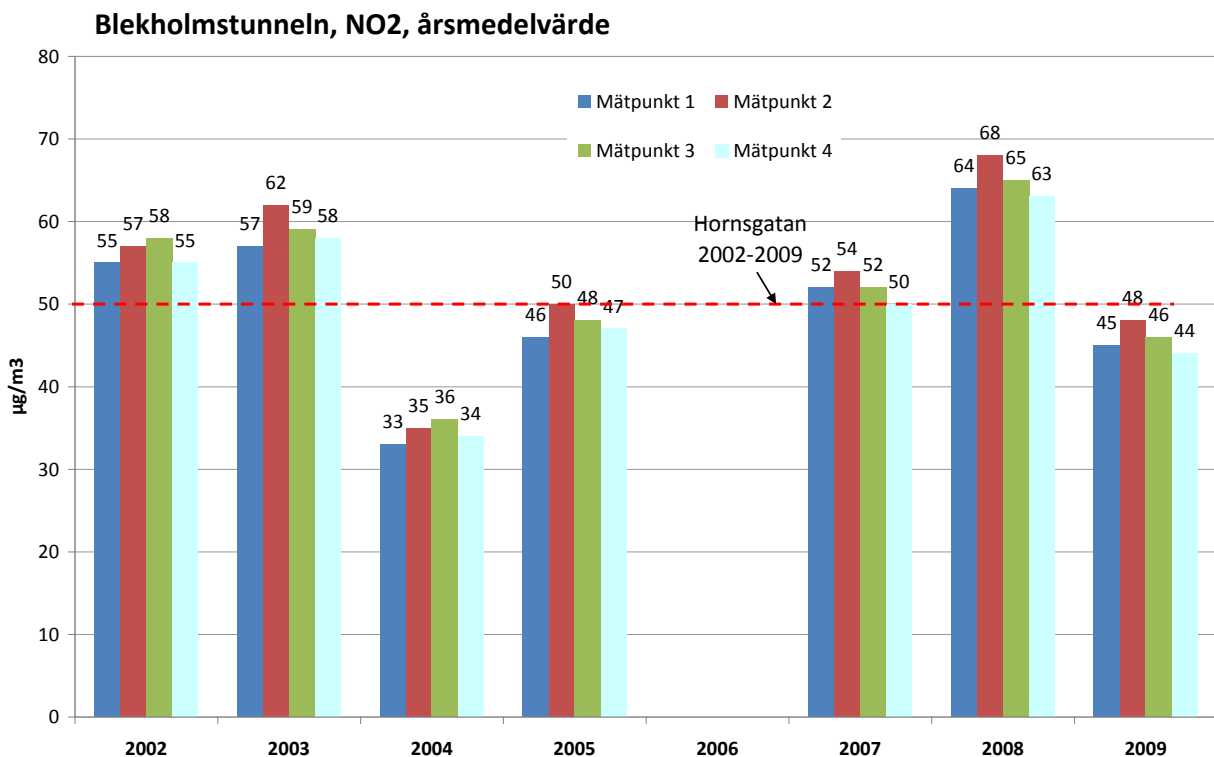
I Söderledstunneln har de genomsnittliga halterna av kvävedioxid legat på ungefär samma nivå åren 2001-2009. Även för Blekholmstunneln och Klaratunneln ses ingen minskning utan halterna tenderar snarare att öka något under de senaste åren. De högsta uppmätta NO₂-halterna under en timme är också i stort sett oförändrade. I Söderledstunneln ligger nivån ungefär som det befintliga riktvärdet på 400 µg/m³. Vissa år har halten uppgått till 500 µg/m³. Klaratunneln uppvisar likande högsta timmedelvärden som Söderledstunneln medan nivåerna är lägre i Blekholmstunneln.

I Södra Länkens tunnlar uppmätts, liksom för NO_x, de högsta NO₂-halterna beroende på att tunneln är längre än de övriga redovisade. Under åren 2008-2009 har årsmedelvärdet av NO₂ vid de mest utsatta mätpunkterna legat omkring 300 µg/m³. Det är ungefär 6 gånger högre än det som mäts upp i utomhusluften på Hornsgatan (50 µg/m³, MKN=40 µg/m³).

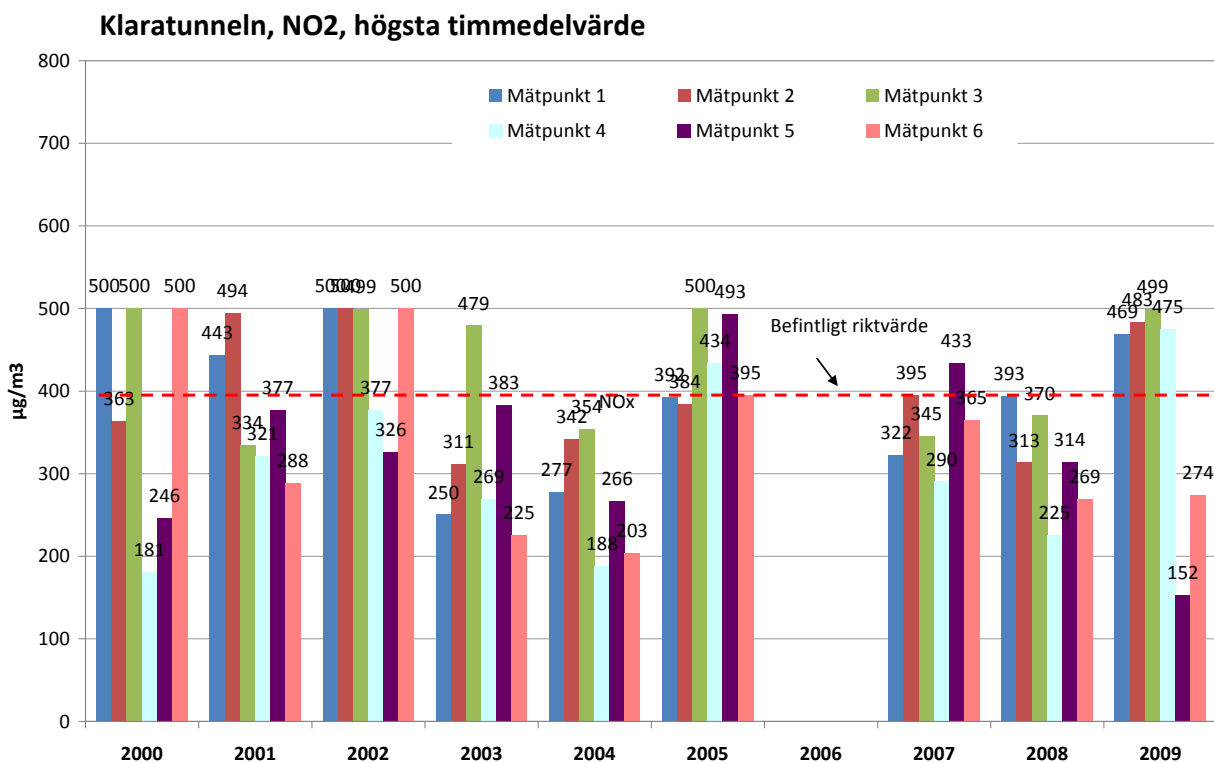
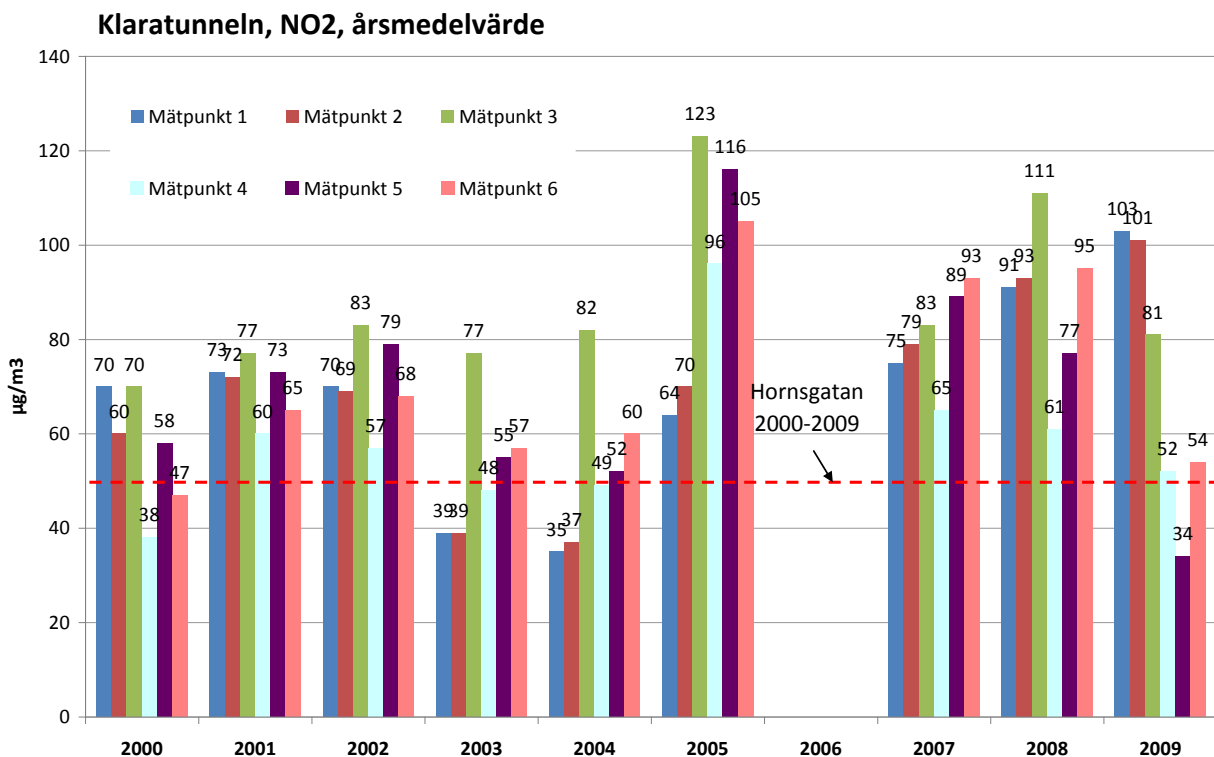
Ventilationen gör att föroreningshalterna minskar i tunneln. Men med ventilationsluften kommer också oxiderande ämnen som ozon in i tunneln. Ozonet reagerar snabbt med de ämnen som släpps ut i avgaserna i tunneln. Detta innebär att NO₂ andelen i tunneln ökar (NO i avgaserna oxideras till NO₂). Hur stor andelen NO₂ blir i slutändan beror på luftflödet och ozonhalten, men i princip kommer all ozon att reagera. Ventilation, luftflöde och därmed ozonhalt varierar i de undersökta tunnlarna.



Figur 6. Uppmätta halter av kvävedioxid i Söderledstunneln i Stockholm. Årsmedelvärde övre figuren respektive högsta timmedelvärde, åren 2001-2009. Preliminära data. Streckad linje anger befintligt riktvärde (Vägverket Region Stockholm) eller motsvarande nivå på Hornsgatan.

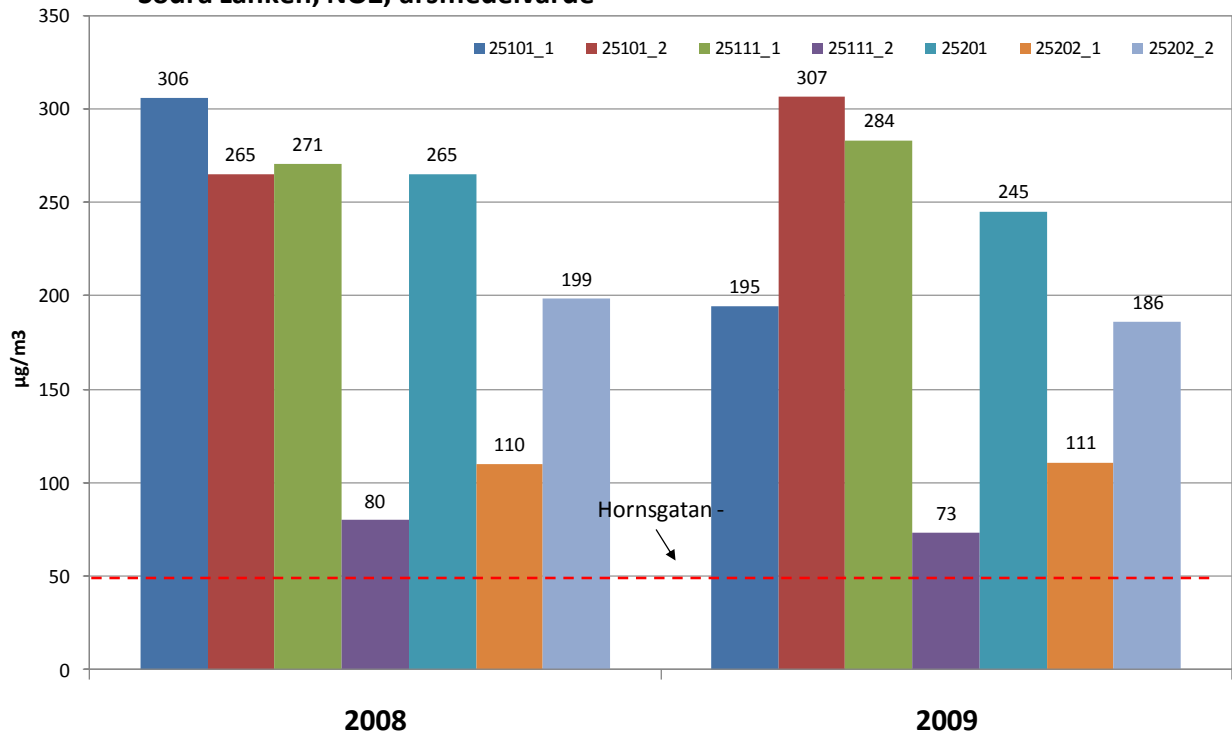


Figur 7. Uppmätta halter av kvävedioxid i Blekhölmstunneln i Stockholm. Årsmedelvärde övre figuren respektive högsta timmedelvärde, åren 2002-2009. Preliminära data. Streckad linje anger befintligt riktvärde (Vägverket Region Stockholm) eller motsvarande nivå på Hornsgatan.

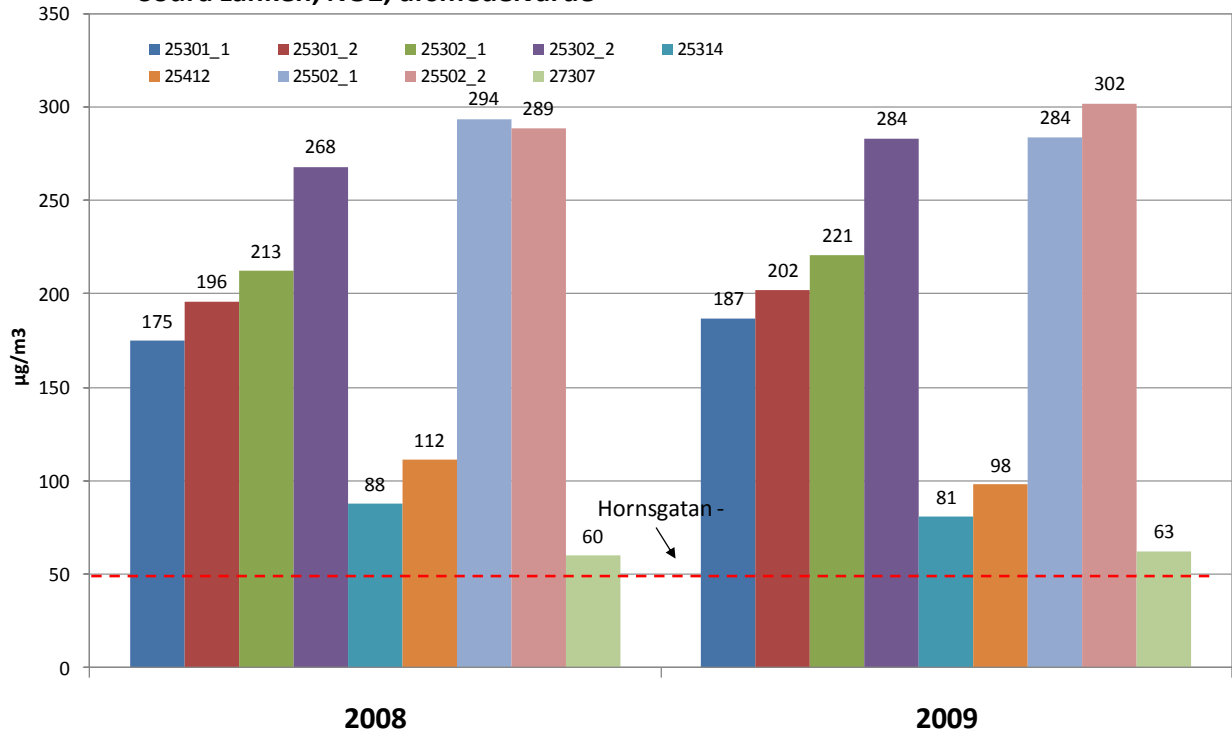


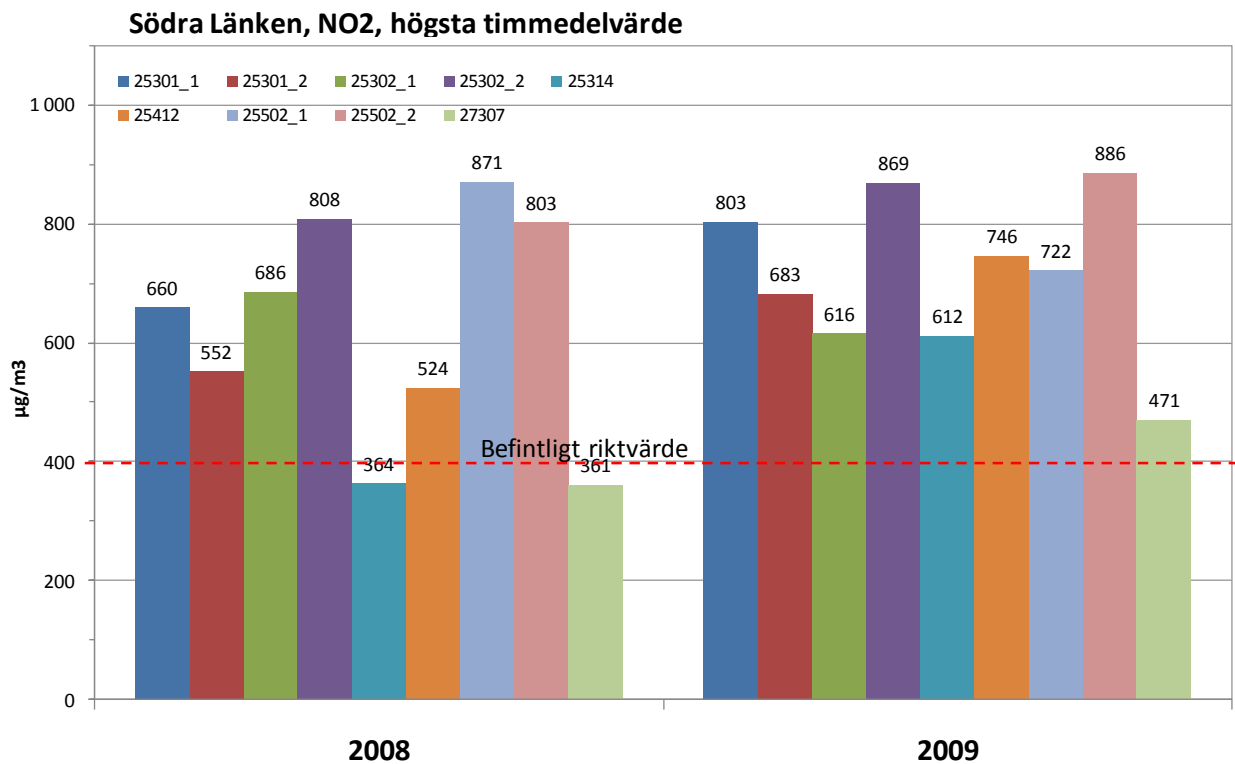
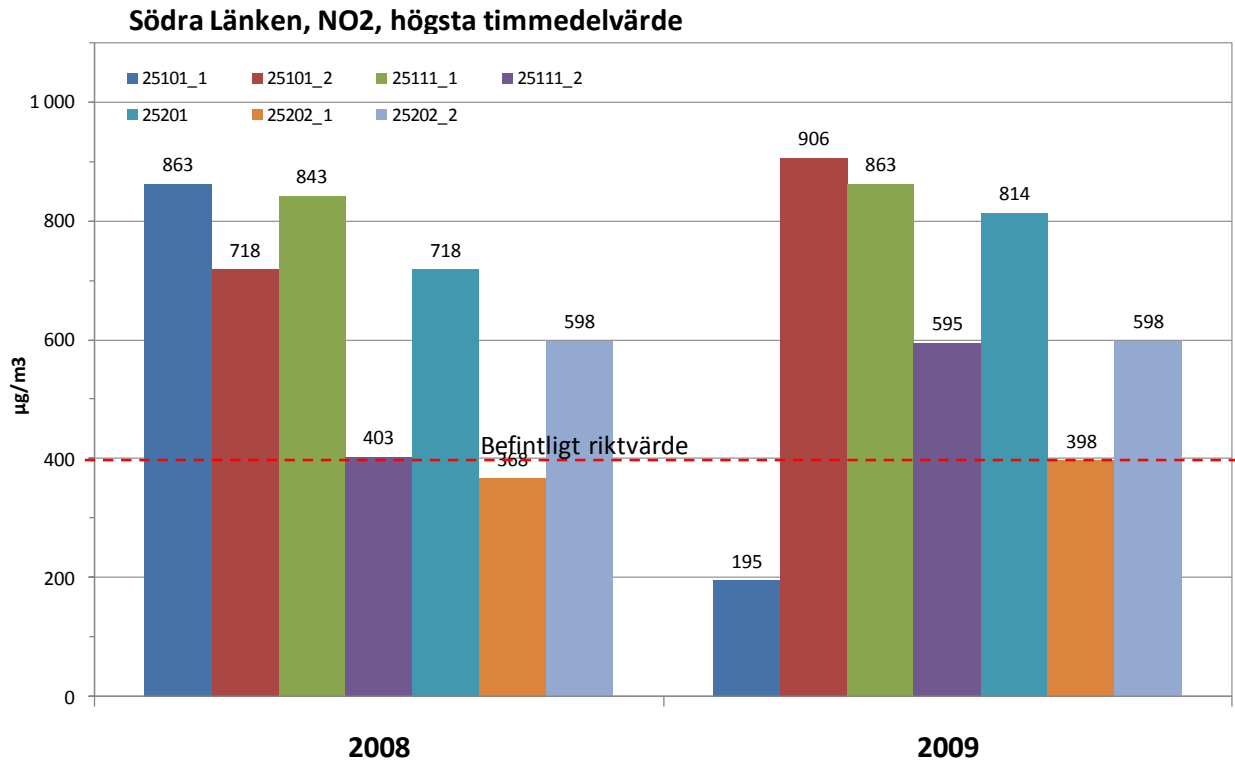
Figur 8. Uppmätta halter av kvävedioxid i Klaratunneln i Stockholm. Årsmedelvärde övre figuren respektive högsta timmedelvärde, åren 2000-2009. Preliminära data. Streckad linje anger nytt befintligt riktvärde (Vägverket Region Stockholm), eller motsvarande nivå på Hornsgatan.

Södra Länken, NO2, årsmedelvärde



Södra Länken, NO2, årsmedelvärde



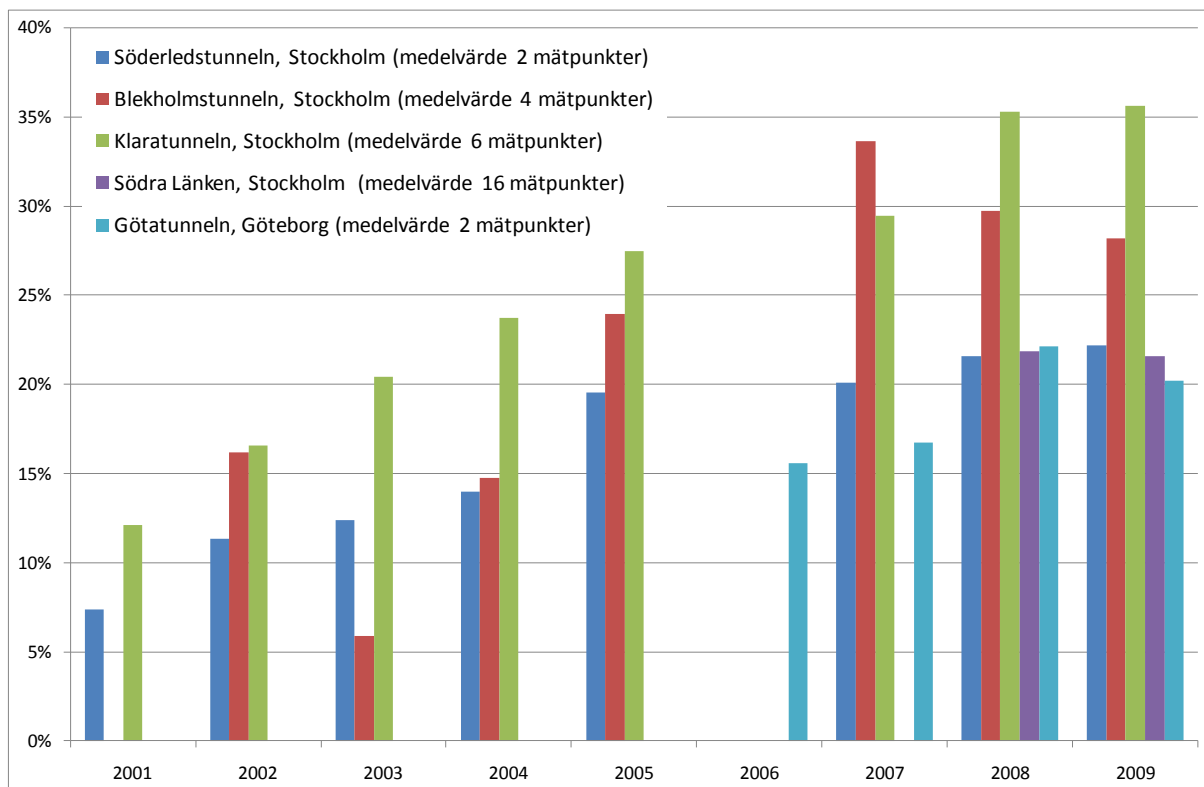


Figur 9. Uppmätta halter av kvävedioxid i Södra Länken i Stockholm. Årsmedelvärde (föregående sida) respektive högsta timmedelvärde, åren 2008-2009. Streckad linje anger nytt befintligt riktvärde (Vägverket Region Stockholm), eller motsvarande nivå på Hornsgatan. Mätpunkternas placering har inte Vägverket kunnat ta fram.

5.3 Mätresultat i tunnelluft – andelen kvävedioxid, NO₂, av NO_x

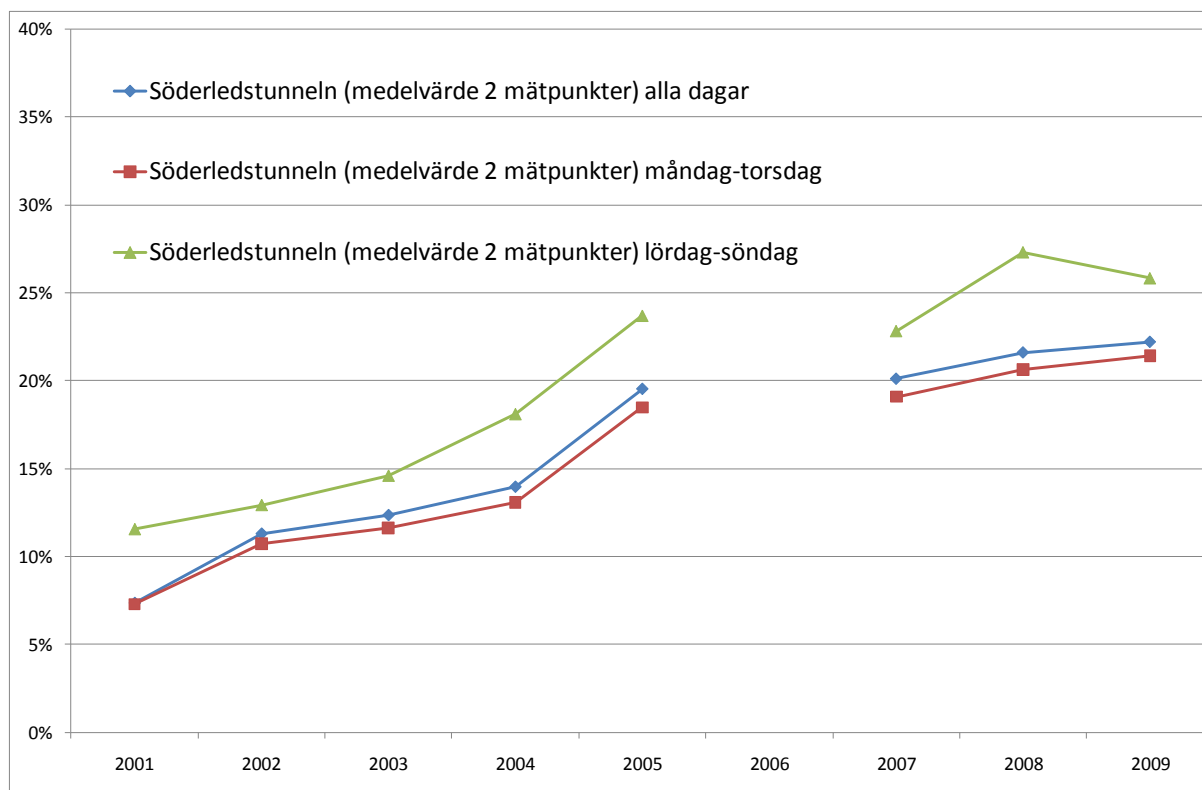
För kvävedioxid, NO₂, är trenden i vägtunnelnarna inte alls lika positiv som för summan av kväveoxiderna, NO plus NO₂. I Söderledstunneln har de genomsnittliga halterna av kvävedioxid, NO₂, legat på ungefär samma nivå under 2000-talet. Inte heller i Blekholmstunneln eller Klaratunneln ses någon minskning utan halterna tenderar snarare att öka något under de senaste åren. En av anledningarna till detta är att andelen NO₂ av vägtrafikens NO_x-utsläpp har ökat under de senaste 10-15 åren (Johansson & Forsberg, 2005).

I Söderledstunneln har uppmätt andel NO₂ av NO_x ökat från ca 7 % i början av 2000-talet till ca 22 % i slutet av decenniet (Figur 10). I Klaratunneln är motsvarande ökning från 12 % till 36 %. I båda dessa tunnlar har alltså andelen trefaldigats. Även i Blekholmstunneln har NO₂-andelen ökat. I Götatunneln i Göteborg (medelvärde två mätpunkter) har NO₂-andelen år 2009 uppmätts till ungefär 20 %, vilket är något högre än år 2006.



Figur 10. Trenden för uppmätt andel NO₂ av NO_x i vägtunneln i Stockholm samt Götatunneln i Göteborg.

I Figur 11 visas en jämförelse mellan uppmätta NO₂-andelar olika veckodagar i Söderledstunneln. Lite överraskande kan klart högre andelar ses under lördag-söndag då den tunga (diesel)trafiken är mycket mindre. Skillnaden är ungefär fem procentenheter och har varit det under perioden 2001-2009. Förklaringen kan vara (vilket också trafikmätningar visar) att det förekommer mycket dieseldriven taxitrafik i innerstaden under helger. Även i Södra Länken ses högre uppmätta NO₂-andelar under veckosluten.



Figur 11. Trenden för uppmätt andel NO₂ av NO_x i Söderledstunneln i Stockholm. Jämförelse med vardagar (mån-tors) och helgdagar (lör-sön).

Resultatet för tunnelmätningarna kan jämföras med en studie på Hornsgatan i Stockholms innerstad. Under några månader hösten 2009 filmades trafiken och registreringarna kopplades till vägtrafikregistret varefter utsläpp av kväveoxider och kvävedioxid beräknades. Med emissionsfaktorer för NO_x och NO₂, enligt Artemismodellen år 2010, viktade mot registreringarna av olika euroklasser beräknades direktutsläppen av NO₂ från trafiken på Hornsgatan till **ca 19 %** av NO_x. För år 1990 och 2000 finns inte lika detaljerad trafikinformation. Andelen NO₂ av NO_x beräknades till **ca 6 %** respektive **ca 8 %**.

Beräkningarna för Hornsgatan stämmer mycket bra med tunnelmätningarna i Södra Länken och Söderledstunneln där **ca 20 %** har uppmätts år 2009 och **ca 7 %** år 2001. Att andelen ungefär har trefaldigats under 2000-talet stämmer också. Resultaten är jämförbara eftersom det mesta av ozonet i de långa tunnlarna har förbrukats vid mätpunkterna. Därför kan inte mer NO från direktutsläpp oxideras till NO₂ och höja andelen vid mätpunkterna (Bleholmstunneln och Klaratunneln som är ganska korta har däremot en högre andel beroende på ozonets inverkan).

5.4 Mätresultat i tunnelluft – halter av partiklar, PM10

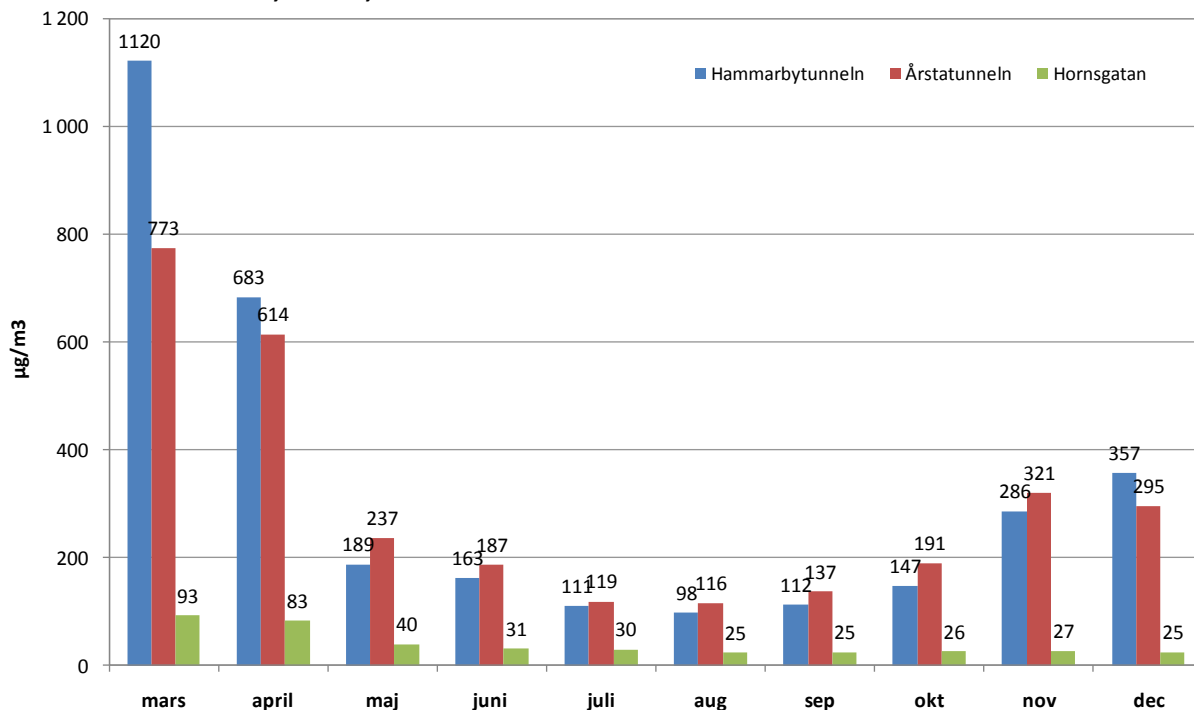
För inandningsbara partiklar, PM10 följer en redovisning för månadsmedelvärden och högsta timmedelvärden under år 2009 i Södra Länkens huvudtunnlar (Hammarby- och Årstatunneln).

Något riktvärde för PM10 i tunnelluften finns inte, därför har uppmätt timmedelhalt i Södra Länken jämförts med den nivå Bertil Forsberg vid Umeå universitet angivit, d.v.s., partikelhalter i tunnlar bör inte överstiga 400-800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ med tanke på hälsan [6]. Jämförelse görs också med utomhusluften på Hornsgatan som har PM10-nivåer över miljö kvalitetsnormen.

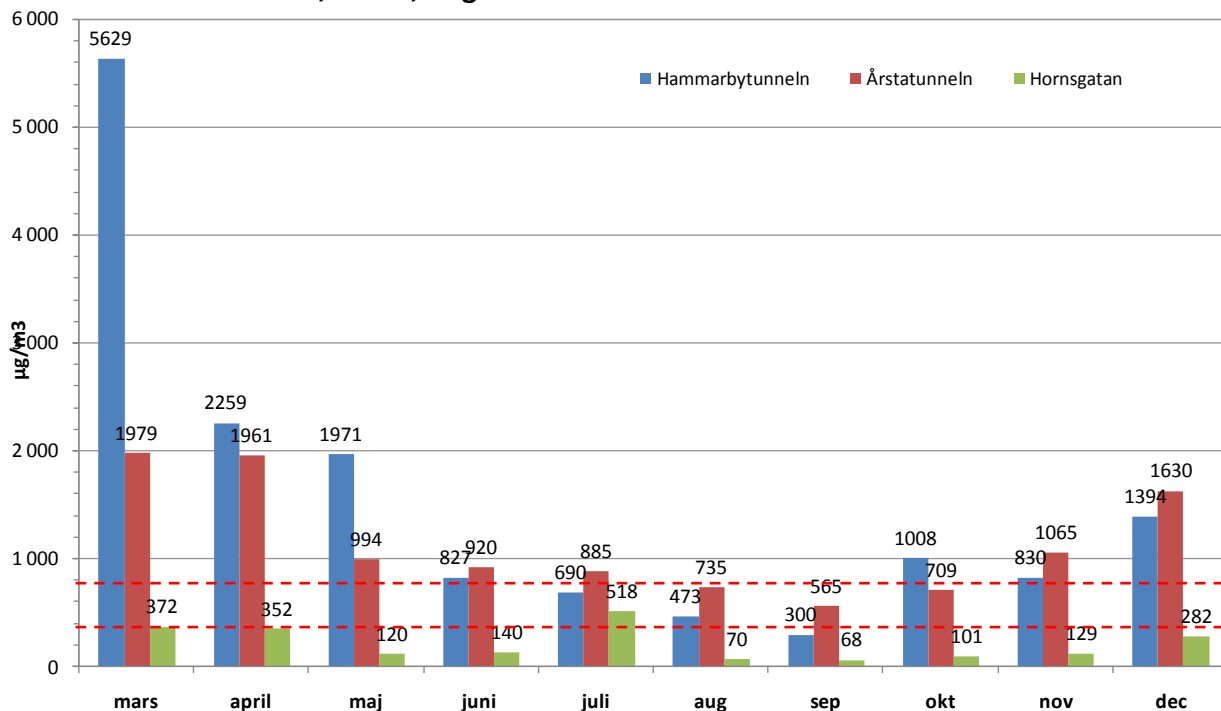
Väldigt höga månads- och timmedelvärden uppmättes under mars månad vilket till stor del avspeglar den höga användningen av dubbdäck vintertid i Stockholm (ca 70 % av personbilarna), samt torra körbanor som gör att partiklarna kan virvla upp. Under sommarhalvåret är luften i tunneln renare, men är ändå 4-5 gånger högre än på Hornsgatan. Detta beror på att trafikmängden är högre och utvädringen är sämre i tunnlar.

Det allra högsta timmedelvärdet under året uppmättes i Hammarbytunneln, över 5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. I Årstatunneln noterades uppemot 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i både mars och april. Med tanke på hälsan är detta alldeles för höga nivåer. Riktvärdet på 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ överskreds i tunneln.

Södra Länken, PM10, månadsmedelvärden 2009



Södra Länken, PM10, högsta timmedelvärde 2009



Figur 12. Uppmätta halter av partiklar, PM10 i Hammarby- och Årstatunneln (Södra Länken) i Stockholm. Månadsmedelvärden respektive högsta timmedelvärden år 2009. Preliminära data. Gröna staplar anger motsvarande nivå på Hornsgatan. Streckade linjer anger intervall för halt för PM10 som ej bör överstigas med tanke på hälsan [6]

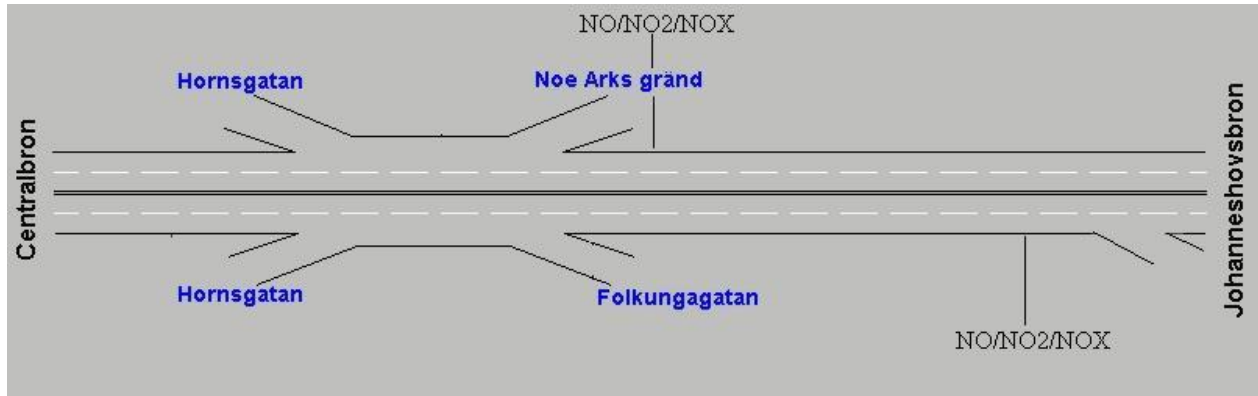
6. Litteratur och referenser - tunnelluft

1. Sjödin, Å, 1999. Mätningar av emissioner från vägtrafik i tunnlar. En litteraturöversikt. IVL, Institutet för vatten- och luftvårdsforskning, IVL. KFB-rapport 1999:19.
2. Socialstyrelsen, 2005. Miljöhälsorapport 2005. Socialstyrelsen, ISBN 91-7202-931-X. Edita Norstedts tryckeri, 2005.
3. Sanderson, E., Briggs, D., Matti Jantunen, Bertil Forsberg, Magnus Svartengren, Radim Šrám, John Gulliver and Nicole Janssen, 2005. Human exposure to transport-related air pollution, Chapter 3 in Health effects of transport related air pollution (Krzyzanowski et al., eds) ISBN 92 890 1373 7, WHO Regional Office for Europe, Scherfigsvej 8, DK-2100 Copenhagen Ø, Denmark.
4. Brandt, R., et al. Independent review of ventilation and safety concept. HBI-rapport 09-207-01, på uppdrag av Vägverket. 2009-09-16 / Ver. 1.3.
5. PIARC, 2000 (Permanent International Association of Road Congresses). Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels. ISBN 2-84060-127-3.
6. Gustafsson, A., 2009. Dålig luft kan försena förbifarten. Artikel Svenska Dagbladet 2009-12-16. http://www.svd.se/stockholm/nyheter/dalig-luft-kan-forsena-forbifarten_3945945.svd
7. Handbook 021, Vegtunneler, normaler, Statens Vegvesen, Norge,
8. SLB analys, 1994. Mätningar av luftföroeningar luftflöden och trafik i Söderledstunneln. SLB analys. Miljöförvaltningen, Box 8136 , 104 20 Stockholm. (http://slb.nu/slb/rapporter/pdf6/slb1994_004.pdf).
9. Tønnesen, D., 1996. Måling av svevestøv-konsentrasjoner og luftstrøm i Ekeberg tunnelen i Oslo. NILU, OR 66/96. ISBN 82-425-0828-4.
10. Aldrin, M., I. Hobæk Haff, P. Rosland, 2008. The effect of salting with magnesium chloride on the concentration of particular matter in a road tunnel. Atmos. Environ., 1762-1776.
11. Boulter, P.G., I S McCrae and K Taylor, 2004. Road tunnel air pollution monitoring. TRL Limited. Report PR/SE/746/03. Opublicerad projektrapport.
12. Brandt, R., Höj, N-P., Opstad, K. Huijben, H. Oberoende granskning av miljöventilationskoncept och säkerhetskoncept. 2009. E4 Förbifart Stockholm. HBI haerter. Höj Consulting. HBI-rapport 09-307-01.
13. Child & Associates, 2004. M5 East freeway: A review of emission treatment technologies, systems & applications.
14. Electrostatic precipitators and ventilation in road tunnels in Japan Report of a visit by a delegation from the NSW Roads and Traffic Authority to Japan from 30 September – 10 October 2003. Annex 8. tunnel ventilation system technology review and best practice. Februari, 2004.
15. Forsberg, B. Blomberg, A. PM Hälsorisker av luftföroeningar I vägtunnelluft.
16. Gense R. Vermeulen R. Weilenmann M. McCrae I., 2006. NO₂ emissions from passenger cars, In proceedings from Transport and Air Pollution 15 th symposium Reims, France 14-16 June 2006.
17. Göteborgs Miljöförvaltning, 2006. Uppföljning av Götatunneln – delrapport 1. Uppdragsrapport 2006:7.

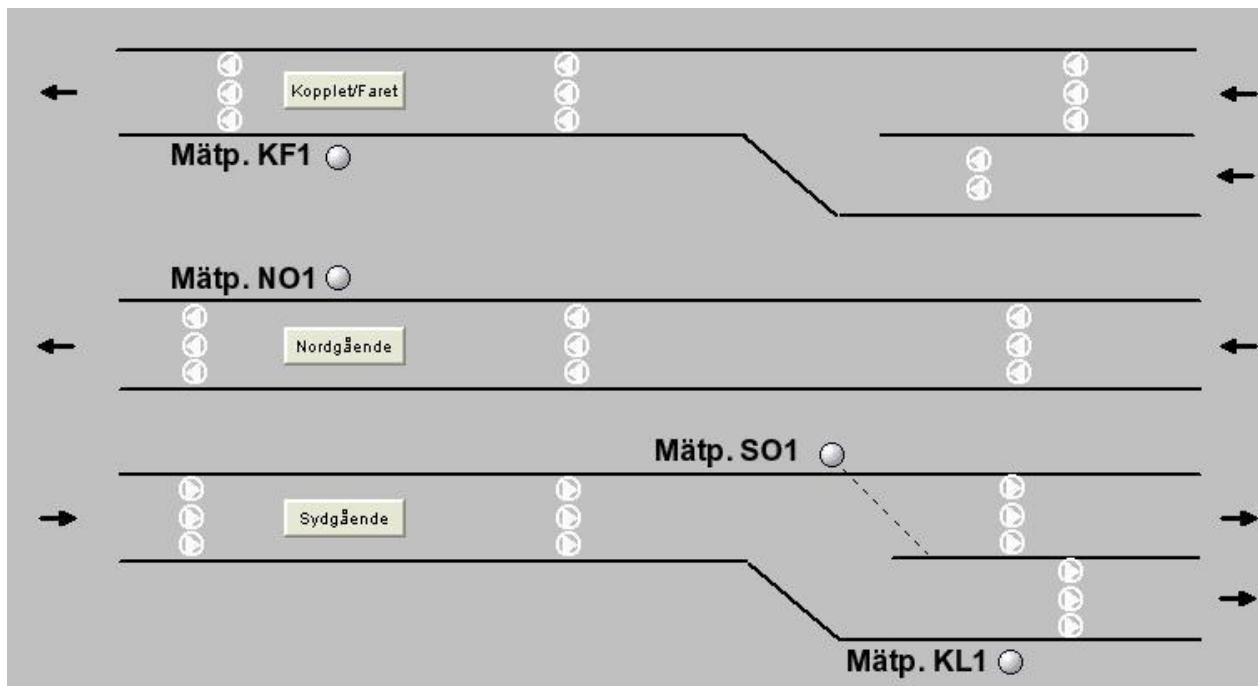
18. Henning, J. E., 1997. The Efficiency of Particle Cleaning in Norwegian Tunnels. Presentation vid "The Safety Session of the 1997 INTERNATIONAL ROAD FEDERATION (IRF) XIIIth WORLD MEETING". Toronto Canada.
19. Johansson, C., Johansson, P-Å. and Burman, L., 1996. Emissioner av kväveoxider och kolmonoxid från trafik. Analys av mätningar i Söderledstunneln. ITM Luftlaboratoriet, Stockholms universitet, rapport nr. 49
20. Sandman, T., 2007. PM avseende planeringsmål och driftstrategier för luftkvalitet i Ringens vägtrafiktunnlar. VST infrateknik, 2007-01-11. Vägverket Region Stockholm.
21. Sandström, T., Forsberg, B., Bylin, G., 2003. Air Quality in Road Tunnels. Health effects of nitrogen dioxide and aspects on CO-pollutants. Publ. 2003:64. Vägverket

Översikt tunnelmätningar i Stockholm

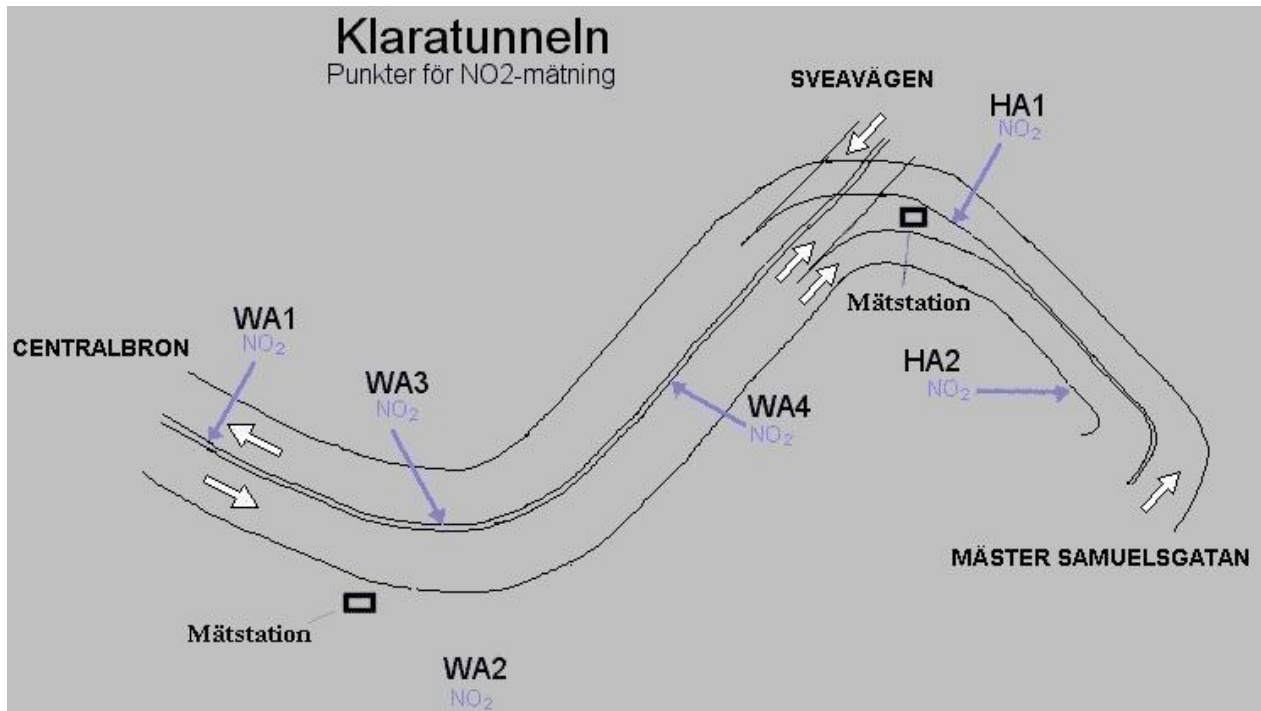
Söderledstunneln



Blekholmstunneln

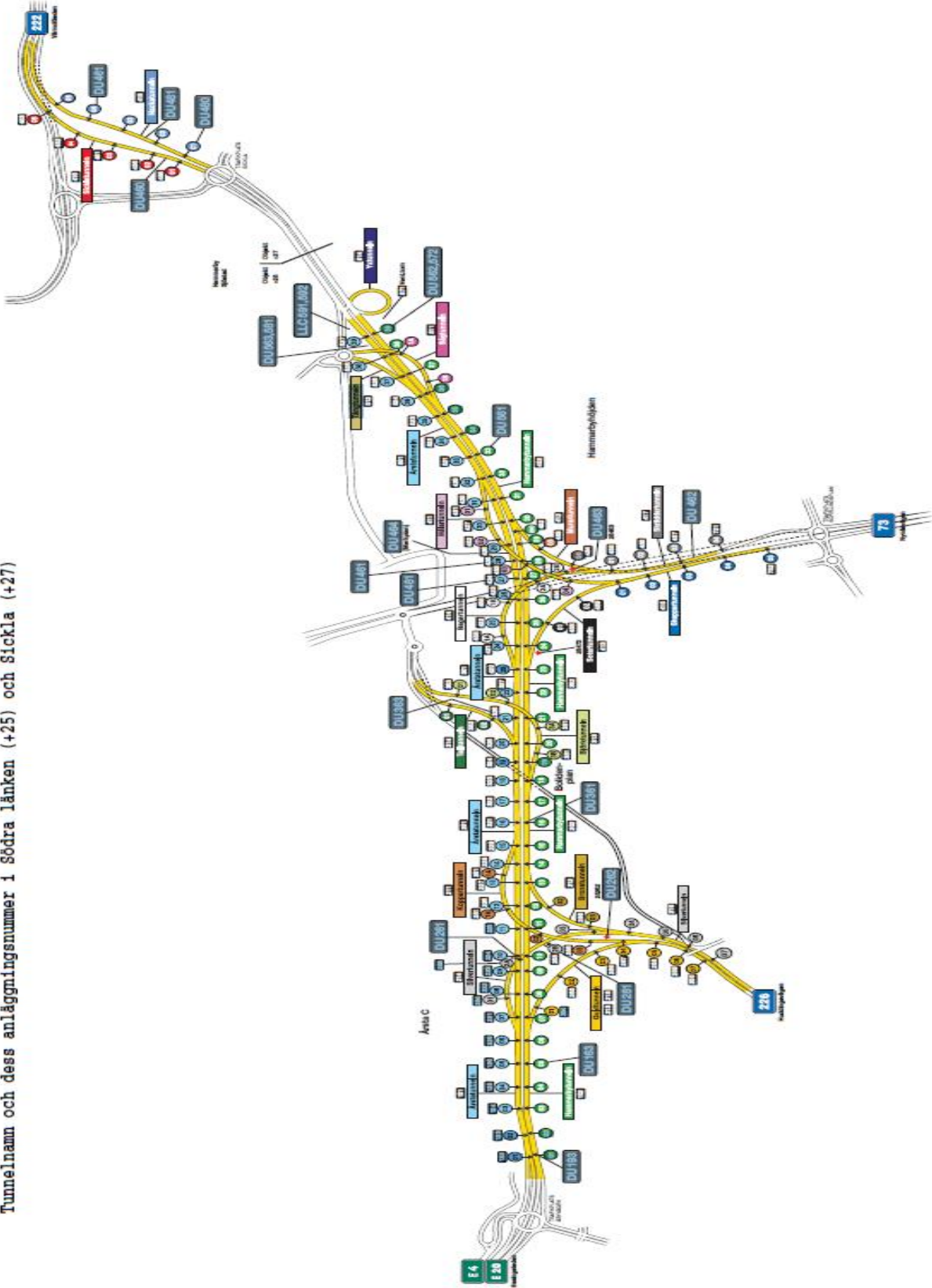


Klaratunneln



Södra Länkens tunnlar

Tunnelnamn och dess anläggningsnummer i Södra länken (+25) och Sickla (+27)



Utdrag från Vägverkets VV Publ 2004:124 "Tunnel 2004". Kap 5. Hälsa och miljö

5.2 Luft

5.2.1 Krav

5.2.1.1 Allmänt

Tunnlar skall utföras så att luftkvaliteten blir tillfredsställande för alla berörda såväl i tunneln som i tunnelns omgivning.

Med berörda avses såväl närboende som trafikanter.

En utformning som ger personer med funktionshinder samma tillgänglighet som andra till det aktuella vägavsnittet bör eftersträvas.

Krav på utformning och dimensionering av ventilationssystem anges i avsnitt 8.6.

5.2.1.2 Luftkvalitet i tunneln

Krav på tunnelluftens innehåll av kvävedioxid, NO₂, skall bestämmas i samråd med såväl den lokala miljö- och hälsoskyddsmyndigheten som Naturvårdsverket.

Halten av kolmonoxid får vid olyckor inte överskrida sådana nivåer att det påverkar människors förmåga att på ett säkert sätt ta sig ut ur tunneln.

WHO:s rekommenderade högsta halter av kolmonoxid bör tillämpas, se tabell 5.2-1.

Högsta tillåtna halter av kvävedioxid och kolmonoxid skall vara angivna i den tekniska beskrivningen.

Tabell 5.2-1 Rekommenderad högsta halt kolmonoxid i tunneln, tidsmedelvärde

<i>Kolmonoxid koncentration mg/m³</i>	<i>Uppmätt tid</i>
<i>100</i>	<i>15 minuter</i>
<i>60</i>	<i>30 minuter</i>
<i>30</i>	<i>1 timme</i>

5.2.1.3 Luftkvalitet i omgivningen

Utsläpp av föroreningar från tunnelmynningar och ventilationsöppningar får inte ske så att det uppstår olägenheter.

Kraven är redovisade av Naturvårdsverket i föreskrifter om gränsvärden och Miljökvalitetsnormer för luft.

Utsläpp bör ske så att förorenad luft inte förs tillbaka till tunnelns eller till annat byggnadsverks luftintag.

Utsläpp via ventilationstorn kan vara nödvändigt för att kraven på luftkvalitet vid intilliggande bebyggelse skall uppfyllas.

5.2.2 Emissioner

Emissionsberäkningar skall utföras enligt "Emissionsmodell för tunnlar" (VTI) samt "Emissioner i tunnlar – Beräkningsprogram med handledning" (Vägverket). Emissionsberäkningarna skall ingå i redovisningen av ventilationsberäkningen.

Emissionsberäkningar skall göras med avseende på kväveoxider, NO_x (NO+NO₂).

Andelen kvävedioxid av den totala kväveoxidemissionen bör sättas till 8 %.

För utsläpp till omgivningen skall beräkningar även göras för partiklar härrörande från:

- fordonens avgaser
- vägslitage

Vägslitagetets storlek varierar mellan olika typer av vägbeläggningar och andelen dubbdäck.

- däck- och bromsslitage.

5.2.3 Dimensionering

5.2.3.1 Luftkvalitet i tunneln

Ventilationsanläggningen skall dimensioneras med en beräkning som skall visa att av kraven på luftkvaliteten i tunneln innehålls.

5.2.3.2 Luftkvalitet i omgivningen

Ventilationsanläggningen skall dimensioneras med en beräkning som skall visa att kraven på luftkvaliteten i tunnelns omgivning innehålls.

Utsläppens spridning från mynningar och ventilationsöppningar skall analyseras.

Vägledande information om spridningsberäkningar ges i "Metodhandbok luft" (Naturvårdsverket) och i "Handbok för vägtrafikens luftföroreningar" (Vägverket/Naturvårdsverket).

Utsläpp från ventilationstorn och tunnelmynningar kan simuleras som punktkällor.

Vägledande information vid dimensionering av ventilationstornets höjd kan fås ur "Skorstenshöjd" (Naturvårdsverket).

Uppskattning av tunnelluftens spridning till omgivningen från tunnelmynningen kan utföras med hjälp av "Ventilation av vägtunnelar" (Nordiska Vägtekniska Förbundet).

5.2.4 Kontroll

Luftkvaliteten i tunneln skall kontrolleras genom mätning.

Vägledande information finns i "Handbok för vägtrafikens luftföroreningar" (Vägverket/Naturvårdsverket).

Spridningsberäkningen skall kontrolleras genom mätning.

Andelen kvävedioxid, NO₂ av NO_x-utsläpp för olika fordon, bränslen och euroklasser. Inom parentes anges värden för fordon med partikelfilter. Artemismodellen.

Bränsle/ rening:	Lätta fordon			Tunga fordon		
	Bensin	Diesel	Gas/etanol	Bensin	Diesel	Gas/etanol
Pre-Euro	5 %	8 %	10 %	5 %	7 %	25 %
Euro 1	5 %	8 %	10 %	5 %	7 % (25 %)	25 %
Euro 2	5 %	11 % (30 %)	10 %	5 %	7 % (25 %)	25 %
Euro 3	5 %	35 % (30 %)	10 %	5 %	7 % (30 %)	25 %
Euro 4	5 %	40 % (50 %)	10 %	5 %	7 % (25 %)	25 %
Euro 5	5 %	(35 %)	10 %	5 %	7 % (25 %)	25 %
Euro 6	5 %	(30 %)	10 %	5 %	28 %	25 %



är en enhet vid Miljöförvaltningen i Stockholm som

- utreder
- mäter
- beräknar
- informerar

avseende kvalitet på utomhusluft. SLB-analys genomför även externa uppdrag vad gäller luftkvalitet.

ISSN 1400-0806

SLB-analys
Miljöförvaltningen i Stockholm
URL: <http://www.slb.nu>