

LUFTKVALITET I VÄGTUNNAR

TILLÄGGSUPPDRAK NATIONELLT RIKTVÄRDE

2019-10-15

SLUTVERSION REVIDERAD
BERÄKNINGSHANDLEDNING 2019-12-13



Impulsfläktar i Norra länken. Foto Michael Ullén.

wsp

LUFTKVALITET I VÄGTUNNLAR

Tilläggsuppdrag nationellt riktvärde

KUND

Transportstyrelsen

Box 267
781 23 Borlänge
Besök: Jussi Björlingsväg 19
Telefon (växel): 0771 503 503
transportstyrelsen.se

Trafikverket

780 89 Borlänge
Besök: Röda vägen 1
Telefon (växel): 0771 921 921
trafikverket.se

KONSULT

WSP Advisory

WSP Sverige AB
121 88 Stockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7
Tel: +46 10 7225000
wsp.com

UPPDRAGSNAMN

Tillägg riktvärde tunnelluft

UPPDRAGSNUMMER

10281423

FÖRFATTARE

Sirje Pädam, Matts Andersson,
Karin Brundell-Freij, Mats
Finnson, Maria Noring, Göran
Nygren, Filippa Pyk

DATUM

2019-06-05

ÄNDRINGSDATUM

2019-12-13

KONTAKTPERSONER

Transportstyrelsen

Per Andersson
Per.andersson@transportstyrelsen.se

Trafikverket

Jan Skoog
jan.skoog@trafikverket.se

WSP Sverige AB

Sirje Pädam
sirje.padam@wsp.com

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	5
1 INLEDNING	8
1.1 AKTUELLA FRÅGESTÄLLNINGAR	9
1.2 SYFTE	9
1.3 METOD	9
1.4 AVGRÄNSNINGAR	11
1.5 RAPPORTENS DISPOSITION	11
2 BRAND OCH VENTILATION	13
2.1 INITIALTILLSTÅND I TUNNELN FÖRE BRAND	13
2.1.1 Inledning	13
2.1.2 Tunnelaerodynamik och vägtrafikens emissioner	13
2.1.3 Principer för tunnelventilation	14
2.1.4 Styrande parametrar för lufthastigheter i initialskeket	17
2.1.5 Krav på lufthastigheter	18
2.1.6 Faktorer utöver ventilation som påverkar lufthastighet	19
2.2 RISKER VID BRAND/EXPLOSION	19
2.2.1 Strategi för brandgaskontroll i tunnlar	19
2.2.2 Höga ventilationsflöden - påverkan på branden	20
2.3 DISKUSSION/SLUTSATS	24
3 KONSEKVENSER FÖR INTERNATIONELLT SAMARBETE	26
3.1 TRANSPORTOMRÅDET REGLERAS FRAMFÖRALLT PÅ EU-NIVÅ	26
3.2 MILJÖZON I TUNNEL?	27
3.3 GRÄNSÖVERSKRIDANDE TUNNEL	27
3.4 ANMÄLNINGSPLIKT FÖR TEKNISKA REGLER	28
3.5 SLUTSATSER AVSEENDE INTERNATIONELLT SAMARBETE	28
4 RIKTVÄRDENAS EFFEKTER PÅ BESLUT OM FRAMTIDA TUNNLAR	29
4.1 INLEDNING	29
4.2 METODFRÅGOR OCH INDATA	29
4.2.1 Att jämföra samhällsekonomiska kalkyler	29
4.2.2 Hantering av alternativnyttor och budgetrestriktioner	30
4.2.3 Lönsamhetens påverkan på huruvida en tunnel blir byggd	31
4.3 FALLSTUDIER	32
4.3.1 Val av fallstudier	32
4.3.2 Kostnadsuppskattningar för utökad ventilation i Förbifart Stockholm	34
4.3.3 Södra länken	42
4.3.4 Norra länken	43
4.3.5 Tvärförbindelse Södertörn	46
4.4 SLUTSATSER	47

5	KONKRETISERING RIKTVÄRDE	49
5.1	SLUTSATSER FRÅN TIDIGARE ARBETE	49
5.2	HUR KAN RIKTVÄRDET GENERALISERAS?	50
5.3	LÄMPLIGT RIKTVÄRDE – INDIVIDUELL RISK	51
5.4	LÄMPLIGT RIKTVÄRDE – SAMHÄLLSEKONOMI	52
5.4.1	Riktvärdet jämförs med en referenssituation	52
5.4.2	Faktorer som påverkar avvägningen	53
5.4.3	Vilket riktvärde kan vara samhällsekonomiskt motiverat i andra tunnlar?	55
5.4.4	Riktvärden för en specifik tunnel – vad behövs?	56
5.4.5	Att styra halten när tunneln är i drift	57
6	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	60
7	LITTERATURFÖRTECKNING	64
8	BILAGA - TUNNELVENTILATION	69
8.1	GENERELLA FÖRUTSÄTTNINGAR	69
8.2	ÖKAT ANTAL LUFTUTBYTESSTATIONER - ANTAGANDEN	69
8.3	STÖRRE TUNNELTVÄRSNITT - ANTAGANDEN	69
8.4	ÖKAD LUFTHASTIGHET MED FLER IMPULSFLÄKTAR - ANTAGANDEN	70
8.5	PARTIKELRENINGSSATIONER	70
8.6	VENTILATIONSBEHOVSFAKTOR	73
9	BILAGA BERÄKNINGSHANDLEDNING	76
9.1	TIMMEDELHALT OCH TRAFIKANTVIKTAD MEDELHALT	76
9.2	BEGRÄNSAD INDIVIDUELL RISK FÖR FREKVENTA ANVÄNDARE	77
9.2.1	Passage av flera tunnlar	78
9.3	ETT LÄGRE RIKTVÄRDE PÅ SAMHÄLLSEKONOMISK GRUND	78
9.3.1	Utgångspunkter	78
9.4	STEGEN I DEN SAMHÄLLSEKONOMISKA ANALYSEN	79
9.4.1	Definiera alternativa riktvärden och beräkna trafikantviktad medelhalt	79
9.4.2	Trafikförutsättningar	80
9.4.3	Investerings- och driftskostnader	80
9.4.4	Hälsoeffekt	81
9.4.5	Nuvärdesberäkning: Aggregera över kalkylperioden	82
9.4.6	Sammanvägning och slutsats	83
9.5	REFERENSLISTA	83

SAMMANFATTNING

Under 2017–2018 genomförde WSP en samlad översyn av möjligheterna att föreslå ett nationellt riktvärde för luftkvalitet för i första hand nya vägtunnlar. I översynen sammanfattades tidigare forskning inom området och analyserna resulterade i rekommendationer för vägtunnlar med mekanisk ventilation om att riktvärdet bör baseras på kväveoxider (NO_x). Detta mot bakgrund av möjligheten att mäta halter i tunnel och att befintliga effektsamband för luftföroreningars hälsoeffekter till stor del baseras på studier av förhöjda halter av NO_x och risk för förtida död. De beräknade hälsoeffekterna baserades på långsiktiga effekter av NO_x , som indikator för trafikens luftföroreningar. I takt med att forskningen går framåt och effektsamband tas fram föreslogs en komplettering av detta angreppssätt med hälsobedömning utifrån avgaspartiklar/sot eventuellt i kombination med NO_2 .

Två principer rekommenderades som grund för styrning av luftkvaliteten i varje vägtunnel. Den ena är att riktvärdet ska vara så lågt att riskhöjningen avseende hälsoeffekten inte blir oacceptabelt hög för dagliga pendlare. Den andra är att det riktvärde som följer är samhällsekonomiskt lönsamt. Vid tillämpningen av principerna för Förbifart Stockholm framkom att riktvärdet bör sättas så lågt att det inte fullt ut kan upprätthållas med den projekterade ventilationsutrustningen.

Transportstyrelsen och Trafikverket har initierat ett tilläggsuppdrag som belyser följande frågeställningar: kan ytterligare risker uppkomma vid brand och explosion när ventilationen körs på full kapacitet, vilka alternativ finns det till att ventilerar med full kapacitet, hur påverkar de kostnadsökningar som ges av ett strängt riktvärde lönsamheten för stora tunnelprojekt och vad blir de samhälleliga konsekvenserna av att tunnlar inte byggs alternativt att vägen läggs i ytläge och bör alternativnyttor beaktas avseende offentliga medel som behöver läggas på ökad ventilation och kan ett strängare riktvärde i Sverige än i våra grannländer vara ett handelshinder? Med utgångspunkt i dessa analyser önskar Transportstyrelsen och Trafikverket en konkretisering av riktvärden.

Syftet med detta tilläggsuppdrag är att utreda de kompletterande frågeställningarna. Ytterligare ett syfte är att pröva om resultaten från analyserna av de nya frågeställningarna ger anledning till att föreslå ändrade principer vid bestämning av riktvärde för luftkvaliteten i vägtunnlar.

De fördjupade analyser som genomförts inom ramen för detta uppdrag har inte gett anledning att ändra de grundläggande principerna för hur ett riktvärde bör sättas. Konkretiseringen av hur ett riktvärde bör sättas baseras således på de två principer som rekommenderades i den tidigare utredningen.

Den tidigare utredningen förbisåg de ytterligare risker som kan uppkomma när ventilationen körs på hög kapacitet. När ventilationen körs för fullt ökar lufthastigheten i tunneln. Ökad lufthastighet ger en snabbare och högre effektutveckling vid brand, snabbare spridning av brandgaser och ökad risk för brandspridning mellan fordon. Det kan också leda till en högre risk för explosion. Svårigheten att detektera brand ökar med lufthastigheten på grund av en större utspädningseffekt. Detta innebär i sin tur att risken ökar

för att bränder kan växa sig stora innan åtgärder kan vidtas. Vid högre ventilationshastighet minskar framför allt tidsaspekten för utrymning.

En ökad lufthastighet minskar koncentrationen av kväveoxider (NO_x) i tunneln, vilket sparar liv genom färre förtida dödsfall. Samtidigt ökar risken vid brand. Det går dock inte att med dagens kunskap kvantifiera hur mycket risken ökar och ställa det mot hälsoeffekterna av lägre haltnivåer. För att kvantifiera riskökningen behövs empiri från stora brandförsök. Det är underlag som saknas idag.

Analyser har gjorts av alternativa sätt att nå riktvärdet genom annan utformning av ventilationssystemet: fler luftutbytesstationer, ökat antal impulsfläktar och större tunnelarea. Av de studerade alternativen för att sänka koncentrationen av kväveoxider (NO_x) kan samtliga alternativ, utom fler impulsfläktar, hypotetiskt halvera haltnivåerna. Förutom begränsningen av hur mycket koncentrationen av NO_x kan sänkas, ger fler impulsfläktar ökade lufthastigheter, vilket ger större risk vid brand. Vid en jämförelse mellan ökat antal luftutbytesstationer och större tunnelarea, framkommer att en större tunnelarea är en betydligt mer kostsam åtgärd för att halvera halten av NO_x än fler luftutbytesstationer. Införande av fler luftutbytesstationer är inte bara kostnadseffektivt, utan även gynnsamt brandtekniskt eftersom tätare brandgasavskiljningar kan utföras.

De riktvärden för tunnelluft som diskuteras förhindrar många förtida dödsfall. Exempelvis kan en sänkning av maxhalten från 2 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x till 1 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i Förbifart Stockholm spara 13 liv under ett år. Riktvärdena kommer samtidigt att öka kostnaden för att bygga tunnlar och kostnaderna för tunneldrift. Fallstudierna som genomförts visar att lönsamheten påverkas marginellt. Investeringskostnaden för den ökade ventilationen som krävs för att förbättra tunnelluften är liten i förhållande till den ursprungliga investeringen för tunnarna: 2,4 procent för Förbifart Stockholm, 1,5 procent för Södra Länken, 1,5 procent för Norra Länken och 0,7 procent för Tvärförbindelse Södertörn. Eftersom litteraturen pekar på att den samhällsekonomiska lönsamheten inte har stor påverkan på om ett objekt byggs är det sannolikt att de ökade ventilationskostnaderna inte har någon större påverkan på byggandet av tunnlar i framtiden.

Under driftsskedet är däremot kostnaden stor i förhållande till budgetarna för drift och underhåll. Här finns behov att se till att budgetarna anpassas, vilket det inte alltid finns politisk acceptans för.

Genomgången av konsekvenser för internationellt samarbete tyder på att ett strängt riktvärde i Sverige inte ger några konsekvenser för internationellt samarbete. Skillnader i andra krav och regler inom transportområdet har inte haft sådana konsekvenser och efter diskussion med Kommerskollegium är slutsatsen att ett nationellt riktvärde för luftkvalitet i vägtunnlar inte utgör ett handelshinder. Det senare baseras på att ett riktvärde inte är anmälningspliktigt till EU enligt anmälningsdirektivet för tekniska regler.

Konkretiseringen av hur ett riktvärde bör sättas baseras på de två principer som rekommenderades i den tidigare utredningen. En fördjupad analys görs av hur tunnelns egenskaper kan påverka vilket riktvärde som sätts för halten. Utgångspunkten är att riktvärdet formuleras som ett högsta timmedelvärde av NO_x för medelhalten längs tunneln.

När det gäller principen om riskhöjning för dagliga pendlar, bör riktvärdet sättas omvänt proportionellt mot tunnelns längd. På så sätt kommer den "dos" luftföroreningar som frekventa användare utsätts för att vara densamma i olika tunnlar, vilket i sin tur innebär samma gräns för den individuella riskökningen i alla tunnlar. Analyserna indikerar att det bara är för långa tunnlar som en gräns för den individuella riskökningen kommer att spela någon praktisk roll för hur tunnelventilationen styrs. För kortare tunnlar motsvarar gränsen så höga halter att ventilation kommer att krävas av andra skäl (till exempel sikt).

Inom ramen för uppdraget har ett starkt förenklat effektsamband tagits fram för hur ventilationskostnaderna beror av riktvärdet och tunnelns egenskaper. Detta har ställts mot hälsoeffekterna. Med detta som grund konstateras att en sänkning av medelhalten som nått och jämnt är samhällsekonomiskt lönsam i en högtrafikerad lång tunnel, kan vara samhällsekonomiskt motiverad också i korta tunnlar med liten trafik. Hälsoeffekterna av sänkningen blir mycket större i den långa tunneln – men ventilationskostnaderna ökar i ungefär samma utsträckning!

Man måste dock komma ihåg att modellen ger en starkt förenklad bild av hur ventilationskostnaderna varierar mellan tunnlar. När riktvärden sätts i ett konkret fall för en specifik tunnel bör olika nivåer för riktvärdet analyseras (avvägning hälsnytta mot ventilationskostnader) utifrån de ventilationsalternativ som är möjliga och de förutsättningar som gäller just för den tunneln. För varje undersökt alternativ behöver investeringskostnader, energianvändning, medelhalten i tunneln under dygnets olika timmar beräknas. Dessa beräkningar genomförs av ventilationsexpertis. De samhällsekonomiska kostnaderna för drift (energianvändning och underhåll), beräknas enligt de principer som fastslås i ASEK. Beräkningarna i WSP (2018) kan tjäna som exempel.

1 INLEDNING

Vägtrafiken genererar betydande luftföroreningar. För utomhusluft finns miljökvalitetsnormer för att skydda människor från oacceptabla hälsoeffekter. För luftkvalitet i vägtunnlar finns det däremot inga generellt gällande riktvärden. Vid planering och projektering av vägtunnlar finns det följaktligen inga nationellt fastslagna metoder eller krav att utgå ifrån beträffande hälsoeffekter av luftkvalitet. Internationellt finns nationella riktvärden för vägtunnlar endast i ett fåtal länder. Den maxhalt för NO_x på 29 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ som används i Norge ligger betydligt över den maxhalt på 5 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ som tidigare föreslagits av Vägverket (SLB, 2010). Det är oklart i vilken mån överväganden om hälsoeffekter ligger till grund för det norska riktvärdet.

Trafikverket har finansierat flera forskningsprojekt som underlag för ett nationellt riktvärde för luftkvalitet i vägtunnlar. Med utgångspunkt från denna satsning initierade Trafikverket och Transportstyrelsen en samlad översyn av möjligheterna att föreslå ett nationellt riktvärde för luftkvalitet i vägtunnlar. Översynen genomfördes av WSP under 2017/2018 på uppdrag av Trafikverket och Transportstyrelsen (WSP, 2018). I den rapporten analyserades emissioner från trafik, halt av föroreningar i tunnel och i fordon, exponering/dos av föroreningar, hälsoeffekter av föroreningar samt samhällsekonomiska effekter av och kostnader för ventilationsbehov. Rapporten inkluderade även känslighetsanalyser av bland annat fordonsflottans utveckling samt en slutlig jämförelse av den riskhöjning dagliga pendlare löper för förtida död med två andra samhälleligt accepterade hälsorisker.

Analyserna resulterade i en rekommendation för vägtunnlar med mekanisk ventilation om att riktvärdet bör baseras på kväveoxider (NO_x). Detta mot bakgrund av möjligheten att mäta halter i tunnel och att befintliga effektsamband för luftföroreningars hälsoeffekter till stor del baseras på studier av förhöjda halter av NO_x och risk för förtida död. I takt med att forskningen går framåt och effektsamband tas fram förordades att detta angreppssätt kompletteras med hälsobedömning utifrån avgaspartiklar/sot eventuellt i kombination med NO_2 .

Två principer rekommenderades som grund för styrning av luftkvaliteten i varje vägtunnel. Det lägsta av de två riktvärden som följer av respektive princip bör tillämpas i utformning och styrning av tunnelventilationen:

- För det första ska riktvärdet vara så lågt att riskhöjningen på grund av tunnelpassagen inte blir oacceptabelt hög för den pendlare som dagligen nyttjar tunneln under de mest ogynnsamma omständigheterna.
- För det andra skall man välja ett lägre riktvärde än det som följer av ovanstående om det är samhällsekonomiskt motiverat med tanke på de totala långsiktiga hälsovinster som kan uppnås för trafikantkollektivet som helhet.

Vid tillämpningen av principerna för Förbifart Stockholm framkom att riktvärdet bör sättas så lågt att det inte fullt ut kan upprätthållas med den projekterade ventilationsutrustningen.

1.1 AKTUELLA FRÅGESTÄLLNINGAR

För att kunna föreslå ett väl avvägt nationellt riktvärde för luftkvalitet i vägtunnlar har Transportstyrelsen och Trafikverket identifierat behov av ytterligare underlag i form av ny kunskap kopplat till mer övergripande konsekvenser av den tidigare utredningens rekommendationer. Transportstyrelsen och Trafikverket efterfrågar underlag som besvarar följande frågor:

1. Givet att halterna måste hållas låga på grund av hälsoskäl och att miljöventilationen måste ha hög kapacitet, vilka ytterligare risker kan tillkomma vid brand eller explosion?
2. Vilka eventuella konsekvenser kan uppkomma, till exempel handelshinder, om Sverige skulle tillämpa ett strängare krav än våra nordiska grannländer (om man i en framtid skulle vilja bygga nya vägtunnlar mellan länderna)?
3. Går det att finna lönsamhet och genomförbarhet för stora tunnelprojekt med riktvärden för luftkvalitet som indikeras i rapporten (WSP, 2018)? Om inte, vad är de samhälleliga konsekvenserna av att sådana i så fall inte byggs?
4. Bör man beakta alternativnyttor avseende de pengar som behöver läggas på den ökade ventilationen? Och hur stor del av de negativa hälsokonsekvenserna av långa tunnlar kan uppvägas av att olycksriskerna, bullernivåerna och restiderna reduceras, jämfört med om motsvarande väg skulle förläggas till ytvägnätet?
5. Finns det andra konsekvenser som borde utredas?
6. Vad är lämpligt riktvärde utifrån en pragmatisk tolkning?

1.2 SYFTE

Syftet med detta tilläggsuppdrag är att besvara de kompletterande frågeställningarna. Ytterligare ett syfte är att pröva om resultaten från analyserna av de nya frågeställningarna ger anledning till att föreslå ändrade principer för styrning av luftkvaliteten i vägtunnlar.

1.3 METOD

För att svara på frågeställningen ifall ett strängt riktvärde kan påverka riskerna vid brand och explosion genomförs en grundlig utredning baserad på befintliga effektsamband. Bedömningarna baseras på överslagsmässiga analyser och litteraturstudier. Frågeställningen besvaras på basis av befintlig kunskap om händelse- och konsekvenssamband.

Utredningen av konsekvenser för internationellt samarbete baseras på en genomgång av på vilket sätt andra krav och regler inom transportområdet påverkar Sveriges internationella förbindelser. Underlag har samlats in genom litteraturgenomgång samt kontakter med myndigheter och branschorganisationer.

Analysen av fråga 3 och fråga 4 inleds med en teoretisk genomgång av frågeställningar om hur alternativnyttor och budgetrestriktioner behandlas i samhällsekonomiska kalkyler och vad litteraturen visar om hur samhällsekonomisk lönsamhet påverkar sannolikheten för att ett objekt byggs. För att beräkna kostnaden för att förbättra luftkvaliteten i vägtunnlar

tas kalkyler fram av alternativa sätt att nå ett riktvärde.

Investeringskostnaderna för alternativa sätt att nå riktvärdet baseras på Östlig förbindelse och Förbifart Stockholm. Mot bakgrund av att kostnaderna är unika för varje tunnel bestäms en skalningsfaktor för att föra över kostnaderna till andra tunnlar. Fallstudier väljs ut för att illustrera kostnadsökningen. Baserat på fallstudierna analyseras effekten på den samhällsekonomiska lönsamheten och vad som hade varit ett förväntat alternativ om vägen inte hade lagts i tunnel.

Att ge riktvärdet en pragmatisk tolkning handlar om att konkretisera riktvärden för typtunnlar. Det görs genom att analysera hur olika egenskaper hos tunnelarna påverkar riktvärdet. Utgångspunkten för riktvärdet är i enlighet med den tidigare utredningen hälsopåverkan från trafikens emissioner (**WSP, 2018**). För den enskilda trafikanten kommer hälsopåverkan att bero på den totala dosen. Dosen beror inte på den maximala halt som trafikanterna drabbas av på enskilda platser i tunneln, utan på vilken medelhalt som råder under trafikantens färd längs tunneln, och hur lång tid resan genom tunneln tar.

Även de trafikanter som passerar under den värst belastade tiden på dygnet kommer att möta en medelhalt som är betydligt lägre än halten i det värsta snittet. Om ventilationen, till exempel, skulle styras utifrån ambitionen att halten NO_x under alla dygnets timmar, och i alla tunnelns delar, skulle hållas under $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, så kommer den medelhalt som enskilda trafikanter upplever under sin färd längs tunneln att bli betydligt lägre än så, även under den mest belastade timmen.

De aggregerade hälsokonsekvenserna för alla trafikanter beror i sin tur på vilken medelhalt som gäller för en genomsnittlig trafikant (trafikantviktad medelhalt), och det totala antalet passager. En sådan "medeltrafikant" kommer att utsättas för lägre halter än de trafikanter som reser i den absoluta högtrafiken, eftersom halten varierar under dygnet, och många trafikanter passerar utanför den allra mest belastade perioden. I beräkningar av medelhalten för en medeltrafikant behöver man också ta hänsyn till att fler trafikanter passerar under de timmar då halten är hög (högtrafikperioder) än då halten är låg.

Tabellen nedan är hämtad från WSP (2018, tabell 4) och redovisar maxhalt, medelhalt för maxtimme och medelhalt per dygn samt trafikantviktad medelhalt. Nivåerna gäller för E4 Förbifart Stockholm.

Tabell 1. Haltnivåer (NO_x, µg/m³) i Scenarier för Förbifart Stockholm (FS) uttryckt som maxhalt i något tunnelsegment, och vad dessa nivåer motsvarar uttryckt som medelhalter för hela tunneln. (Källa: egen bearbetning baserat på beräkningar av Brandt och Lucchini, 2016))

Scenario	FS UA1	FS UA2	FS UA3	FS Noll-alternativ
Maxhalt: <i>Tak* för den maximala halten i någon punkt av tunneln, uttryckt som timmedelvärde under dygnets "värsta" timme ur luftkvalitetshänseende</i>	1000/1789*	2000	3000	4000
Medelhalt maxtimme: <i>Genomsnittlig halt längs tunneln under den tid när maxhalten nås i någon punkt, uttryckt som timmedelvärde under maxtimme</i>	1145 ^{*)}	1660	2041	2142
Medelhalt dygn: <i>Genomsnittlig halt i hela tunneln, dygnsmedelvärde givet att ventilationen styrs utifrån maxhalt.</i>	470	705	852	885
Trafikantviktad medelhalt <i>Medelhalt för en medeltrafikant under ett dygn givet att ventilationen styrs utifrån maxhalt</i>	592	900	1134	1205

*) För FS UA1 överstiger medelhalten i maxtimmen (1145 µg/m³) den valda nivån för eftersträvarde maxhalten (1000 µg/m³). Det beror på att den projekterade ventilationsanläggningen inte medger att man upprätthåller den eftersträvarde maxhalten. Maxhalten kan då inte hållas fullt ut under 1789 µg/m³.

Noteras kan att sambandet mellan medelhalt under maxtimmen är cirka halva maxhalten under maxtimme. Vidare framkommer att de analyser av Förbifart Stockholm som genomfördes av Brandt och Lucchini (2016) tyder på att det trafikantviktade dygnsmedelhalten längs tunneln (se Tabell 1) ligger på en stabil nivå (52-56 procent) av den medelhalt som uppmätts för den värsta timmen (medelhalt maxtimme).

1.4 AVGRÄNSNINGAR

Inom ramen för utredningen genomförs inga simuleringar utan analyserna baseras på befintliga effektsamband och litteraturstudier. Inga nya bedömningar av hälsoeffekter har genomförts inom ramen för utredningen. De hälsoeffekter som tas upp i analyserna baseras på WSP (2018). När det gäller fallstudierna av tunnlar har urvalet av tunnlar begränsats av tillgången till genomförda samhällsekonomiska kalkyler. Analyserna av alternativa sätt att nå riktvärdet har avgränsats till hur haltnivån kan reduceras genom utformning av ventilationssystem och tunnelarea. Andra sätt att nå riktvärdena, exempelvis analyser av trafikstyrning för att nå ett riktvärde ligger utanför ramen för denna utredning.

1.5 RAPPORTENS DISPOSITION

I rapportens **inledande kapitel** redovisas uppdragets bakgrund, syfte, avgränsning och metod. I **kapitel 2** analyseras huruvida den kraftiga

ventilation som rekommenderades i den tidigare rapporten medför risker vid brand eller explosion. I **kapitel 3** undersöks i vilken mån strängare krav i Sverige än i våra grannländer kan påverka internationellt samarbete och om kravet är att betrakta som ett handelshinder. **Kapitel 4** analyserar implikationerna på genomförbarhet och lönsamhet av stränga krav på luftkvalitet i vägtunnlar genom att bland annat undersöka hur lönsamheten för ett antal tunnlar hade påverkats och implikationerna av om stora tunnelprojekt inte kommer till stånd. Kapitlet analyserar också alternativanvändningsvärdet av de pengar som behöver läggas på ventilation. Vidare förs en diskussion om de negativa hälsokonsekvenserna av långa tunnlar kan uppvägas av olycksriskerna, bullernivåerna och restiderna reduceras, jämfört med om motsvarande väg istället förläggs till ytvägnätet. I kapitel 4 besvaras alltså frågorna 3 och 4 ovan. I **kapitel 5** genomförs fördjupade analyser och en beräkningsmetodik föreslås för ett riktvärde.

2 BRAND OCH VENTILATION

2.1 INITIALTILLSTÅND I TUNNELN FÖRE BRAND

2.1.1 Inledning

Lufthastigheten i en vägtunnel innan en brand uppstår beror av trafiksituationen och i vilken grad tunneln ventileras. För att ge en bakgrund till lufthastigheter redovisas i avsnitten nedan olika scenarier, ventilationsprinciper samt vilka hastigheter som kan förekomma.

2.1.2 Tunnelaerodynamik och vägtrafikens emissioner

Givet en tunnelgeometri (tunnellängd, tvärsektionsarea, lutningar, luftens friktion mot tunnelväggar och installationer) är lufthastigheten i tunneln under normala förhållanden beroende främst av trafikflödet (mängden fordon och trafikens hastighet), yttre förhållanden (vindpåverkan¹ och lutning) och ventilationsprincip.

Med lufthastighet avses medelvärde i tunneltvärssnittet. Hastigheterna kan lokalt vara högre vilket beskrivs i avsnitten nedan.

Vid flytande trafik med skyltad hastighet kan en tunnel i vissa fall vara självventilerande genom fordonens kolvverkan. Kolvverkan uppstår från fordonens förträngning i tunneltvärssnittet när de kör igenom tunneln vilket driver på ett luftflöde genom tunneln. Uteluft dras in i infartsmynningen och förorenad luft förs ut i utfartsmynningen. Vid kolvverkan behöver inte tunnelventilationen vara i drift om koncentrationen av föroreningar är under riktvärdet.

Om trafikens hastighet inte är tillräckligt hög blir kolvverkan otillräcklig för att dra igenom tillräcklig mängd uteluft genom tunneln för att hålla koncentrationer av föroreningar under riktvärdet. I denna trafiksituation behöver tunnelventilationen föra in uteluft för att späda ut föroreningarna. En typisk situation är vid kö, eller s k "stoppa&gasa" när trafiken sakta flyter fram i "krypfart" med ständiga inbromsningar och accelerationer.

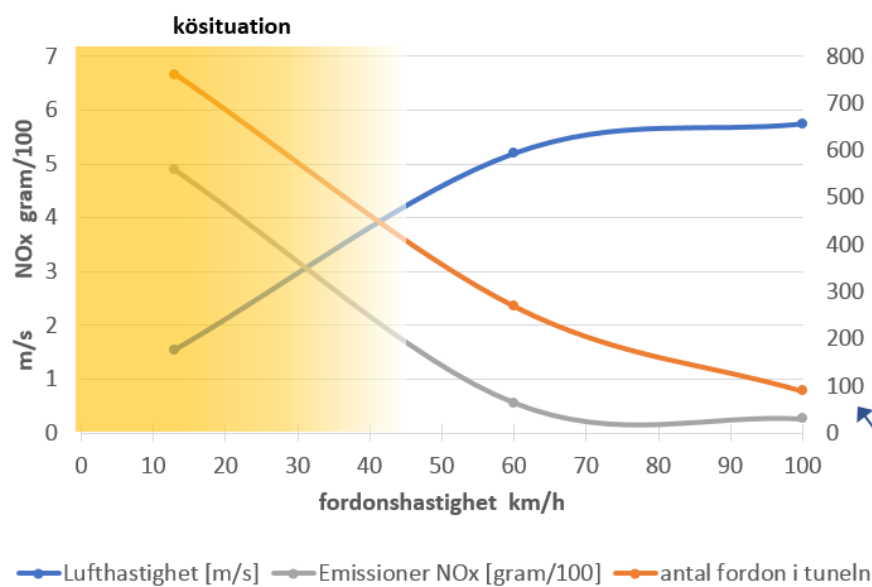
Generellt sett är fordonens emissioner (gram utsläpp per kilometer tunnel) inte proportionella med fordonens hastighet. Till exempel för utsläpp av avgaspartiklar och kvävedioxid hos personbilar ungefär 3 gånger så hög per kilometer vid kösituation "stoppa&gasa" jämfört mot flytande trafik med 60 km/h eller cirka 2 gånger så hög jämfört mot 100 km/h (emissionsdata enligt (Brandt & Lucchini, 2016)). Ventilationsbehovet vid kösituation blir därför större dels på grund av större emissioner vid "stoppa&gasa", dels på grund av låg kolvverkan och dels på grund av att fler fordon finns i tunneln vid kö än vid flytande trafik.

Figur 1 visar hur fordonshastigheten förändrar lufthastigheten i tunneln från kolvverkan, antal fordon i tunneln och den totala mängden emissioner från fordonen i tunneln. Exemplet avser ett 3 km långt tunnelrör med tunnelsektionsarea på 100 m², 3 körfält samt utan på- och avfarter.

¹ Speciellt för kortare tunnlar

Emissionsfaktorer är hämtade ur Brandt och Lucchini (2016) och avser personbilar. Lufthastigheten är beräknad enligt vedertagen formel för kolvverkan, bland annat presenterad av PIARC. Antal fordon i tunnlar som funktion av fordonshastighet baseras på data i (Fläktwoods Tunnelventilation.). Kösituation motsvarar på ett ungefär det skuggade fältet i grafen, se Figur 1.

Vad som framgår i grafen är att när fordonshastigheten avtar ökar mängden bilar i tunneln (avståndet mellan bilarna minskar) och emissionerna i tunneln ökar. Emissionerna räknat som gram per kilometer och per fordon ökar när trafikhastigheten är låg på grund av körsättet i kösituation ("stoppa&gasa"). När fordonshastigheten går ner sjunker även lufthastigheten i tunneln (om fläktarna är avstängda) på grund av att kolvverkan blir mindre. Därav blir ventilationsbehovet större i tunneln vid kö jämfört mot flytande trafik.



Figur 1. Relationer mellan fordonshastighet, antal i fordon i tunneln, kolvverkans genererade lufthastighet i tunneln och total mängd emissionerna i tunneln. Exemplet avser 3 km lång tunnel med tunnelsektionsarea på 100 m² och 3 körfält.

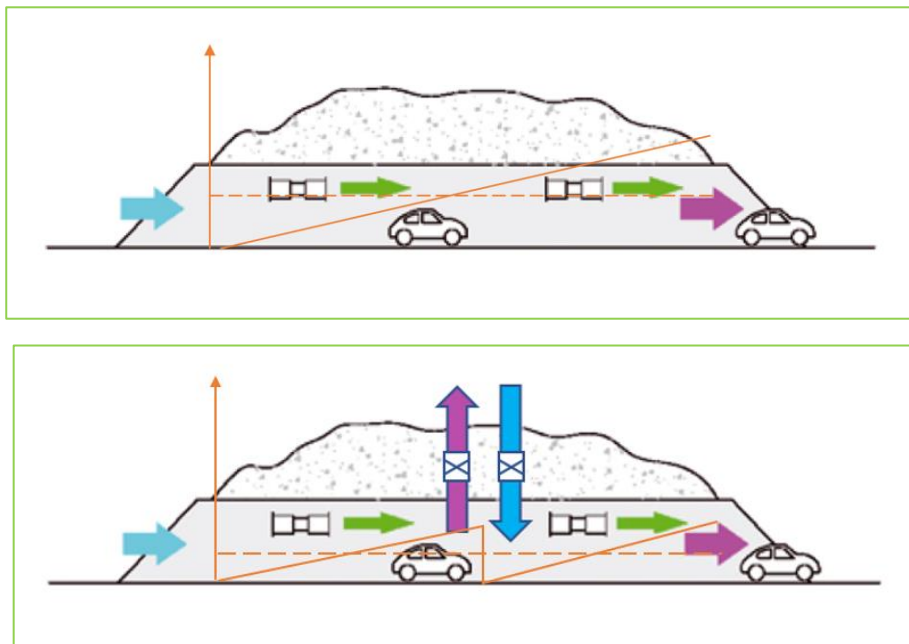
Förorenad luft som strömmar ut genom utfartsmynningen med tunnelluftens hastighet kan ibland behöva begränsas för att hålla låga nivåer i tunnelmynningens närhet. Därför används frånluftstationer i tunneln och ett stycke före utfartsmynningen för att suga bort en del av tunnelluften och blåsa ut den genom avluftstorn. Mellan intilliggande tunnelmynningar kan överläckning ske av förorenad luft från utfartsmynning till infartsmynning. Frånluftstationer vid mynningarna kan minska denna överläckning.

2.1.3 Principer för tunnelventilation

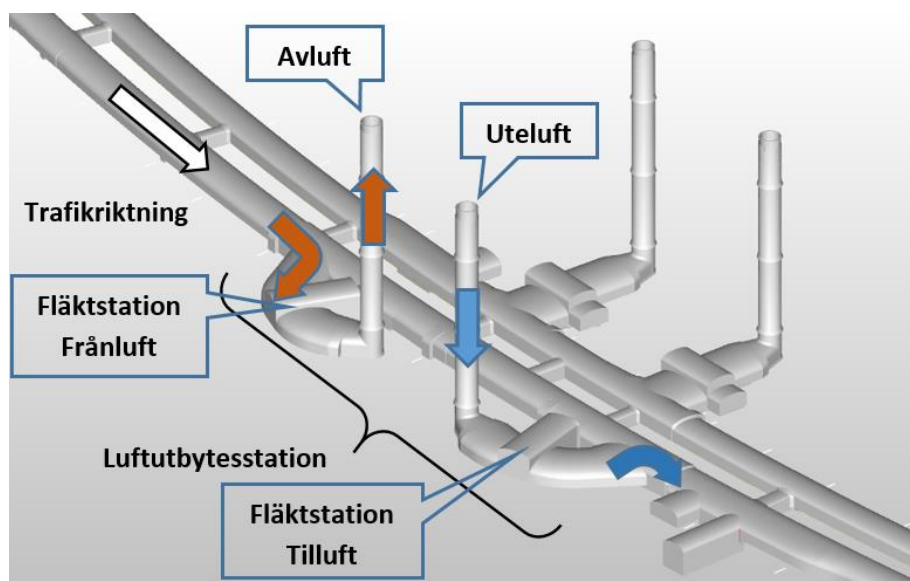
Tunnelventilation kan göras med två olika huvudprinciper: *longitudinell ventilation* (även kallad längsgående ventilation) och *transversell ventilation* (även kallad tvärgående ventilation) se Figur 2. Denna studie med referenstunnel Förbifart Stockholm avgränsas till longitudinellt system, vilket även är den dominerande ventilationsprincipen i Sverige, speciellt i nyare tunnlar.

Longitudinell ventilation

Med *longitudinell ventilation* genereras ett luftflöde genom tunneln med så kallade impulsfläktar i tunneltaket om trafikens kolvverkan inte skapar tillräcklig lufthastighet i tunneln, se Figur 2 (övre bild). Koncentrationerna ökar ungefär linjärt längs tunneln om inga påfartsramper finns som kan föra ner uteluft. Den brandgula linjen i figuren som symboliserar ökning av koncentrationer längs tunneln. Den streckade linjen visar medelvärdet av koncentrationerna längs tunneln. Om tunneln är lång behöver tunnelluften bytas ut efter en viss sträcka i luftutbytesstationer. En viss mängd tunnelluft sugas ut och samma mängd frisk uteluft förs in i tunneln, se Figur 2 (nedre bild) och Figur 3.

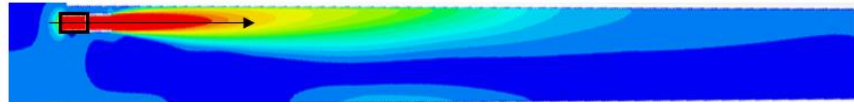


Figur 2. Överst: Princip för longitudinell ventilation. Underst: Longitudinell ventilation med luftutbytesstation. Grafen i figurerna visar principen för ökning av koncentrationer längs tunneln. Den streckade linjen indikerar medelvärdet. Figur: PIARC samt komplettering med grafer.



Figur 3. Principutformning av en luftutbytesstation. Schakten för avluft och uteluft leds upp till markytan. 3D-modell för Förbifart Stockholm (Trafikverket).

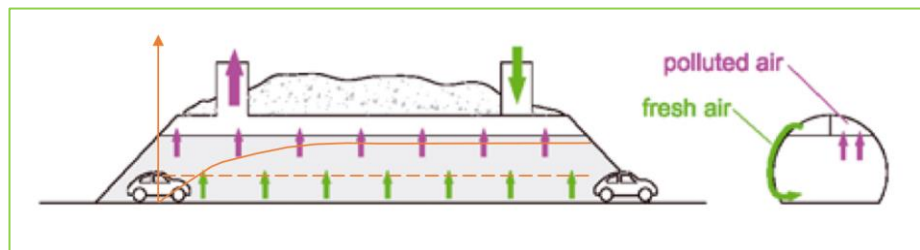
En impulsfläkt har en utloppshastighet på 25 – 30 m/s, men denna hastighet klingar succesivt av ju längre nedströms från fläkten man är. I den övre halvan av tunnelsektionen ett tiotal meter nedströms fläkten kan lufthastigheten fortfarande vara högre än medelhastigheten i tunneltvärsnittet, se Figur 4. Även om lufthastigheten i tunnelsektionen är låg kan den i närheten av impulsfläktar vara hög.



Figur 4. Principbild av hur lufthastigheterna fördelar sig i ett plan som skär genom tunneln på höjden och längden och genom en impulsfläkt (svart box, flöde i pilens riktning). Färgerna representerar lufthastigheter från lågt (blå) till hög (rött). Figur: WSP.

Transversell ventilation

Med *transversell ventilation* ventileras tunneln tvärs trafikriktningen, se Figur 5. Vid flytande trafik uppstår i en tunnel med transversell ventilation en lufthastighet längs tunneln av kolvverkan på samma sätt som i tunnel med longitudinell ventilation. Föroreningar förs till viss del längs med tunneln av trafikens kolvverkan. Ventilationen självt kan skapa lägre lufthastighet längs tunneln än en longitudinell ventilation om trafiken står stilla. Systemet med transversell ventilation kan krävas i tunnlar där kö uppstår om inte en riskanalys kan visa att longitudinellt system är lämpligt tillsammans med riskreducerande åtgärder (Transportstyrelsen, 2015).

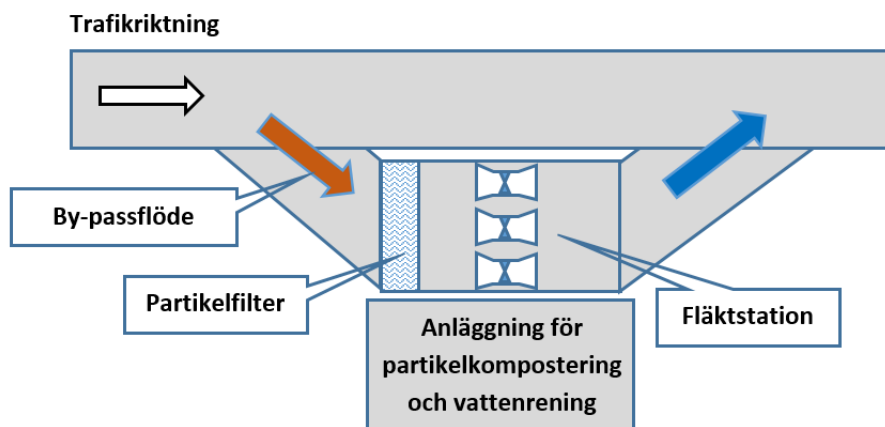


Figur 5. Princip för transversell ventilation. Utluft (gröna pilar) blåses in och förorenad luft (lila pilar) suges ut genom ett stort antal ventilationsöppningar i tunnelväggen och tunneltaket. Ventilationsöppningarna i tunneltaket används även för brandgasevakuering. Grafen i figuren visar principen för ökning av koncentrationer längs tunneln. Den streckade linjen indikerar medelvärdet. Figur: PIARC samt komplettering med grafer.

Jämfört mot ett longitudinellt system innebär detta system större utrymmen längs tunneln för stora ventilationskanaler och fläktrum samt en mer omfattande ventilationsanläggning. För en tunnel i storleksordningen som Östlig förbindelse (cirka 7 km lång bergtunnel med 3 körfält) uppskattades fördyringen i investering till minst cirka 2 miljarder kronor jämfört med ett longitudinellt system.

Partikelrening

En alternativ metod till tunnelventilation för luftkvalitet, eller som komplement, är *luftrening* med så kallat *Air Purification Systems (APS)*. I Figur 6 visas en princip där ett by-passflöde strömmar genom en luftreningsanläggning. Mer detaljerad beskrivning återfinns i bilaga, se kapitel 8.5.



Figur 6. Princip för by-pass med luftrening. Källa: WSP.

Partikelreningssystemet sänker inte lufthastigheten i tunneln då antingen anläggningens kapacitet eller kolvverkan bestämmer lufthastigheten i tunneln.

Eftersom en partikelreningssystem med by-passflöde inte har schakt till markytan kan den inte användas för att evakuera rökgaser.

För att kontrollera nivåer av avgaspartiklar (PM_{avgas} , $PM_{2,5}$) måste PM_{avgas} mätas. NO_x kan inte användas som indikator eftersom NO_x inte påverkas av partikelreningssystemet.

2.1.4 Styrande parametrar för lufthastigheter i initialskedet

Med initialskedet menas normaltillståndet i tunneln innan en brand uppstår. Beskrivning nedan antar att följande är givet:

- riktvärde för luftkvalitet
- tunnelsträckning (längd, tunneltvärsnitt, väglutningar som ger olika utsläpp)
- skyltad hastighet
- trafikflöde och fordonssammansättning (fordonstyper, bränsleslag och dess emissionsfaktorer)
- longitudinell ventilation

Följande parametrar påverkar lufthastigheten i tunneln i initialskedet:

- **Flytande trafik:**

Om trafiken flyter är det sannolikt att ventilationen går på lågfart eller är avstängd eftersom kolvverkan driver på luften genom tunneln och skapar en tillräcklig lufthastighet i tunneln oberoende av tunnelventilationen.

Lufthastighet som kan uppstå enbart från fordonens kolvverkan kan vara runt 5 – 7 m/s för en hårt trafikerad tunnel med flytande trafik.

- **Kösituation eller långsamt flytande trafik:**

Vid en kösituation med "stoppa&gasa" uteblir kolvverkan och emissionerna är högre än vid flytande trafik. Ventilationen genererar en lufthastighet i tunneln.

- **Kö med höga fordon:**

Höga fordon i kö minskar den fria arean i tunnelsektionen och lufthastigheten ökar kring dessa fordon. Till exempel upptar tre lastbilar i bredd 30 m² av tunnelsektionen i Förbifart Stockholm (cirka 100 m²), se Figur 7.



Figur 7. Övre figur: tre lastbilar i bredd i en kö. Nedre figuren: Höga fordon i en kö minskar den fria arean i tunnelsektionen och lufthastigheten kring fordonen ökar för ett givet luftflöde genom tunneln. Källa: WSP.

Med ett givet luftflöde uppströms i tunneln kommer lufthastigheten kring de höga fordonen att öka i snitt med cirka 40 procent, eller till exempel från 5 m/s i fria sektionen till 7 m/s. Om det dessutom finns vägskyltar i samma kö blockeras tunnelsektionen uppemot 50 procent och lufthastigheterna kommer lokalt i förträngningen att öka cirka 100 procent eller från till exempel 5 till 10 m/s.

Den beskrivna kösituationen med höga fordon kan ha olika utbredning längs tunneln och på olika platser.

Uppbromsning av lufthastigheterna behövs vid brand (se kapitel 2.2). Uppbromsningen fördröjs om lufthastigheterna är höga på långa sträckor i tunneln. Fallet ovan med kö av höga fordon uppstår sannolikt endast på korta sträckor. I normalfallet brukar till exempel andelen tunga lastbilar i tunneln vara cirka 10 procent. Man bör dock beakta att lufthastigheterna alltid är förhöjda kring dessa fordon under den tid man försöker bromsa ner en "normal" lufthastighet i resten av tunneln.

2.1.5 Krav på lufthastigheter

Trafikverkets "Krav Tunnelbyggande", TDOK 2016:0230, anger maxkrav på lufthastighet vid dimensionering av ventilation:

- Max 10 m/s vid enkelriktad trafik
- Max 7 m/s vid dubbelriktad trafik (korta tunnlar)

Orsaken till kraven på de maximala lufthastigheterna bedöms vara att förhindra uppdamning och begränsa lufthastigheten vid utrymning vid brand (påverkan i att förflytta sig i stark vind). Även en begränsning av ljudnivån i tunneln från fläktarna kan också vara en orsak, detta regleras dock av ljudkrav vid utrymning. Om lufthastigheterna har sin grund i krav vid

utrymning gäller kravet sannolikt i vistelsezonen cirka 0–2 m över vägbanan i den värsta situationen, till exempel blockerande fordon i tunneltvårsnittet. Utanför vistelsezonen skulle högre hastigheter kunna tillåtas (bortsett brandkrav).

2.1.6 Faktorer utöver ventilation som påverkar lufthastighet

Även om tunnelventilationen för luftkvalitet är dimensionerad för att ge låga lufthastigheter i tunneln, kan förhöjda lufthastigheter uppstå av följande orsaker:

- Tätt flytande trafik genererar lufthastighet från kolvverkan som kan vara betydande oavsett ventilationsprincip och hur ventilationen körs. Om kösituation blir dimensionerande för miljöventilationen och lufthastigheten från ventilationen kan hållas låg, kan lufthastigheten bli högre vid flytande trafik på grund av kolvverkan.
- Ett tiotal meter nedströms impulsfläktar i drift och speciellt i övre halvan av tunneltvårsnittet är lufthastigheterna högre än medelvärdet hos lufthastigheten i tunneltvårsnittet.
- Hinder i tunneln från höga fordon i kö skapar lokalt högre lufthastigheter kring dessa fordon. För ett givet ventilationsflöde genom tunneln kommer lufthastigheten längs en tunnelsträcka med kö av höga fordon (lastbilar, bussar) skapa högre lufthastighet än kö med lägre fordon (personbilar).

2.2 RISKER VID BRAND/EXPLOSION

2.2.1 Strategi för brandgaskontroll i tunnlar

System för brandgaskontroll syftar till att säkerställa utrymning av trafikanter och att underlätta räddningstjänstens insats. Säkerhetskoncept i tunnlar med långsgående ventilation bygger på att trafiken framför en olycka kan köra vidare, dvs utrymning sker i första hand med fordonet, och att de som fastnar bakom olycksplatsen kan utrymma till fots via utrymningsvägar. Fordon ska inte passera olycksplatsen då miljön nedanför kan vara fylld med brandgaser. Brandgasventilation med långsgående ventilation bygger på att luftflödet trycks och sugas i trafikriktningen för att hålla miljön uppströms olyckan brandgasfri. Systemet säkerställer därmed i första hand trygg utrymning och insats uppströms branden.



Figur 8: Illustration av säkerhetskoncept med longitudinellt ventilationsflöde och kösituation.
Källa: WSP.

Vid en eventuell kö nedströms branden behövs strategier för att påverkan på trafikanterna ska minska, till exempel kan brandgaskontrollsystem aktiveras så att lufthastigheten i flödet reduceras till ett minimalt flöde. Därefter kan

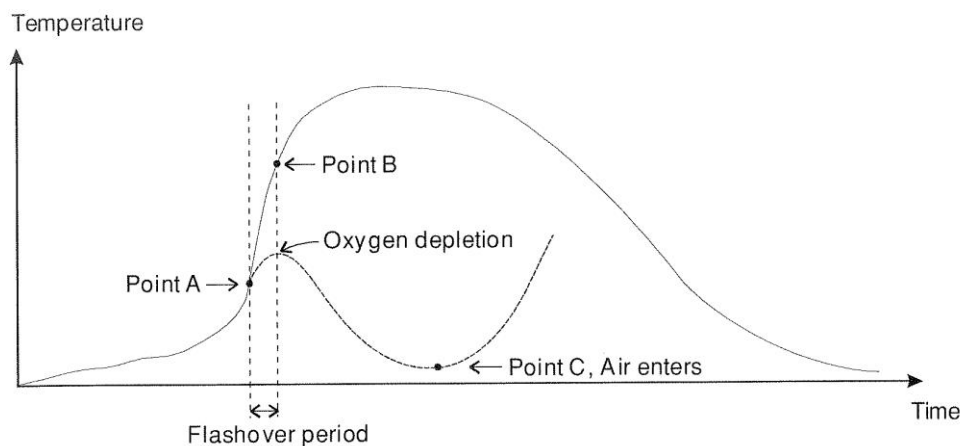
flödet ökas efter att kön är avvecklad eller tunnelavsnittet nedströms är utrymt till fots av trafikanterna. En förbestämd strategi tas vanligen fram där höga luftflöden/luft hastigheter bromsas in för att minska spridningshastigheten men anpassas för att undvika backlayering² uppströms olyckan. En annan strategi är också att minska längden av påverkat område av en tunnel genom att införa ventilationsavsnitt, t ex med luftutbytesstationer, vilket på så sätt minskar de antal trafikanter som kan påverkas av en olycka. Vid luftutbytesstationen förs alla eventuella brandgaser ut och därmed skyddas trafikanter bortom luftutbytesstationen. I tunnlar med ramper för på- och avfarter kan trafikanterna skyddas genom att flödet reverseras i avfartsramper, i påfartsramperna stängs rampen i anslutning till huvudtunneln så att trafikanterna inte kör in i en brandgasfylld miljö samtidigt som luftflödet anpassas för att brandgasspridning inte sker upp i påfartsrampen.

I tunnelsystem med transversell eller semitransversell ventilationsstrategi ventileras luften in och ut i tunneln längs med tunneln i hela dess riktning. Säkerhetskonceptet i denna typ av tunnlar bygger på att få en stratifiering av brandgaserna, det vill säga att brandgaserna ansamlas i taknivå, och att skapa ett inflöde mot den del av tunneln där branden finns för att ventileras bort brandgaserna där. Utrymning kan precis som i tunnlar med longitudinell ventilationsstrategi ske på olika sätt. Stratifieringen av brandgaser i närheten av branden ska dock säkerställa att trafikanterna inte utsätts för brandgaser. Transversella system kräver stora ventilationskanaler där flödet omhändertas. Systemen dimensioneras vanligen för mindre brandförlopp om 30 MW och förlitar sig på att brandspridning kan förhindras med hjälp av till exempel vattensprinkleranläggning. Vid höga longitudinella flöden, till exempel då kolverkan är hög, kan det vara svårt att dimensionera en tunnel med transversell ventilationsstrategi.

2.2.2 Höga ventilationsflöden - påverkan på branden

Brandeffekt mäts i Heat release rate (HRR) och är den faktor som i huvudsak beskriver/styr hur brand sprids och hur mycket brandgaser som produceras. Brandeffekten i en tunnel styrs av bränsletyp, hur branden är placerad, ventilationsförhållanden i tunneln, avstånd mellan fordon samt tunnelns geometri, det vill säga längd, lutning, bredd och höjd (Ying, 2018). Branden kan beroende på dessa faktorer utvecklas på olika sätt och därmed få vitt skilda konsekvenser. Möjliga brandförlopp för hur en brand förenklat kan utvecklas beskrivs i Figur 9.

² En brand i tunnel ger utan erforderligt longitudinellt ventilationsflöde upphov till "backlayering", dvs brandgaserna kommer att röra sig motströms ventilationsriktningen.



Figur 9 Brandgastemperatur som funktion av tiden, schematiskt för brand i byggnad. Källa: (Karlsson, 2000).

Tidigt i brandförloppet, perioden fram till "point A" i Figur 9, är branden alltid bränslekontrollerad, dvs brandutvecklingen styrs helt av det brinnande objektets egenskaper. Denna del av brandförloppet, förenklat sett, är lika oavsett i vilken miljö branden startar om tilluften inte sker forcerat. Forcerad tilluft ger branden mer tillgång till syre varpå effektutvecklingen sker snabbare per tidsenhet, det vill säga brandkurvan blir brantare (Lönnermark & Haukur, 2008).

När ett brinnande objekt är inneslutet leder detta till att värme blir kvar och på så vis ökar återstrålningen till branden. Detta leder vidare till att produktionen av brännbara gaser ökar, vilket i sin tur leder till större återstrålning mot brännbart material och som i sin tur leder till ökad förbränning och ett accelererande förlopp. I en tunnel kan denna acceleration förväntas. Dels utgör fordon en inneslutning där brand kan utvecklas och därefter själva tunnelgeometrin. Tiden till "point A" är kortare för ett objekt i en inneslutning än för ett brinnande objekt placerat i de fria. Denna tid kan även förväntas vara kortare med högre luftflöde. Detta förutsatt att inte branden blir syrekontrollerad eller att inneslutningen är så stor att den inte påverkar branden.

I de försök som gjorts i större skala har inte påverkan av olika ventilationsflöden studerats i detalj. Ofta har hastigheten i initiala ventilationsförhållandena varit låg, i storleksordning 1 m/s, för att sedan öka så att backlayering motverkas. I Figur 10 redovisas ett antal genomförda brandtester. Dessa försök har dock inte gjorts med syftet att se hur olika ventilationshastigheter påverkar brandförloppet.

en brand som involverar allt brännbart i utrymmet. Övertändning inträffar normalt när brandgasernas temperatur är cirka 500–600 °C. Övertändning sker mellan "point A" och "point B" i Figur 9. Denna typ av övertändning förväntas ske lokalt i t ex en del av tunneln, lastutrymmen, förarhytter mm. I genomförda försök i Runehamartunneln visar resultaten på betydelsen av hur agerandet, dvs åtgärder av personer i tunneln under den första tidsperioden, kan vara avgörande för händelseutvecklingen av branden. Vidare visar försöken att en brand i en stor lastbil kan sprida sig långa avstånd nedströms i tunneln, i storleksordning 100-tals meter. Av försöksresultaten och erfarenheter från inträffade bränder framgår att insatser under de fem till tio första minuterna är av stor betydelse. (Haukur Ingason, 2015)

I vissa geometrier förbrukas det syre som finns inne i rummet eller minskar strömmen av syre så att branden blir syrekontrollerad. Detta kan även ske innan övertändningen inträffar. Branden kvävs och begränsas i storlek av bristen på luft. Detta sker om den luft som når förbränningszonen är förorenad av brandgaser som återcirkulerar. När branden tillförs luft, se "point C" i Figur 9, exempelvis genom att en dörr öppnas eller fönster går sönder, kommer effektutvecklingen att öka igen.

När branden har vuxit sig så stor att allt brännbart material brinner till exempel i en bil eller en lastbil nås den fullt utvecklade branden för just detta objekt. Branden kan då antingen begränsas till objektet, det vill säga att ingen spridning sker, alternativt sker en spridning och flera fordon börjar brinna. Den totala effektutvecklingen ökar då för branden.

Brandspridning till andra fordon eller objekt beror på den temperatur som skapas på de objekt som är utsatta. Beroende på material varierar den kritiska temperaturen då det specifika materialet antänder. Denna temperatur kan uppskattas till mellan 300°C och 600°C beroende på värmeöverföringssätt, strålningsvärme alternativt konvektiv värme, och närvaro av pilotlåga. Detta gör att fordon som befinner sig relativt långt från den initiala brandhärden kan antända på grund av att de varma brandgaserna värmer fordonet/en.

Brandspridning i tunnlar bedöms kunna ske i huvudsak genom följande scenarier (Ingason, 2005):

- Strålning från flammor
- Strålning från varma brandgaser mot fordon
- Brandspridning på ytan av ett fordon
- Brännbara vätskor som flyter ut på vägbanan och antänds
- Explosion av bränsletank, kan sprida bränsle och andra brinnande delar.

Om spridning inte sker till andra objekt eller att bränslemängden förbrukas i det brinnande systemet/rummet avtar brandens intensitet. Den avklingande perioden påbörjas och branden dör så småningom ut på grund av bränslebrist.

Höga ventilationsflöden kan leda till att flammor kan tryckas i ventilationsriktningen varpå strålning från flammor mot framförliggande fordon ökar och därmed ökar risken för brandspridning i denna riktning. Flamlängden vid hög effektutveckling kan för tunga fordon bli mer än 10

gångar tunnelns höjd vilket kan resultera i flamlängd i storleksordningen mellan 50–80 m i ventilationsriktningen. (Haukur Ingason, 2015)

Den initiala lufthastigheten och den trafiksituation som råder vid brandstart i en tunnel är avgörande för hur allvarliga konsekvenserna kan bli. En ökad ventilationshastighet behöver därför hanteras. I långa tunnlar kan olika trafiksituationer uppkomma i olika avsnitt av tunneln. I delar av tunneln kan köer föreligga, medan det i en annan del kan vara fritt flytande trafik, i dessa fall kan relativt högt flöde (lufthastighet) i tunneln skapas ensamt av fordonens kolvverkan. Vid en olycka är det önskvärt att snabbt bromsa upp lufthastighet vilket kan ta tid. I kombination med kolvverkan kan det ta ytterligare tid.

Från simuleringar, CFD, har beräkningar för Förbifart Stockholm visat att:

- Effektutveckling över cirka 10 MW skapar kritiska förhållanden avseende sikt i huvudtunnel.
- Brandgasspridningen nedströms en brand sker snabbt med höga lufthastigheter och tunnellutning.
- Miljöventilationens hastighet vid högtrafik kommer att vara hög. Genomförda simuleringar av miljöventilationen visar att det tar lång tid att bromsa upp detta luftflöde trots att reversering av fläktar genomförs.

Höga luftflöden kan även påverka personer som utrymmer tunneln via utrymningsvägar. Dels genom vindpåverkan på kroppen och dels genom att det även kan skapas tryckskillnader som påverkar öppningskraften av dörrar till utrymningsvägarna. Tryckpåverkan på dörrar är något som behöver omhändertas genom att tryckskillnader hanteras med olika åtgärder. Vindpåverkan behöver utredas mer i detalj då det finns mycket lite litteratur inom området. En studie visar att vindpåverkan sker redan vid 5 m/s och att det vid 10 m/s skapas en betydande kraft på kroppen (Penwarden, 1973).

2.3 DISKUSSION/SLUTSATS

Vid högre ventilationshastighet är det framförallt tidsaspekten som påverkas. Här är det viktigt att lyfta fram tidsaspekten till kritiska förhållanden, vilket innebär förhållanden som uppkommer som ett resultat av brand och utgör ett så pass allvarligt hot mot trafikanterna att de kan omkomma. Med snabbare effektutveckling av branden, snabbare spridning av brandgaser, högre maximal effektutveckling etc. behöver högre krav ställas på tekniska system för att kunna motverka en brand i tidigt skede. En brand som inte har identifierats och lokaliserats är svår att motverka effekterna av. En ökad ventilationshastighet påverkar följande:

- Svårigheter att detektera brand, utspädningseffekten ökar vilket gör det svårare att detektera brand generellt, speciellt avseende värme men även brandgaser. Risk för att bränder kan växa sig stora innan åtgärder kan införas.
- Brandtillväxten sker snabbare, vilket leder till ökad risk för trafikanter. Den snabbare brandtillväxten innebär att effekterna av en brand inträffar tidigare och att brandgasspridningen är mer omfattande.

Dessa omständigheter minskar tiden trafikanter behöver för att kunna utrymma säkert.

- Maximal effektutveckling kan öka, vilket leder till större brand, högre temperaturer, mer brandgaser etc. Detta leder till ökad risk för trafikanter och kan leda till att större områden påverkas, kan också leda till ökad risk för brandspridning.
- Ökar risk för brandspridning mellan fordon, längre flamlängd, flammor som trycks nedströms i ventilationsriktningen till exempel mot fordon i kö.
- Risk för eskalerade brand, spridning till andra fordon till exempel större lastbilar, men även risk för påverkan på till exempel farligt gods-transporter. Kan innebära att konsekvenserna av den sekundära olyckan är väsentligt värre än den skulle förväntas vara om ingen brandspridning sker. Kan leda till något högre risk för explosion.
- Utrymning kan försvåras. Hur stor påverkan en ökad ventilationshastighet har är relativt okänt. Det finns rapporter som pekar på att vindpåverkan sker redan vid 5 m/s och att vid 10 m/s skapas en betydande kraft på kroppen. (Penwarden, 1973)

En ökad lufthastighet i tunneln höjer risknivån och påverkar säkerhetskonceptet för en tunnel med högre krav på de tekniska systemen. Detta leder minskad robusthet och de risker som presenteras ovan. Det går dock inte att med dagens kunskap att kvantifiera med hur mycket. Detta beror bland annat på att det saknas empiri från stora brandförsök.

Däremot kan en ökad risknivå hanteras genom att riskreducerande åtgärder införs för att begränsa en brands konsekvenser, dock kan komplexa tunnelsystem bli mer komplexa när nya system tillförs för att lösa ett problem. Detta genom att nya problem kan uppstå. Robusthet är därför en viktig aspekt vid utformning en tunnels säkerhetskoncept.

Nedan ges ett par generella förslag på riskreducerande åtgärder i tunnelmiljö för att minska de risker som uppkommer då ventilationshastigheten ökar:

- Detektionssystem som är anpassade för att kunna detektera brand vid höga ventilationsflöden.
- Brandbekämpningssystem, sprinklersystem som minskar risken för brandspridning, minskar brandens storlek etc.
- System för att snabbt kunna bromsa ventilationsflödet till lägre nivåer.

3 KONSEKVENSER FÖR INTERNATIONELLT SAMARBETE

Idag saknas enhetliga nationella och internationella krav på hur tunnelluft ska regleras utifrån ett hälsoperspektiv. De rekommendationer för tunnelluft som finns gäller främst sikt. Det är PIARC (World Road Association) som är ett internationellt samarbetsorgan inom vägtrafiksektorn som tagit fram rekommendationerna. Om Sverige beslutar om ett nationellt riktvärde för tunnelluft är Sverige ett av få länder som har nationellt riktvärde för tunnelluft (SLB, 2010) och (Advisory committee, 2016).

Frågeställningen i detta kapitel handlar om vilka eventuella konsekvenser för internationellt samarbete som kan uppkomma om Sverige skulle tillämpa ett strängare krav på riktvärde för luftkvalitet i vägtunnlar än våra grannländer. Det kan till exempel gälla en situation där man i en framtid vill bygga nya vägtunnlar mellan länderna. Idag finns riktvärde för tunnelluft i Norge, men saknas i Danmark och Finland. Det norska riktvärdet för NO_x är 15 ppm. Enligt den omräkning som SLB gör motsvarar detta en maxhalt på 29 000 µg/m³, se (SLB, 2010). Nivån ligger betydligt över den maxhalt på 1 000 µg/m³ vilket rekommenderades för Förbifart Stockholm när de två principerna om acceptabel riskhöjning för dagliga pendlare och samhällsekonomisk lönsamhet tillämpades, se (WSP, 2018).

3.1 TRANSPORTOMRÅDET REGLERAS FRAMFÖRALLT PÅ EU-NIVÅ

På grund av att det saknas internationella exempel på hur ett nationellt riktvärde för tunnelluft påverkat samarbetet mellan länder används exempel på andra krav inom transportområdet som skiljer sig åt mellan länder.

Många av de lagar och regler som gäller på transportområdet styrs på EU-nivå med anledning av att underlätta för handel inom unionen. Det förekommer några undantag, exempelvis fick Sverige dispens för längre lastbils ekipage i och med medlemskapet i EU. Enligt branschorganisationen Sveriges Åkeriföretag är det dock inget som utgjort något hinder för handel med grannländer (telefonkontakt 2019-02-14). Danmark tillåts nu också att ha längre ekipage, så undantaget för Sverige har snarare gynnat Danmark (ibid).

Ett annat undantag från EU-lagstiftning är det förslag om att skärpa vinterdäckskrav på tunga fordon som regeringen lade fram under 2018. Ändringen innebär att samtliga hjul, inte bara drivaxlarna måste ha vinterdäck under perioden 1 december – 31 mars när vinterväglag råder. Det nya förslaget gäller även utländska lastbilar och ska träda i kraft från vintern 2019/2020. Med anledning av den nya förordningen har även föreskrifterna för vad som räknas som ett vinterdäck ändrats. I den konsekvensutredning som tagits fram för vad som räknas som vinterdäck bedöms inte de nya reglerna ge effekter på företagets konkurrensförmåga (Transportstyrelsen, 2018). Den negativa effekt som identifieras är att däck som inte är utslitna kan behöva bytas ut under en övergångsperiod. Enligt Åkeriföretagen kan de nya reglerna komma att påverka andelen utländska företag som kör i Sverige

under vintern eftersom det kan vara dyrt att investera i vinterdäck för ett fåtal rutter till Sverige. Åkeriföretagen ser det som en konkurrensfördel för svenska företag, att de i så fall kan öka mängden transporter i Sverige. Vidare har Norge krav på att lastbilar som färdas i landet måste ha snökedjor i bilen. Det är dock inget som påverkat samarbetet mellan Sverige och Norge.

3.2 MILJÖZON I TUNNEL?

Som beskrivs i kapitel 2 beror mängden föroreningar i en vägtunnel på typ av ventilationssystem och graden av ventilation, men den beror också på vilken typ av fordon som färdas genom tunneln. Det skulle tala för att förbjuda viss trafik i tunneln genom att exempelvis införa en miljözon i tunneln för att nå en viss haltnivå utan att vare sig öka lufthastigheten eller ventilationskostnaderna. Om vissa fordon eller viss trafik inte ges tillåtelse att färdas genom tunneln skulle det kunna vara ett hinder för den fria rörligheten. Det finns även andra skäl till varför det inte är troligt att högre krav på luftkvaliteten i tunnlar kan åtgärdas genom att hindra viss trafik från att köra i tunneln.

Enligt trafikförordningen (SFS 1998:1276, 1998) får miljözoner endast införas av kommuner i särskilt miljö känsliga områden och zonen ska dessutom ligga inom ett tätbebyggt område. Vidare får inte en miljözon inskränka på den fria rörligheten av personer, tjänster och produkter enligt grundläggande bestämmelser inom EU. Ett exempel är när lokala myndigheter förbjöd fordon över en viss längd att köra genom tunnlarna i Brennerpasset mellan Italien och Österrike. Förbudet motiverades av att tunnlarna var gamla och inte ansågs tillräckligt säkra för att köra tunga lastbilar i stor omfattning. Bestämmelsen upphävdes av EU-domstolen (se följande domar (C-205/98, 2000) och (C-320/03, 2005) i referenslista) eftersom att det påverkade alla tunga lastbilar som skulle köra mellan Italien och Tyskland och stred således emot den fria rörligheten inom EU. Mot bakgrund av exemplet i Brennerpasset skulle ett införande av miljözon i Förbifart Stockholm, och en eventuell Helsingborgstunnel strida mot den fria rörligheten. Både Förbifarten och Helsingborgstunneln är delar av det transeuropeiska transportnätet TEN-T som är den huvudsakliga leden mellan norra och södra Sverige.

Att tunneln inte kan hantera trafiken (på grund av höga föroreningshalter) är således inte skäl för att införa trafikregler som begränsar trafiken i leder som står för en stor del av trafiken.

3.3 GRÄNSÖVERSKRIDANDE TUNNEL

En fråga som har väckts är vad det skulle innebära för det internationella samarbetet om riktvärdet skulle omfatta en tunnel mellan Sverige och ett av våra grannländer. Den så kallade HH-tunneln för persontåg och vägtrafik under Öresund, mellan Helsingborg och Helsingör är ett projekt som diskuteras. Det finns i dagsläget inget beslut för att tunneln ska byggas, men projektet utreds av Trafikverket och danska Vejdirektoratet.

Man kan tänka sig att ett lågt riktvärde (som kräver mycket ventilation) kan skapa oenighet om vem som ska bära kostnaderna för den ökade ventilationen som riktvärdet innebär. Idag har inte Danmark något riktvärde för tunnelluft, vilket kan göra att kostnaden för ventilationen i en tunnel

mellan Sverige och Danmark kommer att vara högre än för en tunneln som enbart berör Danmark. En del av Öresundsförbindelsen mellan Sverige och Danmark består av tunnel, tunneln är dock förlagd på den danska sidan. Enligt kontakt med Öresundskonsortiet (mailkonversation 2018-02-18) är den tunneln utformad så att luftgenomströmningen håller en god luftkvalitet. Specifikt är den 1–4 m per sekund, utan fläktar, och det finns knappt mätbara nivåer på NO, NO₂ och CO (ibid).

3.4 ANMÄLNINGSPLIKT FÖR TEKNISKA REGLER

Frågan om handelshinder har även diskuterats med Kommerskollegium. I uppföljande epost konversation (2019-02-14) är inte ett nationellt riktvärde för tunnelluft anmälningspliktigt enligt anmälningsdirektivet för tekniska regler. Anmälningsplikt innebär att en myndighet är skyldig att rapportera till EU om en nationell reglering riskerar att orsaka hinder för den fria rörligheten på EU:s inre marknad. Slutsatser avseende internationellt samarbete

3.5 SLUTSATSER AVSEENDE INTERNATIONELLT SAMARBETE

Genomgången tyder på att ett riktvärde inte kommer att få några större konsekvenser på internationellt samarbete. Efter diskussion med Kommerskollegium är slutsatsen att ett riktvärde för luftkvalitet i vägtunnlar i sig inte är ett handelshinder. Detta så länge riktvärdet hålls genom teknisk anpassning av tunneln. Om riktvärdet i sig skulle föranleda restriktioner på exempelvis vilka fordon som tillåts trafikera tunneln skulle det kunna vara ett handelshinder. Det finns även andra skäl utöver handelshinder som gör att miljözon inte är en gångbar åtgärd för att klara ett riktvärde.

4 RIKTVÄRDENAS EFFEKTER PÅ BESLUT OM FRAMTIDA TUNNLAR

4.1 INLEDNING

De riktvärden för tunnelluft som diskuteras i (WSP, 2018) förhindrar många förtida dödsfall. Exempelvis framkommer att en sänkning av maxhalten från 2 000 µg/m³ NO_x till 1 000 µg/m³ sparar 13 liv under ett år (ibid, Tabell 1). Riktvärdena kommer dock också att öka kostnaden för att bygga tunnlar samt för tunneldrift. I detta kapitel utreds hur denna ökade kostnad bör behandlas i den samhällsekonomiska kalkylen, hur den skulle påverkat kalkylen för ett par tunnlar och hur detta kan tänkas skulle ha påverkat beslutet. En tänkbar effekt är att man på grund av fördyringen istället för att bygga tunnlar bygger vägen i markplan, en annan att man inte bygger alls. Om man lägger vägen i markplan minskar kostnaderna och de negativa hälsoeffekterna för trafikanterna, men intrånget (buller, barriär, utsläpp mm) blir större ovan jord.

I avsnitt 4.2 behandlas följande frågeställningar om den samhällsekonomiska kalkylen:

- Vad en samhällsekonomisk kalkyl är och hur kan man jämföra olika kalkyler
- Hur alternativnyttor och budgetrestriktioner behandlas i samhällsekonomiska kalkyler
- Litteraturen om hur lönsamheten påverkar sannolikheten att ett objekt byggs.

I avsnitt 4.3 studeras effekten på ett par fallstudier. Frågorna här är hur mycket kostnaden ökar, hur den ökade kostnaden hade påverkat den samhällsekonomiska kalkylen, hur detta skulle kunna ha påverkat diskussionen och vad effekten av att ingen tunnel byggts hade blivit. Vi kan naturligtvis inte uttala oss med säkerhet om det kontrafaktiska scenariot att lönsamheten varit lägre än vad den varit, vi kan bara resonera utifrån diskussionen om den specifika tunneln (var ytläge ett alternativ? Vad hade konsekvensen av att bygga i ytläge blivit? Gjorde den ökade kostnaden att investeringen gick från lönsam till olönsam? Etc). De fallstudier som ingår är Förbifart Stockholm, Södra länken, Norra länken och Tvärförbindelse Södertörn. Anledningen är att det för dessa tunnlar finns tidigare gjorda samhällsekonomiska bedömningar. Beräkningarna för hur den ökade ventilationen skulle påverkat kostnaden är gjord för Förbifart Stockholm och har sedan utifrån en skalningsfaktor (tunnellängd, trafikmängd och luftkvalitetsmål) räknats om till de andra tunnlarna.

4.2 METODFRÅGOR OCH INDATA

4.2.1 Att jämföra samhällsekonomiska kalkyler

En samhällsekonomisk analys bör ta hänsyn till alla effekter som påverkar alla individer i samhället (till skillnad mot exempelvis privatekonomiska,

företagsekonomiska eller statsfinansiella analyser). En samhällsekonomisk analys innefattar alltså (i princip) alla effekter. En samhällsekonomisk kalkyl däremot innefattar bara de effekter som är kvantifierbara och monetärt värderbara. Utgångspunkten är individernas preferenser; den enda som kan avgöra vad som är bra eller dåligt för individen är individen själv. Även framtidens individer räknas. Vad som ska ingå i en samhällsekonomisk kalkyl och hur de olika effekterna bör värderas i kalkyler av investeringar i transportinfrastruktur bestäms genom Trafikverkets ASEK-arbete. Även beräkningen av effekterna är standardiserad genom modeller och effektsamband. I en svensk samhällsekonomisk kalkyl för en väg- eller järnvägsutbyggnad ingår främst följande effekter:

- Konsumentöverskott (tillgänglighetsvinster för trafikanter och varuägare)
- Producentöverskott (effekter för operatörerna)
- Externa effekter (utsläpp, olyckor)
- Budgeteffekter
- Kostnad för investering samt drift och underhåll.

All påverkan på det offentligas budget räknas upp med marginalkostnaden för offentliga medel ("skattefaktorn").

Samhällsekonomiska kalkyler är i princip jämförbara över tiden då de utgår från medborgarnas värderingar av olika nyttor. Motsatsen är en multikriterieanalys där poängen är att man värderar effekter utifrån beslutsfattarnas preferenser, vilket gör att analysen gäller för specifika beslutsfattare vid en specifik beslutssituation. Ett syfte med att, som i ASEK, gemensamt bestämma vad som ska ingå i kalkylen och hur effekterna ska värderas är att alla kalkyler ska göras i enlighet med den senaste forskningen. Ett minst lika viktigt syfte är att underlagen för beslut om tilldelning av medel ska vara jämförbara. Det senare blir särskilt viktigt om infrastrukturen finansieras på det sätt den görs i Sverige: om finansieringen mestadels är nationell och nyttorna är lokala eller möjligtvis regionala har lokala företrädare incitament att överdriva nyttorna.

Även om samhällsekonomiska kalkyler i princip är jämförbara över tid bör man ta hänsyn till att kalkylvärdena har förändrats över tid. Mellan ASEK 1 som publicerades 1996 och ASEK 3 som kom 2002 förändrades, förutom uppskrivningar för inflation och inkomst, bara värdena för fordonskostnad. Efter det har dock värdena ökat kraftigt: den så kallade "skattefaktor 1" (som motsvarade momsen) har tagits bort, tjänstetidsvärdena har ökat, de betalningsviljebaserade värderingarna räknas numera upp under kalkylperioden etc. Ett objekt som var något olönsamt för 15 år sedan kommer alltså bara på grund av ändrade kalkylvärden vara signifikant lönsamt idag.

4.2.2 Hantering av alternativnyttor och budgetrestriktioner

I en samhällsekonomisk kalkyl beaktas alternativkostnaden för investeringen i och med att alla kostnader tas med och att marginalkostnaden för offentliga medel ("skattefaktor 2" i ASEK:s tidigare terminologi) beaktas.

Alternativnyttan beaktas dock inte explicit: även om en investering är samhällsekonomiskt lönsam kan den alltså vara en dålig idé om det finns en annan investering/lösning på problemet som är ännu mer

samhällsekonomiskt lönsam. Enligt den transportekonomiska terminologin utreder man alltså om ett utredningsalternativ är samhällsekonomiskt lönsamt, andra lösningar får sedan bli ytterligare utredningsalternativ som får utredas för sig.

Budgetrestriktioner beaktas inte i kalkylerna. En tänkbar invändning mot att lägga ökade resurser på ventilation är att det kommer att tränga ut för mycket annat från budgeten för drift och underhåll. När vi visat att den ökade ventilationen är samhällsekonomiskt lönsam så beaktas inte denna typ av restriktioner, budgeten antas ökas i motsvarande mån så att inget annat trängs ut. Det kan finnas politiska restriktioner här, det kan redan idag vara svårt att få politisk acceptans för de stora drift- och underhållskostnaderna för tunnlar.

4.2.3 Lönsamhetens påverkan på huruvida en tunnel blir byggd

I fallstudierna beräknas hur den ändrade kostnaden för tunnelventilation påverkar vägtunnelnarnas samhällsekonomiska lönsamhet. Effekten av att lönsamheten minskar kan antingen vara att vägen inte byggs alls eller att vägen byggs i ytläge. Att vägen byggs i ytläget är ett rimligt jämförelsealternativ om frågan uppstår i den fysiska planeringen (där man utvärderar olika alternativ för att uppnå samma syfte), medan att vägen inte byggs alls är ett rimligt alternativ om frågan uppstår i den ekonomiska planeringen (där man väljer vilka investeringar som ska finansieras). Som bakgrund analyseras lönsamhetskvotens påverkan på sannolikheten att infrastrukturinvesteringar genomförs. Här ingår också en beskrivning av vilka effekter som uppstår om vägar byggs i ytläge istället för i tunnel.

Den samhällsekonomiska lönsamhetens påverkan på huruvida en investering blir av har studerats i den ekonomiska planeringen, men inte i den fysiska. Det finns alltså tämligen gott om underlag när det gäller frågan huruvida lönsamheten påverkar om ett objekt byggs eller inte.³ Däremot har det inte gått att belägga att det finns studier som har utvärderat om skillnader i lönsamhet mellan tunnelalternativ och ytlägesalternativ påverkar huruvida tunnelalternativet väljs. Studierna av den ekonomiska planeringen landar i att de samhällsekonomiska kalkylerna har en signifikant påverkan på de investeringsbeslut som Trafikverket fattar, men liten effekt på de beslut som regeringen och riksdag fattar. Analysobjektet är här åtgärdsplaneringen, där regeringen brukar peka ut ett antal objekt och sedan överlåta till Trafikverket att föreslå andra investeringar. Beslut om de investeringar som föreslås av Trafikverket fattas sedan av riksdagen. I formell mening är alltså alla projekt politiskt beslutade (i praktiken ändrar dock regeringen sällan Trafikverkets förslag). Trafikverket (och tidigare Vägverket och Banverket) brukar i sitt planeringsunderlag redovisa hur stor del av budgeten som är öppen för förslag för dem och hur stor del som redan är fastslagen. Lejonparten är redan fastslagen. När man analyserar lönsamhetens påverkan finner man oftast att det är "nollan" som är viktig. Om ett objekt är lönsamt eller inte kan alltså spela roll, men det blir inte mer sannolikt för att det är väldigt lönsamt.

³ Två av de senaste artiklarna om svenska förhållanden är (Eliasson & Lundberg, Do Cost-Benefit Analyses Influence Transport Investment Decisions? Experiences from the Swedish Transport Investment Plan 2010–21, 2012) och (Eliasson, Börjesson, Odeck, & Welde, 2015). Analysen av de svenska förhållandena baseras i båda artiklarna på data från åtgärdsplaneringen 2008-2009. I den senare artikeln analyseras även de norska förhållandena.

På den samhällsekonomiska plussidan av att bygga i tunnel finns framförallt minskat intrång och möjliggörande av exploatering. Intrång är ett samlingsbegrepp för:

- Barriäreffekter
- Buller
- Markintrång vid parker, vattendrag och strövområden
- Visuellt intrång genom störande gestaltning

Exploatering innebär intäkter till det offentliga (vilket ibland finansierar delar av investeringen) och en bättre stadsbild. För centrala investeringar innebär också exploatering en tätare lokalisering, vilket har positiva effekter på arbetsmarknaden.

Effekten på luftföroreningar av att lägga en investering i tunnel är tvetydiga. Exponeringen av utsläpp för de som vistas runt vägen minskar, men ökar för de som kör på vägen. För koldioxid spelar det ingen roll var utsläppen sker.

4.3 FALLSTUDIER

4.3.1 *Val av fallstudier*

Urvalet av fallstudier baseras på en kartläggning av de tunnlar som finns i Sverige (Wikipedia 2019) samt planerade tunnlar. I sammanställningen i Tabell 1 nedan presenteras endast de tunnlar som överstiger 500 m och är nyare än 15 år. Anledningen är att kortare tunnlar inte omfattas av samma krav på ventilation och brandskydd som längre tunnlar. Samma argument gäller även för äldre tunnlar. Antalet tunnlar som överstiger 500 m och är byggda senare än 2004 uppgår till sex stycken. Dessa är Södra länken och Norra länken i Stockholms kommun, Törnskogstunneln i Sollentuna kommun, Götatunneln i Göteborgs kommun, Löttingetunneln i Täby kommun, Nackatunneln/Sicklatunneln i Nacka kommun samt Ulricehamnstunneln i Ulricehamns kommun.

Tabell 2. Sammanställning över tunnlar i Sverige som överstiger 500 m och är byggda efter 2004 (baserat på sammanställning i Wikipedia 2019-02-25).

Tunnel	Kommun	Väg	Längd (m)	Öppningsår	Övrigt
Södra länken	Stockholms kommun	Riksväg 75	3835	2004	Hammarbytunneln (östgående) 3835 m, Årstatunneln (västgående) 3823 m. Flera anslutande tunnlar
Norra länken	Stockholms kommun	Väg E20	3695	2014	
Törnskogstunneln	Sollentuna kommun	Länsväg 265	2071	2008	
Götatunneln	Göteborgs kommun	Väg E45	1600	2006	
Löttingetunneln	Täby kommun	Länsväg 265	1100	2008	
Nackatunneln/Sicklatunneln	Nacka kommun	Riksväg 75	610	2004	Nackatunneln (östgående) 610 m, Sicklatunneln (västgående) 580 m.

Utöver dessa är även fem vägtunnlar i planerings- eller byggfasen; Förbifart Stockholm samt tre delsträckor på Tvärförbindelse Södertörn: Flemingsbergstunneln, Glömstatunneln och Masmotunneln samt Marieholmstunneln i Göteborg. (Engström Nylén 2018).

Tabell 3. Sammanställning över planerade tunnlar i Sverige. (Baserat på <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/projekt-i-stockholms-lan/Tvarforbindelse-Sodertorn/> 2019, <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Vastra-gotaland/projekt-i-vastra-gotalands-lan/Marieholmsforbindelsen/Marieholmstunneln/> 2019 och Trafikverket 2016).

Tunnel		Kommun	Väg	Längd (m)	Öppningsår (prel.)
Förbifart Stockholm		Botkyrka, Stockholm, Ekerö, Sollentuna	E4	18 000	2026
Tvärförbindelse Södertörn	Flemingsbergstunneln	Haninge, Huddinge, Botkyrka, Stockholm	E4/ Väg 259	3 500	2031
	Glömstatunneln	Huddinge	E4/ Väg 259	1 200	2031
	Masmotunneln	Haninge, Huddinge, Botkyrka, Stockholm	E4/ Väg 259	1 000	2031
Marieholmstunneln		Göteborg	E6/E20/ E45	500	2020

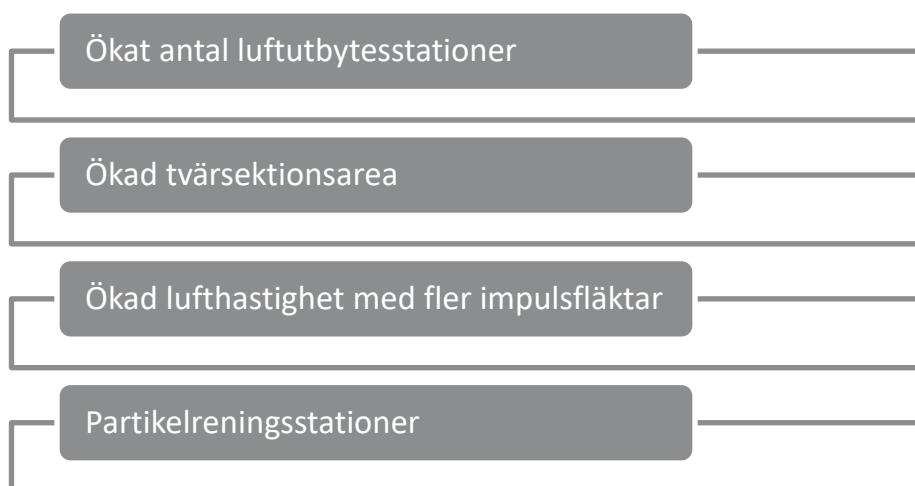
Av dessa tunnlar har Förbifart Stockholm, Södra länken, Norra länken och Tvärförbindelse Södertörn valts ut som fallstudier. Anledningen är att det för dessa tunnlar finns tidigare gjorda samhällsekonomiska bedömningar. För Förbifart Stockholm görs en genomgående beräkning av vilka extra kostnader som ytterligare ventilation för att sänka NO_x -halterna skulle ge.

Baserat på Förbifart Stockholm tas sedan estimat fram för hur stora de extra ventilationskostnaderna är på övriga tunnlar.

Effekterna på den samhällsekonomiska kalkylen av de ökade kostnaderna för ett riktvärde för tunnelluft uppskattas genom att beräkna förändringen i nettonuvärdeskvot (NNK) för projektet. NNK beräknas genom att dividera nettonyttan, det vill säga nytta minus kostnader, med investerings- och driftskostnader. I tidigare kalkyler återfinns endast investeringskostnaden i nämnaren.

4.3.2 Kostnadsuppskattningar för utökad ventilation i Förbifart Stockholm

En sänkning av koncentrationen av luftföroreningar i en vägtunnel kan åstadkommas på olika sätt med hjälp av tunnelventilationen. Dessa presenteras översiktligt i Figur 11.



Figur 11. Metoder för att sänka koncentrationen av luftföroreningar i tunnlar.

Ökat antal luftutbytesstationer

Kostnadsuppskattningarna baseras på en hypotetisk sänkning av NO_x - koncentrationen i Förbifart Stockholm och syftet är att ge en uppskattning av storleksordningen på kostnader.

Avståndet mellan de projekterade luftutbytesstationerna i Förbifart Stockholm är i medeltal cirka fem kilometer. Med ökat antal luftutbytesstationer blir avståndet mellan dem kortare, till exempel innebär en fördubbling av antalet luftutbytesstationer ett avstånd på cirka 2,5 km och ungefär en halvering av NO_x-halten. En ytterligare förtätning skulle innebära att avståndet kortas ner till cirka 1 km vilket hypotetiskt betyder ytterligare en halvering av koncentrationerna och totalt 24 luftutbytesstationer. En fyrdubbling av stationerna är i praktiken omöjligt med tanke på tunnelns lokalisering, schaktlägen, ramper etc. men tas upp som ett räkneexempel. Även en fördubbling av antalet luftutbytesstationer kan vara omöjlig att genomföra av praktiska skäl på grund av markbehov.

Två scenarier utgör grunden för kostnadsberäkningarna där antalet luftutbytesstationer fördubblas eller fyrdubblas. Referensscenariot motsvarar den nuvarande ventilationen i Förbifart Stockholm där det totalt i båda körriktningarna byggs sex luftutbytesstationer. Kostnader för investering av ventilation, elkraftanläggningar och tillhörande utrustning baseras på uppskattningar från systemhandlingsskedet (2009). Byggekostnader för luftutbytesstationer finns inte tillgängligt för Förbifart Stockholm utan kalkyl från Östlig förbindelse tillämpas då dessa stationer är av motsvarande utformning och kapacitet. Uppgift saknas om underhållskostnaden av bergutrymmena för fläktstationer och schakt. I bilaga kapitel 8.2 anges antaganden, förutsättningar och byggtekniska aspekter.

Tabell 4. Uppskattning av tillkommande kostnad för ökat antal luftutbytesstationer och ungefärliga sänkningar (grov bedömning) av koncentrationer av luftföroreningar i tunneln. Referensfall 1000 µg/m³ räknat som medelhalt under maxtimme. Kostnader avser 2010 års prisnivå (SCB, 2019). Mängder avser båda tunnelriktningarna.

Ötökning av antal luftutbytesstationer		Förbifart Stockholm	6 st extra	18 st extra
Koncentration NO _x under maxtimme, längdmedelvärde	µg/m ³	ca 1000 ⁴	ca 500 ⁵	ca 250 ⁴
Sänkning av NO _x -medelvärde jämfört mot referensfall	%	0	ca 50	ca 75
Behov luftutbytesstationer	st	6	12	24
Kapacitet 600 m ³ /s				
Behov impulsfläktar	st	ca 170 ⁴	ca 170 ⁴	ca 170 ⁴
Medelavstånd mellan luftutbytesstationer	km	ca 5	ca 2,5	ca 1,3
Totalt effektbehov tunnelventilation	MW	16	21	32
Ökad investering				
Byggekostnad	Mkr	---	420	1160
Fläktar och elkraft	Mkr	---	180	540
Summa	Mkr		600	1700
Ökad drift och underhåll				
Underhållskostnad fläktar och elkraft ⁶	Mkr/år	---	9	26
Energikostnad ^{7, 7}	Mkr/år	---	25	71
Summa	Mkr/år	---	34	97

Tabell 4 presenterar kostnadsuppskattningarna för sänkning av riktvärde genom ökat antal luftutbytesstationer med referensfall längdmedelvärde under maxtimme (medelhalt under maxtimme) på 1000 µg/m³ NO_x vilket motsvarar maxdrift av tunnelventilationen. Data i (Brandt & Lucchini, 2016) har använts i beräkningen. Den utökade ventilation för att sänka

⁴ (Brandt & Lucchini, 2016)

⁵ Uppskattningar baserat på data (Brandt & Lucchini, 2016).

⁶ Baseras på 5% av investeringskostnaden. Underhåll av berg ej inkluderat, t ex skrotning av berg i schakt i luftutbytesstationer.

⁷ Baseras på trafikantviktat riktvärde för luftkvaliteten (se kapitel 5). Drift av tunnelventilation under samma tid av dygnet som tunneln ventileras i maxläget i referensfallet (bör-värde ca 1000 µg/m³).

⁷ Energikostnad antagen till 1000 kr/MWh, se (WSP, 2018).

koncentrationen innebär en extrapolering av data till en fiktivt större anläggning än den som är projekterad i Förbifart Stockholm.

Större tunneltvärsnitt

Om tunneltvärsnittet i Förbifart Stockholm ökas till det dubbla (cirka 200 m²) och om lufthastigheten om cirka 8 m/s bibehålls kommer volymflödet att fördubblas och nå cirka 1 600 m³/s. Ett dubblerat volymflöde innebär en halverad koncentration av föroreningar i snitt längs tunneln, alltså cirka 500 µg/m³ NO_x. I kostnadsuppskattningarna ingår inte ökad kapacitet hos luftutbytesstationerna, vilket kan krävas då volymflödet i tunneln ökar.

I bilaga, se kapitel 8.3 anges antaganden, förutsättningar och byggtekniska aspekter. Kostnadsuppskattningarna presenteras i Tabell 5.

Tabell 5. Kostnadsuppskattningar för ökad tunnelarea för ökat luftflöde (bibehållen lufthastighet). Kostnader avser 2010 års prisnivå (SCB, 2019). Mängder avser båda tunnelriktningarna.

Utökning av antal luftutbytesstationer		Referens Förbifart Stockholm	Ökad tunnelsektion
Koncentration NO _x under maxtimme, längdmedelvärde	µg/m ³	ca 1000 ⁴	ca 500 ⁵
Sänkning av NO _x jämfört mot referens	%	0	ca 50
Tunnelsektion	m ²	100	200
Lufthastighet	m/s	8	8
Totalt effektbehov tunnelventilation	MW	16	22
Ökad investering			
Byggekostnad	Mkr	---	6000
Fläktar	Mkr	---	40
Summa	Mkr		6040
Ökad drift och underhåll			
Underhållskostnad fläktar ⁶	Mkr/år	---	2
Energikostnad ⁷	Mkr/år	---	27
Summa	Mkr/år	---	29

Ökad lufthastighet

Med ökad lufthastighet ökar volymflödet av luft genom tunneln vilket sänker koncentrationerna av föroreningar i tunneln.

Förbifart Stockholm kommer i vissa längdavsnitt i tunneln att nå rekommenderad maximal lufthastighet på 10 m/s. Ökningen av lufthastigheten kan göras på övriga sträckor från i snitt 8 m/s (högsta medelhastigheten under dygnet baserat på hela huvudtunnelns längd) till 10 m/s, vilket innebär en genomsnittlig ökning av flödet med 25 procent vilket motsvarar en genomsnittlig sänkning av koncentrationerna med 25 procent.

I bilaga, se kapitel 8.4 anges antaganden, förutsättningar och byggtekniska aspekter.

I Tabell 6 nedan visas exempel på uppskattad kostnad för utökad ventilation genom att öka lufthastigheten från 8 till 10 m/s i hela tunneln.

Tabell 6. Kostnadsuppskattningar för ökad lufthastighet i referenstunnel. Kostnader avser 2010 års prisnivå (SCB, 2019).

Utökning av antal luftutbytesstationer (båda riktningar)		Referenstunnel (flytande trafik)	Ökad lufthastighet vid flytande trafik
Koncentration NO _x under maxtimme, längdmedelvärde	µg/m ³	1000 ⁴	750 ⁵
Sänkning av NO _x jämfört mot referens	%	---	ca 25
Koncentration NO _x under maxtimme, maxhalt	µg/m ³	1460 ³	---
Lufthastighet	m/s	8	10
Totalt effektbehov tunnelventilation	MW	16	32
Ökad investering			
Byggekostnad	Mkr	---	20
Fläktar exkl. elkraft	Mkr	---	100
Summa	Mkr		120
Ökad drift och underhåll			
Underhållskostnad fläktar ⁶	Mkr/år	---	5
Energikostnad ⁷	Mkr/år	---	75
Summa	Mkr/år	---	80

Partikelreningsstationer

I bilaga, se kapitel 8.5 presenteras tekniken mer i detalj samt uppskattad kostnadsnivå jämfört mot luftutbytesstationer.

Sammanfattning – principer för utökad ventilation

Tabell 7 sammanfattar de olika principerna för utökad ventilation med kalkylkostnader för en sänkning av koncentrationerna med 50 procent vilket i Förbifart Stockholm antagits vara från 1 000 till 500 µg/m³ räknat som högsta timmedelvärde för medelhalten längs tunneln. Sammanställningen anger även för- och nackdelar.

Tabell 7. Sammanställning av kalkylresultat för olika principer för att sänka koncentrationer av luftföroreningar samt dess för- och nackdelar.

Princip	Ökad investerings-kostnad ¹ Mkr/år	Ökad drift-kostnad Mkr/år	Summa ökning kostnad, Mkr/år	Fördel	Nackdel
Fler luftutbytes-stationer Sänkning från referensnivå <i>medelvärde</i> under maxtimme1000 till 500 µg/m ³	30	35	65	Fläktar och schakt kan användas till brandgasevakuering (medger kortare brandzoner längs tunneln)	Schakt och avluftstorn kräver markyta
Större tunnel-tvårsnitt Sänkning från referensnivå <i>medelvärde</i> 1000 till 500 µg/m ³	245	29	275	Eventuellt säkrare utrymning om tunnelsektionen görs högre (brandgaslager hamnar högre upp)	Ökad byggtid för tunneln
Ökad lufthastighet Möjlig sänkning max 25% (från <i>medelvärde</i> 1000 till 750 µg/m ³)	5	80	85	---	Stort antal impulsfläktar krävs pga att impuls-fläktar arbetar ineffektivt i höga lufthastigheter. Negativ inverkan på brandutveckling och utrymning p.g.a. ökad lufthastighet.
Partikelrenings-stationer Sänkning från referensnivå <i>medelvärde</i> under maxtimme1000 till 500 µg/m ³	Bedöms dyrare än luftutbytes-stationer	Bedöms dyrare än luftutbytes-stationer		Inga schakt till markytan	Saknar schakt för brandgasevakuering

¹ Not: Annuitetsberäkning baserat på 3,5% ränta med antagande om 60 års livslängd för anläggningsarbeten och 25 års livslängd för installationer.

² Not: Eftersom koncentrationerna är inom projekterad ventilationskapacitet avspeglar kostnaderna skillnad i investerad ventilationsinstallation och drift.

Ursprunget till Förbifart Stockholm ligger nästan 60 år bakåt i tiden. Det började då att diskuteras hur man skulle kunna binda ihop de nordliga och sydliga delarna av Stockholm. Några år senare presenterades Kungshattsleden som skulle ligga i ytläge med broar över Mälaren. Cirka 30 år senare, på 1990-talet, uppstod idén igen inom Dennispaketet och den presenterades som Västerleden vilken skulle fortsätta att gå över broar men även i ett par tunnlar. Västerleden kom så långt som till en vägutredning vilken även tittade på alternativet att koppla samman Västerleden med Bergslagsvägen norr om Lovön. Vägen skulle då gå på bro från Lovön och norrut liksom en bro över E18 i Hjulsta. En anledning till att långa tunnlar inte var aktuella var att det fanns en osäkerhet kring hur tunnlar skulle påverka bilisternas beteende och därmed trafiksäkerheten. Bron från Lovön försvann sedan i arbetsplaneskedet på grund av intrångs- och bullerproblem. Utformningen med bro över E18 Hjulsta stoppades av dåvarande vägdirektören som insåg att det inte gick att argumentera för en väg i ytläge genom befolkat område när vägen skulle gå i tunnlar genom naturområden. Då uppstod även tunneln vid Hjulsta. Projektets momentum bidrog till att det drogs vidare trots att stora kostnadsposter uppstod. Dessutom var styrningen av skattemedel svag (Markstedt, 2019).

Beräkningarna nedan utgår från den ursprungliga samlade effektbedömningen som gjordes för Förbifart Stockholm (Trafikverket, Förbifart Stockholm, VST 001, 2013).

För att bedöma vilken påverkan ökade ventilationskostnader skulle ha på NNK för att uppnå lägre nivåer av NO_x i tunneln har två olika scenarier använts (se mer detaljer i avsnitt ovan för respektive utbyggd ventilationslösning). Det första scenariot utgår från att det tillkommer ytterligare 6 luftutbytesstationer, vilket innebär att det byggs totalt 12 luftutbytesstationer. Detta leder till att halterna av NO_x sänks till ungefär

hälften, till en medelhalt under maxtimmen på 500 µg/m³. Om 18 extra luftutbytesstationer byggs uppgår det totala antalet till 24 och att NO_x-halterna kommer att sjunka från en medelhalt under maxtimmen på cirka 1000 µg/ m³ till cirka 250 µg/ m³. Beräkningarna inkluderar även vilka effekter på NNK en dubblering av tunnelarean skulle ha, men gäller endast scenariot med en halvering. De extra investeringskostnaderna har adderats till den ursprungliga investeringskostnaden och de extra investeringskostnaderna samt drift- och underhållskostnaderna har subtraherats från posten nettonuvärde. Därefter har nya nettonuvärdeskvoter räknats fram. Effekterna på NNK och NO_x visas i Tabell 8 nedan. Det ska noteras att värdet av förbättrad hälsa inte ingår i kalkylen för NNK, varken i den ursprungliga eller det nya värdet. I de nya värdena för NNK ingår endast ytterligare investerings- och driftskostnader.

Tabell 8. Effekter på samhällsekonomisk investeringskostnad och nuvärde av nytta minus kostnader. Effekter på NNK och NO_x-halt för Förbifart Stockholm på grund av de extra investeringarna och driftskostnaderna för luftutbytesstationer, dubblerad tunnelarea och ökad lufthastighet med befintligt fläktsystem. Referens 1000 µg/m³ medelhalt under maxtimme.

	Referens	12 luft- utbytes stationer	24 luft- utbytes stationer	Dubblerad tunnelarea	Ökad luft- hastighet, fler impulsfläktar
NO_x (µg/m³), medelhalt maxtimme	1 000	500	250	500	750
Samhällsekonomisk investeringskostnad	33 400	34 200	35 700	41 200	33 600
Nuvärde av nytta minus kostnader	47 800	46 700	44 600	39 800	47 200
NNK	1,43	1,36	1,25	0,96	1,41

Den ursprungliga kalkylen för Förbifart Stockholm visar samhällsekonomisk lönsamhet med en nettonuvärdeskvot på 1,43. Det är dock inte känt vilken haltnivå kalkylen baseras på. Här antas att den ursprungliga kalkylen för Förbifart Stockholm representerar en medelhalt under maxtimmen motsvarande referensnivån 1 000 µg/m³.

I beräkningarna framkommer att den samhällsekonomiska investeringskostnaden för att halvera medelhalten under maxtimmen endast ökar marginellt vid en fördubbling av antalet luftutbytesstationer (2,4%). En fyrdubbling av antalet luftutbytesstationer ger en ökning av den samhällsekonomiska investeringskostnaden med cirka 7 procent. Fyrdubblingen av antalet luftutbytesstationer kan hypotetiskt minska medelhalten under maxtimmen till 250 µg/m³. En fördubblad tunnelarea ger samma reduktion i halt som 12 luftutbytesstationer samtidigt som den samhällsekonomiska investeringskostnaden ökar med nära 24 procent. Ökad lufthastighet med fler impulsfläktar kan minska halten till cirka 750 µg/m³. Den samhällsekonomiska investeringskostnaden ökar då med cirka 0,5 procent.

Nettonuvärdeskvoten visar på lönsamhet för alla alternativ som inkluderats i analysen.

4.3.3 Södra länken

Åtgärderna som beskrivs ovan avser referenstunnel Förbifart Stockholm och kan inte direkt översättas till andra tunnlar då varje tunnel är specifik avseende geometri/utformning, trafiksituation, installation av tunnelventilation, aerodynamik och riktvärde för luftkvalitet. För att beräkna effekterna av ökade ventilationskostnader på andra tunnlar har därför en skalningsfaktor tagits fram, här kallad ventilationsbehovsfaktor "VBF" (se bilaga kapitel 8.6).

Ekvationen beskriver hur aktuell tunnel med ett skärpt riktvärde för luftkvalitet skiljer sig från Förbifart Stockholm. Ventilationskapaciteten uttryckt som medelhalt under maxtimmen är för Förbifart Stockholm ungefär 1 000 µg NO_x per m³ luft och ju längre från det riktvärdet aktuell tunnel är dimensionerad för, desto relativt dyrare blir ventilationen att bygga ut i aktuell tunnel. Vägverket har rekommenderat att riktvärdet 5 000 µg/m³ maxhalt under maxtimmen inte överskrids i tunnlar (SLB, 2010). I exemplet antas det att åtgärderna leder till en halvering av det ursprungliga dimensionerande NO_x-värdet, precis som för Förbifart Stockholm. Skalningsfaktorn, VBF, multipliceras sedan med den extra kostnaden för ventilation som tagits fram för Förbifart Stockholm när NO_x-halten halveras. NNK har sedan beräknats där den extra kostnaden för investeringar och drift multiplicerats med skalningsfaktorn. För Förbifart Stockholm baseras kostnaden på ett ökat antal luftutbytesstationer medan det för andra tunnlar kan resultera i kostnader som inte täcker fullt en hel luftutbytesstation. Resultatet ska därför ses som en indikation på kostnadsökningen på utbyggd ventilation.

När det gäller lokalisering av luftutbytesstationer antas inga begränsningar i placering vilket innebär att omfattningen av utökad ventilation underskattas i stadstunnlar på grund av komplexitet eller begränsningarna i var man kan placera ovanmarksanläggningar (avlufstorn och byggnader med luftintag). I bilagan för ventilationsbehovsfaktorn dras slutsatsen att faktorn sannolikt överskattar kostnader för utbyggd ventilation, men att kostnaderna å andra sidan sannolikt underskattas för tunnlar i stadsmiljö på grund av problematiken med placering av luftutbytesstationer.

Södra länken öppnades 24 oktober 2004 och binder samman Essingeleden i väst med Värmdöleden i öst samt ansluter till Huddingevägen och Nynäsvägen (Vägverket, Kommunikationsarbetet i byggprojektet Södra Länken - Slutrapport, 2006). Tunneln är nästan fyra kilometer lång i en riktning och har en uppmätt trafikmängd ÅDT på 49 600 fordon i ena riktningen (Trafikverket, E4/E20 Essingeleden - Södra länken Samrådshandling, 2017).

Södra Länken var från början ämnad att läggas i tunnel och tankarna fanns redan i Regionplan 90 och Dennispaketet. Södra Länken liksom Norra länken skulle utgöra delarna i en ringled som planerades runt Stockholm. Förbindelsen fanns redan, fast den gick i ytläge och kanske inte på det mest optimala sättet för en resenär. Staden ville frilägga mark för att kunna exploatera för byggande. Eftersom planeringen utgick ifrån att vägen skulle läggas i tunnel går det i det här fallet inte riktigt att uttala sig om vilka alternativkostnader som skulle ha uppstått om vägen lagts i ytläge. Däremot går det att resonera kring effekterna av att Södra Länken inte hade byggts alls. Då hade förmodligen marken inte varit lika attraktiv att bygga bostäder

och arbetsplatser på grund av buller, föroreningar och svårigheter att röra sig fritt över området. Det är rimligt att anta att Årstälänken och delarna av vägarna 226, 73 och 222 hade varit betydligt mer belastade av köer och restidsförlusterna varit betydande (Markstedt, 2019).

Beräkning av skalningsfaktorn VBF för Södra länken visar att kostnaden för att installera luftutbytesstationer för att halvera riktvärdet uppgår till i storleksordningen 0,19 gånger investeringskostnaderna för utbyggd ventilation i Förbifart Stockholm.

För att uppskatta effekten på NNK har uppgifter kring kostnader och nyttor hämtats från en utredning som gjordes 1996 av (Asplund, 1996). Denna visar på mycket dålig samhällsekonomisk lönsamhet, NNK låg på -1,15. Den ursprungliga samhällsekonomiska investeringskostnaden var beräknad till 7,9 miljarder enligt (Asplund, 1996). Uppräknat till 2010 års priser blir investeringskostnaden 9,8 miljarder. Beräkningarna visar att kostnaden för att halvera riktvärdet ökar investeringen med cirka 150 miljoner kronor med ovanstående antaganden. En halvering av riktvärdet innebär således att den samhällsekonomiska investeringskostnaden ökar med 1,5 procent. NNK är kraftigt negativ redan från början och påverkas endast marginellt av den ökade kostnaden. Det faktum att NNK är mindre än minus 1 innebär att investeringens nyttor inte täcker de rörliga kostnaderna. En viktig poäng här är att kalkylen i Asplund (1996) avser de trafikala nyttorna, men att Södra länken inte främst syftade till tidsvinster utan till exploaterings effekter och minskat intrång (vilket inte fångas i kalkylen). På uppdrag av Vägverket beräknades i (Transek, 2005) den tillkommande exploateringsnyttan vara 2-2,4 miljarder. Med de investeringskostnader som antogs i (Asplund, 1996) räcker inte detta till att göra Södra länken samhällsekonomiskt lönsam, men investeringen blir inte längre lika kraftigt olönsam. Man bör också komma ihåg att det minskade intrånget inte värderats och att nyttorna med dagens högre kalkylvärden hade varit högre. Hur som är kostnaden för den ökade ventilationen marginell och hade inte påverkat lönsamheten nämnvärt.

4.3.4 Norra länken

På 1970-talet utredde Vägverket om E4, Norra stationsgatan och Essingelänken kunde kompletteras med en diagonal tunnel mot Järva krog (som först hette Arlandalänken och sedan E4-länken). Den första lösningen som byggdes var en lösning i ytläge ganska nära nuvarande Norra länken där endast Eugeniattunneln lades i tunnel. Idén om en diagonal tunnel levde kvar ända till Stockholms Stad aktivt klev in och ville medfinansiera en tunnel. Tanken var att kunna exploatera marken ovanpå tunneln och knyta ihop Stockholm och Solna. Nya Karolinska började planeras och Trafikverket gjorde en förstudie som även den bäddade för en kommande överdäckning av området mellan Stockholm och Solna. Liksom Södra Länken var Norra Länken en del av Dennispaketet. Staden betalade även för tunnelsträckningarna vid E18. Förmodligen var stadens engagemang anledningen till att det i slutändan blev så mycket tunnel (Markstedt, 2019).

Norra länken fastnade i juridiska strider om nationalstadsparken. Vissa personer överklagade med argumentet att man inte fick göra intrång i anlagd park. Det fanns ett område bakom Wennergrens center där det var oklart om det skulle tolkas som anlagd park eller som ett utfyllt område med växtlighet

på. Detta gjorde att man inte kunde gräva en tunnel uppifrån och anlägga en betongtunnel vilket hade varit lösningen eftersom det inte fanns tillräckligt med berg nära ytan. Andra metoder blev för dyra, lösningen blev att Miljöbalken ändrades. Allt detta tog många år (Markstedt, 2019).

Liksom för Södra Länken har planerna för Norra Länken sedan länge varit förknippade med tunnelläge eftersom staden ville exploatera området kring Norrtull. Alternativkostnader i det fallet skulle ha varit uteblivna värden av sammanlänkning av Stockholm och Solna. En annan sträckning av tunneln, till exempel som Arlandalänken hade förmodligen blivit billigare eftersom den, dels hade blivit kortare, dels hade blivit en bergtunnel och inte en betongtunnel. Men precis som för Förbifart Stockholm har tidigare beslut gett riktningar åt dagens resultat. Eftersom ytläge var billigare byggde man det och enbart Eugeniattunneln. Senare insåg man att planerna på en utbyggd tunnelbana krockade med vägplanerna. Eftersom vägen var riksintresse fick tunnelbaneplanerna stå tillbaka. En alternativkostnad hade i det fallet kunnat vara en utbyggd tunnelbana vilket hade gett effekter, positiva och negativa, på andra grupper i samhället liksom andra geografiska områden (Markstedt, 2019).

Sträckan Roslagstull-Hjorthagen som utgör en del av Norra Länken fanns med i det tidiga Dennispaketet och utgjorde då början på Östlig förbindelse. Man ville även avlasta Valhallavägen och bygga bostäder. Att Valhallavägen är en sekundärled för farligt gods gör att Länsstyrelsen säger nej till att bygga bostäder där. Den nybyggda Norra Djurgårdsstaden drar dock nytta av vägen. Alternativkostnaderna som relaterar till den här sträckan handlar därför mycket om hur belastningen av Valhallavägen hade sett ut och om det hade varit möjligt att bygga Norra Djurgårdsstaden. En alternativ användning av de ekonomiska medlen hade rent hypotetiskt kunnat vara att bygga en spårväg till det nya bostadsområdet istället (Markstedt, 2019).

Norra länken (Figur 13) binder samman Karlberg med Värtan i Stockholm och öppnades delvis år 2015 och helt år 2017. Syftet var att avlasta Valhallavägen och Lidingövägen där många tunga och farligt gods-transporter gick. Sträckan var också en förutsättning för att två nya stadsdelar skulle kunna byggas i Stockholm: Norra Djurgårdsstaden och Hagastaden. Den totala sträckan i båda riktningarna är 7 km och den längsta tunnelsträckan i en riktning är cirka 4 km. Leden består av tre körfält i varje riktning, två körfiler och en för av- och påfarter.

Luft till tunneln tillförs både via infarterna och tilluftsschakt och förs sedan ut via ventilationstorn. Fläktarna styrs utifrån föroreningshalter, sikt och lufthastighet (Trafikverket, Norra länken).



Figur 13. Norra länken (Trafikverket, Norra länken)

För att uppskatta effekterna på tunnelns lönsamhet har skalningsfaktorn "VBF" beräknats. Tunneln är dimensionerad för en årsmedeldygnstrafik på 55 000 fordon per riktning (KÄLLA). Detta ger en skalningsfaktor på 0,20 vilket medför att den extra investeringskostnaden för att halvera riktvärdet uppgår till cirka 160 miljoner kronor. I förhållande till den samhällsekonomiska investeringskostnaden på 11 miljarder uttryckt i 2010 års prisnivå innebär halveringen av riktvärdet en ökning av kostnaden med cirka 1,5 procent.

De ursprungliga värdena från den samlade effektbedömningen har räknats upp från 2006 års prisnivå till 2010. Detta ger en NNK på -0,39 att jämföra med den ursprungliga NNK på -0,38 (Vägverket, Samlad effektbedömning - E20 Norra länken, 2009). Merkostnaden för att halvera riktvärdet reducerar NNK till -0,39. En känslighetsberäkning har gjorts där kostnaden för en hel luftutbytesstation adderas i beräkningen av NNK istället för den beräknade skalfaktorn. Det visar sig då att NNK blir -0,40.



Figur 14. Teknisk detalj Norra länken (Trafikverket, Norra länken).

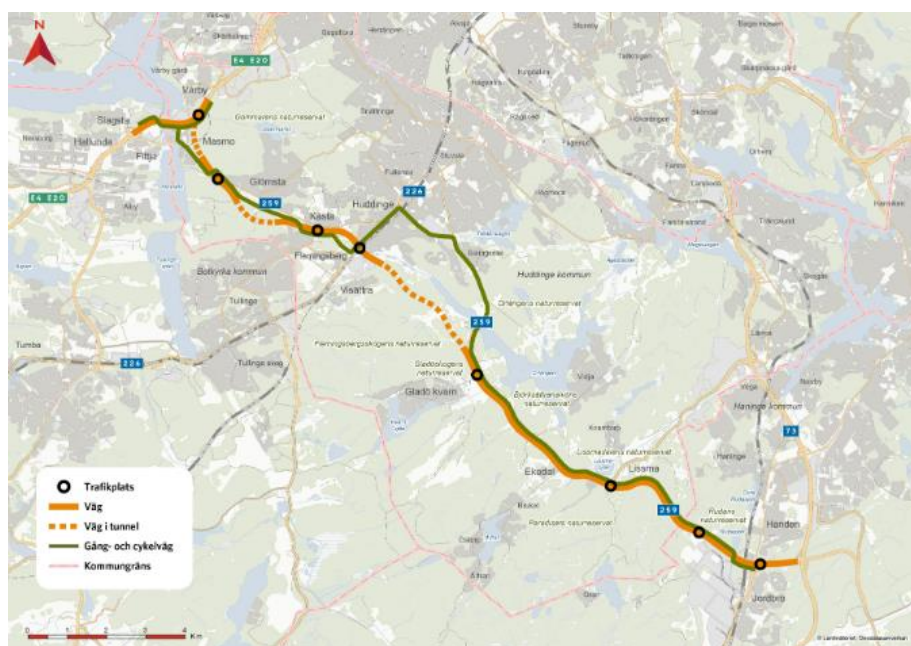
4.3.5 Tvärförbindelse Södertörn

Tvärförbindelse Södertörn är ett kommande projekt som kommer att binda ihop E20/E4 med väg 226 söder om Stockholm. Det var enbart en ytförbindelse på 1990-talet och knäckfrågan var hur man skulle kunna ansluta E4 till Huddingevägen. Projektet har nu blivit tre tunnlar. En av anledningarna är att det finns starka boendegrupper i området. Tunneln genom Masmoberget kom till för att tvärförbindelsen skulle kunna ansluta till Förbifart Stockholm. Huddinge kommun har drivit på för byggandet av tunneln under Glömstaskogen då de vill kunna exploatera och bygga bostäder. Tunneln under Flemingsbergsskogen motiveras däremot mer av naturvärden och det naturreservat som ligger i området (Markstedt, 2019).

Här har det alltså funnits tidigare diskussioner där vägen legat i ytläge. Buller och negativa effekter på naturvärden liksom möjligheter för kommuner att exploatera områden och därmed öka tillväxten har lett till att flera sträckor nu föreslås under mark. Alternativkostnaderna hade i ett ytlägesalternativ förmodligen varit just ökat buller för boende, förstörda naturvärden och minskade möjligheter att bebygga områden och därmed minskade skatteintäkter för kommuner. Det är rimligt att anta att NNK hade varit högre vid ett ytläge eftersom investerings-, drifts- och underhållskostnaderna blir höga vid ett tunnelbygge. Bullernivåerna hade påverkat NNK negativt då fler hade exponerats om vägen skulle byggas i ytläge. Däremot är naturvärden inte monetärt inkluderade i någon samlad effektbedömning och man kan anta att stora delar av dessa värden hade gått förlorade vid ett ytläge (Markstedt, 2019).

Ett av syftena med tvärförbindelsen är att skapa en säkrare väg än befintlig sträckning. Hela förbindelsen blir 21 km varav ungefär 6,5 km kommer att gå i tunnlar. Mellan trafikplats Gömmaren och trafikplats Gladö kommer vägen att förläggas i tre tunnlar; genom Masmoberget liksom under Glömstadalen och Flemingsbergsskogen. Anledningen till att vägen förläggs i tunnel vid dessa sträckor är för att skydda natur- och kulturvärden och de naturreservat

som finns där samt för att kunna ansluta till E4/E20. Det har här antagits att 60 000 fordon i båda riktningarna kommer att belasta vägen per dygn och att tunneln är 6,5 km lång i en riktning (Trafikverket, E4/Lv259 Tvärförbindelse Södertörn, VST005, 2016). Detta stämmer dock inte riktigt då längden delas mellan tre tunnlar vilket minskar behovet av ventilation. Med dessa antaganden blir NNK 0,42 istället för ursprungliga 0,43 och investeringskostnaden cirka 90 miljoner högre. I förhållande till den samhällsekonomiska investeringskostnaden på cirka 14 miljarder kronor innebär halveringen av riktvärdet en kostnadsökning som motsvarar cirka 0,7 procent. Eventuella förbättringar i luftkvalitet har inte inkluderats i dessa beräkningar då kostnadsuppskattningarna inte är så detaljerade. Positiva effekter såsom förbättrad luftkvalitet hade höjt den samhällsekonomiska nettoytan och även höjt NNK. Hur mycket är dock svårt att avgöra.



Figur 15. Tvärförbindelse Södertörn (Trafikverket, Start sida/Nära dig/Stockholm/Projekt i länet/Tvärförbindelse Södertörn/Nyheter/Gång- och cykelvägen planeras om, 2019)

4.4 SLUTSATSER

Den extra investeringskostnaden för utökad ventilation som krävs för att förbättra tunnelluften är liten i förhållande till den totala investeringskostnaden för tunnarna. Ökningen av den samhällsekonomiska investeringskostnaden för att halvera halterna genom en dubbling av antalet luftutbytesstationer är cirka 2,4 procent för Förbifart Stockholm, 1,5 procent för Södra Länken, 1,5 procent för Norra Länken och 0,7 procent för Tvärförbindelse Södertörn. Även om den procentuella ökningen är relativt liten, handlar det om ökade investeringskostnader på mellan 100 och 800 miljoner kronor. Då den samhällsekonomiska lönsamheten enligt litteraturen inte har så stor påverkan på om ett objekt byggs är det inte sannolikt att de ökade ventilationskostnaderna skulle ha någon större påverkan på byggandet av tunnlar i framtiden. Däremot kan det vara rimligt att anta att man hade infört åtgärder för att minska exponeringen av kväveoxider i Förbifart Stockholm om dessa beräkningar hade gjorts under förstudierna. Under driftsskedet är däremot kostnaden stor i förhållande till budgetarna för

drift och underhåll. Dessa budgetar måste alltså ändras, vilket det inte alltid finns politisk acceptans för.

Historiken kring tunnelprojekt, och i synnerhet Förbifart Stockholm, visar att politik och sociala frågeställningar runt omkring har stor inverkan på projektens utfall. Tidigare har infrastrukturinvesteringar genomförts för att förbättra tillgängligheten. Det blir allt vanligare med väginvesteringar där själva syftet med investeringen är att frigöra mark genom att lägga trafiken under jord. Södra länken är en sådan investering, där ytläge alltså inte är ett alternativ. För Förbifart Stockholm, Norra Länken och Tvärförbindelse Södertörn har ytläge funnits med i diskussionerna. Sociala aspekter och effekten av momentum ledde till att Förbifart Stockholm lades i tunnel i en större utsträckning än vad som var tanken från början och vad som kanske var samhällsekonomiskt rimligt. Det fanns alltså planer på en väg i stort sett i ytläge från början men de föll bort på grund av politiska viljor. Om vägen hade byggts i ytläge är det rimligt att anta att det hade billigare att bygga och att trafikanternas exponering för luftföroreningar hade blivit lägre. Däremot hade bullernivåerna liksom intrångs- och barriäreffekterna blivit högre. Vägen i ytläge hade kanske inte blivit lika accepterad bland befolkningen. Allt eftersom markvärden ökar torde också trycket på att lägga infrastrukturinvesteringar som syftar till ökad tillgänglighet under mark. En annan aspekt är att tunnlar numera inte är något oprövat och konstigt. Bedömningen är därför att byggandet av tunnlar inte kommer att avta i framtiden på grund av de ökade kostnaderna för ventilation. Det bör också påpekas att acceptansen för markintrånget vid de ytterligare luftutbytesstationerna kan vara låg, dessa kräver alltså politiska beslut.

5 KONKRETISERING RIKTVÄRDE

5.1 SLUTSATSER FRÅN TIDIGARE ARBETE

I den tidigare rapporten (WSP, 2018), rekommenderades att riktvärde för halt NO_x skulle sättas för varje tunnel separat enligt två olika principer, som båda skulle bevakas.

A: **Begränsad individuell riskhöjning.** Den som arbetspendlar genom en tunnel dagligen, skulle inte på grund av detta få en 'oacceptabelt' stor riskökning. I rapporten föreslogs (mycket tentativt) att gränsen för oacceptabel riskhöjning skulle sättas till 10 procent⁸. Detta krav ansågs motiverat ur ett rättighetsperspektiv.

B: **Samhällsekonomisk effektivitet.** Utöver vad som motiveras av ovanstående krav, skall medelhalten i tunneln sänkas ytterligare, om det är samhällsekonomiskt motiverat. Att en ytterligare sänkning är samhällsekonomiskt motiverad innebär att den samhällsekonomiska marginalkostnaden för att sänka halten ytterligare är lägre än det samhällsekonomiska värdet av motsvarande hälsonytta.

I WSP (2018) gjordes också en analys av vilka konkreta styrande halter (hypotetiska "riktvärden") som dessa principer skulle leda till, om de tillämpades för Förbifart Stockholm. Analysen byggde på tidigare genomförda simuleringar (Brandt och Lucchini, 2016). och var därmed begränsad till en jämförelse mellan de olika alternativ för luftkvalitetsstyrning som analyserats i de simuleringarna. Dessa simuleringar beskrev styrningen av en given ventilationsanläggning (den som beslutats för Förbifart Stockholm) mot olika hypotetiska "riktvärden". Tabell 1 i avsnitt 1.3 presenterar hur luftkvaliteten påverkas av valet av riktvärde för de olika alternativ som simulerades i Brandt och Lucchini (2016).

I WSP (2018) drogs slutsatsen att det, bland dessa alternativ, var mest samhällsekonomiskt lönsamt att välja det lägsta av de riktvärden som studerades⁹. Slutsatsen baserades på en sammanvägning av å ena sidan de samhällsekonomiska kostnaderna för att driva ventilationsanläggningen mot olika riktvärden, å andra sidan den samhällsekonomiska vinsten av att begränsa hälsopåverkan med hjälp av förbättrad luftkvalitet

Analyserna i WSP (2018) pekade alltså på att för **Förbifart Stockholm** är ett riktvärde för (*trafikanthalt*) *medelhalt under dygnet om högst 592 $\mu\text{g NO}_x / \text{m}^3$* samhällsekonomiskt motiverat med hänsyn till avvägningen mellan ventilationskostnader och hälsovinst.

⁸ 10% är en stor ökning av risken för förtida dödsfall, Den är betydligt större än de riskhöjningar som motiverar de gränsvärden/riktvärden som gäller för radonhalt i bostadshus, och miljö kvalitetsnormer för utomhusluft (3% riskhöjning). Ett skäl till att en relativt stor riskökning skulle kunna motiveras, när det gäller tunnelluft är att riktvärdet föreslogs beräknas utifrån ett antagande om att pendlaren använde 75% av bilens maximala kupéventilation. Det är därmed möjligt att klara sig med en betydligt lägre riskökning genom att själv begränsa kupéventilationen till, t ex 25%

⁹ I det alternativet styrdes anläggningen mot ett hypotetiskt riktvärde som innebar att maxhalten skulle hållas under 1000 $\mu\text{g NO}_x / \text{m}^3$ luft överallt i tunneln. På grund av ventilationsanläggningens begränsningar innebar detta "riktvärde" de facto att den verkliga medelhalten under den mest belastade timmen var något högre än så: 1145 $\mu\text{g NO}_x / \text{m}^3$ luft. Sett över hela dygnet utsattes en medeltrafikanthalt för en halt om 592 $\mu\text{g NO}_x / \text{m}^3$ luft.

Analysen visade vidare att detta lägsta riktvärde skulle kunna motiveras även med utgångspunkt i individuell risk. Medelhalten under maxtimmen (1145 µg NO_x /m³) innebär att den person som dagligen pendlar genom tunneln under högtrafik, genom sin pendling ökar sin risk för förtida död med 7 procent. Denna riskökning är visserligen lägre än den tentativt föreslagna gränsen för "oacceptabel" riskökning (10%), men ändå betydligt högre än den riskökning som anses "oacceptabel" i andra liknande sammanhang.

Analysen pekade alltså på att **för Förbifart Stockholm** kan ett riktvärde om att *medelhalten under maxtimmen skall vara högst 1145 µg NO_x /m³* vara rättighetsetiskt motiverat.

5.2 HUR KAN RIKTVÄRDET GENERALISERAS?

I det tilläggsuppdrag som härmed redovisas har vi studerat hur slutsatserna för Förbifart Stockholm kan generaliseras till allmänna riktlinjer, när (om) riktvärden skall formuleras för framtida tunnlar. Det har handlat om två typer av generaliseringar

- Undersöka om några utpekade potentiellt relevanta samhälls(ekonomiska) effekter (utöver ventilationskostnader och hälsoeffekter) kan förändra slutsatserna när det gäller vad som är samhällsekoniskt motiverat
- Undersöka hur egenskaperna hos enskilda tunnlar (andra trafikflöden, andra tunnellängder än Förbifart Stockholm) bör påverka vilket riktvärde som sätts.

När det gäller den första punkten – betydelsen av att beakta ytterligare samhällseffekter - pekar analysen i tidigare kapitel att det inte finns någon direkt anledning att ompröva de tidigare slutsatserna.

När det gäller risker vid brand visar analysen i kapitel 2 visserligen att det av brandsäkerhetsskäl kan vara olämpligt att styra mot lägre riktvärden enbart med hjälp av ökad lufthastighet på det sätt som de samhällsekonomiska beräkningarna i WSP (2018) förutsatte. Men å andra sidan visar analysen i avsnitt 4.3.2 att det i designskedet finns möjligheter att utforma ventilationsanläggningen så att de låga riktvärdena kan uppnås utan högre lufthastigheter, och att de samlade samhällsekonomiska kostnaderna för ventilation inte behöver bli större med en sådan utformning än de kostnader som förutsattes i WSP (2018).

I tilläggsuppdraget har vi också analyserat huruvida effekter på internationellt samarbete (kapitel 3) eller konsekvensen av potentiellt förlorade tillgänglighetsnyttor och budgetrestriktioner (kapitel 4) skulle kunna innebära att en mer fullständig samhällsekonomisk analys skulle leda till ett annat resultat. Inte heller här ger de nya analyserna anledning att ompröva de tidigare slutsatserna när det gäller riktvärde för Förbifart Stockholm.

Inför det nu rapporterade uppdraget har beställarna efterfrågat en mer konkret tolkning av vilka faktiska riktvärden (halter) som principerna leder till inte bara specifikt för Förbifart Stockholm, utan också mer generellt för tunnlar med olika egenskaper.

5.3 LÄMPLIGT RIKTVÄRDE – INDIVIDUELL RISK

Den *individuella hälsopåverkan* (ökad risk för förtida död) för den som pendlar dagligen påverkas av hur stor ökning av den så kallade *årsdosen* av NO_x, som pendlingen medför.

Årsdosökningen beräknas som en multiplikation av tre faktorer:

- Den halt som råder (i medeltal) i den tunnelmiljö som pendlaren omges av under sin passage genom tunneln. I beräkningarna har antagits att pendlingen i båda riktningarna görs under maxtimme. Det avgörande måttet på luftkvaliteten blir **därmed medelhalten (längs tunneln) under maxtimmen**
- Antalet passager genom tunneln som en pendlare gör under ett år. Detta värde påverkas inte av tunnelns egenskaper
- vistelsetiden i tunneln vid varje passage. Vistelsetiden ges i sin tur av
 - tunnelns längd
 - genomsnittlig fordonshastighet (så kallad reshastighet)

I WSP (2018) beräknas årsdosökningen – och motsvarande riskökning - för frekventa pendlare som regelbundet kommer att passera Förbifart Stockholm under de värsta högrafiktimmarna på morgon och eftermiddag¹⁰. Passagen genom tunneln beräknas ta 11 ½ minut i vardera riktningen. De värden som beräknades när det gällde årsdosökningar, och motsvarande riskökningar, sammanfattas i Tabell 9.

Tabell 9 . Medelhalt maxtimme, årsdos och Individuell riskökning för pendlare i Förbifart Stockholm (FS) under olika riktvärden. (Källa: Tabell 4 och Tabell 15 i WSP (2018))

Scenario	Medelhalt hela tunneln (µg NO _x /m ³) under maxtimmen	Passagetid (min)	Ökning årsmedelhalt (årsdos) µg/m ³ NO _x för pendlare	Riskökning för förtida död för frekventa tunnelpendlare
FS - UA1	1145	11,5	9,2	7%
FS - UA2	1660	11,5	12,5	10%
FS - UA3	2041	11,5	17,5	14%
FS – Nollalternativ	2142	11,5	20,4	16%

Med utgångspunkt värdena i Tabell 9 går det att beräkna vilka riktvärden som ger en 'acceptabel' riskökning för frekventa pendlare, även för andra tunnlar än Förbifart Stockholm. Detta som funktion av hur lång tid passagen genom tunneln tar. I Tabell 10 presenteras riktvärden för fyra exempel på hypotetiska tunnlar (passagetid 3, 5, 10 respektive 15 minuter) och två olika nivåer på 'acceptabel' riskhöjning (7% respektive 10%).

I WSP (2018) konstaterades att krav på rimliga siktförhållanden betyder att halter över 4000 µg/m³ NO_x kommer att behöva ventileras bort, även utan att man sätter något riktvärde med hänsyn till hälsokonsekvenser. Tabell 10 indikerar att för tunnlar som är kortare än 5 minuter kommer riskökningen därmed att bli "acceptabel", även om tunneln bara ventileras med hänsyn till siktförhållanden. Riktvärden satta med utgångspunkt i att begränsa den individuella riskökningen för pendlare kommer därför knappast att få någon

¹⁰ Beräkningen tar inte hänsyn till semester och helgdagar, utan baseras på ett antagande om 5*52*2=520 passager per år.

praktisk betydelse för tunnelventilationen för tunnlar som tar mindre än 5 minuter att passera.

Å andra sidan kommer kravet på att hålla den individuella riskökningen för pendlare på en 'acceptabel' nivå att motsvara riktvärden $<2000 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$ för alla tunnlar som tar minst 10 minuter att passera.

Tabell 10 Riktvärden för medelhalt längs tunneln under maxtimmen. Tunnlar med olika passagetid, och olika antaganden om acceptabel risk.

<i>Acceptabel riskökning för förtida död för frekventa tunnelpendlare</i>	Acceptabel ökning årsmedelhalt $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ NO}_x$	Tunnelns längd: Passagetid (min)	"Riktvärde": <i>Medelhalt hela tunneln under maxtimmen ($\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$)</i>
7%	9,2	3	4400
7%	9,2	5	2600
7%	9,2	10	1300
7%	9,2	15	900
10%	12,5	3	6400
10%	12,5	5	3800
10%	12,5	10	1900
10%	12,5	15	1300

Tunnlar kan vara så tätt lokaliserade att många pendlare kommer att passera flera tunnlar under sin pendlingsresa. En rimlig konsekvens av fokus på individuell riskökning blir då att riktvärdet för varje tunnel behöver anpassas så att den samlade riskökningen för hela pendlingen (alla tunnlar) inte överstiger den "acceptabla" gränsen. Konkret innebär det att den sammanlagda passagetiden för alla tunnlar längs en sådan "naturlig rutt" blir avgörande när riktvärdet avläses i Tabell 10.

Det blir en bedömningsfråga vilka rutter (tunnelkombinationer) som skall bedömas vara så vanliga att riskökningen skall beaktas för hela rutten (och inte för varje tunnel för sig). Som ett minimum behöver riktvärdet naturligtvis ta samlad hänsyn till alla tunnlar som ligger efter varandra på samma länk, utan avfarter emellan. I sådana fall är det ju inte möjligt att passera en enskild tunnel.

5.4 LÄMPLIGT RIKTVÄRDE – SAMHÄLLSEKONOMI

5.4.1 Riktvärdet jämförs med en referenssituation

I strävan efter ett riktvärde baserat på samhällsekonomisk effektivitet skall hälsovinster på samhällsnivå vägas mot de samhällsekonomiska (marginal)kostnader det innebär att (på billigaste sätt) ventilera en tunnel ner till ett visst riktvärde.

Till skillnad från det individuella perspektiv som diskuterades i föregående avsnitt, innebär det samhällsekonomiska perspektivet alltså att:

- Nyttan avvägs mot kostnaderna och
- hälsovinster aggregeras över alla trafikanter.

Notera att det är de samhällsekonomiska konsekvenserna av en *sänkning* av riktvärdet som beräknas. Analysen bygger alltså på en jämförelse mellan å ena sidan att styra mot (det föreslagna) riktvärdet, å andra sidan en referenssituation där riktvärdet är högre, eller inte finns. När ett riktvärde skall väljas på samhällsekonomisk grund innebär det dels att avgöra om det alls är samhällsekonomiskt motiverat att sänka riktvärdet jämfört med hur luftkvaliteten styrs i referenssituationen, och dels att jämföra flera olika riktvärden för att komma fram till vilket av dessa som är mest samhällsekonomiskt lönsamt. Det finns ingen analytisk metod som leder till att man med säkerhet hittar det optimala riktvärdet (längs en kontinuerlig skala). I stället handlar det om att enligt principen "trial-and-error" testa ett antal olika tänkbara riktvärden och välja det riktvärde (om något) som i jämförelse med referenssituationen ger det största samhällsekonomiska överskottet.

Referenssituationen kan definieras av att man, till exempel, styr luftkvaliteten enbart med hänsyn till siktkrav¹¹. Om regelverket utformas i linje med rekommendationerna i WSP (2018), innebär det dock att den individuella riskökningen för pendlare sätter en högsta acceptabel gräns för halten under maxtimmen (se avsnitt 5.3, Tabell 10). Det kan då vara naturligt att – istället för ett riktvärde satt med hänsyn till siktkrav - som referenssituation använda den nivå som krävs av hänsyn till den individuella riskökningen.

5.4.2 Faktorer som påverkar avvägningen

Avvägningen mellan marginalkostnad och marginalnytta motsvarar alltså ett unikt riktvärde för varje tunnel. På nyttosidan - hälsovinsten – är de tunnelspecifika egenskaper som påverkar framför allt trafikanternas vistelsetid i tunneln, som i sin tur styrs av tunnelns längd och trafikhastigheten.

På kostnadssidan (ventilationskostnaderna) skulle det kunna handla om ökade driftskostnader för att ventiler kraftigare med samma ventilationssystem som det som planeras för referenssituationen¹², men i andra fall (se analysen i kapitel 4) kan en investering i fler luftutbytesstationer ge lägre marginalkostnader för sänkningen. Lokala omständigheter, till exempel geologi och markvärden, kommer att påverka vilken metod som blir billigast. Därmed kommer slutsatserna när det gäller hur stora marginalkostnader som sänkningen av halten kommer att medföra (jämfört med ventilationskostnaderna i referenssituationen) att variera mellan tunnlar.

Att beräkna "rätt" riktvärde för varje tunnel kräver alltså omfattande utredning av vilka ytterligare ventilationskostnader som krävs för att upprätthålla olika hypotetiska nivåer på riktvärdet. I kommande avsnitt diskuterar vi riktvärden

¹¹ En översiktlig bedömning av siktkrav var utgångspunkt för den referenssituation, 4000 µg NO_x/m³ luft, som valdes för analyserna i WSP (2018).

¹² Den metoden var utgångspunkten i (Brandt och Lucchini, 2016), och därmed underlag till beräkningarna i WSP (2018).

för typtunnlar utifrån en mycket förenklad beskrivning av hur tunnelarnas egenskaper påverkar nytta och kostnader.

Om ett nytt riktvärde innebär att medelhalten i tunneln sänks ger det upphov till *hälsovinster*. Hur stora hälsovinster som uppstår är i princip¹³ proportionellt mot

- Hur mycket haltens trafikantviktade medelvärde sänks på dygnsnivå
- Hur många trafikanter som berörs av sänkningen (årsdygnstrafik, ÅDT)
- Hur länge trafikanterna vistas i tunneln (tiden T, som beror på tunnelns längd L, och trafikens medelhastighet, v)

I WSP (2018) tillämpades risksamband från (Nafstad, o.a., 2004) på befolkningssammansättningen i Stockholms län för att beräkna hälsoeffekterna av de olika riktvärden som utreddes. De slutliga resultaten kan sammanfattas i följande tabell

Tabell 11 Hälsoeffekter av olika haltnivåer i förbifart Stockholm. Källor: tabell 8 i WSP (2018) och Tabell 1 i denna rapport)

Scenarier	Trafikantviktad medelhalt dygn ($\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$)	Sänkning medelhalt jämfört med nollalternativet ($\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$)	Sparade levnadsår per år ($\text{UA}_i - \text{JA}$)	Sparade levnadsår per μg sänkning av dygnsmedelhalten
FS UA1	592	613	557	0,91
FS UA2	900	305	277	0,91
FS UA3	1 134	71	64	0,90
FS Nollalternativ	1 205	0	0	

Av Tabell 11 framgår att hälsovinsten av att sänka riktvärdet är proportionell mot hur stor sänkning av den trafikantviktade dygnsmedelhalten som det föreslagna riktvärdet medför. Detta är en direkt följd av de linjära samband som tillämpas för beräkningarna. (Linjära samband tillämpas ofta i beräkningar av miljömedicinska risker).

De linjära antagandena betyder också att den beräknade hälsoeffekten blir proportionell mot det årliga antalet passager, och likaså proportionell mot den genomsnittliga vistelsetiden i tunneln som varje passage medför.

Om vi jämför effekten av att sänka halten i en godtycklig tunnel med de effekter som beräknats för Förbifart Stockholm kan vi alltså konstatera att hälsoeffekten av att sänka den trafikantviktade dygnsmedelhalten från ett visst referensvärde, kan beräknas som

$$\text{Hälsovinst}_{\text{tunnel } x} = 0,91 * \text{VOLY} * (\text{Halt}_{\text{ref}} - \text{Halt}_{\text{ny}}) * \frac{T_{\text{tunnel } x}}{T_{\text{FS}}} * \frac{\text{ÅDT}_{\text{tunnel } x}}{\text{ÅDT}_{\text{FS}}}$$

I formeln betecknar

¹³ Vi antar att den berörda populationen har samma sammansättning – till exempel åldersfördelning – i alla tunnlar. Vi bortser också från att den bakgrundshalt som trafikanter i olika tunnlar utsätts för i sitt liv i övrigt, skulle kunna variera mellan tunnlar.

VOLY	det samhällsekonomiska värdet av ett sparat levnadsår (se diskussion i WSP (2018))
Halt	den trafikantviktade dygnsmedelhalten i tunneln
Ref	Den referenssituation som riktvärdet utvärderas emot
Ny	den alternativa situation som representerar ett hypotetiskt riktvärde
T	den tid det tar att passera respektive tunnel
ÅDT	årsdygnstrafiken i respektive tunnel
Tunnel X	egenskaperna hos den tunnel vi vill uppskatta hälsovinster i
FS	motsvarande egenskaper i Förbifart Stockholm

Mot dessa hälsovinster skall (ventilations)kostnaderna för att upprätthålla den sänkta halten ställas.

En schabloniserad bild av förväntade kostnader som grundar sig på de ventilationskostnader som beräknats för Förbifart Stockholm, i Brandt och Lucchini (2016), WSP (2018) har tillämpats i avsnitt 4.3.2 i denna rapport, se även bilaga, avsnitt 8.6. Där görs en upp-/ned-räkning av kostnaderna med hänsyn till en specifik tunnels egenskaper

Utifrån detta starkt förenklade samband är de årliga ventilationskostnaderna¹⁴ proportionella mot

- Hur mycket det dimensionerande riktvärdet sänks på dygnsnivå (*procentuellt*)
- Hur många trafikanter som berörs av sänkningen
- Hur lång tunneln är (dvs ungefär proportionellt mot hur länge trafikanterna vistas i tunneln)

Med hjälp av den schabloniserade formel för *ventilationsbehovsfaktorn VBF* som presenteras i bilaga (8.6), och beteckningar motsvarande dem som användes ovan, kan formeln i bilaga 8.6 uttryckas som¹⁵

$$\text{Ventkostnad}_{\text{aktuell}} = \text{Ventkostnad}_{FS} * VBF = \text{Ventkostnad}_{FS} \frac{L \times \text{ÅDT}}{L_{FS} \times \text{ÅDT}_{FS}}$$

5.4.3 Vilket riktvärde kan vara samhällsekonomiskt motiverat i andra tunnlar?

Formlerna i föregående avsnitt visar alltså att samma faktorer styr både kostnader och nyttor, med proportionella samband.

Därmed går det att, med utgångspunkt i de förenklade kostnadssambanden dra en - möjligen något förvånande – slutsats baserat på de tidigare analyserna av Förbifart Stockholm (WSP, 2018).

För Förbifart Stockholm visade analyserna att det samhällsekonomiskt fanns mycket starka skäl att sänka den trafikantviktade dygnsmedelhalten ända ner till 590 µg NO_x/m³. Detta eftersom de samhällsekonomiska kostnaderna för att upprätthålla ventilationen (104 miljoner kronor/år) bara var drygt en tiondel

¹⁴ för att åstadkomma en viss sänkning av halten från en referensnivå

¹⁵ Vi antar här att samma genomsnittliga emissionsfaktorer gäller i den aktuella tunneln, som i Förbifart Stockholm

så stora och långt mindre än de samhällsekonomiska hälsovinster som det skulle medföra att sänka halten (1 006 miljoner kronor /år).

För andra tunnlar kommer samma sänkning att leda till andra hälsovinster och andra ventilationskostnader. Med hjälp av formlerna i föregående avsnitt kan vi dock uppskatta att förhållandet mellan hälsonytta och ventilationskostnader kan förväntas förbli ungefär den samma! Både kostnader och hälsonytta växer proportionellt i samma takt när tunnelns längd och trafikens omfattning förändras. En sänkning av medelhalten som är samhällsekonomiskt motiverad i en högtrafikerad lång tunnel, bör förväntas därför vara samhällsekonomiskt motiverad också i korta tunnlar med liten trafik. Hälsoeffekterna av sänkningen blir mycket större i den långa tunneln – men ventilationskostnaderna ökar i ungefär samma utsträckning!

Analysen i WSP (2018) visade att ett lågt riktvärde (trafikantviktad medelhalt i tunneln under dygnet $592 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$) kunde motiveras utifrån en samhällsekonomisk avvägning mellan ventilationskostnader och hälsovinster i Förbifart Stockholm. När analysen generaliseras, baserat de mycket grova antagandena om sambandet mellan tunnelns egenskaper och ventilationskostnader, tycks det alltså som om lika låga riktvärden kan vara motiverade också för kortare tunnlar med lägre trafikvolym.

Man måste dock komma ihåg att vår modell av "ventilationsbehovsfaktorn" ger en starkt förenklad bild av hur ventilationskostnaderna varierar mellan tunnlar.

5.4.4 Riktvärden för en specifik tunnel – vad behövs?

Eftersom beräkningarna är schablonmässiga skall de utpekade "riktvärdena" ses som illustration av ungefärliga nivåer för samhällsekonomiskt motiverade riktvärden.

När riktvärden skall väljas i ett konkret fall för en specifik tunnel bör olika nivåer för riktvärdet analyseras (avvägning hälsonytta mot ventilationskostnader) utifrån de ventilationsalternativ som är möjliga och de förutsättningar som gäller just för den aktuella tunneln. WSP (2018) presenterar en metodik, och lämpliga kalkylvärden för sådana beräkningar.

Den arbetskrävande delen av analysen handlar då om att utreda alternativ för investering och drift av ventilationsanläggning i tunneln **med flera olika ambitionsnivåer**, och jämföra dessa med avseende på deras samhällsekonomiska lönsamhet. För varje undersökt alternativ behöver investeringskostnader, energianvändning, medelhalten i tunneln under dygnets olika timmar beräknas. Dessa beräkningar genomförs av ventilationsexpertis. De samhällsekonomiska kostnaderna för drift (energianvändning och underhåll), beräknas enligt de principer som fastslås i ASEK. Beräkningarna i WSP (2018) kan tjäna som exempel.

De samlade hälsovinster av ett riktvärde förutsätts öka proportionellt mot hur mycket halten *för en medeltrafikant* sänks i förhållande till referensvärdet ($\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$). Det är därmed naturligt att beräkningarna av vilket riktvärde som skall gälla, utgår från halter uttryckta i form av det *trafikantviktade dygnsmedelvärdet* för halten i tunneln.

När det gäller mätning, styrning och kontroll av halten i tunneln gentemot riktvärdet kan det eventuellt vara svårt att genomföra på dygnsnivå. I så fall kan man istället välja att uttrycka riktvärdet som ett acceptabelt högsta timmedelvärde för halten i hela tunneln (Medelhalt maxtimme). De analyser av Förbifart Stockholm som genomfördes av Brandt och Lucchini (2016) tyder nämligen på att det trafikantviktade dygnsmedelhalten längs tunneln (se Tabell 1) ligger på en stabil nivå (52-56 procent) av den medelhalt som uppmätts för den värsta timmen (medelhalt maxtimme).

5.4.5 Att styra halten när tunneln är i drift

Föregående avsnitt diskuterade den samhällsekonomiska avvägningen mellan ventilationskostnader och hälsovinster med utgångspunkten att riktvärdet definieras som en högsta medelhalt längs tunneln "under maxtimmen" (dvs ett högsta timmedelvärde för medelhalten i tunneln).

Som påpekats ovan kan det finnas anledning att, när det är möjligt, använda ventilationen för att sänka halten även under andra timmar än när trafikillståndet är som värst.

Tabell 12 presenterar värdet av de hälsovinster som genereras om medelhalten i tunnlar (med olika hypotetisk utformning) sänks under en enstaka timme. Som synes kan det vara påtagligt stora hälsovinster, även vid halvering av (medel) halten från relativt låga nivåer.

Om man utanför maxtimmen kan använda befintlig utrustning för att sänka halten i tunneln¹⁶, finns det alltså anledning att göra det så länge de ökade driftskostnaderna (per timme) inte överskrider de hälsovinster som beräknats i Tabell 10.

¹⁶ utan att lufthastigheterna bli oacceptabelt höga, se resonemang i avsnitt 2.1.5

Tabell 12 Det samhällsekonomiska värdet av hälsovinster från att sänka medelhalten i en tunnel under en timme. Tunnlar med olika timflöde (f/h) och restid. Kronor, 2016 års priser. Källa Vidarebearbetning baserad på Tabell 4 och Tabell 8 i WSP (2018)

		Från (medelhalt)	4000	2000	1000	500	250
		Till (medelhalt)	2000	1000	500	250	125
Passagetid (min)	Timflöde (f/h)	Hälso-kostnad, kronor per timme					
3	500	-25 800	-12 900	-6 500	-3 200	-1 600	
5	500	-43 000	-21 500	-10 800	-5 400	-2 700	
10	500	-86 000	-43 000	-21 500	-10 800	-5 400	
15	500	-129 000	-64 500	-32 300	-16 100	-8 100	
3	1000	-51 600	-25 800	-12 900	-6 500	-3 200	
5	1000	-86 000	-43 000	-21 500	-10 800	-5 400	
10	1000	-172 000	-86 000	-43 000	-21 500	-10 800	
15	1000	-258 100	-129 000	-64 500	-32 300	-16 100	
3	1500	-77 400	-38 700	-19 400	-9 700	-4 800	
5	1500	-129 000	-64 500	-32 300	-16 100	-8 100	
10	1500	-258 100	-129 000	-64 500	-32 300	-16 100	
15	1500	-387 100	-193 500	-96 800	-48 400	-24 200	
3	2000	-103 200	-51 600	-25 800	-12 900	-6 500	
5	2000	-172 000	-86 000	-43 000	-21 500	-10 800	
10	2000	-344 100	-172 000	-86 000	-43 000	-21 500	
15	2000	-516 100	-258 100	-129 000	-64 500	-32 300	

6 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Två principer rekommenderades som grund för styrning av luftkvaliteten i vägtunnlar i den tidigare utredningen (WSP, 2018). Den ena är att riktvärdet ska vara så lågt att riskhöjningen inte blir oacceptabelt hög för dagliga pendlare. Den andra är att det riktvärde som följer är samhällsekonomiskt lönsamt. Vid tillämpningen av principerna för Förbifart Stockholm framkom att riktvärdet bör sättas så lågt att det inte fullt ut kan upprätthållas med den installerade ventilationsutrustningen. De fördjupade utredningar som genomförts inom ramen för denna rapport har inte gett anledning att ompröva de grundläggande principerna för hur ett riktvärde bör sättas.

Den tidigare utredningen förbisåg de ytterligare risker som kan uppkomma när ventilationen körs på hög kapacitet. När ventilationen körs för fullt ökar lufthastigheten i tunneln. Detta påverkar risken vid brand. Ökad lufthastighet ger en snabbare och högre effektutveckling vid brand, snabbare spridning av brandgaser och ökad risk för brandspridning mellan fordon. Det kan också leda till en högre risk för explosion. Svårigheten att detektera brand ökar med lufthastigheten på grund av en större utspädningseffekt. Detta innebär i sin tur att risken ökar för att bränder kan växa sig stora innan åtgärder kan vidtas. Vid högre ventilationshastighet minskar framför allt tid till kritiska förhållanden. Det vill säga utrymning under förhållanden då det råder hot om att trafikanter omkommer.

En ökad lufthastighet minskar haltnivåerna i tunneln, vilket sparar liv genom färre förtida dödsfall. Samtidigt ökar således risken vid brand. Det går dock inte att med dagens kunskap kvantifiera hur mycket risken ökar och ställa det mot hälsoeffekterna av lägre haltnivåer. För att kvantifiera riskökningen skulle empiri behövas från stora brandförsök. Det är underlag som saknas idag.

Genomgången av konsekvenser för internationellt samarbete ger vid handen att ett strängt riktvärde i Sverige inte ger några konsekvenser för internationellt samarbete. Skillnader i andra krav och regler inom transportområdet har inte haft sådana konsekvenser och efter diskussion med Kommerskollegium är slutsatsen att ett riktvärde för luftkvalitet i vägtunnlar inte är ett handelshinder. Detta baseras på att ett riktvärde inte är anmälningspliktigt till EU enligt anmälningsdirektivet för tekniska regler.

Analysen har gjorts av alternativa sätt att nå riktvärdet genom annan utformning av ventilationssystemet: fler luftutbytesstationer, ökat antal impulsfläktar och större tunnelarea. Av de studerade alternativen för att sänka koncentrationen av kväveoxider (NO_x) kan samtliga alternativ, utom fler impulsfläktar, hypotetiskt halvera haltnivåerna. Fler impulsfläktar ger dock ökade lufthastigheter. Det kan sannolikt finnas en kombination av ventilationslösningar som kan vara användbara.

En viktig aspekt i valet av tunnelventilation för luftkvalitet är att integrera den med ventilation för brand. Införande av fler luftutbytesstationer ger både en stor sänkning i luftföroreningar, men är även gynnsamt brandtekniskt

eftersom tätare brandgasavskiljningar kan utföras. En ökning av lufthastigheten är, dels ineffektiv med avseende på fläktinstallationens verkningsgrad, dels att brandförlopp förvärras och utrymning kan försvåras av en hög lufthastighet.

De riktvärden för tunnelluft som diskuteras förhindrar många förtida dödsfall. Exempelvis kan en sänkning av maxhalten från 2 000 µg/m³ NO_x till 1 000 µg/m³ i Förbifart Stockholm spara 13 liv under ett år. Riktvärdena kommer dock också att öka kostnaden för att bygga tunnlar och kostnaderna för tunneldrift. Fallstudierna som genomförts visar att den extra investeringskostnaden för den ökade ventilationen som krävs för att förbättra tunnelluften är liten i förhållande till den ursprungliga investeringen för tunnarna: 2,4 procent för Förbifart Stockholm, 1,5 procent för Södra respektive Norra Länken och 0,7 procent för Tvärförbindelse Södertörn. Eftersom litteraturen pekar på att den samhällsekonomiska lönsamheten inte har stor påverkan på om ett objekt byggs är det sannolikt att de ökade ventilationskostnaderna inte har någon större påverkan på byggandet av tunnlar i framtiden.

Under driftsskedet är däremot kostnaden stor i förhållande till budgetarna för drift och underhåll. Här finns behov att se till att budgetarna ökar, vilket det inte alltid finns politisk acceptans för.

I rapporten görs en fördjupad analys av hur tunnelns egenskaper kan påverka vilket riktvärde som sätts för halten. Utgångspunkten i dessa analyser är att riktvärdet formuleras som ett högsta timmedelvärde för medelhalten längs tunneln. Anledningen till analysen är observationen att många tunnelspecifika egenskaper påverkar de kostnader och nyttor som ingick i de tidigare beräkningarna av lämpliga riktvärden för Förbifart Stockholm. Det fanns därmed anledning att förvänta sig att olika nivåer på riktvärdet skulle kunna anses relevanta, för olika typer av tunnlar.

När det gäller en betraktelse ur ett individuellt riskperspektiv, bör riktvärdet sättas omvänt proportionellt mot tunnelns längd. På så sätt kommer den "dos" luftföroreningar som frekventa användare utsätts för att vara densamma i olika tunnlar, vilket i sin tur innebär samma tak för den individuella riskökningen i alla tunnlar. Analyserna indikerar att det bara är för långa tunnlar (restid minst 5 minuter) som ett tak för den individuella riskökningen kommer att spela någon praktisk roll för hur tunnelventilationen styrs. För kortare tunnlar motsvarar taket så höga halter att ventilation kommer att krävas av andra skäl (till exempel sikt). Det kan vara värt att notera att resonemanget kring riktvärden baserade på "individuell riskökning", hittills utgått från att risken skall harmoniseras mellan pendlare som passerar en tunnel i var riktning på resan. Naturligtvis kommer risken att öka mer för pendlare som passerar flera tunnlar med bristande luftkvalitet. I vissa områden med många tunnlar kan det därför vara lämpligt att överväga om inte också den sammanlagda riskökningen till följd av alla tunnelpassager längs en (någorlunda vanligt förekommande) rutt skall begränsas. Riktvärdet behöver då sättas lägre för var och en av de enskilda tunnlar som ingår i rutten, än vad som hade varit motiverat med utgångspunkt i den enskilda tunneln.

När det gäller vilka riktvärden som kan motiveras utifrån ett samhällsekonomiskt perspektiv (hälsovinster större än ventilationskostnader)

kommer svaret att bero på de specifika ventilationskostnader som krävs för en enskild tunnel. I en fördjupad analys, som dock är baserad på mycket översiktliga samband, ger analysen en något överraskande indikation. Tidigare studier har konstaterat att ett mycket lågt riktvärde kan motiveras på samhällsekonomiska grunder för Förbifart Stockholm. Men man har samtidigt konstaterat att Förbifart Stockholm är en extremt lång tunnel, som är mycket hårt trafikerad. Ett lågt riktvärde ger därmed mycket stora hälsovinster. Antagandet har varit att lika låga riktvärden inte kommer att kunna motiveras för kortare, och mindre trafikerade tunnlar där hälsovinster blir betydligt mindre.

Inom ramen för uppdraget har ett (starkt förenklat) effektsamband tagits fram för hur ventilationskostnaderna beror av riktvärdet, och tunnelns egenskaper. Med detta som grund konstateras att en sänkning av medelhalten som nått och jämnt är samhällsekonomiskt motiverad i en högtrafikerad lång tunnel, kan vara samhällsekonomiskt motiverad också i korta tunnlar med liten trafik. Hälsoeffekterna av sänkningen blir mycket större i den långa tunneln – men ventilationskostnaderna ökar i ungefär samma utsträckning!

Man måste dock komma ihåg att effektsambanden ger en starkt förenklad bild av hur ventilationskostnaderna varierar mellan tunnlar. När riktvärden skall väljas i ett konkret fall för en specifik tunnel bör olika nivåer för riktvärdet analyseras (avvägning hälsnytta mot ventilationskostnader) utifrån de ventilationsalternativ som är möjliga och de förutsättningar som gäller just för den tunneln. För varje undersökt alternativ behöver investeringskostnader, energianvändning, medelhalten i tunneln under dygnets olika timmar beräknas. Dessa beräkningar genomförs av ventilationsexpertis. De samhällsekonomiska kostnaderna för drift (energianvändning och underhåll), beräknas enligt de principer som fastslås i ASEK. Beräkningarna i WSP (2018) kan tjäna som exempel.

Under arbetets gång har diskussioner förts om andra konsekvenser som kan behöva utredas. Eftersom införande av ett nationellt riktvärde är förknippat med ökade kostnader för investeringar i ventilationssystem och för drift av dessa kan det vara intressant att ställa kostnaderna mot den aggregerade hälsoeffekten. Detta även om det nationella riktvärdet främst är tänkt att tillämpas för nya tunnlar. Trafikverket håller på att samla in haltsiffror för alla Sverige tunnlar. Data beräknas vara framme i november 2019 och kan med fördel vara underlag för fördjupade analyser av hälsovinster av ett riktvärde.

Det kan finnas skäl till att överväga en fördjupad studie av sambanden mellan ventilationskostnader och egenskaper hos enskilda tunnlar. Detta för att bygga upp kunskap och på ett bättre sätt precisera hur olika egenskaper hos tunneln påverkar "ventilationsbehovsfaktorn". I föreliggande utredning baseras ventilationsbehovsfaktorn på mycket förenklade antaganden.

Det har konstaterats att investeringskostnaderna inte ökar nämnvärt av ett riktvärde. Däremot innebär de ökade kostnaderna under driftsskedet svårigheter att finansiera driften inom ramen för befintliga budgetar. För att få en större förståelse för sambandet mellan ett ökat antal tunnlar och stigande kostnader under driftsskedet finns behov av fördjupade studier.

Analyserna av alternativa sätt att nå riktvärdet har avgränsats till hur haltnivån kan reduceras genom utformning av ventilationssystemet och tunnelarea. Fördjupade studier av andra sätt att minska haltnivåerna i tunneln genom till exempel trafikstyrning kan vara av intresse för framtida studier. Detta särskilt mot bakgrund av att trafikstyrning i områden med frekventa köer har andra nyttor än enbart de som tillfaller tunnelresenärerna. Genom att undvika köer i tunnel kan dessutom brandsäkerheten i tunneln förbättras.

7 LITTERATURFÖRTECKNING

- Advisory committee on tunnel air quality. (2016). *In-tunnel air quality (nitrogen dioxide) policy*. Government of New South Wales, Australia.
- Asplund, Ö. &. (1996). *Objektsanalys för Södra Länken. Utredning utförd på uppdrag av Finanskontoret*. Stockholm stad.
- Besab.se. (den 25 02 2019). Hämtat från <https://www.besab.se/tornskogstunneln-en-ovanligt-tat-tunnel/>
- Brandt, R., & Lucchini, S. (den 22 08 2016). *E4 Förbifart Stockholm. FSK09 Installationer. FSE903: Tunnelventilation, Forskningsprojekt tunnelluft*. Trafikverket.
- C-205/98. (2000). *EU-domstolens dom av den 26 september 2000 i mål C-205/98, Europeiska gemenskapernas kommission mot republiken Österrike, EU:C:2000:493*.
- C-320/03. (2005). *EU-domstolens dom av den 15 november 2005 i mål C-320/03, Europeiska gemenskapernas kommission mot Republiken Österrike, EU:C:2005:684*.
- Carvel R.O., e. a. (2004). *The influence of tunnel geometry and ventilation on the heat release rate*. Edinburgh: School of the Built Environment.
- Eliasson, J., & Lundberg, M. (2012). Do Cost–Benefit Analyses Influence Transport Investment Decisions? Experiences from the Swedish Transport Investment Plan 2010–21. *Transport Reviews* .
- Eliasson, J., Börjesson, M., Odeck, J., & Welde, M. (2015). Does Benefit–Cost Efficiency Influence Transport Investment Decisions? *Journal of Transport Economics and Policy*.
- Eneroth, K. (2018). *Luftkvalitetsutredning för Uppsalavägen och Sveavägen i östra Hagastaden*. Östra Sveriges Luftvårdsförbund.
- Engström Nylén, A. (2018). *Luftkvalitetsutredning för Masmotunnelns västra mynning. Spridningsberäkningar för halter av partiklar (PM10) och kvävedioxid (NO2) år 2035. SLB-analys, LVF 2018:16*.
- Fläktwoods Tunnelventilation. (u.d.). *Produktkatalog*.
- Haukur Ingason, Y. Z. (2015). *Tunnel Fire Dynamics*. New York: Springer Science+Business Media.
- Ingason H., L. Y. (2010). *Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation*. Fire Safety journal.
- Ingason H., L. Y. (2011). *Model scale tunnel fire tests with point extraction ventilation*. . Journal of Fire Protection Engineering .
- Ingason, H. (2005). *The Handbook of Tunnel Fire Safety*. ISBN 0 7277 3168 8.

- Karlsson, Q. (2000). *Enclosure fire dynamics*. New York: CRC Press LLC.
- Lai, S. C. (2016). Use of Air Purification System in Central-Wan Chai Bypass and Island Easter Corridor Link (CWB) in Hong Kong. WSP Parsons Brinckerhoff. Highways Department (HKSAR).
- Löfgren, B. (den 08 03 2019). Kalkylberäkning luftutbytesstation och utökad tunnelsektion. Excelfiler "Luftutb", "Transve". Kalkyl och produktionsplanering. WSP Sverige AB.
- Lönnermark A, I. H. (2008). *The Effect of Air Velocity on Heat Release Rate and Fire Development during Fires in Tunnels*. In: Karlsruhe: 9th International Symposium on Fire Safety Science.
- Lönnermark, A., & Haukur, I. (2008). *The Effect of Air Velocity on Heat Release Rate and Fire Development during Fires in Tunnels*. Borås: SP Technical Research Institute of Sweden.
- Markstedt, A. (den 17 04 2019). Konsult WSP. (M. A. Noring, Intervjuare)
- Mok, C. X. (den No 77 February 2014). Wastewater Reduction in Road Tunnel Air Purification Systems. *Challenge Network, WSP Parsons Brinckerhoff*.
- Nafstad, P., Håheim, L. L., Wisloff, T., Gram, F., Oftedal, B., Holme, I., . . . Leren, P. (2004). Urban air pollution and mortality in a cohort of Norwegian men. . *Environmental Health Perspect*, 610-615.
- Penwarden, A. D. (1973). *Acceptable wind speed in towns*.
- PIARC. (2012). *Road Tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation. 2012R05EN*. PIARC-World Road Tunnel Association.
- SCB. (den 04 04 2019). Hämtat från <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/priser-och-konsumtion/konsumentprisindex/konsumentprisindex-kpi/pong/tabell-och-diagram/konsumentprisindex-kpi/kpi-faststallda-tal-1980100/>
- SFS 1998:1276. (1998). *Trafikförordning*. Infrastrukturdepartementet RST TM.
- SLB. (2010). *Tunnelluftmätningar - underlag FUD-projekt*. Vägverket.
- Statistiska centralbyrån. (den 22 03 2019). *Konsumentprisindex (1980=100), fastställda tal*. Hämtat från scb.se: <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/priser-och-konsumtion/konsumentprisindex/konsumentprisindex-kpi/pong/tabell-och-diagram/konsumentprisindex-kpi/kpi-faststallda-tal-1980100/>
- Trafikverket. (2011). *TRVK Tunnel 11. Trafikverkets tekniska krav Tunnel. TRV publ. nr. 2011:087. November 2011*. . Trafikverket.
- Trafikverket. (2013). *Förbifart Stockholm, VST_001*.
- Trafikverket. (2013). *Marieforsstunneln, inklusive anslutningar. VVA119*.
- Trafikverket. (2016). *E4/Lv259 Tvärförbindelse Södertörn, VST005*.
- Trafikverket. (2017). *E4/E20 Essingeleden - Södra länken Samrådshandling*. Trafikverket. Hämtat från

- https://www.trafikverket.se/contentassets/8c445cec884947d1bcf4fc82556c1cfe/samrad-april-2017/e4e20_essingeleden_sodra_lanken_samradshandling_pm_trafik_och_vagutformning.pdf den 12 04 2019
- Trafikverket. (den 01 04 2018). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1*. Hämtat från https://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/asek-6.1/05_generella_principer_o_varden_a61.pdf den 04 04 2019
- Trafikverket. (den 18 04 2019). Hämtat från Trafikverket.se: <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/projekt-i-stockholms-lan/Forbifart-stockholm/Tunnlar/>
- Trafikverket. (den 18 04 2019). *Startsida/Nära dig/Stockholm/Projekt i länet/Tvärförbindelse Södertörn/Nyheter/Gång- och cykelvägen planeras om*. Hämtat från trafikverket.se: <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/projekt-i-stockholms-lan/Tvarforbindelse-Sodertorn/Nyheter/2019/gang--och-cykelvagen-planeras-om/>
- Trafikverket. (u.d.). *Norra länken*.
- Trafikverket. (November 2011). *TRVK Tunnel 11. Trafikverkets tekniska krav Tunnel. TRV publ nr 2011:087*. Trafikverket.
- Transportstyrelsen. (2015). *TSFS 2015:27. Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd m säkerhet i vägtunnlar mm. 16 §*. Transportstyrelsen.
- Transportstyrelsen. (2018). *Konsekvensutredning av ändring i Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd (TSFS 2009:19) om användning av däck m.m. med anledning av att regeringen inför utökade krav på vinterdäck för tunga fordon*. TSF 2018-20.
- Wikipedia.se. (den 25 02 2019). *Lista över vägtunnlar i Sverige*. Hämtat från https://sv.wikipedia.org/wiki/Lista_%C3%B6ver_v%C3%A4gtunnlar_i_Sverige
- WSP. (2018). *Luftkvalitet i vägtunnlar. Konsekvensutredning och förslag till nationellt riktvärde*.
- Vägverket. (2003). *Vägutredning för Väg 45 Marieholm-Lärje-Agnesberg med ny vägförbindelse över Göta älv. Beslutshandling. Obj nr 423612*.
- Vägverket. (2005). *Miljökonsekvensbeskrivning Vägutredning Nord-sydliga förbindelser i Stockholmsområdet*. Vägverket. Hämtat från https://www.trafikverket.se/contentassets/dd8bf86caa2b4adfa5c03f08649af778/vagutredning/mkb_kap1-5_forbifart_stockholm.pdf
- Vägverket. (2005). *Miljökonsekvensbeskrivning Nord-sydliga förbindelser i stockholmsområdet, Vägutredning. Objektsnummer 48590*.
- Vägverket. (2006). *Kommunikationsarbetet i byggprojektet Södra Länken - Slutrapport*.
- Vägverket. (2009). *Samlad effektbedömning - E20 Norra länken*.

Ying, Z. L. (2018). Overview of tunnel fire research.

(Trafikverket, Förbifart Stockholm, VST_001, 2013) (Trafikverket, E4/Lv259 Tvärförbindelse Södertörn, VST005, 2016) (Vägverket, Miljökonsekvensbeskrivning Nord-sydliga förbindelser i stockholmsområdet, Vägutredning. Objektsnummer 48590, 2005) (Vägverket, Vägutredning för Väg 45 Marieholm-Lärje-Agnesberg med ny vägförbindelse över Göta älv. Beslutshandling. Obj nr 423612, 2003)

8 BILAGA - TUNNELVENTILATION

8.1 GENERELLA FÖRUTSÄTTNINGAR

Livslängden för installationer av fläktar och elkraft har antagits vara 25 år.

Årlig underhållskostnad bedöms till 5% av investeringen.

Livslängden för utrymmen för tunnelventilation antas lika lång som livslängden för tunneln.

8.2 ÖKAT ANTAL LUFTUTBYTESSTATIONER - ANTAGANDEN

Följande byggrelaterade aspekter finns (Löfgren, 2019):

- För varje luftutbytesstation krävs två stora schakt till markytan med en diameter på cirka 50 m² per styck. Teknik för att skapa schakt till markytan är helt beroende av mark och bergegenskaper. I kalkylen antas goda mark- och bergegenskaper som tillåter effektivt schaktarbete med s k Raise-borring.
- Mark för avluftstorn och byggnad för luftintag behöver en yta på några hundra kvadratmeter och mark måste anskaffas.
- I känslig eller tätbebyggd miljö kan problem uppstå att hitta lämpliga placeringar för schakt och tillhörande byggnader.
- Ökat antal stationer innebär mer sprängning vilket kan vara begränsat av miljöregler p g a vibrationer och störningar.
- Produktionstiden för tunneln behöver inte påverkas av fler luftutbytesstationer, då dessa kan byggas parallellt med tunnelbyggandet

8.3 STÖRRE TUNNELTVÄRSNITT - ANTAGANDEN

Med ett ökat tunneltvärsnitt kan volymflödet ökas med en oförändrad lufthastighet och därmed öka utspädningen av föroreningar.

Kostnad för elkraftanläggning för utökat antal impulsfläktar och tillhörande teknikrum med VVS och styrfunktioner har inte inkluderats (omfattande analys krävs). Dessutom behöver luftutbytesstationernas kapacitet ökas och anpassas till luftflödet i tunneln vilket inte ingår i kostnadsuppskattningen.

Följande bygg- och ventilationstekniska aspekter finns:

- Ökat tunneltvärsnitt innebär en ökad byggtid. I stora drag innebär ett dubbelt så stort tunneltvärsnitt en dubblerad byggtid.
- Ökat tunneltvärsnitt innebär ökad mängd sprängning, för vilket det kan finnas miljömässiga begränsningar p g a vibrationer och störningar.
- Om tunnelsektionen görs större genom att göra sektionen högre behöver impulsfläktarna (på grund av åtkomst för installation och service) monteras på bryggor ungefär på samma nivå över vägbanan som idag.

Med avseende på brandsäkerhet kan en ökad tunnelsektion, genom ökad höjd hos tunnelsektionen, innebära säkrare utrymning eftersom brandgaserna kommer högre upp från utrymmande personer.

8.4 ÖKAD LUFTHASTIGHET MED FLER IMPULSFLÄKTAR - ANTAGANDEN

I referenstunneln Förbifart Stockholm är den högsta lufthastigheten i tunneln 8 m/s vid flytande trafik och längmedelvärdet när all ventilation är i drift cirka $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Brandt & Lucchini, 2016). I vissa tunnelavsnitt når hastigheten 10 m/s vilket är högsta rekommenderade lufthastighet enligt Trafikverkets kravspecifikation för vägtunnlar (Trafikverket, November 2011).

På tunnelavsnitten där lufthastigheten når 8 m/s kan lufthastigheten ökas endast 25% till 10 m/s vilket ger motsvarande sänkning i koncentrationer, det vill säga från 1 000 till $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$ med all ventilation i drift. En sänkning med 50% eller mer är inte möjlig att göra i det här fallet. I övrigt har tunneln ingen marginal att öka lufthastigheten för att sänka koncentrationerna eftersom maximal lufthastighet redan nås i vissa avsnitt.

Observera att i ventilationsberäkningar för Förbifart Stockholm (Brandt & Lucchini, 2016) antas kö uppstå endast i ett 2 km långt avsnitt i början av norrgående tunnel samt en anslutande ramp under rusningstrafik. I övrigt baseras beräkningar och ventilation på att kö ej uppstår. Kö ger annars högre emissioner än flytande trafik och därmed ett större ventilationsbehov. Dessa beräkningar baseras på utbyggd ventilation om trafiken alltid flyter.

Bland de negativa faktorerna med att sänka koncentrationerna i tunneln med ökad lufthastighet är:

- Ökad lufthastighet kan innebära ökad risk för stora och omfattande brandscenarier (se kapitel 2.2).
- Impulsfläktarnas verkningsgrad avtar med tunnelluftens hastighet. Ju högre lufthastighet de arbetar i desto sämre verkningsgrad får de, vilket betyder att behovet av antal fläktar ökar progressivt med ökad lufthastighet i tunneln.
- Om lufthastigheten i tunneln från början är relativt hög är marginalen mindre att sänka koncentrationerna eftersom det finns en rekommenderad högsta lufthastighet på 10 m/s.

8.5 PARTIKELRENINGSTATIONER

En alternativ metod till tunnelventilation för att uppnå en viss luftkvalitet, eller som ett komplement, är luftrening med så kallat Air Purification Systems (APS).

Anläggningen kommer att behöva samma luftflödeskapacitet som en luftutbytesstation för att kunna vara jämförbart, samt finnas i samma antal som luftutbytesstationer.

Med by-passlösning (se avsnitt nedan) kan schakt till markytan och problematik med markanspråk elimineras.

I stället för alla fläktar för frånluft och tilluft i en luftutbytesstation behövs hälften av fläktarna för att skapa by-pass genom anläggningen. Friställt utrymme tas istället i anspråk av elektrostatfilter för partikelrening.

Vinsten med halvering av antalet fläktar går åt till ökad investering av kraftigare fläktar som behövs (ökat tryckfall i filter) och större energianvändning p g a de kraftigare fläktarna. Elenergi till elektrostatfilter tillkommer också (uppgifter efterfrågade vid tidpunkten för denna rapport).

Dessutom tillkommer utrymme för vattenreningsanläggning (bassänger) och hantering av partikelavfall. Den ökade kostnaden för den bedömda volymökningen i berget för vattenrening och partikelhantering tas till viss del hem av eliminerade bergschakt till markytan.

Till driftkostnad tillkommer även för hantering och bortförel av bortfiltrerade partikelföroreningar som sedimenterats i bassänger.

Om luftreningssystem finns måste fortfarande tunnelventilation för brandgaskontroll finnas. Bland annat kan tunneln fortfarande behöva sektioneras på vissa platser med fläktstationer och schakt till markytan.

Sammantaget bedöms luftreningsstationer med by-passlösning bli dyrare i investering än luftutbytesstationer samt att drift- och underhållskostnader blir dyrare. Kostnader jämfört mot luftutbytesstationer presenteras i Tabell 13.

Tabell 13. Jämförelser av kostnader mot luftutbytesstationer.

Partikelreningsstationer	Jämförelse mot luftutbytesstationer
Antal	Samma
Luftflödeskapacitet	Samma
Sänkning av NO _x	Samma eller något sämre
Markanspråk	Tar ej mark i anspråk
Användbar för brandgas-evakuering	Kan ej användas
Eleffektbehov	Högre
Investeringskostnad	
Byggkostnad	Något högre
Fläktar, filter, renings- och sedimenteringsanläggning	Högre
Summa	Högre
Drift- och underhållskostnad	
Underhållskostnad	Högre
Energikostnad	Högre
Summa	Högre

Beskrivning av teknik

Luftrening kan göras med avseende på partiklar och kvävedioxid. Antingen förs renad luft tillbaka till tunneln (by-pass) eller så blåses den ut genom schakt och ut i atmosfären genom avluftstorn. I detta fallet avses by-pass teknik för att eliminera schakt till markytan.

Nedan presenteras partikelrening och by-pass-lösning (Lai, 2016).

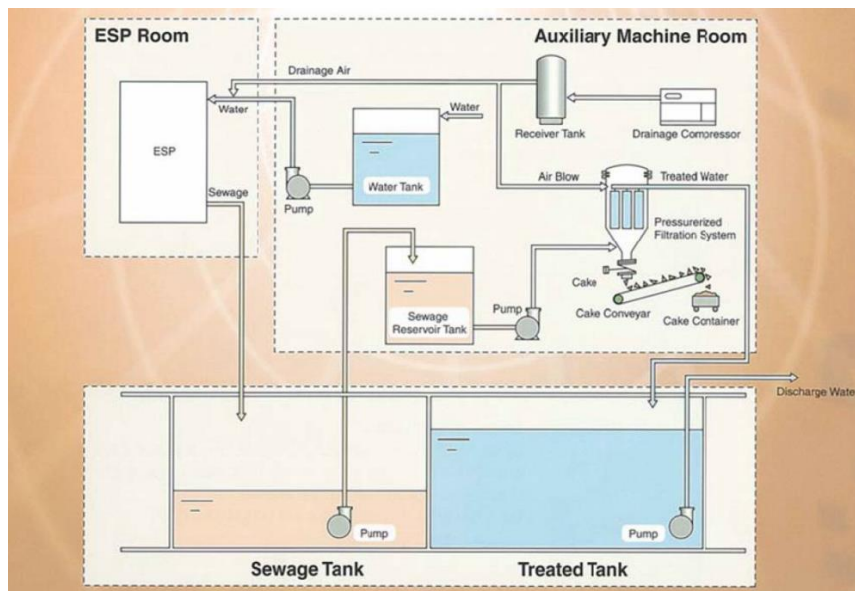
Det finns cirka 70 anläggningar i världen varav de flesta (cirka 50 st) i Japan. Norge är närmaste landet med relativt många (8 st). Drifterfarenheterna med avseende på effektivitet har varit varierande. Filteranläggningar har bland annat nyligen installerats i Hong Kong (Central-Wan Chai Bypass and Island Eastern Corridor Link) och ska inom kort utvärderas.

Partikelrening utförs med elektrostatfilter (electrostatic precipitators, ESP) och filtrerar bort partiklar med en effektivitet på cirka 80-90 % för partikelstorlek ungefär PM_{0,25} – PM₁₀. Se Figur 16. För att filtrera motsvarande flöde som i Förbifart Stockholm (600 m³/s per luftutbytesstation) krävs en sektion vinkelrät mot luftströmmen på cirka 120 m² vilket är ungefär samma storlek som utrymmen i luftutbytesstationerna i Förbifart Stockholm.



Figur 16. Elektrostatfilter för partikelrening (Lai, 2016).

För att rena filtren sprejas de regelbundet med vatten. Stora vattenmängder åtgår och en särskild reningsanläggning krävs för att återanvända och minimera behovet av nytt vatten (Mok, 2014). För en luftreningskapacitet på cirka 600 m³/s är vattenbehovet cirka 30 – 40 m³/månad. Partiklarna sedimenterar i bassäng som sedan pumpas upp, torkas till "kakor" och transporteras till container för bortforsling. Se Figur 17.



Figur 17. Anläggning för partikelrening med elektrostatfilter (ESP), fläktar (syns ej i figuren) och anläggning för vattenrening och bortförel av partikelmassa (Mok, 2014).

8.6 VENTILATIONSBEHOVSFAKTOR

Alla tunnlar har sina specifika egenskaper i form av utformning, ventilation, trafikflöden mm. För att kunna göra någon form av övergripande jämförelse utan lägga ner ett stort tidsödande arbete med att i detalj studera respektive tunnel har en beräkning av en skalningsfaktor, ventilationsbehovsfaktor "VBF", tagits fram.

Skalningsfaktorn är ett sätt att visa vilket behov en tunnel har av luftutbyte. Luftutbytet kan ske antingen genom ventilation med fläktar eller med kolvverkan och luft genom ramptunnlar, eller en kombination av dessa. Avgörande faktorer är tunnelns längd och trafikmängd. Även trenden hur emissionsfaktorerna för en bestämd fordonsflotta har ändrats mellan (den äldre) tunneln som studeras jämfört mot Förbifart Stockholm kan anges.

Formeln avser ventilationsbehovet i aktuell tunnel vid en halvering av halten i tunneln. Formeln ska tillämpas för att skala kostnader i Förbifart Stockholm baserat på en halvering av halterna i Förbifart Stockholm från 1000 till 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Äldre tunnlar utgår oftast från maxvärde av halt medan medelhalt tillämpas här. Olika slags värde har dock ingen betydelse då en halvering av maxhalten innebär approximativt en halvering av medelhalten.

Ventilationsbehovsfaktorn beskrivs enligt följande formel:

$$VBF = \frac{L \times \dot{A}DT}{L_{FS} \times \dot{A}DT_{FS}} \times \frac{EF_{FS}}{EF}$$

Den första kvoten i formeln beskriver förhållandet i utsläppsmängd av emissioner mellan aktuell tunnel och referenstunnel Förbifart Stockholm. Ju längre tunnel (L) och desto större trafikflöde ($\dot{A}DT$) desto större är emissionsmängden och behovet av ventilation.

L: Längd aktuell huvudtunnel båda riktningar [km]

L_{FS} : Längd Förbifart Stockholm huvudtunnel båda riktningar, 34 km (Brandt & Lucchini, 2016).

$\dot{A}DT$: årsmedeldygnstrafik i båda riktningar som tunnel är dimensionerad för [fordon/h]

$\dot{A}DT_{FS}$: årsmedeldygnstrafik för Förbifart Stockholm: 120 000 (Trafikverket, Förbifart Stockholm, VST_001, 2013)

Exempel: För en tunnel som är hälften så lång (17 km) och har hälften så stort trafikflöde (60 000 fordon/dygn) som Förbifart Stockholm blir kvoten 1/4, vilket är aktuell tunnels ventilationsbehovet jämfört mot Förbifart Stockholm:

$$\frac{L \times \dot{A}DT}{L_{FS} \times \dot{A}DT_{FS}} = \frac{17 \times 60\,000}{34 \times 120\,000} = \frac{1}{4}$$

Den andra kvoten i formeln ska justera ventilationsbehovet utifrån den förändring i fordonsemissioner som skett mellan åren för aktuell tunnel och referenstunnel Förbifart Stockholm. Faktorn EF_{FS} (Förbifart Stockholm) respektive EF (aktuell tunnel) är en viktad emissionsfaktor för NO_x baserat på samma fordonsflotta (personbilar, lätta och tunga lastbilar) och fördelning av olika bränsletyper (bensin, diesel, gas, el etc) i tunnlarna. Även relationen mellan NO_x och PM_{avgas} kan ingå i den viktad emissionsfaktorn.

Kvoten mellan EF_{FS} och EF och har inte kunnat beräknas inom detta uppdrags omfattning utan har satts lika med ett (1). Den bedöms kunna ha ett värde ner mot cirka 0,5 beräknat på en äldre tunnel liknande Norra Länken eller Södra länken (påverkan från relation NO_x och PM_{avgas} ej inräknat), vilket skulle innebära att emissionsfaktorerna har halverats räknat från tiden då dessa tunnlar dimensionerades till tidpunkten för Förbifart Stockholms dimensionering.

Angreppssättet med ventilationsbehovsfaktorn förutsätter en rad olika antaganden av hypotetisk karaktär:

- Ventilationsbehovsfaktorn tar ej hänsyn till "naturlig" ventilation med kolvverkan och luftväxling, utan ventilation sker enbart mekaniskt med fläktar.
- Tunneln har liknande geometri, dvs lutning, delsträckor, tunnelsektioner, som Förbifart Stockholm. Tunneln har till exempel samma emissionsökande uppförsbackar som Förbifart Stockholm.
- Tunneln har samma trafiksammansättning som Förbifart Stockholm (andel av personbilar, lätta och tunga lastbilar samt samma fördelning av fordonstyper).
- Tunneln har samma förhållande mellan maxtimestrafik och dygnsmedeltrafik som Förbifart Stockholm.
- Tunneln har samma trafiksituation som Förbifart Stockholm (flytande trafik i huvudtunnel).

Dessa antaganden medför en rad förenklingar och det kan antas att värdena för andra tunnlar skiljer sig åt utifrån följande resonemang.

Det kan antas att Förbifart Stockholm är djupare än andra tunnlar och har därmed fler uppförsbackar vilket ökar utsläppen. Förbifart Stockholm

karaktäriseras också av långa tunnelavsnitt utan ramper som kan tillföra friskluft. Detta skulle kunna överskatta behovet av ventilation i andra tunnlar.

Antagandet om samma emissionsfaktorer för fordonen kan skilja sig mycket mellan olika prognosår. Europastandard för NO_x-utsläpp hos nytillverkade bilar har halverats mellan 2000 (EURO 3) och 2014 (EURO 6).

Förändringen från 2010 till 2030 bedöms till sänkning av NO_x-emissioner till en faktor 1/5 för bensinbilar och 1/3 för dieslbilar (PIARC, 2012).

Förarbetena för olika tunnlar har skett vid skilda tidpunkter och för en äldre prognostiserad fordonspark. Detta innebär att befintlig ventilation i äldre tunnlar än Förbifart Stockholm kan bli överdimensionerad med nya emissionsfaktorer för en ny fordonspark och att en utökning av ventilationen inte behöver bli lika omfattande.

Sammansättningen av fordon och bränsletyper i äldre tunnlar kan skilja sig mot det som tillämpats i projektering av Förbifart Stockholm. Till exempel kan andelen personbilar med dieselbränsle ökat jämfört mot bensinbilar i nyare tunnlar vilket innebär ökade emissioner av NO_x. Denna ökning balanserar delvis mot överlag sänkta emissioner av NO_x.

Även dygnsmedeltrafikflödet och skyltad hastighet skiljer sig mellan olika tunnlar.

Sammantaget överskattas troligen kostnaderna för andra tunnlar.

9 BILAGA BERÄKNINGSHANDLEDNING

Denna handledning bygger på de rekommendationer och slutsatser som formulerats i tidigare utredningsarbete i frågan. En mer fullständig dokumentation av de underlag, antaganden och överväganden som lett fram till dessa rekommendationer återfinns i WSP (2018) och WSP (2019).

Ett flertal olika luftföroreningar spelar var för sig roll för hälsokonsekvenserna av bristande luftkvalitet. Osäkerheten kring vart och ett av dessa samband är mycket stor. Det föreslagna regelverket är utformat så att riktvärden sätts för halten kväveoxider (NO_x). Halten kväveoxider är här att betrakta som en samlad indikator för bristande luftkvalitet, se diskussion i WSP (2018).

En avgörande förutsättning för vilka halter av luftföroreningar som skall anses acceptabla, är hur stora de negativa hälsokonsekvenserna blir. De riktvärden som rekommenderas enligt denna beräkningshandledning baseras på de effektsamband från Nafstad m.fl. (2004) som utgjorde grundkällan till beräkningarna i WSP (2018).

Dessa utgångspunkter innebär att regleringen implicit antar att olika luftföroreningskomponenter förekommer i de proportioner som kan förväntas i tunnelluft med hänsyn till utsläppsegenskaperna i dagens fordonsflotta.

Det finns därför anledning att ompröva dessa riktvärden

- om ny kunskap tillkommer som nyanserar bilden av hälsosambanden
- när fordonsflottan ändras så att proportionen mellan olika luftföroreningar förändras.

9.1 TIMMEDELHALT OCH TRAFIKANTVIKTAD MEDELHALT

De regler och allmänna råd för luftkvalitet i vägtunnlar som speglas i denna beräkningshandledning anger en gräns för den acceptabla halten av kväveoxider i tunnelluften ($\mu\text{g NO}_x / \text{m}^3$). När tunneln trafikeras kommer halten kväveoxider att variera - dels längs med tunneln och dels över tid.

I denna beräkningshandledning används begreppet *timmedelhalt* för att beteckna den halt av NO_x som råder i genomsnitt längs tunneln, i medeltal under en viss timme.

Ett riktvärde för den maximala *timmedelhalten* skall tillämpas i alla tunnlar längre än 1000 meter med ett trafikflöde över 4000 ÅDT¹⁷ (se vidare avsnitt 9.2).

Utöver begränsningen av timmedelvärde skall ett särskilt riktvärde för *den trafikantviktade medelhalten (TVH)*¹⁸ tillämpas om det är samhällsekonomiskt

¹⁷ medeltrafikflödet per dygn under ett år

¹⁸ medelhalt för en medeltrafikant under ett

motiverat (se vidare avsnitt 9.3). I beräkningen av *trafikantviktade medelhalten* viktas timmedelhalten under varje timme i förhållande till trafikens omfattning under den aktuella timmen.

På grund av trafikens dygnsvariation kommer den trafikantviktade medelhalten i de flesta fall att bli betydligt lägre än den maximala timmedelhalten.

Riktvärden sätts alltså med hänsyn till två olika utgångspunkter:

1. Enskilda trafikanter bör inte utsättas för oacceptabelt höga hälsorisker, ens om de är dagliga användare av tunneln. *Timmedelvärde* av halten NO_x bör därför inte överstiga riktvärdet under någon av dygnets timmar.

Det riktvärde som begränsar timmedelvärdet enligt ovan är baserat på den individuella risken och beror inte av vilka kostnader riktvärdet medför för väghållaren eller samhället. Riktvärdet anpassas med hänsyn till tunnelns längd, eftersom en given halt innebär större riskökning om trafikanten exponeras för den under en längre tid, vilket framgår i WSP (2018). **Avsnitt 9.2** i denna beräkningshandledning beskriver mer om detta riktvärde

2. Om det är samhällsekonomiskt motiverat ska ett strängare riktvärde användas utifrån de totala långsiktiga hälsovinster som kan uppnås för trafikantkollektivet som helhet. Detta riktvärde begränsar halten utöver vad som ges av riktvärdet för enskilda trafikanter ovan.

Avsnitt 9.3 och **9.4** i denna beräkningshandledning visar hur det ska fastställas om ett sådant riktvärde baserat på den trafikantviktade medelhalten är samhällsekonomiskt motiverat.

9.2 BEGRÄNSAD INDIVIDUELL RISK FÖR FREKVENTA ANVÄNDARE

Ett grundläggande riktvärde för den maximala timmedelhalten sätts med hänsyn till att frekventa användare av tunneln inte skall utsättas för oacceptabla hälsorisker.

Luftkvalitetens inverkan på hälsorisken beror på hur länge trafikanterna vistas i tunneln. Därför skall riktvärdet enligt denna princip fastslås med hänsyn till tunnelns längd (uttryckt som trafikanternas genomsnittliga förväntade vistelsetid i tunneln under den mest belastade timmen).

Tabell 14 anger vilket riktvärde för haltens timmedelvärde som skall tillämpas baserat på denna princip. Riktvärdet i tabellen anger den maximala timmedelhalten.

dygn där timmedelhalten under varje timme viktas i förhållande till trafikens omfattning under den aktuella timmen

Tabell 14 Samband mellan passagetid och timmedelhalt vid en riskökning på 10% för frekventa användare av tunneln. Antaganden och beräkningsförutsättningar enligt WSP (2018) och WSP (2019)

Passagetid av tunneln i minuter Förväntad passagetid (min)	Riktvärde: Medelhalt hela tunneln under <i>maxtimmen</i> ($\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$)
3	6400
5	3800
10	1900
15	1300

Riktvärdet baseras på att ventilationen i fordonen går på 75% effekt och motsvarar en 10%-ig förhöjning av risken för förtida död. Det är högre än den risk som det innebär att bo i ett hus som ligger strax över riktvärdet för radon eller i miljöer med halter över miljö kvalitetsnormen för PM10 som båda ligger runt 3 %. En frekvent pendlare kan dock själv påverka sin exponering genom att sänka bilens ventilation från 75% till 25% och därigenom minska den individuella riskhöjning som tunnelpendlingen innebär med två tredjedelar vilket medför att risknivån blir jämförbar med andra risker.

Att ställa in ventilationen på recirkulation vid färd genom tunnel är dock inte ett alternativ i långa tunnlar. Detta eftersom kupéventilationen behöver vara påslagen för att undvika kondens.

9.2.1 Passage av flera tunnlar

Tunnlar kan vara så tätt lokaliserade att många biltrafikanter kommer att passera flera tunnlar under sin resa. En rimlig konsekvens av fokus på individuell riskökning blir då att riktvärdet för varje tunnel behöver anpassas så att den samlade riskökningen för hela resan (alla tunnlar) inte överstiger den "acceptabla" gränsen. Konkret innebär det att den sammanlagda passagetiden för alla tunnlar längs en sådan "naturlig rutt" blir avgörande när riktvärdet avläses i Tabell 14.

Det blir en bedömningsfråga vilka rutter (tunnelkombinationer) som skall bedömas vara så vanliga att riskökningen skall beaktas för hela rutten (och inte för varje tunnel för sig). Som ett minimum behöver riktvärdet enligt denna princip beakta den samlade tunnellängden i alla tunnlar som ligger efter varandra på samma länk, utan avfarter emellan.

9.3 ETT LÄGRE RIKTVÄRDE PÅ SAMHÄLLSEKONOMISK GRUND

9.3.1 Utgångspunkter

De samhällsekonomiska konsekvenserna av att tillämpa ett strängare riktvärde beror på specifika förutsättningarna i enskilda tunnlar.

Ett lägre riktvärde är samhällsekonomiskt motiverat om de samlade hälsovinster av att halten sänks ner till ett lägre riktvärde, är större än de samhällsekonomiska marginalkostnader det innebär att på billigaste sätt sänka halten.

- Hälsonyttan aggregeras över **alla trafikanter under dygnets alla timmar** och avvägs mot investerings- och driftskostnaderna

Notera att det är de samhällsekonomiska konsekvenserna av en *sänkning* av riktvärdet som beräknas. Analysen bygger alltså på en jämförelse mellan

- ett referensscenario där halten styrs med hänsyn till riktvärdet för enskilda trafikanter enligt Tabell 14 i avsnitt 9.2.
- ett alternativt scenario där luftkvaliteten styrs mot ett alternativt lägre riktvärde för trafikantviktade medelhalten, då med hänsyn till trafikantkollektivet som helhet.

I enlighet med gängse terminologi för samhällsekonomiska kalkyler används beteckningarna *JA (JämförelseAlternativ)* för referensscenariot, respektive *UA (UtredningsAlternativ)* för det alternativa scenario där ett lägre riktvärde tillämpas för dygnsmedelvärdet.

Den samhällsekonomiska jämförelsen mellan de två scenarierna omfattar följande sex steg

1. Definiera vilka alternativa riktvärden som ska analyseras och beräkna trafikantviktad medelhalt
2. Fastställ förväntade trafikförutsättningar under prognosåret
3. Identifiera skillnader i investering och drift mellan scenarierna
4. Uppskatta hälsoeffekten av ett sänkt riktvärde
5. Aggregera kostnader över kalkylperioden
6. Sammanvägning och slutsats

Riktlinjer för hur beräkningarna kan genomföras i varje steg presenteras i följande avsnitt.

Allmänt gäller att ASEK:s rekommendationer skall följas när det gäller generella beräkningsantaganden vid samhällsekonomiska analyser inom transportområdet.

9.4 STEGEN I DEN SAMHÄLLSEKONOMISKA ANALYSEN

9.4.1 Definiera alternativa riktvärden och beräkna trafikantviktad medelhalt

I den samhällsekonomiska analysen jämförs två scenarier, med olika trafikantviktad medelhalt av NO_x, med avseende på de samlade samhällsekonomiska konsekvenserna.

Jämförelsealternativ, JA: I detta scenario görs ingen särskild styrning av halten utöver vad som följer av det riktvärde som sätts i Tabell 14¹⁹. För att kunna bedöma skillnaden i hälsonytta mellan att endast styra enligt punkt 1 och ett eventuellt lägre riktvärde enligt punkt 2 behöver man först räkna fram den trafikantviktade medelhalten om tunneln styrs för att endast klara

¹⁹ Trafikantviktade medelhalten kommer normalt att bli betydligt lägre än det reglerade maximala timmedelhalten, även om det inte regleras med separat riktvärde

riktvärdet för den maximala timmedelhalten i punkt 1. Den trafikantviktade medelhalten beror bland annat på timmedelhaltens förväntade variation över dygnet och trafikens (trafikanternas) förväntade dygnsvariation. Den uppskattade trafikantviktade medelhalten av NO_x för detta alternativ betecknas, C_{JA}.

Utredningsalternativ, UA innebär ett riktvärde för en lägre trafikantviktad medelhalt C_{UA} än i JA. Minst ett scenario där den trafikantviktade medelhalten begränsas till 75 % av den trafikantviktade medelhalt som gäller i JA måste analyseras, d v s C_{JA}= 0,75 *C_{UA}

C_{JA}, C_{UA} = Trafikantviktad medelhalt: en koncentration (µg NO_x/m³) som råder under en genomsnittlig tunnelpassage (i JA respektive UA), där den trafikantviktade medelhalten C beräknas enligt:

$$C = \frac{\sum_{t=1}^{24}(q_t * h_t)}{\sum_{t=1}^{24}(q_t)}$$

q_t = totala antalet bilresenärer som passerar tunneln under timmen t

h_t = timmedelhalten av NO_x under timmen t

9.4.2 Trafikförutsättningar

Samma trafikförutsättningar antas gälla för båda scenarierna: JA respektive UA. Beräkningarna görs för ett (medel)dygn under prognosåret. De utgår därför från den planerade årsmedelsdygnstrafiken, ÅDT, för prognosåret.

Om det inte finns detaljerade tunnelspecifika prognoser så kan ÅDT-trafiken antas fördelad över dygnets timmar enligt de timindex som rekommenderas i Trafikverkets skrift *Effektsamband för transportsystemet* (Trafikverket (2016)).

9.4.3 Investerings- och driftskostnader

För att kunna möta de striktare kraven i UA kommer det i normalfallet att krävas större investeringar i tunnel och ventilationssystem och/eller ökade kostnader i driftsfasen jämfört med motsvarande kostnader i JA. I beräkningarnas tredje steg skall en beräkning (kvalificerad uppskattning) av dessa kostnadsökningar genomföras.

De åtgärder som krävs för att sänka halten kan vara av olika slag. Ett lågt riktvärde kan uppnås genom att tunnelns, eller ventilationssystemets, utformning justeras i förhållande till vad som annars planerats (till högre investeringskostnader), och/eller en mer intensiv drift av de fläktar som är föreslagna redan i grundutförandet (ökade driftskostnader), under förutsättning att brandsäkerheten inte äventyras.

För att avgöra vilka justeringar av tunnelutformning och ventilationsdrift som är lämpligast (mest rimliga) under förutsättning att det lägre riktvärdet skall nås behövs specialistkompetens. Det krävs avvägningar som tar hänsyn till

såväl generella tekniska begränsningar och specifika lokala förutsättningar, som brandsäkerhetskrav och långsiktig kostnadseffektivitet.

När det fastslagits vilka justeringar som krävs för att det lägre riktvärdet skall kunna upprätthållas, skall kostnaderna för dessa justeringar uppskattas. Ökade investeringskostnader uttrycks som en engångskostnad, medan ökade driftskostnader beräknas som en årlig kostnad för prognosåret.

$K_{inv} =$ Ökade investeringskostnader vid övergång från JA till UA

$K_{drift, prognosår} =$ Ökade driftskostnader under prognosåret vid övergång från JA till UA

9.4.4 Hälsoeffekt

Hälsoeffekterna beräknas, i likhet med driftskostnaderna, i ett första steg för ett prognosår.

Hälsoeffekterna uttrycks i första hand som den minskning av antalet förtida dödsfall, som kan förväntas till följd av minskad exponering för hälsofarliga ämnen när luftkvaliteten styrs mot det lägre dygnsmedelvärde i UA.

Enligt WHO är den relativa risken för förtida död linjärt beroende av den medelhalt NOx som individen utsätts för under året. Om årsdosen (medelhalt) ökar med $1 \mu\text{g NOx/m}^3$ anger Nafstad et al (2004) att risken att dö under året ökar med 0,8% från den tidigare basrisken.

Det innebär att om vi går från JA till UA kan vi förvänta oss att antalet förtida dödsfall minskar med ett antal som kan beräknas med formeln

$$\Delta F_{\text{år}} = Q_{\text{år}} * (C_{JA} - C_{UA}) * \frac{T_{\text{tunnel}}}{T_{\text{år}}} * R_{\text{bas}} * rr$$

där

$\Delta F_{\text{år}} =$ minskat antal förtida döda (per år) till följd av övergång från JA till UA

$Q_{\text{år}} =$ totala antalet bilresenärer som passerar tunneln under ett år, $\text{ÅDT} * 365 * 1,3$

$C_{JA}, C_{UA} =$ Trafikantviktad medelhalt: en koncentration ($\mu\text{g NOx/m}^3$) som råder under en genomsnittlig tunnelpassage (i JA respektive UA).

$\frac{T_{\text{tunnel}}}{T_{\text{år}}} =$ Andel av ett år som tiden för en tunnelpassage utgör (t. ex. för en tunnel som tar 5 minuter att passera: $5/(60*24*365) = 9,6*10^{-6}$)

$R_{\text{bas}} =$ Den genomsnittliga dödsrisken per år för tunnelns trafikanter, Beräkningarna kan baseras på medeldödsrisken i en population 30-74 åringar, enligt WSP (2018). För en sådan population är $R=0,0048$ (=4,8 promille).

$rr =$ Dos-respons samband: Den relativa riskförhöjningen om genomsnittsdosen NOx på årsbasis höjs med $1 \mu\text{g NOx/m}^3$ är enligt Nafstad et al. (2004)²⁰ 8 promille, det vill säga $rr=0,008$.

²⁰ Om ny kunskap tillkommer, som indikerar ett annat samband mellan dos (exponering) och risk för förtida dödsfall, bör värdet på rr omprövas.

Minskningen av antalet förtida dödsfall kan värderas monetärt med hjälp av Värdet av ett Statistiskt Liv, VSL²¹.

$$B_{h\ddot{a}lsa,prognos\ddot{a}r} = \Delta AF * VSL$$

VSL anges för närvarande i Trafikverkets riktlinjer (ASEK²² (2018)) till 40,5 miljoner SEK. (2014 års prisnivå).

9.4.5 Nuvärdesberäkning: Aggregera över kalkylperioden

I tidigare avsnitt har vi beskrivit hur monetariserade hälsovinster och ökade driftskostnader beräknas som årliga nyttor/kostnader för ett specifikt prognosår.

För att på ett meningsfullt sätt kunna jämföras med de ökade investeringskostnaderna behöver de årliga kostnaderna för prognosåret aggregeras för tunnelns (ekonomiska) livslängd - den så kallade *kalkylperioden*. Detta görs genom så kallad *nuvärdesberäkning*.

Nuvärdesberäkningen behöver ta hänsyn till flera aspekter när det gäller hur nyttor och kostnader varierar över tid:

1. På grund av generell trafiktillväxt kan trafikflödet genom tunneln förväntas växa årligen från öppningsåret, förbi prognosåret och ända fram till kalkylperiodens slut. *Hälsonyttorna* (antalet inbesparade förtida dödsfall) kan förväntas följa trafikens utveckling. Trafikens förväntade årliga ökningstakt beskrivs av *trafiktillväxttalet*.
2. Den samhällsekonomiska värderingen av varje enskilt dödsfall är en konsekvens av befolkningens genomsnittliga betalningsvilja för att minska risken att dö. Det finns anledning att tro att betalningsviljan, och därmed VSL, kommer att öka i takt med *realinkomstutvecklingen*. I gällande ASEK-rekommendationer (Trafikverket 2018) förordas kontinuerlig uppräkningsgrad med 1,5 % per år under perioden (2014-2060).
3. Samtidigt behöver en *diskonteringsränta* tillämpas vid nuvärdesberäkningen för att beakta att monetära kostnader som skall tas längre fram i tiden innebär en mindre uppoffring än om motsvarande summa skall betalas ut idag.

Detaljerade riktlinjer för hur nuvärdesberäkning skall göras vid samhällsekonomiska analyser inom transportområdet presenteras i ASEK (Trafikverket 2018). ASEK:s riktlinjer uppdateras löpande och anger de värden för kalkylperiodens längd, trafiktillväxttal, realinkomstutveckling och diskonteringsränta som skall tillämpas vid nuvärdesberäkningen. ASEK:s riktlinjer beskriver också vilka formler som skall tillämpas för nuvärdesberäkningen.

²¹ I WSP (2018) beskrevs en mer komplicerad metod för den monetära värderingen av hälsovinster. Den metoden tog hänsyn till att antalet förlorade levnadsår varierar när personer i olika åldrar dör en förtida död. Sammantaget blir resultaten mycket snarlika dem som erhålls med den förenklade beräkningsgång som föreslås här.

²² ASEK står för Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn (Trafikverket 2018).

9.4.6 Sammanvägning och slutsats

Sedan de hälsovinster och driftskostnader som beräknats för prognosåret nuvärdesberäknats och aggregerats för hela kalkylperioden kan analysresultatet sammanställas enligt följande tabell

	Konsekvens av övergång från JA-UA
Ökade kostnader för tunnelventilation, nuvärdesberäknat	
Ökade investeringskostnader för tunnel och ventilationsanläggning	
Summa kostnader, mkr	
Värdet av sparade förtida dödsfall nuvärdesberäknat	
Summa nyttor, mkr	
Nettonuvärde (Nyttor – Kostnader)	NNV

Om det beräknade nuvärdet av hälsovinster överstiger det beräknade nuvärdet av ökade investeringskostnader och driftskostnader innebär det att nettonuvärdet (NNV) av en övergång från JA till UA blir positivt.

Om beräkningarna visar att $NNV > 0$ är det samhällsekonomiskt motiverat att tillämpa ett strängare riktvärde baserat på den trafikantviktade dygnsmedelhalten (C_{UA}) för hur tunneln utformas och ventilationen styrs i driftsfasen.

9.5 REFERENSLISTA

Nafstad, P. Håheim, LL. Wisloff, T. Gram, F. Oftedal, B. Holme, I. Hjermann, I. Leren, P., (2004). Urban air pollution and mortality in a cohort of Norwegian men. *Environmental Health Perspect*, sida. 610-615.

Trafikverket (2016) Effektsamband för transportsystemet, Fyrstegsprincipen Steg 3 och 4, Bygg om eller bygg nytt, Kapitel 3 Trafikanalys Version 2016-04-01

Trafikverket, (2018). Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn, ASEK, Version 2018-04-01 (ASEK 6.1).

WSP, (2019). Luftkvalitet i vägtunnlar. Tilläggsuppdrag nationellt riktvärde, 2019-10-15, Slutversion reviderad.

WSP, (2018). Luftkvalitet i vägtunnlar. Konsekvensutredning och förslag till nationellt riktvärde, 2018-08-16 Slutversion reviderad.

VI ÄR WSP

WSP är ett av världens ledande analys- och teknikkonsultföretag. Vi verkar på våra lokala marknader med stöd av global expertis. Som tekniska experter och strategiska rådgivare har vi tillgång till ingenjörer, tekniker, naturvetare, planerare, utredare och miljöspecialister liksom professionella projektörer, konstruktörer och projektledare. Vi erbjuder hållbara lösningar inom Hus & Industri, Transport & Infrastruktur och Miljö & Energi. Med drygt 39 000 medarbetare på 500 kontor i 40 länder medverkar vi till en hållbar samhällsutveckling. I Sverige har vi omkring 4 000 medarbetare. wsp.com

WSP Sverige ABWSP Sverige AB

121 88121 88 Stockholm-GlobenStockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7Arenavägen 7

T: +46 10 7225000+46 10 7225000
Org nr: 556057-4880556057-4880
Styrelsens säte: Stockholm
wsp.com

