

Kartlegging av ventilasjons- tårnernes evne til å redusere forurensning fra dagsonen

Måling av luftforurensning i E18 Operatunnelen og
forslag til nytt styringsregime for ventilasjonstårnene

Claudia Hak ¹, Ørjan Antonsen ², Martine Wessel ², Matthias Vogt ¹, Anne-Cathrine Nilsen ¹

(1) NILU, (2) Ingenia



NILU rapport 30/2021	ISBN: 978-82-425-3068-4 ISSN: 2464-3327	TILGJENGELIGHET: A - Åpen
DATO 08.12.2021	ANSVARLIG SIGNATUR Ole-Anders Braathen, Viseadministrerende direktør (sign.)	ANTALL SIDER 103
TITTEL Kartlegging av ventilasjonstårnenes evne til å redusere forurensning fra dagsonen Måling av luftforurensning i E18 Operatunnelen og forslag til nytt styringsregime for ventilasjonstårnene	PROSJEKTLEDER Claudia Hak	NILU PROSJEKTNUMMER O-120066
	FORFATTER(E) Claudia Hak 1, Ørjan Antonsen 2, Martine Wessel 2, Matthias Vogt 1, Anne-Cathrine Nilsen 1 (1) NILU, (2) Ingenia	KVALITETSSIKRER Torleif Weydahl
OPPDRAAGSGIVER Statens vegvesen	OPPDRAAGSGIVERS REF. 20/8508, Per Fjeldal	
REFERAT NILU – Norsk institutt for luftforskning og Ingenia AS har på oppdrag fra Statens vegvesen kartlagt effekten ventilasjonstårnene i Ekeberg- og Bjørvikatunnelen har med hensyn til å redusere luftforurensning fra dagsonen på Sørenga. Prosjektet besto av et omfangsrikt måleprogram i og rundt Operatunnelen i Bjørvika, en vurdering av ventilasjonstårnenes effekt basert på målingene og forslag til prinsipper for et nytt styringsregime. Drift av ventilasjonstårnene ble funnet å ha en tydelig effekt på PM ₁₀ - og NO ₂ -konsentrasjonen i dagsonen og på bakkenivå utenfor dagsonen fra trinn 3 (av 4). Forslaget til nytt styringsregime fokuserer på ventilasjonstårndrift i piggdekkseasongen og avhengighet av ytre forhold.		
TITLE Mapping the ventilation towers' effect to reduce pollution from the Operatunnel's open air section at Sørenga		
EMNEORD Luftkvalitet Trafikkforurensning Svevestøv		
ABSTRACT (på engelsk) NILU – The Norwegian Institute for Air Research and Ingenia AS have, on behalf of the Norwegian Public Roads Administration, mapped the effect of the ventilation towers in the Ekeberg- and Bjørvika tunnels with regard to reducing air pollution from the open air section at Sørenga. The project consisted of an extensive measurement programme in and around the Opera Tunnel in Bjørvika, an assessment of the ventilation towers' effect based on the measurements, as well as proposal for principles for a new control regime. Operation of the ventilation towers was found to have a clear effect on the PM ₁₀ and NO ₂ concentration in the open air section and at ground level outside the open air section from step 3 (of 4). The proposal for a new control regime focuses on ventilation tower operation during the season studded tyres are used and dependence on outdoor conditions.		
PUBLISERINGSTYPE: Digitalt dokument (pdf)	FORSIDEBILDE:	Kilde: Claudia Hak, NILU

© NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning

Sitering: Hak, C., Antonsen, Ø, Wessel, M., Vogt, M., Nilsen, A.-C. (2021). Kartlegging av ventilasjonstårnenes evne til å redusere forurensning fra dagsonen. Måling av luftforurensning i E18 Operatunnelen og forslag til nytt styringsregime for ventilasjonstårnene (NILU rapport 30/2021). Kjeller: NILU.

NILU er ISO-sertifisert i henhold til NS-EN ISO 9001/ISO 14001 og akkreditert i henhold til NS-EN ISO/IEC 17025.

Forord

Dette er et prosjekt utført av NILU – Norsk institutt for luftforskning og Ingenia AS på oppdrag for Statens vegvesen. Bakgrunnen for prosjektet er at luftforurensningssituasjonen i området ikke tilfredsstiller planretningslinjer for luftkvalitet og undersøkelser viser at forurensningsbidraget fra de trafikkerte veiene på overflaten samt fra dagsonen (kulvertåpning) i Operatunnelen bidrar til høy forurensningskonsentrasjon i området. States vegvesen har med dette prosjektet ønsket å kartlegge ventilasjonstårnenes effekt for å redusere forurensning fra dagsonen på Sørenga.

Rapporten er hovedsakelig utarbeidet av Claudia Hak (NILU), Ørjan Antonsen (Ingenia) og Martine Wessel (Ingenia). Prosjektet inneholdt en kompleks målekampanje. Målekampanjen i og rundt Operatunnelen ble koordinert av Anne-Cathrine Nilsen (NILU), i samarbeid med Espen Ødegaard (SVV). Feltarbeid ble utført av Anne-Cathrine Nilsen, Dorothea Schulze, Torbjørn Heltne og Tore Mortensen. Torleif Weydahl var intern kvalitetskontrollør. Dag Tønnesen, Matthias Vogt og Anne-Cathrine Nilsen har bidratt til rapporten og deltatt i faglige diskusjoner.

Kontaktperson hos Statens vegvesen var Per Fjeldal. Per Fjeldal, Espen Ødegaard, Tore Breisnes, Ellen Foslie og Ole Kristian Kjosbakken fra SVV ga innspill til rapporten.

Alle takkes for godt samarbeid.

Innhold

Forord	2
Innhold	3
Sammendrag	5
1 Innledning	7
1.1 Bakgrunn	7
1.2 Formål	9
1.3 Forutsetninger og avgrensninger.....	9
2 Operatunnelen	11
2.1 Utforming av tunnelsystemet	11
2.2 Dagsonen	11
2.3 Eksisterende ventilasjon og drift av anlegget	12
2.3.1 Eksisterende sensorer	12
2.3.2 Langsgående ventilasjon	14
2.3.3 Ventilasjonstårnene	14
2.3.4 Tunnelvask	15
2.4 Strømningsmønstre og massebalanse	16
2.4.1 Arealer, luftmengder og hastigheter	16
2.4.2 Uten tårnventilasjonsdrift.....	17
2.4.3 Med tårnventilasjonsdrift	18
2.4.4 Konsentrasjoner og spredning	21
3 Gjennomføring av målekampanjen	23
3.1 Måleutstyr	23
3.1.1 Plassering av instrumenter	23
3.1.2 Måling av svevestøv – PM ₁₀	27
3.1.3 Måling av NO ₂ og nitrogenoksider	28
3.1.4 Måling av vind og luftbevegelse.....	29
3.2 Kvalitetssikring og instrumentsammenligning	29
3.3 Ventilasjonsplan.....	31
4 Observasjoner	35
4.1 Ytre forhold under målekampanjen	35
4.1.1 Meteorologiske forhold	35
4.1.2 Svevestøvkonsentrasjon i Oslo/Bakkenivå i måleperioden	40
4.1.3 Trafikk.....	44
4.2 Generelle observasjoner	46
4.2.1 Luftstrømning i tunnelen	47
4.2.2 Svevestøvkonsentrasjon	49
4.2.3 Gasskonsentrasjoner.....	51
4.3 Kartlegging av ventilasjonstårnenes effekt.....	54
4.3.1 Ekeberg tunnelen	54
4.3.2 Bjørvikatunnelen	57
4.3.3 Mosseveirampa.....	60
4.3.4 Dagsone.....	63
4.3.5 Effekt av ventilasjonstårnene.....	69

4.4	Vurdering av de målte parametre	73
5	Prinsipper for optimalisert styringsregime	75
5.1	Optimalisert styringsregime for ventilasjonstårn	75
5.2	Oppdaterte setverdier for tunnelventilasjon og ventilasjonstårn.....	78
6	Forslag til videre arbeid	80
7	Konklusjon	82
8	Referanser	84
Vedlegg A	Utfyllende måldata.....	86
Vedlegg B	Grenseverdier og luftkvalitetskriterier	96
Vedlegg C	Figurer.....	101

Sammendrag

Statens vegvesen har engasjert NILU – Norsk institutt for luftforskning og Ingenia AS til å måle luftforurensning ved E18 Operatunnelen i Bjørvika og kartlegge effekten som ventilasjonstårnene i Ekeberg- og Bjørvikatunnelen har med hensyn til å redusere luftforurensning fra dagsonen på Sørenga. Prosjektet besto av et omfangsrikt måleprogram i og rundt Operatunnelen i Bjørvika, en vurdering av ventilasjonstårnenes effekt basert på målingene og forslag til prinsipper for et nytt styringsregime for ventilasjonstårnene som tar hensyn til luftforurensningen utenfor dagsonen. Måleprogrammet fokuserte på måling av svevestøv (PM₁₀) og luftstrømning i tunnellopene som grenser til dagsonen. I tillegg ble det gjort målinger av NO_x-konsentrasjoner i dagsonen, luftbevegelser over dagsonen og svevestøv på bakkenivå utenfor dagsonen. Ytre forhold i Oslo ble også vurdert. Målingene foregikk i perioden 18. januar – 28. februar 2021.

Målet med prosjektet var å gjennomføre målinger i Operatunnelen i Bjørvika for å kartlegge ventilasjonstårnenes effekt med hensyn til å redusere forurensning fra dagsonen. I måleperioden (18. januar – 28. februar 2021) ble ventilasjonstårnene nord og sør for dagsonen driftet etter en definert ventilasjonsplan. Måleresultatene fra prosjektet og målinger av ytre forhold (luftkvalitet og meteorologi) i Oslo ble vurdert for å kartlegge ventilasjonstårnenes effekt. Basert på vurderinger fra måleresultatene, er prinsippene for et nytt styringsregime for ventilasjonstårnene foreslått.

Kontinuerlige målinger av svevestøv (PM₁₀) og luftstrømning i alle tunnellop som grenser til dagsonen ble utført med høy tidsoppløsning. For å kartlegge luftbevegelsene i tunnelen ble det gjort målinger både oppstrøms og nedstrøms tårnavtrekk. Målinger av vertikal luftstrømning over dagsonen ble utført for å kartlegge luftutvekslingen mellom dagsonen og omgivelsene. For å vurdere dagsonens påvirkning på luftkvaliteten i omgivelsene ble svevestøv også målt ved to målestasjoner som var plassert på bakkenivå i ulik avstand sørvest for dagsonen. Totalt ble det brukt 8 kompakte PM-instrumenter, 3 PM-monitorer, 1 NO_x-monitor, 8 2D-vindsensorer, 5 3D-vindsensorer og passive NO₂-prøvetakere.

Bruk av ventilasjonstårnene ble funnet å ha en merkbar effekt på strømmingen i tunnellopene ved trinn 2. Fra trinn 3 ble det observert en tydelig effekt av tårndrift på PM₁₀- og NO_x-konsentrasjoner i dagsonen. Ved tårnventilasjon på trinn 3 ble det målt lavere konsentrasjon av PM₁₀ og NO_x i dagsonen, grunnet innsug av luft nedstrøms tårnavtrekk og resulterende uttynning av luft i dagsonen. Målingene fra målebodene på bakkenivå sørvest for dagsonen viser også en tydelig effekt av tårnventilasjonen.

Tårndrift ser ut til å ha en effekt på vertikale luftbevegelser over dagsonen når ventilasjonen kjøres på trinn 3 eller høyere. Ved vind fra nordøst, som er mest ugunstig for luftkvaliteten i Lohavn/Sørenga, og ventilasjonen på trinn 0, strømmer luft ut av dagsonen og gir dårligere luftkvalitet i sørvestlig retning. Ved samme vindforhold og ventilasjonen på trinn 3, strømmer luft ned i dagsonen og gir tilførsel av friskluft til tunnelen.

På grunn av størrelsen på dagsonen, vil drift av ventilasjonstårnene i liten grad kunne påvirke luftstrømmene som beveger seg inn og ut av dagsonen og til omgivelsene. Det drift av tårnene kan utrette, er å påvirke mengden forurensning som blir tilført dagsonen fra tunnellopene. For å redusere forurensning fra dagsonen til omgivelsene, må konsentrasjonen i dagsonen senkes. Dette oppnås ved å kjøre ventilasjonstårnene ved trinn 3 eller mer.

Meteorologiske forhold påvirker utskiftningen av luft mellom tunnel og utemiljøet, avsetning av svevestøv og gasser, og oppvirvling av svevestøv. Det var god overensstemmelse mellom meteorologiske målinger ved dagsonen og Hovin for vindretning, vindhastighet, temperatur, relativ luftfuktighet og nedbør. Det betyr at målinger fra Hovin er representative for området og kan også brukes for fremtidige vurderinger knyttet til tårnventilasjon.

Effekt av ventilasjonstårnene på luftkvaliteten er kartlagt i detalj og et nytt styringsregime for drift er foreslått. For å kunne ivareta luftkvaliteten i omgivelsene, må reguleringen av tårnventilasjonen bestemmes, både på bakgrunn av produksjonen av forurensning i tunnel og ut fra ulike ytre forhold som påvirker både konsentrasjoner og spredning av luftforurensning til omgivelsene. Siden problemene med dårlig luftkvalitet er størst i vinterhalvåret, både på grunn av piggdekkbruk og dårlige spredningsforhold, fokuserer foreslått styringsregime på piggdekkseasonen. Det anbefales å kjøre ventilasjonstårnene på hverdager på dagtid etter et skjema som varierer med trafikkmengden per kjøretning. Ved ytre forhold som er gunstige for spredning av luftforurensning eller demper oppvirvling av svevestøv, kan fastprogrammeringen av tårndriften overstyres. Dette er estimert til å skje i mer enn 25 % av vintersesongen, avhengig av meteorologiske forhold.

Kartlegging av ventilasjonstårnenes evne til å redusere forurensning fra dagsonen

Måling av luftforurensning i E18 Operatunnelen og forslag til nytt styringsregime for ventilasjonstårnene

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Hovedvegombyggingen for E18 Operatunnelen har muliggjort dagens byutvikling i Bjørvika basert på vedtak på St.mld. 28 (2002). Hovedgrepet for Bjørvikaplanen ble vedtatt i 2004 (S-4099), med reguleringsbestemmelser bl.a. for miljøforhold. Reguleringen av vegsystemet for E18 ble gjort i egen plan som ble vedtatt i 2003. Finansieringen av tiltaket ble gjort gjennom særskilte avtaler mellom stat og kommune der omleggingen av riksveien i hovedsak ble dekket av staten og ved bomfinansiering. Utbygger og kommunen tok ansvar for byutvikling i området, med de kostnader og risiko som var knyttet til bl.a. vanskelige grunnforhold og forurensning ved regulering av disse områdene. Statens vegvesen har i alle detaljplaner fra 2012 som berører utbygging av Bjørvika/ Bispevika - Lohavn påpekt behovet for å tilfredsstille kravene til miljøkvalitet. Hensynet til sikringsone for Operatunnelen og forhold knyttet til miljøkvalitet som støy og luftforurensningen fra kulvert og større veger i området har særlig vært i fokus (SVV, brev til PBE i 2020).

Da bystyret vedtok reguleringsplanen for Bjørvika i 2003 ble det stilt krav til luftkvalitet. Dette var en forutsetning for å tillate boliger og skole så nær åpningen til en av Norges mest trafikkerte tunneler. Ved åpning av Bjørvikatunnelen i 2010, stod fire 40 meter høye ventilasjonstårn i betong klare for å transportere forurenset luft ut fra tunnelen, som et tiltak for å ivareta luftkvaliteten i tunnelene og på bakkenivå. Det er imidlertid kjent at ventilasjonstårnene er lite i bruk og at forurenset luft fra dagsonen kan fraktes mot Lohavn og Sørenga (Berge et al., 2019).

Det er eksisterende bebyggelse på Sørenga, utbygging i Bispevika og planer om utbygging av området Lohavn med boliger, skole, utearealer og næringsbygg. Flere tidligere prosjekter har belyst problemstillinger knyttet til luftkvaliteten i området og vist at PM₁₀-konsentrasjonen er den største utfordringen. Tidligere kartlegginger har vist at dagsonen til E18 Operatunnelen er en betydelig kilde til luftforurensning. I dette prosjektet skal det kartlegges hvor stor effekt ventilasjonstårnene ved begge sider av dagsonen i Operatunnelen har med hensyn til å redusere forurensning fra dagsonen. Kartleggingen utføres på grunnlag av avanserte målinger og strømningstekniske vurderinger.

Målekampanjen var opprinnelig planlagt utført høsten 2020, men ble utsatt til januar/februar 2021. Usikkerheter rundt Covid-pandemien, pågående tunnelarbeider og generelt stor kompleksitet av måleprosjektet krevde en utsettelse på nesten et halvt år.

Da prosjektet begynte, i januar 2020, ble september/oktober 2020 vurdert som egnet tidsperiode for å utføre målekampanjen i Operatunnelen. Egnede måleutstyr måtte bestilles og estimert leveringstid for instrumentene var åtte uker. Kartlegging av ventilasjonstårnenes effekt krever lite variasjon av ytre forhold og «vanlig» trafikk i området i en sammenhengende periode på 4-5 uker. Redusert trafikkvolum på grunn av ferie- og fridager i månedene mai, juni, juli og august 2020 var dermed ikke en ideell periode. Statens vegvesen informerte om vedlikehold i Operatunnelen som skulle pågå frem til slutten av august 2020. Forsinkelser på grunn av Covid-pandemien førte til at vedlikeholdsarbeidet pågikk frem til 11. juli 2021. Begynnelsen av piggdekkperioden 1. november (frem til 30. april) førte til videre begrensning av mulige tidsperioder for å utføre hele målekampanjen (5-6 uker) med minst mulig variasjon av ytre forhold.

Tidsrommet som ble valgt for målekampanjen, uke 3 til og med uke 7 i 2021, var mellom juleferien og vinterferien og midt i piggdekkperioden og dermed ideell, med potensiale til å registrere episoder med høy luftforurensning. Målekampanjen ble forlenget med én uke for å teste noen utvalgte ventilasjonsscenarioer på grunnlag av resultater fra målingene i uke 3 – 7. Disse målingene ble gjennomført i uke 8, som er vinterferieuken i Oslo – trafikken var dermed noe redusert sammenlignet med ukene før. Trafikkvolumet i Operatunnelen i måleperioden ble vurdert som noe redusert sammenlignet med årene før, både på grunn av generell trafikkreduksjon som resultat av Covid-pandemien og på grunn av et omfattende rehabiliteringsarbeid av Vålerengatunnelen, der ett løp var sperret i periodene juni – november 2020 og november 2020 – juli 2021. Det ble vurdert at påvirkningen av dynamikken i tunnelen ikke ville være for stor for å utføre måleprosjektet.

Hovedkomponentene i den uønskede forurensning fra dagsonen til omgivelsene er NO_2 og PM_{10} . Mens man forventer en reduksjon i fremtidige utslipp av NO_x som følge av forbedret motorteknologi og voksende elbilandel i kjøretøyparken, er det ikke forventet at PM_{10} -konsentrasjonene vil gå ned på samme måte. Den største delen av PM_{10} fra trafikk kommer fra vegslitasje og oppvirvling. Bidraget fra dagsonen til luftforurensning i omgivelsene er imidlertid vanskelig å kvantifisere og i stor grad avhengig av ytre forhold.

Tidligere prosjekter i området (nyeste først):

- Som en del av planarbeidet for utviklingen av Lohavn og Grønlikaia ble det gjort målinger og beregninger av lokal luftkvalitet på oppdrag fra Hav Eiendom. Våren 2020 utførte NILU PM -målinger ved tre steder i Lohavn for å kartlegge fordelingen av svevestøvkonsentrasjonen i luft i området Lohavn (Hak og Tønnesen, 2020). Målingene ga ingen tydelige svar på konkrete svevestøvkilder i området. Midlertidige lokale svevestøvkilder har i perioder bidratt vesentlig til målte PM -konsentrasjoner. Målingene ga grunnlag for nye modellberegninger utført av Civitas (Selvig og Klami, 2020). Modellen viste godt samsvar med målingene når det tas hensyn til midlertidige kilder. Beregningene viste at feltene D5, D6, D7 og D8 ligger i rød sone på østsiden av bebyggelsen og gul sone på vestsiden av bebyggelsen. Som hovedårsak til de relativt høye konsentrasjonene (rød sone) angis de lokale utslippskildene, det vil si kulvertåpningen fra Operatunnelen, de sterkt trafikkerte veiene på overflaten i randen av planområdet og tunnelmunninger øst og sørøst for planområdet.
- Samtidig utførte Norconsult en utredning av tiltak for å bedre luftkvaliteten i Lohavn for Oslo kommune PBE (Norconsult, 2021). Rapporten oppsummerer effekten og gjennomførbarheten av trafikkreduserende tiltak, driftstiltak og skjermingstiltak. Vurderingene er basert på litteraturstudier og CFD-simuleringer av spredning rundt planområdet. Tiltakene som anbefales å vurdere videre er knyttet til renhold og vinterdrift av gater basert på prediksjon av luftkvalitet, styring av ventilasjonstårnene i Operatunnelen med formål å redusere utslipp av forurenset tunnelluft fra dagsonen, og etablering av vegetasjon langs gater og i allmenningene for å redusere spredning av forurenset luft. Tiltak i forbindelse med dagsonen ble vurdert viktigst å prioritere.
- Som en del av planarbeidet for utviklingen av Lohavn gjorde Civitas og Brekke & Strand beregninger av lokal luftkvalitet (Berge et al., 2019) for Hav Eiendom. Beregningene var blant annet basert på en måleserie fra året 2016/2017 (Berge og Kravik, 2018). Resultatene viste at nesten hele planområdet ligger i rød sone for PM_{10} og i gul og rød sone for NO_2 . PM_{10} er den største utfordringen både med hensyn til utbredelse av rød sone og fordi det er indikasjoner på at konsentrasjonsnivåene ligger betydelig høyere enn grenseverdien. Hovedårsaken er lokale utslippskilder som kulvertåpningen fra Operatunnelen og sterkt trafikkerte veier på overflaten i randen av planområdet, f.eks. Håkon Vs gate. Kulvertåpningens utslipp har tidligere ikke vært inkludert i luftsoneberegningene fordi man har forutsatt at luftetårnene har hindret forurensning å trenge opp gjennom åpningen. Dette har gjennom utført måleprogram

(Berge og Kravik, 2018, Berge, 2017) vist seg å ikke være tilfelle. Det er et betydelig utslippsbidrag fra kulvertåpningen. Tiltak, både utforming av bygninger, skjerming og reduksjon av lokale utslippskilder, er diskutert i rapporten.

- Målinger og analyser i Operakulverten i Lohavn ble utført av NILU og Civitas i 2016-2017 (Berge og Kravik, 2018) med hovedhensikten å vurdere effekten driften av luftetårnene har på lokal luftkvalitet i Lohavnområdet. Analysen baserte på målinger av vind og turbulens i Operakulverten og av PM, NO₂ og meteorologiske parametere utenfor kulverten, samtidig som SVV regulerte kapasiteten i viftene i vestlig og østlig luftetårn. Hensikten med måleprogrammet har vært å måle den effekten luftetårnene har på lufttransporten ut og inn av kulverten og å vurdere om økt drift av luftetårnene vil kunne bedre forurensnings-situasjonen i Lohavn. Det ble ikke funnet en registrerbar sammenheng mellom driften av luftetårnene og midlere vertikalvind eller midlere vertikalturbulens i kulverten. Fra måleresultatene ble det konkludert av at intensivert drift av luftetårnene ikke forventes å påvirke luftstrømmene som transporterer forurensning ut av den åpne kulverten.
- Måleprogrammet utført i 2016-2017 viste at åpningen i Operakulverten er en betydelig kilde til luftforurensning i Lohavnområdet. Måleprogrammet i oppdrag for Hav Eiendom, Statens Vegvesen Region øst, Utdanningsetaten i Oslo/Oslo kommune er beskrevet av Civitas i et notat (Berge, 2017). Det ble etablert for å bedre kunnskapen om den lokale luftkvaliteten i Lohavn. Timemiddelkonsentrasjoner av NO₂, PM₁, PM_{2.5} og PM₁₀ ble målt ved en målestasjon plassert vest i Loallmenningen nær skoletomten. Det ble også gjort målinger av NO₂ med passive prøvetakere i 12 punkter, i et profil tvers over kulverten (langs hovedvindretningene) og enkelte andre steder. Måleprogrammet viste tydelig at kulvertåpningen er en viktig kilde til luftforurensning i planområdet Lohavn. Målingene viste at planområdet trolig er i rød sone mht. PM₁₀ og i gul sone mht. NO₂. Resultatene fra måleprogrammet og den nye kunnskapen ble anvendt til mer detaljerte og oppdaterte beregninger for Lohavnområdet (se Berge et al., 2019).

1.2 Formål

Til tross for at det finnes flere tunneler med ventilasjonstårn i Oslo i dag, er det manglende kunnskap om hvordan ventilasjonstårnene kan styres mest mulig optimalt for å redusere forurensningen i områdene rundt tunnelmunningene. Tidligere kartlegginger har vist at dagsonen til E18 Operatunnelen er en betydelig kilde til luftforurensning i området. Hensikten med dette prosjektet er å bedre kunnskapen om hvor stort bidrag dagsonen til E18 Operatunnelen utgjør til luftforurensningen i omgivelsene, og kartlegge ventilasjonstårnenes effekt for å redusere dette. Hovedfokuset i denne rapporten vil derfor være på drift av ventilasjonstårnene, og på hvilken måte de kan benyttes for å ivareta luftkvaliteten i områdene rundt dagsonen. For å kartlegge dette er det gjennomført et måleprogram i og rundt dagsonen. Dagsonen og de tilknyttede tunnellopene er en del av et komplekst tunnelnettverk, der de ulike delene av nettverket kan påvirke hverandre med akkumulert forurensning og luftstrømmer. Strømningsmønstre og massebalanse er derfor undersøkt for en avgrenset strekning av tunnelen.

1.3 Forutsetninger og avgrensninger

Siden formålet til denne studien er å undersøke ventilasjonstårnenes evne til å redusere forurensning fra dagsonen, begrenser observasjonene seg til området rundt dagsonen på Sørenga, dvs. ventilasjonstårn, dagsone og tunnelstrek med umiddelbar tilknytning til dagsonen (opp til 60 m inn i tunnellopene fra dagsonen). Resterende tunnelstrek, tårn og ramper i Operatunnelsystemet og konsekvenser for tunnel- og portalkonsentrasjoner i andre deler av tunnelsystemet er kun delvis omtalt og ikke utredet i detalj.

På grunn av måletekniske begrensninger kunne ikke referansemålinger av PM utføres i tunnel, heller ikke NO₂-målinger i tunnel. Målingene utført i tunnelen var punktmålinger. Parametrene antas å

varierte over tunnelverrsnittet. Variasjonen av parametrene ved målepunktene er relevant i prosjektet.

Optimalisert styringsregime for ventilasjonstårnene angir kun prinsipielle føringer og forslag av hensyn til forurensning (primært PM_{10}). Hensyn til og samspillseffekter for den langsgående ventilasjonen (impulsvifter) var ikke en del av oppdraget og er ikke vurdert i detalj. Drift av impulsventilatorene i måleområdet ble tatt med i vurderingen av effekten av ventilasjonstårnene. Impulsventilatorene var knapt i drift i måleperioden.

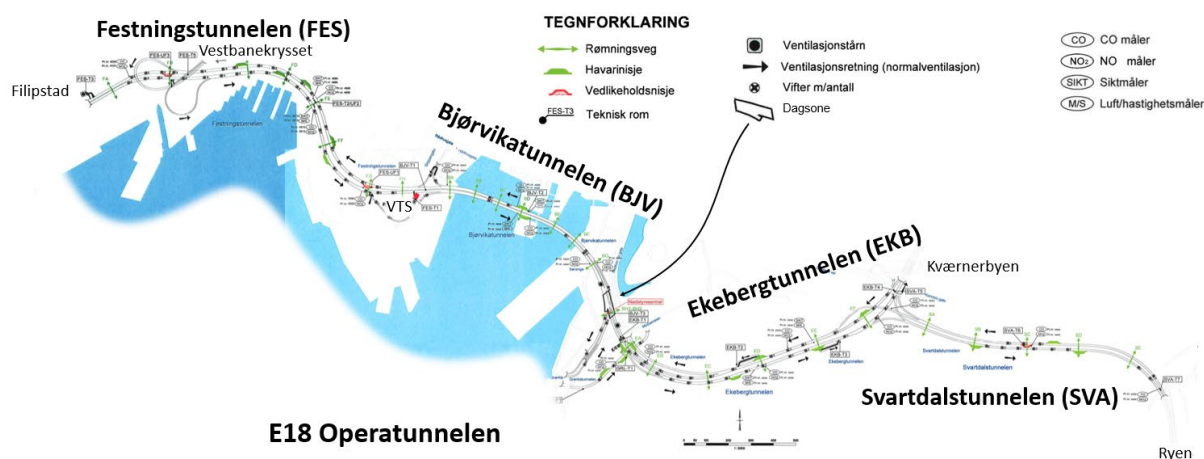
Funksjonsbeskrivelse og programmering av styringssystemet er ikke en del av oppdraget, heller ikke hensyn og konsekvenser for brannventilasjon. Styringsregimet for ventilasjonen er kun studert for normal drift, ikke for spesielle forhold/hendelser som f.eks. brann.

Ytre forhold (dvs. meteorologiske forhold og luftforurensning i Oslo) har en stor effekt på svevestøv-konsentrasjonen i tunnelen og utskiftning mellom dagsonen og utemiljøet. Resultatene fra målekampanjen (og vurderinger) baserer seg på fremherskende forhold under målekampanjen. Disse var riktignok typiske for årstiden, men det understrekes at ikke alle mulige værforhold, særlig inversjonsepisoder, ble observert i måleperioden. Derfor kan effekten av ventilasjonstårnene under inversjonsforhold bare vurderes i et begrenset omfang.

2 Operatunnelen

2.1 Utforming av tunnelsystemet

Operatunnelen er en 5,7 km lang tunnel i Oslo som strekker seg fra Filipstad i vest til Ryen i øst. Den består av flere sektorer som går over i hverandre: Festningstunnelen, Bjørvikatunnelen, Ekebergtunnelen og Svartdalstunnelen. Ved Sørenga, mellom Bjørvikatunnelen og Ekebergtunnelen er det en strekning som går under åpen himmel som refereres til som dagsone¹. Figur 1 gir en oversikt over hele Operatunnelen.



Figur 1: Oversikt over hele Operatunnelen. Måleprosjektet fokuserer på området Bjørvikatunnelen – Ekebergtunnelen, inklusive dagsone. Figuren er gitt i større format i Vedlegg C.

Forkortelsene i figuren er benyttet i denne rapporten. I tillegg skilles det mellom østgående og vestgående retning med «Ø» og «V», eksempelvis BJV Ø for Bjørvika østgående.

2.2 Dagsonen

I grensesnittet mellom Bjørvika- og Ekebergtunnelen er det et strekk på ca. 106 m lengde (og ca. 28 m bredde) som er bygget uten tak (åpen løsning), som utgjør en brann- og røykteknisk skillesone. Denne dagsonen har et areal på ca. 3000 m². Nord og sør for dagsonen er det plassert ca. 40 m høye doble ventilasjonstårn. Det ene paret på sporområdet til Østfoldbanen er koblet til vestgående løp i Ekebergtunnelen, og det andre paret nærmere Sørenga er koblet til østgående løp i Bjørvikatunnelen. I den tidligere planbeskrivelsen for reguleringsplanen for «Byutvikling i Bjørvika – Bispevika – Lohavn» (Oslo kommune, PBE, 2003) ble det forutsatt og satt krav til tilstrekkelig dimensjonering av viftekapasitet i ventilasjonstårnene slik at dagsonen ikke skulle bli en utlufting av tunnelen, men i stedet et innsug av frisk luft. De høye konsentrasjonene registrert utenfor dagsonen i forbindelse med tidligere målinger tyder imidlertid på at dette ikke fungerer slik som forutsatt i reguleringsplanen. Undersøkelser av driften av ventilasjonstårnene har også indikert at de driftes forholdsvis lite, slik at det bare er små luftvolum som trekkes ut av tårnene (Berge og Kravik, 2018). Dagsonen utgjør dermed en lokal utslippskilde der forurensning fra Operatunnelen transporteres opp og ut gjennom dagsonen. Målinger av luftbevegelsene over dagsonen fra oktober og november 2017 (Berge og Kravik, 2018) viser at det først og fremst er turbulente bevegelser som transporterer forurensning ut av dagsonen. Målingene viser også at turbulensen varierer med trafikkmengdene i tunnelen og vindforholdene utenfor dagsonen, samt posisjon i dagsonen.

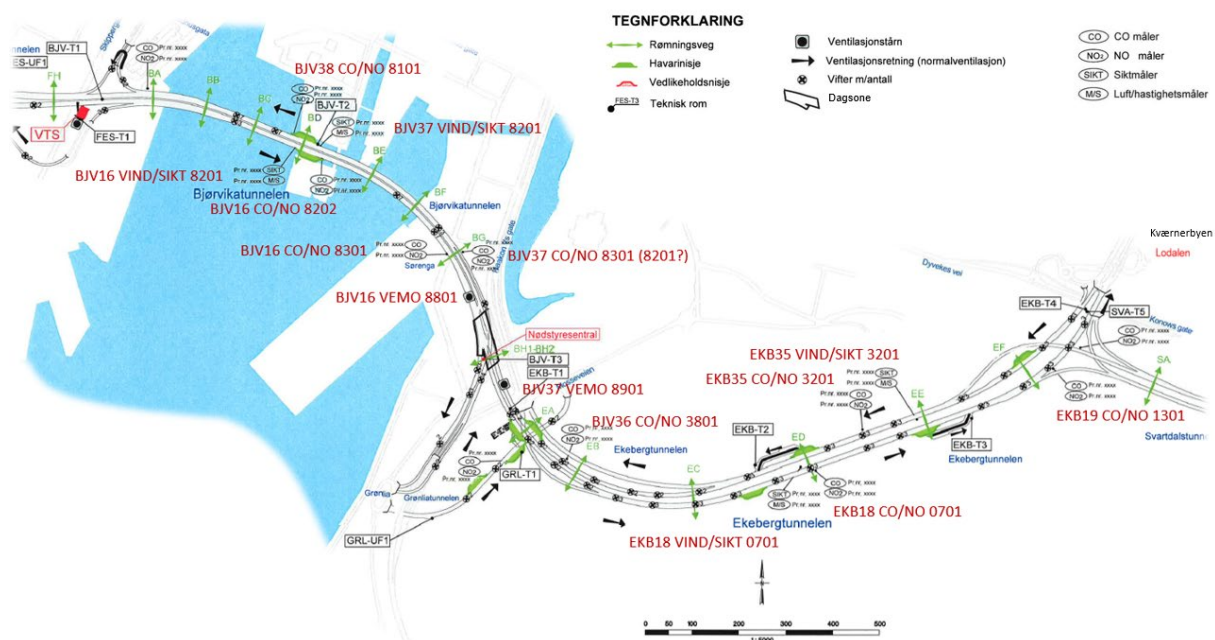
¹ I mange rapporter er dagsonen referert til som kulvert.

2.3 Eksisterende ventilasjon og drift av anlegget

Ventilasjonsanlegget i Operatunnelen består av impulsvisfer for langsgående ventilasjon i taket, som er jevnt fordelt langs tunnelens lengde, og ventilasjonstårn plassert nord og sør for dagsonen ved Sørenga, ved Havnelageret og ved Filipstad. I tillegg til å være en viktig sikkerhetsinstallasjon som benyttes til å styre røyk ved en brann eller røykutvikling inne i tunnelen, er hensikten med ventilasjonsanlegget også å sikre god luftkvalitet i tunnel og i omgivelser. Mens den langsgående ventilasjonen sikrer gjennomlufting og uttynning av forurensningen fra trafikken, er tårnventilasjonens primære oppgave å sikre at luften i omgivelsene rundt dagsonen tilfredsstillende relevante krav til luftkvalitet. I tillegg til å være et sentralt element for sikkerhet ved brann, vil dagsonen også fungere som tilførsel av friskluft i tunnellopene med retning fra dagsonen i vestgående og østgående retning.

2.3.1 Eksisterende sensorer

Statens vegvesen overvåker sikt, vindhastighet, CO- og NO-konsentrasjon i Operatunnelen med fastinstallerte sensorer som vist i Figur 2. CO- og NO-konsentrasjon målt flere steder i Operatunnelen styrer tunnelventilasjonen (se kapittel 2.3.2). ID-koden til hver av sensorene er gitt i figuren med rødt skrift.



Figur 2: Oversikt over lokasjonene av Statens vegvesens CO-, NO-, vind- og siktsensorer i Bjørvika- og Ekeberg tunnelen. Lokasjon av ventilasjonsenheter er også vist. Tegningen er fra 2009, faktisk posisjon for teknisk utstyr kan avvike fra tegningen, spesielt for Ekeberg tunnelen som ble oppgradert i 2019.

Sikt er et mål for lysforhold/sikt i tunnelen. Sikt måles med én sensor per tunnellop og tunnelavsnitt (se Figur 2). Det brukes sensorer av typen SICK VISIC 620 som baseres på lysspredning. Sensoren leverer data for synsvidde med enhet m, som regnes om i driftssystemet til mg/m^3 etter en standard formel for å angi støvmengde i luften. Siktmålerne i Operatunnelen benyttes ikke til styring av ventilasjonen. Tillatt siktforurensning i tunneler ifølge håndbok HB021 (SVV, 2006) er $1,5 \text{ mg}/\text{m}^3$. Oppdaterte tallverdier fra håndbok HB-N500 (SVV, 2020a) er $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} og $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\text{PM}_{2.5}$. Disse parameterne måles imidlertid ikke i Operatunnelen.

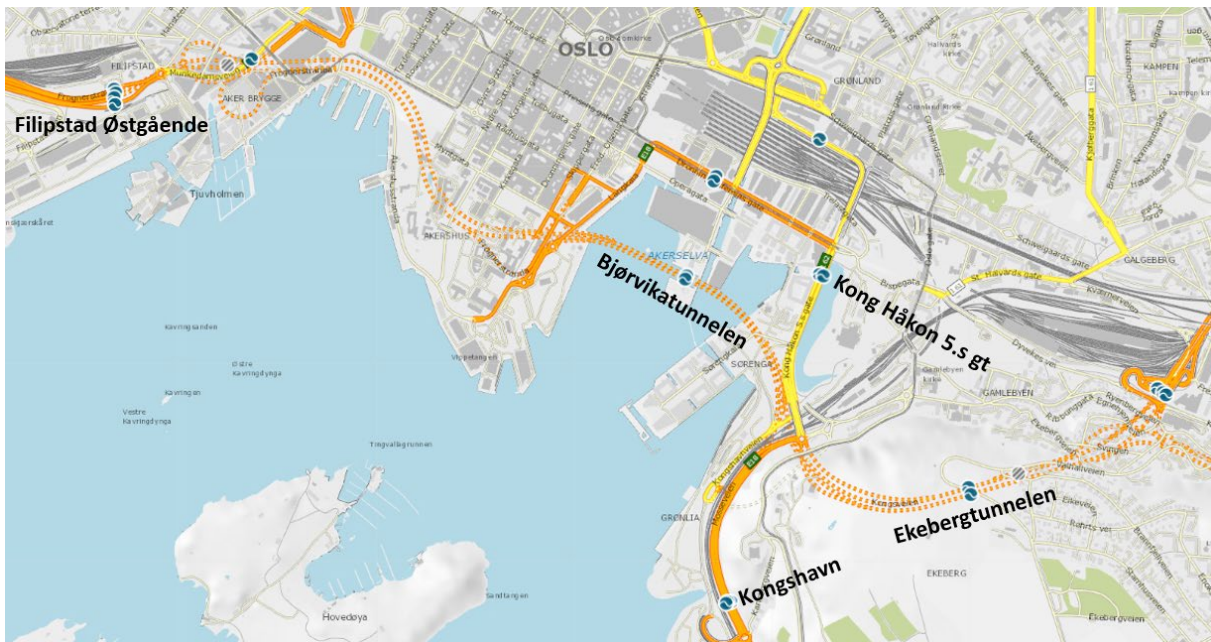
Vind-/strømningshastigheten i tunnellopene måles med en sensor av typen SICK FLOWSIC200. Sensoren sender og mottar ultralydpulser over en strekning diagonal over tunnellopet for å måle strømningshastigheten. Sensorene er montert i østgående og vestgående løp i henholdsvis Ekeberg tunnelen, Bjørvikatunnelen og Festningstunnelen (se Figur 2).

CO- og NO-konsentrasjon i Operatunnelen måles med elektrokjemiske sensorer fra Dräger. Både CO- og NO-konsentrasjon i tunnellopene brukes til styring av tårnventilasjonen og langsventilasjonen. En oversikt over setverdiene for oppstart av ventilasjonen i området vest og øst for dagsonen er gitt i Figur 4. CO- og NO-målere er plassert på ulike steder gjennom tunnelen i vestgående og østgående løp, illustrert i Figur 2 for området Bjørvikatunnelen – Ekeberg-tunnelen. Målingene oppgis som blandingsforhold i ppm (parts per million by volume). Disse kan regnes om i mg/m^3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) med antagelser om temperatur og trykk. I dette prosjektet undersøkes data fra CO- og NO-sensorene i Bjørvika- og Ekeberg-tunnelen for å vurdere deres egnethet (i kombinasjon med setverdiene) til å styre tårnventilasjonen. Gass-sensorene i Ekeberg-tunnelen ble byttet ut ved tunnelens rehabilitering i 2019 (Dräger Polytron 7000), mens sensorene i Bjørvikatunnelen (Dräger Polytron 2) har vært i drift siden installasjon i 2010. Levetiden på sensorene angis som 8 år for CO-sensorene og 5-6 år for NO-sensorene². SVVs retningslinjer for plassering av gass-sensorer i tunneler er gitt i HB V520 Tunnelveiledning (2020b). Det er blant annet nevnt at NO-sensorer kan brukes i eksisterende tunneler, men det anbefales at de erstattes av NO₂-sensorer ved oppgradering av anleggene. Nye måleinstrumenter for kontroll av luftkvalitet i tunneler er angitt å dekke følgende måleområder:

- NO₂: 0 – 5 ppm, tilsvarende 0 – 10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (NO₂ er ikke målt i Operatunnelen)
- NO: 0 – 50 ppm, tilsvarende 0 – 100 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- CO: 0 – 200 ppm, tilsvarende 0 – 240 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- PM_{2.5}: 0 – 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{2.5} er ikke målt i Operatunnelen)

Trafikkregistrering er utført over det statlige og fylkeskommunale vegnettet i hele landet. Statens vegvesen overvåker både trafikkvolum og trafikkhastighet i tunnellopene og langs veiene på bakkenivå. Figur 3 gir oversikt over lokasjon av trafikkensensorene i omgivelsene av måleområdet. Trafikkvolumet i Operatunnelen er målt i Svartdalstunnelen nær portalen på Ryen, ved portalen ved Lodalen, midt i Ekeberg-tunnelen, midt i Bjørvikatunnelen og ved portalen på Filipstad, i begge kjøreretninger/tunnellop. Dataene er tilgjengelige med 1 times tidsoppløsning fra Statens vegvesens dataportal Trafikkdata (<https://www.trafikkdata.no/>). Hvilke målepunkter som ble benyttet til analyse av trafikkmengde (kjt/t) og kjørehastighet (km/t) under målekampanjen er angitt i figuren ved navn. Ved tellepunktene registreres hastighet og trafikkvolum i alle kjørefelt. Det skilles på kjøretøytype ut fra lengde. Registrert trafikkhastighet ble levert av SVV.

² Referanse: Datablader fra og samtale med Dräger Norge AS v/Dag-Inge Johnsen (august 2020)



Figur 3: Oversikt over lokasjoner av sensorer for trafikkteiling og trafikkhastighetsmåling (<https://www.trafikkdata.no/>).

2.3.2 Langsgående ventilasjon

Ventilasjonsanlegget i Operatunnelen er dimensjonert for å kunne oppnå røykkontroll ved brann og kan benyttes til å sikre gjennomlufting av tunnelen når medrivning av luft fra trafikken ikke er tilstrekkelig. Nødvendig ventilasjonskapasitet (lufthastighet) oppnås ved bruk av impulsvifter.

Brannventilasjon aktiveres fra Statens vegvesens Vegtrafikksentral (VTS) ved at ferdigprogrammerte brannplaner setter i gang ulike viftedrift avhengig av hvor i tunnelen hendelsen oppstår³.

Den langsgående ventilasjonen styres i dag etter konsentrasjonsnivåer av CO og NO, regulert i ulike trinn. Hvert trinn består av et gitt antall impulsvifter i ulike tunnelseksjoner.

2.3.3 Ventilasjonstårnene

Ventilasjonstårnenes primærfunksjon er brannsikkerhet. Ventilasjonstårnene skal frakte forurenset luft ut av Bjørvikatunnelen østgående og Ekeberg tunnelen vestgående. Hvert tårn består av to «piper» med 4 vifter i hver, totalt 8 vifter for hvert tunnelløp. Viftene er vertikalmontert med en maks kapasitet på 50 m³/s, med mulighet for totrinns hastighetsregulering. For å oppnå tilstrekkelig lufthastighet ut av tårn, samt å unngå uheldige trykkforhold eller tilbakestrømning, driftes hver kvartett av vifter med lik hastighet og luftmengde. Viftene ventilerer 25 m³/s ved 14 kW og 50 m³/s ved 55 kW. Det vil altså være mer energiøkonomisk å drifte flere vifter på halv kapasitet enn noen vifter på full kapasitet. Dette vil også være mindre belastende for viftesystemet og føre til mindre slitasje.

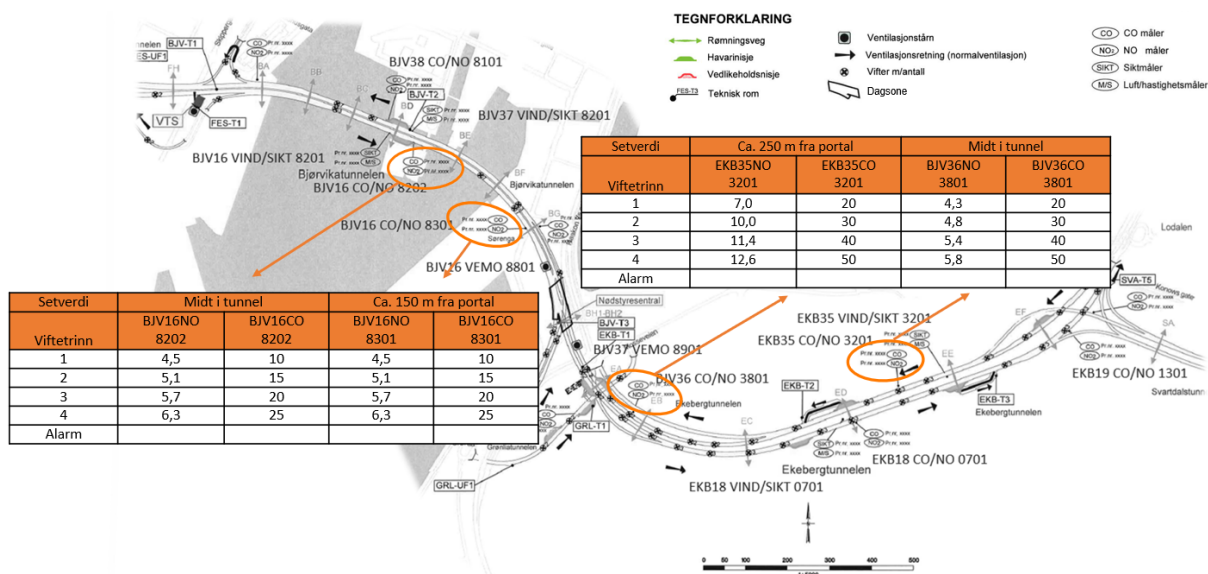
³ Ved deteksjon av brann i Operatunnelen skal brannventilasjonen settes i gang av VTS. Hvilke vifter som kjøres og om de skal reverseres, avhenger av hvor i tunnelen det brenner. Forhåndsprogrammering eller forhåndsinnstilling av viftene utføres slik at VTS kun trenger å forholde seg til hvor det brenner. Tunnelnettverkets kompleksitet, med en rekke inn- og utramper, medfører at en koordinert styring av viftene må foretas for å oppnå hensiktsmessig røykkontroll med tilstrekkelig kapasitet.

Tårnene kjøres på fire ulike trinn:

- Trinn 1: Et av tårnene kjøres på halv hastighet (100 m³/s)
- Trinn 2: Begge tårnene kjøres på halv hastighet (200 m³/s)
- Trinn 3: Et tårn på halv hastighet og et tårn på full hastighet (300 m³/s)
- Trinn 4: Begge tårn kjøres på full hastighet (400 m³/s)

I denne rapporten har vi innført Trinn 0 som betegner at tårnene ikke er i drift.

Statens vegvesen opplyser at eksisterende tårn normalt styres «parallelt» med impulsventilene i tunnelen. Figur 4 oppsummerer dagens setverdier for ventilasjonsstart for både langsgående ventilasjon og ventilasjonstårn. Setverdiene angir konsentrasjonsterskler for CO- eller NO-konsentrasjon i tunneløpene som utløser respektive ventilasjonstrinn. Det antas ut fra krav i *Håndbok N500* (SVV, 2020a) og føringer i *Spesifikasjon OPC grensesnitt for Trafikkstyresystem i VTS* (Vegtrafikksentralen, SVV, 2020c) at setverdiene må være overskredet i minst 15 minutter før ventilasjonen setter i gang.



Figur 4: Setverdier (ppm ^{footnote 4}) for ventilasjonsoppstart i BJV Ø og EKB V etter dagens styringsregime.

Spesifikasjon OPC grensesnitt for Trafikkstyresystem i VTS anbefaler at «tårn gis egne parametere for oppstart, som er lavere enn impulsventilene i hovedløp basert på NO-målinger i løpet». Det ble bekreftet av SVV at sjaktventilatorene skal starte ved ca. 90 % av setverdi for impulsventilatorene. Videre anbefales det at verdiene overvåkes og justeres etter driftserfaringer. SVV Håndbok V520 anbefaler for eksisterende tunneler uten NO₂-måling at startverdiene for NO justeres i takt med utvikling i NO₂-utslipp.

Setverdiene i Bjørvikatunnelen virker å være ujustert siden tunnelåpningen i 2010. I Ekeberg tunnelen antas det at verdiene er tilpasset etter en tidligere utgave av håndbøkene. Forslag til oppdatering og tiltak ved fremtidige oppgraderinger er gitt i kapittel 5.2. Etter målekampanjen, i april 2021, meddelte SVV at setverdiene for CO ble justert iht. dagens krav.

2.3.4 Tunnelvask

Vegtunnelene vaskes og feies regelmessig som tiltak for å redusere svevestøvproblematikken. I Operatunnelen blir det generelt utført *halvvask* (se Tabell 1) én gang per måned. To ganger per år

⁴ Omregningsfaktorer fra ppm ved standard temperatur og lufttrykk er: 1 ppm NO = 1250 µg/m³, 1 ppm CO = 1,17 mg/m³.

utføres det *helvask*. I kalde perioder, med frost gjennom tunnelen, er det ikke mulig å spyle/børste veibanen eller vegger. Også feiing foregår i frostperioder med så lite vann som mulig. For ikke å forstyrre/ødelegge målingene og måleinstrumentene under målekampanjen, ble opprinnelig vaskeplan revidert, med avtale om at så lite vask som mulig/forsvarlig skulle utføres i området/tunnelløpene rundt dagsonen.

Tabell 1: Oversikt over ulike typer vask i Operatunnelen.

	Spyling	Feiing*
Teknisk vask (**)	- Skilt - Sikkerhetsinstallasjoner - Veibane	- Bankett - Veibane
Halvvask (1 gang per måned)	- Skilt - Sikkerhetsinstallasjoner - Veibane - Vegger	- Bankett - Veibane
Helvask (2 ganger per år)	- Skilt - Sikkerhetsinstallasjoner - Veibane - Vegger - Tak Dette foregår med børster	- Bankett - Veibane
Feiing (hver 14. dag)		- Veibane Befuktet veibane Miljøtiltak (ikke i tunnel)

* Feiing utføres med befuktet veibane og supersugere

**Teknisk vask gjennomføres vanligvis ikke i Operatunnelen, da dette inngår i halvvask og helvask.

Før målekampanjen ble det utført vask i Festningstunnelen og Bjørvikatunnelen vestgående (7. januar) og i Ekeberg tunnelen østgående (14. januar). Feiing som var planlagt i uke 3 (19. januar) uteble. I uke 3 ble det utført teknisk⁵ vask i Ekeberg tunnelen vestgående (22. januar kl. 00:00 – 05:00), men aktiviteten stoppet ved tverrforbindelse EA (ca. 150 m øst for dagsonen) for å skåne måleutstyret. Ingen vask ble utført i Operatunnelen i uke 4 og 5. I uke 6 (10. februar og 11. februar) ble det utført vask i Svartdalstunnelen (over 1,5 km øst for måleområdet). Ingen vask ble utført i Operatunnelen i uke 7 og 8. I uke 9, dvs. etter målekampanjen, ble samtlige deltunneler i Operatunnelen vasket.

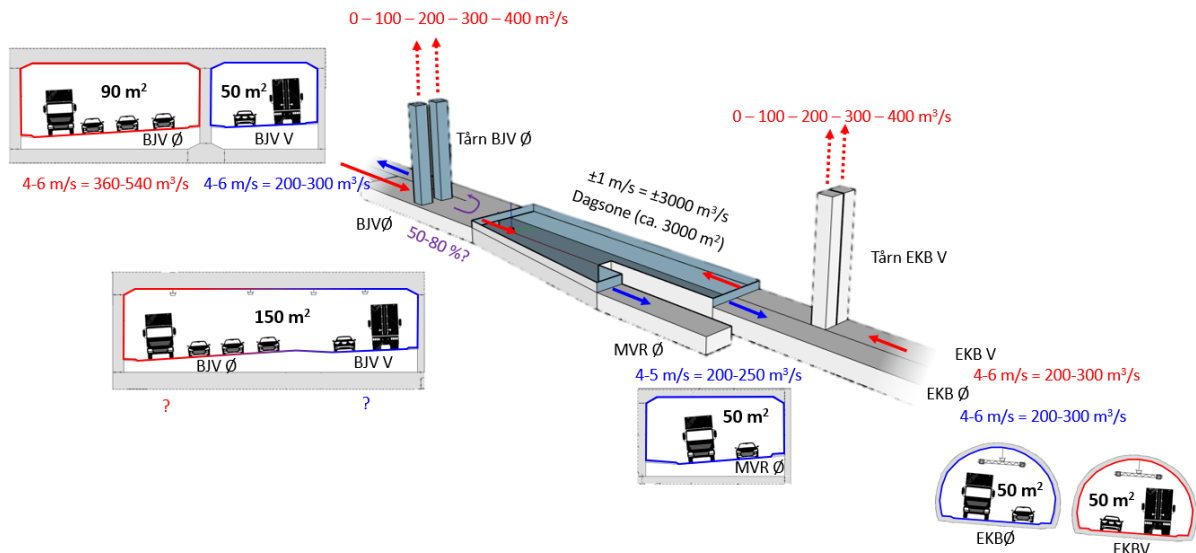
2.4 Strømningsmønstre og massebalanse

2.4.1 Arealer, luftmengder og hastigheter

For å kunne redusere luftforurensning fra dagsonen, må man få kontroll på lufthastigheter og -mengder. Strømningsmønster for luft kan sammenliknes med strømningsmønstre for vann. Utløp vil ha turbulent strømningsmønster i stor utstrekning, mens innløp vil ha et ryddigere strømningsmønster i mindre utstrekning.

Figur 5 viser en prinsippskisse av dagsonen med tilknyttede tunneler og ventilasjonstårn. For å illustrere størrelsesforholdene vises i tillegg eksempler på forventede tunnelvolumstrømmer basert på arealer og observerte lufthastigheter (på dagtid, uten tårndrift). Røde piler indikerer luft tilført dagsone (tunnelutløp), mens blå piler indikerer luft trukket ut (tunnelinnløp).

⁵ Ettersom det var frost gjennom tunnelen store deler av måleperioden var det ikke mulig å spyle/børste veibanen eller vegger. Feiingen foregikk med så lite vann som mulig.



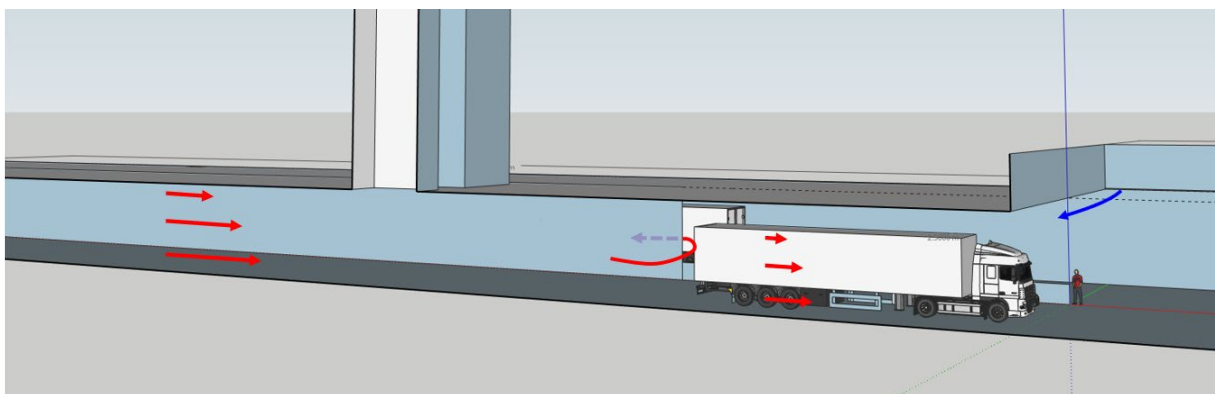
Figur 5: Prinsippskisse av dagsonen, tilknyttede tunneler og ventilasjonstårn.

Dynamikken i luftstrømmene nede i tunnel og dagsone er i stor grad dominert av trafikken. Mengden luft som går opp og ned fra dagsone, og som potensielt bidrar til økt forurensning i planområdet rundt åpningen, er i stor grad avhengig av vær-, vind- og temperaturforhold. I Bjørvikasystemet vil trafikken i tillegg bidra til turbulens og lokale strømningsvariasjoner.

2.4.2 Uten tårnventilasjonsdrift

Når ventilasjonstårnene i Bjørvika østgående ikke er i drift (Trinn 0) vil luft fra BJV Ø utløp gå mot dagsonen. I den siste delen av Bjørvikatunnelen opphører tunnelveggen som skiller østgående og vestgående løp, for å ivareta mulighet for etablering av tovegstrafikk i tunnelene med krysningsfelt. Denne åpningen mellom løpene (ca. $30 \times 5 \text{ m}$), fører til at en stor andel av luften fra BJV Ø vil kortslutte (resirkulere) over i BJV V. Hvor stor andel av luften som kortslutter vil avhenge av flere faktorer, men det antas at rundt 50-80 % av luften vil kunne trekkes inn i BJV V og gå mot Filipstad (Norconsult, 2021; Norconsult, 2017). Resterende luft vil trekkes med trafikken ut av portal fra BJV Ø og ende opp i dagsonen.

Dersom veggen hadde gått helt frem til dagsonen ville graden av kortslutning blitt redusert. Dette ville ha ført til mer spredning til dagsonen og mindre spredning til BJV V.



Figur 6: Prinsippskisse av mulig strømningsmønster og kortslutning mellom Bjørvikatunnelen østgående og vestgående løp uten tårnventilasjonsdrift (Trinn 0).

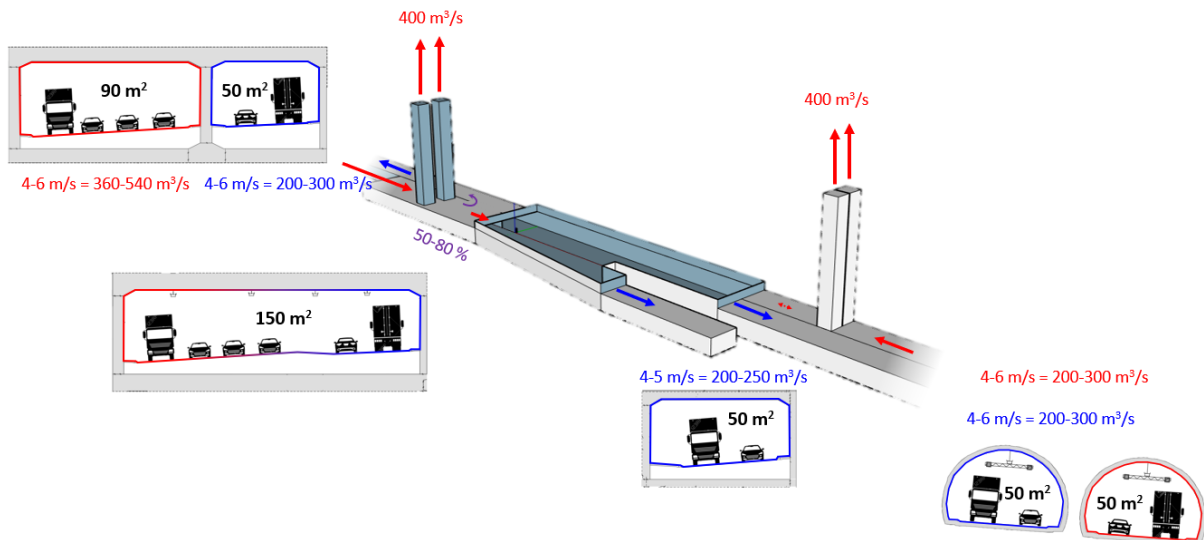
Portalene for BJV V, MVR Ø og EKB Ø vil trekke noe av dagsone luften med seg videre i trafikketningen. I innløpene vil en andel av luften komme fra dagsone øvre sjikt, hvor det er forventet lavere konsentrasjoner enn langs vegbanen (i trafikkkrommet).

Når ventilasjonstårnene i øst ikke er i drift (Trinn 0) vil all luft fra EKB Vs utløp gå mot dagsonen. Her er tunnelene fysisk adskilt helt ut mot dagsonen, med en avstand på ca. 4-5 m mellom utløp (EKB V) og innløp (EKB Ø), og en mindre grad av direkte kortslutning forventes.

I selve dagsonen vil luft gå opp eller ned avhengig av trafikk, vær-, vind og temperaturforhold (se kapittel 4). De møtende luftstrømmene fra BJV Ø og EKB V, sammen med overtemperatur på tunnelutløpsluften, antas å være den største årsaken til at luft presses opp fra dagsonen og velter ut (Norconsult, 2021).

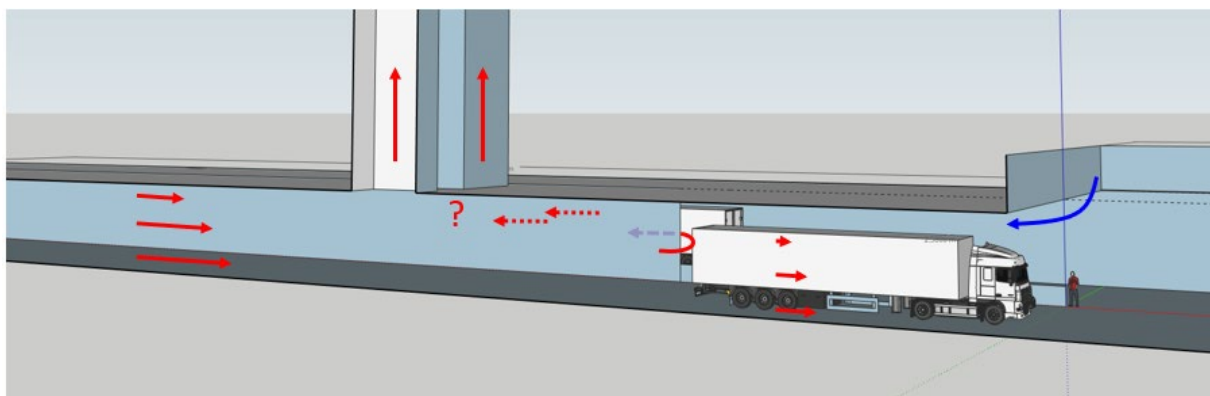
2.4.3 Med tårnventilasjonsdrift

Figur 7 viser forventede luftvolumstrømmer ved maksimalt driftstrinn for ventilasjonstårnene.



Figur 7: Prinsippkisse av forventede luftvolumstrømmer ved maksimalt driftstrinn (Trinn 4) for ventilasjonstårnene.

Ved maksimal luftmengdekapasitet på tårnene i vest vil man være i stand til å trekke store deler av luften fra BJV Ø ut av tunnelsystemet, men luftmengden i tunnelen oppstrøms tårnet overgår luftmengden i tårnet, så resterende luft vil strømme ut i dagsonen eller smitte over i BJV V. Tårnene er plassert nær portalene (ca. 50 m). En viss fordeling av hastighetsprofilen med motgående luft øverst i tverrsnittet (mot taket) og utgående luft langs vegbanen (i trafikkrommet) kan forventes under drift av ventilasjonstårnene.

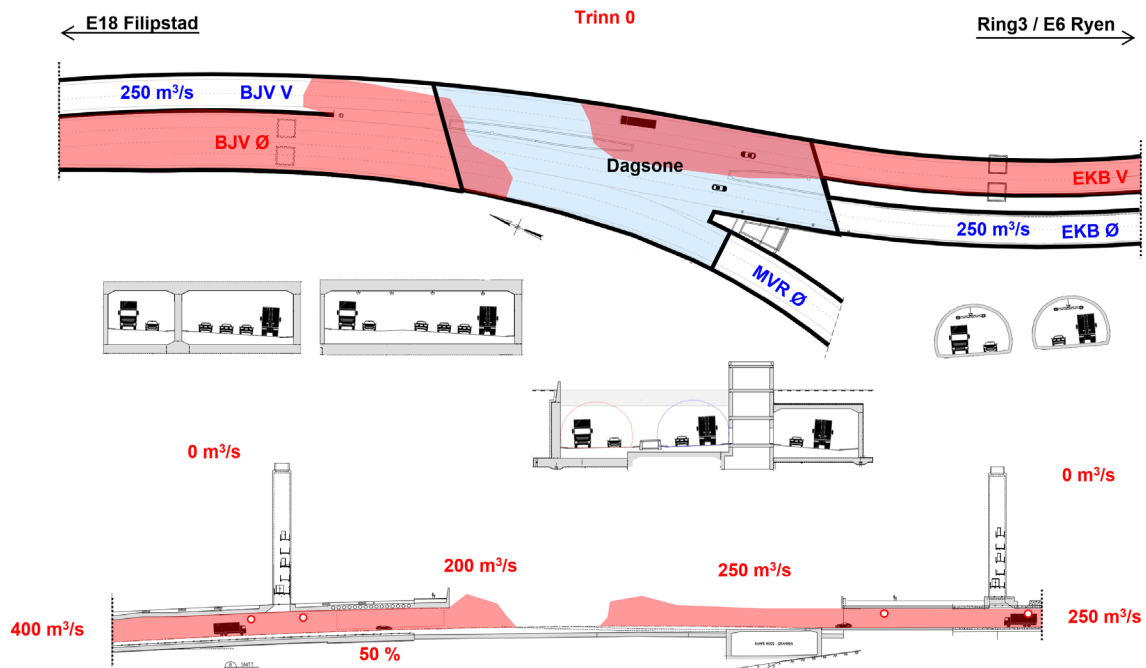


Figur 8: Prinsippkisse av mulig strømningsmønster og kortslutning mellom Bjørvikatunnelen østgående og vestgående løp med tårnventilasjonsdrift (Trinn 4).

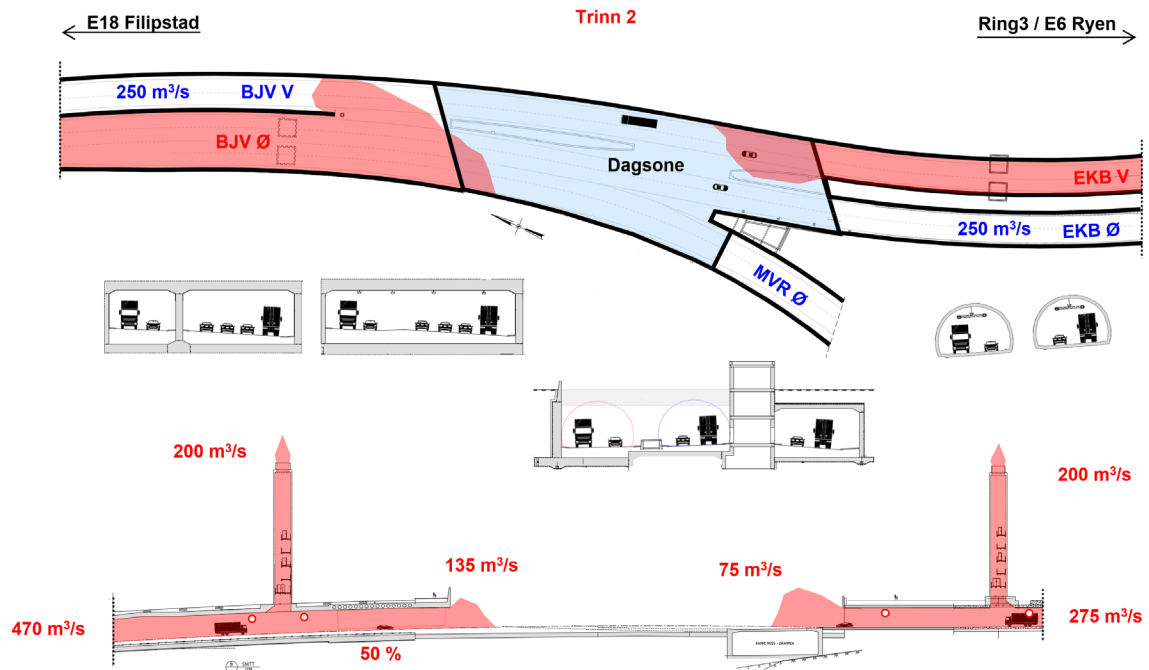
I øst har tårn EKB V tilsvarende luftmengdekapasitet som tårn BJV Ø, men man ventilerer her et løp med mindre tunneltverrsnitt (areal) og luftmengder oppstrøms tårn. Det forventes derfor at tårnet er i stand til å håndtere all luft som går i trafikkretningen mot dagsonen (se Figur 5 og Figur 7). Selv med

overkapasitet på tårnene, kan det ikke forventes at luft trekkes kontinuerlig inn fra dagsone i hele tverrsnittet. Trafikk og ytre påvirkninger (vind) vil føre til at luften vekselvis går inn eller ut. Hvor mye forurensning som havner i dagsonen er avhengig av hvor mye som trekkes av i tårn.

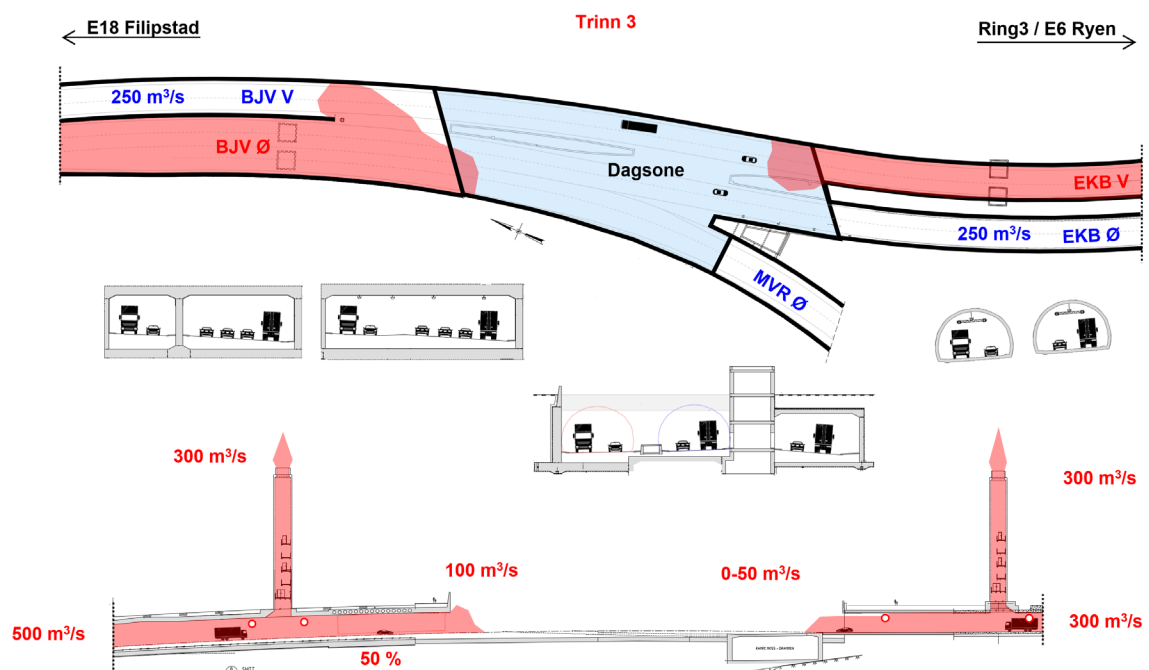
De etterfølgende figurene er prinsipielle tegninger som illustrerer strømningsmønsteret og samspillet (i luftmengder) mellom tunnellop, dagsone og tårn ved fri trafikkflyt, avhengig av hvilket trinn tårnene driftes på. Med unntak av luftmengder i tårn er oppgitte volumstrømmer prinsipielle da de varierer mye avhengig av situasjonen. Resirkuleringen mellom BJV Ø og BJV V er illustrert med 50 % for alle tilfeller.



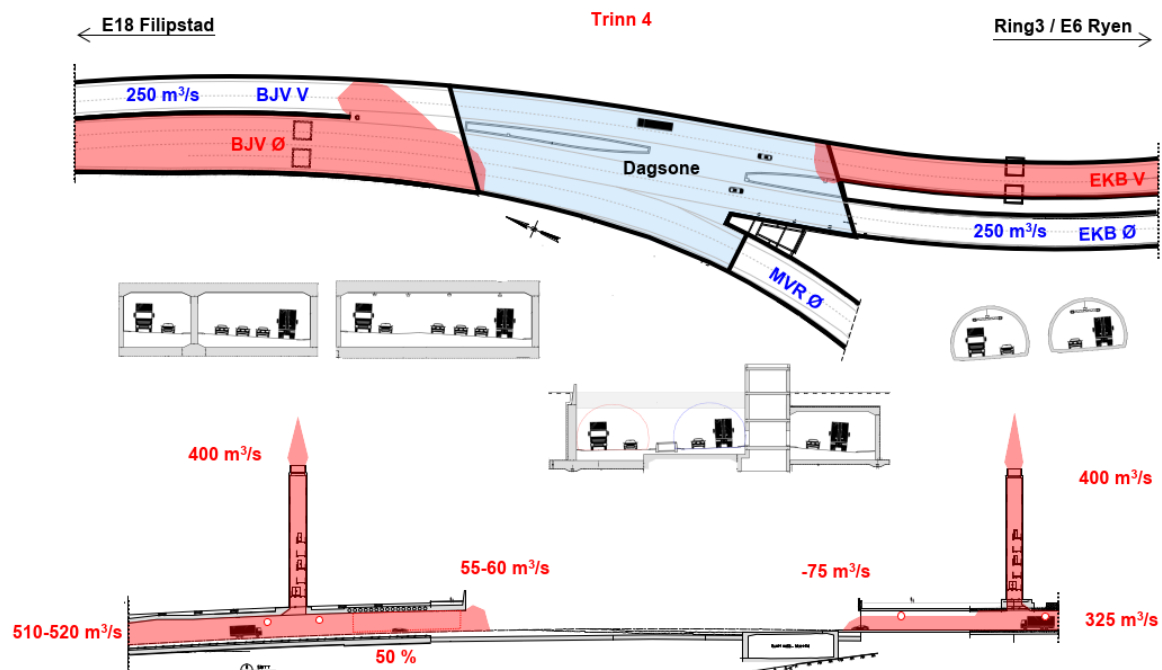
Figur 9: Eksempel på strømningsmønster og luftmengder uten tårnventilasjonsdrift (Trinn 0).



Figur 10: Eksempel på strømningsmønster og luftmengder med tårnventilasjonsdrift (Trinn 2).



Figur 11: Eksempel på strømningsmønster og luftmengder med tårnventilasjonsdrift (Trinn 3).



Figur 12: Eksempel på strømningsmønster og luftmengder med tårnventilasjonsdrift (Trinn 4).

2.4.4 Konsentrasjoner og spredning

Luftkvaliteten i tunnelen vurderes med hensyn til tunnelkrav (Statens vegvesen, 2020a). Ute på bakkenivå, der folk ferdes, gjelder grenseverdier (forurensningsforskriften⁶) og luftkvalitetskriterier (FHI, 2021). Grenseverdiene i forurensningsforskriften er rettslig bindende, og overskridelse av disse minstekravene utløser krav om tiltak for å bedre luftkvaliteten. I følge forurensningsforskriften §7-3 skal eier av anlegg som bidrar vesentlig til fare for overskridelse av grenseverdier for luftkvalitet sørge for å gjennomføre nødvendige tiltak for å sikre at grenseverdier og krav som følge av disse bestemmelser blir overholdt. I motsetning til de kravene som er nedfelt i forurensningsforskriften, er luftkvalitetskriteriene ikke juridisk bindende. En enkel måte å fremstille hvor forurenset luften er, er ved bruk av forurensningsklasser. En oversikt over grenseverdier, luftkvalitetskriterier og forurensningsklasser for PM og NO₂ er gitt i Vedlegg B.

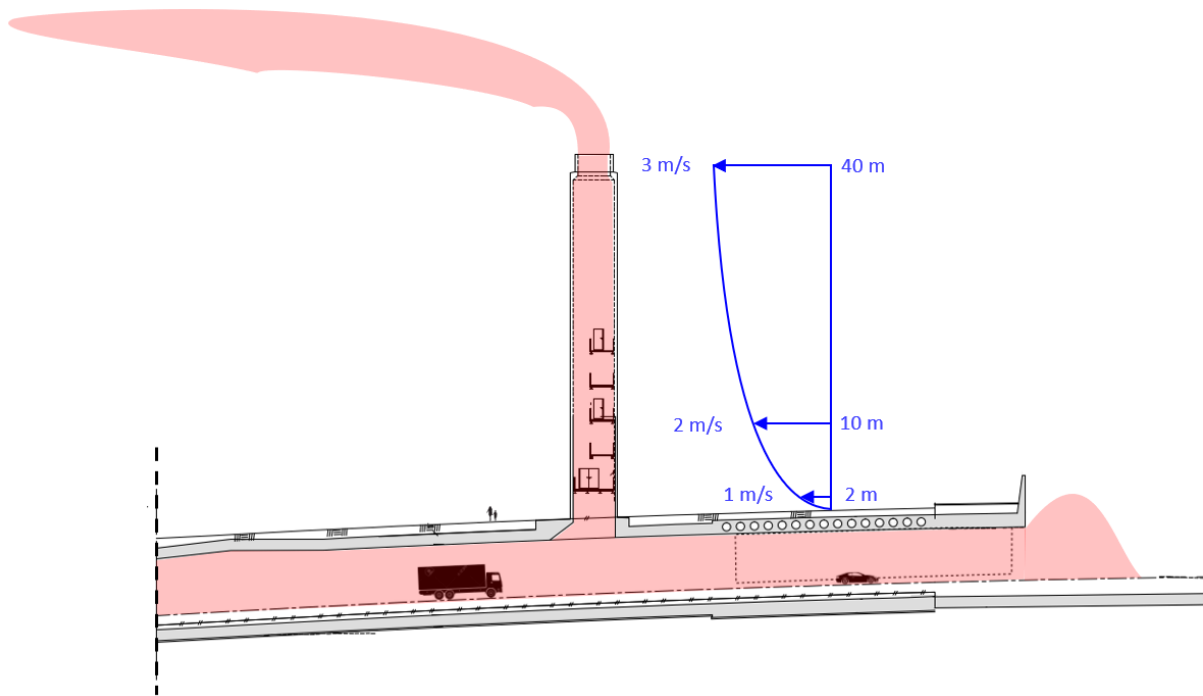
Omgivelseskonsentrasjonene ved innløpsportalene vil avgjøre hvilken «startkonsentrasjon» hvert tunnellop har. I tunnelene vil konsentrasjonene øke i lengderetning og nå maksimale nivåer i enden av tunnelen (mot utløpsportal).

Nede i dagsonen vil det forekomme innblanding og luftutveksling mot øvre del av dagsonen. I gjennomsnitt forventes konsentrasjonene derfor å avta med økende høyde.

Over og utenfor dagsonen vil konsentrasjonene avta med økende avstand som følge av uttynning og innblanding med omgivelsesluft (vind).

Figur 13 viser et forenklet eksempel på vindforhold og fordelene med ventilasjonstårn. Utslippet slippes ut i større høyde, og vil være mer uttynnet når det til slutt når bakken. Den lokale luftkvaliteten i området rundt dagsonen, på bakkenivå, vil derfor bli betraktelig forbedret dersom tunnelutslippene i større grad ventileres ut via tårnene.

⁶ https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931/KAPITTEL_3-1#KAPITTEL_3-1



Figur 13: Eksempel på tårnspredning (Trinn 2) med typisk vindprofil 2 m/s vind i 10 m høyde.

For å styre ventilasjonstårn med tanke på luftkvaliteten i omgivelsene er det ikke tilstrekkelig å kun vurdere konsentrasjoner eller luftmengder alene. Det er de to i kombinasjon, massestrømmen, som vil avgjøre om videre spredning blir problematisk med tanke på grenseverdier eller uakseptabel luftkvalitet.

Grunnet størrelsen på dagsonen vil drift av ventilasjonstårnene i mindre grad kunne kontrollere luftstrømmene som beveger seg inn og ut av dagsonen og til omgivelsene. Det drift av tårnene kan utrette er å påvirke mengden forurensning som blir tilført dagsonen fra tunnellopene.

Siden tårn BJV Ø er plassert før veggåpningen med kortslutning, vil økt tårndrift også bedre tunnelkonsentrasjonene i BJV V og i sin tur også forurensningsnivåene utenfor portaler i f.eks. Vestbanekrysset og på Filipstad. Økt tårndrift vil på samme måte kunne redusere forurensningsnivåene utenfor portaler i f.eks. Kværnerbyen eller Ryen for østgående trafikk.

3 Gjennomføring av målekampanjen

3.1 Måleutstyr

For å kartlegge ventilasjonstårnenes effekt på luftkvaliteten rundt dagsonen ble et stort antall instrumenter plassert i tunnellopene nord og sør for dagsonen, nede i dagsonen, over dagsonen og ute på bakkenivå. Måleprogrammet fokuserte på måling av luftbevegelse, PM₁₀-konsentrasjon og PM₁₀-konsentrasjonsendringer (i tid). NO₂ ble målt med NO_x-monitor nær inngangen til et av tunnellopene og med passive prøvetakere i dagsonen. På grunn av måletekniske begrensninger⁷ var det ikke mulig å måle NO₂ i tunnellopene. Datainnsamlingen fra alle måleinstrumentene i og over dagsonen og i tunnellopene var tidssynkronisert for å undersøke sammenheng mellom luftbevegelse i tunnelen og PM- og NO_x-konsentrasjoner i tunnelen og i dagsonen. Tidsoppløsningen dataene ble registrert med er avhengig av instrumenttypene. Luftbevegelse (vindhastighet) i tunnelen og over dagsonen ble logget med høy tidsoppløsning (1 sekund). PM-konsentrasjon i tunnellopene og NO_x-konsentrasjon i dagsonen ble logget med 10 s oppløsning og PM-konsentrasjon i dagsonen med 6 s oppløsning (1 sekund). Statens vegvesens fastinstallerte sensorer i tunnellopene er beskrevet i kapittel 2.3.1.

Det er viktig å nevne at målingene var punktmålinger og at både konsentrasjoner og luftstrømning varierer over tunneltverrsnittet. Men for å undersøke ventilasjonstårnenes effekt ble hovedsakelig variasjoner ved de enkelte målestedene med tiden studert.

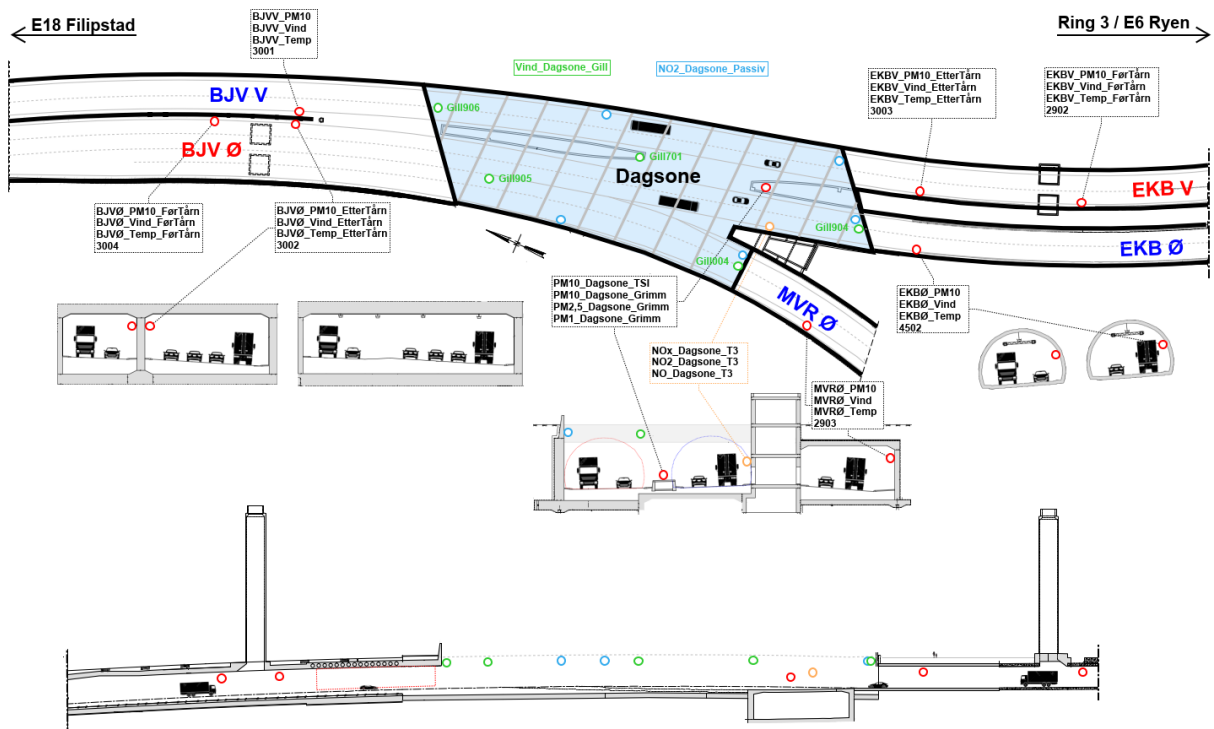
3.1.1 Plassering av instrumenter

Instrumentene ble montert på natten 11.-12. januar og 12.-13. januar av NILU sammen med Mesta AS⁸. All trafikken gjennom tunnelen var stengt så lenge monteringen i tunnellopene, i og over dagsonen pågikk. Totalt 8 kompakte PM-målere, som refereres som TSI-instrumenter i denne rapporten, ble brukt i prosjektet. 7 TSI-instrumenter ble plassert i alle tunnellop rundt dagsonen og både før og etter ventilasjonstårnene som vist i Figur 14. 7 Vaisala værsensorer var samlokalisert med TSI-svevestøvinstrumentene i tunnellopene, hovedsakelig for å måle luftbevegelse langs tunnelen. Ett TSI-instrument var plassert i dagsonen, i midtrabatten mellom vest- og østgående kjørebane (se Figur 14 og Figur 16) nær Ekeberg-portalene, samlokalisert med en Grimm EDM 180 PM-monitor (ekvivalent med referansemotoden).

TSI-instrumentene i tunnelen ble montert på tunnelveggene i 300-360 cm høyde over banketten. Inntakene til TSI-instrumentene og vindsensorene var 380 cm over banketten i tunnellop med buet tverrsnitt (Ekeberg øst- og vestgående) og 440 cm over banketten i tunnellop med firkantet tverrsnitt (Bjørsvika øst- og vestgående, Mosseveien). Figur 15 viser TSI 4502 og Vaisala vindsensor i Ekeberg østgående som et eksempel. Alle TSI/Vaisala-instrumentene i tunnellopene ble plassert på samme måte. Målingene er punktmålinger som er representative for respektive målested og gir nyttig informasjon om dynamikken i tunnellopene selv om strømningsmønsteret i tunnellopene kan variere over hele tunneltverrsnittet.

⁷ Pålitelige NO₂-målinger krever bruk av NO_x-monitor, med behov for ukentlig tilsyn (kalibrering, etc.) og behov for beskyttende målebod. Fysisk tilgang til tunnellopene var ikke mulig uten å sperre tunnelen for trafikk, og derfor lot ikke målinger seg gjennomføre.

⁸ Mesta hadde det tekniske ansvaret for monteringen og gjorde alt som ikke direkte hadde med instrumentene å gjøre (skinner, braketter osv.)



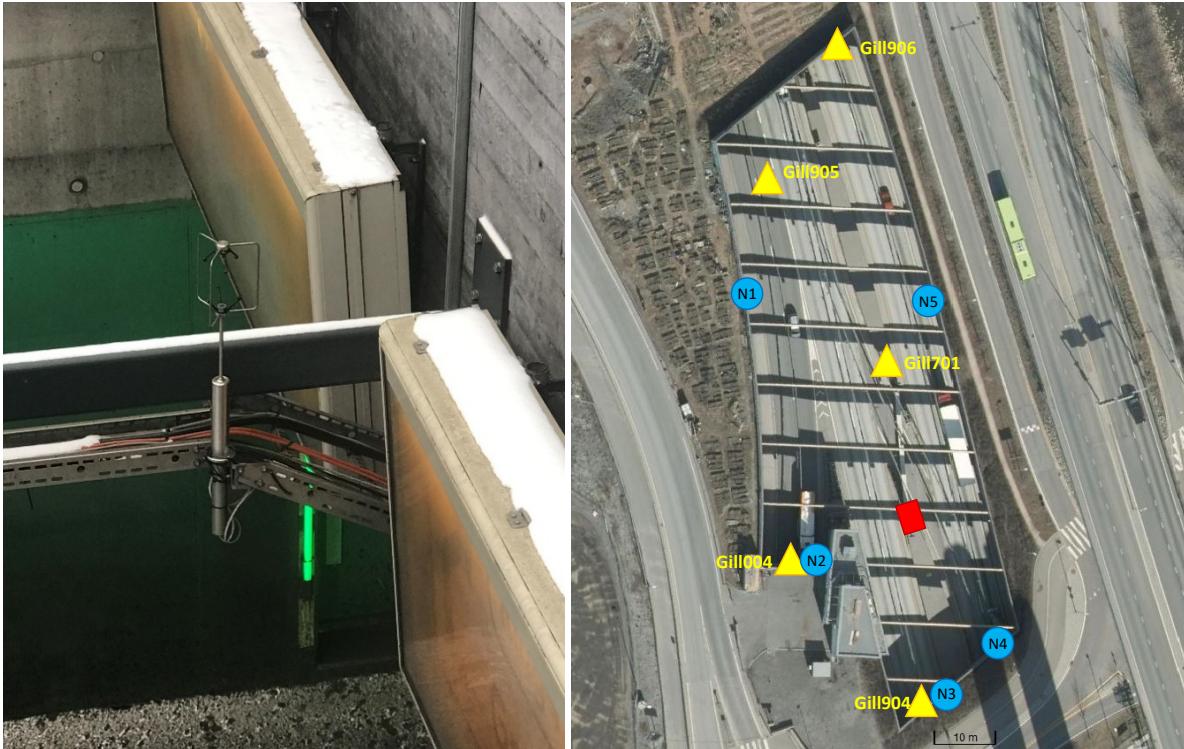
Figur 14: Skisse av dagsone og tunnelavsnittene som viser plassering av instrumentene og ID-numrene til instrumentene. En detaljert oversikt over lokasjonene av Gill-sensorene og passive NO₂-prøvetaker er gitt i Figur 16. Instrumentene var montert og operative så lenge måleprosjektet foregikk. En større versjon av figuren er gitt i Vedlegg C.



Figur 15: TSI-instrument sammen med Vaisala 2D-vindsensor montert i tunnelveggen (Ekeberg østgående). Foto: Anne-Cathrine Nilsen

Fem ultrasoniske 3D vindsensorer var utplassert over dagsonen for å overvåke lufttransporten inn og ut av dagsonen under kampanjen. Sensorene var festet ved kabelbroer og plassert ved portalene av østgående løp i Ekeberg tunnelen, østgående løp i Mosseveitunnelen og vestgående løp i Bjørvikatunnelen, samt to sensorer over dagsonen (se Figur 16) midt mellom betongbjelkene. Sensorene var festet ved kabelbroer (som vist til venstre i Figur 16), midt mellom betongstagene over dagsonen. Målingene er 3D-målinger som representerer luft på vei ut og inn av dagsonen i forhold til omgivelsene rundt.

Vindsensorene (Vaisala og Gill) ble orientert slik at retning «nord» faller sammen med kjøreretningen i tilsvarende kjørefelt, siden strømmingen i tunnelen stort sett går i kjøreretningen.



Figur 16: Ultrasoniske 3D vindsensorer (Gill) var montert ved 5 steder over dagsonen, vist med gule trekkanter. Plasseringer av passive NO₂-prøvetakere er vist med blå sirkler. Rød rektangel viser plasseringen av PM referanseinstrumentet (Grimm-monitor) som målte parallelt med ett av TSI-instrumentene.

Passive NO₂ prøvetakere var plassert ved fem steder i dagsonen (se Figur 16). Sør i dagsonen var prøvetakerne (N2, N3 og N4) plassert over tunnelåpningene. Prøvetakerne som var plassert nærmere Bjørvikatunnelen (N1 og N5) var montert cirka 10 m over kjørebane. Eksponeringstiden var ett døgn fra ca. kl. 9 om morgenen til ca. kl. 9 dagen etter, bortsett fra prøvetakerne satt ut på fredag morgen som ble eksponert til mandag morgen.

NO_x-monitoren var plassert i teknisk rom T3, et rom som ligger mellom MVR Ø og EKB Ø, på samme nivå som tunnellopene (se Figur 14 og Figur 17 for orientering). Inntaksslangen gikk rett ut av veggen ut til tunnellopet og var montert i en av kabelbruene over veibanen nær portalen til Ekeberg tunnelen østgående. Luften ble ledet til monitoren via en ca. 20 m teflonslange. NO_x-monitoren registrerte konsentrasjonene kontinuerlig. NO_x-data ble logget med 10 s tidsoppløsning.

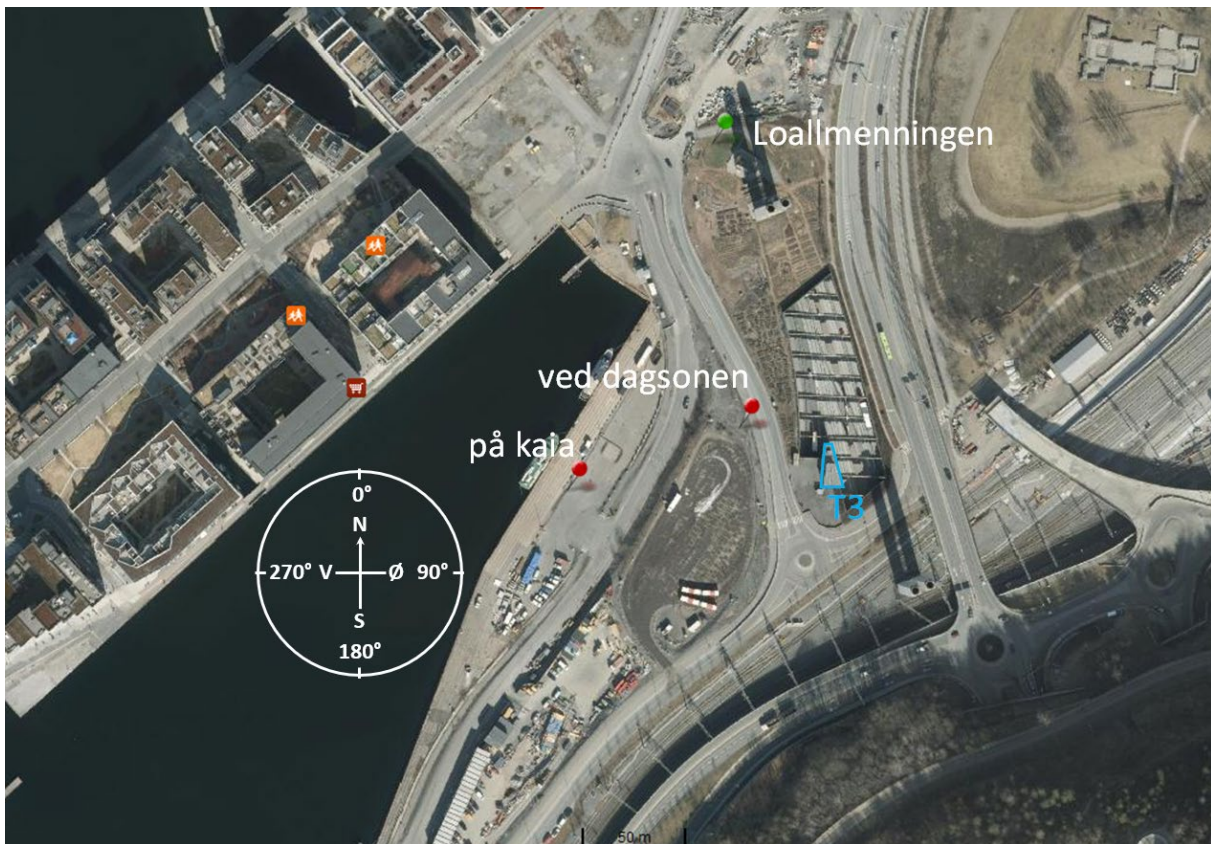
To måleboder var plassert på bakkenivå sørvest for dagsonen, henholdsvis 30 m (ved dagsonen) og 125 m (på kaia) fra kanten av åpningen (se Figur 17). Plasseringene ble valgt siden vindretningen vinterstid hovedsakelig er fra nordøst. Dermed kan området sørvest for dagsonen bli utsatt for utslipp fra dagsonen⁹ i årstiden luftkvaliteten i Oslo generelt er verst. Dessuten er det planer om bebyggelse i området sørvest for dagsonen, og det er relevant å måle effekten forurensning fra dagsonen har på luftkvaliteten i området.

Ved måleboden som er nærmest dagsonen ble det målt svevestøv (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) og meteorologiske parametere (vindretning, vindhastighet, maks vind dvs. vindkast, temperatur, relativ luftfuktighet, nedbørindikator¹⁰). Ved måleboden på kaia (Grønlikaia) ble det målt svevestøv (PM₁₀,

⁹ Med «utslipp fra dagsonen» menes forurensning med dagsonen som kilde. Dette omfatter utslipp fra forbrenningsmotorer og oppvirvlingsstøv.

¹⁰ «Nedbørindikator» er NILUs vurdering av nedbørmåleren. Sensoren oppgir nedbør i mm, men vår erfaring er at den ikke er nøyaktig nok til å brukes til dette, dvs. det vises *når* det regner, ikke eksakt hvor mye det regner.

PM_{2.5}, PM₁) med Grimm EDM 180 svevestøvmonitor (ekvivalent med referansemetoden). Hensikten med bakkestasjonene var å registrere lokal vind og eventuell påvirkning av luftkvaliteten fra dagsonen ved ulik avstand fra kilden.



Figur 17: Flybilde over området. De to bakkestasjonene sørvest for dagsonen er markert rødt. Oslo kommunes bybakgrunnsstasjon «Loallmenningen» er markert grønt. Plasseringen til T3-bygget ved dagsonen, der NO_x-monitoren var plassert, er markert i blå.

Oslo kommune har satt opp en målestasjon i nærheten i november 2020, der det måles NO_x (NO og NO₂) med NO_x-monitor og svevestøv (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) med Palas Fidas 200 svevestøvmonitor (ekvivalent med referansemetoden). Denne stasjonen «Loallmenningen» er plassert 90 m nordvest for dagsonen mot Sørenga og fremtidig bebyggelse i Bispevika. Stasjonen er klassifisert som bybakgrunnsstasjon¹¹ og er ikke direkte påvirket av utslipp fra dagsonen siden sørøstvind er hindret av Ekebergåsen.

3.1.2 Måling av svevestøv – PM₁₀

Svevestøv (PM₁₀, PM_{2.5} og PM₁) i tunnelen ble målt med 8 TSI DustTrak DRX Environmental aerosol monitorer (modell 8543), som er kompakte instrumenter designet for bruk i belastet/forurenset miljø (f.eks. anleggsplasser, prosessindustri). Instrumentene var plassert som vist i Figur 14. På grunn av kompakt design (31 x 30 x 41 cm) var det mulig å montere instrumentene til veggen i tunnellopene

¹¹ Bybakgrunnsstasjoner er plassert ved steder som er representative for den eksponeringen befolkningen i sin alminnelighet er utsatt for. Stasjonene er plassert slik at forurensningsnivået påvirkes av det samlede bidraget fra alle kilder motvinds i forhold til stasjonen. Forurensningsnivået bør ikke domineres av en enkelt kilde. Prøvetakingspunktene er representative for flere kvadratkilometer (2008/50/EF, Vedlegg III).

som vist i Figur 15. Støvinntakene til TSI-instrumentene montert i tunnelen var ugunstig plassert, det vil si for nær vegg og tak. Normalt plasseres inntak slik at luften kan sirkulere fritt, vekk fra hindringer som kan påvirke luftstrømmene. Plasseringen ble et kompromiss for å få til målinger. TSI DRX DustTrak Environmental måler svevestøv i tre størrelsesfraksjoner ved bruk av en metode basert på lysspredning av partikler. I denne rapporten diskuteres kun PM₁₀-nivåer fra TSI-instrumentene. PM₁₀-målingene ble kalibrert ihht. instrumentsammenligningen på Kjeller høsten 2020 (se kapittel 3.2). Syv TSI-instrumenter var montert i tunnellopene, ca. 15-20 m fra dagsonen og både før og etter ventilasjonstårnene (se Figur 14). Ett av TSI-instrumentene var plassert i midtrabatten i dagsonen mellom vest- og østgående kjørebane, sammen med en Grimm EDM 180 svevestøvmonitor for å sammenligne målingene med data fra et instrument som måler ekvivalent til referansemetoden. TSI-data ble logget med 10 s tidsoppløsning.

TSI-instrumentene ble automatisk nullpunkts-kalibrert hver natt kl. 3 for å korrigere eventuell drift av de målte konsentrasjonene.

I dagsonen og i målestasjonene på bakkenivå ble PM₁₀, PM_{2.5} og PM₁ målt med Grimm EDM 180 svevestøvmonitører som oppfyller visse datakvalitetsmål (Hak og Marsteen, 2019) og er godkjent for måling av lokal luftkvalitet i det norske målenettverket (ekvivalentinstrumenter).

3.1.3 Måling av NO₂ og nitrogenoksider

NO_x (nitrogenoksider) er samlebegrepet for gassene NO og NO₂. I Norge er kildene til NO_x-utslipp først og fremst forbrenning av fossilt brensel i olje- og gassvirksomhet, industrien og mobile kilder på land og til havs. Veitrafikk er hovedkilden for NO_x i norske byer. NO oksideres i uteluft etter hvert til NO₂. NO₂ kan ved høy konsentrasjon ha negative helseeffekter ved innånding og er derfor regulert med grenseverdier og luftkvalitetskriterier (se Vedlegg B). NO₂/NO_x-forholdet må tas i betraktning ved valg av setverdier for ventilasjonen, siden det måles NO i tunnelen. NO₂/NO_x-fraksjonen i utslippet av nye kjøretøy økte frem til ca. 2010 og har gått ned siden. I tillegg til at utviklingen av NO₂ og NO_x i utslippet av hele kjøretøyparken er noe forskjøvet i forhold til utslippet av nye kjøretøy, har nedgangen av NO_x-utslipp vært sterkere i de siste årene enn nedgangen av NO₂-utslippet.

Nitrogenoksider (NO_x = NO₂ + NO) ble målt med NO_x-monitor (Teledyne API 200E). NO_x-monitoren var plassert i teknisk rom T3 (se kapittel 3.1.1). Måleverdiene ble logget som 10 sek-middelverdier og lagret på logger-PCen, sammen med alle andre måledata fra tunnelen og dagsonen, slik at de ble tidssynkronisert.

NO_x-monitoren bruker referansemetoden for måling av NO₂ (NS-EN 14211:2012), dvs. kjemiluminescens. Dette er i henhold til kvalitetskriteriene for måling av NO₂ etter krav i forurensningsforskriften/luftkvalitetsdirektivet og gjør målingene sammenlignbare med andre målinger. Instrumentet krever plassering i en målebod eller et klimatisert rom som var tilfellet i T3-bygget. Målingene ble utført i tråd med kvalitetssystemet for måling av lokal luftkvalitet utarbeidet av det Nasjonale referanselaboratoriet for luft i samarbeid med Miljødirektoratet (Miljødirektoratet, 2014). Dataene ble kontrollert jevnlig i hele måleperioden via online tilgang. Instrumentet ble kontrollert ukentlig av NILU (null- og spansjekk).

Passive diffusjonsprøvetakere ble brukt for å kartlegge den gjennomsnittlige fordelingen av NO₂-konsentrasjonen i dagsonen. Prøvene ble tatt ved 5 steder rett ved eller i nærheten av portalene til tunnellopene (Figur 16). Passive prøvetakere er små brikker (ca. 2,5 cm i diameter) som plasseres utendørs beskyttet for regn, og som ikke krever tilgang til strøm eller mobilnett. For å ha mulighet til å skifte prøvetakerne daglig, ble det montert løpeskinner loddrett ned i dagsonen, langs murveggene. I begge ender av løpeskinna ble det montert en trinse med tau rundt, festet til en metallvinkel, slik at vinkelen kunne heises opp og ned. Prøvetakerne ble plassert i klemmer under metallvinkelen, beskyttet for regn, og firt ned til bunnen av løpeskinna. Når de ble eksponert hang prøvetakerne maksimalt 10 m over kjørebane i dagsonen.

Passive prøvetakere gir tidsintegrerte konsentrasjoner med kontinuerlig tidsdekning, dvs. gjennomsnittskonsentrasjonen over en gitt tidsperiode (her – ett eller tre døgn). Midlingsperioden er bestemt av hvor lenge prøvetakeren har blitt eksponert for uteluft, som i denne studien var ca. ett døgn. Deteksjonsgrensen av NO₂ for 24 timer eksponering er under 1 µg/m³. Måleusikkerheten som tilskrives prøvebehandling og kjemiske analyser på laboratoriet ligger innenfor ± 10 % og oppfyller dermed datakvalitetskravet i luftkvalitetsdirektivet på 25 %.

3.1.4 Måling av vind og luftbevegelse

Vaisala værsensorer av samme type (WXT 520) ble brukt i tunnellopene og ved målestasjonen utenfor dagsonen på bakkenivå.

Luftbevegelse/«vind» ble målt i tunnellopene med syv 2D Vaisala (WXT 520 og WXT 530) værsensorer, som var montert til de syv TSI DustTrak Environmental instrumentene (Figur 14 og Figur 15). Vaisala-sensorene måler vindhastighet (også maksvind/vindkast), vindretning, lufttrykk, temperatur, relativ luftfuktighet (og nedbør). Nærmere bestemt målte vindsensorene horisontale luftbevegelser ved PM-målepunktene ved hjelp av ultralyd. Vaisala-data ble lagret med 1 s tidsoppløsning.

Over dagsonen ble turbulente luftbevegelser målt med fem Gill Windmaster 3D sonic anemometre (Figur 16). Gill-sensorene registrerer også temperatur. Gill-sensorene var montert til kabelbroene over kjørebaneane. De måler luftbevegelsen i tre dimensjoner ved hjelp av ultralyd. Dataene ble lagret med 1 s tidsoppløsning. Hovedfokuset i prosjektet er på vertikal bevegelse inn og ut av dagsonen (vist i rødt, Kapittel 4.3.4).

Vindhastighet og vindretning på bakkenivå utenfor dagsonen ble målt ca. 6 m over bakken med en Vaisala WXT 520 værsensor som var montert ved måleboden («ved dagsonen») rett utenfor dagsonen. Denne målte også andre meteorologiske parametere som temperatur, relativ luftfuktighet, lufttrykk og nedbør, som ble brukt i dataanalysen. Vaisala værsensoren brukt ved måleboden utenfor dagsonen var samme type sensor som også ble brukt i tunnellopene, men ved måleboden ble dataene lagret med lavere tidsoppløsning (5 minutter).

3.2 Kvalitetssikring og instrumentsammenligning

En sammenligningskampanje for alle måleinstrumenter (dvs. både PM-målere og vindsensorer) brukt i Operatunnelen og dagsonen ble utført på Kjeller i forveien av målekampanjen (september – desember 2020) for å sikre kvaliteten av målingene og etablere kalibreringsfunksjoner slik at alle instrumentene måler likt etter kalibrering.

Alle instrumentene ble samlokalisert som vist i Figur 18. Ved å samlokalisere instrumentene både før og etter målekampanjen ble det testet hvor stabil instrumentene er over tid. Grimm-monitoren var plassert i et måleskap ved siden av de andre instrumentene. TSI-instrumentene var montert på paller ca. 10 m fra måleboden. De 7 Vaisala-sensorene var montert til TSI-instrumentene og de 5 Gill-sensorene var montert ved veggen til måleboden få meter unna. Instrumentene målte stort sett samme luftmasse. Inntakene til TSI-instrumentene var litt lavere enn inntaket til Grimm i måleskapet. Gill-sensorene var montert ca. 1 m høyere enn Vaisala-sensorene. Resultater fra alle 8 TSI-instrumentene ble sammenlignet med resultater fra Grimm EDM 180 svevestøvmonitoren (ekvivalent med referansemetoden for måling av PM, etter NS-EN 12341:2014).

Etter målekampanjen ble TSI-instrumentene samlokalisert en gang til, på taket til måleboden utenfor dagsonen, for å sjekke om kalibreringsfunksjonene har endret seg i løpet av målekampanjen.



Figur 18: Samlokalisering av støvmåleinstrumentene (TSI-instrumenter, Grimm PM-monitor) og vindsensorer (Vaisala, Gill) på Kjeller høst/vinter 2020. TSI-instrumentene var montert på paller, Vaisala-sensorene var montert på TSI-instrumentene, Gill-sensorene var montert ved veggen og ovenfor taket til måleboden. En Grimm EDM 180 svevestøvmonitor var plassert i måleskap ved siden av TSI-instrumentene. Foto: Anne Cathrine Nilsen

TSI-instrumenter og Grimm-monitor

Vanligvis bruker NILU måleinstrumenter som oppfyller krav til respektive referansemetoder for å måle luftkvalitetsparametere. Dette sikrer at målingene oppfyller datakvalitetsmålene som er satt i EUs luftkvalitetsdirektiv (og gjennom EØS-avtalen i forurensningsforskriften). Målingene utført med referanseinstrumenter ved bruk av referansemetoder og i henhold til kvalitetssystemet er sammenlignbare, uavhengig av ytre forhold. For å sikre dette gjennomgår instrumentene en rekke tester og må godkjennes av sertifiserte testlaboratorier (Hak og Marsteen, 2019).

I dette prosjektet måtte målemetoden tilpasses til tunnelkrav. PM-monitorer som vanligvis brukes til måling av svevestøv er for store til å plasseres i tunneløp og krever ukentlig tilsyn for å utføre tester og sikre at datakvalitetsmålene er oppfylt. I tunnelen og dagsonen er det ikke tilgang uten å sperre trafikk gjennom tunnelen. Instrumentene brukt (TSI Environmental DustTrak) er tilstrekkelig kompakte i størrelsen til å kunne plasseres i tunnelen, og tilstrekkelig lette til å henges på tunnelveggen. I følge instrumentprodusent anbefales det månedlig tilsyn. Måle kampanjen i Operatunnelen varte i seks uker uten mulighet for tilsyn. TSI-instrumentene var fabrikknye da de ble tatt i bruk i dette prosjektet.

Kalibreringsformler for TSI-instrumentene ble beregnet på grunnlag av ortogonal regresjon av data fra sammenligningen høsten 2020. Målingene viste at variasjoner av PM-konsentrasjonen blir detektert av TSI-instrumentene. Absolutte PM-konsentrasjoner kan avvike fra faktisk konsentrasjon. Man bør ikke ha like store forventninger til datakvaliteten som ved bruk av referanseinstrumenter.

PM-monitører (Grimm EDM180) ble brukt i dagsonen og i de to bakkestasjonene. Instrumentet i dagsonen ble plassert i et instrumentskap som sto ved midtdelene mellom øst- og vestgående kjørebane ca. 30 m fra portalene til Ekeberg tunnelen. Grimm-monitørene oppfylder datakvalitetskrav og måler dermed ekvivalent med referansemeteren. Instrumentene brukes i mange luftkvalitetsmålestasjoner i det norske målenettverket (se Hak, 2021).

Vaisala 2D vindsensorer

Vindretning (2D-vind) og vindhastighet ble målt med 7 Vaisala WXT 520/530 enheter som var montert til respektive TSI-instrumenter. Instrumentene var samlokalisert under instrumentsammenligningen, dvs. målte i samme luftmasse (se Figur 18).

Vindretning målt av de individuelle Vaisala-sensorene under sammenligningskampanjen 2020 stemte godt overens. Også vindhastighet målt av de individuelle Vaisala-sensorene stemte godt overens, unntatt Vaisala_2903 som målte høyere vindhastighet i noen episoder enn de andre sensorene. I målekampanjen var Vaisala_2903 montert i Mosseveirampa. Vindretning og vindhastighet målt av de enkelte sensorene ble ikke kalibrert etter sammenligningskampanjen høsten 2020 siden korrelasjonen var god nok. Vindretning og vindhastighet målt av Vaisala-sensorene i Operatunnelen er viktige parametere for å vurdere effekten av ventilasjonstårnene.

Det var veldig høy korrelasjon for temperaturene målt med de ulike Vaisala-modulene under sammenligningen, men ca. 2°C spredning. For målekampanjen i Operatunnelen ble temperaturmålingene fra alle sensorer kalibrert mot Vaisala 2902 med kalibreringsfunksjoner fra sammenligningskampanjen 2020. Temperaturforskjell i Operatunnelen hjelper å forstå dynamikken og forhold i tunnelen.

Gill 3D vindsensorer

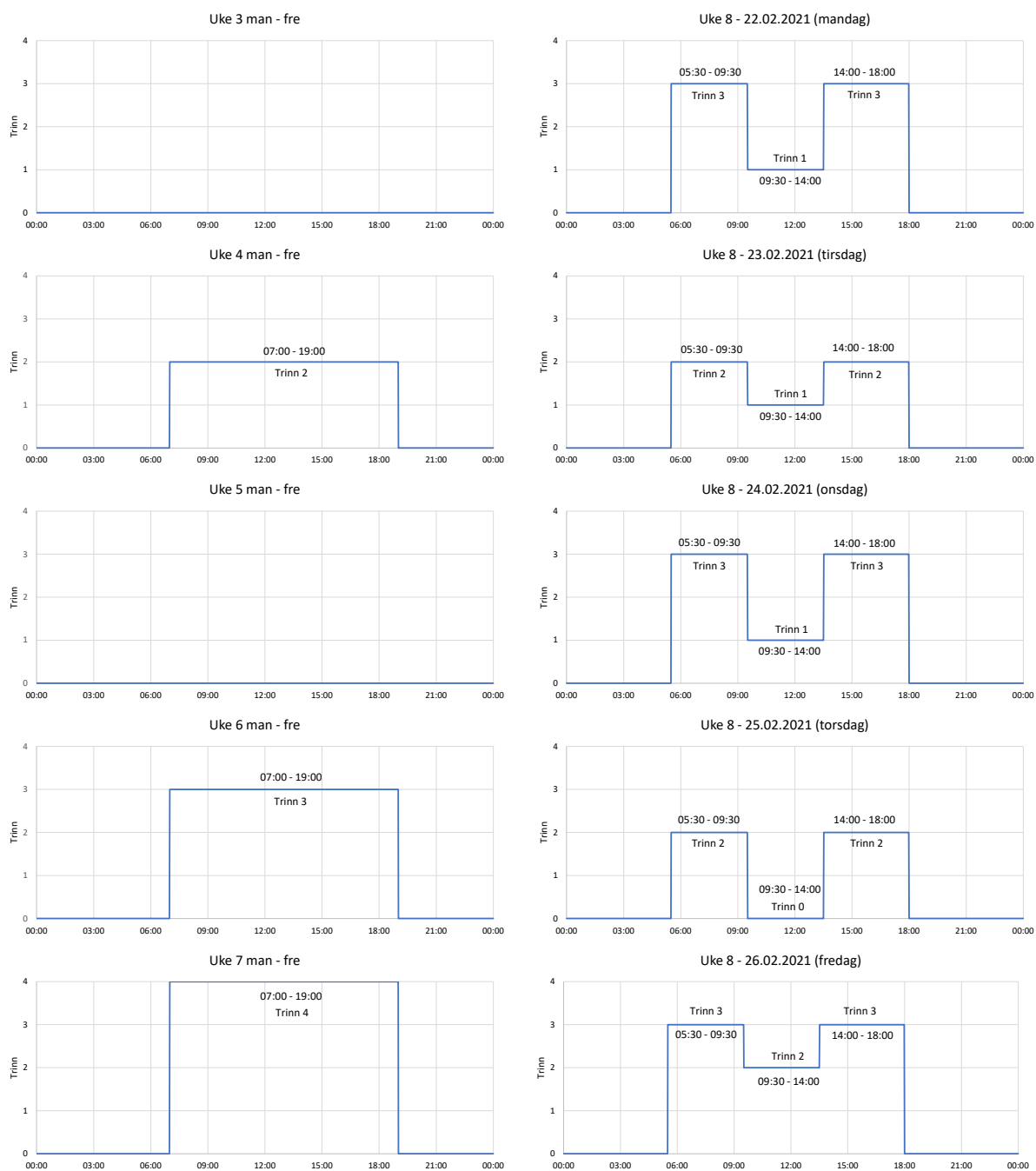
Overensstemmelsen av de tre vindretningskomponentene målt av 5 individuelle Gill-sensorer under sammenligningskampanjen 2020 var veldig bra. Vindretningskomponentene målt av de enkelte sensorene ble ikke kalibrert etter sammenligningskampanjen høsten 2020 siden korrelasjonen var god nok.

Det viste seg i sammenligningskampanjen at temperaturen målt av Gill vindsensorene ikke var nøyaktig nok til å kunne brukes til å tolke hvordan temperaturen endret seg med høyden i Operatunnelen og dagsonen. Temperaturmålinger fra Gill-sensorene ble derfor ikke brukt videre i prosjektet.

3.3 Ventilasjonsplan

Ventilasjonstårnene på Sørenga er en viktig del av strategien for brannventilasjon i Operatunnelen. Tårnene brukes også for sensorstyrt utlufting av tunnelen ved høy CO- eller NO-konsentrasjon, men er i denne sammenhengen veldig lite i drift. For å teste hvilken effekt driften av ventilasjonstårnene har på luftstrømmene ut og inn dagsonen ble det satt opp en ventilasjonsplan som skulle følges under måleprosjektet. Uavhengig av konsentrasjonsnivået i tunnelen skulle tårnene driftes på definerte trinn mellom kl. 7 og kl. 19 på hverdager. Det er i dette tidsrommet at trafikken produserer mest forurensning. I helgene skulle ventilasjonen settes på «AUTO», dvs. vanlig sensorstyrt drift. En oversikt over driftsplanen for ventilasjonstårnene er gitt i Figur 19. Alle fire tårn (dobbeltårnene BJV Ø og EKB V) ble styrt manuelt fra VTS etter vist skjema. Impulsventilatorer i tunnelloppene var ikke del av ventilasjonsplanen i prosjektet, dvs. de var satt på «AUTO». Ventilasjonstårnene i østgående løp ble styrt i samme periode og på samme trinn som tårnene i vestgående løp. I motsetning til et tidligere prosjekt der driftsplanen fastsatte 20 minutt til 60 minutt driftsperioder for ventilasjonstårnene (Berge og Kravik, 2018), var tårnene i drift i 4 – 12 timer i et strekk i dette måleprosjektet. Tårnene ble ikke alltid styrt nøyaktig etter planen vist i Figur 19. Faktisk drift av ventilasjonstårnene er diskutert i kapittel 4.3. Ventilasjonskapasiteten til tårnene styres trinnvis som beskrevet ovenfor (Kapittel 2.3.3). Maksimal kapasitet nås ved trinn 4.

Ventilasjonsplanen for ukene 3 til og med 7 gjelder per uke og omfatter tidsrommet fra kl. 7 til kl. 19 på hverdagene (mandag til fredag). I helgene var tårnventilasjonen satt på «AUTO». Uke 8 var en ekstra uke der ventilasjonsplanen varierte fra dag til dag. Basert på observasjonene i ukene 3 – 7 ble ventilasjonen kjørt på høyere trinn i rushtiden om morgenen og ettermiddagen enn midt på dagen. Ventilasjonen om morgenen begynte 1,5 timer tidligere enn i ukene 3 – 7 og ventilasjonen ble stoppet en time tidligere om kvelden enn i ukene 3 – 7. Tidligere start av ventilasjonen begrunnes med stor økning av PM₁₀-konsentrasjonen allerede før kl. 7, som ble observert i uke 3 – 7. Om kvelden ble ventilasjonen stoppet tidligere i uke 8 for å undersøke om konsentrasjonsforhold mellom kl. 18 og kl. 19 er lave nok til å stoppe, eller om det kreves videre drift av ventilasjonen.



Figur 19: Skjema for ønsket tårnventilasjonsstyring i måleperioden. Venstre: ventilasjonsplan per uke, uke 3-7. Høyre: ventilasjonsplan per dag, uke 8 (ekstra uke).

Ventilasjonen ble stort sett styrt etter denne planen. En oversikt over faktisk drift av ventilasjonstårnene er vist i Vedlegg A. Her må det nevnes at observasjonene av både strømningshastighet og konsentrasjoner tyder på at ventilasjonen mest sannsynlig gikk på ønsket trinn, selv om driftsloggen viser et lavere trinn. SVV antar at dette skyldes en mismatch/diskrepans mellom styreprogram og PLS (programmerbar logisk styring). Systemet gir en feil tilbakemelding om ventilasjonstrinn, selv om ønsket trinn ble startet. Avvik fra planen gjelder driftstiden:

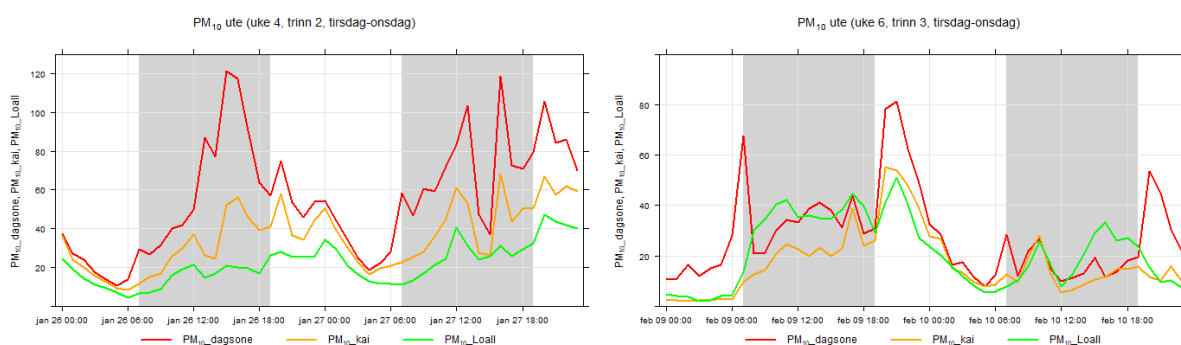
Mandag 8. februar (uke 6) gikk tårnventilasjonen i Ekeberg tunnelen frem til midnatt istedenfor å slås av kl. 19. I Bjørvikatunnelen ble tårnventilasjonen slått av kl. 19 som planlagt.

I uke 7 da ventilasjonstårnene skulle kjøres på trinn 4 førte det til overbelastning av systemet når alle viftene manuelt ble satt på samtidig (tirsdag 16. februar). Motorvern ble utløst som følge av overbelastningen. Denne dagen gikk tårnviftene både i Bjørvika- og Ekeberg tunnelen på trinn 4 først fra kl. 10. For å unngå overbelastning anbefales det å sette på viftene trinnvis. Ved aktivering av forhåndsdefinerte brannplaner er dette ivare tatt.

I uke 8 var det tenkt å teste effekten av høyere ventilasjon i rushtiden. Tirsdag 23. februar var tårnventilasjonen i Bjørvika- og Ekeberg tunnelen på samme trinn fra kl. 05:30 til kl. 18:00 istedenfor å kjøre ventilasjonen på høyere trinn i morgen- og ettermiddagsrushtiden. Fredag 26. februar ble tårnventilasjonen slått av kl. 14:00 istedenfor å kjøres frem til kl. 18:00.

4 Observasjoner

Innledende vises at drift av ventilasjonstårnene ved Sørenga påvirker luftkvaliteten utenfor dagsonen. Figur 20 nedenfor viser PM₁₀-konsentrasjonen målt ved målestasjonen utenfor dagsonen (rød), målestasjonen på kaia (gul) og ved Loallmenningen (grønn) på tirsdag og onsdag i hhv. uke 4 (venstre) og uke 6 (høyre). Grå bakgrunn fremhever når tårnventilasjonen var i drift. I uke 4, der tårnventilasjonen gikk på trinn 2 ble maksimale PM₁₀-konsentrasjoner målt midt på dagen. Ventilasjon på trinn 2 ser ikke ut til å ha nok kapasitet til å hindre at forurenset luft slippes ut av dagsonen. I uke 6 gikk tårnventilasjonen på trinn 3. De høyeste PM₁₀-konsentrasjonene ble målt før og etter ventilasjonen var i drift. Midt på dagen, når trafikkvolumet er størst i Operatunnelen, ble det målt lavere svevestøvkonsentrasjon ute, på grunn av ventilasjonstårnenes effekt. Effekten var størst ved måleboden utenfor dagsonen, men var også målbar ved målestasjonen på kaia. Observasjonene av luftforurensning i tunnel og dagsone og utenfor dagsonen, og hvordan parametrene henger sammen med meteorologiske forhold er forklart nærmere i dette kapitlet.



Figur 20: PM₁₀-konsentrasjonen målt på bakkenivå utenfor dagsonen med tårnventilasjon på trinn 2 (venstre) og på trinn 3 (høyre).

4.1 Ytre forhold under målekampanjen

4.1.1 Meteorologiske forhold

Meteorologiske forhold påvirker utskiftningen av luft mellom tunnel og utemiljøet, avsetning av svevestøv og gasser, og oppvirvling av svevestøv. Meteorologiske parametere i måleperioden ble målt ved måleboden utenfor dagsonen (Figur 17). Meteorologiske data er også tilgjengelig fra Meteorologisk institutts stasjon Hovin, 3,4 km nordøst for dagsonen. Parametere målt begge steder er vindretning, vindhastighet, temperatur, relativ luftfuktighet og nedbør. Det var god overensstemmelse¹² mellom målingene ved dagsonen og Hovin for vindretning, vindhastighet, temperatur, relativ luftfuktighet og nedbør. Det betyr at målinger fra Hovin er representative for området og kan også brukes for fremtidige vurderinger knyttet til tårnventilasjon.

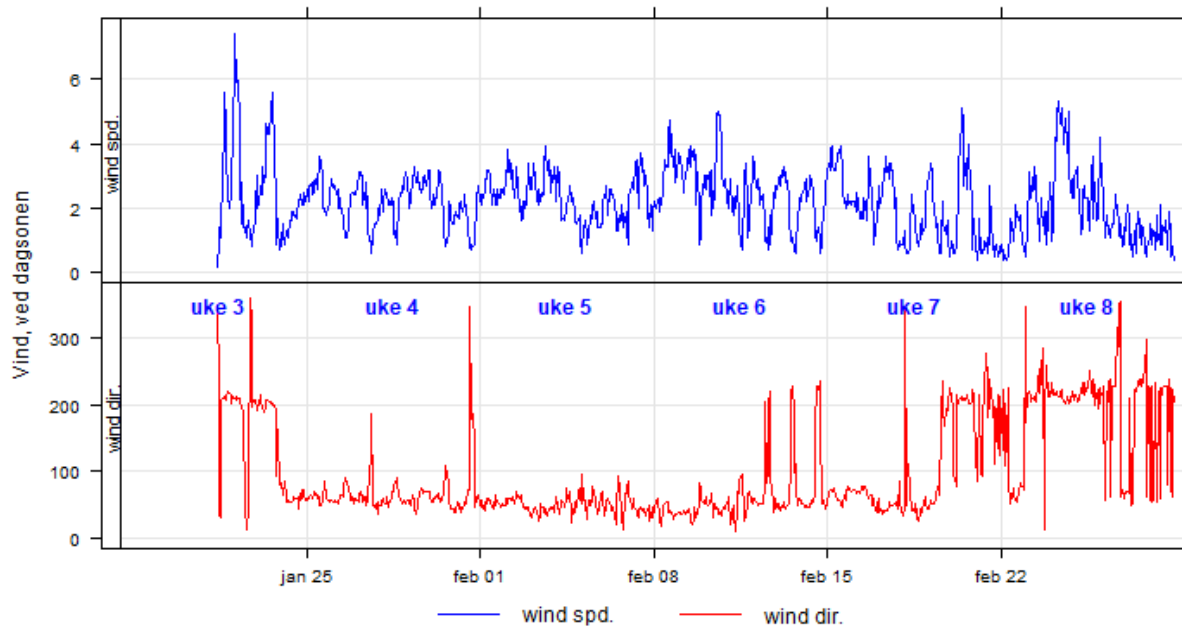
I tillegg til vindmålinger i tunnelen, for å undersøke strømningsforhold ved varierende ventilasjonsdrift, er det målt lufttemperatur i tunnelen med Vaisala-sensorene. Vertikale temperaturforskjell påvirker utskiftning av luft mellom dagsonen og utemiljøet.

Målekampanjen ble utført på vinteren, som er den årstiden som er forbundet med dårligst spredningsforhold og typisk størst fare for overskridelser av luftkvalitetskriterier. Temperaturen var under nullpunktet uavbrutt i flere uker, men grunnet vindforholdene ble det ikke observert temperaturinversjon i måleperioden.

¹² Meteorologiske målinger ved Losæter våren 2020 viste også god overensstemmelse med Hovin (NILU rapport 26/2020).

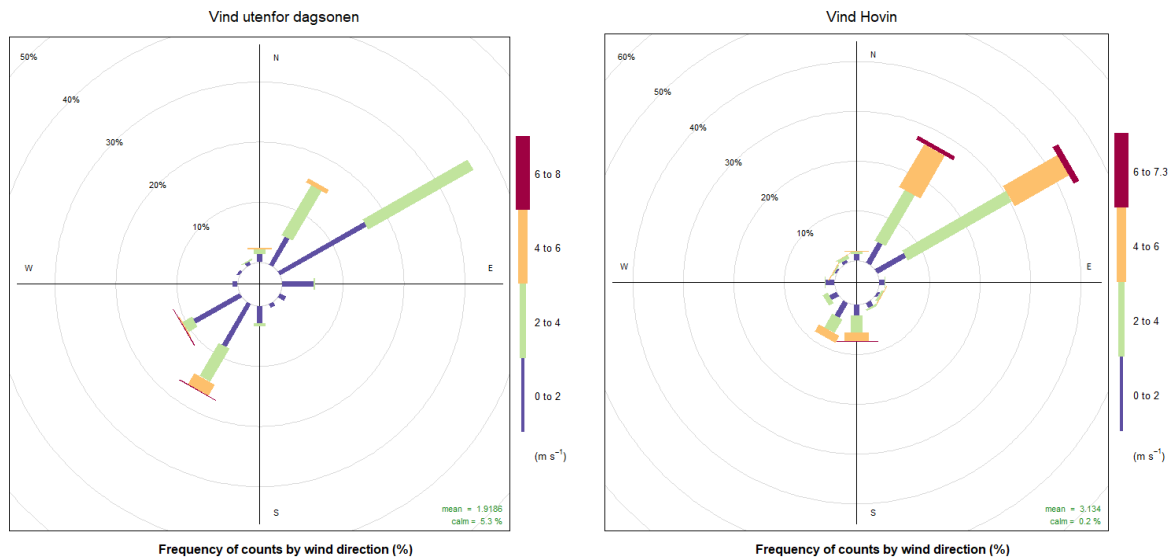
Vind

Vindretningen i måleperioden var hovedsakelig fra nordøst, som er hovedvindretningen i området på vinteren. 19. februar dreide vindretningen til sør-sørvest (se Figur 21), som er hovedvindretningen på våren og sommeren. Størst effekt fra dagsonen på luftkvalitet i Lohavn forventes ved vind fra nordøst, som ble observert i måleperioden frem til midten av uke 7.



Figur 21: Tidsserie for vindhastighet (m/s) og vindretning (grad), målt ved måleboden ved dagsonen. Vindretningen er retningen vind kommer fra. Vindretningene 0° , 90° , 180° og 270° tilsvarer vind fra N, Ø, S og V. Tidsaksen er delt inn i uke 3 – uke 8.

Vindretningsmålinger fra Hovin var representative for området rundt dagsonen både i vår/sommer 2020 (se Hak og Tønnesen, 2020) og i måleperioden. Vindroser fra måleboden utenfor dagsonen og fra meteorologisk stasjon på Hovin i måleperioden er vist i Figur 22. Vindsensoren på Hovin er montert ca. 4 m høyere over bakken enn sensoren ved dagsonen. Det forklarer sannsynligvis at vindhastigheten målt på Hovin er høyere enn vindhastigheten målt ved dagsonen.

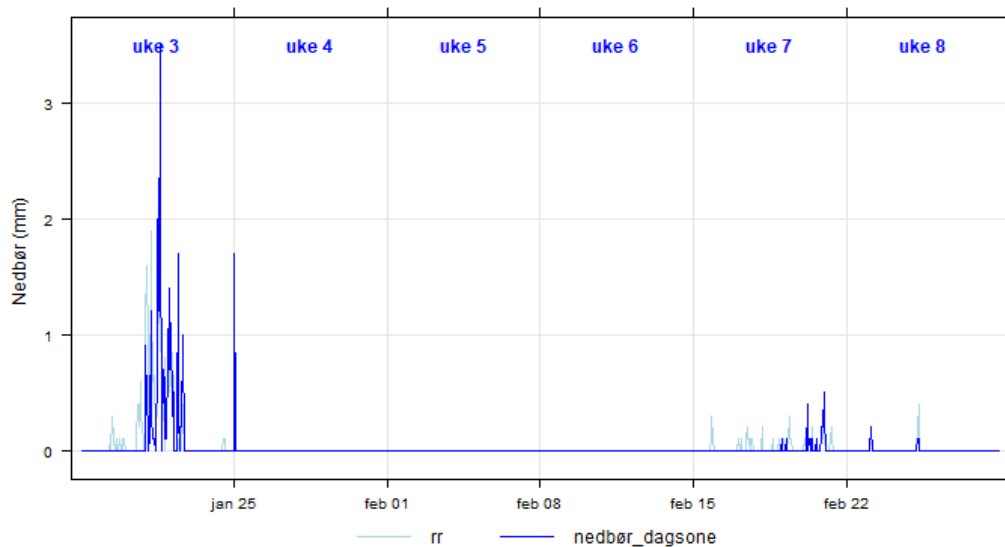


Figur 22: Vindrose fra måleperioden (18. januar – 28. februar 2021) ved måleboden utenfor dagsonen¹³ (6 m over bakken) og vindrose ved meteorologisk stasjon Hovin (10 m), basert på timemiddelverdier. Figuren viser med hvilken frekvens det forekom vind fra angitt retning.

Nedbør

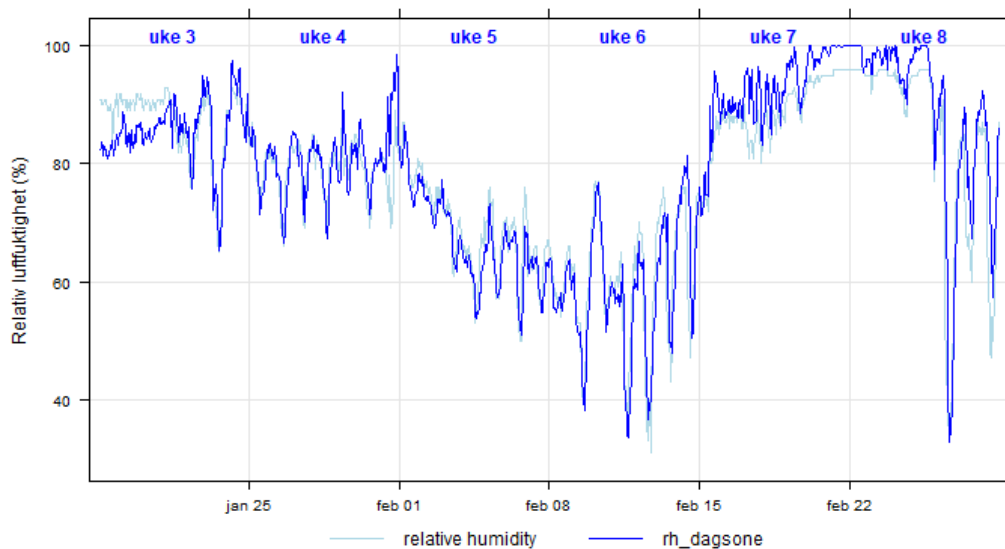
Nedbør demper oppvirvling av støv og fører til våtdeposisjon av svevestøv. Det var stort sett tørre forhold i måleperioden (se Figur 23). I uke 3 ble det registrert kraftig nedbør (21. januar og 22. januar). Mindre nedbørmengder ble også observert i uke 7. I uke 4 til uke 6 var det opphold, og temperaturen var under -5°C hele tiden (se Figur 25). Disse ukene var dermed best egnet for å undersøke ventilasjonstårnernes effekt på PM-konsentrasjonen i og utenfor dagsonen.

¹³ Vindmålinger ved måleboden fra 21. januar, da defekt vindsensor ble erstattet.



Figur 23: Nedbørmengde (mm) per time i måleperioden målt utenfor dagsonen (blå) og på Hovin (lyseblå).

Høy relativ luftfuktighet er typisk knyttet til fukt i bakken og forminsket støvoppvirvling. Relativ nedbør målt utenfor dagsonen og på Hovin er vist i Figur 24. Nedbør i ukene 3, 7 og 8 førte til høy relativ luftfuktighet i måleområdet. Etter nedbøren i uke 3 var luftfuktigheten fremdeles høy i uke 4.

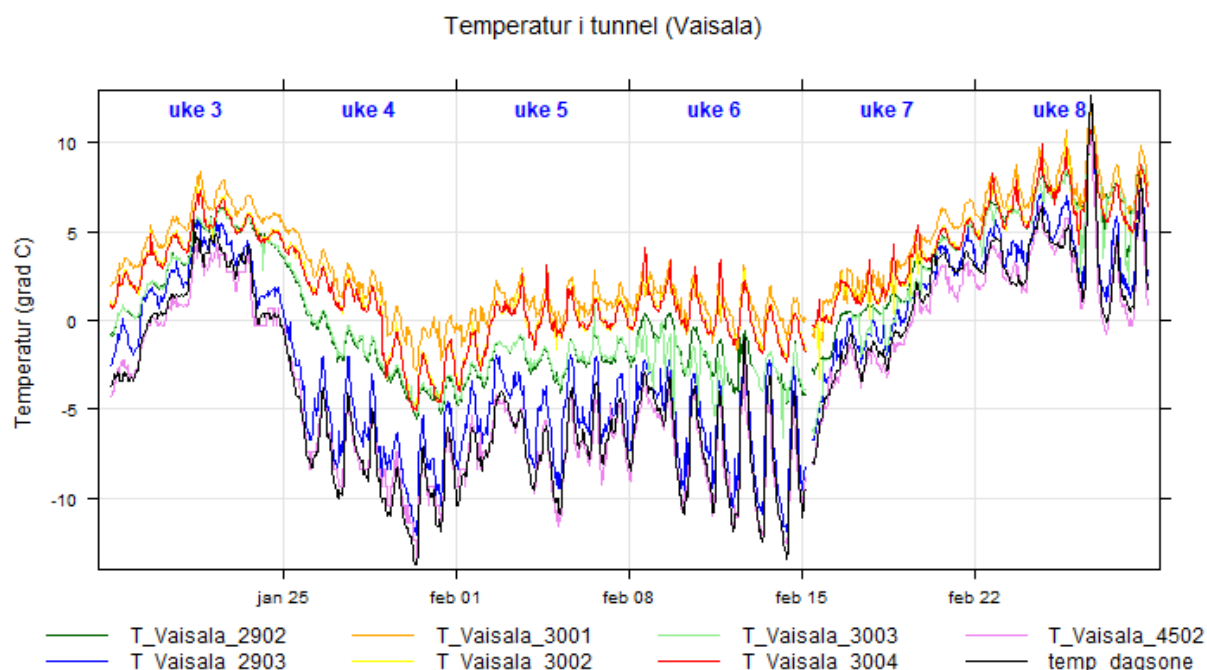


Figur 24: Relativ luftfuktighet (%) i måleperioden målt utenfor dagsonen (blå) og på Hovin (lyseblå).

Temperatur

Temperatur i tunnelen ble målt av Vaisala-sensorene som var montert i tunnellopene sammen med TSI-PM-instrumentene (se også kapittel 3.1 og 3.2). Figur 25 viser temperatur i Operatunnelen i måleperioden. Temperaturen ved alle målepunkt i tunnelen fulgte generelt temperaturvariasjonen utendørs (utenfor dagsonen) som er vist med svart kurve. I Ekeberg tunnelen østgående (Vaisala_4502) var temperaturen lavest og nærmest utetemperatur, en effekt av at kjøretøy transporterer luft med utetemperatur inn i tunnelen. I Mosseveitunnelen (Vaisala_2903) var temperaturen marginalt høyere. Noe høyere temperatur ble målt i Ekeberg tunnelen vestgående, der temperaturen før (Vaisala_2902) og etter ventilasjonstårnet (Vaisala_3003) stort sett var identiske. Luft som passerer sensorene i

vestgående løp er varmet opp mellom portalen på Ryen (noen km lenger øst) og sensorlokasjonen. Sensorene i Bjørvikatunnelen målte høyere temperatur enn i Ekeberg tunnelen. I Bjørvikatunnelen østgående var temperaturen før (Vaisala_3004) og etter ventilasjonstårnet (Vaisala_3002) identiske. Høyest temperatur ble målt i Bjørvikatunnelen vestgående. Kortslutningssonen ved overgangen fra dagsonen til Bjørvikatunnelen førte til god blanding av luften i begge løp slik at temperaturforskjellen mellom østgående og vestgående løp var liten.



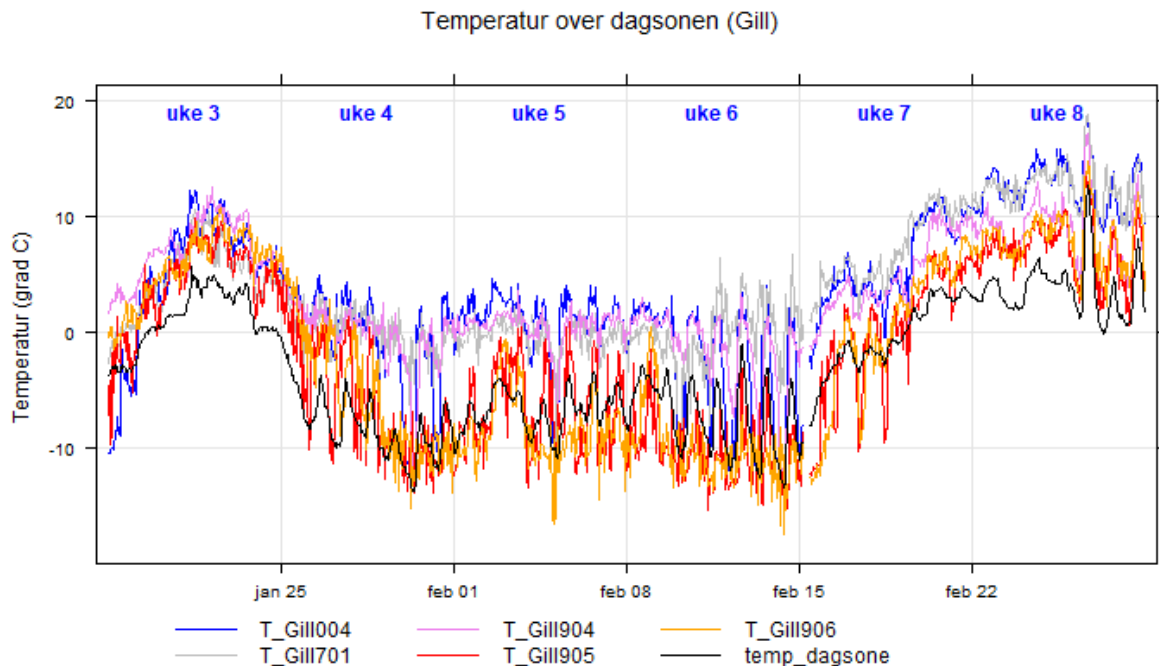
Figur 25: Temperatur i tunnellopene, målt med Vaisala sensorene. Temperaturen utenfor dagsonen (på bakkenivå) er vist i svart. Se Figur 14 for plassering av Vaisala sensorene.

Målingene indikerer at tunnel luften som går inn mot dagsonen (BJV Ø og EKB V) har overtemperatur i de kaldeste periodene. Oppvarmingen skyldes primært varmeutveksling fra berg og tunnelvegger, men varmeavgivelse fra kjøretøy og teknisk utstyr vil også bidra. Observasjonene samsvarer med parallelle simuleringer/vurderinger gjort av Norconsult. Overtemperatur vil føre til større oppdrift og kan gi mer utslipp fra dagsonen til omgivelsene. Samtidig vil det kunne virke positivt på den videre spredningen utenfor dagsonen. Slik sett kan overtemperatur redusere det lokale spredningsbidraget på bakkenivå (Norconsult, 2021).

Undertemperatur er i målekampanjen kun registrert i ca. 4 timer den 28. februar (uke 8). Observasjonen gir et uttrykk for tunnelveggenes termiske treghet, og bekrefter at undertemperaturer kan opptre etter lengre kuldeperioder, med påfølgende høye dagtemperaturer eller raske utvendige lufttemperaturrendringer. Undertemperatur fører til at oppdrift fra dagsonen er mindre sannsynlig og i disse periodene kun påvirket av turbulens. Det antas at disse situasjonene oppstår relativt sjeldent.

Temperaturmålingene før og etter tårn indikerer også i hvilke situasjoner ventilasjonstårnene er i stand til å trekke luft mot kjøreretningen, inn fra utløpsportaler (øverst i tunneltverrsnittet). I EKB V observeres det tilbakestrømming fra og med trinn 3 for store deler av ventilasjonsdøgnene i uke 6, mens det for BJV Ø kun observeres på ettermiddagene mellom kl. 15 og kl. 18, når kjørehastigheten og stempeleffekten reduseres. Dette samsvarer med målingene av lufthastigheter beskrevet i kapittel 4.3.2. Effekten vil være mest fremtredende ved store temperaturforskjeller.

Temperaturen over dagsonen ble målt med Gill vindsensorene. Disse måler imidlertid temperatur med høyere usikkerhet enn Vaisala-sensorene. Temperatur målt over dagsonen er vist i Figur 26, men som nevnt i kapittel 3.2 er disse målingene ikke brukt til videre analyse.

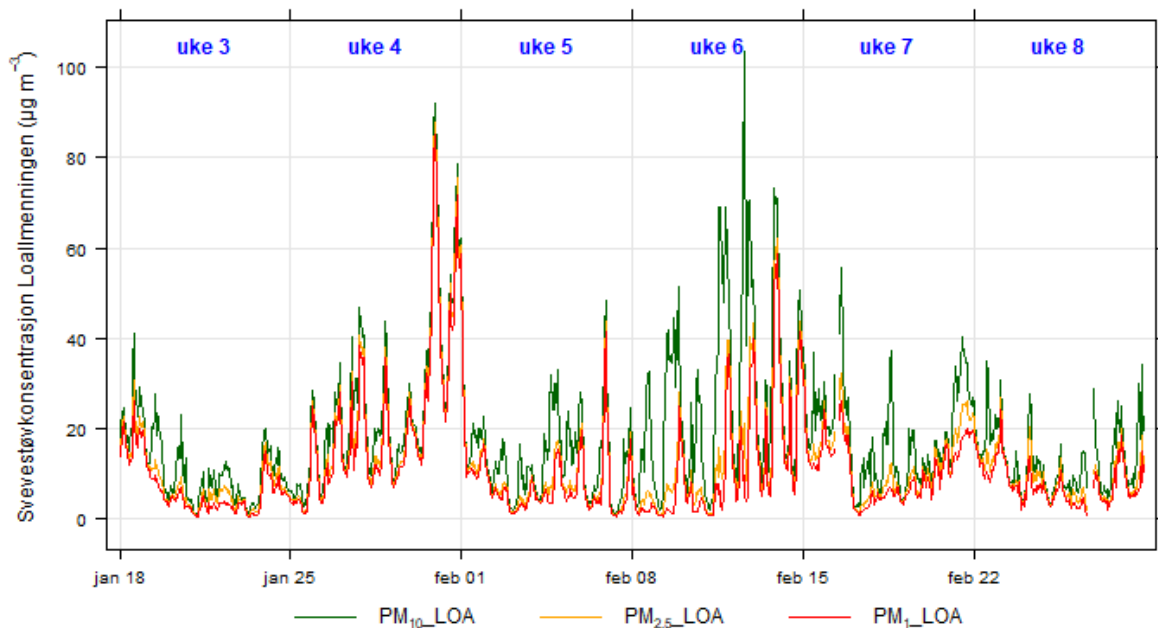


Figur 26: Temperatur over dagsonen, målt med Gill sensorer. Temperaturen utenfor dagsonen (på bakkenivå) er vist i svart.

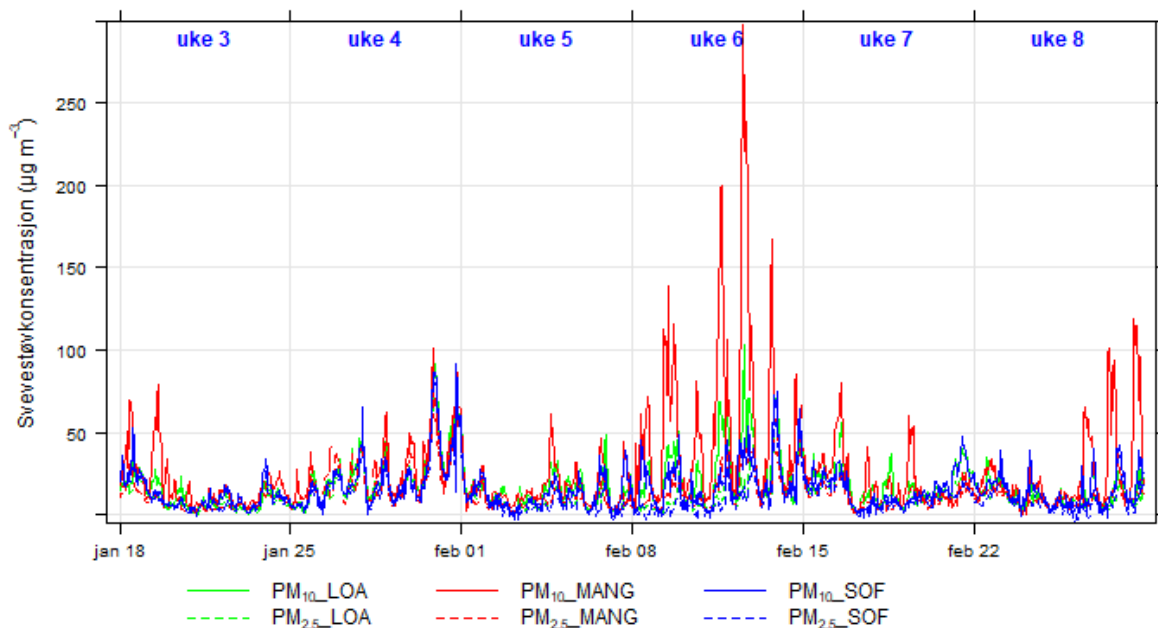
4.1.2 Svevestøvkonsentrasjon i Oslo/Bakkenivå i måleperioden

Svevestøvkonsentrasjonen på bakkenivå ble målt ved tre målestasjoner i nærheten av dagsonen. Måleboden ved dagsonen og måleboden på kaia ble satt opp for målekampanjen sørvest for dagsonen for å vurdere under hvilke forhold utslipp fra dagsonen bidrar til luftforurensning i området Lohavn/Sørenga. Ved begge stasjonene ble det målt svevestøv. Målestasjonen Loallmenningen er en bybakgrunnsstasjon nordvest for dagsonen. Konsentrasjonene ved Loallmenningen anses å ikke direkte være påvirket av utslipp fra dagsonen. Vind i retning mot Loallmenningen fra dagsonen forekommer ikke (Figur 22). For å separere variasjoner av PM-konsentrasjonen ved disse tre stasjonene relatert til ventilasjonsdrift fra generelle (mer regionale) variasjoner av PM-konsentrasjonen i Oslo, er også data fra andre målestasjoner i Oslo studert, som er helt uavhengige av ventilasjonsdrift i Operatunnelen, f.eks. Manglerud (veinær stasjon 3 km øst for dagsonen) og Sofienbergparken (bybakgrunnsstasjon 2,4 km nord for dagsonen).

Svevestøvkonsentrasjonen (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) ved Loallmenningen i måleperioden er vist i Figur 27. Svevestøvkonsentrasjonen på bakkenivå i nærheten av dagsonen var forholdsvis lav i uke 3 og uke 5, sammenlignet med uke 4, 6 og 7. Selv om uke 3 og 5 var ukene uten tårnventilasjon i drift i Operatunnelen, var ventilasjonen ikke årsaken for varierende PM-nivå på bakkenivå. Som vist i Figur 28, varierte svevestøvnivået på en større skala som også omfattet målestasjoner i andre bydeler i Oslo (veinær stasjon på Manglerud, bybakgrunnsstasjon i Sofienbergparken). De høyeste svevestøvkonsentrasjoner ved Loallmenningen og andre steder i Oslo ble registrert i uke 6. Det skyldtes hovedsakelig støvoppvirvling (PM_{10}) fra tørre veioverflater, også byggeaktivitet i området kan ha bidratt. Om kvelden var det tydelige topper av fint svevestøv ($PM_{2.5}$, PM_1), som sannsynligvis skyldtes husoppvarming (vedfyring) ved utetemperaturer under -10°C (se Figur 27). Vedfyring var sannsynligvis også årsaken for PM-toppene i helgen 30. – 31. januar.



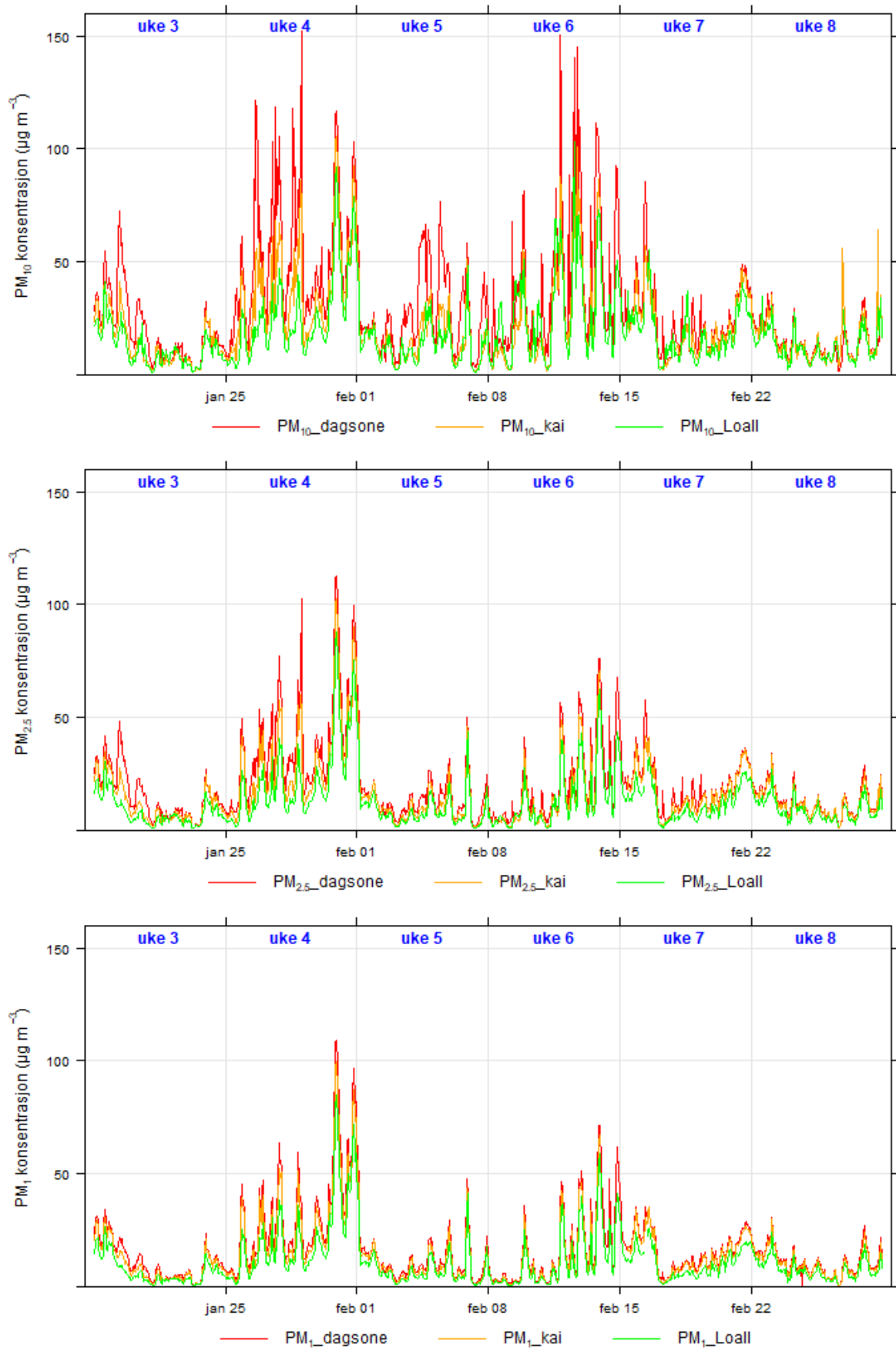
Figur 27: Svevestøvkonsentrasjonen (grønn: PM_{10} , gul: $PM_{2.5}$, rød: PM_1) ved Loallmenningen i måleperioden.



Figur 28: Svevestøvkonsentrasjonen (PM_{10} og $PM_{2.5}$) ved Loallmenningen (grønn), Manglerud (rød) og Sofienbergparken (blå) i Oslo i måleperioden.

Målestasjonene utenfor dagsonen og på kaia var plassert sørvest for dagsonen, ikke langt unna Loallmenningen (se Figur 17), men rett nedstrøms i forhold til dagsonen mesteparten av måleperioden. Formålet med de to stasjonene var å fange opp eventuelle bidrag fra dagsonen til luftforurensning på bakkenivå ved vind fra nordøst. I uke 3 til uke 7 var PM_{10} -konsentrasjonen størst ved måleboden utenfor dagsonen, noe lavere på kaia og lavest ved Loallmenningen, som ikke anses å

være direkte påvirket av utslipp fra dagsonen (se Figur 29). PM_{10} -toppene er forårsaket av støvoppvirvling under tørre forhold. Frem til 19. februar var hovedvindretningen fra nordøst, som er hovedvindretningen på vinteren. Dette førte sannsynligvis til at målebodene utenfor dagsonen og på kaia var mer eksponert for støvutslipp fra dagsonen enn Loallmenningen. Fra 19. februar blåste det hovedsakelig fra sør-sørvest, dvs. fra Oslofjorden, som er hovedvindretningen på sommeren. I den perioden var PM_{10} -konsentrasjonene lave og på nesten samme nivå ved alle tre stasjonene. Også $PM_{2.5}$ - og PM_1 -konsentrasjonene, som er knyttet til bl.a. forbrenningskilder, var størst utenfor dagsonen og minst ved Loallmenningen (se Figur 29), men forskjellen (mellom før og etter 19. februar) var mindre utpreget enn for PM_{10} . For PM_1 var forskjellen enda mindre utpreget. Dette tyder på at påvirkningen fra dagsonen på luftkvaliteten på bakkenivå hovedsakelig består av oppvirvlet svevestøv (grove partikler), mens bidraget fra forbrenningsutslipp (fine partikler, $PM_{2.5}$ og PM_1) er mindre.



Figur 29: PM_{10} , $PM_{2.5}$ og PM_1 i måleperioden målt på bakkenivå: ved dagsonen, på kaia og ved Loallmenningen.

På bakkenivå der folk kan ferdes, gjelder grenseverdier for luftkvalitet og luftkvalitetskriterier (se Vedlegg B) for beskyttelse av menneskers helse. Grenseverdien for PM₁₀-døgnmiddel på 50 µg/m³ må ikke overskrides mer enn 30 ganger per kalenderår. Dette konsentrasjonsnivået ble overskredet 8 ganger i måleperioden ved måleboden ved dagsonen (26. januar, 27. januar, 28. januar, 30. januar, 31. januar, 11. februar, 12. februar, 13. februar; dvs. i uke 4 og uke 6). Ved stasjonen på kaia ble døgnmiddelkonsentrasjoner over 50 µg/m³ observert 31. januar og 12. februar. På Loallmenningen var PM₁₀-døgnmiddelverdiene under dette nivået i hele måleperioden. I måleperioden ble det registrert 4 døgn med PM₁₀-konsentrasjon over grenseverdien ved den veinære stasjonen Manglerud (9. februar, 11. februar, 12. februar, 13. februar; dvs. i uke 6) og ingen overskridelser ved bybakgrunnsstasjonen Sofienbergparken.

Ut fra en 6 ukers målekampanje kan man ikke si om grenseverdien vil overskrides i løpet av et helt år. De fleste døgnmidler over 50 µg/m³ i Oslo observeres generelt i månedene februar, mars, april som en kombinert effekt av piggdekkbruk, tørre veiforhold og oppvirvling. Overskridelse av grenseverdien for PM₁₀ (mer enn 30 døgnmidler over 50 µg/m³) har ikke blitt observert ved målestasjonene i Oslo i 2021¹⁴. Observasjonene fra målekampanjen antyder at målingene utenfor dagsonen var påvirket av utslipp fra dagsonen og at det kan være fare for overskridelse av grenseverdien sørvest for dagsonen under tørre forhold. Det er tillatt med 30 overskridelser av døgn grenseverdien over et helt kalenderår. Etter en mulig innskjerping av PM₁₀-grenseverdien fra 1. januar 2022 er antallet tillatte overskridelser 25.

Grenseverdien for PM₁₀ årsmiddel er på 25 µg/m³ (15 µg/m³ for PM_{2.5}). PM₁₀-middel i måleperioden var 30,4 µg/m³ ved dagsonen (20,2 µg/m³ for PM_{2.5}), 21,7 µg/m³ på kaia (16,4 µg/m³ for PM_{2.5}), og 18,5 µg/m³ ved Loallmenningen (12,7 µg/m³ for PM_{2.5}). Målingene pågikk i 6 uker og det er ikke mulig å vurdere eventuell overskridelse av årsgrenseverdien på dette grunnlaget.

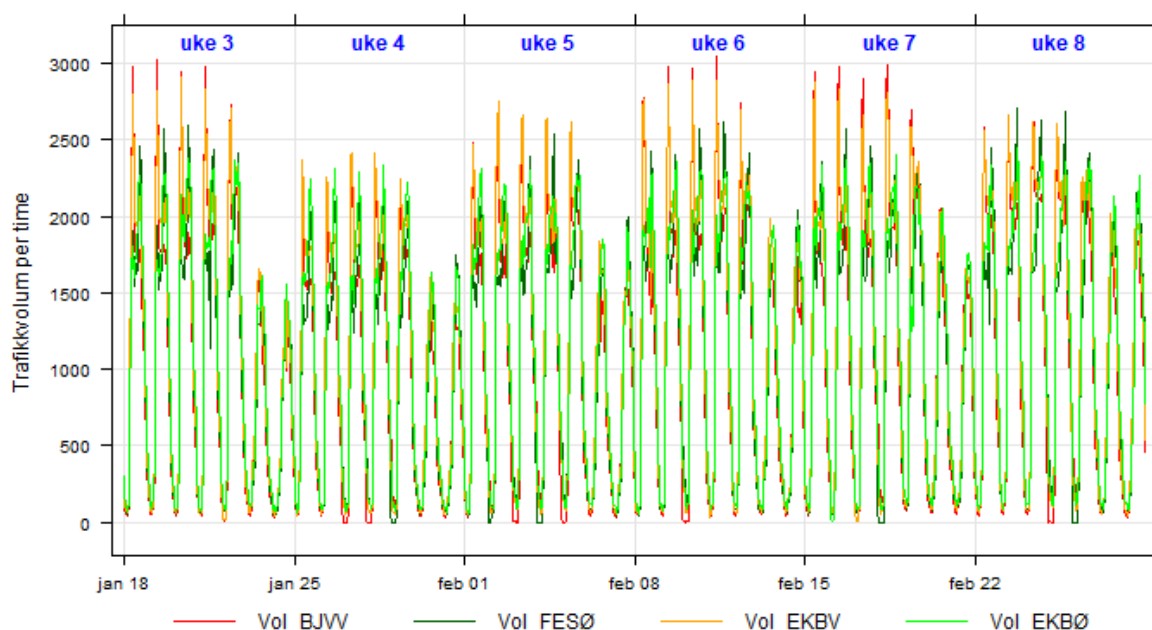
4.1.3 Trafikk

Data om trafikkvolum som er representative for måleområdet ved Sørenga (Ekeberg tunnelen¹⁵ østgående, Ekeberg tunnelen vestgående, Bjørvikatunnelen vestgående, Filipstad østgående¹⁶) er vist i Figur 30. I måleperioden var det en tydelig variasjon av trafikkvolumet per døgn og fra uke til uke. Trafikkvolumet er typisk størst i rushtiden om morgenen i vestgående løp, mens østgående løp har topp på ettermiddagen. Toppen om morgenen er redusert i ferieuken (f.eks. uke 8, vinterferie). Både trafikkvolum og trafikkhastighet (Figur 32) har en effekt på støvoppvirvling. Lavere trafikkvolum i uke 4 kan ha årsak i innstramning av reglene i forbindelse med Covid-pandemien.

¹⁴ I perioden 1. januar – 3. desember 2021 har det vært 25 av 35 tillatte overskridelser ved Hjortnes.

¹⁵ Ekeberg tunnelen østgående tilsvarer Ekeberg tunnelen nordgående (i <http://www.vegvesen.no/trafikkdata>), Ekeberg tunnelen vestgående tilsvarer Ekeberg tunnelen sørgående

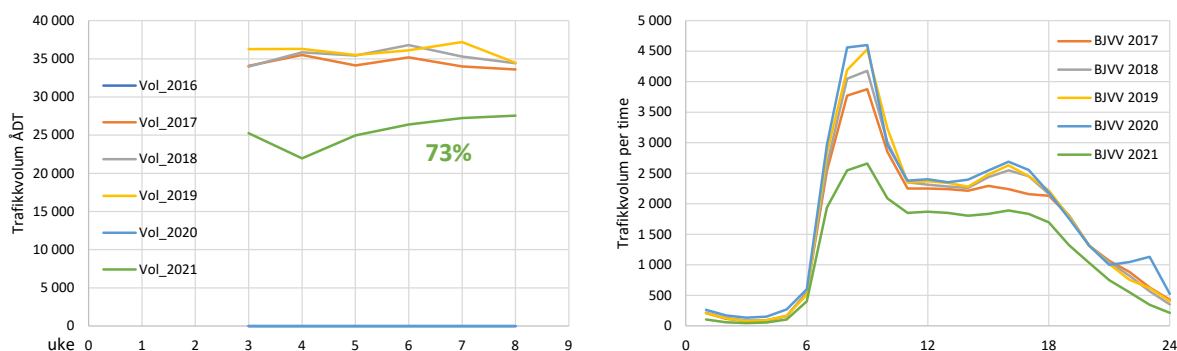
¹⁶ Trafikktelleren i Bjørvikatunnelen østgående leverte ikke data i måleperioden. Derfor er data fra Filipstad østgående vist i figuren. Det er én av-/påkjøring mellom Filipstad og telleren under Operaen. Det antas at døgnvariasjonen av trafikkvolumet målt på Filipstad er sammenlignbar med trafikkvolumet i Bjørvikatunnelen. Trafikktelleren Filipstad er operativ fra 2021.



Figur 30: Trafikkvolum (kjøretøy per time) i Bjørvikatunnelen vestgående (BJVV), Filipstad østgående (FESØ), Ekeberg tunnelen vestgående (EKBV) og østgående (EKBØ) i måleperioden.

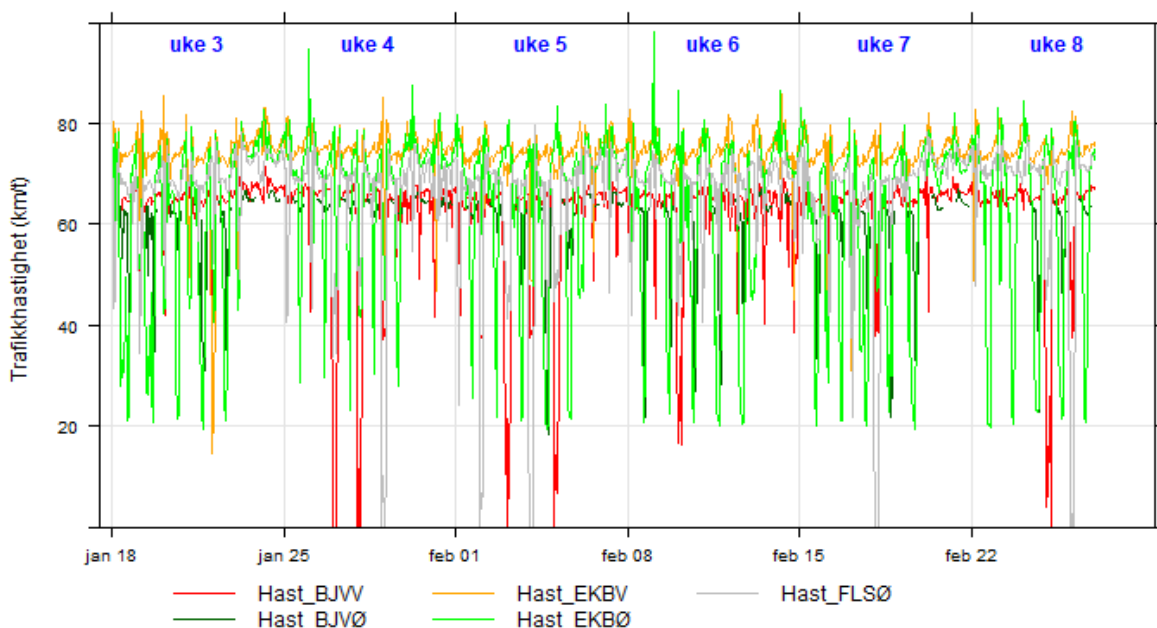
Figur 31 viser trafikkvolumet (ÅDT) i Bjørvikatunnelen vestgående som er registrert for tidsperioden uke 3 – uke 8 i årene 2016-2021 (trafikk tellinger for 2016 og 2020 mangler i BJVV) for å sammenligne hvor representativ trafikk mengden i 2021 (pandemiar) var i forhold til vanlig trafikk mengde. Trafikk tellingene viser en nedgang i trafikkvolumet i 2021 i ukene måleprogrammet pågikk sammenlignet med årene før. Trafikkvolumet var 73 % av midlet trafikkvolum for samme periode i årene 2016-2020. Sannsynlig årsak til dette er forandret atferd/restriksjoner i forbindelse med Covid-19 og smittevern tiltak. Det kan dermed forventes en økning i oppvirvling og utslipp av svevestøv når trafikken er tilbake til normalen. Det antas at dette ikke vil ha betydning for måleresultatene i forbindelse med kartleggingen av effekten til ventilasjonstårnene siden noe lavere trafikkvolum ikke endrer den grunnleggende dynamikken i tunnelen.

Høyre delen av Figur 31 viser døgnvariasjonen av trafikkvolumet i Bjørvikatunnelen vestgående midlet over hverdagene (mandag – fredag) i perioden uke 3 – uke 8 i årene 2017 – 2021. I tillegg til at trafikkvolumet generelt var redusert i 2021, sammenlignet med årene før, er rushtidstoppene mindre utpreget enn vanlig, særlig om morgenen men også på ettermiddagen.



Figur 31: Venstre: Trafikkvolum (ÅDT) i Bjørvikatunnelen vestgående i uke 3 – uke 8 2021 (grønn kurve) sammenlignet med samme periode i årene 2017–2019. Høyre: Midlet døgnvariasjon av trafikkvolumet i Bjørvikatunnelen vestgående på hverdager (man-fre) i uke 3 – uke 8 i årene 2017–2021.

Trafikkhastigheten i Operatunnelen i måleperioden er vist i Figur 32. Hastighetsgrensen er på 70 km/t. Midlet kjørehastighet for uhindret trafikkflyt er mellom 65 og 80 km/t. På hverdager ble det observert saktegående trafikk (kø) i Ekeberg tunnelen østgående hver ettermiddag, med forplantning videre i Bjørvika østgående enkelte dager. Svevestøppvirkning øker med økende trafikkhastighet.



Figur 32: Trafikkhastighet (km/t) i Bjørvikatunnelen vestgående (BJVV), Bjørvikatunnelen østgående (BJVØ), Ekeberg tunnelen vestgående (EKBV) og østgående (EKBØ), og Filipstad østgående (FLSØ) i måleperioden.

4.2 Generelle observasjoner

Normalt kjøres ikke ventilasjonstårnene i Operatunnelen. I regulær drift er det NO- og CO-konsentrasjonene, registrert av SVVs sensorer, som styrer langs ventilasjon og tårnventilasjon i tunnelen. I første og tredje uken i måleprosjektet (uke 3/2021 og uke 5/2021) var tårnventilasjonen slått av manuelt. Strømningshastighet målt i disse periodene angir dermed vanlige forhold i

tunnelløpene. PM₁₀-konsentrasjonen og NO₂-konsentrasjonen (og andre målte parametre) i tunnelløpene og i dagsonen kan variere utover nivåene målt i uke 3 og uke 5 når utekonsentrasjonene eller trafikkvolumet avviker sterkt fra forholdene under målekampanjen.

4.2.1 Luftstrømning i tunnelen

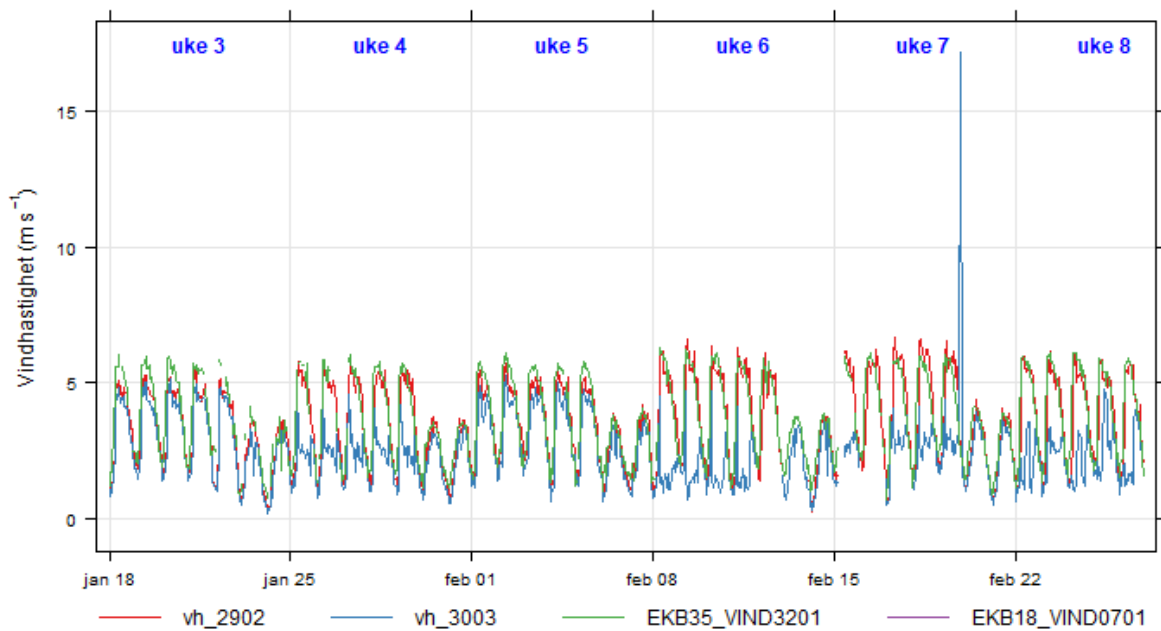
Midlet luftstrømningshastighet i Bjørvika- og Ekeberg tunnelen i hverdager midt på dagen var ca. 4,5-4,7 m/s (Figur 33 og Figur 34). Luftstrømningen skyldes i hovedsak stempeleffekten¹⁷ fra trafikken og er avhengig, blant annet, av trafikkvolum og trafikkhastighet gjennom tunnelen. Ventilasjon som skyldes meteorologiske krefter (vind og temperaturforskjell) og stempeleffekt fra kjøretøy betegnes som naturlig ventilasjon.

I Ekeberg tunnelen vestgående var vindhastigheten før ventilasjonstårnet (vh_2902) ca. 0,5 m/s større enn etter tårnet (vh_3003) i ukene med kun naturlig ventilasjon. Vindretningen i måleperioden var hovedsakelig fra nordøst, dvs. det kan ha vært en vindkomponent inn i Ekeberg tunnelen. Strømningen i tunnelen påvirkes mer av utendørs vind jo nærmere portalen man kommer.

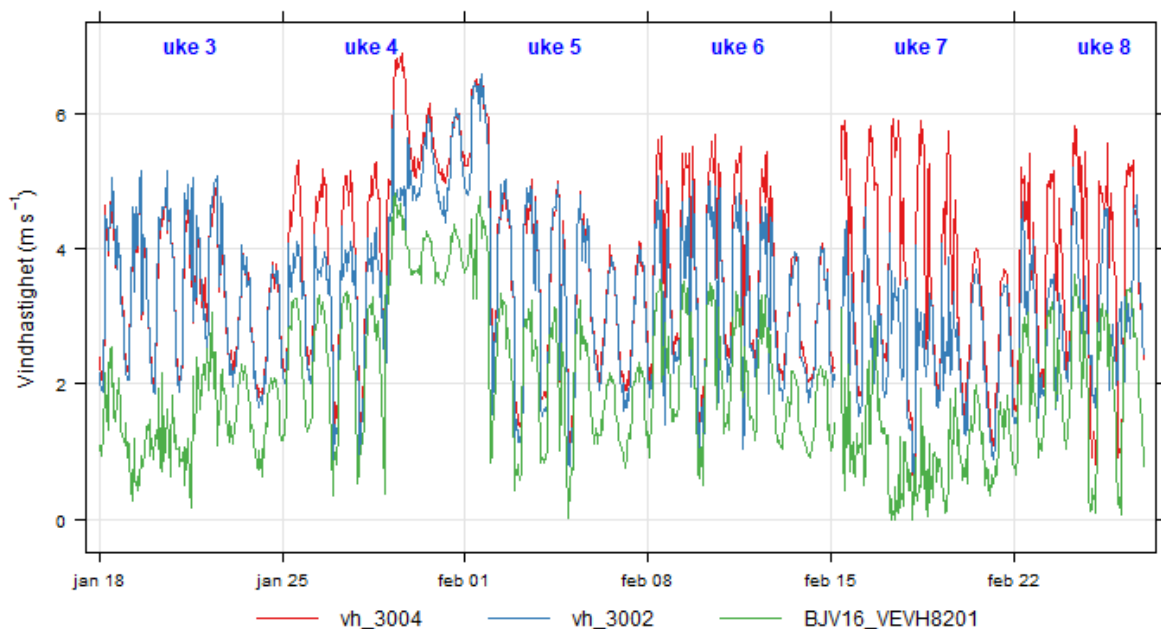
I Bjørvika tunnelen østgående var vindhastigheten før (vh_3004) og etter ventilasjonstårnet (vh_3002) omtrent like i uke 3 og uke 5. Døgnvariasjonen og maksimal verdi av luftstrømningshastigheten i tunnelløpene varierte veldig lite fra dag til dag i ukene uten tårnventilasjon. Observasjonene kan dermed anses som vanlige. Vindhastigheten i Operatunnelen ved ulike ventilasjonsscenarioer er diskutert i Kapittel 4.3.

Vindhastighet i tunnelen er målt kontinuerlig av SVV i Festningstunnelen (FES51_VIND8502, FES66_VIND8502), i Bjørvika tunnelen (BJV16_VEVH8201, BJV37_VEVH8201) og i Ekeberg tunnelen (EKB18_VIND0701, EKB35_VIND3201), dvs. én vindsensor per tunnelsektor og tunnellop. Lokasjonene til sensorene er vist i Figur 2. Vindmålingene av sensoren EKB35_VIND3201 i Ekeberg tunnelen vestgående løp stemmer godt overens med målingene før ventilasjonstårnet i vestgående løp utført av NILU (se sensorene 2902 og 3003 i Figur 33). Sensor EKB18_VIND0701 i Ekeberg tunnelen østgående leverte ikke data i måleperioden. Vindmålingene fra sensoren BJV16_VEVH8201 i Bjørvika tunnelen østgående korrelerer med målingene utført av NILU på begge sidene av ventilasjonstårnet i østgående løp (se Figur 34). Hastigheten målt av SVVs sensor er lavere enn NILUs målinger, men det kan henge sammen med plasseringen av SVVs sensor midt i havarinisjen og geometrien av tunnelen (i havarinisjen er arealet større og dermed er målt vindhastighet lavere). Det foreligger sporadisk (7-14 5 min verdier per dag i måleperioden) vindhastighetsdata fra SVVs vindsensor BJV37_VEVH8201 i Bjørvika tunnelen vestgående, men verdiene vurderes som urealistiske (støy; faste verdier på 0,0, rundt 4, rundt 8,5, rundt 12,5, rundt 14 og 20,0 m/s).

¹⁷ Stempeleffekt: Når biler passerer gjennom en tunnel med en fart som er forskjellig fra lufthastigheten i tunnelen, vil de utøve et trykk (skyvekraft) mot luftmassene i tunnelen.



Figur 33: Sammenligning av vindmålinger i Ekeberg tunnelen vestgående løp. EKB35_VIND3201 (SVV) er montert midt i Ekeberg tunnelen, Vaisala 2902 (NILU) var montert rett før ventilasjons-tårnet (i kjøreretning) og Vaisala 3003 (NILU) mellom ventilasjonstårn og dagsone. EKB18_VIND0701 (SVV) i Ekeberg tunnelen østgående løp leverte ikke data i måleperioden.



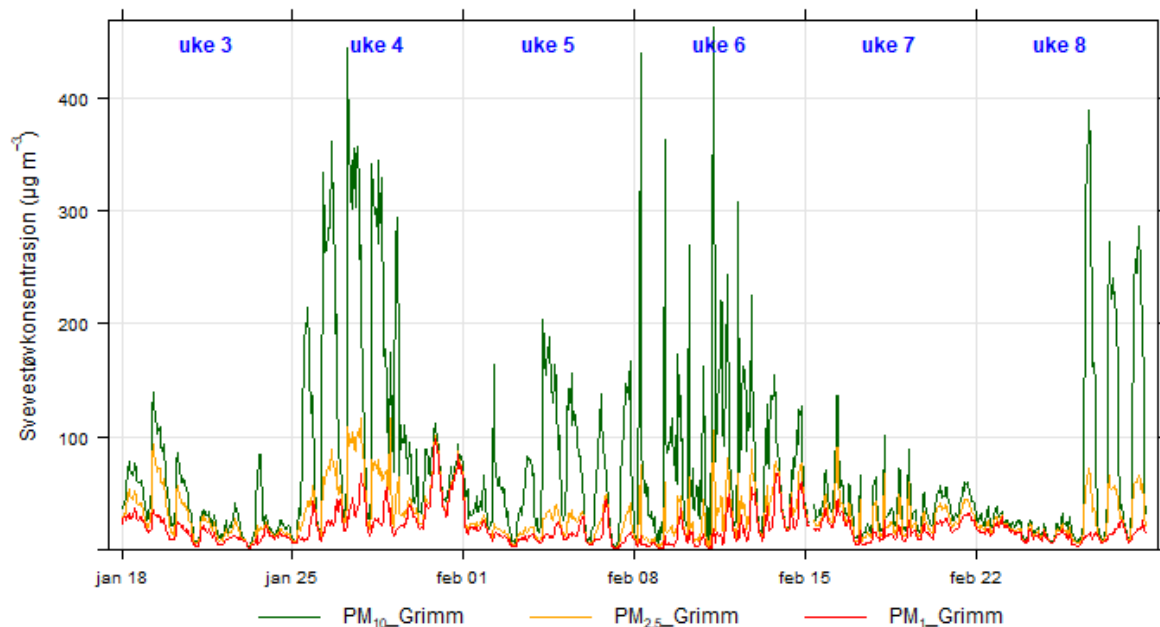
Figur 34: Sammenligning av vindmålinger i Bjørvikatunnelen østgående løp. BJV16_VEVH8201 (SVV) er montert midt i Bjørvikatunnelen, Vaisala 3004 (NILU) var montert rett før ventilasjons-tårnet (i kjøreretning) og Vaisala 3002 (NILU) mellom ventilasjonstårnet og dagsone. BJV37_VEVH8201 (SVV) i Bjørvikatunnelen vestgående løp leverte ikke brukbare data i måleperioden og er ikke vist her.

Impulsventilatorene i Bjørvikatunnelen og Ekeberg tunnelen ble ikke satt i drift i måleperioden av forhøyede CO- eller NO-konsentrasjon. Ifølge driftsloggen var impulsventilatorene ikke i drift i måleperioden, bortsett fra perioden 29. januar – 1. februar, der en impulsventilator i Bjørvikatunnelen østgående ble aktivert på trinn 3. Årsaken til at ventilatoren BJV15VEMO8101 gikk på trinn 3 i flere døgn er ukjent. Som vist i Figur 34 har drift av denne impulsventilatoren en tydelig effekt på strømningshastigheten i BJV Ø.

4.2.2 Svevestøvkonsentrasjon

PM dagsone

PM i dagsonen ble målt med en Grimm EDM 180 svevestøvmonitor som var samlokalisert med et TSI-instrument (ID 2901 i Figur 14). Svevestøvnivået i dagsonen er påvirket av trafikkvolumet gjennom dagsonen/tunnelen, av svevestøvnivået ute, av været (f.eks. nedbør) og av intensiteten i tårnventilasjonen, dvs. ventilasjonstårnene i Ekeberg tunnelen vestgående (BJV37 VEMO8901) og i Bjørvikatunnelen østgående (BJV16 VEMO8801). Svevestøvnivået i dagsonen i måleperioden er vist i Figur 35 for alle tre størrelsesfraksjoner målt, PM_{10} , $PM_{2.5}$ og PM_1 . Episoder med mye støvoppvirvling i dagsonen blir tydelige ved at PM_{10} -konsentrasjoner er mye større enn $PM_{2.5}$ - og PM_1 -konsentrasjoner.



Figur 35: Svevestøvkonsentrasjon (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) i dagsonen i måleperioden målt med Grimm EDM 180 (timesmiddel).

I uke 3 var det nedbør, spesielt fra onsdag 20. januar til fredag 22. januar, som dempet svevestøvkonsentrasjonen, særlig PM_{10} -konsentrasjonen, i dagsonen. I uke 5 var det opphold og dermed mer mulighet for oppvirvling fra tørre veioverflater. PM_{10} -konsentrasjonen i dagsonen økte generelt mellom kl. 5 og kl. 7 om morgenen, parallelt med trafikkvolumet. Trafikkvolumet i rushtiden i uke 5 var litt lavere enn trafikkvolumet i rushtiden i uke 3 (se Figur 30).

I uke 4, ved tørre forhold og tårnventilasjon på trinn 2, ble det observert intensiv støvoppvirvling i dagsonen på hverdager. I uke 6, da tårnventilasjon gikk på trinn 3, ble det også observert høye topper, men som diskutert nedenfor i dette kapittelet, var PM_{10} -konsentrasjonen i dagsonen lavere enn man ville ha forventet uten tårnventilasjon. Målingene i Oslo antyder at PM_{10} -konsentrasjonene i byen var høyest i uke 6 (Figur 27 – Figur 29).

Trafikkvolumet i Bjørvikatunnelen¹⁸ i uke 3-8/2021 var ca. 28 % mindre enn gjennomsnittet for samme periode i årene 2017-2020 (se kapittel 4.1.3). Trafikkvolumet for veiene rundt dagsonen og Operatunnelen, dvs. Kong Håkon 5s gate og Mosseveien/Kongshavn, i uke 3-8/2021 var 20-25 % lavere enn gjennomsnittet for samme periode i årene 2016-2020. Reduksjonen skyldes sannsynligvis forandret atferd under pandemien. Som vist i Figur 31 er i tillegg rushtidstoppene om morgenen og på ettermiddagen ytterligere redusert sammenlignet med årene 2017-2020.

Svevestøvnivået i dagsonen var vesentlig høyere enn svevestøvnivået på bakkenivå. Maksimale PM₁₀ timemidler på rundt 150-200 µg/m³ ble nådd i dagsonen i uke 3 og uke 5, mens maksimale PM₁₀ timemidler ved måleboden utenfor dagsonen var på 50-75 µg/m³, og 30-50 µg/m³ ved Loallmenningen. Dette skyldes bedre spredning av svevestøv på bakkenivå og større avstand fra kilden. Luftkvalitetsgrenseverdier gjelder ikke i dagsonen siden offentligheten ikke har adgang til dagsonen.

Støvnivået ute påvirker støvnivået i luften trukket inn av trafikken i tunnellopene. Støvnivået i dagsonen er mest påvirket av graden av støvoppvirvling i tunnellopene og dagsone som er mest utpreget ved opphold og lav luftfuktighet.

PM tunnel

PM-konsentrasjon i tunnelen ble målt i alle tunnellop rundt dagsonen ved bruk av TSI-instrumenter som ble kalibrert på grunnlag av resultatene fra samlokaliseringen på Kjeller. Syv TSI-instrumenter var plassert i de enkelte tunnellop som vist i Figur 14.

PM-konsentrasjonen i tunnelen er påvirket av en rekke ytre faktorer og det er ikke mulig å trekke frem generelle konklusjoner om forhold uten ventilasjon. Effekten av tårnventilasjon på svevestøvkonsentrasjonen i de enkelte tunnellop, i dagsonen og ute er diskutert i kapittel 4.3.

Sikt

Siktmålinger omfatter partikkelforurensning i form av sot fra forbrenningsprosessen i motorene og støv fra slitasje av vegbane og oppvirvling av gammelt støv (SVV, 2012). Det er en sammenheng mellom dårlig sikt og høyt nivå av forurensning. «Sikt» måles med enhet mg/m³. Svevestøv og siktproblematikk er først og fremst en trafikksikkerhetsfaktor i tunneler (SVV, 2012). I Norge benyttes først og fremst måling av NO_x for styring av ventilasjon, men i enkelte tunneler i Sveits styres ventilasjon etter partikkelforurensning på basis av optiske målinger av svevestøv (SVV, 2012). I Operatunnelen brukes CO- og NO-målinger for styring av ventilasjon. Det er uklart hva siktmålingene i Operatunnelen brukes til. SVV opplyser at der det finnes siktmålere er intensjonen at de skal starte ventilasjon.

Det foreligger ikke siktdata fra Ekeberg tunnelen. Siktsensorene i Bjørvikatunnelen er montert i vestgående (BJV37VESI8201) og østgående (BJV16VESI8201) løp under Bjørvika. Siktmålingene i Bjørvikatunnelen østgående (BJV16VESI8201) virker urealistiske (se figur i Vedlegg A), eventuelt er innstillingene for måleområdet ikke tilpasset forholdene i tunnelen. Siktmålingene i Bjørvikatunnelen vestgående (BJV37VESI8201) er også vist i Vedlegg A. Tidsserien viser en variabilitet som minner om støy. Verdiene varierer rundt 2 mg/m³ som er et ganske høyt nivå. I tillegg er nivået målt i BJV Ø to til tre størrelsesordener større enn nivået målt av sensoren i motsatt retning. Ingen av måleseriene for sikt er korrelert med målt PM-konsentrasjon (NILU-målinger, se Kapittel 4.3) eller trafikkmengde i tunnelen og er dermed lite troverdig.

¹⁸ Her refereres det til målinger i Bjørvikatunnelen vestgående. Det foreligger ikke data i <http://www.vegvesen.no/trafikkdata> for Bjørvikatunnelen i uke 3-8 i 2016 og 2020 og det foreligger ikke data for Bjørvikatunnelen østgående i uke 3-8 i 2021. Det foreligger heller ikke data for Ekeberg tunnelen før 2021.

4.2.3 Gasskonsentrasjoner

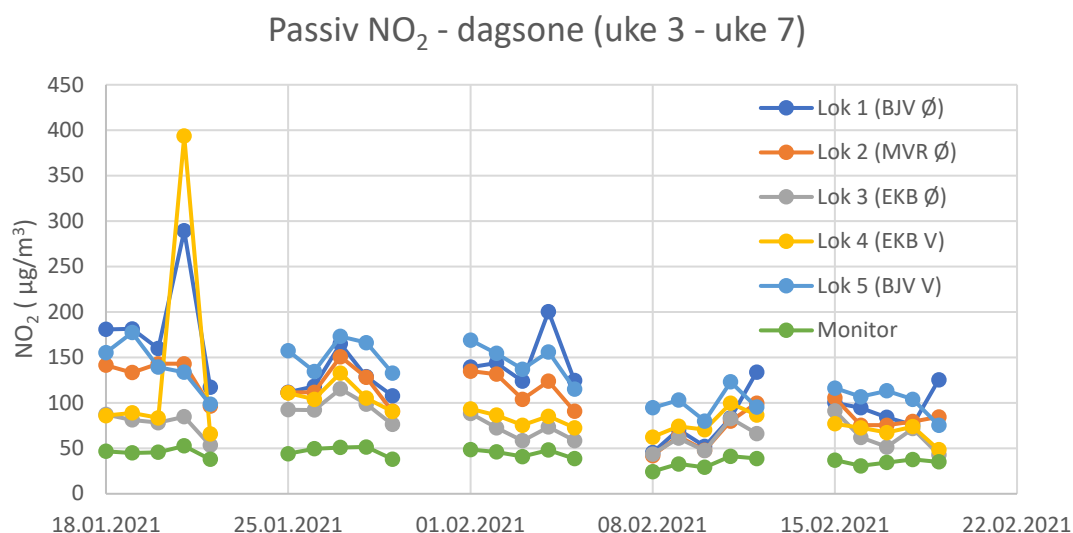
NO_x dagsone

NO₂-konsentrasjonen (målt med NO_x-monitor) i dagsonen varierte med trafikkvolumet, med et minimum på 15-20 µg/m³ etter midnatt og mellom 60 og 90 µg/m³ om dagen. NO₂/NO_x-forholdet i dagsonen varierte mellom et maksimum rundt 0,5 på natten (mellom ca. kl. 1 og ca. kl. 4) og et minimum rundt 0,15 om dagen (mellom kl. 7 og kl. 17).

Til sammenligning var NO₂/NO_x-forholdet på bakkenivå, ved målestasjonen Loallmenningen (bybakgrunnsstasjon nær dagsonen), rundt 0,55-0,6 på natten og rundt 0,45 om dagen. En lignende variasjon ble observert på Manglerud (veinær stasjon) med ca. 0,65 på natten og ca. 0,4 om dagen. I Sofienbergparken (bybakgrunnsstasjon) derimot, som er mindre påvirket av direkte utslipp, var NO₂/NO_x-forholdet høyere, ca. 0,85 på natten og 0,7 om dagen. Observasjonene er plausible, lavest NO₂/NO_x-forhold er forventet nærmest utslippskilden, der NO-utslippet er minst oksidert til NO₂.

I tunnelen forventer man enda lavere NO₂/NO_x-forhold enn i dagsonen (som beskrevet i kapittel 3.1). SVV måler NO-konsentrasjonen i tunnelen som brukes til styring av ventilasjonssystemet. NO₂/NO_x-forholdet ble antatt som 10 % i 2006 (HB021) og 2010 (HB021) og tilpasset endrede forhold med 15 % i 2020 (HB-N500).

NO₂-konsentrasjonene målt ved de fem passive prøvetakingsstedene i dagsonen var høyere enn konsentrasjonen målt av NO_x-monitoren (Figur 36). NO₂-konsentrasjonen ved posisjon 1 (utenfor utgangen fra BJV Ø) og utenfor inngangen til BJV V (posisjon 5) var høyest (ca. 150 µg/m³ som døgnmiddel). Lavest konsentrasjon av de fem prøvetakingsstedene var ved posisjon 3 (ved inngangen til EKB Ø). NO₂-fordelingen i dagsonen, med høyere konsentrasjon ved posisjonene i midten av dagsonen enn ved de sørligste posisjonene, kan være forårsaket av større spredning sør i dagsonen pga. vind fra nordøst i måleperioden. I uke 3 og uke 5 uten ventilasjon og uke 4 med tårnventilasjon på trinn 2 var NO₂-konsentrasjonen i dagsonen høyere enn i uke 6 (trinn 3) og uke 7 (trinn 4). Ved lokasjonene 1 og 5 var konsentrasjonen i uke 6 og uke 7 rundt 100 µg/m³ og dermed sterk redusert sammenlignet med de første tre ukene.



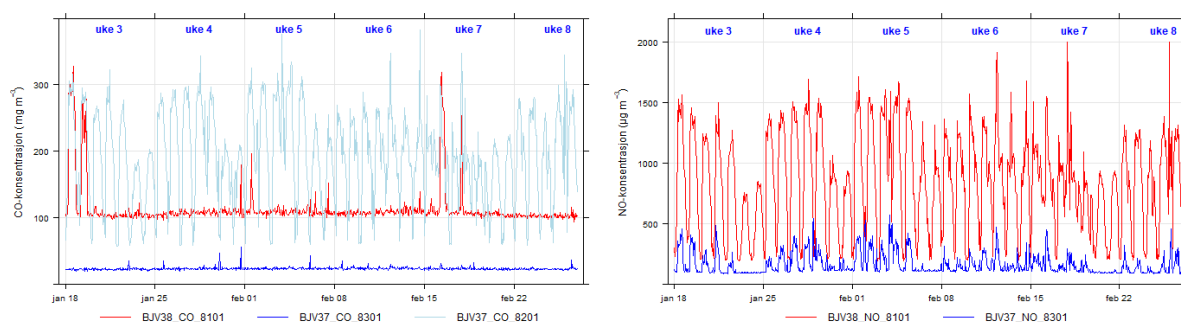
Figur 36: NO₂-konsentrasjon (døgnmidler) målt i dagsonen med passive prøvetakere. Nivået målt med NO_x-monitor er også vist.

CO-, NO- og siktmåling i tunnellopene

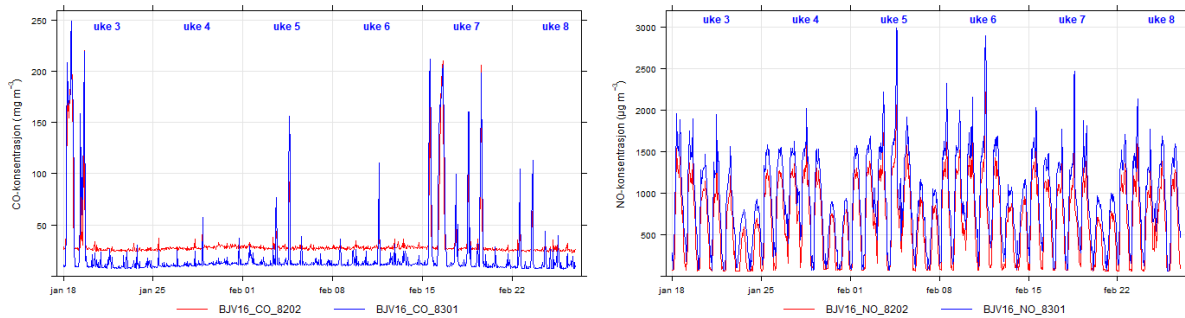
CO og NO er kontinuerlig målt av Statens vegvesen ved faste målepunkter, både nær tunnelåpningene og midt i tunnelen, i begge kjøreretningene (se Figur 2 for grov plassering). CO- og NO-konsentrasjoner målt i Operatunnelen brukes til styring av langsventilasjonen i tunnelen og tårnventilasjonen. I hele måleperioden var CO- og NO-nivået under setverdiene som utløser ventilasjon (Figur 4). Sensorene leverer CO og NO blandingsforhold i ppm (parts per million by volume). Verdiene ble konvertert til konsentrasjoner i $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ved standard temperatur og lufttrykk.

NO- og CO-konsentrasjonen i Bjørvikatunnelen vestgående er vist i Figur 37. NO-konsentrasjonen målt av sensorene BJV37_NO_8301 og BJV38_NO_8101 varierte med trafikkvolumet. Nivået midt i Bjørvikatunnelen (BJV38_NO_8101, under Operaen) var høyere enn nivået ca. 150 m etter dagsonen (BJV37_NO_8301), som man forventer. CO-sensorene BJV37_CO_8301 (ca. 150 m etter dagsonen) og BJV38_CO_8101 (midt i Bjørvikatunnelen) viste tilsomme data i måleperioden. CO-konsentrasjonen målt av sensoren BJV37_CO_8201 (det er uklart hvor i tunnelen sensoren befinner seg) varierte med trafikkvolumet og viser muligens realistiske data. Sensoren under Operaen, dvs. midt i tunnelen (BJV38_CO_8101), viste en offset på ca. $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ sammenlignet med sensoren som er nærmere inngangen fra dagsonen (BJV37_NO_8301). En offset på $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ tilsvarer 85,8 ppm som er et alvorlig avvik ved setverdier i størrelsesorden 10 – 25 ppm. Sensoren nærmere dagsonen har mer tilgang til frisk luft, dvs. man ville forvente lavere konsentrasjon, men man forventer også en variasjon med trafikkvolumet, uavhengig av hvor i tunnelen målingene er gjort. Begge sensorene viser bare støy, ingen variasjon med trafikkvolumet. Målingene fra disse to sensorer i BJV V kan ikke brukes til ventilasjonsstyring.

Det foreligger data fra to NO- og to CO-sensorer i Bjørvikatunnelen østgående, BJV16_NO/CO_8202 (midt i Bjørvikatunnelen) og BJV16_NO/CO_8301 (utløp, ca. 250 m før dagsonen), se Figur 38. NO-konsentrasjonene samvarierte med trafikkvolumet og høyere konsentrasjonstopper enn midt i tunnelen ble nådd nær dagsonen. Dette tyder på at innblandingen av friskluft fra åpningen er ubetydelig i østgående løpet av Bjørvikatunnelen. Den målte CO-konsentrasjonen viste ingen variasjon med trafikkvolumet. I tillegg har sensor BJV16_CO_8202 en offset på ca. $25 \text{ mg}/\text{m}^3$. En offset på $25 \text{ mg}/\text{m}^3$ tilsvarer 21 ppm som er et alvorlig avvik ved setverdier i størrelsesorden 20 – 50 ppm. Gassensorene i Bjørvikatunnelen har vært i drift siden 2010 og ser ikke ut å levere pålitelige data lenger. Målingene fra CO-sensorene i BJV Ø kan ikke brukes til styring.



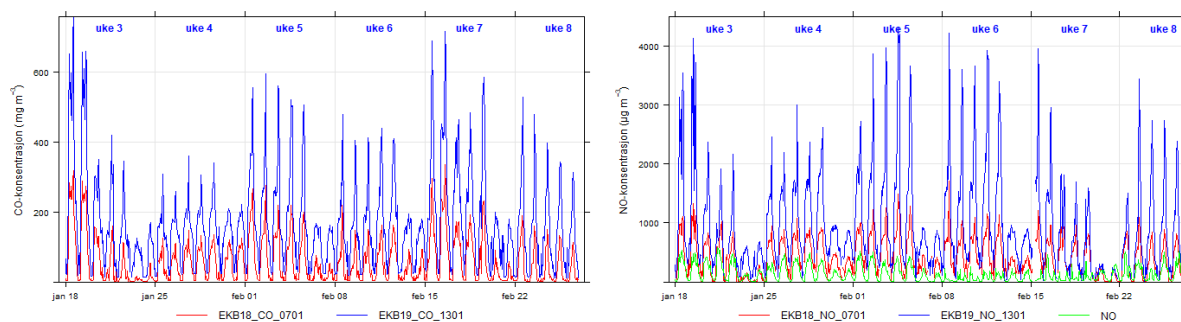
Figur 37: CO-konsentrasjon (venstre) i mg/m^3 og NO-konsentrasjon (høyre) i $\mu\text{g}/\text{m}^3$ målt av SVVs sensorer i Bjørvikatunnelen vestgående. Rød kurve: midt i tunnel, blå kurve: nærmere portal, lyseblå: uklart hvor sensoren befinner seg.



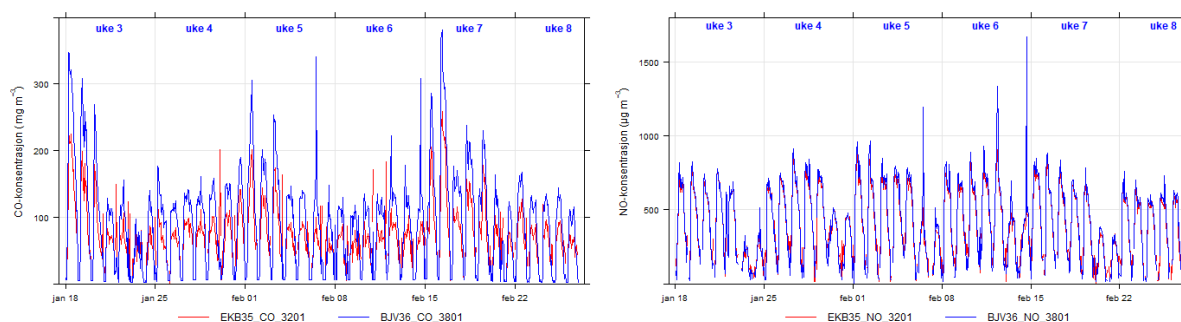
Figur 38: CO-konsentrasjon (venstre) i mg/m^3 og NO-konsentrasjon (høyre) i $\mu\text{g}/\text{m}^3$ målt av SVVs sensorer i Bjørvikatunnelen østgående. Rød kurve: midt i tunnel, blå kurve: nærmere portal.

NO- og CO-konsentrasjonen i Ekeberg tunnelen østgående måles midt i Ekeberg tunnelen (EKB18_NO/CO_0701) og i overgangen mot Svartdalstunnelen/Lodalen (EKB19_NO/CO_1301). Både NO- og CO-konsentrasjonen varierte med trafikkvolumet og nivåene var høyere ved sensoren med størst avstand fra dagsonen (EKB19_NO/CO_1301) og dermed mindre tilgang til friskluft (Figur 39). Som forventet målte NILUs NO-monitor i dagsonen (grønn kurve i Figur 39) lavere NO-konsentrasjon enn nivået lenger inn i tunnelen.

I Ekeberg tunnelen vestgående er det to NO- og to CO-sensorer, EKB35_NO/CO_3201 (midt i Ekeberg tunnelen) og BJV36_NO/CO_3801 (ved utløpet mot dagsonen). Både NO- og CO-konsentrasjonen varierte med trafikkvolumet. Det var lite forskjell i NO-nivået mellom de to målepunktene (Figur 40). CO-konsentrasjonene nær utgangen til dagsonen nådde høyere topper om dagen og verdier nær null på natten (Figur 40). CO-nivået i Ekeberg tunnelen nærmere dagsonen ble målt høyere enn midt i tunnelen. Dette er ikke observert for andre komponenter. Gassensorene i Ekeberg tunnelen er fra 2019 og viser mye mer konsistente måleresultater enn sensorene i Bjørvikatunnelen.



Figur 39: CO-konsentrasjon (venstre) i mg/m^3 og NO-konsentrasjon (høyre) i $\mu\text{g}/\text{m}^3$ målt av SVVs sensorer i Ekeberg tunnelen østgående. Rød kurve: midt i Ekeberg tunnel, blå kurve: overgang mot Svartdalstunnelen, grønn kurve: NO-monitor i dagsone.



Figur 40: CO-konsentrasjon (venstre) i mg/m^3 og NO-konsentrasjon (høyre) i $\mu\text{g}/\text{m}^3$ målt av SVVs sensorer i Ekeberg tunnelen vestgående. Rød kurve: midt i Ekeberg tunnel, blå kurve: nærmere dagsone.

I måleperioden var både CO- og NO-konsentrasjonene ved alle målepunktene i BJV og EKB lavere enn halvparten av setverdien for trinn 1 (jf. Figur 4). Etter målekampanjen reviderte SVV setverdiene for CO i alle tunnelseksjoner (iht. tabell 9.7, håndbok V520 pr Mars 2021; se også Vedlegg A). For noen av målepunktene er de nye setverdiene lavere enn før, for noen av målepunktene er de høyere. Konsentrasjonene i måleperioden var stort sett under de nye setverdiene, bortsett fra sensor EKB19COAL1301 som hadde en 5 min middelværdi på 16,4 ppm på første måledagen (18. januar 2021, kl. 15:45-15:50), som ligger over den nye setverdien for trinn 1 på 15 ppm.

4.3 Kartlegging av ventilasjonstårnernes effekt

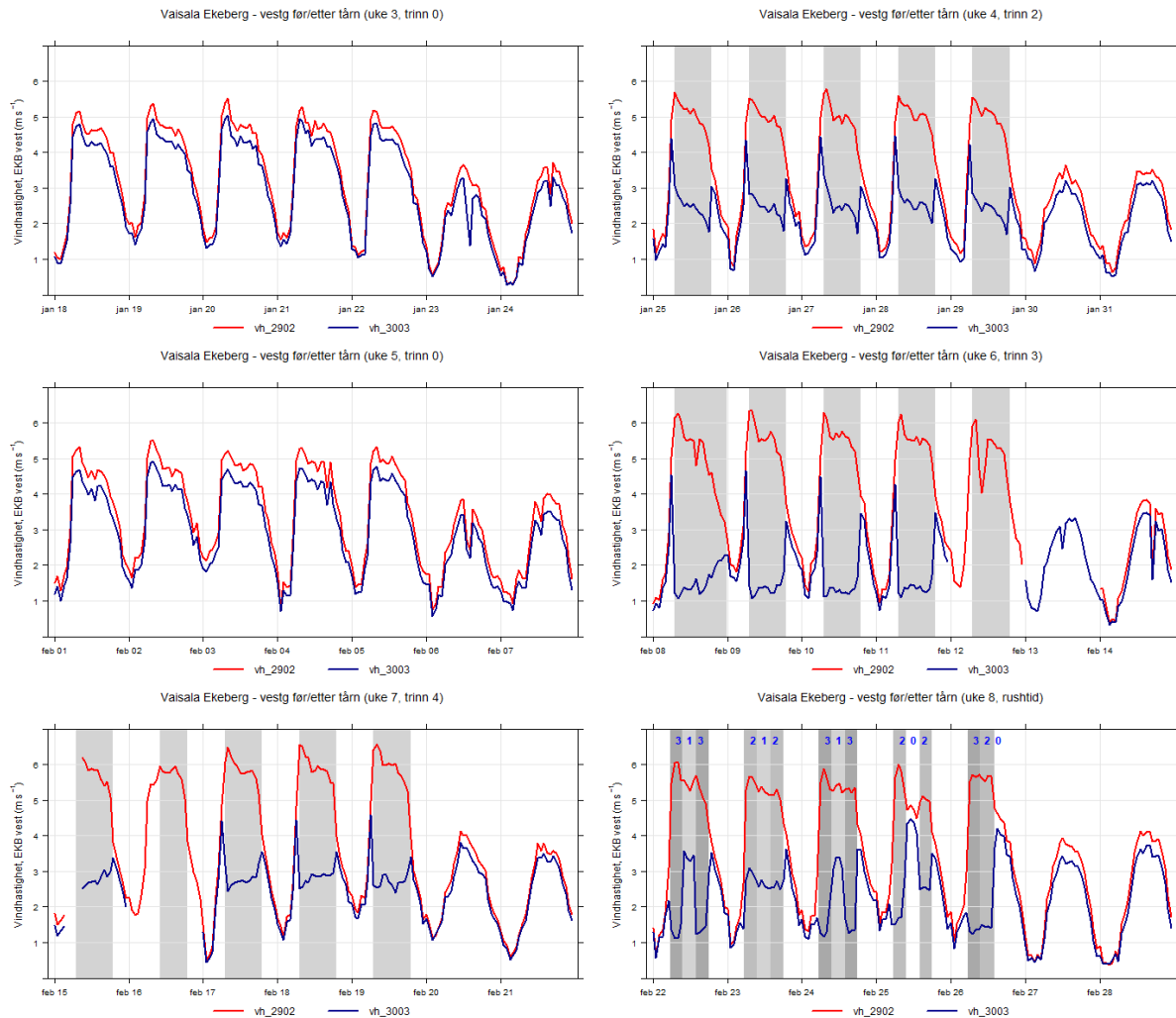
Tårnventilasjonen gikk på definerte trinn om dagen (mellom kl. 7 og kl. 19 på hverdager) i uke 4 (trinn 2), uke 6 (trinn 3) og uke 7 (trinn 4). For å sammenligne observasjonene med vanlige forhold var tårnventilasjonen ikke i drift i uke 3 og uke 5. Uke 8 var en ekstra uke der ulike ventilasjonsscenarioer ble testet. Ventilasjonsplanen er beskrevet i kapittel 3.3.

4.3.1 Ekeberg tunnelen

Det vestgående tunneløpet i Ekeberg tunnelen er knyttet til ventilasjonstårnet sør for dagsonen og hadde to målepunkter for PM og vind, henholdsvis før ventilasjonstårnet og etter ventilasjonstårnet (dvs. mellom ventilasjonstårn og dagsonen) som vist i Figur 14. Luftmassen i vestgående tunneløp beveger seg generelt i kjøreretningen, dvs. fra Svartdalstunnelen/Lodalen mot dagsonen. PM_{10} -konsentrasjonen lenger inn i tunnelen (posisjon 2902, rød kurve) var større enn konsentrasjonen nærmere dagsonen (posisjon 3003, gul kurve), både når tårnventilasjonen ikke var i drift og med ventilasjon i drift ved ulike intensitetstrinn (se Figur 42). Dette virker ulogisk ved første betraktning (teoretisk sett bør konsentrasjonen være størst nærmest dagsonen når tårnventilasjonen ikke er i drift), men kan forklares bl.a. ved at vindretningen ute var fra nordøst, dvs. en vindkomponent inn i Ekeberg tunnelen sørget for at PM-konsentrasjonen ved utløpet ble fortennet med frisk luft, som

diskutert i kapittel 4.2.1. Ved tilstrekkelig tårnventilasjonsdrift strømmer luft fra dagsonen inn i tunneløpet og fortynner PM-konsentrasjonen i strekningen mellom dagsonen og ventilasjonstårnet. Som beskrevet i Kapittel 4.2.1 er strømningshastigheten i vestgående løp i perioder uten ventilasjon (uke 3 og uke 5) hovedsakelig bestemt av trafikkvolumet.

Ventilasjonstårnene gikk på trinn 2 i uke 4. Det ble observert at strømningshastigheten før ventilasjonstårnet økte litt, mens strømningshastigheten mellom ventilasjonstårn og dagsone var lavere sammenlignet med situasjonen uten ventilasjon (se Figur 41). Strømningsretningen i uke 4 var i kjøreretningen hele døgnet, med redusert hastighet etter ventilasjonstårnet i tidsperioden kl. 7 – 19. I uke 6 ble ventilasjonstårnene kjørt på trinn 3 mellom kl. 7 og kl. 19. Dette førte til økt strømningshastighet i vestgående løp før ventilasjonstårnet (opp mot 6 m/s i rushtiden) og svært lav strømningshastighet mellom ventilasjonstårn og dagsonen (ca. 1,5 m/s). Strømningsretningen mellom ventilasjonstårn og dagsonen snudde mot kjøreretningen ved ventilasjon på trinn 3. Mandag 8. februar var tårnventilasjonen i Ekeberg tunnelen i drift (trinn 3) helt frem til midnatt istedenfor å slokkes kl. 19. Effekten synes tydelig både på vindhastigheten og svevestøvkonsentrasjonen. Måleresultatene viser tydelig at lufthastigheten i tunnelen før tårnet øker, når tårnavtrekket økes. Ved trinn 4 i uke 7 var strømningshastigheten før ventilasjonstårnet opp mot 6,5 m/s i rushtiden, mellom ventilasjonstårn og dagsonen var strømningshastigheten mellom 2 og 3 m/s om dagen med strømningsretning mot kjøreretningen.



Figur 41: Strømningshastighet i Ekeberg-tunnelen vestgående løp før ventilasjonstårnet (rød) og mellom ventilasjonstårn og dagsone (blå), per uke. Grå bakgrunn viser når ventilasjonstårnene var i drift. For uke 8 er ventilasjonstrinn vist med blå tall.

I Ekeberg-tunnelen kan man tydelig observere uttynning av PM-konsentrasjonen etter tårn i uke 7, da tårnene gikk på trinn 4. Dette indikerer at luft trekkes inn fra dagsonen mot kjøreretningen, og luften tynnes ut før avtrekk i tårn.



Figur 42: PM_{10} -konsentrasjon i Ekeberg-tunnelen i måleperioden, per uke. Rød: Vestgående løp før ventilasjonstårnet (2902). Gul: Vestgående løp etter ventilasjonstårnet (3003). Grønn: Østgående løp (4502). Grå bakgrunn viser når ventilasjonstårnene var i drift. For uke 8 er ventilasjonstrinn vist med blå tall.

PM -konsentrasjonen i østgående tunnellop (posisjon 4502) var lavere enn nivået målt ved posisjonene i vestgående løp (se Figur 42). Måleinstrumentene i østgående løp var plassert ca. 10 meter inn i tunnelen. Kjøretøy trekker med seg forholdsvis ren luft inn i østgående løp. Østgående og vestgående løp er helt separert fra hverandre frem til dagsonen (det er ikke tilfellet i Bjørvikatunnelen, se nedenfor). Strømningshastighet og -retning i østgående løp er bestemt av trafikkvolum og -hastighet (stempleffekt).

4.3.2 Bjørvikatunnelen

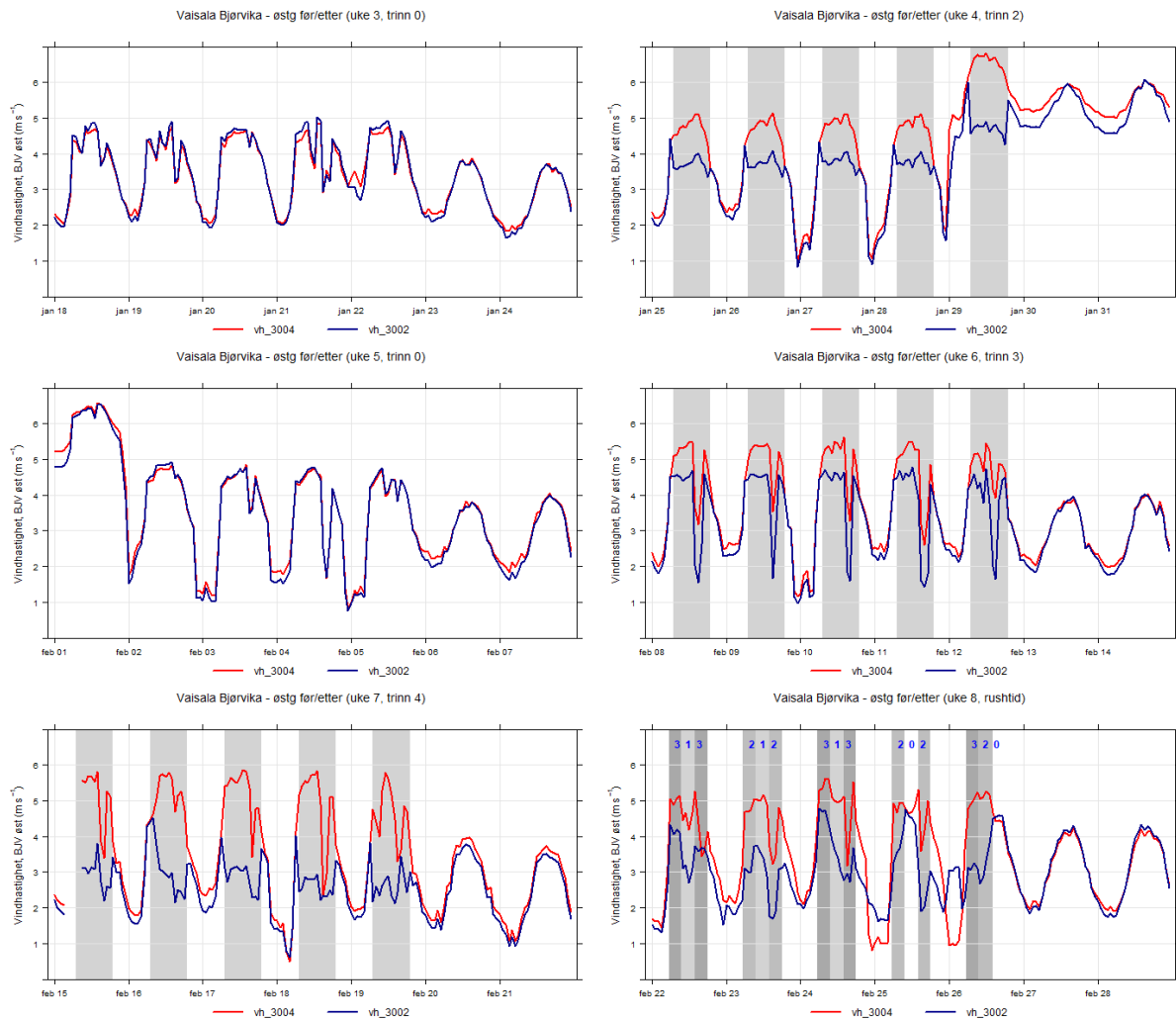
Ventilasjonstårnene nord for dagsonen på Sørenga er knyttet til østgående løp i Bjørvikatunnelen. To målepunkter for PM og vind var lokalisert hhv. før ventilasjonstårnet og etter ventilasjonstårnet (dvs. mellom ventilasjonstårn og dagsonen) som vist i Figur 14. I Bjørvikatunnelen¹⁹ østgående var det lite forskjell mellom PM_{10} -konsentrasjonen lenger inn i tunnelen (posisjon 3004, rød kurve) og nærmere dagsonen (posisjon 3002, gul kurve), spesielt når tårnventilasjonen ikke var i drift (Figur 44). Med ventilasjon i drift ved ulike intensitetstrinn var konsentrasjonen litt høyere nærmere dagsonen. Med økende tårnventilasjonsdrift reduseres luftvolumet (og -hastigheten) etter tårnet. Et mindre luftvolum,

¹⁹ I BJV Ø var det kortere avstand mellom målepunktene (ca. 20 m) enn i EKB V (ca. 40 m).

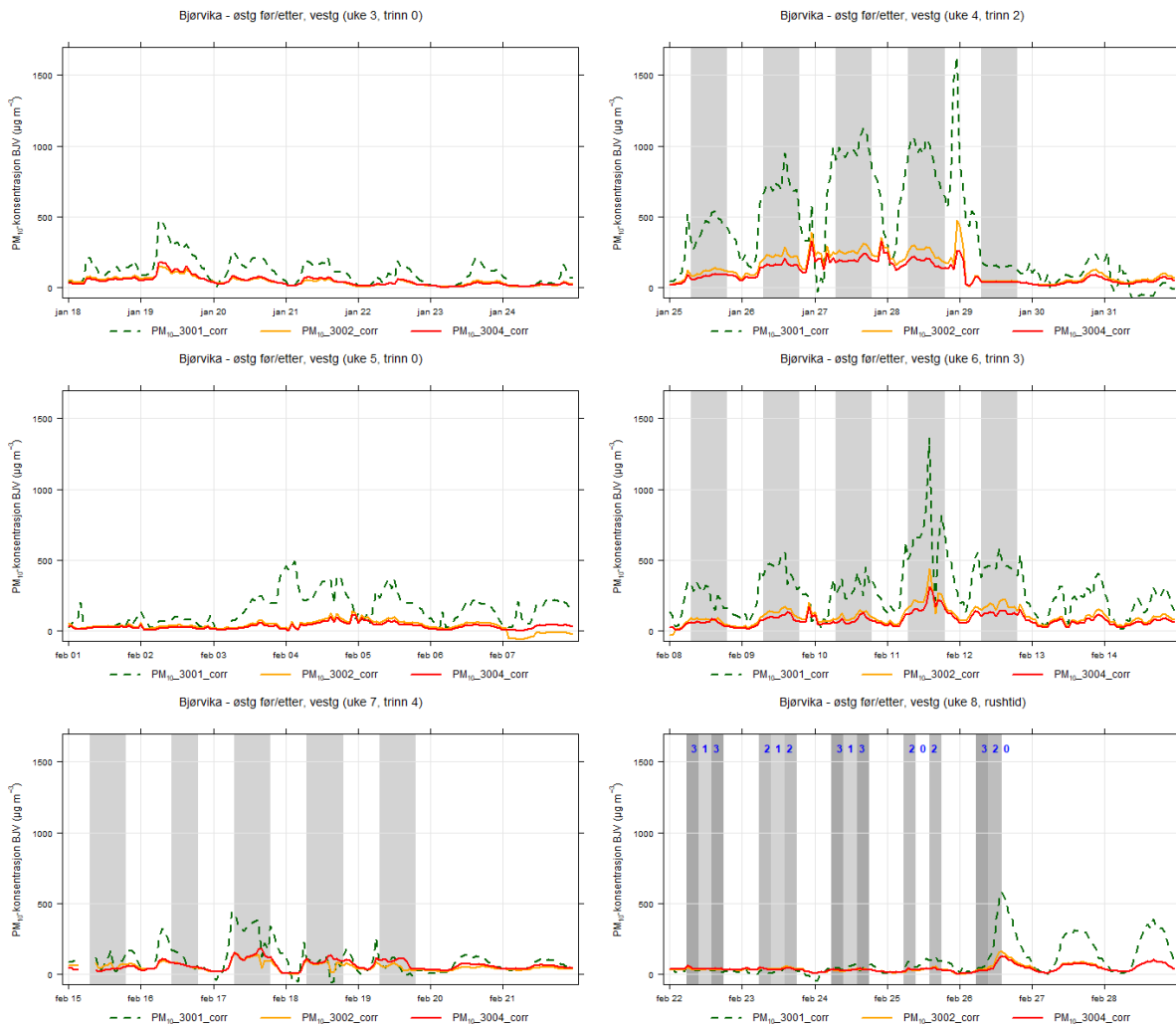
uten tilførsel av friskluft (tilbakestrømning), kan medføre raskere stigning i konsentrasjoner. I Ekeberg tunnelen var det en tydelig konsentrasjonsforskjell (se ovenfor). Som beskrevet i Kapittel 4.2.1 er strømningshastigheten i tunnellopene i perioder uten ventilasjon (uke 3 og uke 5) bestemt av trafikkvolumet. I Bjørvikatunnelen østgående var strømningshastigheten før og etter ventilasjonstårnet omtrent lik i perioder uten tårnventilasjon (Figur 43). I uke 4 gikk ventilasjonstårnene på trinn 2. På samme måte som i Ekeberg tunnelen vestgående, økte strømningshastigheten før ventilasjonstårnet noe, mens strømningshastigheten mellom ventilasjonstårn og dagsone avtok. På grunn av tunnelgeometrien var denne effekten mer utpreget i Ekeberg tunnelen. Strømningsretningen i Bjørvikatunnelen østgående løp var i kjøreretning hele døgnet, med redusert hastighet etter ventilasjonstårnet i tidsperioden 7 – 19, sammenlignet med situasjonen uten ventilasjon. I uke 6 ble ventilasjonstårnene kjørt på trinn 3 mellom kl. 7 og kl. 19. Dette førte til økt strømningshastighet i østgående løp før ventilasjonstårnet (opp mot 5,5 m/s i rushtiden). I motsetning til situasjonen i Ekeberg tunnelen var strømningshastigheten mellom ventilasjonstårn og dagsone bare litt lavere (ca. 4,5 m/s) enn før ventilasjonstårnet, og strømmingen gikk primært i kjøreretningen (alle dager tårnventilasjonen gikk på trinn 3). Ved trinn 4 i uke 7 var strømningshastigheten før ventilasjonstårnet opp mot 5,7 m/s, mellom ventilasjonstårn og dagsone var strømningshastigheten ca. 3 m/s om dagen med strømningsretning stort sett i kjøreretningen. Målingene indikerer at tårnet kun er i stand til å trekke luft inn fra portal når det er redusert kjørehastighet (kø) i Bjørvikatunnelen østgående.

Fra torsdag 28. januar kl. 23:11 til mandag 1. februar kl. 22:46 ble langsventilasjonen i østgående løp i Bjørvikatunnelen (BJV15VEMO8101) kjørt på trinn 3. Dette var ikke en planlagt del av målekampanjen og årsaken for ventilasjonsdrift over helgen er ukjent (hverken CO- eller NO-konsentrasjonene målt av SVVs sensorer var i nærheten av setverdien). Det førte imidlertid til en intensiv strømming gjennom tunnellopet i kjøreretningen døgnet rundt i fire døgn. Lav PM-konsentrasjon ble observert i Bjørvikatunnelen 29. januar, men det trenger ikke å stå i sammenheng med økt ventilasjon, siden PM-konsentrasjonen var betydelig lavere enn dagene før også i andre tunnellop, i dagsone, på bakkenivå og i Oslo generelt. 29. januar var tårnventilasjonen på trinn 2 fra kl. 7 til kl. 19. I helgen og 1. februar var tårnventilasjonen ikke i drift.

Grunnet forskjellig tunnelgeometri er strømningsdynamikken i Bjørvikatunnelen veldig forskjellig fra den i Ekeberg tunnelen. Selv med maksimal ventilasjonsrate i ventilasjonstårnene (trinn 4) ble det ikke observert at luft strømmet tilbake fra dagsone mot ventilasjonstårnene i Bjørvikatunnelen ved fri trafikkflyt. Tilbakestrømning ble kun observert på enkelte ettermiddager hvor det oppstod kø. I slike situasjoner vil tårnventilasjon på trinn 3 eller 4 være i stand til å trekke tilnærmet all luft fra BJV Ø, og samtidig snu ventilasjonsretningen etter tårnet (trekke luft inn fra dagsone).



Figur 43: Strømningshastighet i Bjørvikatunnelen østgående løp før ventilasjonstårnet (rød) og mellom ventilasjonstårn og dagsone (blå), per uke. Grå bakgrunn viser når ventilasjonstårnene var i drift. For uke 8 er ventilasjonstrinn vist med blå tall. I perioden 29. januar – 1. februar førte drift av impulsventilator i BJV Ø til økt strømming over 4 døgn.



Figur 44: PM_{10} -konsentrasjon i Bjørvikatunnelen i måleperioden, per uke. Grønn: Vestgående løp (3001). Rød: Østgående løp før ventilasjonstårnet (3004). Gul: Østgående løp etter ventilasjonstårnet (3002). Grå bakgrunn viser når ventilasjonstårnene var i drift. For uke 8 er ventilasjonstrinn vist med blå tall.

PM -konsentrasjonen i vestgående tunneløp (posisjon 3001) i Bjørvikatunnelen var høyere enn nivået målt ved posisjonene i østgående løp (se Figur 44). Måleinstrumentene 3001 (vestgående løp) og 3002 (østgående løp) var lokalisert rett innenfor (dvs. rett vest for) og på hver side av separeringen mellom løpene. Målingene i Bjørvikatunnelen vestgående kan være påvirket av resirkulasjon fra østgående løp, men disse er ikke kritiske for å studere ventilasjonstårnenes effekt.

4.3.3 Mosseveirampa

Mosseveirampa er ikke koblet til ventilasjonstårn, men PM -konsentrasjonene ca. 20 meter inn i tunneløpet fra dagsonen er tydelig påvirket av tårndrift i Ekeberg tunnelen og Bjørvikatunnelen (se Figur 45). Datakvaliteten av PM -målerne i tunneløpene er diskutert i Kapittel 4.4. Som illustrert i Figur 9 – Figur 12 har tårndrift i Ekeberg tunnelen størst effekt på luftforurensning i dagsonen. Tidsseriene for PM_{10_corr} , PM_{10} , $PM_{2.5}$ og PM_1 på Mosseveirampa per uke er vist i Figur 45. PM_{10_corr} er resultatet etter kalibrering med kalibreringsfunksjon fått fra instrumentsammenligningen på Kjeller høsten 2020. Tidsseriene for $PM_{2.5}$ og PM_1 er ikke korrigert og skal bare illustrere andelen finstøv i forhold til PM_{10} (ikke korrigert).

Uten tårnventilasjon i drift (uke 3 og uke 5) økte PM-konsentrasjonen i Mosseveitunnelen i morgenrushtiden (kl. 5 – kl. 7) parallell med trafikkvolumet. Variasjonen i løpet av døgnet er avhengig av trafikkvolum, trafikkhastighet, PM-nivået ute og meteorologiske parametre (nedbør, relativ luftfuktighet).

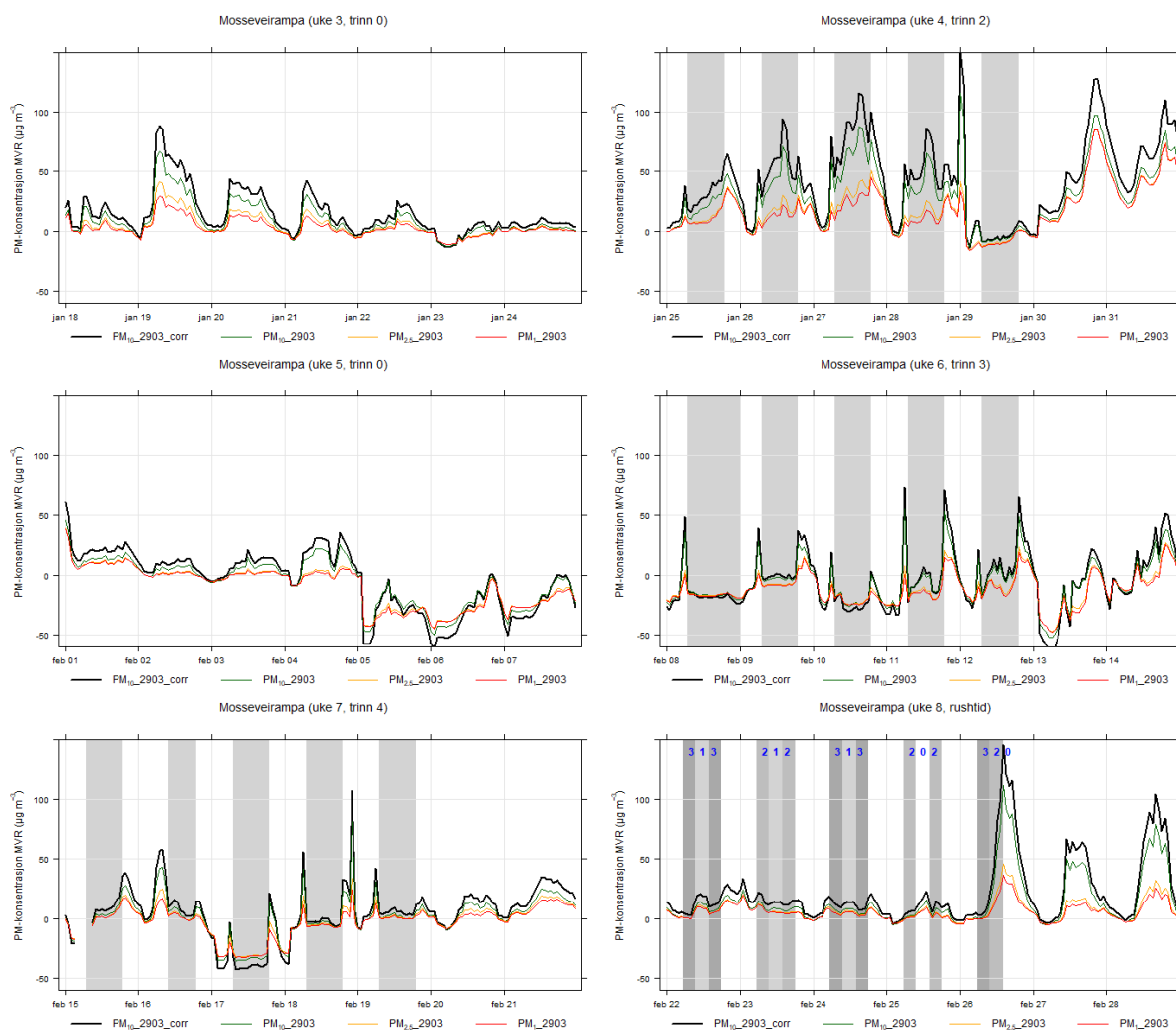
I uke 4 var tårnventilasjonen på trinn 2 i hele tidsrommet mellom kl. 7 og kl. 19. Før kl. 7 økte PM-konsentrasjonen parallell med trafikkvolumet, men gikk ned ved oppstart av ventilasjonen. Det er vanskelig å kvantifisere effekten på grunn av mange påvirkende ytre faktorer, men det er sannsynlig at konsentrasjonen ville ha fortsatt å øke frem til ca. kl. 9 uten ventilasjon.

Tårnventilasjon med trinn 3 (uke 6) hadde en tydelig effekt på PM-konsentrasjonen i Mosseveitunnelen. PM-topper ble registrert både tidlig om morgenen, før ventilasjonstårnene gikk i drift kl. 7, og om kvelden fra kl. 19 da ventilasjonen ble slått av. PM-konsentrasjonen på dagtid gikk helt ned på et typisk nivå for nattestid.

Mandag, 8. februar observeres ingen tydelig PM-topp på kvelden i Mosseveitunnelen. Dette skyldes mest sannsynlig at tårnventilasjonen i Ekeberg tunnelen ble kjørt helt til midnatt istedenfor å slås av kl. 19. Tårnventilasjonen i Bjørvikatunnelen ble stoppet kl. 19 som planlagt, som kan ha ført til en minimal økning målbar i Mosseveitunnelen.

I uke 7 ble tårnventilasjonen kjørt på trinn 4 på hverdager mellom kl. 7 og kl. 19 (unntak: tirsdag, 16. februar var ventilasjonen i gang fra kl. 10). Effekten av tårnventilasjonen på PM-konsentrasjonen i dagsonen og dermed på PM-konsentrasjonen i luftmassen som er flyttet inn i Mosseveitunnelen av kjøretøy er enda tydeligere enn ved trinn 3.

I uke 8 var det varierende ventilasjonsscenerier (se kapittel 3.3). Hovedforskjellen var at ventilasjonen ble startet tidligere enn i ukene 3 – 7. Ingen PM-topp ble observert om morgenen i uke 8. Årsaken kan ha vært tidligere start av ventilasjonen, men man må også legge merke til at det ikke var like meteorologiske forhold som i ukene før. I uke 8 var det både motsatt vindretning, nedbør og høyere relativ luftfuktighet enn i ukene 4 – 6. Fredag, 26. februar ettermiddag da ventilasjonen ble slått av for tidlig, økte PM-konsentrasjonen sterkt som en følge av oppvirvling under tørre forhold. Det ble observert mye oppvirvling hele helgen.



Figur 45: PM-konsentrasjon i Mosseveitunnelen i måleperioden, per uke. Figuren viser både korrigert PM₁₀-konsentrasjon og rå konsentrasjon for PM₁₀, PM_{2.5} og PM₁. Grå bakgrunn viser når ventilasjonstårnene i Ekeberg- og Bjørvikatunnelen var i drift. For uke 8 er ventilasjonstrinn vist med blå tall. Merk at drift av tårnventilasjonen i Ekeberg-tunnelen til midnatt 8. februar har en effekt på konsentrasjoner i Mosseveitunnelen.

En 3D-vindsensor var montert i kabelbroen over veibanen i overgangen fra dagsonen inn i Mosseveitunnelen (Gill004, se Figur 14). Den vertikale luftbevegelsen rundt sensoren var stort sett nedover i hele målekampanjen, både om dagen og om natten. Bevegelsen langs med veibanen gikk i kjøreretningen. I uke 3 og uke 5, når ventilasjonstårnene ikke var i drift, hadde vertikalbevegelsen en uregelmessig variasjon, langsbevegelsen følger trafikkvolumet med noe sterkere strømning i kjøreretningen om dagen enn om natten. Med ventilasjonstårndrift i Ekeberg- og Bjørvikatunnelen var vertikalbevegelsen ned i dagsonen mer tydelig utpreget enn uten ventilasjon, mens døgnvariasjonen av langsbevegelsen ble mindre. Ventilasjonstårnene har ingen direkte tilknytning til Mosseveitunnelen men fører til en indirekte påvirkning av volum/massebalansen til hele dagsonen, som MVR Ø er koblet til. Måledata fra Vaisala vindsensoren (2903) i Mosseveitunnelen i måleperioden ble vurdert å være feilaktige.

4.3.4 Dagsone

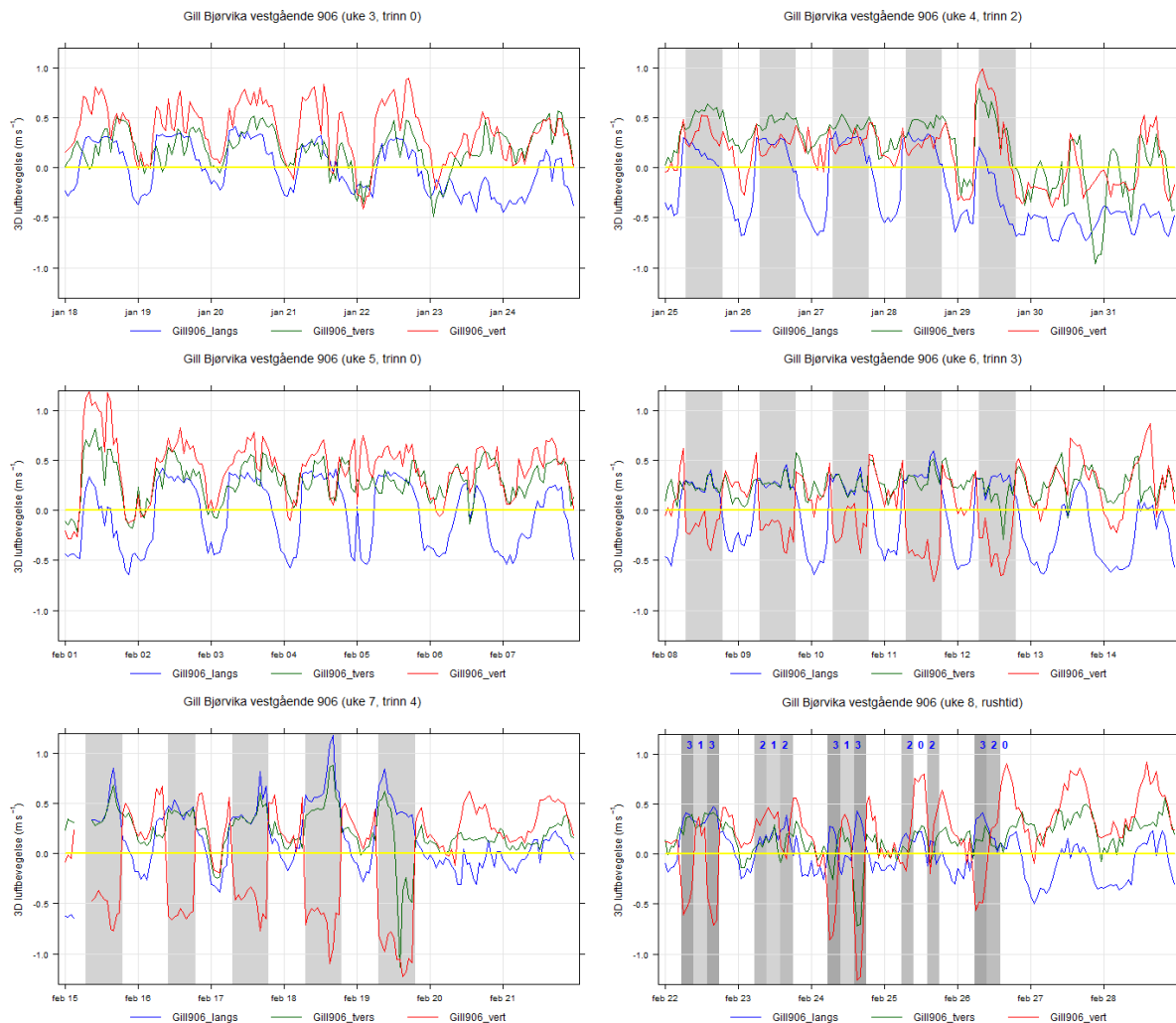
3D luftbevegelse over dagsonen

I tillegg til svevestøv- og strømningsmålingene i tunnellopene, beskrevet ovenfor, ble luftbevegelser målt over dagsonen i tre dimensjoner. Hovedfokuset var på vertikale bevegelser, dvs. inn og ut av dagsonen. Sensorene var montert ved portalen til Ekeberg tunnelen østgående (Gill904), Mosseveitunnelen (Gill004), Bjørvikatunnelen vestgående (Gill906) og over dagsonen (Gill905 og Gill701) som vist i Figur 14. Sensor Gill701 viste seg å gi uforklarlige data frem til 11. februar og blir ikke diskutert her.

Luftbevegelsen over inngangen til BJV V (Gill906) var opp og ut av dagsonen ved trinn 0, dvs. i uke 3, uke 5 og stort sett i helgene (Figur 46). Ved trinn 2 var den vertikale bevegelsen over portalen til BJV V opp og ut av dagsonen på dagtid, men ned i korte tidsperioder på natten der ventilasjonen ikke var i drift og trafikkvolumet var lavt. Ved redusert trafikkhastighet i samme tunnellop ble det også observert svak luftbevegelse nedover i dagsonen. Økt ventilasjonsdrift med impulsventilator i BJV Ø i perioden 29. januar – 1. februar hadde en målbar effekt på luftbevegelsen over inngangen til BJV V med økt vertikal bevegelse ut av dagsonen og lavere hastighet langs med kjørebanelen.

Først ved trinn 3 ble det registrert lengre perioder på dagtid med luftstrømning nedover i dagsonen. Om morgenen, i starten av rushtiden, beveger luften seg oppover og ut av dagsonen. Så snart ventilasjonen starter opp snur strømmingen og frisk luft blir tilført dagsonen og ført videre inn i BJV V. I hele perioden under drift av ventilasjonstrinn 4 observeres en tydelig vertikal luftbevegelse ned i dagsonen.

I uke 8, med variert ventilasjonsregime i og utenfor rushtid fra dag til dag, varierte vertikal luftbevegelse i større grad på trinn 3 og tilførselen av frisk luft ses kun under gitte forhold.



Figur 46: 3D luftbevegelser (m/s) over dagsonen, ved Bjørvika vestgående. Tilsvarende figurer for øvrige 3D sensorer er vist i Vedlegg A. Rød: vertikal bevegelse inn (negative verdier) og ut av dagsonen. Blå: Horisontal bevegelse i kjøreretningen (positive verdier). Grønn: Horisontal bevegelse tvers til kjøreretningen. Grå bakgrunn viser når ventilasjonstårnene i Ekeberg- og Bjørvikatunnelen var i drift. For uke 8 er ventilasjonstrinn vist med blå tall.

Konsistent med BJV V, ble det observert vertikal bevegelse ut av dagsonen nær utløpet til BJV Ø (Gill905) ved trinn 0 og trinn 2 (se figur i Vedlegg A). Sensoren var plassert et stykke unna portalen til BJV Ø. Det ble observert vertikal luftbevegelse ned i dagsonen når ventilasjonen var på trinn 3 og enda tydeligere ved trinn 4. Målingene fra uke 8 viser at det registreres vertikal bevegelse ned i dagsonen ved trinn 3 når vind utenfor dagsonen kommer fra nordøst (mandag), men ikke når vind kommer fra sør-sørvest (onsdag og fredag). Ved vind fra sør-sørvest flyttes luftmassene fra dagsonen imidlertid mot Middelalderparken uten planlagt bebyggelse.

For sensor Gill904 over portalen til EKB Ø på sørsiden av dagsonen ble det registrert vertikal bevegelse ned i dagsonen over hele måleperioden. Det var ikke store forskjell i vertikal hastighet mellom trinn 0, 2, 3 og 4 (se figur i Vedlegg A).

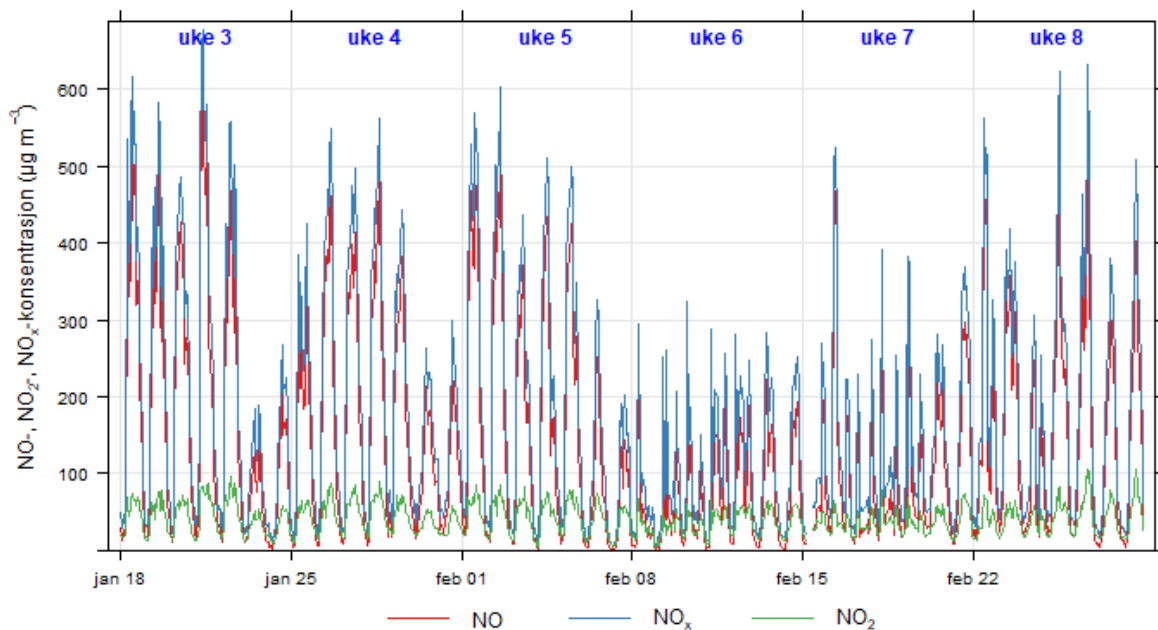
Også over portalen til MVR Ø (Gill004) ble det stort sett registrert vertikal bevegelse ned i dagsonen i hele måleperioden. Ved trinn 0 ble det observert luftbevegelser oppover ved vindhastigheter over 5 m/s (se figur i Vedlegg A). Ved trinn 3 og trinn 4, og vind fra nordøst, var den vertikale bevegelsen ned i dagsonen mer tydelig enn for trinn 0 ved Mosseveiportalen, selv om Mosseveiportalen ligger et stykke unna tunneløpene som er koblet til tårnventilasjon. Ved vind fra sør-sørvest i uke 8 ble det observert luftbevegelse ut av dagsonen. Luftmassene flyttes mot Middelalderparken.

I tidligere målinger av luftbevegelser over dagsonen (Berge og Kravik, 2018) ble det observert en svakt nedadgående luftstrøm i dagsonen. De nye målingene viser nedadgående luftstrøm (uten ventilasjonsdrift) kun i den sørlige delen av dagsonen. I den nordlige delen av dagsonen går luften ut av dagsonen når tårnventilasjonen ikke er i drift.

Tårnventilasjonen ser ut til å ha en effekt på vertikale luftbevegelser over dagsonen når den kjøres på trinn 3 eller høyere. Ved nordøstvind, som er mest ugunstig for luftkvaliteten i Lohavn/Sørenga, blir luftbevegelsen snudd fra en strømning ut av dagsonen (ved trinn 0), som kan føre til dårligere luftkvalitet sørvest for dagsonen, til en strømning ned i dagsonen (ved trinn 3) og dermed tilførsel av frisk luft til tunnelen. Tidligere målinger av 3D luftbevegelser over dagsonen (Berge og Kravik, 2018) fant ingen effekt av drift av ventilasjonstårnene på luftutskiftning mellom dagsone og utemiljøet. I måleprosjektet 2017-2018 ble ventilasjonstårnene kun kjørt i perioder på 20 minutter (maksimalt 60 minutter), som viste seg ikke å være tilstrekkelig for å konstatere en effekt.

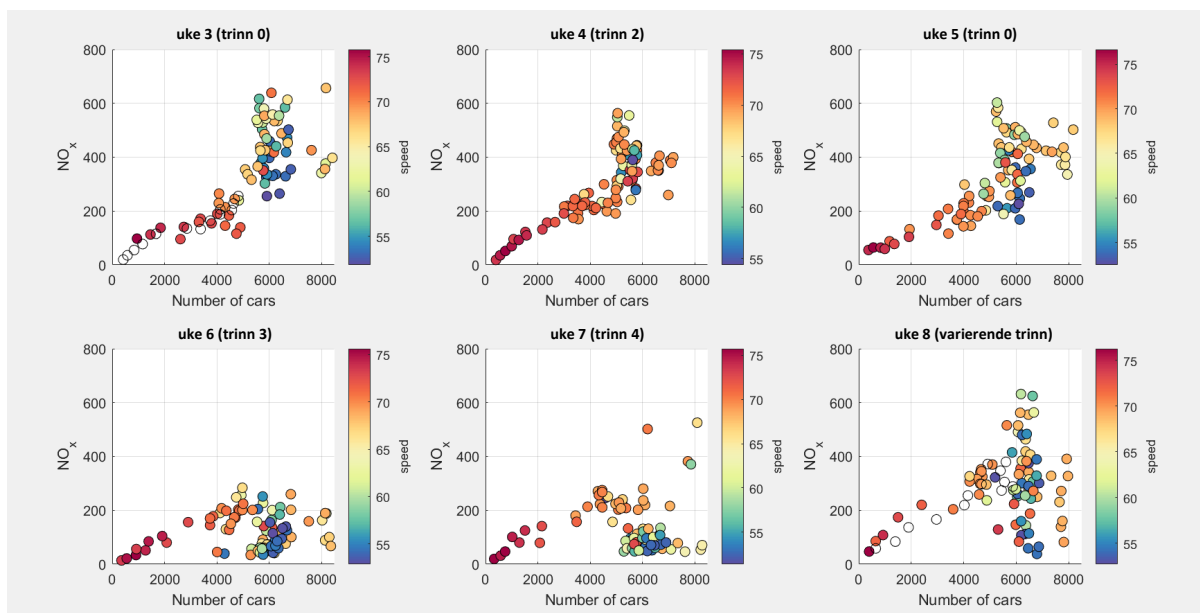
Nitrogenoksider NO_x i dagsonen

I uke 6 og uke 7 der ventilasjonstårnene var i drift, henholdsvis på trinn 3 og 4, var NO_x -konsentrasjonen i dagsonen, målt med NO_x -monitoren, merkbart lavere enn i uke 3 og uke 5 da ventilasjonstårnene ikke var i drift (Figur 47). Det var hovedsakelig NO -konsentrasjonen som var redusert, men også for NO_2 -konsentrasjonen var reduksjonen synlig. Det ble ikke funnet tydelig effekt på reduksjon i NO_2 -konsentrasjonen ved tårnventilasjonstrinn 2. Uten ventilasjon og med ventilasjon på trinn 2, ble det målt maksimale timekonsentrasjoner på rundt $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ både midt på dagen og på ettermiddagen. Ventilasjon på trinn 3 og trinn 4 førte til at maksimale NO_2 -timemiddelkonsentrasjoner på rundt $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kun ble målt tidlig om morgenen, før ventilasjonen startet. Ved trinn 3 ble det på dagtid målt NO_2 -nivåer (timemiddel) i dagsonen mellom 30 og $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ og ved trinn 4 mellom 25 og $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. NO_2 -nivået om natten ble målt til ca. 10 - $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



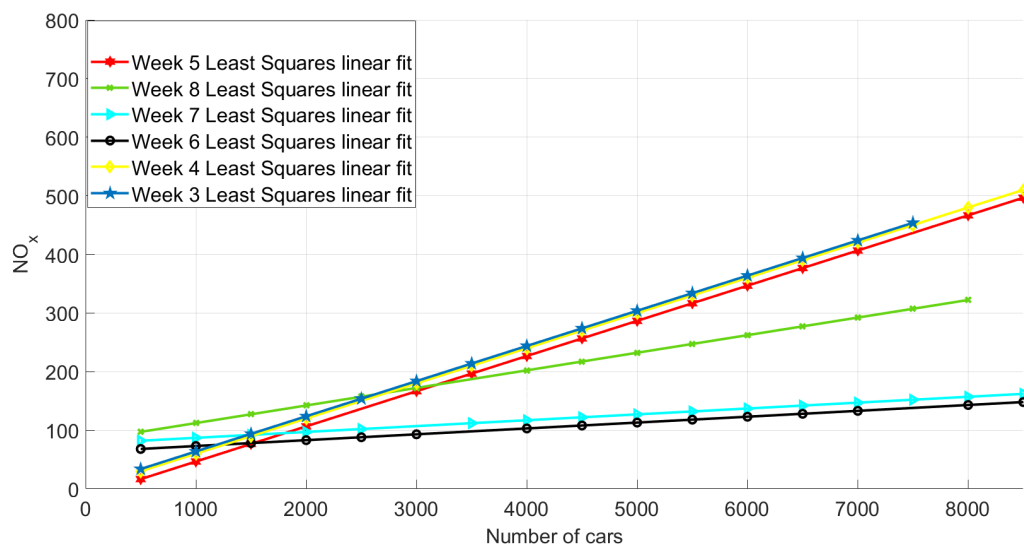
Figur 47: NO -, NO_2 - og NO_x -konsentrasjon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) målt i dagsonen med NO_x -monitor. Inntaket var lokalisert ovenfor nødutgangen til T3-bygget.

Siden trafikk er hovedkilden til NO_x er NO_x -konsentrasjonen i dagsonen avhengig av trafikkvolumet. NO_x -konsentrasjonen øker lineært med økende trafikkvolum så lenge som veien har nok kapasitet til antallet kjøretøy. Ved ca. 5000 kjt/t som sum over begge kjøreretninger er maksimal kapasitet oppnådd, kødannelse begynner, kjørehastigheten blir mindre og NO_x -konsentrasjonen øker overproposjonalt mht. trafikkvolumet. Dette er illustrert i Figur 48 som viser NO_x -konsentrasjonen avhengig av trafikkvolumet for uke 3 – uke 8. Fargen angir trafikkhastigheten med blå datapunkter for lav hastighet og røde datapunkter for høy hastighet. Skiltet hastighet i Operatunnelen er 70 km/t.



Figur 48: NO_x -konsentrasjon målt i dagsonen avhengig av trafikkvolumet (antall kjøretøy i begge kjøreretningene) i uke 3 – uke 8 (hverdager mellom kl. 7 og kl. 19). Fargen angir kjørehastighet i km/t.

Figur 49 viser regresjonslinjer for NO_x -konsentrasjonen i dagsonen som funksjon av trafikkvolum (dvs. summen av antall kjøretøy i begge retninger) for tidsperiodene kl. 7-19 mandag – fredag i de individuelle ukene, basert på data fra forrige figur (for trafikkvolum før kødannelse begynner og fører til ulineær sammenheng). Sammenhengen mellom NO_x -konsentrasjonen i dagsonen og trafikkvolumet var omtrent likt i uke 3, uke 4 og uke 5 der tårnventilasjonen var på trinn 0 (trinn 2 i uke 4). I uke 6 og uke 7 der tårnventilasjonen var på hhv. trinn 3 og trinn 4 ble vesentlig lavere NO_x -nivå oppnådd enn uten ventilasjon, ved likt trafikkvolum. Dette viser tydelig at NO_x -konsentrasjonen i dagsonen i rushtiden kan senkes ved bruk av tårnventilasjonen (minst på trinn 3). Det viser også at tårnventilasjon på trinn 2 ikke har noen effekt på NO_x -konsentrasjonen i dagsonen. Ventilasjonsdrift har noe effekt på luftvolumet som tilføres. Ved å sette en «tålegrense» for NO_x i dagsonen kan man finne ut ved hjelp av Figur 49 ved hvilket totaltrafikkvolum (begge retninger) tårnventilasjonen bør settes i drift. Dette kan vurderes ved mer belastende trafikk situasjoner enn det som ble registrert under målekampanjen.



Figur 49: Regresjonslinjer for NO_x -konsentrasjon vs. trafikkvolum, basert på data vist i Figur 48, for hver uke (uke 3 – uke 8). NO_x -konsentrasjonen i tidsperiodene kl. 7 – 19 er midlet over bins over 500 kjøretøy (gjelder for trafikkvolum før kødannelse begynner).

Svevestøv PM_{10} i dagsonen

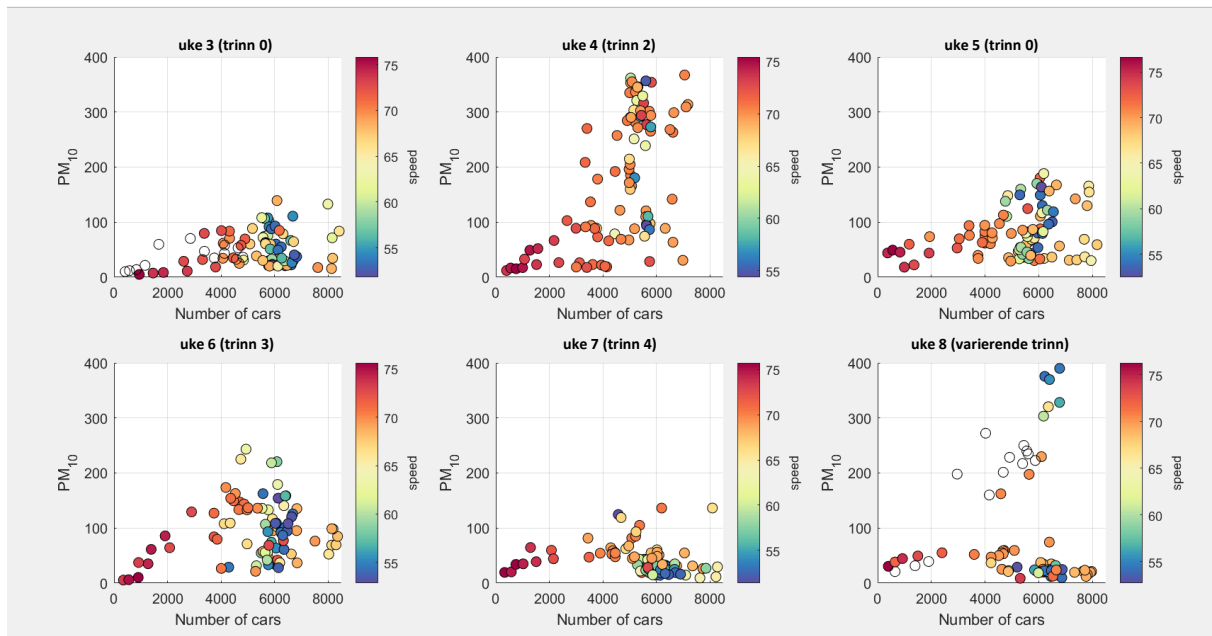
PM_{10} -konsentrasjonen i dagsonen om morgenen generelt økte først sammen med trafikkvolumet gjennom Operatunnelen (Figur 35). En liten, men synlig, nedgang av PM_{10} -konsentrasjonen ble observert etter kl. 7, når tårnventilasjonen ble slått på (trinn 2). Høyest PM_{10} -konsentrasjon i dagsonen i målekampanjen ble observert i uke 4. Det var opphold og svevestøvkonsentrasjonen skyldes sannsynligvis oppvirvling av veistøv. Høyest PM_{10} -konsentrasjon i Oslo derimot ble målt i uke 6. Tårnventilasjon med trinn 3 førte til at PM_{10} -konsentrasjonen i dagsonen i uke 6 ble fortennet med frisk luft utenfra slik at målte PM_{10} -topper var lavere enn i uke 4. På grunn av vertikal luftbevegelse ned i dagsonen forble oppvirvlet PM_{10} nede i dagsonen i uke 6, mens vertikal luftbevegelse ut av dagsonen i uke 4 førte til forurensningsbidrag fra dagsonen til området utenfor dagsonen.

Fra fredag 29. januar kl. 00:11 til mandag 1. februar kl. 23:46 var impulsventilator BJV15VEMO8101 (Bjørsvika østgående, mellom Havnelageret og Opera) i drift, ventilasjonsloggen viste trinn 3. Det er usikkert hva som var utløseren for ventilasjonen, siden CO- og NO-konsentrasjonene var under setverdiene. Effekten av denne ventilatoren på lufthastigheten i Bjørsvikatunnelen østgående løp var økt vindhastighet i ca. fire døgn (se Figur 34 og Figur 43). På fredag og mandag kom denne effekten i tillegg til tårnventilasjonen. Effekten av økt langsventilasjon på PM -konsentrasjonen i Bjørsvikatunnelen østgående er vanskelig å estimere siden PM -konsentrasjonen i Oslo var generelt lavere fredag 29. januar (se Figur 27, Figur 28, Figur 29). Både i Mosseveitunnelen og Bjørsvikatunnelen ble økt²⁰ PM_{10} -konsentrasjon observert mellom torsdag kl. 23 og fredag kl. 01. Forminsket sikt i tunnelen kan ha ført til at ventilasjonen ble utløst manuelt. Men som diskutert i kapittel 4.2 viser siktmålerne ikke brukbare data.

I motsetning til NO_x er PM_{10} -konsentrasjonen i dagsonen ikke bare avhengig av trafikkvolumet. Ytre forhold, som for eksempel meteorologiske forhold, spiller en stor rolle. Figur 50 viser hvordan PM_{10} -konsentrasjonen varierer med trafikkvolumet for uke 3 – uke 8. Fargen angir trafikkhastighet med blå datapunkter for lav hastighet og røde datapunkter for høy hastighet. PM_{10} -konsentrasjonen er større med større trafikkvolum, men forholdet er ikke lineært. Det var nedbør i uke 3 og dermed sterk dempet oppvirvling. Støv produsert på veioverflaten i denne uken ble akkumulert til veien tørket opp i uke 4

²⁰ Enkelte minuttverdier over 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

og store mengder svevestøv ble virvlet opp i tunnel og dagsone som førte til høy PM_{10} -konsentrasjon målt i dagsonen i uke 4. I uke 5 og uke 6, under tørre forhold, ble produsert støv på veioverflaten virvlet opp direkte og svevestøvkonsentrasjonen økte med økende trafikkvolum. På grunnlag av disse observasjonene kan det anbefales å kjøre ventilasjonstårnene intensivt første dagen veien tørker opp etter en lengre nedbørepisode.



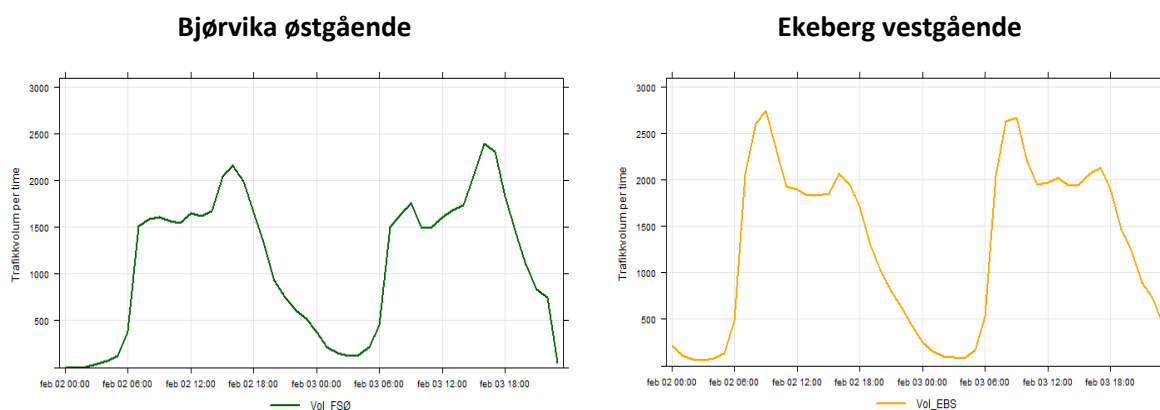
Figur 50: PM_{10} -konsentrasjon målt i dagsonen avhengig av trafikkvolumet (antall kjøretøy i begge kjøreretninger) i uke 3 – uke 8 (hverdager mellom kl. 7 og kl. 19). Fargen angir kjørehastighet i km/t.

4.3.5 Effekt av ventilasjonstårnene

For å illustrere effekten av ventilasjonstårnene er det valgt å trekke frem resultater fra perioden tirsdag til onsdag i uke 5, uten tårndrift, og uke 6, med tårndrift på trinn 3.

Trafikk

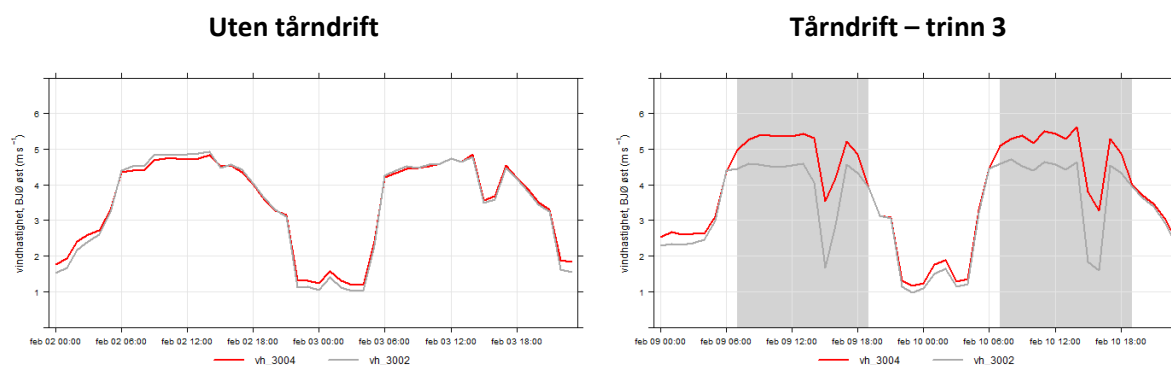
Trafikkvolumet per time i BJV Ø og EKB V over dagene tirsdag – onsdag i uke 5 er vist i henholdsvis venstre og høyre del av Figur 51. Målingene viser en økning i trafikkvolumet på ettermiddagen i Bjørvika østgående og på morgenen i Ekeberg vestgående.



Figur 51: Trafikkvolum (kjt/t), tirsdag og onsdag i uke 5. Venstre: Bjørvika østgående. Høyre: Ekeberg vestgående.

Bjørvika østgående

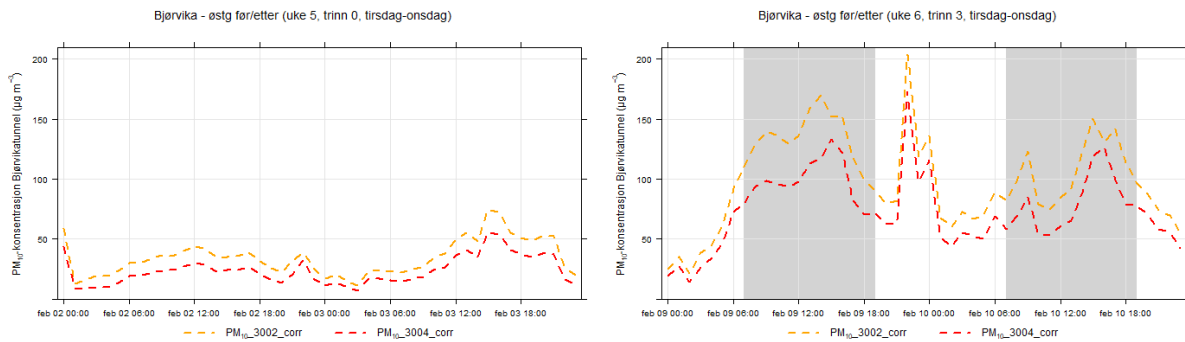
Uten tårndrift er strømningshastigheten tilnærmet lik før og etter tårn (Figur 52). Ved tårndrift er strømningshastigheten etter tårn redusert, noe som indikerer at deler av luftstrømmen er trukket av i tårnet. Bunnpunktet på ettermiddagen skyldes kødannelse og lavere meddriving av luften fra trafikkstrømmen.



Figur 52: Strømningshastighet (m/s) i Bjørvikatunnel østgående. Venstre: uten tårndrift. Høyre: ved tårndrift, trinn 3. Grå bakgrunn viser når ventilasjonstårnene i Ekeberg- og Bjørvikatunnelen var i drift.

En noe høyere PM₁₀-konsentrasjon etter tårn sammenlignet med før tårn (Figur 53) kan ha årsak i plasseringen av sensoren og at PM₁₀-konsentrasjonen i tunnel ikke er uniform over hele tverrsnittet. Denne effekten kan være spesielt merkbar i nærheten av åpningen mellom de to løpene, der luftstrømmen trekkes inn i motgående tunneløp. En tilnærmet lik konsentrasjon før og etter tårnavtrekket er å forvente, da det kun er luftstrømmen (m/s), og massestrømmen (kg/s) som vil reduseres ved tårndrift.

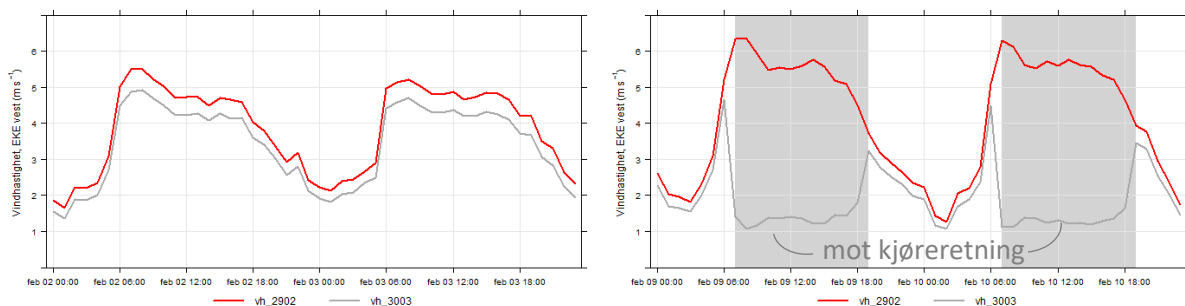
Konsentrasjonsforskjell mellom TSI-instrumentene kan være knyttet til måleusikkerheten av instrumentene (se også kapittel 4.4).



Figur 53: PM_{10} -konsentrasjon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i tunnel, Bjørvika østgående, før (rød) og etter (gul) tårn. Venstre: uten tårndrift. Høyre: med tårndrift, trinn 3.

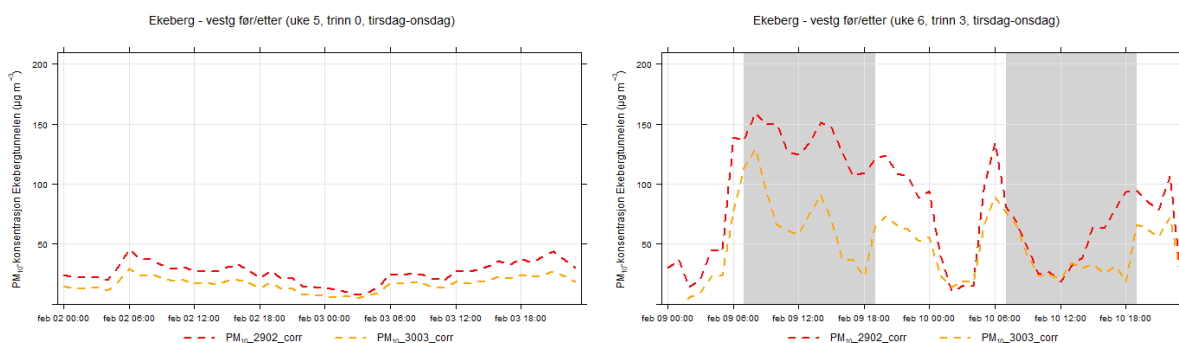
Ekeberg vestgående

Uten tårndrift er strømningshastigheten tilnærmet lik før og etter tårn (Figur 54). En noe høyere strømningshastighet før tårn enn etter tårn kan forklares med en ujevn strømningsprofil over tverrsnittet. Når tårnene driftes fremkommer det tydelig at strømningshastigheten reduseres og går her mot kjøreretningen i det siste strekket mellom tårnavtrekk og dagsone. Årsaken til dette er at tårnet trekker av mer enn størrelsen på luftstrømmen som går igjennom tunnelen. Ekeberg vestgående er et mindre løp enn Bjørvika østgående. Effekten av tårnavtrekket vil derfor framkomme tydeligere i Ekeberg vestgående enn det gjør i Bjørvika østgående, fordi avtrekksmengden utgjør en større andel av den totale luftstrømmen som går igjennom tunnelen.



Figur 54: Strømningshastighet (m/s) i Ekeberg tunnel vestgående. Venstre: uten tårndrift. Høyre: ved tårndrift, trinn 3.

Konsentrasjonen før og etter tårnavtrekk er å forvente å være relativt lik, både med og uten drift av tårn. Årsaken til reduksjonen i konsentrasjonen etter tårnavtrekk når tårnet er i drift (Figur 55) er at tårnet, som her går på trinn 3, trekker av mer enn størrelsen på luftstrømmen i tunnelen. Dette fører til at luft trekkes inn fra dagsonen mot kjøreretningen og luften i det siste strekket mellom tårnavtrekk og dagsone tynnes ut.

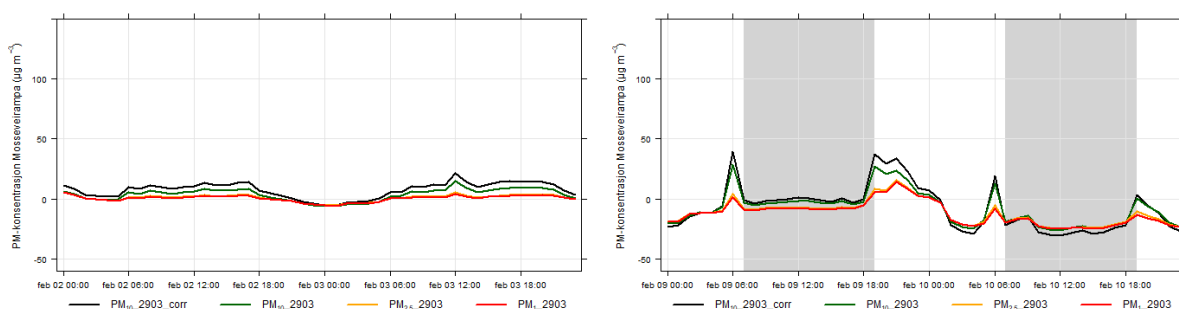


Figur 55: PM_{10} -konsentrasjon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i tunnel, Ekeberg vestgående, før (rød) og etter (gul) tårn. Venstre: uten tårndrift. Høyre: med tårndrift, trinn 3.

Et lavere forurensningsnivå i uke 5 enn i uke 6, som er synlig både i Figur 53 og Figur 55, skyldes en generelt lavere omgivelseskonsentrasjon i Oslo i uke 5. Dette er også beskrevet i kapittel 4.1.2.

Mosseveirampa

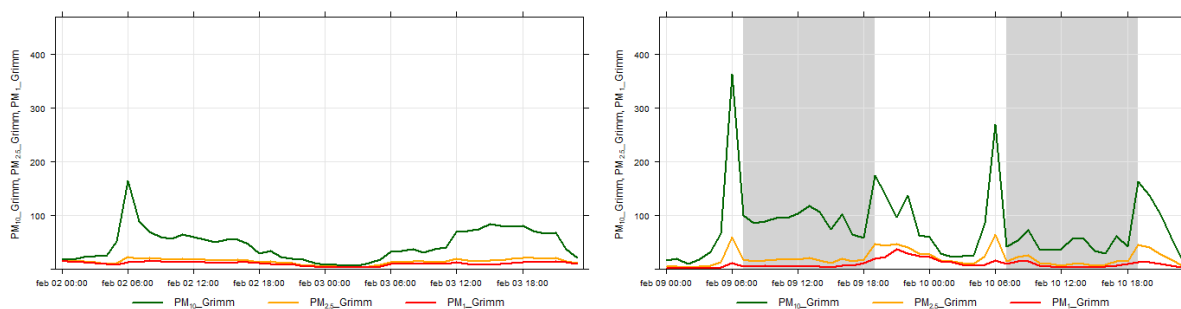
Deler av luften som havner i dagsonen blir trukket inn i Mosseveirampa med trafikkflyten. Konsentrasjonen i Mosseveirampa vil dermed kunne gi indikasjon på hvilken effekt tårndrift har på utslippsmengden fra dagsonen til omgivelsene. Når tårnet driftes viser kurvenes form en tydelig effekt av tårndrift ved at konsentrasjonen stiger med det økende trafikkvolumet på morgenen og synker deretter i det tårnventilasjonsen settes i gang kl 07:00 (Figur 56). Når tårnventilasjonsen avsluttes på kvelden ser man igjen en stigning i konsentrasjonen.



Figur 56: PM -konsentrasjon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i tunnel, Mosseveirampa. Venstre: uten tårndrift. Høyre: med tårndrift (i Ekeberg- og Bjørvikatunnel), trinn 3. Svart: PM_{10} korrigert, grønn: PM_{10} ikke korrigert, gul: $PM_{2.5}$ ikke korrigert, rød: PM_1 ikke korrigert.

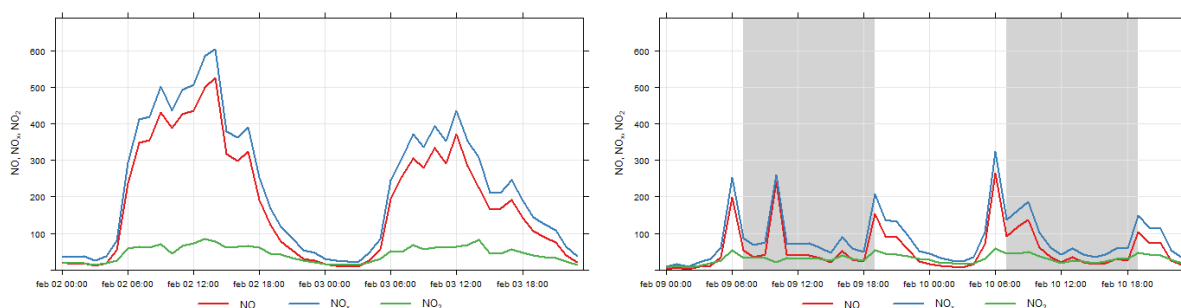
Dagsonen

Samme mønster som ved målingene i Mosseveirampa kan observeres i målingene i dagsonen (Figur 57). PM_{10} -konsentrasjonen stiger med det økende trafikkvolumet på morgenen og synker deretter i det tårnventilasjonsen settes i gang kl 07:00. Når tårnventilasjonsen avsluttes på kvelden ser man også her en stigning i konsentrasjonen. Generelt lave konsentrasjoner i uken uten tårndrift skyldes generelt lave PM_{10} -konsentrasjoner i hele Oslo. Liten andel $PM_{2.5}$ og PM_1 i PM_{10} (Figur 57) viser at PM_{10} -nivået i dagsonen hovedsakelig skyldes oppvirvling av svevestøv. $PM_{2.5}$ og PM_1 stammer hovedsakelig fra forbrenningskilder.



Figur 57: PM_{10} -, $PM_{2.5}$ - og PM_1 -konsentrasjon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i dagsonen. Venstre: uten tårndrift. Høyre: med tårndrift (i Ekeberg- og Bjørvikatunnel), trinn 3.

Målinger av NO_x -konsentrasjoner i dagsonen viser også betydelig effekt av tårnventilasjon. Resultatene viser at når tårnene ikke driftes øker konsentrasjonene i dagsonen i takt med økt trafikkvolum (Figur 58). NO - og NO_x -konsentrasjoner stiger med økende trafikkvolum om morgenen og synker i det tårnventilasjonen settes i gang kl. 7.



Figur 58: NO_x -konsentrasjon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i dagsonen. Venstre: uten tårndrift. Høyre: med tårndrift, trinn 3.

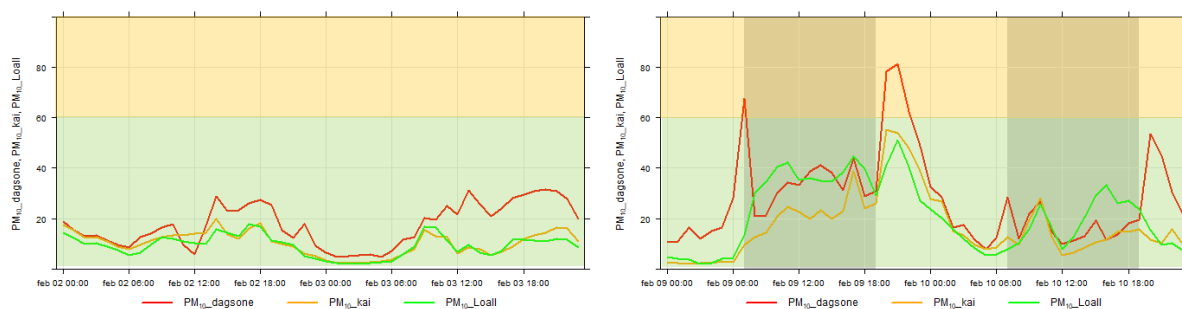
Bakkenivå – omgivelser

Målingene fra målebodene på bakkenivå, som illustrerer forholdene i omgivelsene rundt dagsonen, viser også en tydelig effekt av tårnventilasjon (Figur 59). Igjen viser målingene en lavere konsentrasjon i uke 5 enn i uke 6, som sammenfaller med generelt lavere omgivelseskonsentrasjoner av PM_{10} i Oslo. Tårnventilasjonens effekt fremkommer tydelig i uke 6, der konsentrasjonen stiger med det økende trafikkvolumet på morgenen og synker idet tårnventilasjonen settes i gang. Når tårnventilasjonen avsluttes på kvelden stiger konsentrasjonen på bakkenivå igjen, før den synker med synkende trafikkvolum på kvelden.

Effekten er mest utpreget ved målestasjonen ved dagsonen som var lokalisert nærmest dagsonen og nedvinds for dagsonen. Effekten synes også til en viss grad ved målestasjonen på kaia som også var lokalisert nedvinds i forhold til dagsonen, men med større avstand.

Gjennom tidligere start av tårnventilasjonen i uke 8 (kl. 5:30 istedenfor kl. 7) var det mulig å unngå høye PM_{10} -konsentrasjonstopper på bakkenivå tidlig om morgenen. Ved tørre veiforhold og avhengig av trafikkvolumet kan det være en fordel å holde tårnventilasjonen i drift til kl. 19 istedenfor kl. 18.

Målingene ved Loallmenningen ser ikke ut til å være påvirket av tårnventilasjonsdrift.



Figur 59: PM_{10} -konsentrasjon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) på bakkenivå, dvs. ved dagsonen, på kaia og ved Loallmenningen. Venstre: uten tårndrift. Høyre: med tårndrift, trinn 3. Bakgrunnsfargen indikerer forurensningsklasser.

4.4 Vurdering av de målte parametre

NILUs instrument/sensorer

Det er store utfordringer knyttet til å utføre luftkvalitetsmålinger i en veitunnel. Som regel bruker NILU måleinstrumenter som måler i henhold til referansemetoden (angitt i luftkvalitetsdirektivet) eller som er likeverdige med referansemetoden (ekvivalentmetoder). Disse instrumentene krever imidlertid plassering i et beskyttet miljø (målebod, instrumentskap), med stabil temperatur (klimaanlegg) og regelmessig tilsyn og vedlikehold. Av sikkerhetshensyn er det ikke plass i tunnellopene til selv de minste instrumentskapene som står til rådighet og instrumentene kan ikke plasseres på banketten ved siden av kjørebanelene. Plassering av annet utstyr enn skilt på tunnelvegg må vurderes spesielt og skal stikke minst mulig ut. Instrumentene som ble valgt er 30,5 x 31,1 x 41,1 cm store og ble montert i ca. 4 m høyde over bakken (dvs. over skilthøyde) for å tilfredsstille kravene. Ytterligere utfordringer, i tillegg til lite plass og strikte regler for utstyr i tunnelen, er forbudet mot ferdsel i tunnelen som gjorde det umulig å utføre flow-sjekk av instrumentene eller rensing og vedlikeholde instrumentene under måleperioden (6 uker).

TSI-instrumentene oppfyller ikke de samme høye datakvalitetskravene som instrumenter brukt i målenettverk i Norge (Direktiv 2008/50/EF), men ble valgt fordi de er robuste og tilstrekkelig små og kompakte å oppfylle kravene om sikkerhet i veitunneler. Siden instrumentene ikke kunne sjekkes og vedlikeholdes under målekampanjen, ble de programmert å utføre en nullpunktsjekk hver døgn, midt på natten for å sikre best mulig datakvalitet.

Inntakene til TSI-instrumentene var montert nær vegger og tak til tunnelen. Normalt ville man montert støvinntak med større avstand til vegg og tak, slik at luften kan sirkulere fritt. Plasseringen av instrumentene var et kompromiss for å få til målinger.

Samlokaliseringen av TSI-instrumentene før målekampanjen (se kapittel 3.2) var et ytterligere trinn for å sikre best mulig datakvalitet. Alle TSI-instrumentene ble kalibrert mot en Grimm EDM 180 svevestøvmonitor (ekvivalent med referansemetoden, EN 12341). I utgangspunktet skal instrumentene måle likt etter kalibreringen. Under målekampanjen i Operatunnelen var TSI-instrumentene fordelt over 7 lokasjoner for å levere informasjon over hvordan PM-konsentrasjonen varierer ved hver lokasjon. Her antar man at kalibreringen består under hele målekampanjen og at instrumentene ikke fraviker signifikant.

Ett TSI-instrument var samlokalisert med en Grimm EDM 180 PM-monitor i dagsonen under hele målekampanjen. Tanken var å kunne korrigere mulig påvirkning av f.eks. relativ luftfuktighet på ytelsen av TSI-instrumentene ved hjelp av parallell måling i dagsonen. Men TSI-instrumentet i dagsonen viste driftende konsentrasjon i begynnelsen av målekampanjen slik at korreksjon på grunnlag av samlokaliseringen i dagsonen ikke ble vurdert som en forbedring. En lignende drift av konsentrasjonene i samme tidsrom ble ikke observert ved de andre TSI-instrumentene.

Stort sett var variasjonen av PM-konsentrasjonen målt av TSI-instrumentene plausibel og illustrerte både variasjon forventet på grunn av varierende trafikkmengde og også variasjonen på grunn av ventilasjon og ytre forhold. Men det observeres uvanlige variasjoner i enkelte episoder og negative konsentrasjoner med TSI-instrumentene. Siden det ikke var mulig å utføre flow-sjekk og annen vedlikehold i måleperioden, kan målte verdiene ha driftet i løpet av måleperioden. Verdiene kan drifte i positiv retning eller i negativ retning. TSI-instrumentet i Mosseveitunnelen for eksempel målte negative verdier i flere tidsperioder. I disse tidsperiodene ser det ut som om måleverdiene hadde en negativ offset. Tidsvariasjonen ellers så plausibel ut for alle TSI-instrumenter.

Det konkluderes med at *variasjoner* av PM-konsentrasjonen med tiden og relative verdier er mest pålitelig informasjon fra TSI-dataene. Absolutte konsentrasjoner er mindre sikre. Absolutte konsentrasjoner målt av TSI-instrumentene i tunnelløpene bør ikke vurderes mot f.eks. tunnelkrav.

Øvrige instrumenter brukt i målekampanjen var referanseinstrumenter (NO_x-monitor) eller ekvivalente med referansemotoden (Grimm-monitorer i dagsone og på bakkenivå). Disse ble driftet i henhold til kvalitetssystemet og leverte data som kan brukes til kvantitative analyser. Grimm-monitoren i dagsonen kunne ikke kontrolleres ukentlig, men ble sjekket og godkjent både før og etter målekampanjen.

SVVs sensorer

Statens vegvesen har fastinstallerte sensorer i tunnelen for å overvåke strømning og konsentrasjoner og for å styre ventilasjonen.

Vindsensorer montert i tunnelløpene viste en variasjon av vindhastigheten som var plausibel. En av sensorene antas å være plassert i en havarinisje der strømningsforhold avviker fra andre deler av tunnelen. Noen av sensorene leverte ikke data i måleperioden og en av sensorene leverte data som ikke ble vurdert som realistisk. Korrekt plassering av sensorene er viktig. Havarinisjer og andre områder der forhold ikke er representative for resten av tunnelen bør unngås.

Gass-sensorer, dvs. CO-sensorer og NO-sensorer, er plassert både nær tunnelåpningene og midt i tunnelseksjonene for å overvåke CO- og NO-nivået og styre ventilasjonen. CO og NO er komponenter i utslippet fra forbrenningsmotorer og varierer typisk med trafikkvolumet. For flere av CO-sensorene i Bjørvikatunnelen ble det ikke registrert variasjon med trafikkvolum, og noen av sensorene viste en signifikant offset. Dette indikerer at noen av gass-sensorene ikke måler korrekt og kan ikke brukes til styring. Gass-sensorene i Bjørvikatunnelen har vært i drift siden 2010. Sensorprodusenten angir en levetid på 5-7 år. Det er viktig at eksisterende sensorer kalibreres og testes regelmessig.

Siktsensorene måler ifølge produktbeskrivelsen en parameter som angir støvmengde i luften og dermed synsvidde i tunnelen. Måleresultatene fra Bjørvikatunnelen var ikke plausible. Ingen av måleseriene for sikt var korrelert med målt PM-konsentrasjon i tunnelen. Begge tidsseriene viser en variabilitet som minner om støy. I tillegg er nivået målt i BJV Ø to til tre størrelsesordener større enn nivået målt av sensoren i motsatt retning. Det foreligger ikke siktdata fra sensorene i Ekeberg tunnelen. Det ble informert om at siktmålingene ikke brukes til styring av ventilasjonen. Siktmålingene som foreligger for Bjørvikatunnelen anses ikke som brukbare.

5 Prinsipper for optimalisert styringsregime

Når ventilasjonstårn driftes trekkes forurenset luft ut fra tunnelsystemet og reduserer forureningsbidraget til dagsonen. Resultater fra målekampanjen underbygger dette, og viser tydelig at intensivert drift av ventilasjonstårnene reduserer bidraget av forurenset luft fra tunneløp til dagsonen, og dermed også fra dagsonen til omgivelsene.

5.1 Optimalisert styringsregime for ventilasjonstårn

Statens vegvesens håndbøker gir ingen konkrete føringer på hvordan tårn skal driftes. Tunnelveiledning V520 (SVV, 2020) inneholder kun eksempel på startgrenser for å ivareta luftkvalitet i tunnel.

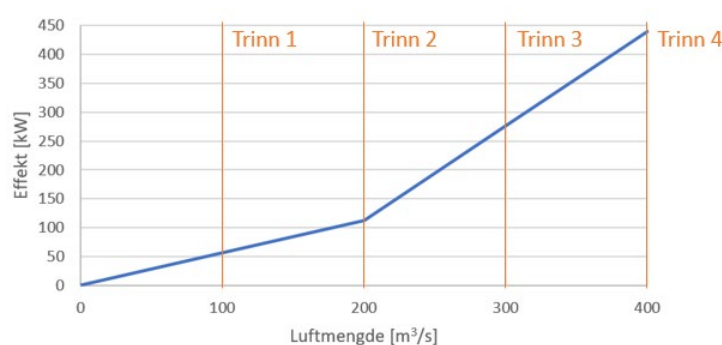
Dagens styring av ventilasjonstårnene i Bjørvika tar ikke hensyn til nivå av forurensning i dagsone og omgivelser. For å kunne ivareta luftkvaliteten i omgivelsene må reguleringen av tårnventilasjonen bestemmes både på bakgrunn av produksjonen av forurensning i tunnel og av hensyn til ulike ytre forhold som påvirker både konsentrasjoner og spredning til omgivelsene.

Grenseverdiene for utendørs luftkvalitet som skal overholdes for PM₁₀ er basert på døgnmiddel, grenseverdien for NO₂ er basert på timemiddel (Vedlegg B). Hensyn til forureningsproduksjon, vær og vind må derfor vurderes deretter.

Som følge av en stadig renere kjøretøypark er det forventet en reduksjon i fremtidig utslippsproduksjon av NO₂. Tilsvarende reduksjon av svevestøv, PM₁₀, er ikke forventet, fordi den største delen av PM₁₀ fra trafikk kommer fra vegslitasje og oppvirvling. Et optimalisert styringsregime basert på observasjoner fra målekampanjen er derfor antatt å også være et godt utgangspunkt for en fremtidig situasjon.

Problemer med dårlig luftkvalitet er størst i vinterhalvåret. Piggdekkseasonen strekker seg fra 1. november til første søndag etter 2. påskedag. Dette utgjør ca. 170 dager i løpet av året hvor det er forventet høy støvproduksjon i tunnelen. Det kan antas at støvproduksjonen er mindre på dager med lav trafikk, som f.eks. i helgedager, helligdager og uke 51 og 52. Samtidig kan oppvirvlingen være stor fordi hastigheten er høyere enn i rushtid. Utslippsmengdene av PM₁₀ følger også trafikkmønsteret gjennom uken, med størst behov for tårndrift hverdager ved morgen- og ettermiddagsrush.

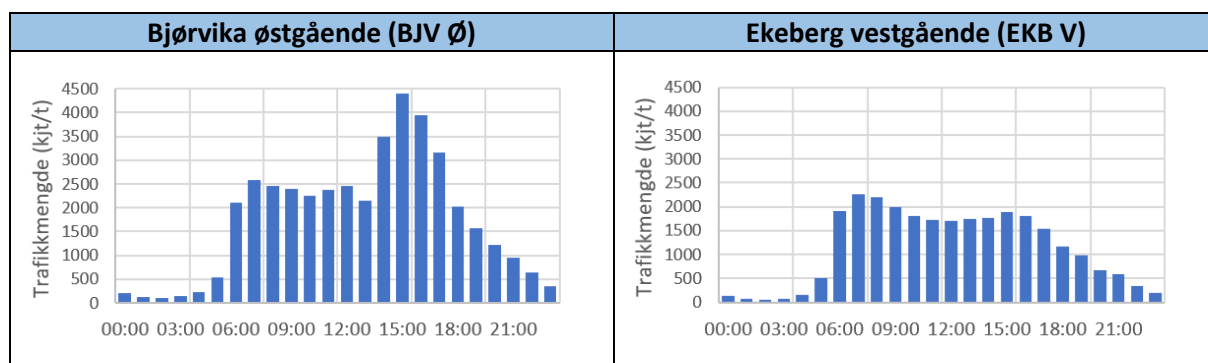
Ventilasjonstårnene er beskrevet i kapittel 2.3.3. Figur 60 viser effektkurven for ventilasjonstårnene ved ulike trinn. Kurven indikerer kostnadseffektiv drift ved trinn 2.



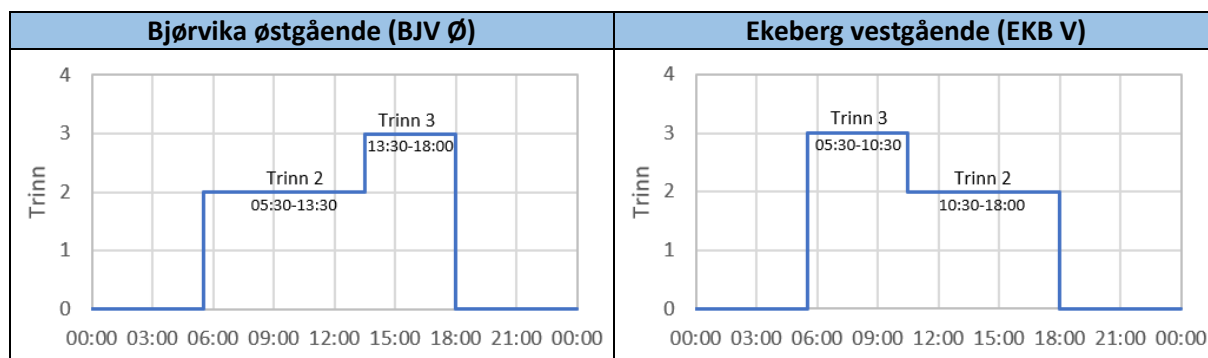
Figur 60: Effekt- og kapasitetskurve for ventilasjonstårnene ved trinn 1 – trinn 4.

På bakgrunn av funn fra målekampanjen, sammen med et mål om praktisk gjennomførbarhet, er det utarbeidet et styringsregime basert på tidsstyring utfra forventet trafikkmønster, og energiøkonomisk drift. For Bjørvika østgående er det forventet et økt trafikkvolum på ettermiddagen, mens det for Ekeberg vestgående er forventet et økt trafikkvolum på morgenen. På bakgrunn av trafikkmengdene vist i Figur 61 foreslås det styringsregime av tårnventilasjonsdriften i henhold til Figur 62, med drift mandag til fredag i piggdekkseasonen med unntak av dager forbundet med lite trafikk.

I Figur 61 er det vist trafikktegninger for EKB V fra år 2021 på grunn av manglende data fra tidligere år. I kapittel 4.1.3 er det vist trafikktegninger fra BJV V i år 2021 sammenlignet med tidligere år, som indikerer en mer utpreget topp for morgenrushet i normalår enn for pandemiåret 2021. Trafikktegninger for BJV V er representative for EKB V, og foreslått styringsregime er basert på forventet trafikktegninger for normalår.



Figur 61: Trafikkmengde (tirsdag i uke 4) for Bjørvika østgående (2019²¹) og Ekeberg vestgående (2021).



Figur 62: Optimalisert tårndrift Bjørvika østgående og Ekeberg vestgående.

En slik tårndrift vil gi et omtrentlig årlig energiforbruk som vist i Tabell 2. I beregningen av årlig kostnad er det regnet med en gjennomsnittlig strømpris på 1 kr/kWh.

²¹ Trafikktegningen i BJV Ø var ikke i drift i januar – februar 2021.

Tabell 2: Eksempelberegning energiforbruk og driftskostnader. Antatt gjennomsnittlig strømpris 1 kr/kWh.

2020/2021		Bjørvika østgående	Ekeberg vestgående	Totalt
Totalt antall dager		156	156	156
Helgedager/røde dager		49	49	49
Antall hverdager		107	107	107
Trinn 2	Driftstid	kl. 05:30 – 13:30	kl. 10:30 – 18:00	-
	Driftstimer	8 timer	7,5 timer	15,5 timer
	Effekt	112 kW	112 kW	112 kW
	Energiforbruk	896 kWh	840 kWh	1 736 kWh
Trinn 3	Driftstid	kl. 13:30 – 18:00	kl. 05:30 – 10:30	-
	Driftstimer	4,5 timer	5 timer	9,5 timer
	Effekt	276 kW	276 kW	276 kW
	Energiforbruk	1 242 kWh	1 380 kWh	2 622 kWh
Daglig energiforbruk		2 138 kWh/dag	2 220 kWh/dag	4 358 kWh/dag
Årlig energiforbruk		228 766 kWh/år	237 540 kWh/år	466 306 kWh/år
Årlig kostnad (1 kr/kWh)		228 766 NOK/år	237 540 NOK/år	466 000 NOK/år

Behovet for tårndrift er størst i perioder med dårlige spredningsforhold og høye bakgrunns-konsentrasjoner. Dager med eksempelvis mye nedbør, lave bakgrunnskonsentrasjoner eller vedvarende vind fra sørvestlig retning kan medføre dager der drift av tårnventilasjon ikke er nødvendig²². For å unngå tårndrift når det ikke er behov kan det legges inn ulike parametere for ytre forhold som kan overstyre fastprogrammeringen av tårndriften. En slik overstyring må programmeres inn i driften, basert på innhentede prognoser eller målinger. For varslet meteorologi eller luftkvalitet kan det innhentes prognoser fra f.eks. yr.no/met.no eller luftkvalitet.miljostatus.no.

Eventuell instrumentering og regulering må sees i sammenheng med øvrig tunnelventilasjonsstyring og det må også velges sensorer tilpasset nødvendig måleområde og nøyaktighet. Sensorene må kalibreres og sjekkes regelmessig.

Mulige parametere for overstyring av fastprogrammering av tårndrift er gitt i Tabell 3.

Tabell 3: Parametere for overstyring av fastprogrammering på grunn av ytre forhold. Verdiene for overstyring må bestemmes på grunnlag av eksisterende data (se kapittel 6, Forslag til videre arbeid).

Ytre forhold	Verdi	Måling/prognose
Nedbør	≥ X mm	Måling/prognose
Relativ luftfuktighet	≥ Y % RH	Måling/prognose
Vindhastighet	≥ Z m/s	Måling/prognose
Vindretning	Fra retning XY	Måling/prognose
PM ₁₀ (døgn) omgivelseskonsentrasjon	≤ A µg/m ³	Prognose
NO ₂ (time) omgivelseskonsentrasjon	≤ B µg/m ³	Prognose

²² Det bør undersøkes hvordan spredningen rundt dagsonen endrer seg etter at eventuell bebyggelse sørvest for dagsonen er etablert.

For å tallfeste kritiske overstyringsverdier, antall dager med reelt behov for tårndrift, eller konsekvens av oppdatert styringsregime for luftkvaliteten i tilgrensende planområder, må det utføres videre beregninger og/eller analyser.

I løpet av piggedekkesongen i vintrene 2010/11 til 2020/21 utgjorde antallet dager med registrert nedbør (dvs. døgnedbør > 0 mm) på Hovin mellom 27 % (2011/12) og 58 % (2017/18) av ca. 170 dager. Det må bestemmes et terskelnivå for døgnedbør som er forventet å gi mindre oppvirvling av svevestøv for å kunne brukes for overstyring for nedbør. 25 % av dagene de siste fire vintrene²³ hadde en døgnet vindhastighet > 3,7 m/s (2018/19) til > 4,3 m/s (2019/20). Disse midlede hastighetene innebærer høyere maksvind som kan føre til effektiv spredning av luftforurensning. Med overstyring for vindhastighet vil man eventuelt kunne redusere behovet for tårndrift med ca. 25 %. I de fire siste vintersesongene forekom vindretning fra sør eller sørvest ca. 25 % av tiden (vinteren 2019/20 var det til og med 40 %). Til sammen vil overstyring av ventilasjonsprogrammering på grunn av nedbør, vindhastighet eller vindretning kunne redusere ventilasjonsbehovet minst 25 % av tiden, men sannsynligvis oftere.

Detaljerte analyser av nedbørmengde, relativ luftfuktighet, vindhastighet og vindretning i Bjørvika og virkning på oppvirvling av svevestøv vil levere terskelverdier for overstyring av fastprogrammering. Histogrammer som viser frekvensfordelingen av døgnedbørmengde, døgnet vindhastighet og døgnet relativ luftfuktighet på Hovin i vintrene 2010/11 – 2020/21 (kun nedbør, andre parametere ble først målt fra 2017/18) er vist i Vedlegg A.

Størrelsen på reduksjonen av de årlige driftskostnadene en programmert overstyring kan gi er avhengig av hvilke målinger og prognoser man velger å programmere inn i ventilasjonsdriften. I det årlige kostnadsestimatet gitt i Tabell 2 vil det også foreligge en viss usikkerhet knyttet til strømprisen. Strømprisen vil variere med spotpris, med høyere strømpriser på morgenen og ettermiddagen. I Tabell 4 er det gitt en forenklet sensitivetsanalyse for hva variasjoner i strømpris og overstyring med ytre parametere kan gjøre for reduksjon av årlige kostnader.

Tabell 4: Sensitivetsanalyse årlige kostnader tårndrift.

Sensitivitet [kr/kWh]	Reduksjon i dager med behov for tårndrift f.eks. som følge av overstyring			
	0 %	-25 %	-50 %	-75 %
2,0	933 000	699 000	466 000	233 000
1,5	699 000	525 000	350 000	175 000
1,0	466 000	350 000	233 000	117 000
0,5	233 000	175 000	117 000	58 000

5.2 Oppdaterte setverdier for tunnelventilasjon og ventilasjonstårn

Måleprogrammet avdekket at enkelte setverdier for ventilasjonsstart på bakgrunn av CO- og NO-konsentrasjoner i tunnel, var basert på forutsetninger som gjaldt da tunnelene ble åpnet, eller da tunnelutstyret sist ble oppgradert. Etter målekampanjen, i april 2021, ble setverdiene for CO justert iht. dagens V520-anbefaling²⁴.

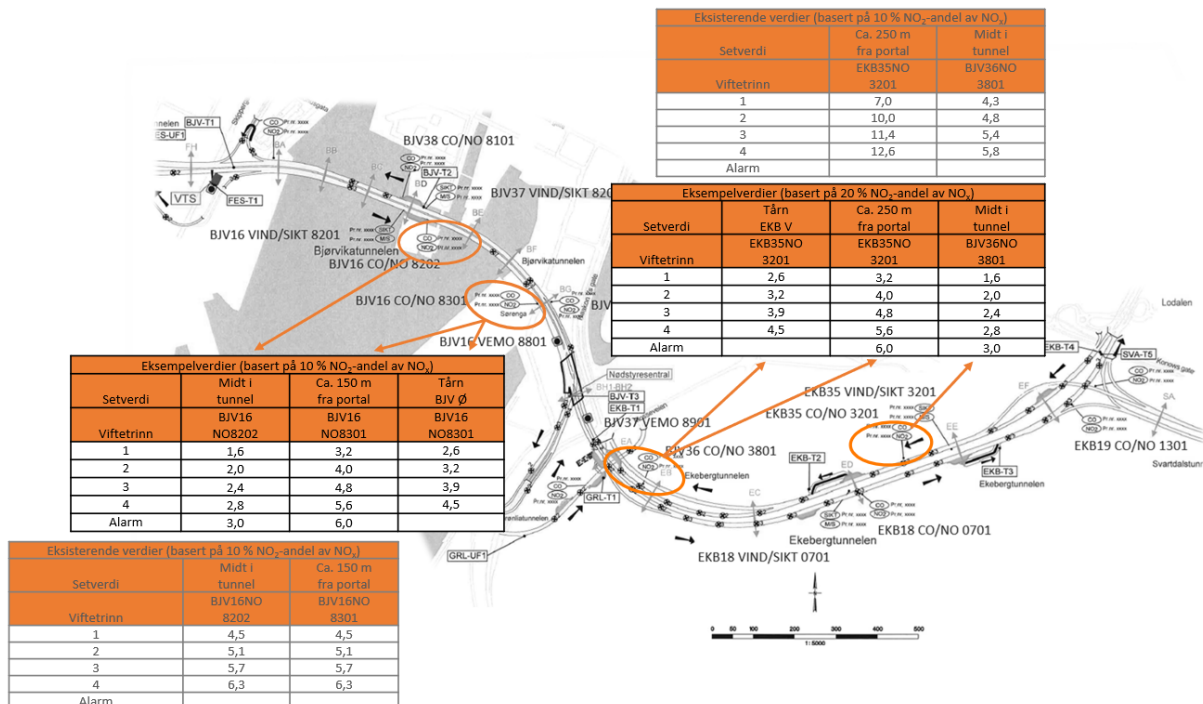
Spesifikasjon OPC grensesnitt for Trafikkstyresystem i VTS anbefaler at verdiene bør overvåkes og justeres etter driftserfaringer. SVV Håndbok V520 anbefaler for eksisterende tunneler uten NO₂-måling at startverdiene for NO justeres i takt med utvikling i NO₂-utslipp.

²³ Bare nedbørdata er tilgjengelig mange år tilbake i tid. Data for vind, relativ fuktighet osv. er tilgjengelig fra vinter 2017/18.

²⁴V520 gir eksempel på startgrenser i en 4–10 km lang tunnel der viftene alltid starter med naturlig trekkretning.

Uavhengig av implementering av nytt styringsregime for ventilasjonstårn, bør setverdiene justeres på bakgrunn av funn gjort i målekampanjen og oppdateres i henhold til gjeldene versjon av HB N500.

Figur 63 viser eksempel på oppdaterte startverdier for NO, forutsatt 20 % NO₂-andel av NO_x i tunnelene. For å ivareta anbefalinger i *Spesifikasjon OPC grensesnitt for Trafikkstyresystem i VTS*, er det også lagt inn forslag for tårnventilasjonsstart med lavere setverdier enn for langsgående ventilasjon. Dette sikrer effektiv drift av tårn og kan hindre at høy tunnelforurensning videreføres til omgivelser eller andre tunnellopp.



Figur 63: Eksempel på oppdaterte setverdier for ventilasjon basert på 20 % NO₂-andel av NO_x.

Setverdier for tunnelsystemet som helhet bør justeres for å sikre ivaretagelse av siste tunnelkrav²⁵. Ved neste tunneloppgradering bør NO₂-sensorer installeres og setverdier tilpasses NO₂-kravene. Det bør kontrolleres at sensorene er plassert slik at de gir representative målinger. Dette gjelder særlig lufthastighetsmåler for BJV (se kapittel 4.2.1).

I takt med utslippsnedgangen skjerpes kravene til luftkvalitet. Det anbefales minimum årlig justering av setverdier og driftstrinn basert på målinger fra representative lokasjoner, overskridelser av eller endrede krav til luftkvalitet.

²⁵ Etter målekampanjen, i april 2021, ble setverdiene for CO justert iht. dagens V520-eksempel.

6 Forslag til videre arbeid

Fastsette konkrete verdier og metoder for overstyringsprogrammering

Det anbefales et robust system, der de verdier og metoder som velges ikke er for kompliserte. Uansett ambisjonsnivå bør det ansees som viktigere å ventilere litt for mye, enn litt for lite. Det antas å være mest å spare på å unngå drift på enkeltdager, fremfor å finjustere ventilasjonstrinn på timesbasis. Gjennomgang av årlige luftkvalitetsdata (fra f.eks. Hjortnes, Manglerud, Loallmenningen) og meteorologidata (fra f.eks. Hovin), vil gi en god pekepinn på når det ikke er behov for tårndrift. Relevante parametere for overstyring av ventilasjonsprogrammering er nedbørmengde, vindhastighet, vindretning og relativ luftfuktighet. Resultater fra gjennomgangen kan videre benyttes til kost-nytte-vurdering sett opp mot alternative tiltak (f.eks. vask, salting etc.).

Verifisering at meteorologisk prognose tilsvarer faktiske forhold

Hvis overstyring programmeres på forhånd, dvs. for påfølgende dag, må man basere seg på prognoser, f.eks. meteorologiske prognoser for Bjørvika. Meteorologiske måledata fra Oslo – Hovin (SN 18210) har vist bra samsvar med lokale målinger ved dagsonen og ved Losæter (tidligere prosjekt). Det bør undersøkes hvor godt samsvaret er mellom prognosen for Hovin (og dermed Bjørvika) og faktisk målt vindretning, vindhastighet, nedbør og relativ luftfuktighet. Dette vil sikre at tiltaket er målrettet for å redusere forurensning fra dagsonen.

Gjennomgang av sensorer og justering av setverdier (NO) for hele E18 Operatunnelssystemet

Utover de tunnelstrekk, tunnelsensorer og ventilasjonstårn som er gjennomgått i dette oppdraget, anbefales det en gjennomgang av tunnelsystemet som helhet (E18 Operatunnelen). Dynamikken i tunnelen er sammensatt, men videre beregninger kombinert med data fra eksisterende tunnelsensorer samt funn fra målekampanjen, bør kunne gi svar på om andre tunnelstrekk eller -sensorer har behov for optimalisering. Det er ikke gitt at eksempelverdier fra V520 er tilstrekkelig for å unngå overskridelse av krav til luftkvalitet.

Oppfølgende målinger for å verifisere at ventilasjonsstrategien fører til ønsket resultat

Etter eventuell innføring av nytt styringsregime bør det utføres målinger av PM₁₀ og NO₂ på bakkenivå utenfor dagsonen. Målingene kombinert med meteorologidata fra Hovin vil vise om tårndrift under tørre forhold i piggdekkseasonen ved lite vind eller vind fra nordøstlig sektor fører til PM₁₀-konsentrasjoner på akseptabelt nivå.

Etter en mulig innskjerping av PM₁₀-grenseverdien fra 1. januar 2022 er antallet tillatte overskridelser av døgn grenseverdien 25. Oppfølgende målinger vil vise om aktiv styring av ventilasjonstårnene i tørre perioder vil hjelpe å minske bidraget fra dagsonen til PM₁₀-konsentrasjonen i omgivelsene.

Test av eksisterende sensorer og systemer

Observasjoner under målekampanjen reiste flere spørsmål rundt sensorer og driftssystemer som bør vurderes å følge opp.

- En mismatch/diskrepans mellom styreprogram og PLS ser ut til å føre til at tilbakemeldingen fra systemet angående ventilasjonstrinn er feil. For måleprosjektet førte dette til usikkerhet om hvilken trinn ventilasjonen ble kjørt på til enhver tid. Hvis logdataene om ventilasjonstrinn brukes videre bør dette sjekkes.
- Det bør vurderes om det er hensiktsmessig og gjennomførbart å omprogrammere tårndrift trinn 3 (nå: et tårn på halv hastighet og et tårn på full hastighet) for å unngå å kjøre et av tårnene på full hastighet. Tårndrift med begge tårn på ¾ kapasitet vil kunne bidra til å redusere effektbehovet, men må ikke føre til økt ubalanse eller slitasje.

- Oppstart av tårnventilasjon på trinn 4 førte til overbelastning en av dagene i målekampanjen. Det anbefales å lage en instruks for trinnvis oppstart (automatisert rutine) av tårnventilasjonen for å unngå overbelastning.
- Hvis styringsregimet skal designes rundt eksisterende sensorer må det sikres at sensorene måler korrekt. Både målt nivå og tidsvariasjonen av fastinstallerte sensorer knyttet til drift av ventilasjon bør sjekkes regelmessig. Sensorer som ikke samvarierer med trafikkmengden måler mest sannsynlig feil (CO-sensorer i BJV, siktsensorer). Det bør sikres at sensorene ikke viser en offset i målt konsentrasjon, som ble observert for noen av CO-sensorene. Det er anbefalt å skifte ut sensorene når de har overgått sin levetid.
- Plassering av vindsensor i Bjørvikatunnelens østgående løp bør vurderes.
- Mottatt grunnlag benyttet i oppdraget har avdekket manglende samsvar med faktiske forhold og ulik navn- og kodeangivelse på tvers av dokumenter. Det anbefales at det utarbeides oppdaterte tegninger som viser nøyaktige ventilasjons- og sensorplasseringer med koordinerte navn- og kodeangivelser. Dette vil bidra til lettere resultattolkning og kan sørge for en mer effektiv prosess i videre arbeider. Informasjon i Nasjonal vegdatabank (NVDB) bør oppdateres parallelt.

7 Konklusjon

Ved hjelp av et omfattende måleprosjekt og analyser av strømnings og luftbevegelser, ble effekten av ventilasjonstårnene ved Sørenga i E18 Operatunnelen kartlagt og et nytt styringsregime for drift av ventilasjonstårnene ble foreslått.

Måleprosjektet og analysene viser at drift av tårnventilasjon har en målbar effekt på luftkvaliteten i og utenfor dagsonen.

Dette skyldes primært at bruk av ventilasjonstårnene påvirker luftstrømmene fra Bjørvikatunnelens østgående og Ekeberg tunnelens vestgående tunnellop. Effekten er merkbar fra trinn 2 og tydelig ved trinn 3.

Tårnventilasjonen ser videre ut til å ha en effekt på vertikale luftbevegelser over dagsonen når den kjøres på trinn 3 eller høyere. Tidligere målinger av luftbevegelser over dagsonen (Berge og Kravik, 2018) fant ingen effekt av drift av ventilasjonstårnene på luftutskiftning mellom dagsone og utemiljøet. I måleprosjektet 2017-2018 ble ventilasjonstårnene kun kjørt i perioder på 20-60 minutter, noe som antagelig ikke var tilstrekkelig for å konstatere en effekt. Korte tidsintervaller for tårndrift vil også i liten grad påvirke døgnmiddelverdier for PM₁₀.

Drift av ventilasjonstårnene (ved trinn 3 eller høyere) førte til lavere konsentrasjoner av PM₁₀ og NO₂ i dagsonen. Drift av ventilasjonstårnene (ved trinn 3 eller høyere) viste også lavere konsentrasjoner av PM₁₀ for omgivelsene på bakkenivå utenfor dagsonen (dvs. mindre tilførsel av luftforurensning fra dagsonen). Effekten er mest utpreget ved målestasjonen som var lokalisert nærmest og nedvinds for dagsonen. Effekten synes også til en viss grad ved målestasjonen på kaia som også var lokalisert nedvinds i forhold til dagsonen, men med større avstand.

I motsetning til tidligere undersøkelser, viser dermed resultatene samlet at intensivert drift av ventilasjonstårnene i Operatunnelen er et virkningsfull tiltak mot luftforurensning fra dagsonen, og har en positiv effekt på luftkvaliteten i omgivelsene rund dagsonen.

Utskiftningen av forurenset luft mellom tunnel/dagsone og utemiljøet er, i tillegg til trafikkforhold og ventilasjonsdrift, også påvirket av temperatur, vindretning og vindhastighet. Med tanke på svevestøvkonsentrasjoner og -bidrag, vil i tillegg nedbør og relativ luftfuktighet være avgjørende. De ytre parametrene vil ha direkte effekt på både oppvirvling av svevestøv og strømning mellom dagsone og utemiljøet.

På grunnlag av den detaljerte kartleggingen av ventilasjonstårnenes effekt, er det foreslått et nytt styringsregime, som tar hensyn til både forventet produksjon av forurensning i tunnel og forventede ytre forhold. Produksjon av forurensning er avhengig av trafikkvolumet, som har en karakteristisk døgnvariasjon. Forventede ytre forhold er avhengig av prognoser for nedbør, fuktighet, vindhastighet, vindretning og omgivelseskonsentrasjoner. Behovet for tårndrift er antatt størst i perioder med høy trafikkbelastning, kombinert med dårlige spredningsforhold og høye bakgrunnskonsentrasjoner. Dette forekommer typisk vinterstid i piggdekk sesongen.

Foreslått prinsipielt styringsregime legger opp til en tidsstyrt fastprogrammering, som innebærer drift av ventilasjonstårnene (trinn 2 og trinn 3) mandag til fredag i piggdekk sesongen kl. 5:30 – kl. 18, med intensivert drift (trinn 3) i rushtiden for de enkelte kjøreretningene.

Tårnventilasjonsdrift er energikrevende og kostnadsdrivende. På dager med mye nedbør, vedvarende vind fra sørvestlig retning eller lave bakgrunnskonsentrasjoner, vil det være redusert behov for tårnventilasjon. Av energiøkonomiske hensyn beskriver styringsforslaget derfor også ulike ytre parametre som kan benyttes til å overstyre tidsstyringen når det ikke er behov for å kjøre tårnene. Beskrevne parametre er nedbør, luftfuktighet, vindhastighet, vindretning og omgivelseskonsentrasjoner.

Bidraget fra dagsonen til luftforurensning i omgivelsene er vanskelig å kvantifisere og i stor grad avhengig av ytre forhold. For å tallfeste kritiske overstyringsverdier, antall dager med reelt behov for tårndrift, eller konsekvens av oppdatert styringsregime for luftkvaliteten i tilgrensende planområder, må det utføres videre beregninger og/eller analyser.

Måleresultatene antyder at støv som er produsert på veioverflaten på nedbørsdager blir akkumulert til veien tørker opp og store mengder svevestøv blir virvlet opp. På grunnlag av dette, anbefales det å kjøre ventilasjonstårnene intensivt første dagen veien tørker opp etter en lengre nedbørepisode.

Det var god overensstemmelse mellom meteorologiske målinger ved dagsonen og Hovin for vindretning, vindhastighet, temperatur, relativ luftfuktighet og nedbør. Det betyr at målinger fra Hovin er representative for området og kan brukes for fremtidige vurderinger knyttet til tårnventilasjon.

Eventuell innskjerping av PM-grenseverdiene fra 1.1.2022 vil betone behovet for å få på plass aktiv styring av ventilasjonstårnene.

8 Referanser

- Berge, E. (2017) Luftkvalitet i Lohavn. Oppsummering av resultater fra måleprogram for luftkvalitet og planer for videre arbeid fram til innlevering av planforslag. Civitas notat av 01.11.2017.
- Berge, E., Kravik, R. (2018) Målinger av vind og turbulens i Operakulverten, Lohavn, Oslo. Måling av vind og turbulens i Operakulverten og sammenligning med drift av lufttårnene, trafikkmengder og meteorologiske forhold utenfor kulverten. Civitas og NILU. Civitas rapport 18.12.2018
- Berge, E., Klami, T., Selvig, E. (2019) Luftkvalitet Lohavn, Oslo. Beregninger av lokal luftkvalitet i dagens situasjon og for framtidig situasjon etter en utvikling av området. Civitas og Brekke & Strand. Civitas rapport 08.01.2019
- Det Kongelige Arbeids- og Administrasjonsdepartement (2002) St.meld. nr. 28 (2001-2002) Utvikling av Bjørvika. Tilråding fra Arbeids- og administrasjonsdepartementet av 26. april 2002, godkjent i statsråd samme dag.
- FHI, Folkehelseinstituttet (2021) Uteluft – luftkvalitetskriterier [nettdokument]. Oslo: Folkehelseinstituttet. URL: <https://www.fhi.no/nettpub/luftkvalitet/> [lest 01.09.2021]
- Hak, C., Marsteen, L. (2019) Godkjenning av instrumenter for måling av lokal luftkvalitet. Forslag til godkjenningsordning for Norge. NILU rapport 4/2019. Kjeller: NILU. URL: <http://hdl.handle.net/11250/2601246>
- Hak, C., Tønnesen, D. (2020) Målinger av PM₁₀ i Lohavn. April og mai 2020. NILU rapport 26/2020. Kjeller: NILU. URL: <https://hdl.handle.net/11250/2732197>
- Hak, C. (2021) Norges målenettverk for luftkvalitet. Gjennomgang av stasjonsplasseringer i forhold til krav i EUs luftkvalitetsdirektiver. NILU rapport under arbeid.
- Miljødirektoratet (2014) Håndbok for kvalitetssystem for målinger av luftkvalitet. Del 1: Beskrivelse av kvalitetssystemet. Veileder. M39-2014. Oslo: Miljødirektoratet. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m39/m39.pdf>
- Miljødirektoratet (2020) Grenseverdier for svevestøv. Forslag til reviderte grenseverdier for PM₁₀ og PM_{2.5}. Rapport. M-1669/2020. Oslo: Miljødirektoratet. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1669/m1669.pdf>
- Miljøverndepartementet (2012) Retningslinje for behandling av luftkvalitet i arealplanlegging, T-1520.
- Norconsult (2021) Utredning av tiltak for å bedre luftkvaliteten i Lohavn. Norconsult, RAPP-01, 2021.11.02.
- Norconsult (2017) Tiltak for å begrense utslipp fra portal i Vestbanekrysset. Norconsult, Notat TA-04-06, 2017.12.18.
- Oslo kommune, Plan- og bygningsetaten (2003) Byutvikling i Bjørvika – Bispevika – Lohavn. Reguleringsforslag til bystyret.
- Selvig, E., Klami, T. (2020) Luftkvalitet i området Lohavn og Grønlikaia, Oslo. Dagens situasjon og framtidig situasjon med planlagt bebyggelse i området. Konsentrasjonsberegninger og T-1520 kart for partikler, PM₁₀, basert på ny måleserie vår 2020. Civitas, Brekke & Strand og NILU. Civitas rapport 01.12.2020.
- Statens vegvesen (2006) Vegtunneler. Normaler. HB021. Oslo: Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2010) Vegtunneler. Normaler. HB021. Oslo: Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2012) Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008-2011. Vegtunneler og lokal luftkvalitet. Statens vegvesens rapporter Nr. 152. Vegdirektoratet, Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen, Tunnel og betong, August 2012. URL:

<https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2655452/Rapport%20152%20Etatsprogrammet%20Moderne%20vegtunneler%202008%20-%202011%20vegtunneler%20og%20lokal%20luftkvalitet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Statens vegvesen (2020a) Vegtunneler. Håndbok N500. Vegdirektoratet. URL: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2760692/hb-n500-vegtunneler-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

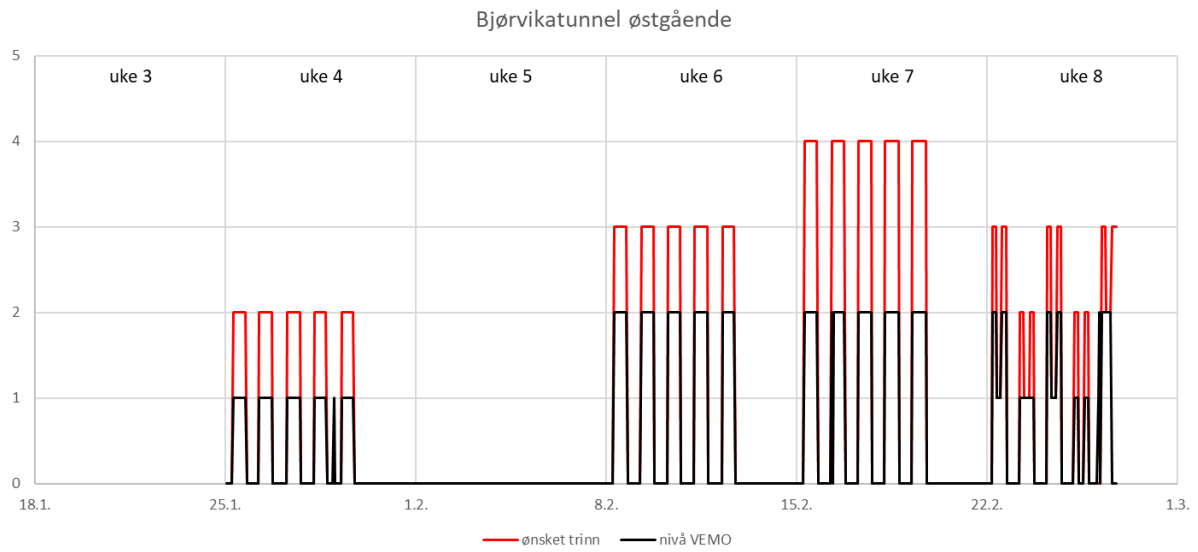
Statens vegvesen (2020b) Tunnelveiledning. Håndbok V520. Vegdirektoratet. URL: https://filesver.motocross.io/trafikksiden/HB_V520_Tunnelveiledning_2020.pdf

Statens vegvesen (2020c) Spesifikasjon OPC grensesnitt for Trafikkstyresystem i VTS. Standard OPC-grensesnitt for Trafikkstyresystem i Vegtrafikksentralen i Oslo (VTS). Versjon 3.2g.

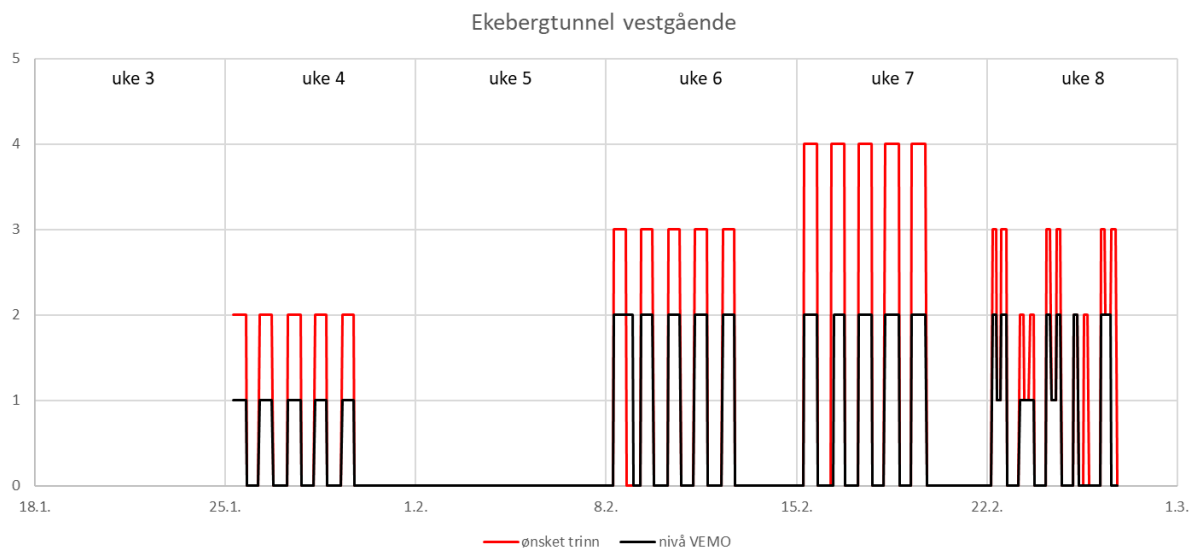
Vedlegg A

Utfyllende måledata

Drift av tårnventilasjonen

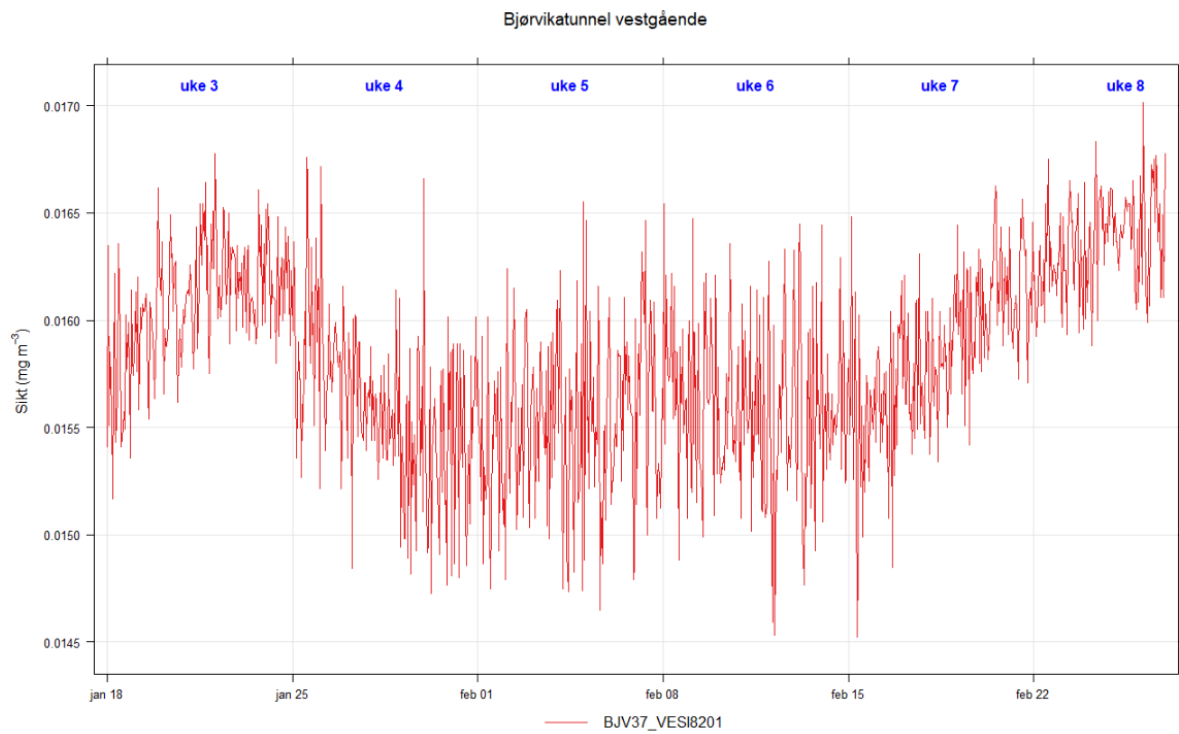


Figur: Tårnventilasjonsdrift i BJV Ø. Rød: ønsket trinn. Svart: trinn logget av styringssystemet.

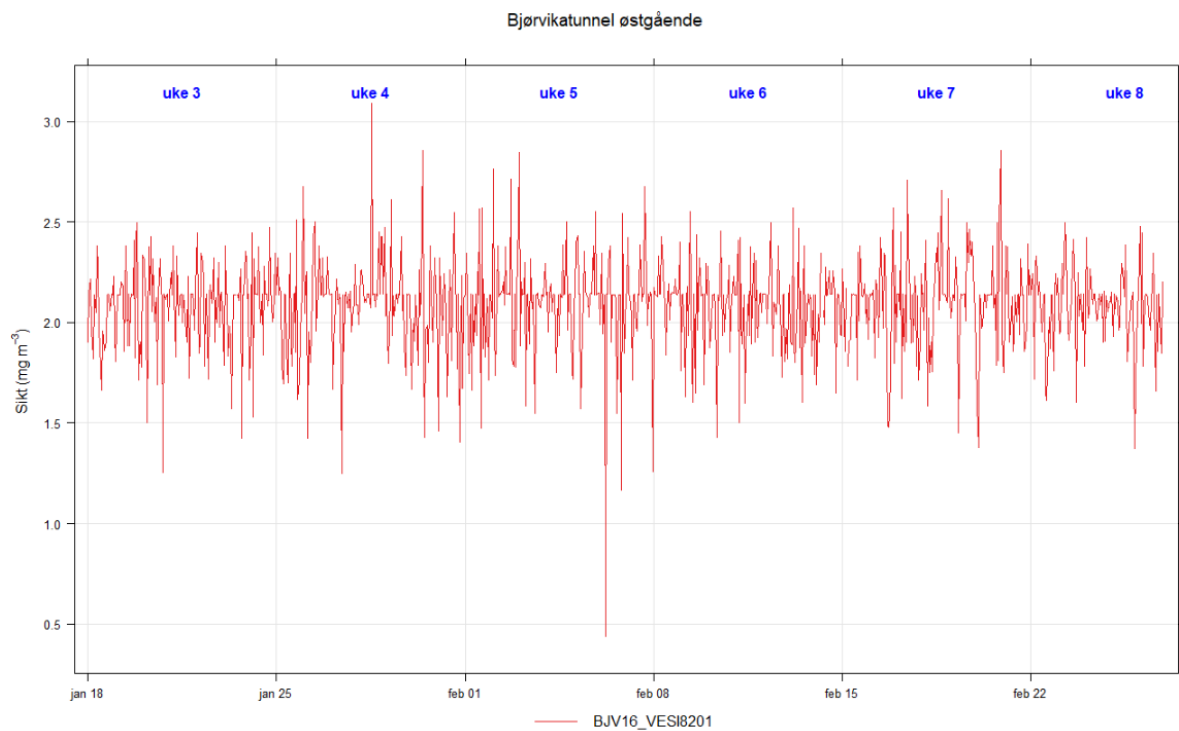


Figur: Tårnventilasjonsdrift i EKB V. Rød: ønsket trinn. Svart: trinn logget av styringssystemet.

SVV siktmålinger

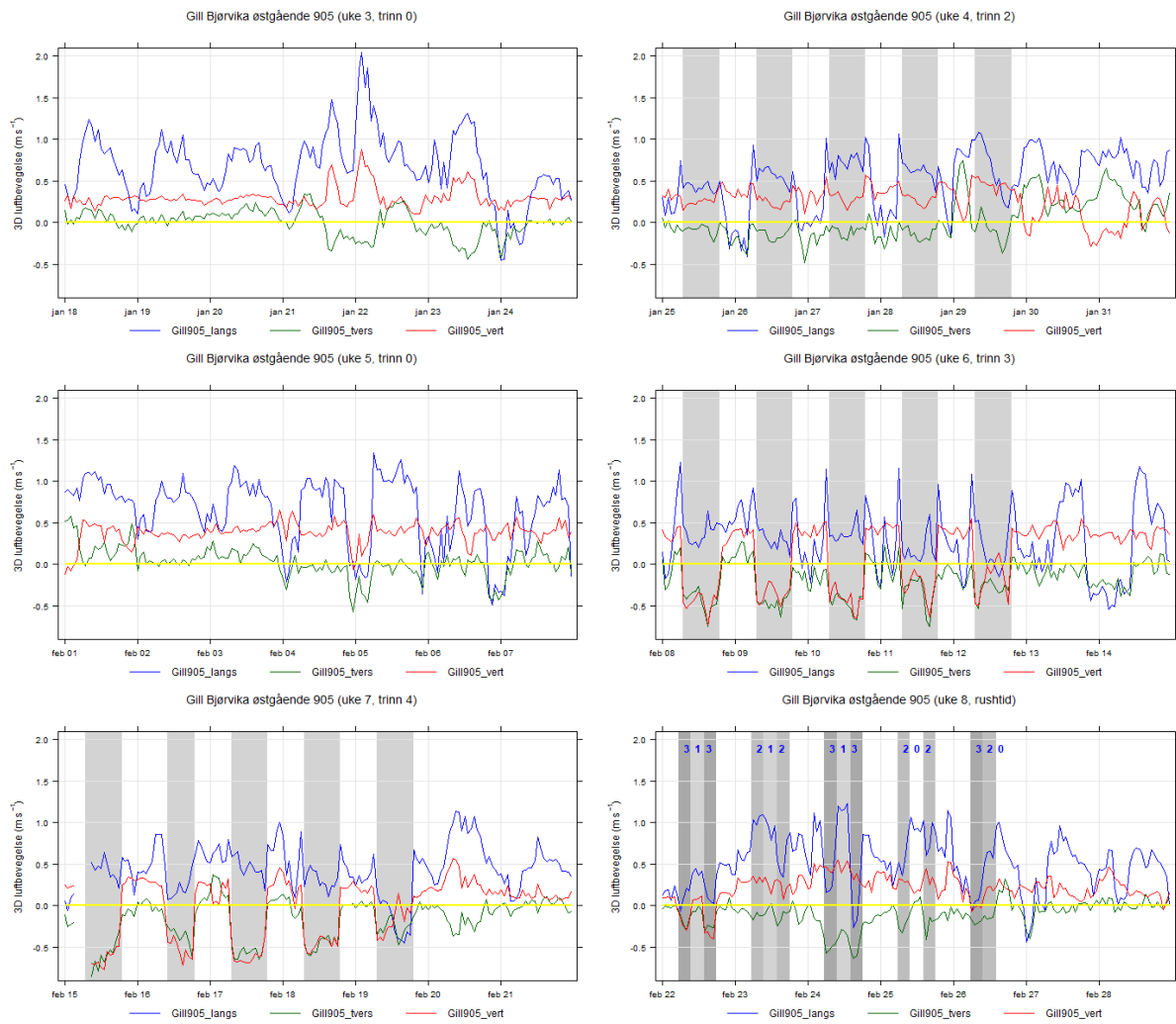


Figur: Sikt (mg/m^3) målt av SVVs sensor i Bjørvikatunnel vestgående.

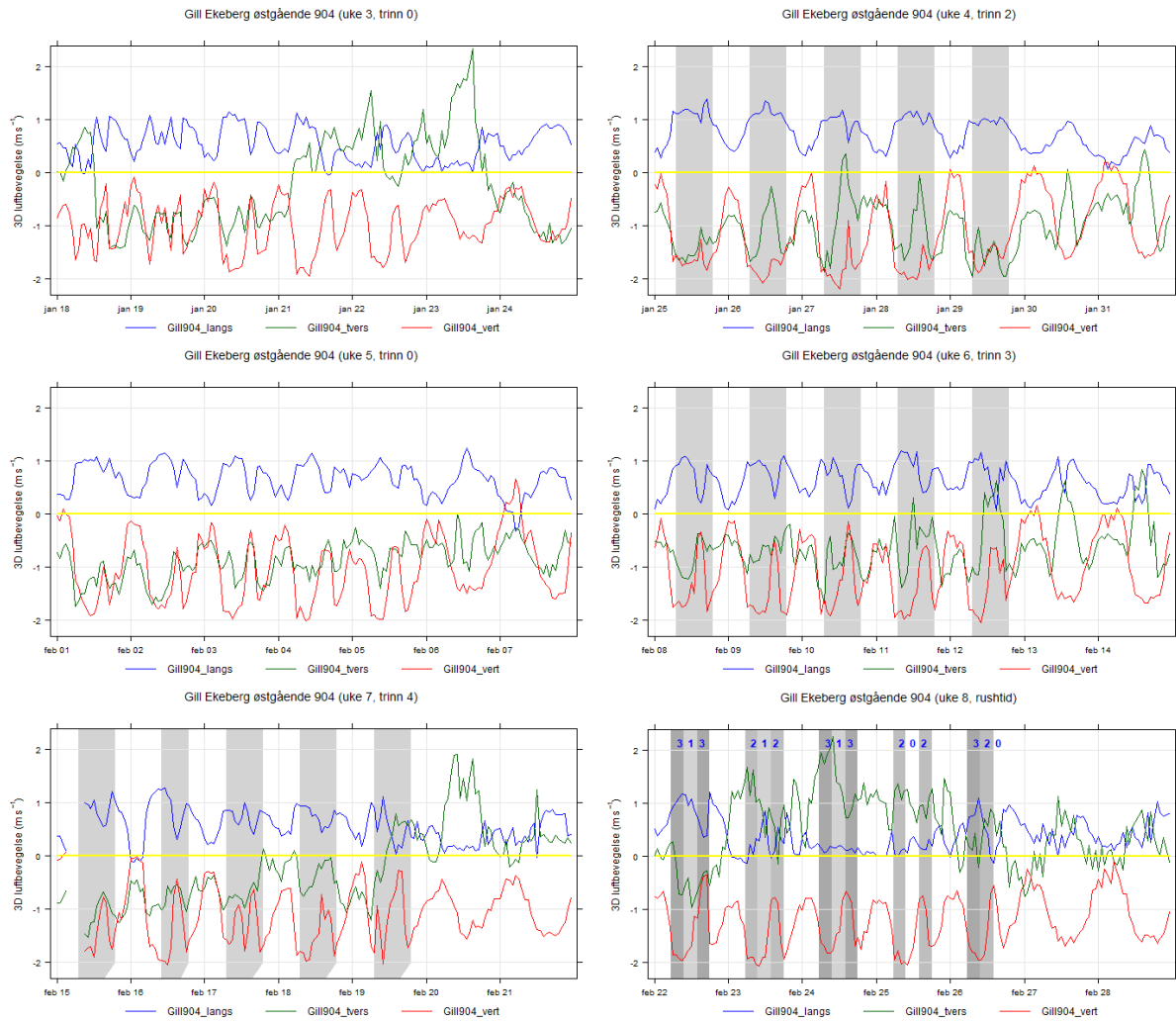


Figur: Sikt (mg/m^3) målt av SVVs sensor i Bjørvikatunnel østgående.

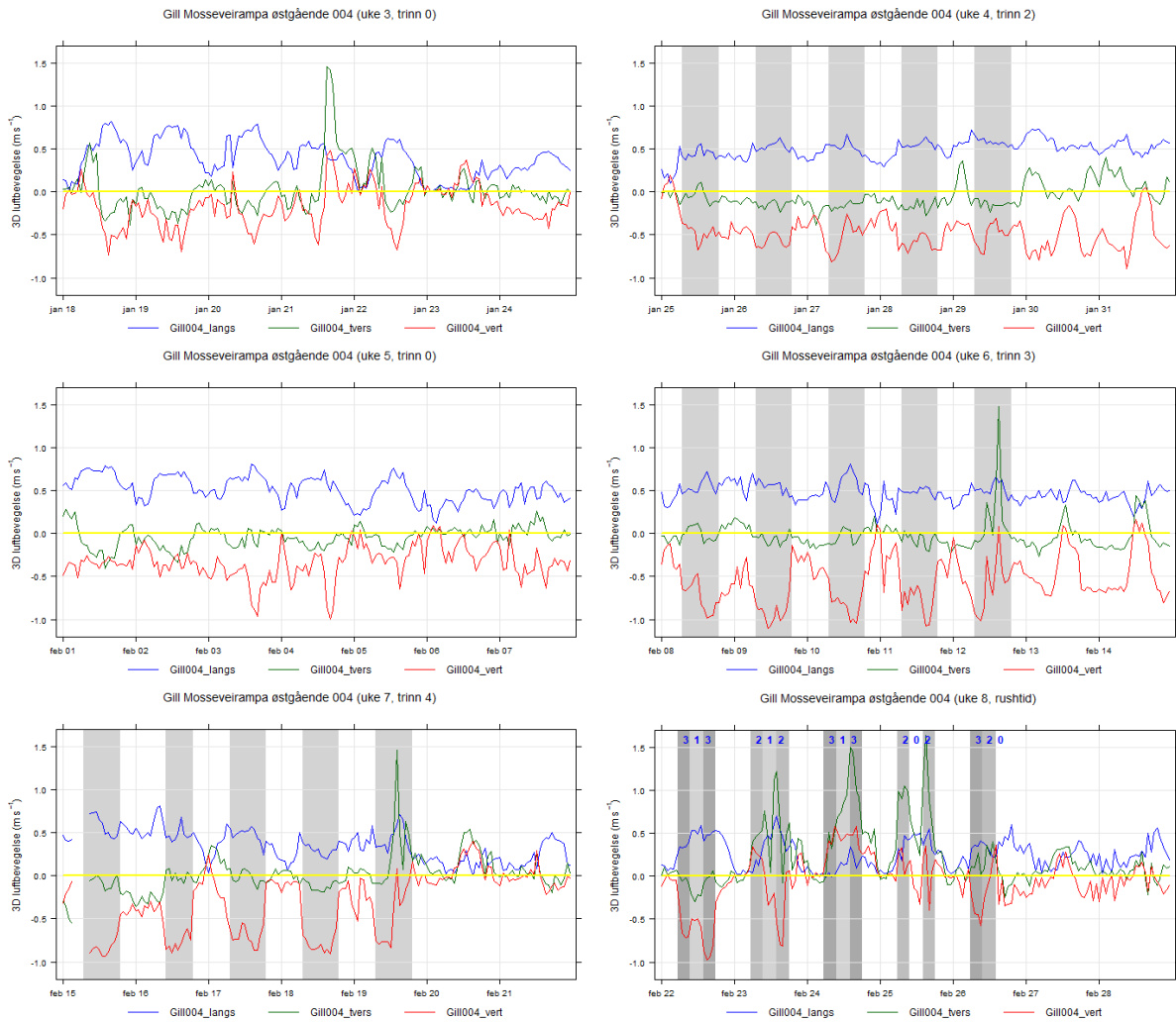
3D luftbevegelser over dagsonen



Figur: 3D luftbevegelser (m/s) over dagsonen, ved Bjørvika østgående.



Figur: 3D luftbevegelser (m/s) over dagsonen, ved Ekeberg østgående.



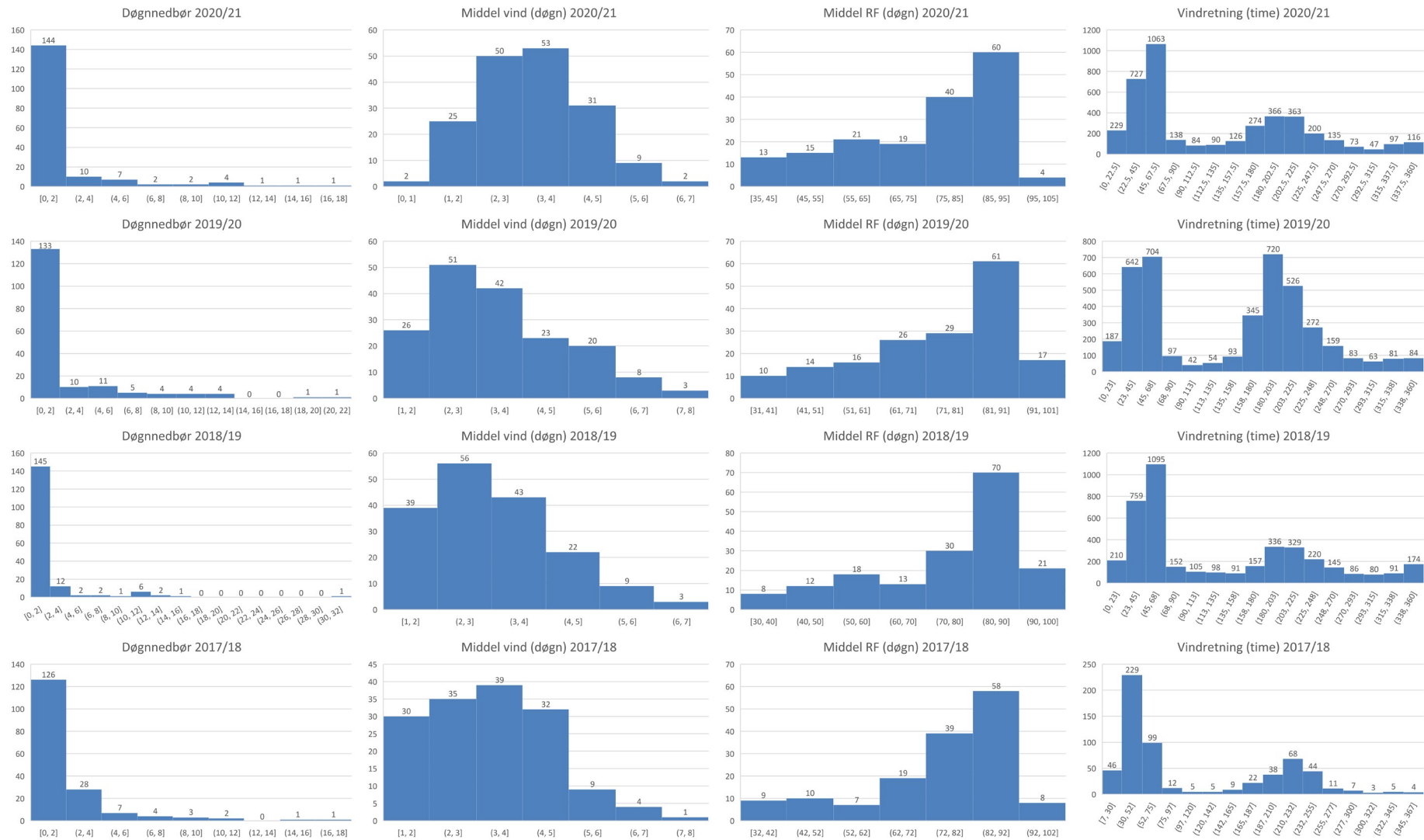
Figur: 3D luftbevegelser (m/s) over dagsonen, ved Mosseveirampa

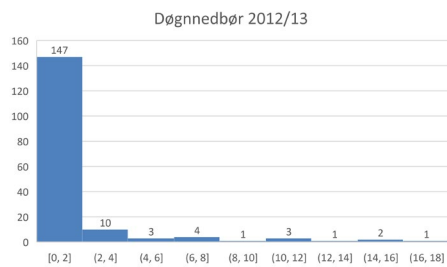
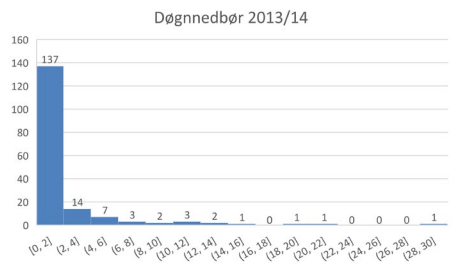
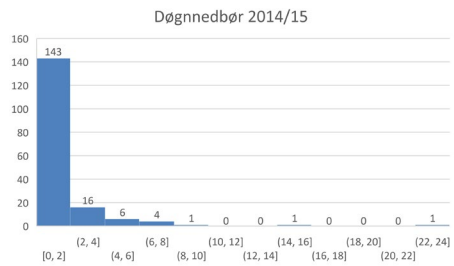
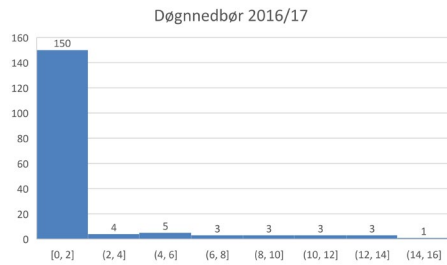
Nye setverdier: Etter målekampanjen, i april 2021, ble setverdiene for CO justert ihht. dagens krav

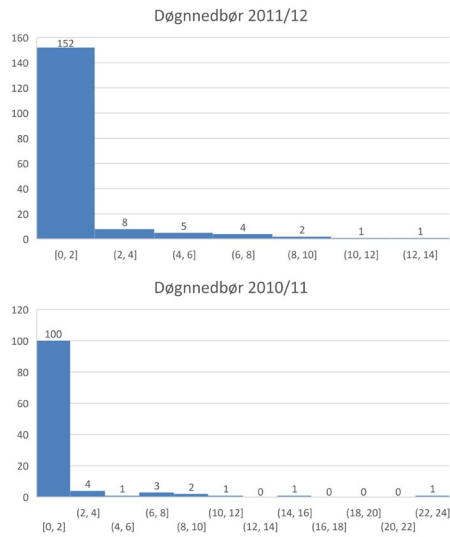
Tabell: Setverdier for CO etter april 2021 (iht. tabell 9.7, håndbok V520 pr mars 2021)

Objektnavn	Limit1	Limit2	Limit3	Limit4	Limit5	Limit6	Merknad
EKB18COAL0701	30	35	40	45	50	-	375-750m
EKB19COAL1301	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
EKB35COAL3201	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
EKB36COAL3801	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
FES51COAL8502	30	35	40	45	50	-	375-750m
FES13COAL9201	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
FES14COAL9101	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
FES40COAL9201	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
FES41COAL9301	30	35	40	45	50	-	375-750m
FES66COAL8502	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
SVD72COAL0701	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
SVD72COAL1101	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
SVD82COAL3401	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
SVD57COAL4001	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
BJV16COAL8202	30	35	40	45	50	-	375-750m
BJV16COAL8301	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
BJV62COAL8301	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel
BJV37COAL8301	30	35	40	45	50	-	375-750m
BJV37COAL8201	30	35	40	45	50	-	375-750m
BJV38COAL8101	15	20	25	30	50	-	Midt i tunnel

Meteorologiske forhold (målestasjon Hovin, Oslo) i piggdekkelsesongene 2010/11 – 2020/21. Piggdekkelsesong defineres som perioden 1.nov – 21.april:







Figur: Histogrammer, dvs. frekvensfordelingen, for nedbørmengde, vindhastighet, relativ luftfuktighet og vindretning målt ved Oslo - Hovin i piggedekkesongene siden 2010/11. Vindhastighet, relativ luftfuktighet og vindretning ble målt fra 2017/18.

Vedlegg B

Grenseverdier og luftkvalitetskriterier

Det er ulike regler mht. luftkvalitet som gjelder i tunnelluft og i uteluft. Tunnelkravene (SVV, 2020a) angir kravene til luftkvalitet, dvs. konsentrasjoner av CO, NO (NO₂) og PM, i vegtunneler. I uteluft, dvs. luften i områdene der folk kan ferdes, gjelder både grenseverdier, som er juridisk bindende, og luftkvalitetskriterier, som ikke er juridisk bindende, men heller anbefalinger som angir nivåer av luftforurensning som er trygge for de aller fleste mennesker.

Tunnelluft

Kravene for luftkvalitet i tunnel er satt for å ivareta trafikantenes helse og sikkerhet. Kravene fra Tabell 9.2 i SVVs N500 (SVV, 2020a) er gjengitt i Tabell 5.

Tabell 5: Tunnelkrav for luftkvalitet (SVV, 2020a, tilpasset fra Tabell 9.2).

Komponent	Dimensjonerende konsentrasjon	Kommentar
CO – karbonmonoksid	50 ppm	Krav
NO ₂ – nitrogendioksid	1,5 ppm 3000 µg/m ³	Krav
NO _x – nitrogenoksider	-	Varierer med NO ₂ -andel
NO – nitrogenmonoksid	-	Varierer med NO ₂ -andel
PM ₁₀ – svevestøv (sikt)	1000 µg/m ³	Krav
PM _{2,5} – eksospartikler [sikt]	500 µg/m ³	Krav

NO₂-verdien er basert på en antatt NO₂-andel på 15 % av NO_x. Der NO₂-konsentrasjonen overstiger 0,75 ppm midt i tunnelen skal det utløses alarm på VTS, og ventilasjonsanlegget bør reguleres automatisk til maksimal kapasitet. Tunnelen skal stenges for trafikk hvis konsentrasjonen i midtpunktet ikke faller under 0,75 ppm i løpet av 15 min.

I eksisterende tunneler kan NO-sensorer brukes, men det anbefales at de erstattes av NO₂-sensorer ved oppgradering av anleggene.

For å sikre at dimensjonerende konsentrasjoner i tunnel ikke oppnås, gis ventilasjonsanlegget startgrenser (setverdier) som er lavere enn alarmgrensen (kravet). Disse setverdiene må vurderes i sammenheng med luftkvaliteten i omgivelsene, slik at man sikrer at krav til utendørs luftkvalitet overholdes utenfor tunnelmunning. Avhengig av omgivelsene betyr dette vanligvis langt lavere setverdier enn startgrensene som er gitt som eksempel i V520. Det må også tas i betraktning at høye

15-minutters middelværdier ut fra tunnel, ikke nødvendigvis gir overskridelse av lavere timemiddel eller døgnmiddelværdier for uteluften.

Krav til utslipp fra tunneler er gitt i N500s kapittel 10.3 og gjengitt i Tabell 6.

Tabell 6: *Krav til utslipp fra tunneler (SVV, 2020a; kapittel 10.3).*

Komponent	Midlingstid	Forurensningsforskriften Enhet: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Antall tillatte overskridelser i parentes	Nasjonale mål Enhet: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Nivåer for utslipp fra tunnel iht. N500* Enhet: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Antall tillatte overskridelser i parentes
NO ₂	Time	200 (18)		150 (8)
	År	40	40	
PM ₁₀	Døgn	50 (30)		50 (7)
	År	25	20	
PM _{2,5}	År	15	8	

Døgnmiddel for PM₁₀ tilsvarer Rød sone iht. Miljødirektoratets Retningslinjer for behandling av luftkvalitet i arealplanlegging, T-1520.

Måleinstrumenter for kontroll av luftkvalitet i tunneler skal ifølge V520 Tunnelveiledning (SVV, 2020b) dekke følgende måleområder:

- NO₂ : 0–5 ppm tilsvarende 0–10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- NO: 0–50 ppm tilsvarende 0–100 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- CO: 0–200 ppm tilsvarende 0–240 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- PM_{2,5}: 0–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{2,5} dekker utslipp av eksospartikler)

Uteluft

Utendørs luftkvalitet er i Norge regulert i forurensningsforskriften kapittel 7 om lokal luftkvalitet²⁶. Forskriften har som formål å fremme menneskers helse og trivsel og beskytte vegetasjon og økosystemer ved å sette minstekrav til luftkvalitet og sikre at disse blir overholdt. Den skal også bidra til at Norge overholder EUs direktiver om luftkvalitet (2004/107/EF og 2008/50/EF), og inneholder en rekke grenseverdier, målsettingsverdier og andre terskler som bl.a. bestemmer i hvilke tilfeller luftkvaliteten må overvåkes, og når det må gjennomføres tiltak. Kommunene er delegert forurensningsmyndighet etter forskriften (§ 7-4). Norske grenseverdier for PM₁₀, PM_{2.5} og NO₂ er gitt i Tabell 7. Grenseverdiene er todelt. De består av en konsentrasjon som ikke skal overskrides og et antall overskridelser per år som er tillatt.

Døgn grenseverdien for PM₁₀ på 50 µg/m³ skal ikke overskrides mer enn 30 ganger per kalenderår. Dette betyr at den 31. høyeste døgnmiddelverdien ikke skal overskride grenseverdien. Årsgrenseverdien er på 25 µg/m³. Grenseverdiene for PM₁₀ og PM_{2.5} gjeldende i Norge er strengere enn EU sine grenseverdier.

Tabell 7: Grenseverdier for tiltak (Forurensningsforskriften §7-6). Nye grenseverdier for PM å bli gjeldende fra 1.1.2022 ble foreslått av Miljødirektoratet (Miljødirektoratet, 2020).

Komponent	Midlingstid	Grenseverdi	Antall tillatte overskridelser av grenseverdien
Svevestøv, PM₁₀			
	1 døgn	50 µg/m ³	Grenseverdien må ikke overskrides mer enn 30 ganger pr. kalenderår
	Kalenderår	25 µg/m ³	
Svevestøv, PM_{2.5}			
	Kalenderår	15 µg/m ³	
Nitrogendioksid, NO₂			
	1 time	200 µg/m ³	Grenseverdien må ikke overskrides mer enn 18 ganger pr. kalenderår
	Kalenderår	40 µg/m ³	

Miljødirektoratet, Vegdirektoratet, Folkehelseinstituttet og Meteorologisk institutt har utredet om grenseverdiene for svevestøv, PM₁₀ og PM_{2.5}, bør endres og anbefaler en innstramning av grenseverdiene fra 1. januar 2022 (Miljødirektoratet, 2020).

- PM₁₀ årsmiddel: 20 µg/m³ (ned fra dagens 25 mg/m³)
- PM₁₀, antall tillatte overskridelser av døgnmiddel 50 µg/m³: 25 (ned fra dagens 30)
- PM_{2.5} årsmiddel: 10 mg/m³ (ned fra dagens 15 µg/m³)

²⁶ https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931/KAPITTEL_3-1#KAPITTEL_3-1

Folkehelseinstituttet og Miljødirektoratet har i tillegg fastsatt luftkvalitetskriterier for en rekke komponenter. Luftkvalitetskriteriene er fastsatt for ulike forurensningskomponenter basert på eksisterende kunnskap om hvilke helseeffekter de gir. Luftkvalitetskriteriene er ikke juridisk bindende, men angir nivåer av luftforurensning som er trygge for de aller fleste mennesker. Luftkvalitetskriteriene for PM₁₀, PM_{2.5} og NO₂ er gitt i Tabell 8. For PM₁₀ er luftkvalitetskriteriene for døgnmiddel på 30 µg/m³ (FHI, 2021).

Tabell 8: Luftkvalitetskriterier fastsatt av Folkehelseinstituttet og Miljødirektoratet.

Komponent	Midlingstid	Luftkvalitetskriteriet
PM ₁₀	Døgn	30 µg/m ³
PM ₁₀	År	20 µg/m ³
PM _{2.5}	Døgn	15 µg/m ³
PM _{2.5}	År	8 µg/m ³
NO ₂	15 min	300 µg/m ³
NO ₂	Time	100 µg/m ³
NO ₂	År	40 µg/m ³

Likeledes har en rekke offentlige institusjoner samarbeidet om å utarbeide forurensningsklasser og helse råd for en rekke typer forurensning (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂ og O₃), se Tabell 9²⁷. For PM₁₀ karakteriseres nivåene av forurensning som *lite* (timemiddelkonsentrasjon < 60 µg/m³), *moderat* (60 - 120 µg/m³), *høyt* (120 – 400 µg/m³) og *svært høyt* (> 400 µg/m³).

Tabell 9: Forurensningsklasser for timesmiddel for PM₁₀, PM_{2.5} og NO₂ (for PM også døgnmiddel).

Forurensnings-klasse	Helserisiko	PM ₁₀ (døgn)	PM ₁₀ (time)*	PM _{2.5} (døgn)	PM _{2.5} (time)*	NO ₂ (time)
Svært høyt	Alvorlig	> 150	> 400	> 75	> 150	> 400
Høyt	Betydelig	50 – 150	120 – 400	25 – 75	50 – 150	200 – 400
Moderat	Moderat	30 – 50	60 – 120	15 – 25	30 – 50	100 – 200
Lavt	Liten	< 30	< 60	< 15	< 30	< 100

*Forurensningsklassen for svevestøv (PM₁₀ og PM_{2.5}) er i utgangspunktet gitt for døgnmiddel (gjennomsnittlig konsentrasjon i løpet av et døgn). Tilsvarende forurensningsklasse for timesmiddel (gjennomsnittlig konsentrasjon i løpet av en time) er en matematisk omregning basert på statistikk. Når timesmiddel for svevestøv kommer i forurensningsklassen gul er det mest sannsynlig at døgnet også blir gult.

Miljøverndepartementet vedtok i april 2012 en retningslinje (T-1520) for behandling av luftkvalitet i arealplanlegging (Miljøverndepartementet, 2012). Anbefalingene i retningslinjen skal legges til grunn av kommuner, regionale myndigheter og berørte statlige etater ved planlegging og behandling av overordnede planer og enkeltsaker etter plan- og bygningsloven. De anbefalte grensene er vist i Tabell 10. Gul sone ansees som en vurderingssone, mens i rød sone bør bebyggelse med et følsomt bruksformål unngås. Med følsomt bruksformål menes helseinstitusjoner, barnehager, skoler, boliger, lekeplasser og utendørs idrettsanlegg, samt grønstruktur.

²⁷ Se forurensningsklasser gjengitt på <https://luftkvalitet.miljodirektoratet.no/artikkel/artikler/varslingsklasser/>

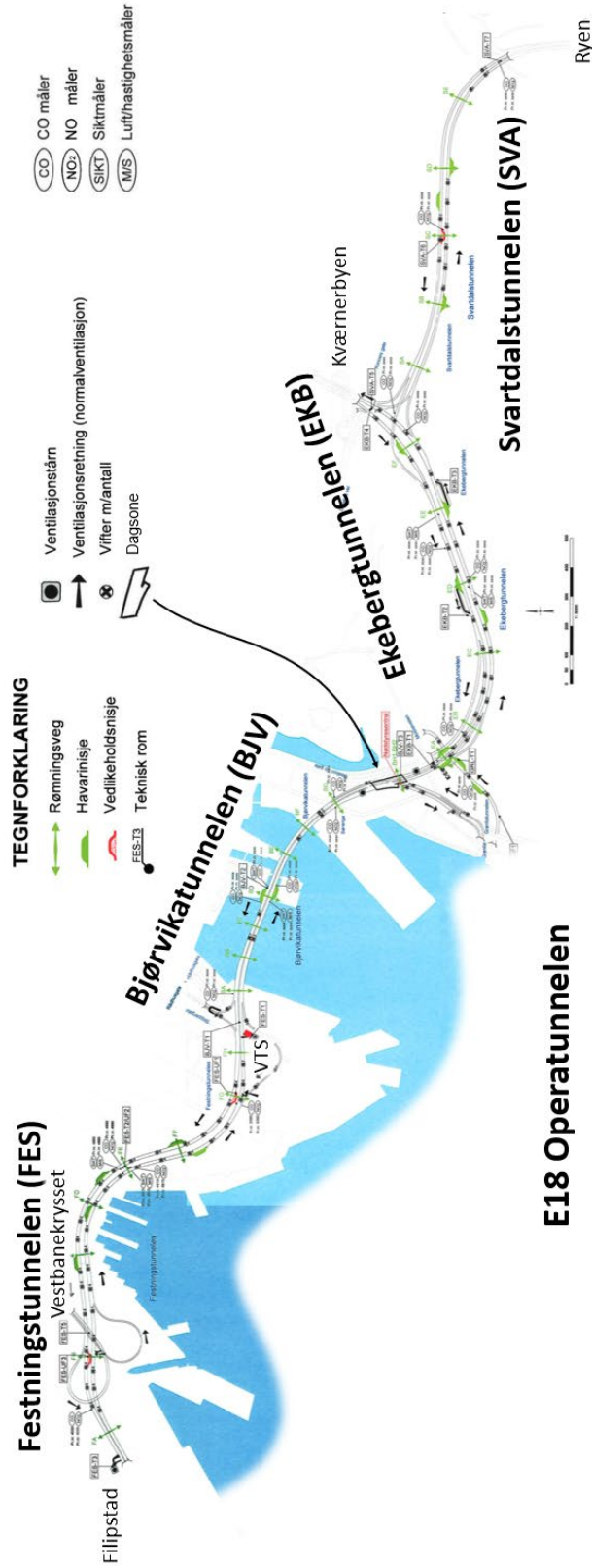
Tabell 10: Anbefalte grenser for luftforurensning og kriterier for soneinndeling ved planlegging av virksomhet eller bebyggelse. Kilde: T-1520.

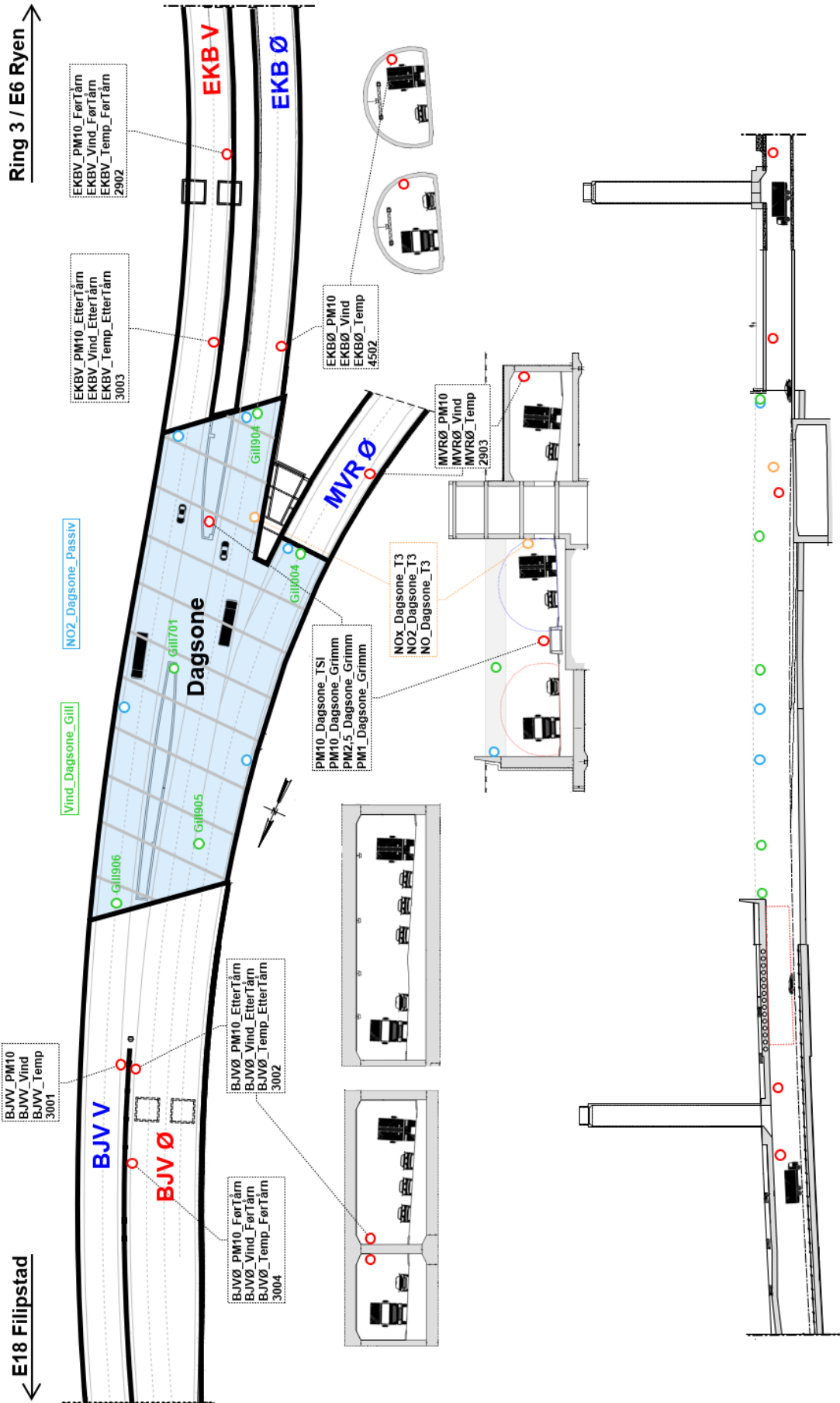
Komponent	Luftforurensningssone*	
	Gul sone	Rød sone
Svevestøv – PM ₁₀	35 µg/m ³ , 7 døgn per år	50 µg/m ³ , 7 døgn per år
Nitrogendioksid – NO ₂	40 µg/m ³ , vintermiddel	40 µg/m ³ , årsmiddel
Helserisiko	Personer med alvorlig luftveis- og hjertekarsykdom har økt risiko for forverring av sykdom. Friske personer vil sannsynligvis ikke ha helseeffekter.	Personer med luftveis- og hjertekar-sykdom har økt risiko for helse-effekter. Bland disse er barn med luftveislidelser og eldre med luftveis- og hjertekarlidelser mest sårbare.

*Bakgrunnskonsentrasjonen er inkludert i sonegrensene.

Vedlegg C

Figurer





NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning

NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning er en uavhengig stiftelse etablert i 1969. NILUs forskning har som formål å øke forståelsen for prosesser og effekter knyttet til klimaendringer, atmosfærens sammensetning, luftkvalitet og miljøgifter. På bakgrunn av forskningen leverer NILU integrerte tjenester og produkter innenfor analyse, overvåkning og rådgivning. NILU er opptatt av å opplyse og gi råd til samfunnet om klimaendringer og forurensning og konsekvensene av dette.

NILUs verdier: Integritet – Kompetanse – Samfunnsnytte

NILUs visjon: Forskning for en ren atmosfære

NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning
Postboks 100, 2027 KJELLER

E-post: nilu@nilu.no

<http://www.nilu.no>

ISBN: 978-82-425-3068-4
ISSN: 2464-3327