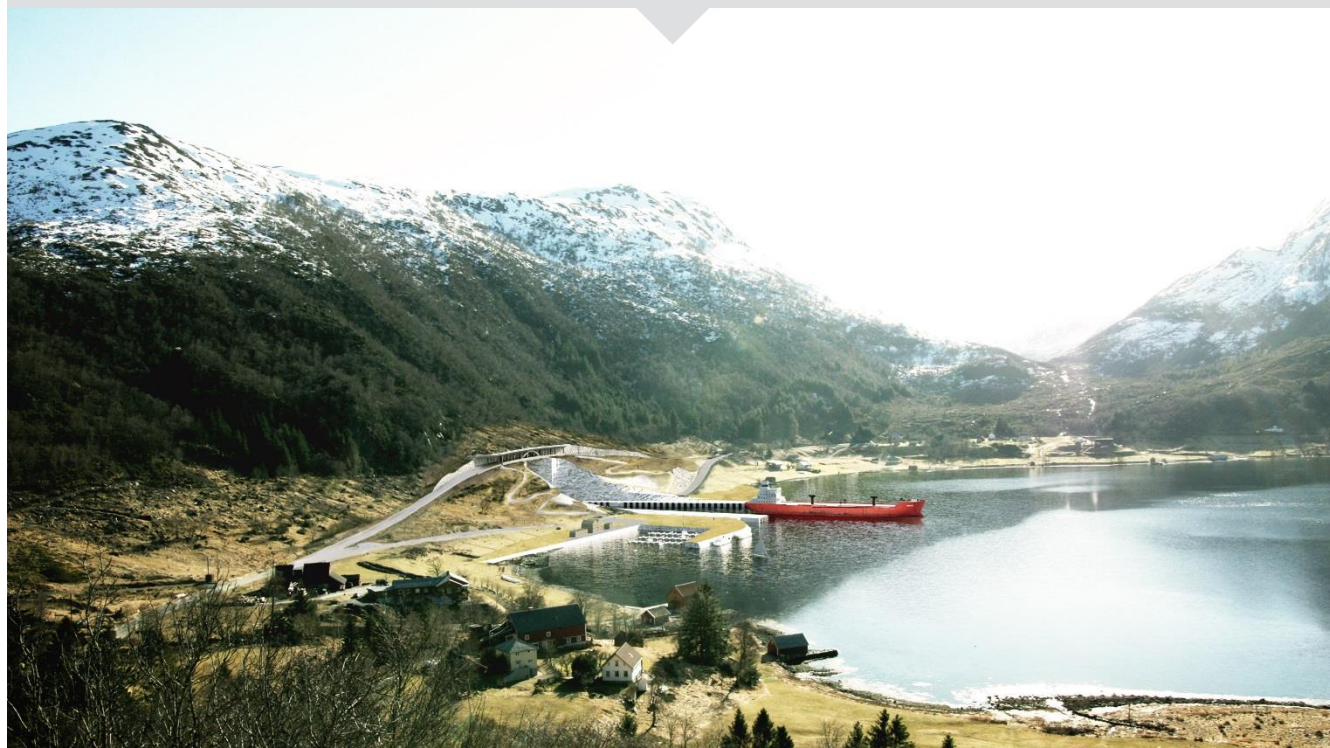




KYSTVERKET

# Stad skipstunnel

Teknisk forprosjekt  
VEDLEGG H - VENTILASJON



Oppdragsnr.: 5161743 Dokumentnr.: 001 H Versjon: J01  
2016-11-23

J01	2016-11-23	For bruk	Bård Venås	Erik Eika	Svend Arntzen
<b>Versjon</b>	<b>Dato</b>	<b>Beskrivelse</b>	<b>Utarbeidet</b>	<b>Fagkontrollert</b>	<b>Godkjent</b>

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult AS som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører Norconsult. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

## Sammendrag

Det er nødvendig å sikre tilstrekkelig ventilasjon i skipstunnelen for å lufte ut avgasser som produseres av skipene mens de passerer gjennom tunnelen. Ventilasjon spiller i tillegg en viktig rolle for hva temperaturen i tunnelen vil være vinterstid og dermed behov for frostsikring. Ved en evt. brann vil ventilasjon ha betydning for hvordan røyk sprer seg. Uttrykket «ventilasjon» her benyttes som en samlebetegnelse for luftbevegelsene gjennom tunnelen, enten de settes opp av ytre meteorologiske drivkrefter («naturlig ventilasjon») eller aktivt ved bruk av vifter («mekanisk ventilasjon») hvis en slik løsning installeres.

For å anslå naturlig ventilasjon i tunnelen, er det blitt etablert målestasjoner for vind, lufttrykk og temperatur ved de to portalområdene. Ut fra tre måneders data ved disse stasjonene er det simulert fordeling av naturlig trekk i tunnelen. Trekken i tunnelen viser seg å være relativt likt fordelt mellom de to tunnelretningene. Vanligst hastighet er ca. 2 m/s i begge retninger. Retningen skifter relativt ofte (typisk varighet med konstant ventilasjonsretning er 1 time til 1 døgn). Det er sjelden ingen ventilasjon i tunnelen – vindstille forhold opptrer i hovedsak i korte perioder idet trekken er i ferd med å snu.

Basert på Statens vegvesens regelverk for vegtunneler er grenseverdi for luftforurensning foreslått å være konsentrasjon på 1500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$ . Ut fra kommunikasjon med Hurtigruten og motordata er utslippsmengde ved passering gjennom tunnelen bestemt. Det er utført CFD-simuleringer av utslippet idet Hurtigruten passerer gjennom tunnelen for noen karakteristiske trekk og temperaturforhold. Det er funnet at det foreslåtte luftforurensningskravet overholdes kun ved den naturlige ventilasjonen.

Som en del av vurderingene i rapporten er det, som input til vedlegg F Risikoanalyse, også gjort en vurdering av nødvendig kapasitet og installasjon for mekanisk røykventilasjon.

# Innhold

<b>1</b>	<b>Bakgrunn</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Utgangspunkt for meteorologiske drivkrefter</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Målestasjoner ved portalene</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Innsamlede måledata</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Naturlig ventilasjon i tunnelen</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Luftforurensning</b>	<b>17</b>
6.1	Grenseverdier	17
6.2	Eksosutslipp fra Hurtigruta	17
6.3	CFD-simulering av luftforurensning ved passering	18
6.4	Utlufting av tunnelen mellom passeringer	21
<b>7</b>	<b>Mekanisk ventilasjon</b>	<b>22</b>
7.1	Innledning	22
7.2	Dimensjonering	22
7.3	Mulig vifteinstallasjon	24
<b>8</b>	<b>Diskusjon av måledata</b>	<b>25</b>
<b>9</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>26</b>

# 1 Bakgrunn

Det er nødvendig å sikre tilstrekkelig ventilasjon i skipstunnelen for å lufte ut avgasser som produseres av skipene mens de passerer gjennom tunnelen. Ventilasjonen spiller i tillegg en viktig rolle for hva temperaturen i tunnelen vil være vinterstid og dermed behov for frostsikring. Ved en evt. brann vil ventilasjon være avgjørende for hvordan røyk sprer seg, og dermed styrende både for rømning og mulighet for slukkeinnsats.

Det gjøres her oppmerksom på at uttrykket «ventilasjon» her benyttes som en samlebetegnelse for luftbevegelsene gjennom tunnelen, enten de settes opp av ytre meteorologiske drivkrefter («naturlig ventilasjon») eller aktivt ved bruk av vifter («mekanisk ventilasjon») hvis en slik løsning installeres.

I grunnlagsdokumentet KS1 Delrapport 2.1 – Brann på Hurtigruten skrives det følgende: «Teoretiske betraktninger sannsynliggjør at vifter vil ha liten eller ingen virkning, og at ventilasjon i skipstunnelen vil måtte baseres på naturlig trekk».

Norconsults vurdering var i utgangspunktet at selv om det evt. var mulig å etablere ventilasjonsanlegg, så ville dette anlegget måtte bli svært omfattende og kostbart. Dette skyldes ikke bare behovet for et stort antall vifter og tilhørende installasjoner, men også vanskeligheter med tilkomst og vedlikehold av systemet.

Utgangspunktet for dette arbeidet var derfor å forsøke å beregne hvor mye, og hvordan, naturlige drivkrefter vil ventilere tunnelen uten mekanisk ventilasjon. Med naturlige drivkrefter menes her i første rekke krefter satt opp av differanse mellom lufttrykk (barometertrykk og vindtrykk) ved de to portalene.

Denne rapporten oppsummerer beregningene som er gjort av hvilken trekk/ vindhastighet som oppstår gjennom tunnelen, samt hvordan disse forholdene påvirker konsentrasjon av avgasser fra skip i tunnelen. Arbeidet danner dessuten inngangsdata for vurdering av frost og røykspredning ved brann, som beskrives i separate delrapporter. Det gjøres i rapporten videre en vurdering av mulighet for installasjon av mekanisk ventilasjon.

I Norconsults tilbud på arbeidet ble det spesifisert at 3D CFD-simuleringer skulle benyttes for å estimere de meteorologiske drivkreftene ved «naturlig ventilasjon» av tunnelen. Etter diskusjoner med oppdragsgiver i oppstartsfasen ble det isteden valgt å sette opp meteorologiske målestasjoner ved de to fremtidige portalene. Dataene fra disse stasjonene har gitt et mye sikrere grunnlag for beregningen av ventilasjonen. Beskrivelsen av disse målestasjonene inngår i det som rapporteres her.

## 2 Utgangspunkt for meteorologiske drivkrefter

Naturlig trekk i skipstunnelen vil i all hovedsak drives av vindkrefter og lufttrykk. Tunnelen er vannrett og oppdriftskrefter forårsaket av varmeavgivelse inne i tunnelen vil ha neglisjerbar effekt på trekken<sup>1</sup>.

Det er svært høy gjennomsnittlig vindhastighet langs kystlinjen ved Stad. Vind påvirkes derimot alltid kraftig av terreng, selv over korte distanser i åpent lende. Slike effektene er enda mer dominerende i bratt fjordlandskap av typen som finnes i det aktuelle området.

Figur 1 illustrerer beliggenheten av tunnelen sammen med de to nærmeste faste meteorologiske målestasjonene. Stasjonen ved Kråkenes fyr ligger 23 km øst for Eide, øverst på en værutsatt klippe og ut mot åpent hav. Målestasjonen i Fiskåbygd, lenger ute i Vanylvsfjorden, ligger 12 km nord-nordøst for Kjøde. Denne stasjonen ligger i et flatt område, men med bratt terreng i umiddelbar nærhet mot nord, samt med noe større avstand, i alle andre retninger.

Topografien medfører at selv om Kråkenes har en middelvind på hele 8,6 m/s, har Fiskå middelvind på kun 2,9 m/s (tilsvarende f.eks. Oslo).

Figur 2 viser vindroser for de to stasjonene, altså statistisk fordeling av hvor stor andel av tiden vinden kommer fra ulike retninger. Ved Kråkenes er fremherskende vindretninger som den typiske kystvinden i området, dvs. det blåser mest langs kysten. Vestavind er ofte kraftig, men forekommer statistisk sett betydelig sjeldnere. Innlandsvind fra øst er både svak og lite hyppig.

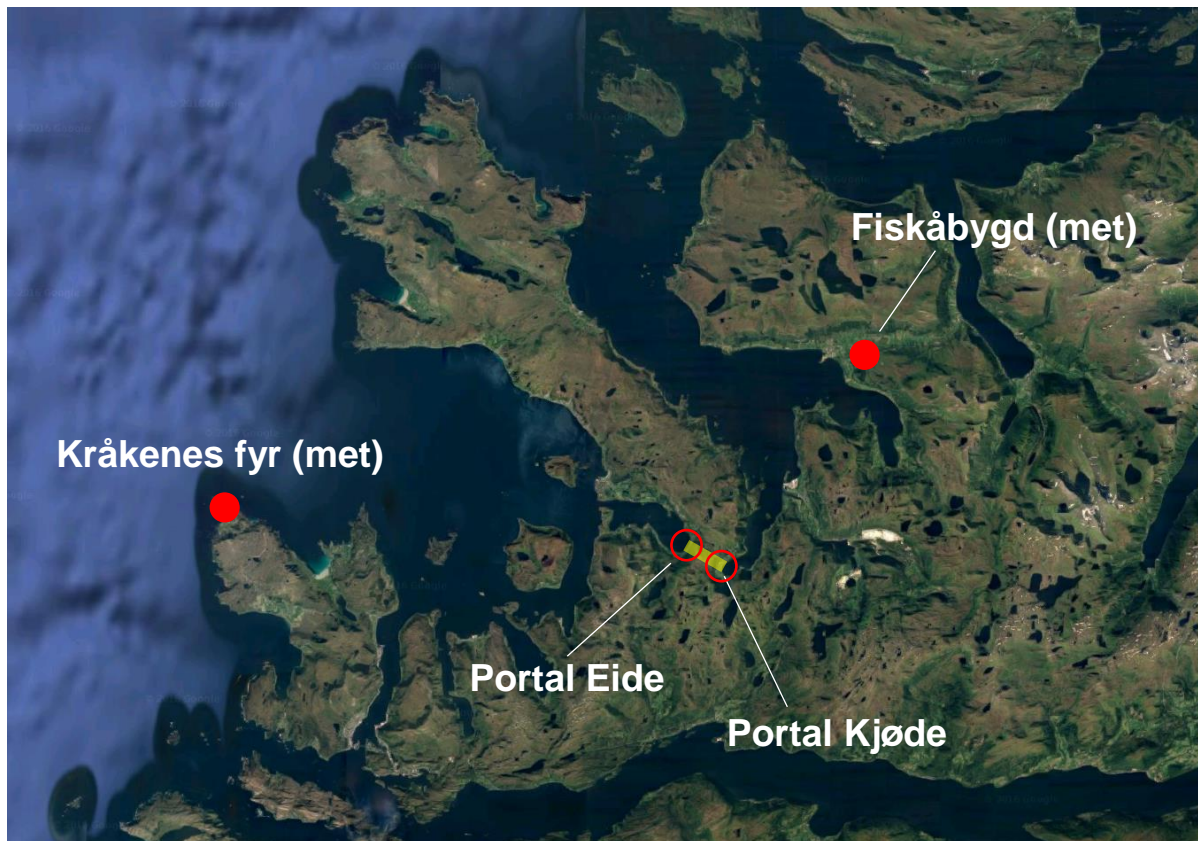
Fiskå ligger på sin side godt skjermet for vinden, spesielt fra nord. Vindrosen illustrerer hvordan vinden her hovedsakelig følger terrengformasjonene i øst-vest retning.

Både portalen på Eide i Moldefjorden og Kjødepollen i Vanylvsfjorden ligger relativt godt skjermet for vind fra mange vindretninger. Det var derfor i utgangspunktet vanskelig å anslå vindforholdene ved portalene basert på de eksisterende meteorologiske stasjonene. Med hensyn til trekk i tunnelen var en ytterligere kompliserende faktor hvordan terrenget via de lokale endringene i vindforholdene påvirker de lokale lufttrykkene.

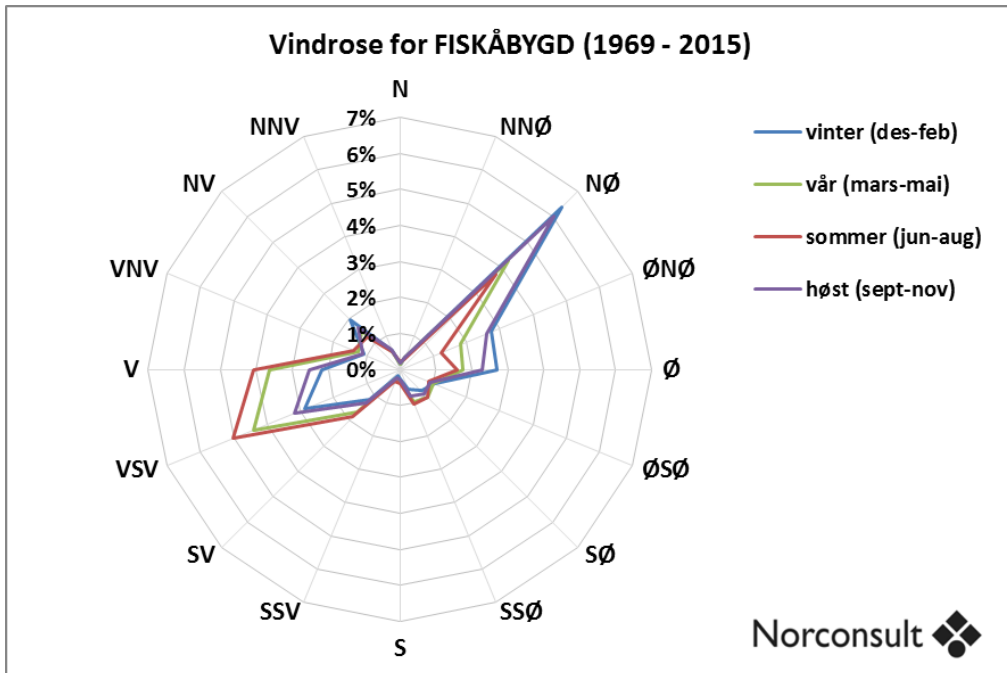
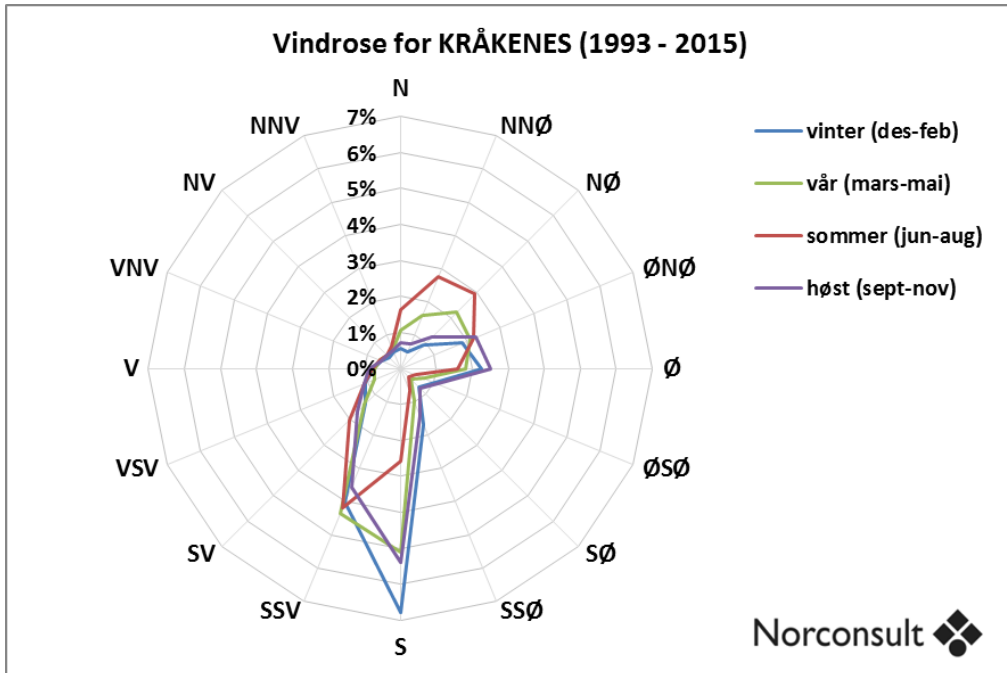
For å få en oversikt over naturlig trekk i tunnelen trengtes informasjon både dynamisk (vindtrykk) og statisk lufttrykk (barometertrykk) ved portalene. Det ble derfor besluttet å sette opp målestasjoner ved de to portalene. Dette arbeidet beskrives i neste kapittel.

---

<sup>1</sup> Slik varmeavgivelse kan komme fra berg, sjø, skip eller installasjoner. Temperaturforskjell mellom de to sidene av tunnelen påvirker lufttrykket, og dermed implisitt trekken via lufttrykket.



Figur 1: Satellittbilde som viser beliggenhet av tunnelen og de nærmeste meteorologiske stasjonene (Google).



Figur 2: Vindroser fra hhv. de meteorologiske stasjonene på Kråkenes og Fiskåbygd.



### 3 Målestasjoner ved portalene

Det er vanskelig å anslå virkningen av terrenget på lokalklimaet og dermed også resulterende naturlig trekk i skipstunnelen. Det ble derfor besluttet å etablere målestasjoner ved de framtidige portalene.

Siden tunnelen og portalene ikke er bygget, vil målingene naturlig nok representere en litt annen situasjon enn den som skal analyseres. Det ble derfor gjort nøye vurderinger av hvordan stasjonene burde etableres for å gi best mulig grunnlag for å beskrive den framtidige geometrien på stedet.

Basert på dette ble det forsøkt å designe stasjonene slik at de både ville bli lite påvirket av dagens lokaltopografi, bygninger og vegetasjon, samt representere typiske forhold for hele portalenes tverrsnitt.

Målestasjonene ble satt opp nær senter av de framtidige portalene og ca. 10 meter inn fra vannlinjen. Dette var så nær vannet som praktiske forhold, som tilgjengelighet og bardunering, tillot. Mastenes høyde ble valgt for å nå opp omtrent til senter av den 33 meter høye tunnelen. Det ble vurdert at en slik plassering ville gi de mest representative vindforholdene for å vurdere framtidige portaler som vil ligge et stykke inn i terrenget. Alternative plassering av vindmålere lengere oppe i terrenget, med lavere mast, ville blitt påvirket mer av lokal topografi som vil endres ved bygging av portalene.

Figur 3 viser masten på Eide sett fra avstand. En kan her legge merke til at det er trær med høyde opp til ca. 10 meter rundt masten. Vindmasten stikker tilstrekkelig over trærne til å måle representativ vind også når trærne blir fjernet.

Avtale om etablering av stasjonene ble inngått med Scanmatic AS tidlig i juni, og de var operative en uke ut i juli. Scanmatic designet og satt sammen måleutstyret, mens deres underleverandør Oppland elektro AS sto for reising av mastene på stedet.

Målestasjonene er bygget rundt en 18 meter høy bardunert Telenor ST-B mast, og er vist i figur 4 og figur 5. Mastene har (sett ovenfra og nedover) ultralyd vindsensor i toppen, solcellepanel, temperatursensor, samt tekniske skap med trykksensor, innsamlings- og kommunikasjonsenhet, og batteripakke<sup>2</sup>. Målestasjonene kommuniserer via mobilnettet direkte mot en server hos Norconsult i Sandvika.

Norconsult sto for valg av måleutstyr, byggesøknad og oppfølging på byggested. I byggesøknaden er det tatt høyde for at mastene kan stå i 3 til 5 år. Selv om forprosjektet har betydelig kortere varighet enn dette vil mastene kunne gi nyttig og utfyllende informasjon i lang tid, helt fram mot byggestart.

Det vil være en stor fordel å følge opp målingene framover for å få sikrere meteorologisk statistikk, både ved at en får data fra alle årstider, samt bedre statistisk signifikans ved å ha en lengre periode med data (forprosjektet har data fra juli til oktober).

---

<sup>2</sup> Bildene er tatt under bygging og før «klatresikring» (platekledning) ble festet på den nedre del av masten.



Figur 3: Plassering av målestasjon med vindmast på Eide.



Figur 4: Målestasjon på Eide i Moldefjorden.



Figur 5: Målestasjon på Kjøde i Vanylvsfjorden.

## 4 Innsamlede måledata

Målestasjonene samler inn data for vindstyrke, vindretning, barometertrykk og lufttemperatur. Disse størrelsene midles i utgangspunktet i 1-minutts intervaller<sup>3</sup>. I tillegg beregnes standardavvik innenfor disse intervallene.

Det ble valgt å samle data med kortere intervaller enn standard 10-minutters perioder som benyttes i vanlige meteorologiske målinger. Årsaken til dette var at det ble forventet at vinden ville være svært turbulent og variere mye over tid. En kortere midlingsperiode får dermed med seg mer informasjon om slike variasjoner, samtidig som 10-minuttersmidler uansett kunne kalkuleres ved databehandling i ettertid.

Denne rapporten er basert på måledata fra oppstart den 8. juli fram til og med 14. oktober. Det mangler, av noen tekniske innkjøringsårsaker, data for noen dager i denne perioden. Totalt sett er det benyttet rundt tre måneder data i analysene.

Figur 6 viser innsamlede data fra stasjonene. Dataene som presenteres her er presentert på samme måte som standard meteorologiske målinger, dvs. 10-minutters middelværdi ved enden av hver hele time. Ovenfra og nedover vises hhv. vindstyrke, lufttrykk, differanse mellom lufttrykkene på Eide og Kjøde, samt temperatur.

Det er målt relativt lave vindhastigheter på de to stasjonene. Vinden på Eide har middelhastighet 1,4 m/s og maksimal hastighet 11,4 m/s. På Kjøde viser dataene middelhastighet på 1,9 m/s og makshastighet på 14,5 m/s. Som vist i diskusjonen i kapittel 8 er dette betydelig lavere vindhastighet enn det som er målt simultant på fyrstasjonene på Kråkenes.

Den nest øverste delen av figur 6 viser at de store meteorologiske endringen i lufttrykk skjer forholdsvis simultant ved de to tunnelportalene. Disse endringene representerer passerende værsystemer og variasjonene skjer typisk i løpet av dager. Legg for øvrig merke til at trykket er vist i Pascal og relativt én standard atmosfære<sup>4</sup>.

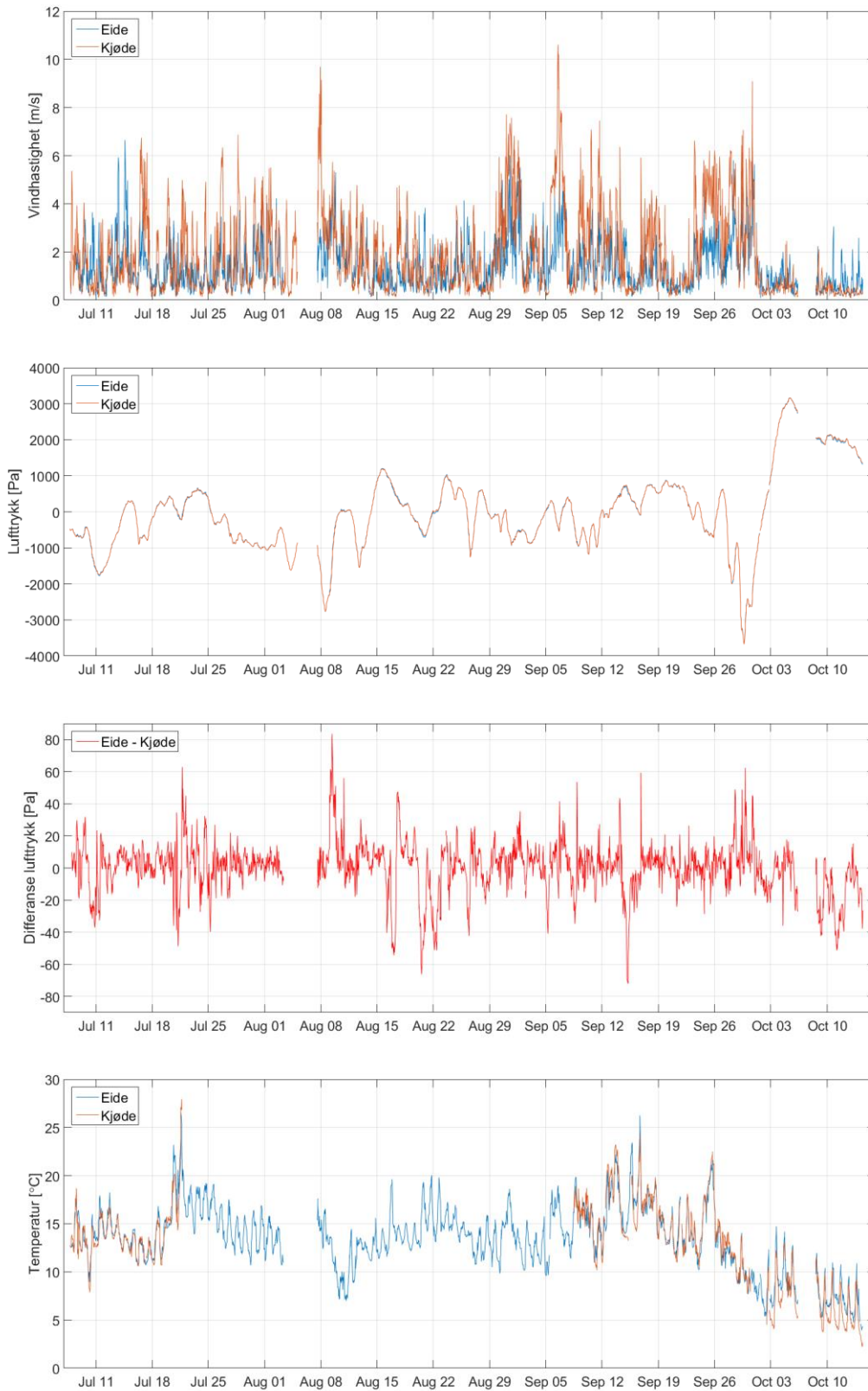
Den tredje delfiguren viser trykkdifferansen mellom de to portalene. Denne differansen vil, sammen med vindtrykket, drive den naturlige trekken gjennom tunnelen. En ser at det stort sett hele tiden er en viss trykkforskjell mellom de to portalene. Som neste kapittel viser er lufttrykk og vind nok til å drive luft gjennom tunnelen med en betydelig hastighet det meste av tiden, men med varierende trekkretning og hastighet.

Den nederste figuren viser lufttemperaturen på Eide og Kjøde. Her kan en først legge merke til at temperatursensoren på Kjøde gikk i stykker etter et par ukers drift, og at det tok noe tid å få installert en ny sensor.

En ser at de to stedene har relativt lik temperatur både i juli og september (datagrunnlag mangler for august). I oktober falt temperaturen og målingene kan tyde på at Kjøde blir kaldere enn Eide, spesielt nattetid. Med hensyn til frost og frostsikring tiltak i tunnelen er det ønskelig å se hvordan disse temperaturene varierer for de kaldeste vintermånedene. Dette diskuteres nærmere i kapittel 8 og i vedlegg I Vurdering av frost.

<sup>3</sup> 1 minutt var minste tilgjengelige midlingstid i målingene. Det er i tillegg mulig å ta ut øyeblikkverdier (1 logging), men oppsett av dette i systemet har ikke vært prioritert foreløpig.

<sup>4</sup> Standard atmosfære: 1 atm = 101325 Pa = 101,325 hPa = 760 mm Hg (kvikksølv).



Figur 6: Måledata fra stasjonene på Eide og Kjøde i perioden 8. juli til 14. oktober. Ovenfra og nedover: vindstyrke, luftrykk (relativt 1 standard atmosfære), differanse mellom luftrykk ved portalene, og lufttemperatur.

## 5 Naturlig ventilasjon i tunnelen

Med hensyn til ventilasjon er skipstunnelen svært forskjellig fra lange veg- og jernbanetunneler. Tunnelens tverrsnitt er så stort at ventilasjonen i mange henseender vil oppføre seg som i en typisk vegtunnel med lengde mellom 300 og 500 meter. Meteorologiske forhold vil ha svært stor innflytelse på trekken i tunnelen.

Luftbevegelsen i tunnelen er simulert ut fra måledataene ved å benytte programmet «IDA tunnel» fra EQUA (<http://www.equa.se/en/tunnel/ida-tunnel/overview>). I programmet er tunnelen lagt inn med data for tverrsnittsareal, lengde og aerodynamisk effektivitet for vegger/vannflate. Tidsserier fra målestasjonene er lagt inn som ytre grensebetingelser for vind, lufttrykk og temperatur ved tunnelportalene.

Figur 7 viser beregnet ventilasjonshastighet i tunnelen. Den øverste delen av viser beregningen for hele den tilgjengelige måleperioden. Den midterste delen av viser beregningene for én typisk uke, mens den nederste figuren viser et histogram (sannsynlighetsfordeling) med statistisk fordeling av trekk. Positiv hastighet er her definert fra Eide mot Kjøde, negative hastigheter har motsatt retning.

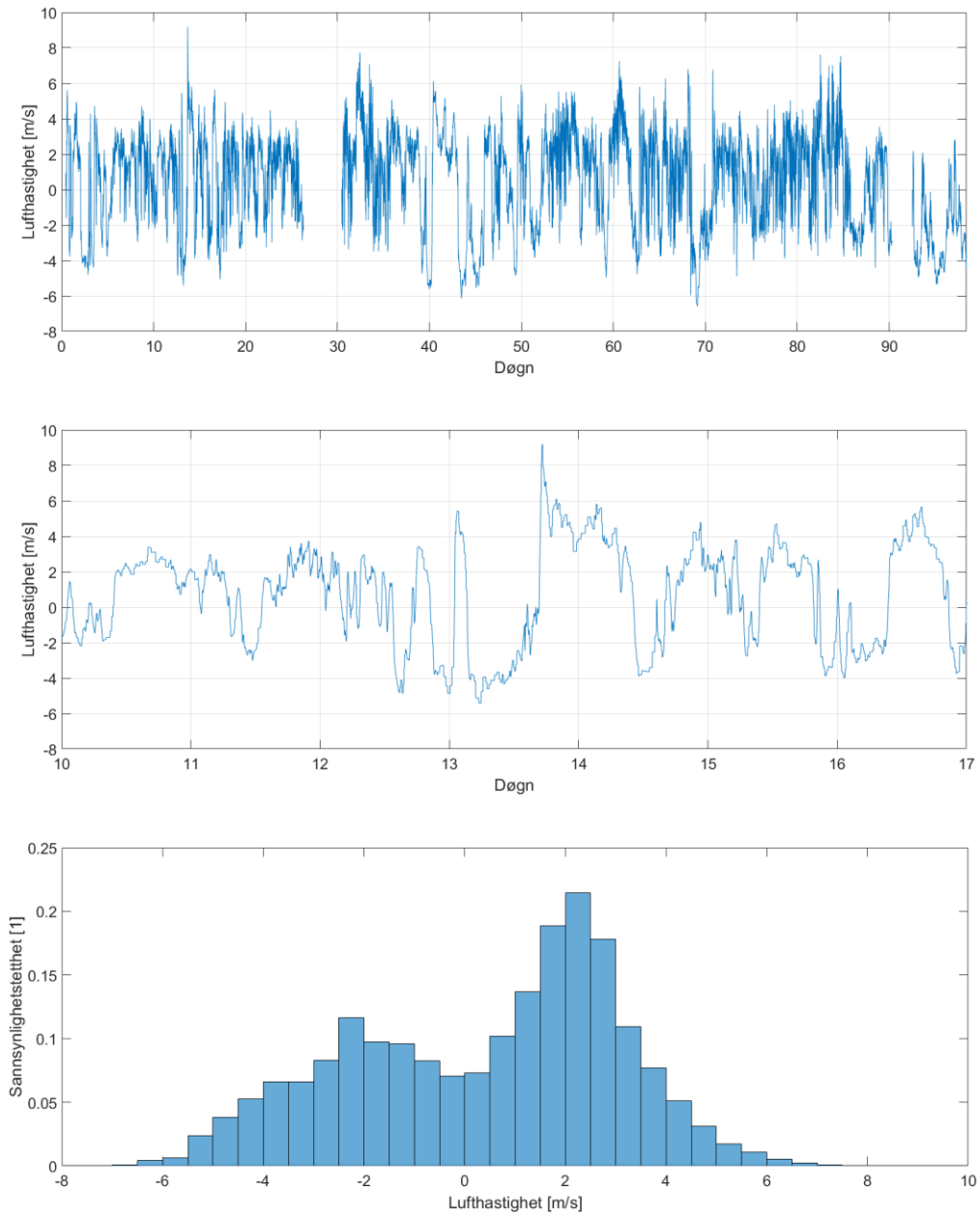
Forhold en kan legge merke til er at hastigheten sjelden er stabil rundt null. Tunnelen vil derfor stort sett alltid ha ventilasjon. Unntakene forekommer i hovedsak i korte perioder når trekken snur. Sannsynlighetsfordelingen har to toppe, hhv. ved ca. -2 m/s og +2 m/s. Den hyppigste hastigheten er altså 2 m/s fra Eide mot Kjøde, eller i motsatt retning, fra Kjøde mot Eide.

Hvor ofte trekken skifter retning er svært varierende, men kan overslagsmessig sies å ligge innenfor et spenn på fra typisk 1 time til 1 døgn. Det er dermed relativt sannsynlig at trekken er forholdsvis konstant i løpet av en vanlig passering gjennom tunnelen (10 til 20 minutter ved 3 til 5 knop hastighet).

Ved en brann eller annen hendelse som tar lenger tid, fra én til flere timer, er det derimot relativt sannsynlig at vinden vil kunne snu i løpet av hendelsen.

Relativt ofte er trekkhastigheter opp mot 5 - 6 m/s. De maksimale verdiene ut fra de tre månedene med tilgjengelige data er på 8 - 9 m/s.

Det kan bemerkes at den midterste delen figur 7 viser en svært rask og kraftig endring av trekkhastighet på dag 13. Hastigheten stiger her fra omtrent vindstille til 9 m/s i løpet av en halvtime. Ved å sammenlikne med de meteorologiske stasjonene i området i samme periode, ser en at kraftig vind snur ca. 180° i akkurat samme periode. Dette viser hvordan et raskt værskifte kan forandre trekken i tunnelen svært raskt.



Figur 7: Beregnet ventilasjonshastighet i tunnelen (positiv hastighet er fra Eide mot Kjøde). Øverst: basert på data fra hele perioden. Midten: data fra én uke. Nederst: histogram som viser fordeling av ventilasjonshastigheter.



## 6 Luftforurensning

### 6.1 Grenseverdier

Utslipp fra et skip som passerer gjennom tunnelen er vurdert med hensyn på utslipp av NO<sub>2</sub>. Tabell 1 oppsummerer grenseverdier for NO<sub>2</sub> som benyttes i vegtunneler og for arbeidsmiljø.

Tabell 1: Grenseverdier for NO<sub>2</sub> i Håndbok N500 og Forskrift om tiltaks og grenseverdier.

Kilde	Grenseverdi
Statens Vegvesen håndbok N500 Vegtunneler	2750 µg/m <sup>3</sup>
Forskrift om tiltaks- og grenseverdier	1100 µg/m <sup>3</sup>

I håndbok N500 er grenseverdien maksimalt tillatte konsentrasjon i tunnelen. Dette oppstår normalt i en ende av tunnelen, slik at gjennomsnittskonsentrasjonen en bilist blir utsatt for ved passering er lavere (i størrelsesorden halvparten). Forskrift for tiltaks- og grenseverdier, angir grenseverdi for NO<sub>2</sub> som høyeste akseptable gjennomsnittskonsentrasjon over et åttetimers skift. Det vil si at det tillates overskridelser, så lenge gjennomsnittskonsentrasjonen er under grenseverdien. For NO<sub>2</sub> angir veiledningen til forskriften at det kan aksepteres en overskridelse på 200 % av grenseverdien i en periode på 15 minutter.

Håndbok N500 angir at sikkerhetstiltak for tunneler over 10 km skal vurderes spesielt. Det er derfor her lagt til grunn at grenseverdien angitt i håndbok N500 gjelder for tunneler inntil 10 km. Det vil si en oppholdstid i tunnelen på 10 minutter ved 60 km/t. Ved 3 knops hastighet under passering i stadstunnelen vil oppholdstiden i tunnelen være på 18 min. En maksimalt tillatt konsentrasjon på 1500 µg/m<sup>3</sup> vil gi tilnærmet samme gjennomsnittsbetlastning, som en 10 km tunnel i 60 km/t med grenseverdi som angitt i N500.

Forskrift om tiltaks og grenseverdier angir krav til arbeidsatmosfæren. Det skal tilstrebes at arbeidsatmosfæren er bedre enn minimumskravet. Det er naturlig at ligge godt under dette kravet for en tunnel som også sårbare grupper vil benytte. En grenseverdi på 1500 µg/m<sup>3</sup> vil gi en gjennomsnittsbetlastning under passering på om lag 750 µg/m<sup>3</sup>. En passasjer på hurtigruta antas å utsettes for lave konsentrasjon av NO<sub>2</sub> før og etter passering av tunnelen. Dersom det midles over en lengre periode en selve passeringen, antas det derfor at gjennomsnittlig betlastning vil være vesentlig lavere enn dette. 1500 µg/m<sup>3</sup> synes derfor å være en rimelig grenseverdi for maksimal konsentrasjon av NO<sub>2</sub> og anbefales benyttet.

### 6.2 Eksosutslipp fra Hurtigruta

Tunnelen skal dimensjoneres for passering av hurtigruta. Det er antatt at disse skipene vil bidra med de største enkeltutslippene av eksos inne i tunnelen, og at passering av disse dermed er dimensjonerende for luftforurensning.

Datagrunnlag for hvordan motorene vil driftes ved passering gjennom Stadstunnelen er basert på en telefonsamtale med teknisk direktør i Hurtigruta, Frode Hernar. Det ble her anslått at motorene i ett hurtigruteskip som går gjennom tunnelen i 3 - 5 knop vil være 20 % av maks effekt. Denne verdien er gyldig uavhengig av motorstørrelse. 20 % dekker her både fremdrift og strøm til skipets systemer<sup>5</sup>. For Midnatsol er det dermed lagt til grunn en motoreffekt på 1680 kW ved passering.

<sup>5</sup> Diesellaggregatene om bord i hurtigruteskipene blir ikke benyttet når hovedmotorene er i drift, da hovedmotorene har også aggregat som blir benyttet for produksjon av strøm.

De eldste hurtigrutene tilfredsstillende utslippsklasse TIER I (Kong Harald til og med Nordnorge). De nyere båtene (inkl. Midnatsol) tilfredsstillende TIER II. Det foregår en gradvis oppgradering av eldre båter for å tilfredsstillende TIER II.

Ut fra «Wärtsilä 32 Product Guide» er det gjort et anslag på at det slippes ut 6 kg/s eksos når de to motorene (Wärtsilä 9L32) går på 20 % last. Dette er basert på en vurdering ut fra tabellene som kun går til 50 % last. Temperaturen på avgassene idet de forlater skorsteinen er på samme måte anslått til 300 °C.

Det er lagt til grunn et NO<sub>x</sub> utslipp på 12,1 g/kWh, tilsvarende krav til motor med utslippsklasse TIER I og turtall 720 rpm, med en NO<sub>2</sub>-andel på 5 %.

### 6.3 CFD-simulering av luftforurensning ved passering

For å forstå spredningen av eksos i tunnelen er det utført 3D CFD simuleringer med en modell hvor hurtigruten passerer gjennom tunnelen i 3 knops hastighet mens det kontinuerlig slippes ut eksos fra skorsteinen. Dette er samme CFD-modell som er benyttet i brannsimuleringene, men utført med såkalt «bevegelig mesh» for å representere skipets forflytning. I tillegg til figurene og tallene som diskuteres her kan simuleringene også presenteres i animasjoner.

Det er utført tre simuleringer:

- 1) Uten trekk i tunnelen (med lik lufttemperatur utenfor tunnelen og overflatetemperatur på tunnelvegg og vannflate).
- 2) Med trekk i tunnelen tilsvarende skipets hastighet (lik lufttemperatur utenfor tunnelen og overflatetemperatur på tunnelvegg og vannflate).
- 3) Med trekk i tunnelen tilsvarende skipets bevegelse (10 °C høyere lufttemperatur utenfor tunnelen enn overflatetemperatur på tunnelvegg og vannflate).

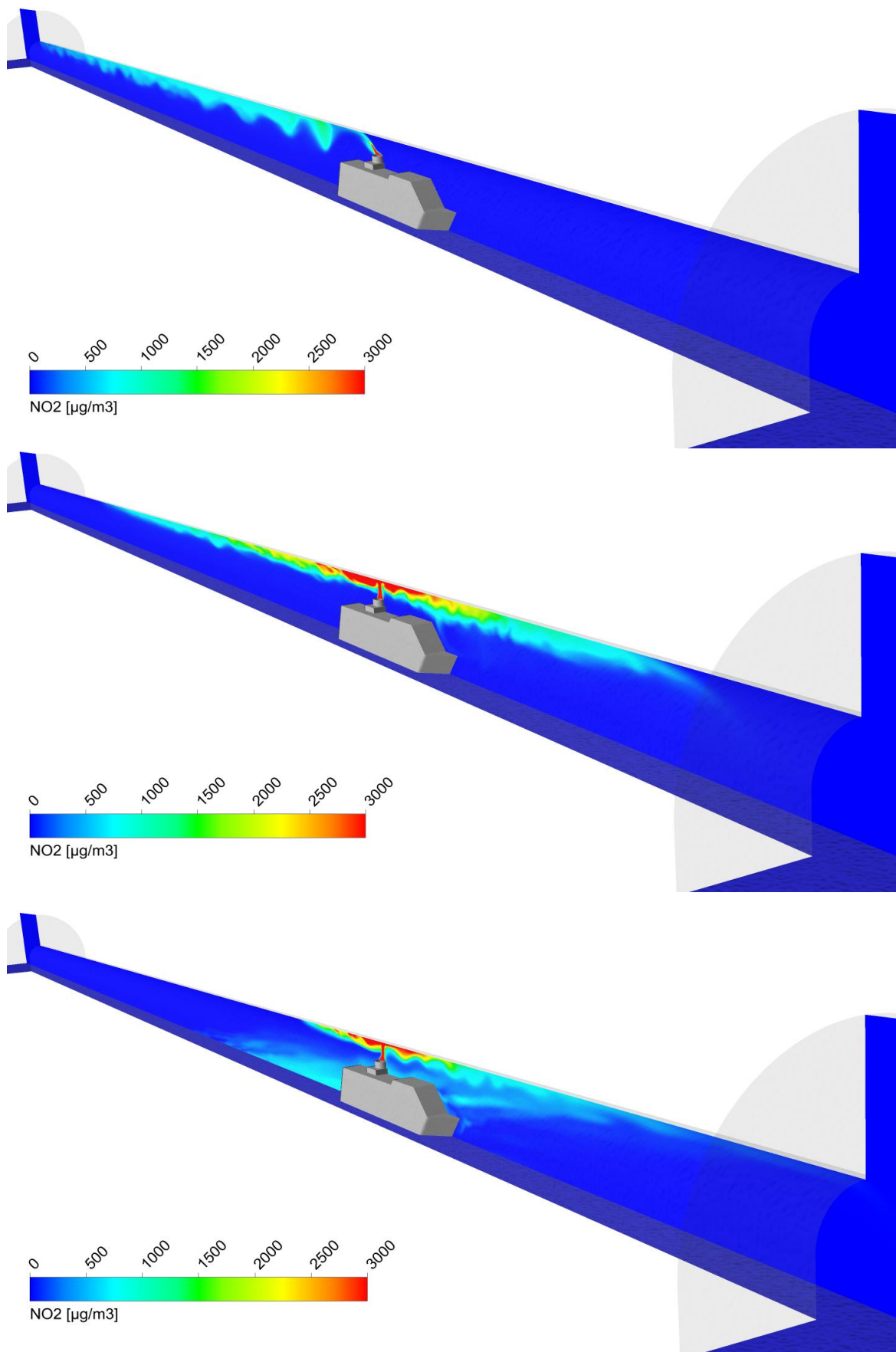
De tre simuleringene er vist i figur 8. Den øverste figuren viser simulering 1 som representerer en situasjon hvor det er veldig lav ventilasjon i tunnelen. Konsentrasjonene av NO<sub>2</sub> er vist når skipet er ca. 300 meter fra enden av tunnelen. En ser at røyken ligger igjen under taket bak skipet og ikke påvirker luftkvalitet på dekk eller ved skipets luftinntak. Oppdriften gjør at den tykkeste røyken blir liggende under hengen. Denne situasjonen vil også være kvalitativt beskrivende for situasjoner med «motvind», altså rundt 50 % av passeringene.

Den midterste delen av figur 8 viser simulering 2. Trekken i tunnelen har her samme hastighet og retning som skipet. Konsentrasjonene av NO<sub>2</sub> er vist i samme posisjon som for simulering 1. En ser at eksosen danner et røyksjikt over skipet.

Dette skyldes at varm røyk føres rett opp i tunnelhengen og bøyes av både framover og bakover. Eksosen gis dermed hastighet relativt skipets bevegelse. Oppdriften i røyken gjør at den blir liggende som en «pute» under hengen hvor trekken øker på undersiden, istedenfor å dytte det videre i fartsretningen.

Røyksjiktet er relativt tynt og NO<sub>2</sub>-konsentrasjonene ved dekk og luftinntak ligger langt under grenseverdien.

Denne situasjon kan endres i negativ retning hvis luften utenfor tunnelen er betydelig varmere enn tunnelveggene. Dette fordi en slik situasjon skaper nedadgående luftbevegelser langs veggene i tunnelen. En ekstrem situasjon hvor uteluften er 10 °C varmere enn tunnelveggene er undersøkt i simulering 3. En slik situasjon kan opptre hvis et værskifte medfører rask stigning i lufttemperaturen.

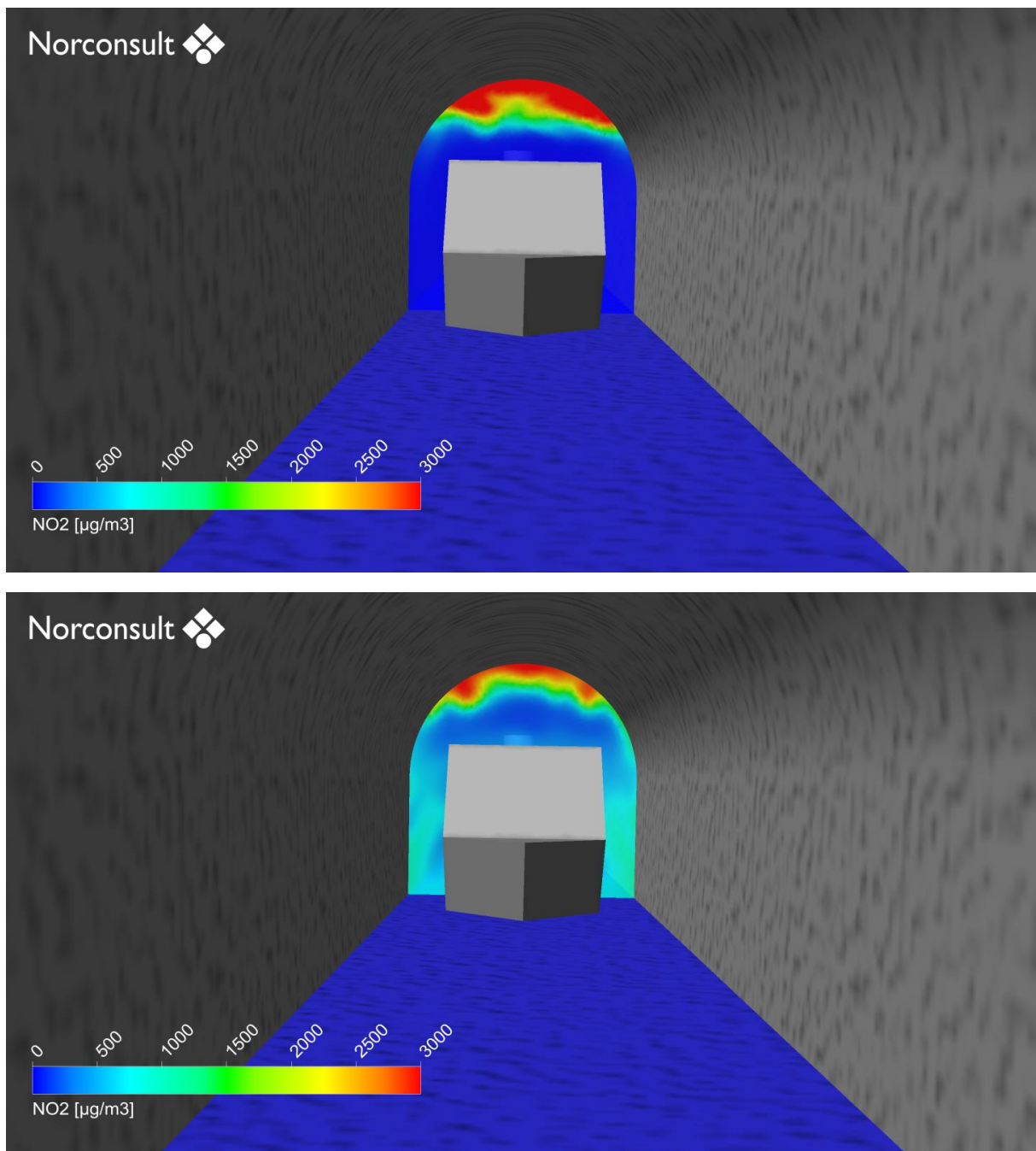


Figur 8: CFD-simuleringer av NO<sub>2</sub>-konsentrasjon. Ovenfra og nedover simulering 1 til 3.

Den nederste delen av figur 8 viser denne simuleringen. En ser her at en del eksos er trukket nedover av strømmingen i tunnelen. NO<sub>2</sub>-konsentrasjonene er allikevel et godt stykke under grenseverdien.

Figur 9 viser konsentrasjonen i et snitt gjennom skipet for simulering 2 og 3. En ser øverst at røyksjiktet er tydelig også normalt på skipsaksen for situasjonen når luft og tunnel har samme temperatur (sjikningen vil for øvrig være enda kraftigere hvis uteluften er kaldere enn tunnelveggen).

Den nederste delen av figuren viser konsentrasjoner for simulering 3 hvor eksos som trekkes ned fører til lokale NO<sub>2</sub>-konsentrasjoner rundt skipet på ca. 1000 µg/m<sup>3</sup>. Verdiene er altså også her under grenseverdien.



Figur 9: Snitt som viser konsentrasjon av NO<sub>2</sub> for simulering 2 (øverst) og simulering 3 (nederst).

## 6.4 Utlufting av tunnelen mellom passeringer

I IDA-simuleringene som er utført basert på måledata fra Eide og Kjøde er det kalkulert «gjennomsnittlig alder» på luften i tunnelen. Denne verdien er et mål på hvor lang tid det tar fra luften kommer inn i tunnelen, til den forlater tunnelen.

Den høyeste verdien for gjennomsnittlig alder er i tidsperioden med målinger registret til 2,1 timer. Det vil si at den lengste simulerte utluftingstiden av tunnelen. Gjennomsnittlig alder på luften er 9 minutter. Det vil si at tunnelen i snitt luftes helt gjennom i løpet av 18 minutter. Ut i fra disse verdiene og den begrensede konsentrasjonsoppbyggingen ved passering av hurtigruten gjennom tunnelen vil forurensning svært sjelden kunne akkumuleres i tunnelen. Innenfor den perioden som er undersøkt vil ikke forurensning kunne akkumuleres lengre enn i størrelsesorden 2 timer i tunnelen.

## 7 Mekanisk ventilasjon

### 7.1 Innledning

Som en del av vurderingene som gjøres i vedlegg F Risikoanalyse, gjøres det her en vurdering av hvordan mekanisk ventilasjon kan være i denne tunnelen. Det påpekes at dette ikke er en vurdering av behov for mekanisk ventilasjon, kun en vurdering av hva en slik installasjon vil kunne bestå av.

Det er normalt to hovedgrunner til å installere mekanisk ventilasjon i tunneler. Dette er hhv. for å ventilere ut luftforurensning ved normal drift eller for å kontrollere røykspredning ved brann. CFD-simuleringene i forrige kapittel viser at det ikke er behov for ventilasjon med hensyn til luftforurensning.

CFD brannsimuleringer (vedlegg G) viser behov for en trykkforskjell mellom portalene på 30 Pa for å kontrollere røyk fra en 100 MW brann (dimensjonerende hendelse for hurtigruten Midnatsol). Med uttrykket «kontrollere» menes her at all røyk trekker mot én av portalene, slik at den andre retningen er tilgjengelig for evakuering og innsats. Naturlig ventilasjon tilfredsstiller ikke dette kravet, da en sjelden får 30 Pa trykkdifferanse mellom portalene, og trekkretningen også kan snu i løpet av en brann. Dette diskuteres nærmere i neste underkapittel.

Et tiltak for å oppnå en gitt trekkretning er installasjon av mekanisk ventilasjon. Kun vanlig langsgående ventilasjon med impulsventilatorer er vurdert videre i kapittelet. Et alternativ kunne ha vært avtrekksventilasjon via sjakter. Men siden en brann kan være plassert hvor som helst i tunnelen, vil dette ikke bare kreve store (~100 m<sup>2</sup> sjakter), men flere sjakter, eller en separat langsgående ventilasjonstunnel. Dette siden en er nødt til å trekke av røyksjiktet før røyken kjøles ned og trekkes ned i rømningsvegen, uavhengig av hvor brannen befinner seg. Avtrekksventilasjon ble derfor vurdert som en lite realistisk løsning.

### 7.2 Dimensjonering

Figur 10 viser statistisk variasjon av naturlig forekommende trykkforskjell i tunnelen, altså differanse mellom lufttrykket ved de to portalene. En ser her at kun 10 % av tiden er det store nok trykkrefter (større enn +30 Pa eller mindre enn -30 Pa) til å kontrollere en dimensjonerende brann uten mekanisk ventilasjon.

En ytterligere kompliserende faktor ved de naturlige drivkreftene er at denne ventilasjonen vil være variabel og kan endre seg betydelig i løpet av en brannhendelse. I verste fall kan trekkretningen snu og drive røyk tilbake til «sikker side» av brannen.

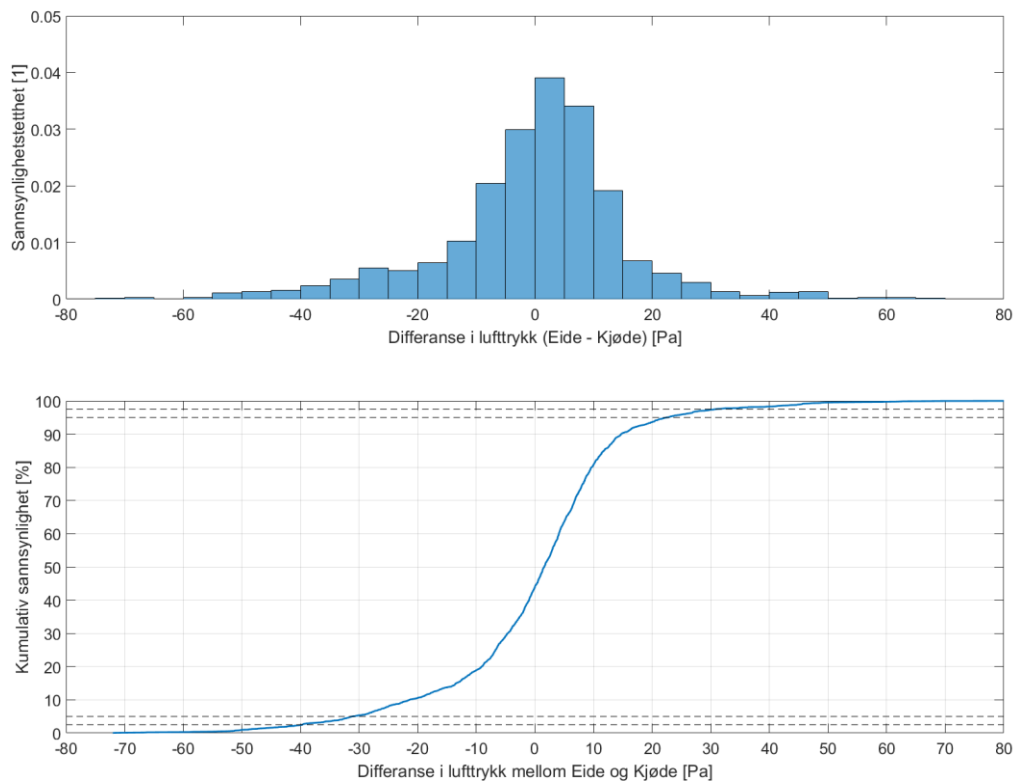
En vifteinstallasjon må altså være kraftig nok til å motvirke ytre trykkrefter i tillegg til å kontrollere brannen.

Ved dimensjonering er det gjort følgende vurderinger:

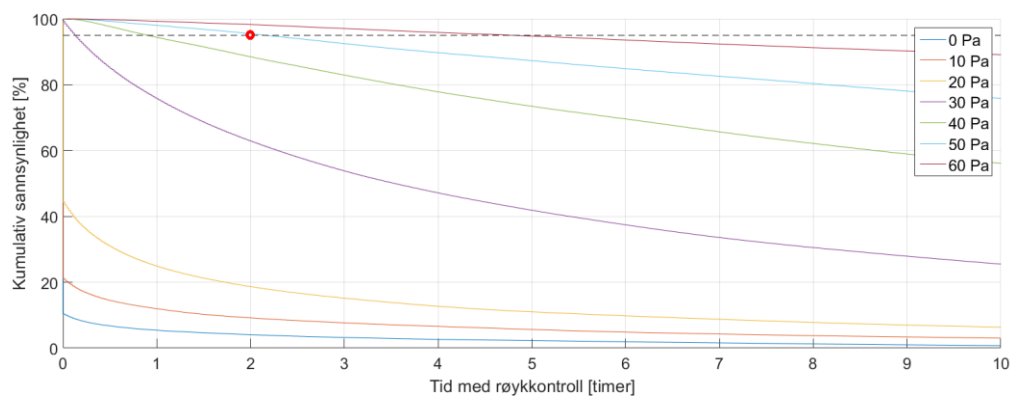
- Viftene er reverserbare og starter opp i samme retningen som den naturlige trekken ved oppstartstidspunktet.
- Viftenes skyvkraft dimensjoneres for med 95 % sannsynlighet å kunne opprettholde 30 Pa trykkoppbygning i ventilasjonsretningen, mot ytre meteorologiske trykkrefter, i en periode på to timer.

Figur 11 viser kurver fra beregninger av hvor sannsynlig det er å opprettholde slik røykkontroll som funksjon av varighet. De enkelte kurvene viser resultater med ulike vifteinstallasjoner som trykkoppbygging i Pascal.

Kriteriet over (2 timer og 95 % sannsynlighet) er oppfylt ved å installere vifter som kan gi 50 Pa trykkoppbygging. Dette punktet er markert med en rød sirkel i figur 11.



Figur 10: Statistisk variasjon i trykkforskjell mellom portaler (uten mekanisk ventilasjon). Øverst: sannsynlighetsfordeling. Nederst: kumulativ sannsynlighetsfordeling.



Figur 11: Beregnet sannsynlighet for røykkontroll som funksjon av varighet. Kurvene representerer installasjoner med ulik kapasitet for trykkoppbygging.

### 7.3 Mulig vifteinstallasjon

De er gjort en vurdering av løsning for mekanisk langsgående ventilasjon av tunnelen ved bruk av impulsventilatorer. Vurderingen er gjort for å undersøke omfang av en installasjon som kan bygge opp det ønskede trykket på 50 Pa for å kontrollere ventilasjonsretningen innenfor et intervall på to timer.

Tilgjengelig plass for impulsvifter er over gangbanen utenfor fritromsprofilen for hurtigruten. Tilgjengelig bredde her er 4750 mm (se tegning K131). Det er god høyde over gangbanen, slik at det er mulig å plassere vifter uten å komme i konflikt med evakuerende.

På grunn av tunnelens store tverrsnitt bør det være en avstand på 200 m mellom hver vifteposisjon. Dette for å sikre at det etableres et jevnt strømningsprofil i tverrsnittet mellom viftene. Vurderingen er basert på nødvendig avstand mellom vifter i veitunneler, skalert med hensyn på tunneltversnittets størrelse.

To mulige viftediametere er vurdert. Dette er hhv. en vifte med innvendig diameter på 1600 mm, som er største standard viftedimensjon for impulsvifter i vegtunneler, og en vifte med innvendig diameter 2700 mm. Den sistnevnte viften vil kreve spesialproduksjon. Det er ikke funnet eksempler på bruk av impulsvifter av denne størrelsen. Anslått nødvendig antall vifter og posisjoner i tunnelen med vifter er oppsummert i Tabell 2.

Tabell 2: Viftebehov ved bruk av ulike vurderte produkter.

Viftediameter [mm]	Antall vifter [stk]	Antall posisjoner [stk]
1600	48	6
2700	16	4

Bruk av Ø1600 mm vifter krever åtte vifter i hver posisjon, fire vifter på hver side av tverrsnittet montert over gangbanen. Løsningen med Ø2700 mm vifter krever fire vifter i hver posisjon, det vil si to vifter på hver side av tverrsnittet montert over gangbanen. Tilført total effekt til viftene for installasjonene som er skissert er anslått til 3,8 MW inkludert cos fi på 0,85.

Strategien for ventilasjonsløsningen er å ventilere med trekken som er i tunnelen på tidspunktet for brannstart. Det må derfor benyttes symmetriske vifter slik at ventilasjonsanlegget får samme ytelse i begge retninger.

Det er flere utfordringer knyttet til en løsning med mekanisk ventilasjon med impulsvifter. Det antas at det vil være meget korrosivt miljø i tunnelen, og dette vil være en utfordring for viftene med hensyn til holdbarhet. Størrelsen på viftene, montasje fra leker/båt og høyden på veggen vil gi ekstra utfordringer knyttet til montasje og vedlikehold, sammenlignet med standard løsninger for impulsventilasjon i en veitunnel. For bestemmelse av ventilasjonsretning og hastighetsregulering krever systemet styring ut fra målinger av vindretning og -hastighet i tunnelen. Det må derfor som en del av anlegget etableres en redundant løsning for måling av vindretning og -hastighet samt oppstart og regulering av vifter i ønsket retning.

Bruk av impulsvifter, montert på veggene, for ventilasjon av det svært store tverrsnittet, kan gi 3D-effekter som ikke fullt ut er undersøkt. Dette bør undersøkes nærmere. Det kan blant annet være en utfordring at vifter som er montert høyt på veggen kan blåse direkte på en brann. Hvordan viftene vil bygge opp trykk i et så stort tunneltversnitt bør også undersøkes nærmere for å avdekke om det oppstår noen 3D-effekter på grunn av det store tverrsnittet, som ikke er utfordringer i en standard tunnel med langsgående ventilasjon.



## 8 Diskusjon av måledata

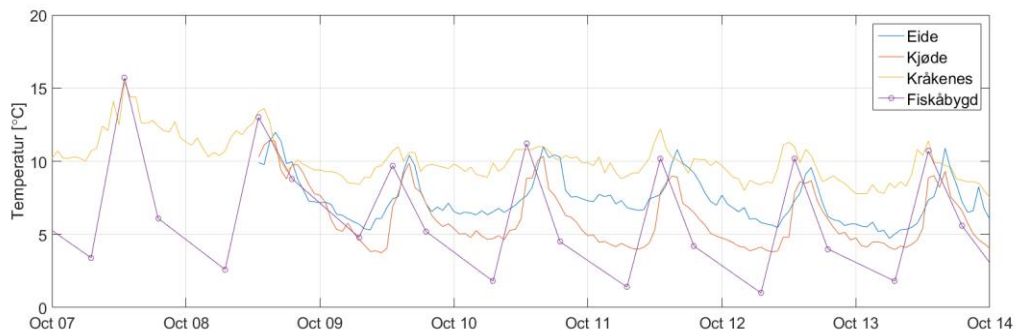
De etablerte målestasjonene på Eide og Kjøde har gitt grunnlag for analyse av naturlig ventilasjon. Det var ca. tre måneder tilgjengelig med data fra stasjonene i arbeidet. Ut fra både en meteorologisk og en statistisk vurdering hadde det vært ønskelig med data fra en lenger periode.

For å gjøre frostberegningene sikrere er det svært ønskelig å fortsette målingene og oppdatere analysene en gang til våren, etter at vinterdata blir tilgjengelige. Frostanalysene, slik de kommer fram i vedlegg I, er basert på å koble målinger av vind og lufttrykk fra perioden juli til oktober, med vintertemperaturer fra meteorologisk institutts stasjon i Fiskåbygd.

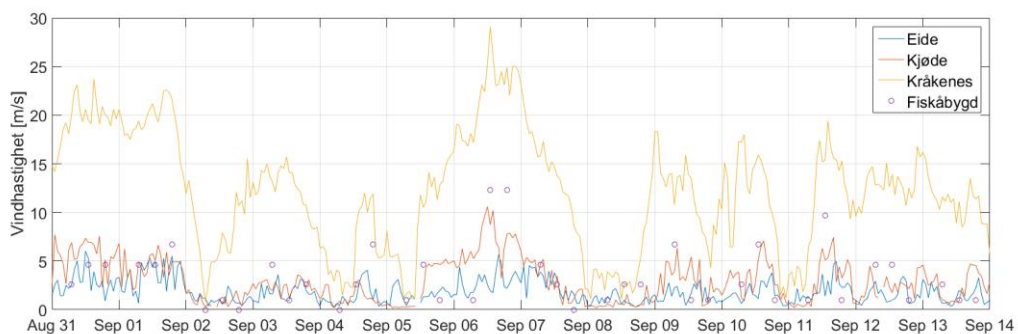
Figur 12 viser lufttemperatur fra stasjonene på Eide og Kjøde, for den siste uken som er benyttet i analysene, sammenstilt med data fra meteorologisk institutts stasjoner på Kråkenes og Fiskåbygd<sup>6</sup>. Denne perioden er valgt ut her siden temperaturene startet å bli lave, spesielt nattetid, og kan likne betydelig mer på det en vil oppleve ved minusgrader vinterstid, enn tidligere i måleperioden.

Kråkenes har forholdsvis jevn temperatur hele døgnet, mens temperaturen i Fiskåbygd faller kraftig om natten. Stasjonene på Eide og Kjøde rapporterer temperaturer som ligger mellom disse to, med Eide konsistent under Kjøde. Hvis situasjonen er slik vinterstid vil frostanalysen som er gjort så langt kunne være svært konservativ.

Middelvind på Eide og Kjøde i måleperioden er hhv. 1,4 og 1,9 m/s. Til sammenlikning er middelvind i samme periode på Kråkenes på 7,4 m/s og 2,2 m/s<sup>7</sup>. Figur 13 viser målt vind i en toukers periode fra de samme stasjonene. En ser her hvordan vinden reduseres svært mye fra kysten inn til portalene. Situasjonen på Svinøy fyr, nord for Stadt, viser i hovedtrekk liknende forhold som på Kråkenes og det kan dermed slutes at det er fjordterrengtet som skjærer portalene svært godt mot vind.



Figur 12: Lufttemperaturer ved målestasjonene på Eide og Kjøde, sammenliknet med meteorologiske stasjoner.



Figur 13: Målt vind på Eide og Kjøde, sammenliknet med meteorologiske stasjonene på Kråkenes og i Fiskåbygd.

<sup>6</sup> Merk at stasjonen i Fiskåbygd kun lagrer data tre ganger i døgnet: kl. 07, 13 og 19.

<sup>7</sup> Dette er noe lavere enn langtids årsmiddel på Kråkenes og Fiskåbygd som er hhv. 8,6 og 2,9 m/s.

## 9 Konklusjon

For å anslå naturlig ventilasjon i tunnelen, er det blitt etablert målestasjoner for vind, lufttrykk og temperatur ved de to portalområdene. Ut fra tre måneders data ved disse stasjonene er det simulert fordeling av naturlig trekk i tunnelen. Trekken i tunnelen viser seg å være relativt likt fordelt mellom de to tunnelretningene. Vanligst hastighet er ca. 2 m/s i begge retninger. Retningen skifter relativt ofte (typisk varighet med konstant ventilasjonsretning er 1 time til 1 døgn). Det er sjelden ingen ventilasjon i tunnelen – vindstille forhold opptrer i hovedsak i korte perioder idet trekken er i ferd med å snu.

Basert på Statens vegvesens regelverk for vegtunneler er grenseverdi for luftforurensning foreslått å være konsentrasjon på 1500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$ . Ut fra kommunikasjon med Hurtigruten og motordata er utslippsmengde ved passering gjennom tunnelen bestemt. Det er basert på dette utført CFD-simuleringer av utslippet idet Hurtigruten passerer gjennom tunnelen for noen karakteristiske trekk og temperaturforhold.

De høyeste luftforurensningsnivåene finnes når trekken i tunnelen har lik retning og hastighet som skipet. Det er funnet at det foreslåtte luftforurensningskravet overholdes kun ved den naturlige ventilasjonen også for denne situasjonen. Når trekken går mot skipet eller har større hastighet en skipet, driver eksosen bort fra det, og forurensningsnivåene er lave.