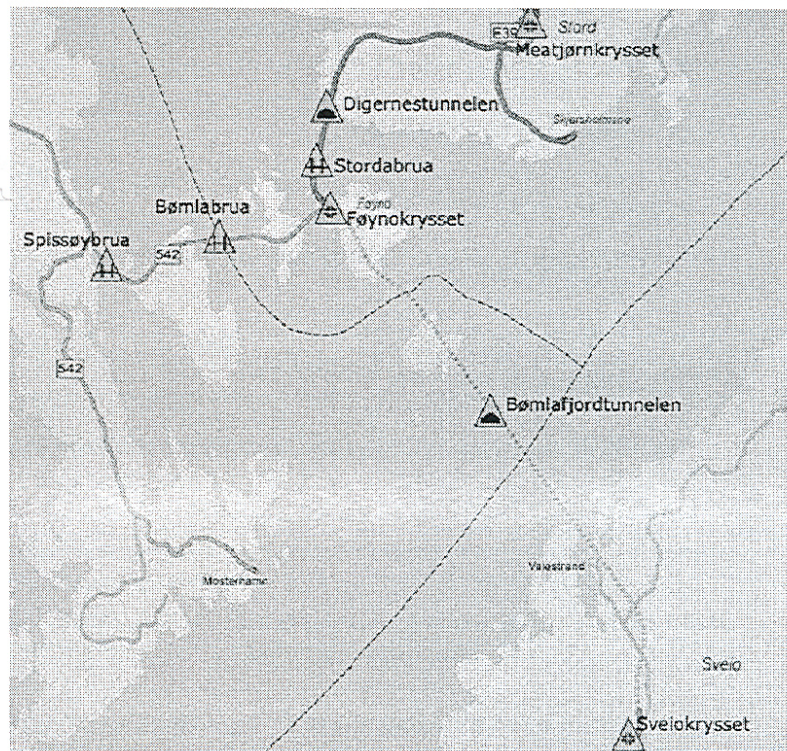


Luftkvalitet og ventilasjonsstyring i Bømlafjordtunnelen



av

Oddny Indrehus
Avdeling for ingeniør- og naturfag

Tor Tybring Aralt
Statens vegvesen Region vest

R-NR 7/03

| | | |
|---|--|---|
| TITTEL | RAPPORTNR. | DATO |
| Luftkvalitet og ventilasjonsstyring i Bømlafjordtunnelen. | 7/03 | 06.11.03 |
| PROSJEKTTITTEL | TILGJENGE | TAL SIDER |
| Luftkvalitet og ventilasjonsstyring i lange tovegstrafikkerte vegtunneler. | Åpen | 61 sider + vedlegg 29 sider |
| FORFATTAR | PROSJEKTLEIAR/-ANSVARLEG | |
| Oddny Indrehus og Tor Tybring Aralt | Geir Anton Johansen | |
| OPPDRAGSGJEVAR | EMNEORD | |
| Statens Vegvesen Region vest | Tunnel, luftkvalitet, NO, CO, støv, ventilasjonsstyring | |
| SAMANDRAG / SUMMARY | | |
| <p>Målet var å skaffe kunnskaper om forholdene i den 7860 m lange undersjøiske Bømlafjordtunnelen for å optimalisere ventilasjonen. Data fra kontinuerlige målere (NO, CO, støv, vindfart, temperatur, luftfuktighet og ventilasjon) for seks uker i 2001/02 ble analysert. Konsentrasjonene av CO, NO og støv var under grenseverdiene. Korrelasjonen var 0,623 for NO og støv, 0,425 for NO og CO, i målepunkt en. En PLS1-modell for NO basert på CO og støv ble utviklet og testet på data fra seks nye uker, korrelasjon mellom målte og utregnede verdier ble 0,829.</p> <p>The objective was to gain more knowledge about the air quality in the 7860 m long undersea Bømlafjord tunnel to improve the ventilation. Measured data from continuous analysers (NO, CO, PM₁₀, air flow, temperature, air moisture and ventilation) for six weeks in 2001/02 were analysed. The concentration of CO, NO and PM₁₀ were below Norwegian air quality standards. The correlation between NO and PM₁₀ was 0.623, between CO and NO 0.425, in measuring point one. A PLS1 model for NO based on CO and PM₁₀ was developed and tested on measured data for six new weeks, the correlation between measured and calculated values was 0.829.</p> | | |
| PRIS | ISSN | ANSVARLEG SIGNATUR |
| kr 70,- | 0806-1688 | Tarald Seldal Dekanus Avdeling for ingeniør- og naturfag |
| | ISBN | |
| | 82-466-0076-1 | |

Forord

Rapporten tilhører prosjektet *Luftkvalitet og ventilasjonsstyring i lange tovegstrafikkerte vegtunneler*, et samarbeidsprosjekt mellom Statens vegvesen Region vest, Distrikt Bergen og Høgskulen i Sogn og Fjordane (HSF), Avdeling for ingeniør- og naturfag. Målet for prosjektet er å få bedre kunnskaper om luftkvaliteten i lange tovegstrafikkerte vegtunneler, spesielt om sammenhenger mellom gasskonsentrasjoner (NO, CO), støv, vindfart, temperatur, luftfuktighet og ventilasjon. Dette skal gi grunnlag for bedre styring av viftene i slike tunneler. Trafikkantene skal få en luftkvalitet som er god nok etter gjeldende grenseverdier, samtidig som ventilasjonen skal være kostnadseffektiv ved at viftene ikke blir koblet inn unødige.

I prosjektet er det aktuelt å analysere luftkvalitetsmålinger fra ulike tunneler i Region vest. I denne rapporten blir det presentert resultater fra målinger i *Bømlaffjordtunnelen* i perioden november 2001 til september 2002. I perioden etter åpningen av denne undersjøiske tunnelen i desember 2000 fikk Statens vegvesen mange klager på dårlig sikt, samtidig som strøm - kostnadene til ventilasjonen var store. Det ble derfor satt i gang en omfattende kartlegging av luftkvalitet og ventilasjon i november 2001, disse målingene har fortsatt til dags dato. I februar 2002 ble det tatt kontakt med ingeniørutdanningen ved HSF, der man tidligere hadde hatt prosjekter med analyse av data fra luftkvalitetsmålinger i lange tovegstrafikkerte vegtunneler (Høyangertunnelen 1994 og 1995). Prosjektet ble etablert i september 2002.

Rapporten er skrevet for ingeniører og andre tilsatte i Statens vegvesen som arbeider med luftkvalitet, både ved planlegging og drift av tunneler, men bør også være av interesse for andre som arbeider med luftkvalitet.

Målingene i Bømlaffjordtunnelen ble finansiert av Statens vegvesen. HSF har kjøpt inn dataprogrammet *The Unscrambler* til prosjektet, som ellers ikke har hatt noen spesiell finansiering. Prosjektdeltakere:

- Cand. scient Tor Tybring Aralt, Statens vegvesen Region vest
- Høgskolelektor Oddny Indrehus, Avdeling for ingeniør- og naturfag, Høgskulen i Sogn og Fjordane
- Professor Geir Anton Johansen, Fysisk Institutt, Universitetet i Bergen

Førde/Bergen 6. november 2003

Oddny Indrehus

Tor Tybring Aralt

Geir Anton Johansen

Innholdsliste

| | |
|--|-----------|
| FORORD | 1 |
| INNHOLDSLISTE | 2 |
| SAMMENDRAG | 4 |
| MÅL FOR PROSJEKTET | 4 |
| ARBEIDSMÅTER | 4 |
| VIKTIGE FUNN | 4 |
| FORSLAG TIL NY UNDERSØKELSE | 4 |
| INNLEDNING | 5 |
| BØMLAFJORDTUNNELEN | 5 |
| PROBLEMSTILLINGER I PROSJEKTET | 5 |
| PROSJEKTSAMARBEID | 5 |
| LUFTFORURENSNING I VEGTUNNELER | 6 |
| TRAFIKKUTSLIPP OG VEGSTØV | 6 |
| <i>Karbonmonoksid og nitrose gasser</i> | 6 |
| <i>Svevestøv</i> | 6 |
| <i>Andre stoffer</i> | 6 |
| GRENSEVERDIER I NORSKE VEGTUNNELER | 7 |
| <i>CO, NO₂ og NO</i> | 7 |
| <i>Støv og sikt</i> | 8 |
| LUFTFORURENSNING OG HELSE | 9 |
| <i>CO, NO₂ og støv i uteluft</i> | 9 |
| <i>Vegtunneler og helse</i> | 11 |
| MÅLETEKNIKK I VEGTUNNELER | 12 |
| MÅLETEKNISK HISTORIKK I NORSKE VEGTUNNELER | 12 |
| <i>Målemetoder for CO, støv og sikt</i> | 12 |
| <i>Målemetoder for NO₂</i> | 12 |
| <i>Nyere målemetoder</i> | 13 |
| HISTORIKK VENTILASJON I BØMLAFJORDTUNNELEN | 13 |
| <i>Ventilasjonsprogram</i> | 13 |
| <i>Optimalisering av ventilasjonen</i> | 13 |
| MÅLEOPPSETT, DATAINNSAMLING OG METODE | 15 |
| MÅLEOPPSETT OG PARAMETRENER | 15 |
| STYRT VENTILASJON I MÅLEPERIODEN | 16 |
| METODE | 16 |
| MÅLERESULTATER | 18 |
| DATAGRUNNLAG | 18 |
| <i>Variabler</i> | 18 |
| <i>Rådata og ordnede data</i> | 19 |
| MÅLERESULTATER FOR HVER VARIABEL | 20 |
| <i>CO konsentrasjon</i> | 20 |
| <i>NO konsentrasjon</i> | 21 |
| <i>Støv</i> | 23 |
| <i>Temperatur</i> | 24 |
| <i>Luftfuktighet</i> | 25 |
| <i>Vindfart og styrt ventilasjon</i> | 27 |

| | |
|--|-----------|
| SAMVARIASJON MELLOM VARIABLER | 29 |
| <i>Luftfuktighet, temperatur, CO og NO</i> | 29 |
| <i>CO, NO og støv</i> | 30 |
| <i>NO/støv</i> | 32 |
| <i>CO/NO forholdet</i> | 33 |
| <i>CO/støv</i> | 34 |
| MODELLER FOR NO KONSENTRASJON..... | 36 |
| MODELLERINGSVARIABLER | 36 |
| <i>NO, CO og støv</i> | 36 |
| <i>NO og luftfuktighet</i> | 36 |
| <i>NO, temperatur og trafikk</i> | 37 |
| <i>NO, vindfart og antall vifter i drift</i> | 37 |
| <i>Oppsummering</i> | 37 |
| PLS1-MODELLER FOR NO BASERT PÅ CO OG STØV | 38 |
| <i>Modeller for NO i målepunkt 1</i> | 38 |
| <i>Modeller for NO i målepunkt 2</i> | 40 |
| <i>Vurdering av modellene</i> | 42 |
| TESTING AV PLS1-MODELLENE | 43 |
| <i>Måleresultater for testukene</i> | 43 |
| <i>Testresultater</i> | 43 |
| <i>Valg av modell</i> | 45 |
| DISKUSJON..... | 46 |
| GASSER OG STØV | 46 |
| <i>Karbonmonoksid, CO</i> | 46 |
| <i>Nitrøse gasser, NO og NO₂</i> | 47 |
| <i>NO₂/NO_x forholdet</i> | 47 |
| <i>CO/NO forholdet</i> | 48 |
| <i>Støv</i> | 48 |
| <i>NO/støv</i> | 49 |
| <i>CO/støv</i> | 49 |
| <i>Modeller for NO konsentrasjon</i> | 49 |
| TEMPERATUR OG LUFTFUKTIGHET | 50 |
| <i>Temperatur</i> | 50 |
| <i>Luftfuktighet</i> | 50 |
| STYRT VENTILASJON | 51 |
| <i>Vindfart</i> | 51 |
| <i>Vifter</i> | 52 |
| KONKLUSJONER..... | 53 |
| VIKTIGE FUNN..... | 53 |
| FORSLAG TIL NY UNDERSØKELSE | 53 |
| REFERANSER | 54 |
| TABELL- OG FIGURLISTE | 60 |
| TABELLER..... | 60 |
| FIGURER | 61 |

Sammendrag

Mål for prosjektet

Skaffe kunnskaper om forholdene i Bømlafjordtunnelen som kan brukes til en ytterligere optimalisering av ventilasjonen.

Arbeidsmåter

Det har pågått en omfattende kontinuerlig overvåkning av luftkvalitet, vindfart og antall vifter i drift i tunnelen siden november 2001, med registrering av data for hvert minutt i døgnet. Det ble her valgt tilfeldig seks uker, en fra hver sju ukers bolk innenfor en 42 ukers periode fra november 2001 til september 2002. Måledataene fra disse seks ukene ble analyserte for å finne sammenhenger mellom gasskonsentrasjoner (NO, CO), støv, vindfart, temperatur, luftfuktighet og ventilasjon i tunnelen i full drift. Det ble utvikla en modell for NO konsentrasjon basert på andre variabler. Modellen ble testet på data fra seks tilfeldig valgte nye uker, en fra hver av de samme sju ukers bolkene.

Viktige funn

- Bømlafjordtunnelen var tilstrekkelig ventilert i måleperioden ut fra gjeldene krav til luftkvalitet i tunneler. CO konsentrasjon og støv lå langt under grenseverdiene. NO₂ var en mer kritisk faktor i forhold til grenseverdiene enn CO og støv.
- CO/NO forholdet varierte en del og hadde høyest verdi i helgene og om sommeren. CO/støv viste omtrent samme variasjonsmønster som CO/NO forholdet. Dersom en antok at NO₂ er 10 % av NO_x, ble gjennomsnittet for CO/NO_x forholdet beregnet til 5,5.
- Korrelasjonen mellom NO og støv var 0,623 i målepunkt 1 og 0,564 i målepunkt 2, for NO og CO var tilsvarende tall 0,425 og 0,523.
- En PLS1-modell for NO konsentrasjon i målepunkt 2, basert på CO og støvmålinger i målepunkt 1 – 4, ga en korrelasjon mellom målte og utregnete verdier på 0,829 ved testing på data fra seks nye uker, men de utregnete verdiene for NO var litt for lave ved høye NO konsentrasjoner.
- Gjennomsnittlig vindfart i tunnelen ble lavere i sommerukene enn i vinterukene, sett i forhold til antall vifter i drift.

Forslag til ny undersøkelse

Dersom man vil arbeide videre for å utvikle en modell for NO₂ konsentrasjon basert på støv og CO målinger, bør kjemiluminescens NO_x måling benyttes. Ved en slik undersøkelse vil man også få belyst NO₂ /NO_x forholdet. For å få med alle variasjoner bør måledata logges for et helt år.

Innledning

Bømlafjordtunnelen

Bømlafjordtunnelen er en del av trekantsambandet som binder sammen Stord, Bømlo og Haugalandet. Dette er en undersjøisk tunnel som er 7860 m lang, med laveste punkt 260,4 m under havet. Der er en stigning på henholdsvis 8,0 % og 8,5 %. En stor andel av trafikken er tungtransport. Tunnelen går mellom Sveio og Føyne og har tovegstrafikk. I dag er der en trafikk på ca 2500 kjøretøyer pr døgn gjennom tunnelen. Ventilasjonen er langsgående, med fast ventilasjonsretning. I perioden etter åpningen av tunnelen i desember 2000 fikk Statens vegvesen Region vest mange klager på dårlig sikt, samtidig som strømkostnadene til ventilasjonen var store. Det ble derfor satt i gang en omfattende kartlegging av luftkvalitet og ventilasjon i november 2001.

Problemstillinger i prosjektet

I forbindelse med ventilasjon av tunneler er det viktig å optimalisere ventilasjonen med hensyn på akseptabel luftkvalitet til lavest mulig pris. Har man *en* tunnel er det ikke av stor betydning, men har man, som i Statens vegvesen Region vest, flere hundre tunneler med ventilasjon vil dette ha større betydning. Strømrregningen for tunneler blir da vesentlig. I forbindelse med arbeider utført tidligere i Hordaland har man vist at der i enkelte tilfeller er mulig å oppnå bedre luftkvalitet og samtidig redusere energikostnadene ved riktig styring av ventilasjonen.

Det vi i dette prosjektet ønsket å se nærmere på var hvilke sammenhenger det er mulig å finne mellom gasskonsentrasjoner (NO, CO), støv, vindfart, temperatur, luftfuktighet og ventilasjon, når man analyserer målinger tatt med det måleutstyr som normalt benyttes i tunneler. Alt måleutstyr som ble benyttet i denne undersøkelsen er av standard industri utførelse. Dette anses av Statens vegvesen som vesentlig for nytteverdien av undersøkelsen. Det ble brukt resultater fra målinger i Bømlafjordtunnelen i perioden november 2001 til september 2002. Målet var en ytterligere optimalisering av ventilasjonsstyringen i tunnelen.

Prosjektsamarbeid

Prosjektet var et samarbeid mellom

- Cand. Scient Tor Tybring Aralt, Statens vegvesen Region vest
- Høgskolelektor Oddny Indrehus, Avdeling for ingeniør- og naturfag (AIN), Høgskulen i Sogn og Fjordane
- Professor Geir Anton Johansen, Fysisk Institutt, Universitetet i Bergen. Johansen er også dosent II ved AIN, HSF

Aralt har hatt ansvar for kvalitetssikring av måledataene, for fysisk forståelse av måledataene og for styring av ventilasjonen i måleperioden. Indrehus har utført dataanalysen og Johansen har fungert som prosjektleder.

Luftforurensning i vegtunneler

Trafikkutslipp og vegstøv

Karbonmonoksid og nitrøse gasser

Gassen karbonmonoksid (CO) finnes i eksos fra forbrenningsmotorer (bensin/diesel). NO_x er en fellesbetegnelse for nitrogenoksid (NO) og nitrogendioksid (NO₂). Utslippene av nitrøse gasser er langt større fra dieselkjøretøyer enn fra bensindrevne kjøretøyer. Utslippene er også langt større pr. kjøretøy for trailere enn for personbiler.

Svevestøv

Svevestøv er partikler med aerodynamisk diameter mindre enn 75 µm som holder seg svevende en viss tid. Svevestøvet kan deles inn i undergrupper:

- PM₁₀ (aerodynamisk diameter mindre enn 10 µm)
- Grovfraksjon (aerodynamisk diameter mellom 2,5 µm og 10 µm)
- PM_{2,5} eller finfraksjon (aerodynamisk diameter mindre enn 2,5 µm), dvs. PM₁₀ kan deles i grovfraksjon og finfraksjon
- Ultrafine partikler (aerodynamisk diameter mindre enn 1 µm), typisk dieselstøv
- Sot (svarte partikler i svevestøv, f. eks. dieleleksospartikler)
- Aerosoler (faste partikler eller dråper, små nok til å holde seg svevende i lufta)

Her brukes ”støv” om PM₁₀, men en stor andel av utslippene er ultrafine partikler. Støvet i tunneler er en blanding av eksospartikler fra forbrennings- motorer og asfaltstøv fra vegen. Vegstøvet øker ved piggdekkbruk. De fleste partiklene fra vegbanen har en størrelse som gjør at de faller raskt ned igjen på bakken. Eksospartiklene vil dermed være den langt største delen av svevestøvet i tunnelene. Utslipp av partikler i eksos fra dieselkjøretøyer er langt høyere enn fra bensindrevne biler. Utslipet av PM_{2,5} fra dieselbuss ble estimert til ca. 32 – 55 ganger utslippet fra bensin - drevet personbil av Balogh et. al (1993), her sitert fra Holmen et al. (2001).

Andre stoffer

Utslipp fra vegtrafikk til luft inneholder også en rekke andre kjemiske stoffer som ikke vil bli behandlet her. De totale utslippene fra vegtrafikk i Norge har økt for noen stoffer, mens andre har gått ned de senere år. Endringer fra 1973 til 1997 for de viktigste andre stoffene (Statens forurensningstilsyn, 1999):

- Karbondioksid (CO₂), pluss 91 %.
- Metan (CH₄), pluss 35 %..
- Lystgass (N₂O), har økt 10 ganger.
- Svoveldioksid (SO₂), minus 62 %.
- Ammoniakk (NH₄), pluss 29 %
- Non-methane volatile organic compound (NMVOC), pluss 4 %.
- Bly (Pb), minus 99,7 %.
- Polyaromatiske hydrokarboner (PAH), pluss 63 %.
- Benzen (C₆H₆), minus 17 %

Svovelinholdet i bensin og diesel og blyinnholdet i bensin avtok betydelig fra 1973 til 1997, dette forklarer nedgangen i SO₂ og bly. I den samme perioden økte forbruket av drivstoff med 87 % (Statens forurensningstilsyn, 1999). Svevestøvet fra vegtrafikk kan bære med seg andre forurensende stoffer enn de som er nevnt her, for eksempel tungmetaller. Dette gjelder både partikler i eksos og partikler fra asfalt og bildekk.

Grenseverdier i norske vegtunneler

CO, NO₂ og NO

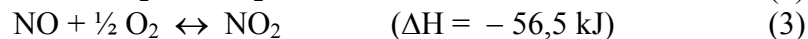
I Norge er grenseverdiene for CO og NO₂ konsentrasjonen i vegtunneler gitt i *Håndbok 021 vegtunneler* (Statens vegvesen, 2002). Dette er "bibelen" for all tunnelbygging i Norge. Her finner vi de aktuelle grenseverdier og forenklete modeller for produsert forurensning av CO og NO₂. Grenseverdier for gasskonsentrasjoner gjelder for enden av en tunnel i ventilasjonsretningen. For norske tunneler som i hovedregelen er langsgående ventilerte skal der også måles i midten av tunnelen (Tabell 1). Ved grenseverdier på 100 ppm CO eller 0,75 ppm NO₂ i midten av tunnelen overskredet i 15 minutter skal tunnelen stenge. Er tunnelen ventilert på andre måter, for eksempel med en sjakt i midten av tunnelen med frisk luft inn fra begge sider, blir grenseverdiene slik at midten (ved sjakten) har de høye verdiene, og de lave er midtvegs mellom sjakt og innkjøring. Det forutsettes at forurensningen i en tunnel er jevnt stigende i ventilasjonsretningen. I dag er grenseverdier for CO og NO₂ de samme i Norge som i resten av Europa.

Tabell 1 Grenseverdier for CO og NO₂ i norske vegtunneler

| Gass | Midlingstid | Midt i tunnelen | Ved enden av tunnelen |
|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------------|
| CO | 15 min. | 100 ppm | 200 ppm |
| NO ₂ | 15 min. | 0,75 ppm | 1,50 ppm |

For NO₂ er det ikke målestyr av standard industriell utførelse som egner seg til fast utplassering i tunneler. I *Håndbok 021 vegtunneler* blir det antatt at andelen av NO₂ er 10 % av NO_x. I en rapport fra *World Road Association* (PIARC) om NO₂ forurensning i vegtunneler ble det, på grunnlag av tidligere undersøkelser i tunneler, konkludert med at for NO₂/NO_x forholdet kan 10 % sees som øvre grense og følgelig en trygg verdi å basere et ventilasjonssystem på (Darpas et al., 2000). I Norge har en brukt 10 % ved utregning av grenseverdi for NO ved enden av tunnelen. Dersom NO₂ er 10 % av NO_x ($\frac{1,5\text{ ppm}}{[NO]+1,5\text{ ppm}} = 0,10$) får man grenseverdien 13,5 ppm for NO, overstiges 50 % av grenseverdien i midten av tunnelen i mer enn 15 minutter skal denne stenges.

Gassen nitrogenmonoksid, NO, blir dannet ved forbrenning i bilmotorer. På veg ut av motoren, med fallende temperatur og relativt høy konsentrasjon av NO, vil det danne seg ei blanding av NO og NO₂. I tunnellufta kan det skje kjemiske reaksjoner, med det resultat at mer NO omdannes til NO₂:



Konsentrasjonen av oksidantene O_3 eller radikalene XO_2^\bullet antas å være lave i tunnelluft, O_3 konsentrasjonen i uteluft er vanligvis under 0,05 ppm. Ved høyere NO konsentrasjoner, der det ikke er mer av oksidantene i reaksjon (1) og (2), vil (3) bli mer viktig. Likevekten i reaksjon (3) er sterkt forskjøvet mot høyre og reaksjonsfarten øker med fallende temperatur, og med kvadratet av NO konsentrasjonen (Indrehus & Vassbotn, 1997). I lange vegtunneler, der NO konsentrasjonen kan bli godt over 5 ppm, vil reaksjon (3) medføre at NO blir omdannet til NO_2 (Barrefors, 1996). I Høyanger-tunnelen ble det i en undersøkelse i 1994 funnet høyere NO_2/NO_x verdier enn 10 % (Tønnesen 1996), NO_2/NO_x forholdet økte med økende NO_x for NO_x over ca. 2 ppm, til verdier langt over 15 % (Indrehus & Vassbotn, 2001). Det er dermed knyttet noe usikkerhet til om NO_2/NO_x forholdet i lange tovegtrafikkerte norske vegtunneler faktisk holder seg under 10 %.

Støv og sikt

I Norge er det gitt stengeskriterium for støvkonsentrasjon. Det er kun i Norge at det finnes grenseverdier for støvkonsentrasjon i vegtrafikk-tunneler. Denne grenseverdien for støv (PM_{10}) er gitt i mg/m^3 og er i dag $1,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ (Statens vegvesen, 2002). Grenseverdien er gitt ut fra at det da er så dårlig sikt at man ikke forsvarlig kan ha trafikk i tunnelen. Grenseverdien er satt ut fra at man har en relativ stor andel med piggdekkstøv. Verdien ble satt i en tid hvor sotproduksjonen ikke var den dominerende forurensning fra kjøretøyer. Hvis man kommer i nærheten av denne konsentrasjonen ved sot vil publikum for lengst ha reagert, mange vil ha snudd og kjørt tilbake. I tunneler med flere kilometer med fri sikt, vil folk klage og begynne å snu ved langt lavere konsentrasjoner¹. Er det imidlertid store partikler som er årsaken (piggdekkstøv) er dette ikke en kritisk høy konsentrasjon. Normalt vil vi ha en blanding av små og store partikler.

I de fleste land er det ingen grenseverdier for støvkonsentrasjon i tunneler. Det finnes derimot praktiske grenseverdier (k -verdi)² for sikt med måleenhet m^{-1} . Ekstinksjonskoeffisienten k er definert ved Lambert-Beers lov:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-kx} \quad \text{eller} \quad k = -\frac{\ln T}{x}$$

der I_0 = utsendt lys, I = mottatt lys, x = måledistanse og T = transmisjon.

Det vil normalt være mulig å regne seg om fra m^{-1} til $\mu\text{g}/\text{m}^3$, gitt at man antar en midlere kornstørrelse for aerosoler. Støvmålere basert på spredning av lys vil forutsette et kjent midlere spredningstverrsnitt for aerosoler.

¹ Erfaringer fra Bømlafjordtunnelen: Innringte klager er korrelert med målt konsentrasjon.

² For Tyskland gjelder følgende grenseverdier: Alarm ved ca $0,006 \text{ m}^{-1}$, steng tunnelen ved ca $0,012 \text{ m}^{-1}$.

Luftforurensning og helse

CO, NO₂ og støv i uteluft

Høsten 2002 ble det i Norge vedtatt en ny forskrift om lokal luftkvalitet (Lovdata, 2002), med hjemmel i Forurensningsloven. Forskriften er basert på EUs direktiver om luftkvalitet (EC 1996, EC 1999, EC 2000).

Tabell 2 Luftkvalitetskriterier utendørs

| Gass | Midlingstid | Grenseverdi ³ | Tillatte overskridelser | Fra |
|-----------------|-------------|--------------------------|-------------------------|------|
| CO | 8h | 10 mg/m ³ | | 2005 |
| NO ₂ | 60 min | 200 µg/m ³ | 18 ganger/år | 2010 |
| | 1 år | 40 µg/m ³ | | 2010 |

| Støv | Midlingstid | Norge | Tillatte overskridelser | Fra |
|------------------|-------------|----------------------|-------------------------|------|
| PM ₁₀ | 24 h | 50 µg/m ³ | 35 ganger/år | 2005 |
| | 1 år | 40 µg/m ³ | | 2005 |

I mange undersøkelser de siste tiår i USA og Europa er det blitt funnet en sammenheng mellom luftforurensning og helseproblemer og redusert levetid (Brunekreef & Holgate 2002, Stieb et al. 2002). Eldre, barn og personer med kroniske hjerte- og lungesykdommer eller astma er mer utsatt enn andre (Pope, 2000). Noen av disse undersøkelsene er *cohort* undersøkelser der et stort utvalg personer bosatt i gitte områder ble fulgt over mange år, samtidig som luftkvalitetsdata for områdene ble registrert. Andre er *epidemiologiske* undersøkelser der antall sykehusinnleggelses for visse diagnoser og/eller dødsfall ble registrert og sammenholdt med luftkvalitetsmålinger i samme område til samme tid. Denne type undersøkelser kan utføres fordi luftkvalitetsdata for uteluft har vært registrert på mange steder i mange land de siste tiår. I denne sammenheng ser vi spesielt på CO, NO₂, PM_{2,5} og PM₁₀, men det er også andre luftforurensende stoffer enn disse som kan ha skadelige helseeffekter.

Svevestøv kan skade celler i luftvegene enten direkte eller ved å være bærere av andre skadelige stoffer. Det er funnet sammenheng mellom PM₁₀ utendørs og antall sykehusinnleggelses på grunn av luftvegs- og hjertesykdommer (Burnett et al., 1999), spesielt utsatt er personer med kroniske hjerte- og karsykdommer (Mann et al., 2002), eldre og diabetikere (Zanobetti & Schwartz, 2002). Det er mistanke om at effekten av luftforurensning på hospitalisering på grunn av hjertesykdommer primært er knyttet til dieseleksos (Le Tertre et al., 2002). Det er også funnet sammenhenger mellom forhøyet PM₁₀ utendørs og antall dødsfall (Verhoeff et al. 1996, Choudhury et al. 1997, Abbey et al. 1999, Katsouyanni et al. 2001). Større relativ risiko for dødsfall av luftvegssykdommer ved økt luftforurensning er blitt funnet hos eldre (Aga et al. 2003, Fischer et al.

³ Omregning til ppm ved 20 °C (Indrehus & Vassbotn, 1997):

CO: 10 mg/m³ svarer til 8,59 ppm. NO₂: 200 µg/m³ svarer til 0,106 ppm.

2003) og for personer med sykdommer i nedre luftveger (Goldberg et al., 2001). I noen undersøkelser er det fokusert på virkningen av kombinasjonen av forhøyet NO₂ og partikler i form av svart røyk (*black smoke*). Dette har forekommet i episoder av en viss varighet f. eks. i London 1991, der det ble funnet en klar økning både i hospitalisering og dødelighet (Anderson et al., 1995). De som bor nær hovedtrafikkårer kan bli utsatt for kombinasjonen NO₂ og svart røyk over lang tid. I en kohort undersøkelse fra Nederland 1986 – 94 av bosatte nær hovedtrafikkårer ble det konkludert med at langtids luftforurensning kan forkorte forventet levetid (Hoek et al., 2002).

I økende grad er en blitt klar over at helseeffektene i større grad er knyttet til PM_{2,5} enn grovfraksjonen. For dieseleksospartikler er virkningen i forhold til allergi godt dokumentert, disse partiklene kan ikke bare forsterke allergien og symptomene hos allerede allergiske individer, men synes også å gjøre at flere blir allergiske (Ormstad & Løvik, 2002). Resultat fra en nylig undersøkelse indikerer at høy kumulativ eksponering for trafikkeksos kan forandre den respiratoriske funksjonen hos barn (Gauvin et al., 2001). Nyere undersøkelser indikerer at sammenhengen mellom forhøyet konsentrasjon av PM₁₀ utendørs og antall dødsfall også i større grad er knyttet til finfraksjonen enn grovfraksjonen (Schwartz et al. 1996, Burnett et al. 2000, McDonnell et al. 2000), også for lungekreft (Pope et al., 2002).

NO₂ er en giftig gass som kan medføre øyeirritasjon, redusert lunge - funksjon, økt mottagelighet for infeksjoner og gi betennelsesreaksjoner i luftvegene. NO₂ er blant de gassene som bidrar til økning i antall sykehus - innleggelse på grunn av luftvegs- og hjertesykdommer ved høye konsentrasjon utendørs (Burnett et al., 1997). Gjentatt eksponering for forhøyet NO₂ konsentrasjon kan øke responsen på allergener hos astmatikere (Strand, 1998). I Stockholm ble det funnet indikasjon på at eksponering for urban luftforurensning (NO₂) over lang tid øker risikoen for lungekreft (Nyberg et al., 2000). Økt NO₂ konsentrasjon kan også medføre økt dødelighet (Saez et al., 2002).

CO binder seg til de røde blodlegemene og påvirker blodets oksygen - transport. Personer med hjerte/kar lidelser kan være svært følsomme overfor CO påvirkning. Positive relasjoner mellom både forhøyet NO₂ og CO konsentrasjon og hospitalisering er funnet for personer med hjerte- og karsykdommer (Mann et al., 2002). Det er blitt funnet sammenheng mellom både forhøyet NO₂ og CO konsentrasjon og hospitalisering for astma hos barn (Lin et al., 2003).

I de senere år er det også reist spørsmål om luftforurensning kan påvirke forløpet av svangerskap. I undersøkelser i en rekke land er det funnet indikasjoner på sammenheng mellom luftforurensninger i uteluft, lav fødselsvekt og for tidlig fødsel, mens andre undersøkelser ikke har positive funn. Nyere undersøkelser har funnet mulige sammenhenger mellom for tidlig fødsel og forhøyet NO₂ (Marozziene & Grazuleviciene, 2002); og forhøyet PM₁₀ og muligens CO (Ritz et al., 2000).

Vegtunneler og helse

Når man kjører gjennom en tunnel kan det aksepteres vesentlig høyere konsentrasjoner av miljøgifter i tunnellufta enn det man har utenfor tunnelen. Dette skyldes at man normalt ikke er direkte eksponert for tunnellufta og at oppholdstida i tunneler vanligvis er kort, noen få minutter. Grenseverdiene for forskjellige miljøgifter i tunneler (Tabell 1) er derfor satt nærmere grenseverdier for akutt skade enn grenseverdier for langtids - virkning. Grenseverdiene for lokal luftkvalitet (Tabell 2) er vesentlig lavere enn for tunneler, også i Norge blir disse grenseverdiene overskredet i flere byer på vinterstid (Miljøverndepartementet, 2003). Når det gjelder støv, aksepteres opp mot $1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i tunneler. I uteluft skal grenseverdien for gjennomsnitt pr. døgn bli $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fra år 2005 (Tabell 2). Dette er en konsentrasjon man sjelden og aldri kommer ned mot i de fleste vegtrafikk-tunneler på dagtid. Tilsvarende forhold vil man finne for de fleste typer forurensninger i en tunnel.

Grenseverdiene for uteluft er gitt som gjennomsnittsverdier i et bestemt tidsrom, for PM_{10} og NO_2 har det vært foreslått alternativt å bruke luftkvalitetsindikatorer som avspeiler tidsvariabiliteten og den episodiske naturen av forurensningen (Guerreiro et al., 1999). De sammenhenger som er påvist mellom luftforurensning og helseproblemer gjelder eksponeringer for luftforurensning ved høyere konsentrasjoner enn grenseverdiene for uteluft, men likevel langt lavere enn det trafikkantene blir utsatt for i tunneler. Ut fra de omfattende og alvorlige helseskadene som er resultat av luftforurensning generelt, kan en ikke utelukke at også den kortvarige eksponeringen i tunneler kan gi helseskader, spesielt for grupper som er følsomme for slik eksponering: Personer med kroniske hjerte- og lungesykdommer eller astma, barn, eldre. Svevestøv i tunneler kan også være plagsomt for trafikkantene på grunn av at det kan redusere sikten i tunnelen. Trafikkantene oppholder seg kort tid i tunnelen (7860 m, fart 80 km/h gir kjøretid ca. 6 min., 60 km/h gir ca. 8 min.). Følgende forhold spiller også en rolle for PM_{10} og NO_2 eksponeringen til den enkelte bilist:

- På en lengre kjøretur på en strekning med mange tunneler, vil trafikkantene tilbringe en betydelig del av turen inne i tunneler.
- Noen kjører gjennom tunneler mange ganger daglig over lang tid.
- Ved å sette ventilasjonen i bilen på resirkulering ved kjøring i tunnel kan en redusere forurensningen i kupeen betydelig.
- En nødssituasjon kan oppstå i en tunnel, med lang oppholdstid.

Det er funnet få undersøkelser på helseeffekter av kjøring i tunneler. En undersøkelse fra Söderledstunnelen i Stockholm viste at eksponering for luftforurensning i en vegtunnel kan forsterke allergianfall flere timer senere, spesielt var utslagene tydelige ved forhøyet NO_2 (Svartengren 2000). Dette viser at tunneler kan være lumske, mange vil ikke koble problemer ut på dagen med at de kjørte i en tunnel på morgenen. I Sverige blir det diskutert å sette lavere grenseverdier for NO_2 enn de norske (Sandstrøm et al., 2003).

Usikkerhet knyttet til helsevirkningene gjør det spesielt viktig for Statens vegvesen å se til at luftkvalitetskriteriene for tunneler blir overholdt.

Måleteknikk i vegtunneler

Måleteknisk historikk i norske vegtunneler

Målemetoder for CO, støv og sikt

Fra vi begynte med vegtunneler i Norge har der vært en utvikling av måleteknikk som har vært benyttet i vegtunneler. I de første vegtunnelene ble ventilasjon styrt ut fra et mål for sikt (k-verdi) og CO konsentrasjon. Man benyttet CO målere med elektrokjemiske celler, og det ble benyttet transmisjonsmålere av varierende kvalitet til måling av støvkonsentrasjonen. Teoretisk nøyaktighet for transmisjonsmålerne var svært dårlig, når man ser på finstøvet. Etter omregning⁴ fra m^{-1} til mg/m^3 ble måleområdet for transmisjonsmålerne normalt 1 til $5 mg/m^3$ eller 1 til $15 mg/m^3$, altså dårlig tilpasset et stengekriterium på $0,75 mg/m^3$ i midten av en tunnel. Resultatet av denne dårlige nøyaktigheten var at man sluttet å måle støv eller k-verdi i norske vegtunneler. Imidlertid var det i begynnelsen så mye CO i tunnelene at CO målerne varslet for stengning av tunnelene lenge før en transmisjonsmåler slo ut når denne var nyrenset. Ved lang tid siden rens visste man ikke når en transmisjonsmåler ville slå ut, utslaget ville være avhengig av akkumulert støvmengde på linsa. Dette gjorde imidlertid ikke noe da der var stor produksjon av CO fra både personbiler og lastebiler. Husk at dette var lenge før katalysatorens tid. CO var i denne tida alltid den kritiske ventilasjonsfaktor, holdt man denne lav var der aldri noe problem.

Målemetoder for NO₂

Forbrenningsmotorer produserer en del NO i tillegg til støv og CO, spesielt dieselmotorer produserer mye NO. Når denne er på veg ut av motoren vil det danne seg ei blanding av NO og NO₂. NO₂ er som nevnt en svært giftig gass, og for å ikke få problemer med NO₂ konsentrasjonen i forhold til grenseverdiene (Tabell 1) ble det også innført måling av NO₂. Man valgte da av vane samme type måler som man benytter for å måle CO, imidlertid var dette ikke vellykket. CO måling med elektrokjemiske celler fungerer greit når måleområdet er 0 – 300 ppm, og laveste startkriterium for vifter er 50 eller 75 ppm. For NO₂ var imidlertid måleområdet 0 – 2 ppm, med laveste stengekriterium $0,75 ppm$, og laveste startkriterium av vifter $0,25 ppm$. Når man satte inn elektrokjemiske celler her fikk man viftestart i hytt og pine. Elektrikerne i Vegvesenet hevet derfor alltid startkriterium for laveste viftetrinn fra NO₂ til 2 ppm, og gjorde det samme med alle alarmgrenser. Dette sa de ingen ting om til planleggerne. Slik gikk det i mange, mange år. Dette gikk greit på grunn av at dominerende forurensning var CO. Så kom katalysatoren, og reduserte CO produksjonen i nye biler drastisk. Etter en del år ble biler med katalysator dominerende. Den gamle måten fungerte ikke like bra lenger, forholdet mellom CO/NO₂ og CO/støv

⁴ Ved omregning fra k-verdi til vekt pr. volum ble det her forutsatt et midlere sprednings-tverrsnitt med diameter $1 \mu m$.

var drastisk endret. En tunnel kunne komme i stengekriterium for NO₂ eller støv uten nevneverdige konsentrasjoner av CO.

Nyere målemetoder

Montering av støvreanseanlegg i Bergen resulterte i at man her fant fram til en støvmåler som fungerer godt. Denne var basert på 60 DEG tilbakespredt lys, med måling direkte i tunnellufta. Måleprinsippet ble dokumentert i en hovedoppgave i fysikk fra UiB (Tjugum, 1998). Parallell måling med gravimetrisk utstyr av høy kvalitet ble gjennomført av UiB og viste godt samsvar for PM₁₀ i området 50 – 300 µg/m³ (Wedberg 2000).

Man har også gått over fra å måle NO₂ direkte til å måle NO. Dette har gitt en vesentlig forbedring av den relative nøyaktighet. Imidlertid er nøyaktigheten fortsatt i dårligste laget for å kunne styre ventilasjonen, men nå fungerer det å benytte de elektrokjemiske celler for stengekriterium. Ettersom forholdet mellom NO og NO₂ langt i fra er konstant er det lite egnet for styring av ventilasjon. Andre metoder bør finnes. Man kan i dag få svært høye støvkonsentrasjoner i en tunnel uten at man har utslag på CO, NO eller NO₂. Dette gjør at det er blitt noe vanskeligere å styre ventilasjonen i tunneler.

Historikk ventilasjon i Bømlafjordtunnelen

Ventilasjonsprogram

Ventilasjon i undersjøiske tunneler er alltid langsgående, og har ofte krevd mer energi enn for tunneler av tilsvarende lengde som ikke har lavbrekk. På grunn av at tunnelen er tovegstrafikkert vil det ikke bli noen stempeleffekt fra trafikken, som gir et vesentlig bidrag til ventilasjonen i envegstrafikkerte undersjøiske tunneler (Chen et al., 2002). Det er hevdet at dårlig sikt i de undersjøiske tunneler skyldes luftfuktighet, vanndamp etc. I noen tunneler er dette kanskje tilfelle.

Bømlafjordtunnelen er utstyrt med 96 vifter, hver på ca. 20 kW. Det er brannventilasjon som har vært dimensjonsgrunnlag for antall vifter. 24 vifter gir en midlere lufthastighet i området 3 – 4 m/s. Ventilasjonen står for en større andel av strømknadene. Til å begynne med var ventilasjonen styrt av CO og NO målere plassert fem steder i tunnelen. I utgangspunktet var ventilasjonsprogrammet satt med fire trinn, med 24 vifter i hvert trinn. Ved grense 1 startet så 24 vifter osv. Dette var basert på erfaringer med styring fra CO og NO. Ved lave konsentrasjoner, eller små endringer i verdi mellom trinn blir unøyaktigheten for de benyttede målere for stor i forhold til grenseverdier.

Optimalisering av ventilasjonen

I 2001 ble det, etter klager på dårlig sikt i tunnelen, installert støvmålere ved fire målestasjoner i tunnelen i tillegg til NO og CO målere. For å kunne si

om den dårlige sikten i tunnelen skyldes fuktighet (tåke) eller støv ble der også montert fem temperaturmålere og fem luftfuktighetsmålere inne i tunnelen, samt på begge sider av tunnelen. Inne i tunnelen ble disse montert på samme sted som måling av NO, CO og støv. Det ble gjort et arbeid med optimalisering av ventilasjonsstyringen (Aralt, 2002). Målet for dette arbeidet var ”best mulig luftkvalitet til lavest mulig strømkostnad”.

Konklusjoner som ble trukket i denne rapporten var:

1) Ventilasjonen bør styres etter støvkonsentrasjon da vi her kan benytte en finere inndeling av trinnene. Imidlertid synes det som om det vil være riktig å ha NO og CO målere med. Disse kan inngå i ventilasjonsstyringen og derved øker sikkerheten for at grenseverdier for NO og CO ikke overstiges. Ved styring fra kun støv vil vi kunne få kortvarige overskridelser av grenseverdier for NO. Langvarige overskridelser vil vi ikke få da støvet vil komme etter. En må ta med i betraktningen at støvkonsentrasjonen ut fra måleren er midlet over 255 sekunder, mens der ikke er noen slik midling i NO og CO målerne. I forbindelse med et prosjekt som vil bli utført i Kolltveittunnelen utenfor Bergen vil vi ha anledning til å teste effekten av integrasjonstid i målerne. Resultater herfra kan påvirke endelig konklusjon.

2) Det er ut fra analyse av de innsamlede data sannsynlig at man kan oppnå noe på å endre på antall vifter som går i hovedtrinn 1 (dette er 24 i dag). Alt tyder på at man vil få tunnelen fort nok ren ved 18 vifter og de ganger NO stiger over 4 ppm i midten av tunnelen. Tunnelens totale viftekapasitet synes å være overdimensjonert med tanke på forurensning fra trafikken. Dette er ikke overraskende da det er 20 MW brann som har vært dimensjonerende.

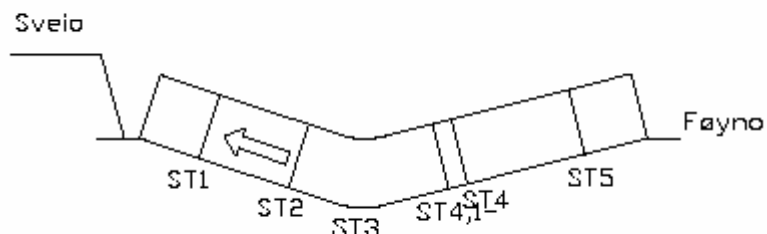
3) Ved framtidige anlegg, spesielt der hvor brannventilasjon er dimensjonerende bør man benytte flest mulig trinn i styring fra automatikk, gjerne et trinn pr vifte.

4) De innstillinger som er gjort av ventilasjonen er basert på at vi dagens trafikkforhold sjelden har hatt behov for mer enn 24 vifter. Ved en større økning i trafikken vil det være riktig å gå gjennom dette på nytt. Sikkerheten er ivaretatt ved hjelp av NO og CO målere, mens støvet aldri får lov å starte mer enn 24 vifter. Dette for å unngå full ventilasjon ved tåke i bakken mot Sveio.

5) Det har fra forskjellig hold vært hevdet at man vil kunne oppnå en bedring av siktforholdene i tunnelen ved bedre vanntetting. De målte luftfuktigheter i tunnelen viser at dette ikke vil ha noen effekt, da tunnelen jevnt over er tørrere enn lufta utenfor. Dette skyldes at tunnelen er relativt bra vannsikret. Dette må også sees i sammenheng med Oslofjordtunnelen som har en vesentlig bedre vannsikring, men som har nøyaktig de samme problemene.

Måleoppsett, datainnsamling og metode

Måleoppsett og parametere



Figur 1 Skjematisk plassering av målestasjoner i tunnelen

Tabell 3 Plassering av målestasjoner, med parametere

| Målestasjon | Plassering | Måling av |
|---------------|---------------------------------|---|
| Sveio | 30 m før tunnelen | Temperatur og luftfuktighet |
| Stasjon 1 | 970 m inn fra Sveio | Temperatur, luftfuktighet, CO, NO, støv og vindhastighet |
| Stasjon 2 | 2430 m inn fra Sveio | Temperatur, luftfuktighet, CO, NO og støv |
| Stasjon 3 | 3600 m inn fra Sveio. Lavbrekk. | Temperatur, luftfuktighet, CO, NO, støv og vindhastighet ⁵ |
| Stasjon 4, 1- | 4680 m fra Sveio | Støv |
| Stasjon 4 | 4980 m fra Sveio | Temperatur, luftfuktighet, CO, NO |
| Stasjon 5 | 6850 m fra Sveio | Temperatur, luftfuktighet, CO, NO |
| Føyno | 130 m før tunnelen | Temperatur og luftfuktighet |

Figur 1 og Tabell 3 viser en oversikt over målestasjonene i og utenfor tunnelen. Støvmålerne er montert ca. 2,5 m over vegbanen for å unngå piggdekkstøv. Trafikktellinger for måleperioden har ikke vært tilgjengelig.

Tabell 4 viser en oversikt over måleparametere, måleenheter og måleinstrumenter. Parallellmålinger av støv utført av UiB (Wedberg, 2000) ga en nøyaktighet for støvmålerne på $\pm 6\%$ av måleverdi. CO og NO målerne har en garantert nøyaktighet på ca. $\pm 3\%$ av full skala, som er henholdsvis 0 – 300 ppm og 0 – 50 ppm. Tidligere erfaring har vist at målerne for CO og NO har noe nullpunktsdrift. Det vil gi seg utslag i at minimumsverdiene for disse målingene kan bli litt, men ikke mye, negative. Det forelå ikke informasjon om tidspunkter for kalibrering av målerne.

⁵ Vindhastighet fra målestasjon 3 blir ikke presentert i rapporten.

Tabell 4 Måleparametere, -enheter, -metoder og instrumenter

| Parameter | Måleenhet | Målemetode | Instrument |
|---------------|-------------------|--|--------------------------|
| CO gass | ppm | Elektrokjemisk celle, med kompensasjon for endringer i relativ luftfuktighet | Dräger polytron 2 |
| NO gass | ppm | Elektrokjemisk celle, med kompensasjon for endringer i relativ luftfuktighet | Dräger polytron 2 |
| Støv | mg/m ³ | 60 DEG tilbakespredt lys | Visic 610 T ⁶ |
| Vindfart | cm/s | Ultralyd ca. 45 DEG i forhold til tunnelens lengderetning | Flowsic |
| Temperatur | °C | | EFT-276 |
| Luftfuktighet | % RH | | EHT-32A |

Styrt ventilasjon i måleperioden

Målingene er tatt i en tunnel i full drift. Ventilasjonen har vært innstilt på følgende måte: Ved hver av de fem målestasjonene er det egne grenseverdier for start av viftetrinn. Når måleverdien synker under grenseverdien er det en etterkjøringstid for å unngå hyppige start/stopp av viftene, samt for å sikre at forurensningen blir blåst helt ut. Det er en grenseverdi for CO og for NO for hvert trinn (24 vifter). På grunn av nøyaktigheten til NO målerne har det liten hensikt å ha startkriterier for vifter basert på NO konsentrasjon ned mot 3 ppm eller lavere.

Da vi monterte støvmålere, var det ønskelig å kunne nytte seg av støvmålerens gode oppløsning og repeterbarhet ved lave konsentrasjoner til å ha en finere inndeling av ventilasjonen. For å samtidig slippe å omprogrammere hele styresystemet ble det da lagt inn at ved styring av ventilasjon fra støvmålere kunne man starte ventilasjonen i kvarttrinn i hovedtrinn 1. For å unngå full ventilasjon ved tåke i tunnelen ble støv i hovedtrinn 2, 3 og 4 satt høyt. I hovedtrinn 1 kunne inntil 24 vifter startes:

- 6 vifter ved 75 µg /m³,
- 12 vifter ved 150 µg /m³
- 18 vifter ved 225 µg /m³
- 24 vifter ved 300 µg /m³.

Ved grenseverdier på 100 ppm CO eller 7 ppm NO i midten av tunnelen overskredet i 15 minutter skal tunnelen stenges (Statens vegvesen, 2002).

Metode

Litteratursøk

Det ble utført litteratursøk på tunnelundersøkelser i ISI Web of Knowledge og Compendex Engineering Village 2 med søkeordene *road – traffic – vehicle* og *tunnel* kombinert med *air quality – dust – PM – NO_x – nitrogen oxide – NO – nitrogen dioxide – NO₂ – carbon monoxide – CO – ventilation*

⁶ Visibility monitor, Mod. VISIC 610 T, produsert av SICK AG, Waldkirch, Tyskland.

– *aerosol – PAH – NMVOC*. Det ble også gjort frie søk på Internett med disse søkeordene på engelsk, norsk og svensk. I tillegg ble det utført søk i ISI Web of Knowledge og frie søk på Internett for å finne artikler om luftkvalitet og helse.

Statistiske metoder

Statistiske analyser ble foretatt i MINITAB release 13,0 og i The Unscrambler v. 7.8. Det ble brukt deskriptiv statistikk, t-konfidensintervall og Pearsons korrelasjonskoeffisient. Det ble videre brukt Principal Component Analysis (PCA) og Partial Least Squares Analysis (PLS1).

De kjemometriske metodene PCA og PLS1 er beskrevet f. eks. i Esbensen et al. (1994). Disse metodene kan brukes til å trekke relevant informasjon ut av et datasett og skille denne fra tilfeldig variasjon eller ”støy”. Metodene blir her brukt til å finne sammenhenger mellom CO og NO konsentrasjoner og støv i forskjellige målepunkter i tunnelen.

PCA er en metode for ekstrahering av egenvektorer i et datasett. Ved å representere et datasett ved egenvektorer vil man kunne fjerne datavariabler som korrelerer og dermed få et nytt datasett med en lavere dimensjon, men med samme mengde informasjon som det opprinnelige settet. Prinsipal - komponentene (egenvektorene) er en lineærkombinasjon av de opprinnelige variablene. Prinsipalkomponent nr. 1 (PC1) er den retningen i variabel - rommet som utspenner den største variasjonen i datasettet, PC2 den retningen som er ortogonal til PC1 der man finner nest størst variasjon osv. Slik fortsetter man til det meste av variasjonen i datasettet er forklart, men uten å gå så langt at man inkluderer ”støy”. Man finner dermed et nytt koordinatsystem (nye variabler) der en med færre variabler enn opprinnelig kan beskrive det vesentlige av variasjonen i datasettet.

PLS er en måte å korrelere ulike deler X og Y av et datasett. Med vanlig multippel lineær regresjon (MLR) antar man at X-variablene er uavhengige. Med PLS antar man ikke uavhengighet mellom X-variablene. Ved begge typer metoder er hensikten å kunne forklare et sett med variabler Y med et annet sett X. De X-variablene som er aktuelle i denne undersøkelsen er CO konsentrasjon og støv i ulike målepunkter i tunnelen. Disse variablene er klart ikke uavhengige, dermed passer PLS bedre enn MLR. PLS1 blir brukt når det bare er en Y-variabel. X-matrisen består her av målte verdier for X-variablene på forskjellige tidspunkter, Y-vektoren består av de målte verdiene for Y-variabelen på de samme tidspunkter. I PLS1 blir det utført PCA av X-matrisen, men på en slik måte at det bare blir tatt hensyn til ”Y-relevant” struktur i X-matrisen. Deretter blir det beregnet en modell for sammenhengen mellom X-variablene og Y-variabelen.

Måleresultater

Datagrunnlag

Det ble foretatt logging av måledata fra november 2001 og fram til tidspunktet da arbeidet med analyse av dataene startet, 28. september 2002⁷. Fordi man tok sikte på å utvikle modeller for NO konsentrasjon måtte man ha to datasett, ett som skulle brukes til å utvikle modeller (treningsdata) og ett som kunne brukes til å teste disse modellene (testdata). For å begrense datamengden i analysen ble det valgt ut seks uker ved loddtrekning (treningsuker) for modellutvikling og seks uker (testuker) for testing av modellene. Ved utvelgingen ble tida delt inn i perioder for å fange opp årstidsvariasjonen. Tida fra uke 48 i 2001, start mandag 26. november, og fram til uke 37 i 2002, slutt søndag 15. september, ble delt inn i 6 perioder på 7 uker hver (Tabell 5). Det ble så gjort en tilfeldig trekning av testuker og treningsuker med MINITAB Ukenumrene ble lagt inn i en kolonne for hver periode og det ble valgt ut 2 uker fra hver periode⁸, den første av disse som treningsuke og den andre som testuke. Dersom en av de utvalgte ukene hadde lange perioder med manglende data eller andre vesentlige problem med dataregistreringen, skulle det trekkes ny uke innenfor samme periode.

Tabell 5 Resultat av loddtrekning av trenings- og testuker

| Periode | Uker | 2001 | 2002 | Treningsuker | Testuker |
|---------|----------------------|-------|------|--------------|-----------|
| 1 | 48 49 50 51 52 | 01 02 | | 48 (2001) | 52 (2001) |
| 2 | 03 04 05 06 07 08 09 | | | 03 (2002) | 07 (2002) |
| 3 | 10 11 12 13 14 15 16 | | | 11 (2002) | 13 (2002) |
| 4 | 17 18 19 20 21 22 23 | | | 20 (2002) | 21 (2002) |
| 5 | 24 25 26 27 28 29 30 | | | 28 (2002) | 25 (2002) |
| 6 | 31 32 33 34 35 36 37 | | | 35 (2002) | 31 (2002) |

Variabler

- **CO** Konsentrasjonen av CO (ppm)
- **NO** Konsentrasjonen av NO (ppm)
- **STOV** Støv ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- **VM** Vindfart (cm/s)
- **TEMP** Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- **FUKT** Fuktighet (% RH)
- **VIFTER** Antall vifter i drift

For støvmålingene ble det målt gjennomsnitt for 4 minutt, CO og NO for 1 minutt. For hver uke ble det gjort målinger hvert minutt. Med målinger hvert minutt, fikk en i løpet av ei uke: $7 \times 24 \times 60 = 10\,080$ målinger.

Det ble foretatt målinger i følgende posisjoner (Tabell 6), der 0 m er ved tunnelinngangen i Sveio og tunnelutløpet i Føyno er ved 7860 m:

⁷ Dataloggingen i Bømlafjordtunnelen har fortsatt også etter dette tidspunktet.

⁸ Calc → Random data → Sample from Columns

Tabell 6 Oversikt over posisjoner og variabelnavn

| Sveio | Sta. 1 | Sta. 2 | Sta. 3 | Sta. 4a | Sta. 4 | Sta. 5 | Føyno |
|----------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|
| -30 m | 970 m | 2430 m | 3600 m | 4680 m | 4980 m | 6850 m | 7960 m |
| | CO-1 | CO-2 | CO-3 | | CO-4 | CO-5 | |
| | NO-1 | NO-2 | NO-3 | | NO-4 | NO-4 | |
| | STOV-1 | STOV-2 | STOV-3 | STOV-4 | | | |
| | VM-1 | | | | | | |
| TEMP-SVE | TEMP-1 | TEMP-2 | TEMP-3 | | TEMP-4 | TEMP-5 | TEMP-FOY |
| FUKT-SVE | FUKT-1 | FUKT-2 | FUKT-3 | | FUKT-4 | FUKT-5 | FUKT-FOY |

Rådata og ordnede data

Tabell 7 Oversikt rådata og ordnede data, treningsuker

| År | Uke | Dato | Rådata | Ordnet | Manglende data (mer enn 60) |
|-------------------|-----|---------------|--------|--------|---|
| 2001 | 48 | 26.11 – 02.12 | 10080 | 2016 | |
| 2002 | 03 | 14.01 – 20.01 | 10080 | 2016 | Fukt-Foyno hele uka |
| 2002 | 11 | 11.03 – 17.03 | 10080 | 2016 | Stov-4 hele uka Stov-3 fra 13.03 kl. 13:34 og ut uka |
| 2002 | 20 | 13.05 – 18.05 | 9827 | 1965 | Alle variablene 13.05 kl. 07:57 – 12:09 Temp-Foyno hele uka Stov-4 fra start t.o.m. 14.05 kl. 11:37 |
| 2002 | 28 | 08.07 – 13.07 | 9816 | 1963 | Alle variablene 13.07 kl. 08:04 – 12:27 VM-1 12:07 kl. 01:12 – 06:26 Stov-1 12:07 kl. 01:12 – 06:26 |
| 2002 | 35 | 26.08 – 01.09 | 10080 | 2016 | |
| 2001/02 seks uker | | | 59963 | 11992 | Se ovenfor for hver enkelt uke |

Dataene forelå i Excel-filer. Omfanget av manglende data ble vurdert, se Tabell 7. Konklusjonen ble at for treningsukene kunne de utvalgte ukene brukes. Ordning av data ble utført i MINITAB, release 13,0. CO og NO målingene ble glattet med *moving average* i MINITAB⁹ for å få samsvar med støvmålingene. Deretter ble hver 5. måling tatt ut¹⁰ (for alle variablene) for å redusere datamengda. Antall observasjoner ble da redusert fra 59963 til 11992.

Etter at dataene var ordnet, ble det utført dataanalyse i MINITAB release 13,0 og The Unscrambler v. 7.8. Det ble brukt sju datafiler, en for hver av de seks ukene og en for alle seks ukene samlet. Tabell 7 gir en oversikt over de ordnede dataene fra treningsukene som ble brukt i utregningene her.

⁹ Stat □ Time series □ Moving average, MA length 4 (4 minutters gjennomsnitt).

¹⁰ Utregninger viste at det var neglisjerbar forskjell på deskriptiv statistikk for hver variabel og korrelasjoner mellom variabler for de opprinnelige og de glattede dataene.

Måleresultater for hver variabel

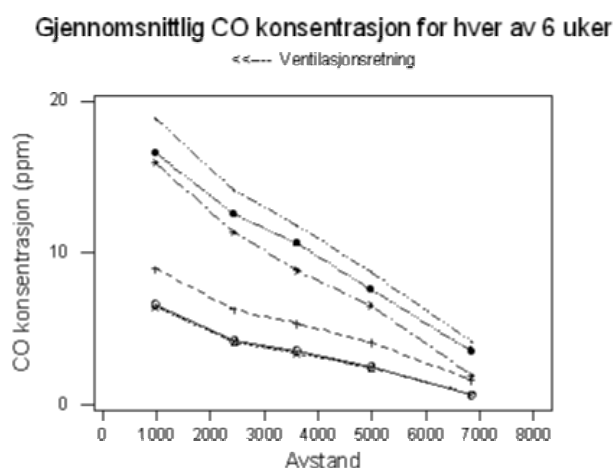
CO konsentrasjon

Deskriptiv statistikk for CO konsentrasjonen i alle målepunktene er vist i Tabell 8. Den gjennomsnittlige CO konsentrasjonen for hvert målepunkt er også framstilt grafisk i Figur 2, mens Figur 3 og Figur 4 viser døgn- og ukedagsfordelingen av CO konsentrasjon i målepunkt 1 og 2.

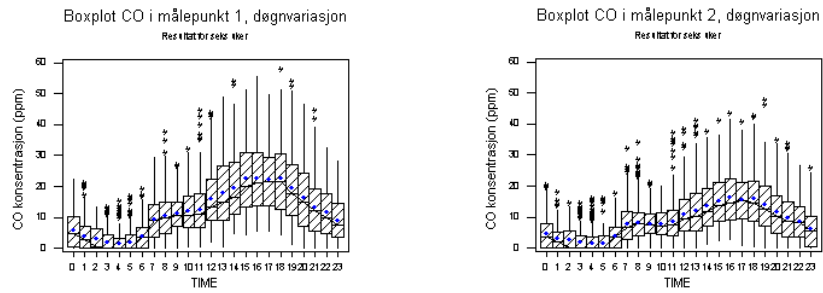
Tabell 8 Deskriptiv statistikk for CO konsentrasjon

| Uke - År | N | (ppm) | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | CO-5 |
|-----------|------|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 48 - 2001 | 2016 | \bar{x} | 6,62 | 4,22 | 3,56 | 2,53 | 0,70 |
| | | x_{max} | 32,9 | 24,1 | 18,4 | 15,2 | 8,83 |
| | | SD | 5,76 | 4,33 | 3,72 | 3,10 | 1,62 |
| 03 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 9,00 | 6,29 | 5,40 | 4,14 | 1,64 |
| | | x_{max} | 36,8 | 33,7 | 28,7 | 25,9 | 17,3 |
| | | SD | 7,74 | 5,90 | 5,15 | 4,40 | 2,95 |
| 11 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 6,47 | 4,16 | 3,41 | 2,46 | 0,73 |
| | | x_{max} | 34,8 | 28,8 | 24,1 | 20,9 | 16,5 |
| | | SD | 5,96 | 4,41 | 3,78 | 3,25 | 1,86 |
| 20 - 2002 | 1965 | \bar{x} | 15,95 | 11,42 | 8,88 | 6,56 | 1,98 |
| | | x_{max} | 49,6 | 39,1 | 35,6 | 31,7 | 23,5 |
| | | SD | 11,01 | 7,96 | 6,46 | 5,49 | 3,24 |
| 28 - 2002 | 1963 | \bar{x} | 18,94 | 14,17 | 11,86 | 8,78 | 4,19 |
| | | x_{max} | 56,1 | 47,7 | 39,1 | 33,4 | 27,1 |
| | | SD | 13,26 | 9,40 | 7,33 | 6,22 | 4,59 |
| 35 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 16,66 | 12,59 | 10,69 | 7,63 | 3,56 |
| | | x_{max} | 58,2 | 42,4 | 39,7 | 34,2 | 25,3 |
| | | SD | 11,39 | 8,03 | 6,46 | 5,58 | 3,97 |

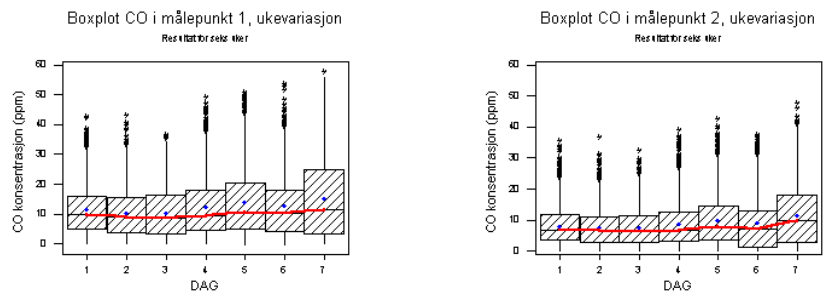
Gjennomsnitt (**uthevet**), maksimalverdi og standardavvik (*kursiv*)



Figur 2 Gjennomsnittlig CO konsentrasjon gjennom tunnelen

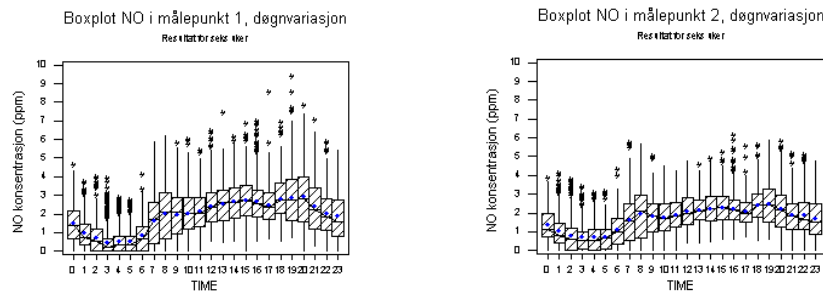


Figur 3 Boxplot¹¹ av døgnfordeling for CO konsentrasjon i målepunkt 1 og 2

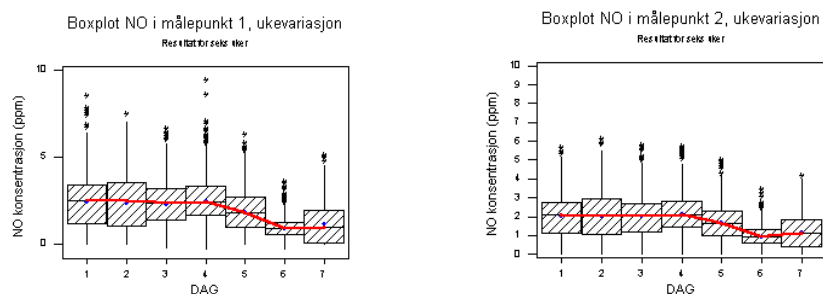


Figur 4 Boxplot av ukedagsfordeling¹² CO konsentrasjon, målepunkt 1 og 2

NO konsentrasjon



Figur 5 Boxplot av døgnfordeling for NO konsentrasjon, målepunkt 1 og 2



Figur 6 Boxplot av ukedagsfordeling NO konsentrasjon, målepunkt 1 og 2

¹¹ Boxplottene viser median (strek), gjennomsnitt (punkt), skravert boks fra 1. til 3. kvartil og outlier symbol (*) for hver time eller hvert døgn.

¹² Dag 1 er mandag, dag 2 tirsdag osv.

Døgn- og ukedagsfordelingen av NO konsentrasjon i målepunkt 1 og 2 er vist i Figur 5 og Figur 6. Deskriptiv statistikk for NO konsentrasjonen i alle målepunktene er vist i Tabell 9, den gjennomsnittlige NO konsentrasjonen for hvert målepunkt er også framstilt grafisk i Figur 7.

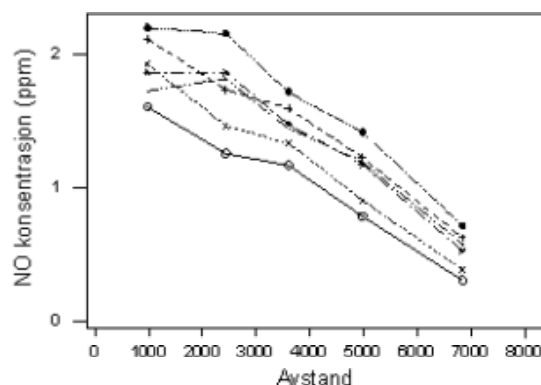
I vedlegg A finner man tidsrekker for hver variabel i målepunkt 1 for hver uke. Deskriptiv statistikk for CO og NO konsentrasjon og støv i alle målepunkter for alle de seks treningsukene samlet er presentert i vedlegg B.

Tabell 9 Deskriptiv statistikk for NO konsentrasjon

| Uke - År | N | (ppm) | NO-1 | NO-2 | NO-3 | NO-4 | NO-5 |
|-----------|------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 48 - 2001 | 2016 | \bar{x} | 1,61 | 1,26 | 1,17 | 0,79 | 0,31 |
| | | x_{max} | 9,43 | 5,12 | 4,75 | 4,21 | 3,05 |
| | | <i>SD</i> | <i>1,18</i> | <i>0,89</i> | <i>0,88</i> | <i>0,70</i> | <i>0,45</i> |
| 03 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 2,12 | 1,74 | 1,60 | 1,23 | 0,63 |
| | | x_{max} | 7,44 | 5,49 | 5,87 | 5,22 | 5,14 |
| | | <i>SD</i> | <i>1,51</i> | <i>1,17</i> | <i>1,15</i> | <i>0,98</i> | <i>0,78</i> |
| 11 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 1,93 | 1,48 | 1,34 | 0,91 | 0,39 |
| | | x_{max} | 8,59 | 6,17 | 5,36 | 4,73 | 3,49 |
| | | <i>SD</i> | <i>1,52</i> | <i>1,15</i> | <i>1,07</i> | <i>0,86</i> | <i>0,56</i> |
| 20 - 2002 | 1965 | \bar{x} | 1,87 | 1,87 | 1,48 | 1,18 | 0,53 |
| | | x_{max} | 6,24 | 5,79 | 5,55 | 5,43 | 4,15 |
| | | <i>SD</i> | <i>1,38</i> | <i>1,09</i> | <i>1,00</i> | <i>0,91</i> | <i>0,61</i> |
| 28 - 2002 | 1963 | \bar{x} | 1,73 | 1,82 | 1,45 | 1,20 | 0,58 |
| | | x_{max} | 5,94 | 4,86 | 4,82 | 4,57 | 3,42 |
| | | <i>SD</i> | <i>1,13</i> | <i>0,92</i> | <i>0,88</i> | <i>0,76</i> | <i>0,60</i> |
| 35 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 2,20 | 2,16 | 1,72 | 1,42 | 0,72 |
| | | x_{max} | 6,38 | 5,75 | 5,99 | 5,37 | 4,46 |
| | | <i>SD</i> | <i>1,50</i> | <i>1,20</i> | <i>1,10</i> | <i>0,99</i> | <i>0,73</i> |

Gjennomsnitt (**uthevet**), maksimalverdi og standardavvik (*kursiv*)

Gjennomsnittlig NO konsentrasjon for hver av 6 uker
 <<---- Ventilasjonstrening



Figur 7 Gjennomsnittlig NO konsentrasjon gjennom tunnelen

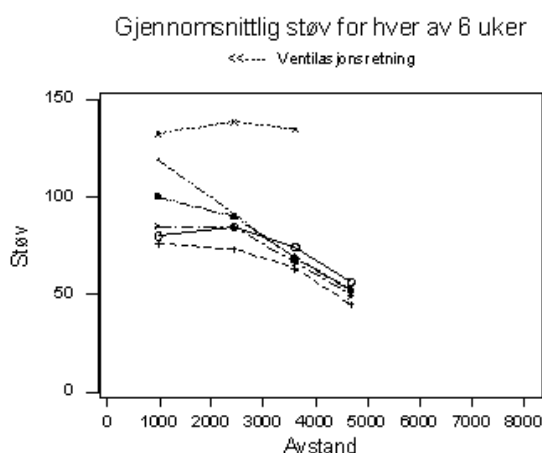
Støv

Deskriptiv statistikk for støvkonsentrasjon i alle målepunktene er vist i Tabell 10, den gjennomsnittlige støvkonsentrasjonen for hvert målepunkt er også framstilt grafisk i Figur 8. Døgn- og ukedagsfordelingen av støvkonsentrasjon i målepunkt 1 og 2 er vist i Figur 9 og Figur 10.

Tabell 10 Deskriptiv statistikk for støv

| Uke - År | N | ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Stov-1 | Stov-2 | Stov-3 | Stov-4 |
|-----------|--------------------|------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 48 - 2001 | 2016 | \bar{x} | 79,9 | 84,4 | 74,2 | 56,6 |
| | | x_{max} | 389 | 342 | 436 | 293 |
| | | SD | 48,8 | 54,2 | 49,9 | 43,0 |
| 03 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 76,0 | 73,4 | 63,5 | 45,0 |
| | | x_{max} | 302 | 259 | 380 | 288 |
| | | SD | 43,9 | 43,0 | 39,3 | 28,9 |
| 11 - 2002 | 2016 ¹³ | \bar{x} | 132,4 | 138,5 | 134,7 | * |
| | | x_{max} | 539 | 673 | 653 | * |
| | | SD | 79,9 | 92,1 | 99,4 | * |
| 20 - 2002 | 1965 ¹⁴ | \bar{x} | 85,1 | 84,7 | 66,4 | 49,9 |
| | | x_{max} | 269 | 232 | 192 | 171 |
| | | SD | 48,1 | 43,9 | 36,8 | 30,1 |
| 28 - 2002 | 1963 ¹⁵ | \bar{x} | 119,0 | 91,4 | 68,8 | 52,7 |
| | | x_{max} | 670 | 365 | 376 | 288 |
| | | SD | 81,1 | 46,3 | 39,6 | 31,1 |
| 35 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 100,0 | 89,8 | 68,9 | 52,0 |
| | | x_{max} | 426 | 396 | 400 | 231 |
| | | SD | 59,9 | 47,2 | 41,5 | 32,6 |

Gjennomsnitt (**uthevet**), maksimalverdi og standardavvik (*kursiv*)

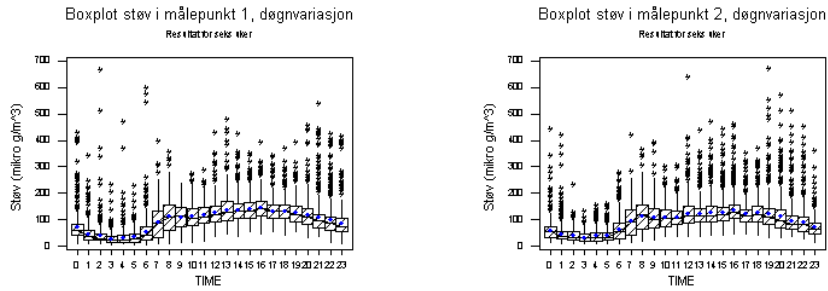


Figur 8 Gjennomsnittlig støvkonsentrasjon gjennom tunnelen

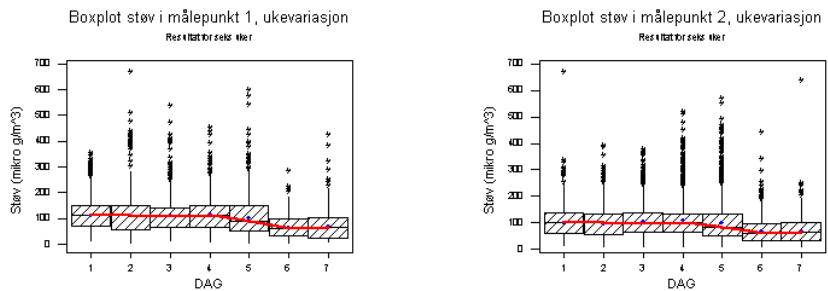
¹³ Stov-3 hadde 738 målinger i uke 11 i 2002, Stov-4 manglet denne uka.

¹⁴ Stov-4 hadde 1588 målinger i uke 20 i 2002.

¹⁵ Stov-1 hadde 1898 målinger i uke 28 i 2002.



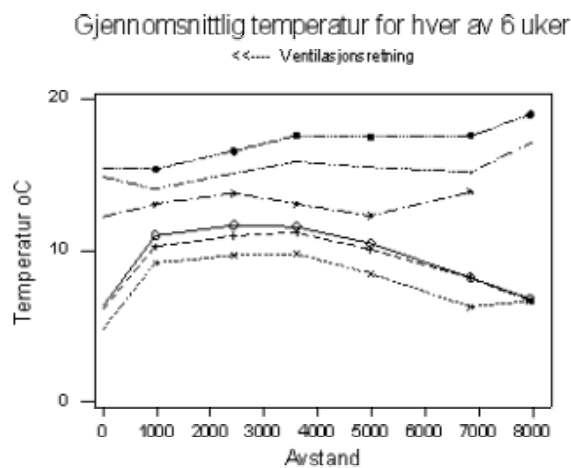
Figur 9 Boxplot av døgfordeling av støv i målepunkt 1 og 2



Figur 10 Boxplot av ukedagsfordeling av støv i målepunkt 1 og 2

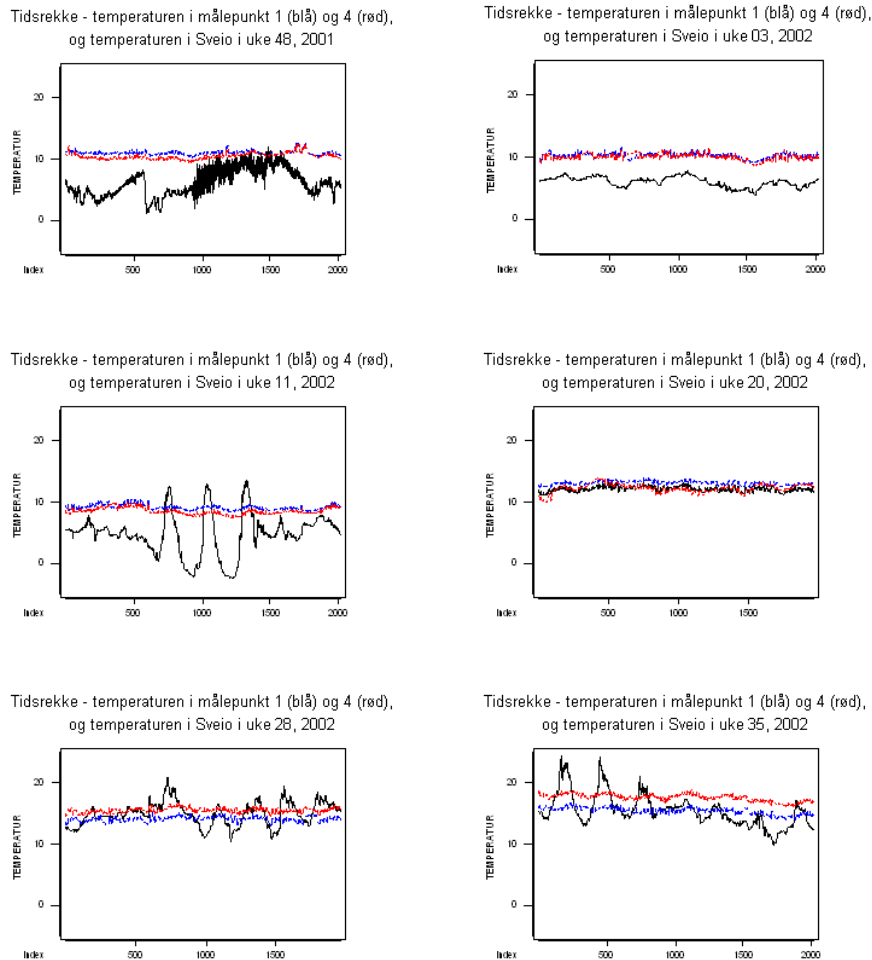
Temperatur

Den gjennomsnittlige temperaturen for hvert målepunkt inne i tunnelen og utenfor i Sveio og i Føyno er framstilt grafisk i Figur 11. I vedlegg B finner man deskriptiv statistikk for temperatur i alle målepunktene for hver uke.



Figur 11 Gjennomsnittlig temperatur gjennom tunnelen¹⁶

¹⁶ Her er målingene i Sveio (30 m før tunnelen) og Føyno (100 m etter tunnelen) med.



Figur 12 Tidsrekker for temperatur i målepunkt 1 og 4, og utenfor i Sveio¹⁷

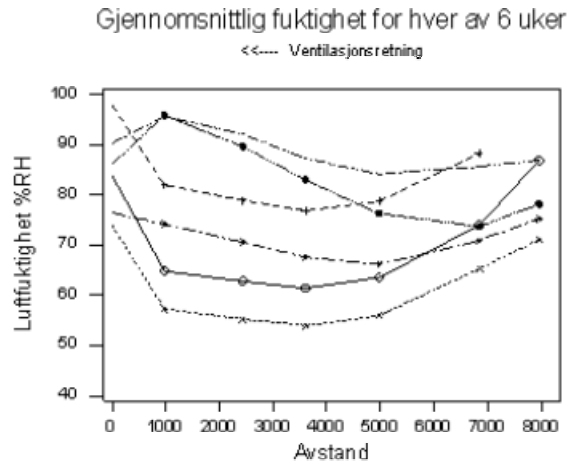
I ukene 48 (november), 3 (januar) og 11 (mars) var gjennomsnitts - temperaturen *høyere* inni enn utenfor tunnelen, se Figur 11 og Figur 12. Temperaturen varierte mer utenfor enn inne i tunnelen, og enkelte døgn var det stor variasjon i temperaturen i Sveio (Figur 12). I ukene 20 (mai), 28 (juli) og 35 (august) var gjennomsnittstemperaturen inni tunnelen omtrent den samme som utenfor. I uke 20 var det liten variasjon i temperaturen, i ukene 28 og 35 var døgnvariasjonen i Sveio tydeligere. I uke 3, uke 28 og uke 35 fant man også betydelig større temperaturvariasjon i målepunkt 3 enn i de andre målepunktene inne i tunnelen.

Luftfuktighet

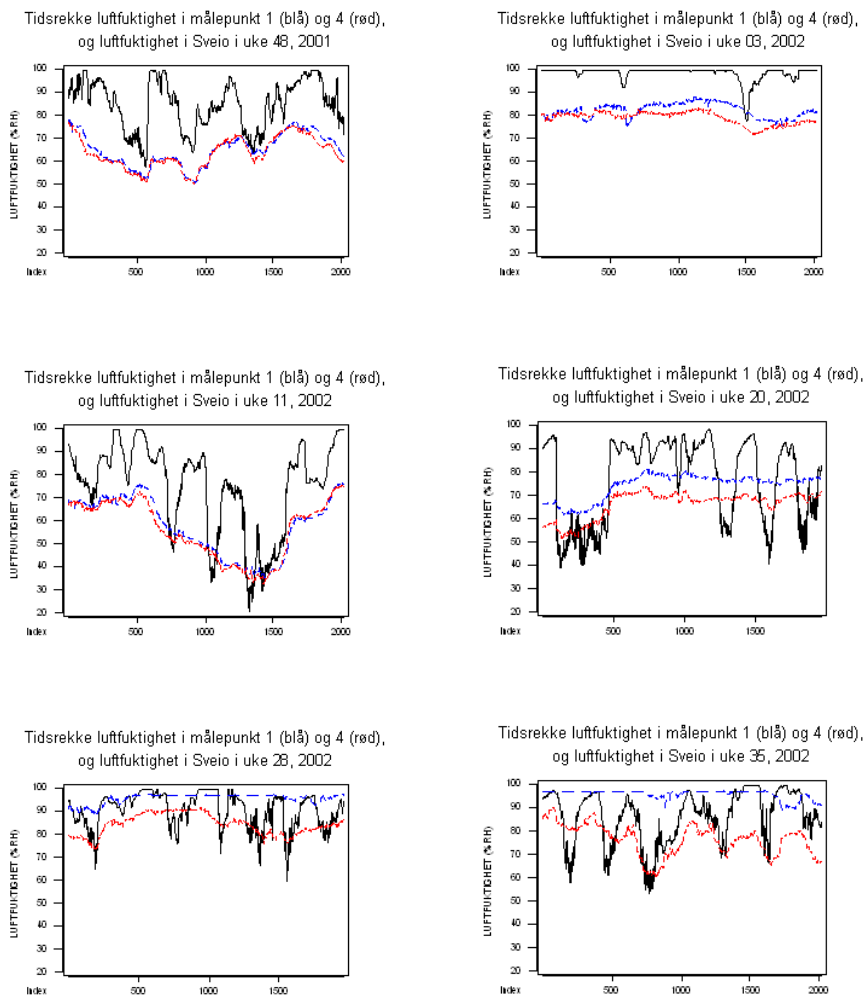
I vedlegg B finner man deskriptiv statistikk for luftfuktighet for hver uke. I ukene 48 (november), 3 (januar), 11 (mars) og 20 (mai) var gjennomsnitts - fuktigheten *lavere* inni enn utenfor tunnelen¹⁸, se Figur 13 og Figur 14, i ukene 28 (juli) og 35 (august) om lag samme gjennomsnitt som utenfor.

¹⁷ 1 enhet = 5 minutter. 288 enheter = 1 døgn. 2016 enheter = 1 uke.

¹⁸ For luftfuktighet er også målingene i Sveio og Føyno tatt med.



Figur 13 Gjennomsnittlig luftfuktighet gjennom tunnelen



Figur 14 Tidsrekker for fuktighet i målepunkt 1 og 4, og utenfor i Sveio

I uke 28 og 35 var luftfuktigheten tydelig voksende i ventilasjonsretningen. Samtidig var luftfuktigheten høy, 88 – 97 % RH hele uka, og litt høyere i målepunkt 1 enn utenfor tunnelen i Sveio.

I vedlegg A er det vist tidsrekker for hver variabel i målepunkt 1 for hver uke. Tidsrekkene for luftfuktighet skilte seg ut fra de andre. For CO, NO, støv, temperatur og vindfart kan en i større eller mindre grad se en døgnvariasjon med trafikken, minst tydelig for temperatur. Luftfuktighet viste imidlertid ikke et slikt mønster, den så ut til å ”leve sitt eget liv”.

Vindfart og styrt ventilasjon

Deskriptiv statistikk for antall vifter i drift i tunnelen og for vindfarten i målepunkt 1 er presentert i Tabell 11. Døgn- og ukedagsfordelingen er vist i Figur 15. Trenden var at vindfarten økte når flere vifter ble satt i drift (Figur 16), korrelasjonen mellom vindfart og antall vifter var 0,686. Vindfarten ble imidlertid også påvirket av trafikken, bildet var ikke entydig. Store vogntog i motsatt kjøreretning i forhold til ventilasjonsretningen har vist seg å ha stor innvirkning på vindfarten og krever mange vifter i drift¹⁹.

Tabell 11 Deskriptiv statistikk for vifter i drift og vindfart

| Uke - År | N | | Antall vifter | Vindfart (cm/s) |
|------------------|--------------------|-----------|---------------|-----------------|
| 48 – 2001 | 2016 | \bar{x} | 8,4 | 245 |
| | | x_{max} | 42 | 511 |
| | | <i>SD</i> | 7,1 | 88,6 |
| 03 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 5,5 | 173 |
| | | x_{max} | 42 | 506 |
| | | <i>SD</i> | 6,3 | 94,6 |
| 11 - 2002 | 2016 | \bar{x} | 10,3 | 245 |
| | | x_{max} | 42 | 516 |
| | | <i>SD</i> | 8,5 | 90,5 |
| 20 - 2002 | 1965 ²⁰ | \bar{x} | 5,9 | 147 |
| | | x_{max} | 24 | 433 |
| | | <i>SD</i> | 5,7 | 81,3 |
| 28 - 2002 | 1963 ²¹ | \bar{x} | 9,3 | 172 |
| | | x_{max} | 42 | 482 |
| | | <i>SD</i> | 7,7 | 100,3 |
| 35 - 2002 | 2016 ²² | \bar{x} | 7,8 | 157 |
| | | x_{max} | 42 | 438 |
| | | <i>SD</i> | 6,3 | 81,3 |

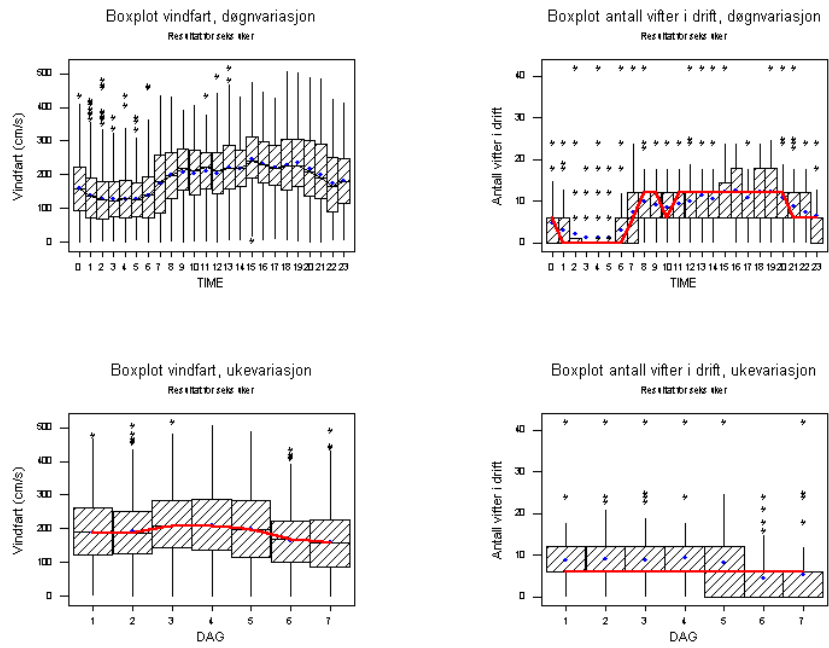
Gjennomsnitt (**uthevet**), maksimalverdi og standardavvik (*kursiv*)

¹⁹ I ett spesielt tilfelle som ikke er med i disse seks ukene, kom det ca. 70 vogntog mot ventilasjonsretningen samme kveld. 40 vifter var i drift for å holde en vindfart på 2,5 m/s.

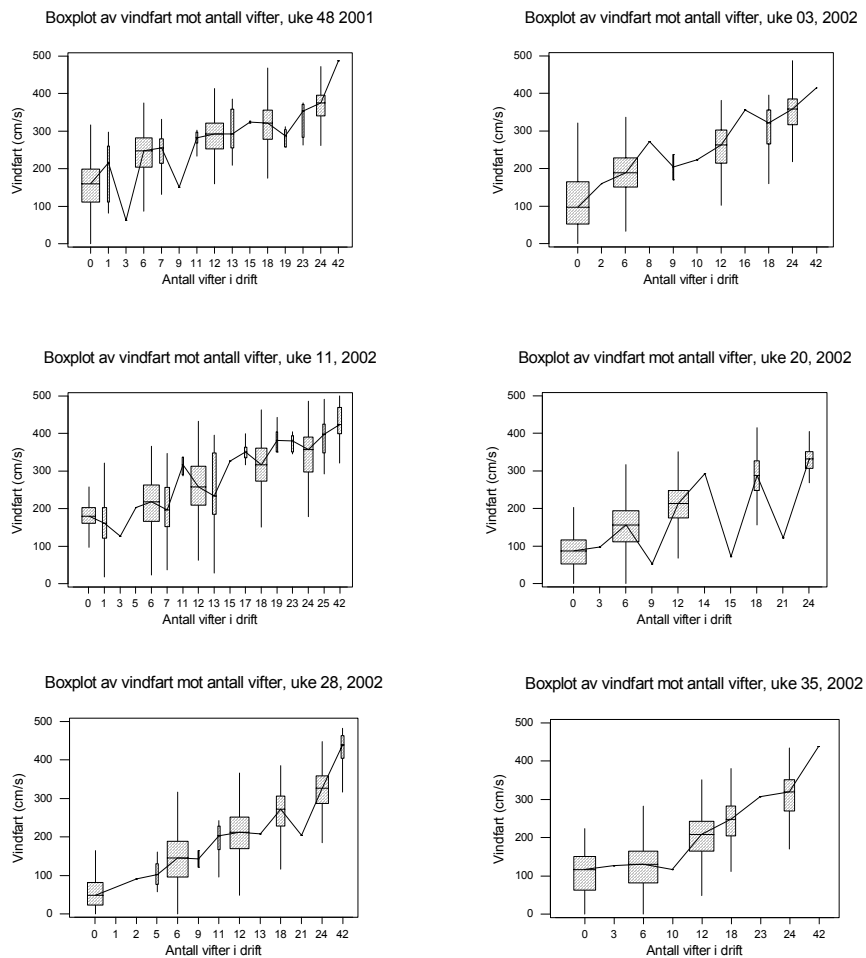
²⁰ Vindfart hadde 1963 målinger i uke 20 i 2002.

²¹ Vindfart hadde 1900 målinger i uke 28 i 2002.

²² Vindfart hadde 2012 målinger i uke 35 i 2002



Figur 15 Boxplot av døg- og ukedagsfordeling for vindfart og vifter



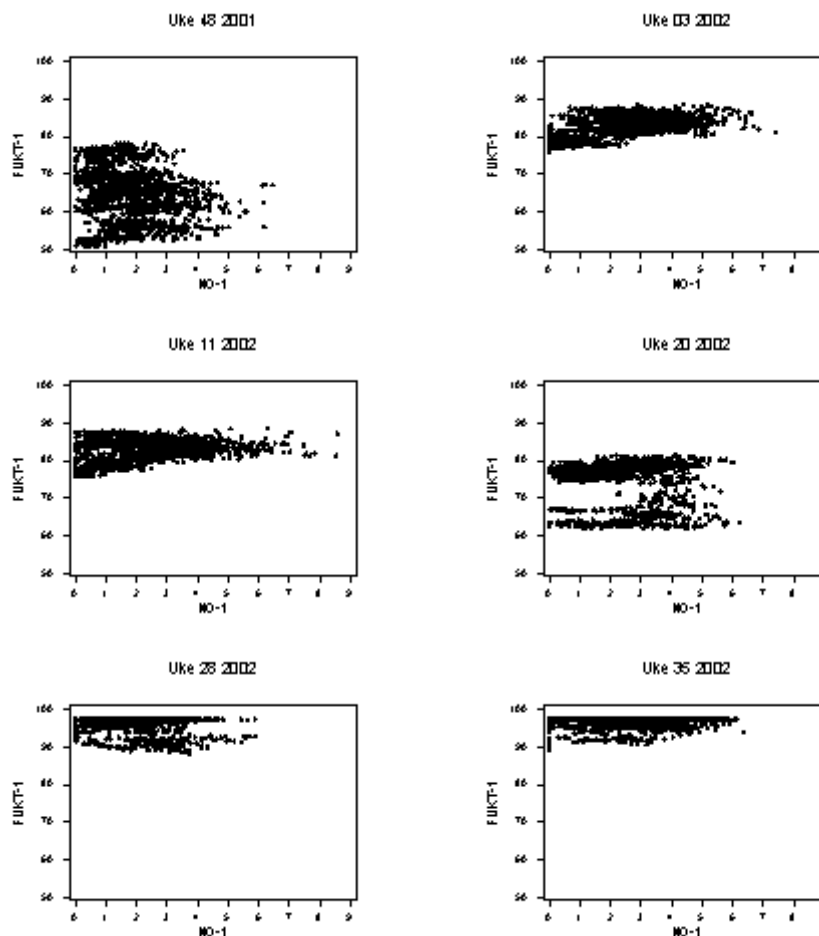
Figur 16 Boxplott av vindfarten mot antall vifter i drift i tunnelen

Samvariasjon mellom variabler

Luftfuktighet, temperatur, CO og NO

NO målerne er innstilt slik at det blir kompensert for luftfuktighet. Det ble derfor ingen tydelig sammenheng mellom luftfuktighet og NO konsentrasjon, se Figur 17. I vedlegg B ser en at korrelasjonene mellom CO og fuktighet og mellom NO og fuktighet for hver uke var varierende, positive, negative eller nær null.

Tabell 12 viser korrelasjonene mellom luftfuktighet i alle målepunkter og NO og CO i målepunktene 1 – 4 for alle seks ukene samlet. Korrelasjonene mellom fuktighet i målepunktene inne i tunnelen og CO eller NO i målepunkt 1 – 4 var svakt positive eller nær null, dvs. det var liten sammenheng mellom disse variablene. Se vedlegg B for resultater for enkeltuker. I Tabell 12 er det tatt med korrelasjoner mellom luftfuktighet inne i og utenfor tunnelen og antall vifter i drift. For hele seks ukers perioden var disse korrelasjonene svakt negative eller nær null.



Figur 17 Plott av luftfuktighet mot NO i målepunkt 1

Tabell 12 Korrelasjoner mellom fuktighet, CO, NO og vifter

| | NO-1 | NO-2 | NO-3 | NO-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | Vifter |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| FUKT-SVEIO | -0,08 | -0,06 | -0,05 | -0,01 | -0,13 | -0,11 | -0,06 | -0,05 | -0,218 |
| FUKT-1 | 0,094 | 0,235 | 0,154 | 0,214 | 0,395 | 0,430 | 0,448 | 0,400 | -0,069 |
| FUKT-2 | 0,084 | 0,222 | 0,145 | 0,206 | 0,361 | 0,399 | 0,420 | 0,378 | -0,077 |
| FUKT-3 | 0,079 | 0,208 | 0,141 | 0,202 | 0,334 | 0,371 | 0,394 | 0,357 | -0,092 |
| FUKT-4 | 0,043 | 0,145 | 0,101 | 0,156 | 0,244 | 0,278 | 0,303 | 0,282 | -0,126 |
| FUKT-5 | -0,01 | 0,020 | 0,014 | 0,049 | 0,055 | 0,072 | 0,095 | 0,102 | -0,173 |
| FUKT-FOYN | -0,15 | -0,13 | -0,13 | -0,09 | -0,19 | -0,16 | -0,12 | -0,11 | -0,220 |

Cell Contents: Pearson correlation

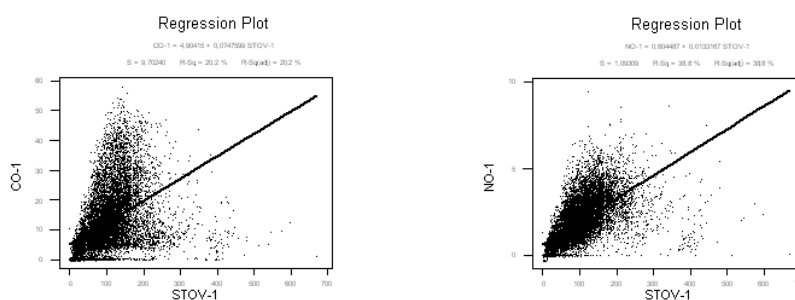
Tabell 13 Korrelasjoner mellom temperatur, CO, NO og vifter

| | NO-1 | NO-2 | NO-3 | NO-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | Vifter |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| TEMP-SVEIO | 0,132 | 0,288 | 0,171 | 0,227 | 0,515 | 0,541 | 0,533 | 0,472 | 0,066 |
| TEMP-1 | 0,087 | 0,259 | 0,146 | 0,234 | 0,438 | 0,480 | 0,489 | 0,438 | -0,025 |
| TEMP-2 | 0,063 | 0,238 | 0,130 | 0,215 | 0,423 | 0,466 | 0,477 | 0,423 | -0,031 |
| TEMP-3 | 0,058 | 0,195 | 0,106 | 0,180 | 0,354 | 0,391 | 0,404 | 0,359 | -0,011 |
| TEMP-4 | 0,074 | 0,241 | 0,140 | 0,223 | 0,429 | 0,472 | 0,489 | 0,433 | -0,003 |
| TEMP-5 | 0,067 | 0,245 | 0,141 | 0,216 | 0,494 | 0,530 | 0,534 | 0,481 | -0,020 |
| TEMP-FOYN | 0,131 | 0,290 | 0,175 | 0,230 | 0,542 | 0,567 | 0,560 | 0,498 | 0,106 |

Cell Contents: Pearson correlation

Tabell 13 viser korrelasjonene mellom temperatur i alle målepunkter og NO og CO i målepunkt 1 – 4 for alle seks ukene samlet. Korrelasjonene mellom NO i målepunkt 1 og temperatur for hver av de seks ukene er presentert i vedlegg B. Korrelasjonene varierte ganske mye fra uke til uke, og var positive, negative eller nær null. Det var likevel en overvekt av positive korrelasjoner, slik som Tabell 13 viser for alle seks ukene samlet.

CO, NO og støv



Figur 18 Plott av CO og NO mot støv i målepunkt 1

Figur 18 viser plott av CO og NO mot støv i målepunkt 1, med regresjonslinjer²³. Her ble det brukt data for seks uker. Pearson korrelasjonskoeffisient for CO og støv var 0,450, for NO og støv 0,623 (Tabell 14).

²³ Likninger for regresjonslinjene:

$$\text{CO-1} = 4,90415 + 0,0747599 \text{ STOV-1}$$

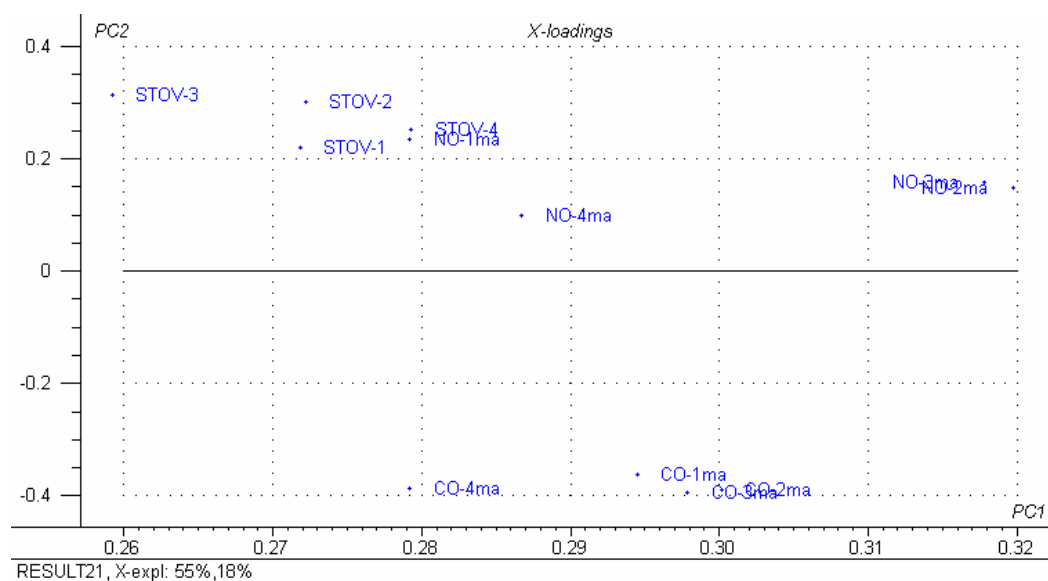
$$\text{NO-1} = 0,604487 + 0,0133167 \text{ STOV-1}$$

Det var stor spredning om regresjonslinjene, spesielt for CO og støv. En lineær regresjonsmodell passet ikke særlig godt til disse dataene. Korrelasjonskoeffisienter mellom CO, NO og støv for målepunkt 1 – 4 for alle seks ukene er presentert i Tabell 14. Korrelasjonene i tabellen var alle positive og signifikant forskjellige fra null. I vedlegg B er det også presentert korrelasjoner for de samme variablene for hver av treningsukene.

Tabell 14 Korrelasjoner mellom CO, NO og støv, målepunkt 1 – 4

| | Stov-1 | Stov-2 | Stov-3 | Stov-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | NO-1 | NO-2 | NO-3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Stov-2 | 0,745 | | | | | | | | | | |
| Stov-3 | 0,547 | 0,773 | | | | | | | | | |
| Stov-4 | 0,506 | 0,743 | 0,834 | | | | | | | | |
| CO-1 | 0,450 | 0,350 | 0,282 | 0,372 | | | | | | | |
| CO-2 | 0,390 | 0,357 | 0,294 | 0,383 | 0,927 | | | | | | |
| CO-3 | 0,351 | 0,311 | 0,326 | 0,420 | 0,848 | 0,911 | | | | | |
| CO-4 | 0,305 | 0,269 | 0,283 | 0,481 | 0,764 | 0,814 | 0,879 | | | | |
| NO-1 | 0,623 | 0,549 | 0,455 | 0,428 | 0,425 | 0,359 | 0,306 | 0,245 | | | |
| NO-2 | 0,537 | 0,564 | 0,496 | 0,476 | 0,485 | 0,523 | 0,471 | 0,390 | 0,810 | | |
| NO-3 | 0,493 | 0,519 | 0,569 | 0,562 | 0,417 | 0,449 | 0,501 | 0,424 | 0,656 | 0,830 | |
| NO-4 | 0,393 | 0,404 | 0,452 | 0,626 | 0,365 | 0,399 | 0,442 | 0,519 | 0,498 | 0,653 | 0,804 |

Cell Contents: Pearson correlation. Korrelasjoner over 0,500 er markert.



Figur 19 PCA for CO, NO og støv i målepunkt 1 – 4

PCA står for Principal Component Analysis, og er en metode for ekstrahering av egenvektorer i et datasett (Esbensen et al., 1994). Ved å representere et datasett ved egenvektorer vil vi kunne fjerne datavariabler som korrelerer og dermed få et nytt datasett med lavere dimensjon, men med samme mengde informasjon som det opprinnelige settet.

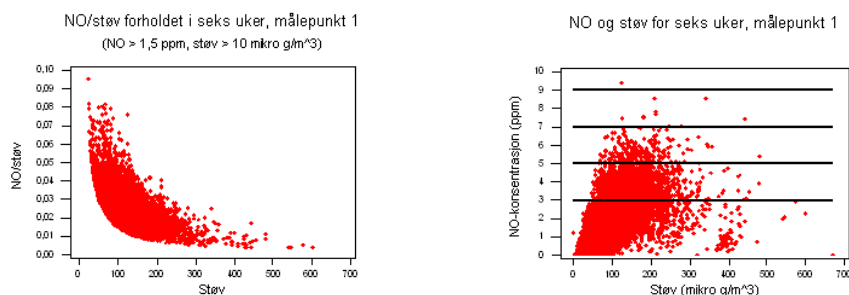
Her ble det utført PCA analyse for å finne ut om det er nok ”struktur” i datasettet til å lage brukbare modeller for en variabel basert på andre variabler. Ved PCA analysen ble de 12 variablene i Tabell 14 brukt. Resultatet ble at med 2 prinsipalkomponenter ble 73 % av variansen i datasettet forklart. Variabler med høy korrelasjon vil ha en tendens til å ligge nær hverandre på loading plottet (Figur 19).

NO/støv

NO/støv er mest interessant når støvverdiene ikke er nær null, her er det brukt måleverdier for alle tidspunkter der støv > 10 µg/m³. Videre er det bare brukt målinger der NO verdien > 1,5 ppm. Det ble brukt 1-sample t-konfidensintervall for forventet NO/støv i målepunkt 1, konfidensnivå 0,95. Av Tabell 15 ser en at 95 % konfidensintervall for NO/støv i målepunkt 1 for noen uker var ikke overlappende.

Tabell 15 Konfidensintervall for forventet NO/støv, målepunkt 1

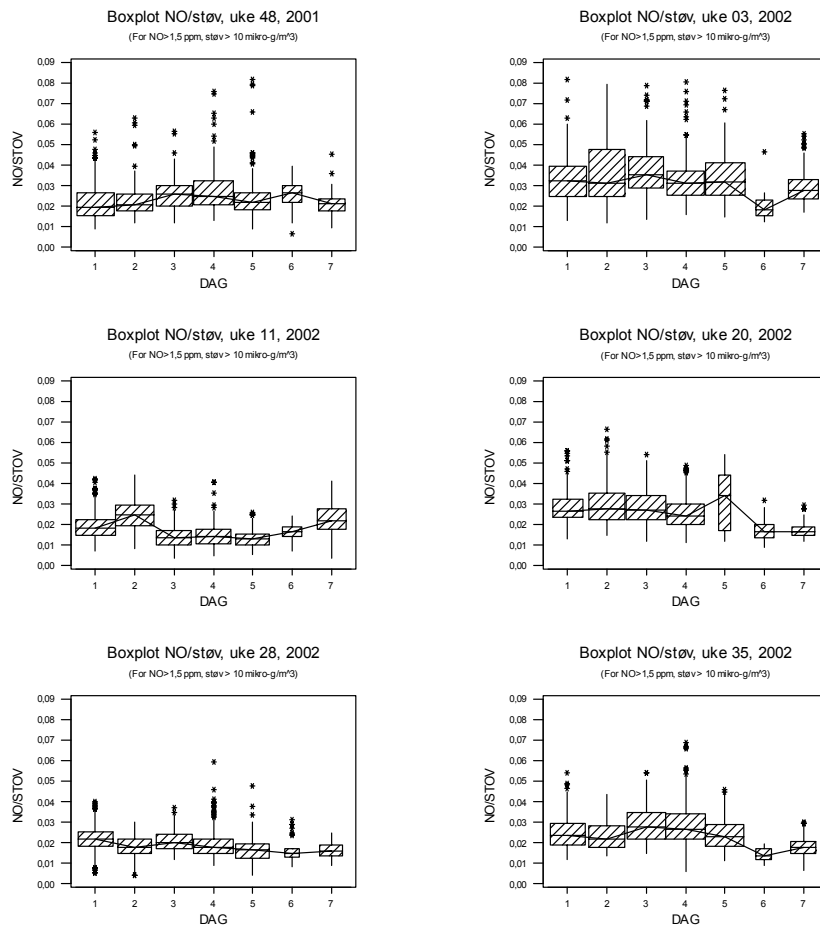
| Uke | År | N | Mean | StDev | 95,0% CI |
|------------------------|------|------|--------|--------|------------------------|
| 48, | 2001 | 996 | 0,0244 | 0,0093 | (0,0238;0,0250) |
| 03, | 2002 | 1278 | 0,0336 | 0,0122 | (0,0329;0,0343) |
| 11, | 2002 | 1129 | 0,0182 | 0,0075 | (0,0177;0,0186) |
| 20, | 2002 | 1041 | 0,0267 | 0,0094 | (0,0261;0,0273) |
| 28, | 2002 | 1097 | 0,0192 | 0,0063 | (0,0188;0,0195) |
| 35, | 2002 | 1346 | 0,0252 | 0,0092 | (0,0247;0,0257) |
| Alle seks ukene | | 6887 | 0,0248 | 0,0106 | (0,0245;0,0250) |



Figur 20 Plott av NO/støv-forholdet og NO mot støv, målepunkt 1

Figur 20 viser sammenhengen mellom NO/støv og støv i målepunkt 1, NO/støv minket og flatet ut når støvverdiene økte. Figur 20 viser også at på noen tidspunkter var NO forhøyet når støv hadde lav verdi. F. eks. forekom det at NO var over 5 ppm, mens støv hadde verdier ned mot 50 µg/m³.

Figur 21 viser ukedagsvariasjon i NO/støv. Det var færre tilfeller av støv > 10 µg/m³ og NO > 1,5 ppm lørdag/søndag enn andre dager. Ukedags - variasjonen hadde elles ikke noe klart ”mønster”.



Figur 21 Boxplot²⁴ av ukedagsfordeling for NO/støv, målepunkt 1

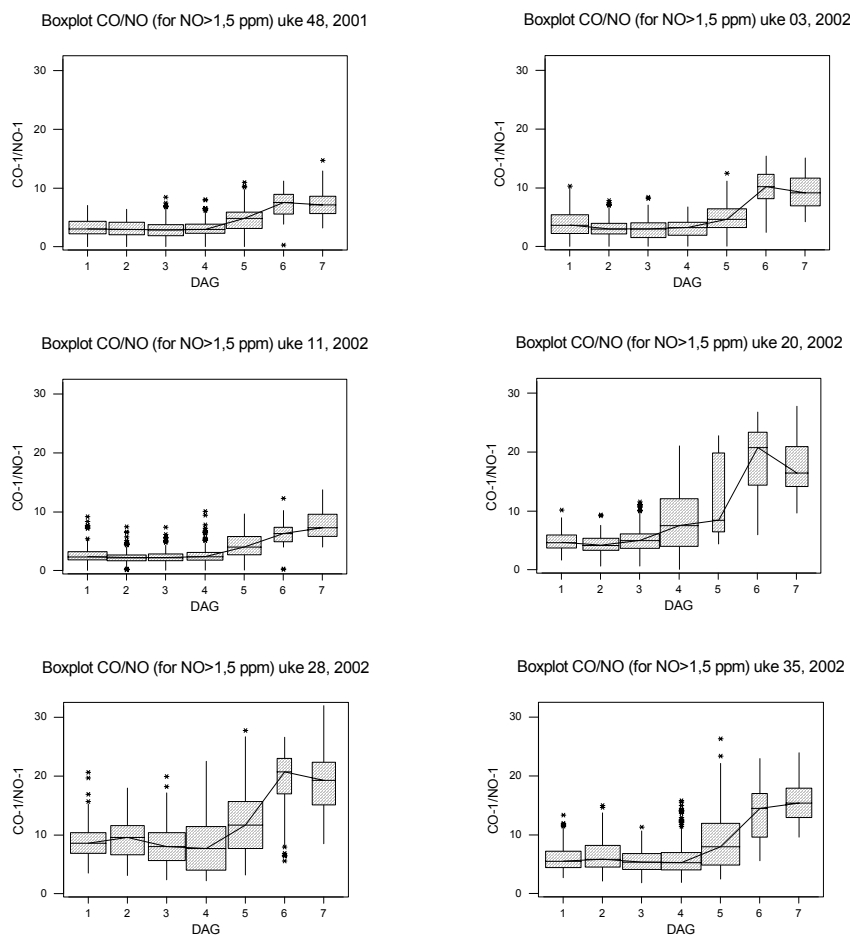
CO/NO forholdet

Dette forholdet er mest interessant når NO ikke er nær null, her er det brukt måleverdier for alle tidspunkter der $NO > 1,5$ ppm. Det ble brukt 1-sample t-konfidensintervall for forventet CO/NO i målepunkt 1, konfidensnivå 0,95. Av Tabell 16 ser en at 95 % konfidensintervall for CO/NO forholdet i målepunkt 1 for noen uker var ikke overlappende. Figur 22 viser at CO/NO forholdet hadde høyest median verdi lørdag og søndag og i uke 28 (juli).

Tabell 16 Konfidensintervall for forventet CO/NO, målepunkt 1

| Uke | År | N | Mean | StDev | 95,0% CI |
|------------------------|------|------|------|-------|---------------------|
| 48, | 2001 | 996 | 3,90 | 2,25 | (3,76; 4,04) |
| 03, | 2002 | 1278 | 4,35 | 3,07 | (4,18; 4,52) |
| 11, | 2002 | 1135 | 3,39 | 2,40 | (3,25; 3,53) |
| 20, | 2002 | 1041 | 7,48 | 5,74 | (7,13; 7,83) |
| 28, | 2002 | 1106 | 10,3 | 5,39 | (9,93; 10,57) |
| 35, | 2002 | 1346 | 7,50 | 4,27 | (7,27; 7,73) |
| Alle seks ukene | | 6902 | 6,16 | 4,74 | (6,05; 6,27) |

²⁴ Her er bredden av boksen proporsjonal med antall observasjoner hvert døgn.



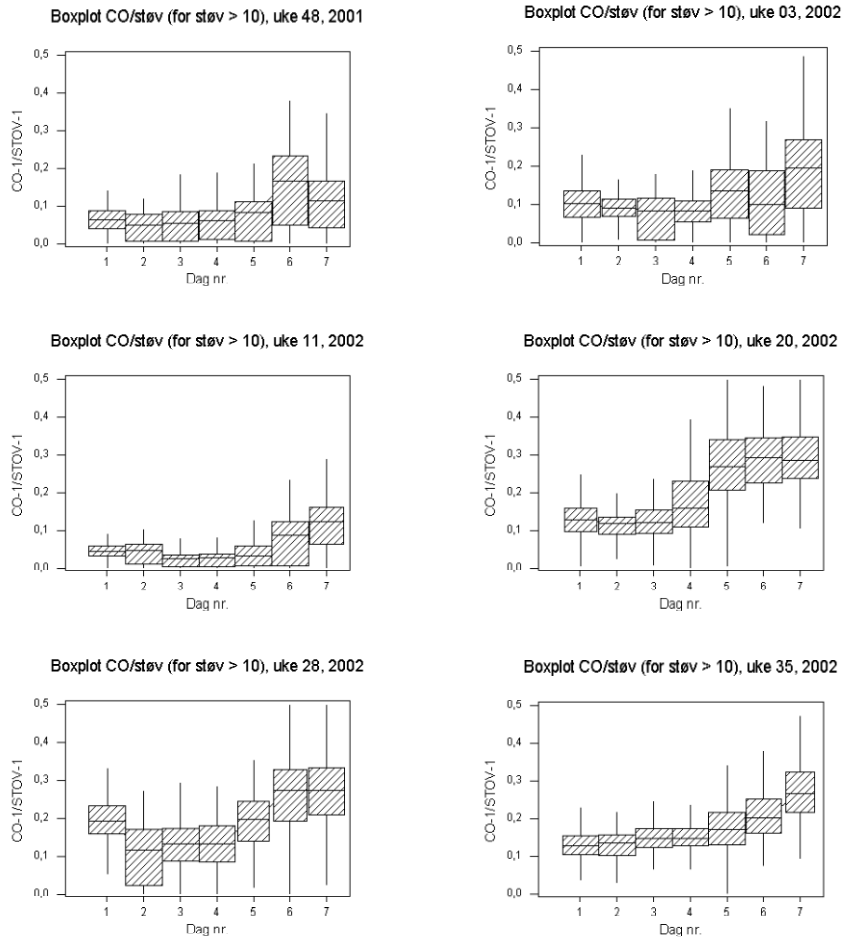
Figur 22 Boxplot av ukedagsfordeling for CO/NO, målepunkt 1

CO/støv

CO/støv er mest interessant når støv ikke er nær null, her er det brukt måleverdier for alle tidspunkter der støv $> 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Det ble brukt 1-sample t-konfidensintervall for forventet CO/støv i målepunkt 1, konfidensnivå 0,95. Av Tabell 17 ser en at 95 % konfidensintervall for CO/støv i målepunkt 1 for noen uker var ikke overlappende. Figur 23 viser at CO/støv også hadde høyest median verdi i helgene og i sommerukene.

Tabell 17 Konfidensintervall for forventet CO/støv, målepunkt 1

| Uke | N | Mean | StDev | 95,0% CI |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
| Uke 48, 2001 | 1978 | 0,081 | 0,077 | (0,077; 0,084) |
| Uke 03, 2002 | 1937 | 0,109 | 0,086 | (0,105; 0,113) |
| Uke 11, 2002 | 1974 | 0,050 | 0,050 | (0,048; 0,052) |
| Uke 20, 2002 | 1952 | 0,196 | 0,116 | (0,190; 0,201) |
| Uke 28, 2002 | 1884 | 0,179 | 0,102 | (0,174; 0,183) |
| Uke 35, 2002 | 1850 | 0,164 | 0,081 | (0,160; 0,168) |
| Alle seks ukene | 11575 | 0,129 | 0,103 | (0,127; 0,131) |



Figur 23 Boxplot²⁵ av ukedagsfordeling CO/støv, målepunkt 1

²⁵ Her er bredden av boksen proporsjonal med antall observasjoner hvert døgn.

Modeller for NO konsentrasjon

Modelleringsvariabler

Her skal man se på om NO i målepunkt 1 eller 2, der NO konsentrasjonen gjennomsnittlig er høyest, kan modelleres ut fra andre variabler. Dersom man kan finne en modell der NO kan beregnes ut fra andre variabler som blir målt i tunnelen, kan en kutte ut NO målerne. Dette forutsetter at modellen gir høy korrelasjon mellom målte og beregnede verdier for NO.

NO, CO og støv

Det var i hovedsak støvkonsentrasjonen som styrte viftene i tunnelen slik ventilasjonsstyringen var innstilt da målingene her ble utført. I hovedtrinn 1 kunne inntil 24 vifter startes ut fra støv: Start av

- 6 vifter ved $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$,
- 12 vifter ved $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- 18 vifter ved $225 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- 24 vifter ved $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

NO og CO målere inngikk også i ventilasjonsstyringen og økte derved sikkerheten for at grenseverdier for NO og CO ikke ble oversteget. Her skal en blant annet se på sammenhengen mellom NO og støv for å vurdere om NO målerne kan kuttet ut uten å få overskridelse av grenseverdiene for NO. I tunnelen har en utslipp fra forskjellige typer kjøretøyer, der forholdet mellom utslipp av CO, NO og støv kan variere. Måleresultatene viste klart positiv og signifikant korrelasjoner mellom NO og CO og mellom NO og støv i alle målepunkter. Korrelasjonen mellom NO i målepunkt 1 og CO i målepunkt 1 – 4 for seks uker samlet lå mellom 0,245 og 0,425, minkende med avstanden mellom målepunktene. I vedlegg B ser en at disse korrelasjonene varierte noe fra uke til uke, med markert lavere verdi i uke 20 enn i de andre ukene. Korrelasjonen mellom NO i målepunkt 1 og støv i målepunkt 1 – 4 var høyere enn for NO og CO, mellom 0,428 og 0,623. I vedlegg B ser en at disse korrelasjonene også varierte noe fra uke til uke. Både CO og støv er aktuelle variabler i forbindelse med modellering av NO i målepunkt 1. Alternativt kan en modellere NO i målepunkt 2, denne har nesten like høyt nivå som NO i målepunkt 1. Ved modelleringen kan en også bruke eventuelle andre typer sammenhenger enn de lineære.

NO og luftfuktighet

Luftfuktigheten i tunnelen har sammenheng med luftfuktigheten utenfor, men fuktigheten inne i tunnelen var gjennomgående noe lavere enn utenfor (vedlegg B). Korrelasjonen mellom NO og luftfuktighet i målepunkt 1 varierte fra $-0,277$ (uke 48, 2001) til $0,602$ (uke 03, 2002). De varierende, men vanligvis lave korrelasjonene har sammenheng med at NO målerne er innstilt slik at det blir kompensert for luftfuktighet. Ut fra dette er luftfuktighet uaktuell som variabel ved modellering av NO.

NO, temperatur og trafikk

Korrelasjonene mellom temperaturen utenfor tunnelen i Sveio og Føyne og inne i tunnelen var forbausende høy (0,746 – 0,921), se vedlegg B. I uke 35 (august 2002) var gjennomsnittstemperaturen i målepunkt 3 inne i tunnelen hele 17,6 °C (mot 15,4 °C i Sveio og 19,0 °C i Føyne). Dette har trolig sammenheng både med den styrte ventilasjonen og at trafikken påvirker temperaturen inne i tunnelen direkte. Når det er mye trafikk vil temperaturen inne i tunnelen øke, blant annet på grunn av utslipp av gasser ved høy temperatur. Mye trafikk i tunnelen vil også føre til mye støv i tunnelen som igjen fører til at viftene starter. Da vil luft utenfra bli trukket inn i tunnelen, og temperaturen inne i tunnelen vil bli påvirket av utetemperaturen. Dersom utelufta har lavere temperatur vil temperaturen inne i tunnelen da gå litt ned igjen, i motsatt fall kan den gå ytterligere opp.

Korrelasjonene mellom NO i målepunkt 1 og temperatur i målepunkt 1 – 4 lå mellom 0,058 og 0,087, mens korrelasjonene mellom NO i målepunkt 2 og temperatur i målepunkt 1 – 4 lå noe høyere, mellom 0,195 og 0,259. NO målerne skal være innstilt slik at det blir kompensert for temperaturen. En legger merke til at korrelasjonen mellom NO i målepunkt 1 og 2 og temperaturen i Sveio og Føyne utenfor tunnelen er høyere enn mellom de samme NO – verdier og temperaturen i målepunktene inne i tunnelen. Dette gjenspeiler trolig døgnvariasjonen i trafikken og i utetemperaturen. Ut fra dette er heller ikke temperatur en aktuell variabel ved modellering av NO konsentrasjon.

NO, vindfart og antall vifter i drift

Viftene ble startet når målte verdier for støv, eller eventuelt CO eller NO konsentrasjon, hadde for høy verdi i forhold til startkriterier som var satt på grunnlag av grenseverdier. Dette medførte at vindfarten hadde en tendens til å øke med økende NO. Dermed ble det en positiv korrelasjon mellom vindfart og NO, men årsakssammenhengen er at høy NO medfører økt vindfart (på grunn av ventilasjonen) og ikke omvendt. Isolert sett vil økt vindfart medføre at forurensningen blir blåst fortere ut av tunnelen og dermed gi nedgang i NO. Dette er argumenter for å holde vindfart og antall vifter i drift utenfor ved modelleringen av NO.

Oppsummering

Ved modellering av NO i målepunkt 1 eller 2 kan disse variablene brukes:

- Stov-1
- Stov-2
- Stov-3
- Stov-4
- CO-1
- CO-2
- CO-3
- CO-4

PLS1-modeller for NO basert på CO og støv

Modeller for NO i målepunkt 1

Det ble utført Partial Least Squares (PLS1) analyse (Esbensen et al., 1994) der modeller for NO i målepunkt 1 ble utvikla basert på variablene

- Stov-1
- Stov-2
- Stov-3
- Stov-4
- CO-1
- CO-2
- CO-3
- CO-4

Logaritmisk transformasjon av NO konsentrasjonen i målepunkt 1 ble vurderte, men $\log(\text{NO})$ ga lavere verdier for korrelasjonene med variablene på lista ovenfor enn NO konsentrasjonen sjøl. Logaritmisk transformasjon ble derfor ikke brukt. Ved utvikling av modeller ble det prøvd å utelate Stov-4 eller CO-4, dette ga litt lavere korrelasjoner mellom målte og beregnede verdier enn når en tok disse med. Inkludering av CO-5 ga også litt lavere korrelasjon mellom målte og beregnede verdier enn uten CO-5.

Det ble først utført modellering uten å ta med andre ordens kombinasjoner. Tabell 18 og Figur 24 viser resultatet av modellering av NO i målepunkt 1. Det ble utført modellering for hver uke, det er ikke dermed ikke samme modell for alle ukene, men modellene er alle basert på de samme variablene. En ser at resultatet ved modellering av NO for alle seks ukene samlet ble dårligere enn for hver enkelt uke (korrelasjonen var 0,69 mellom målte og beregnede verdier, mot 0,72 – 0,85 for hver enkelt uke). Dette har trolig sammenheng med endring i trafikkmønsteret fra vinter til sommer, med mindre tungtransport og mer personbiler om sommeren. Dette ga forskjell i forholdet mellom spesielt NO og CO i vinter- og sommeruker. Modelltypen kalles 1A og modellen for alle seks ukene samlet er modell 1A.

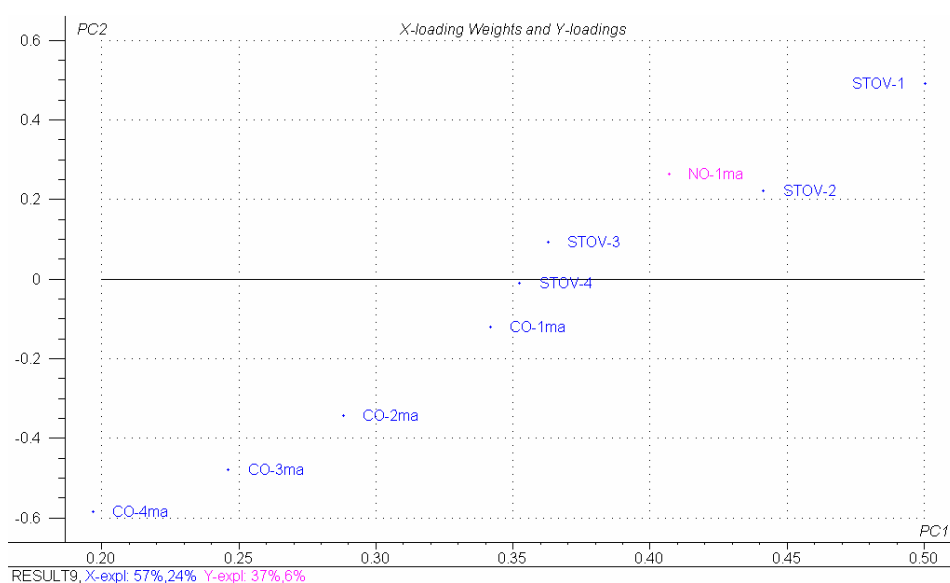
Ved PLS-1 modellering er det også mulig å legge inn andreordens kombinasjoner av modelleringsvariablene. Her ble ulike kombinasjoner prøvd, der en tok utgangspunkt i variablene som ble brukt i modell 1A og i tillegg brukte andre ordens kombinasjoner av disse. Den modelltypen (1B) som hadde færrest variabler og ga høyest korrelasjon mellom målte og beregnede NO konsentrasjoner i målepunkt 1 for alle seks ukene samlet hadde følgende andreordens kombinasjoner i tillegg til variablene fra modell 1A:

- Stov-1 · CO-1
- $(\text{Stov-1})^2$
- $(\text{Stov-2})^2$
- $(\text{CO-1})^2$

Tabell 19 viser resultatet for modelltype 1B. Spesielt for alle ukene samlet ble resultatet noe bedre enn for 1A (korrelasjon 0,76 mellom målte og beregnede verdier, for enkeltukene: 0,75 – 0,86), se Figur 25.

Tabell 18 PLS1-resultater for NO i målepunkt 1, modelltype 1A

| Uke | Forklart Y-varians (%) | | | | Korrelasjon ²⁶ | Kommentar |
|-----------|------------------------|-----|-----|-----|---------------------------|----------------------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | SUM | | |
| 48/2001 | 51 | 7 | 4 | 62 | 0,79 | |
| 03/2002 | 33 | 23 | 3 | 59 | 0,77 | |
| 11/2002 | 43 | 6 | 2 | 51 | 0,72 | Støv-4 manglet |
| 20/2002 | 48 | 20 | 4 | 72 | 0,85 | |
| 28/2002 | 44 | 12 | 3 | 59 | 0,77 | |
| 35/2002 | 43 | 15 | - | 58 | 0,76 | |
| Alle seks | 37 | 6 | 4 | 47 | 0,69 | 4 PC-er ble anbefalt |

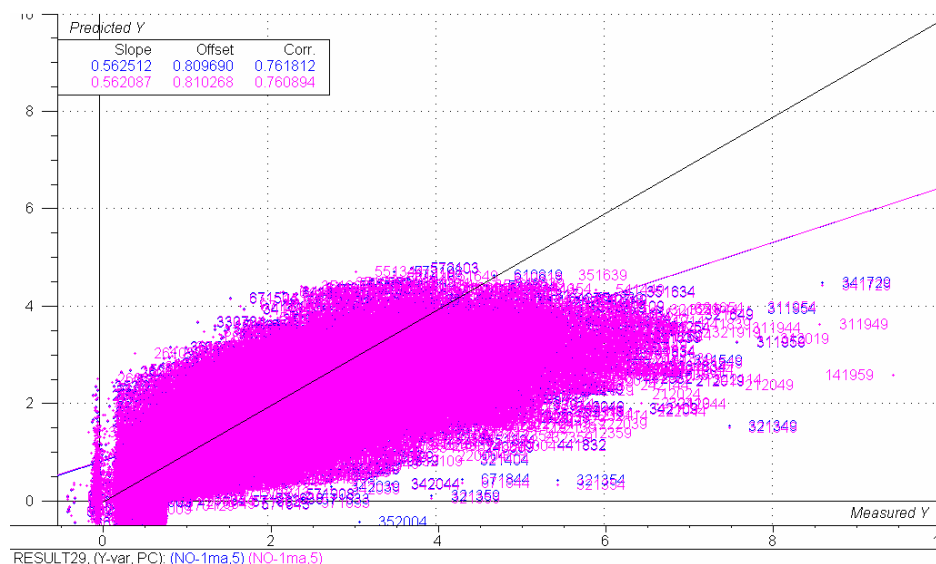


Figur 24 PLS1-resultat for NO i målepunkt 1, modell 1A

Tabell 19 PLS1-resultater for NO i målepunkt 1, modelltype 1B

| Uke | Forklart Y-varians (%) | | | | Korrelasjon | Kommentar |
|-----------|------------------------|-----|-----|-----|-------------|----------------------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | SUM | | |
| 48/2001 | 49 | 9 | 5 | 63 | 0,79 | |
| 03/2002 | 35 | 25 | 2 | 62 | 0,80 | |
| 11/2002 | 42 | 9 | 4 | 55 | 0,75 | Støv-4 manglet |
| 20/2002 | 51 | 14 | 7 | 72 | 0,86 | |
| 28/2002 | 46 | 14 | 6 | 66 | 0,82 | |
| 35/2002 | 51 | 13 | 5 | 69 | 0,82 | |
| Alle seks | 37 | 9 | 8 | 54 | 0,76 | 5 PC-er ble anbefalt |

²⁶ Korrelasjoner mellom målte NO-verdier og beregnede NO verdier etter modellen.



Figur 25 Plott av målt og beregnet NO med modell 1B for treningsukene

Modeller for NO i målepunkt 2

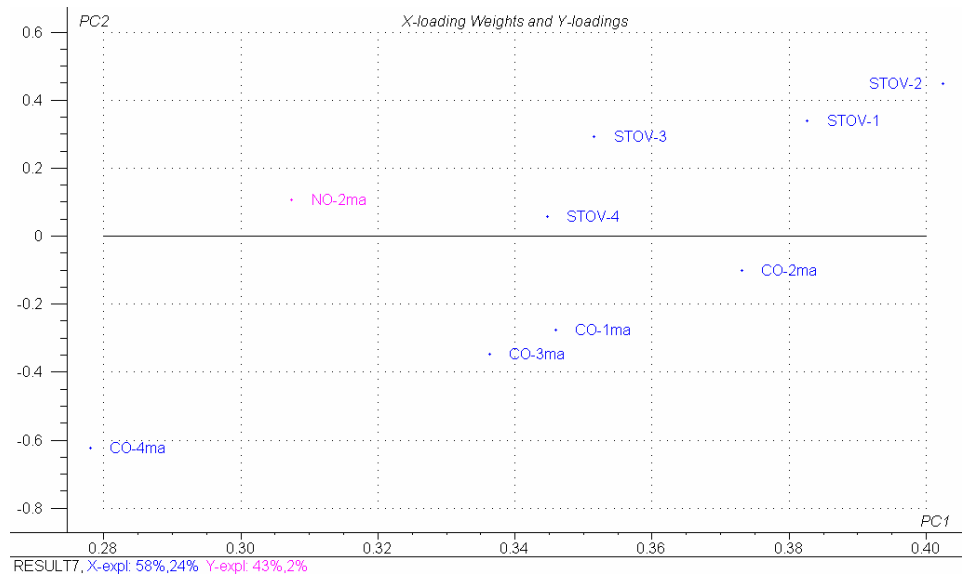
Det ble også gjort PLS1-analyse for NO konsentrasjon i målepunkt 2. Det ble brukt samme variabler som i målepunkt 1. Modelltypen basert på samme variabler som 1A kalles 2A, modellen for alle seks ukene samlet er modell 2A, se resultatene i Tabell 20 og Figur 26.

Det ble prøvd ulike modeller med andre ordens kombinasjoner av variablene som ble brukt i modelltype 2A. Den modellen som ga høyest korrelasjon mellom målte og beregnede NO konsentrasjoner i målepunkt 2 for alle seks ukene samlet hadde de samme andreordens kombinasjoner som i modelltype 1B (målepunkt 1). Modelltypen kalles 2B og modellen for alle seks ukene samlet er modell 2B, se resultatene i Tabell 21 og Figur 27. Andre ordens kombinasjoner i 2B:

- Stov-1*CO-1
- (Stov-1)²
- (Stov-2)²
- (CO-1)²

Tabell 20 PLS1-resultater for NO i målepunkt 2, modelltype 2A

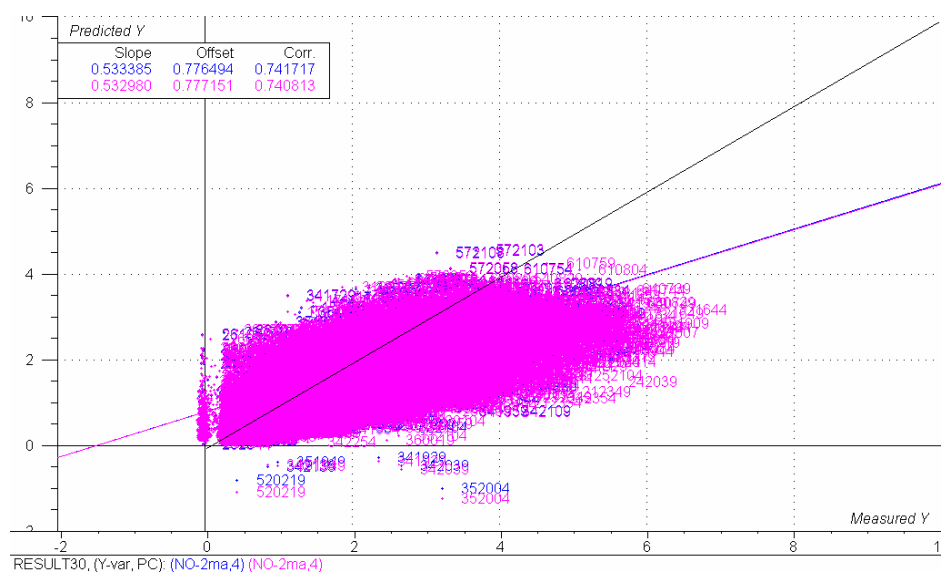
| Uke | Forklart Y-varians (%) | | | | Korrelasjon | Kommentar |
|-----------|------------------------|-----|-----|-----|-------------|----------------------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | SUM | | |
| 48/2001 | 53 | 3 | 2 | 58 | 0,76 | |
| 03/2002 | 35 | 9 | 2 | 46 | 0,69 | |
| 11/2002 | 43 | 4 | - | 47 | 0,68 | Støv-4 manglet |
| 20/2002 | 53 | 16 | 3 | 72 | 0,85 | |
| 28/2002 | 56 | 11 | 3 | 70 | 0,84 | |
| 35/2002 | 42 | 10 | 2 | 54 | 0,73 | |
| Alle seks | 43 | 2 | 2 | 47 | 0,70 | 4 PC-er ble anbefalt |



Figur 26 PLS1-resultater for NO i målepunkt 2, modell 2A

Tabell 21 PLS1-resultater for NO i målepunkt 2, modelltype 2B

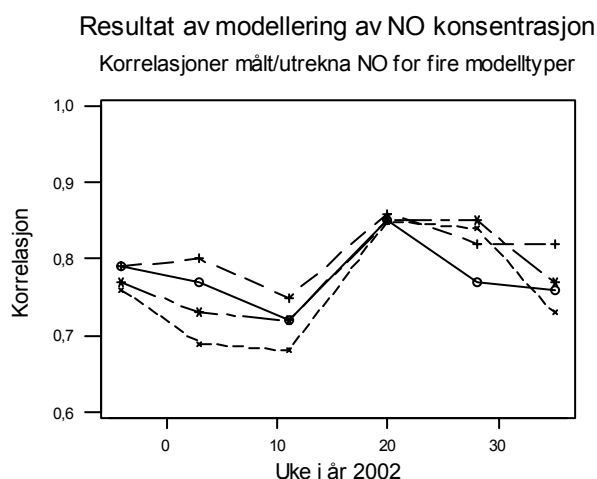
| Uke | Forklart Y-varians (%) | | | | Korrelasjon | Kommentar |
|-----------|------------------------|-----|-----|-----|-------------|----------------------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | SUM | | |
| 48/2001 | 51 | 6 | 2 | 59 | 0,77 | |
| 03/2002 | 37 | 13 | 3 | 53 | 0,73 | |
| 11/2002 | 43 | 8 | 2 | 53 | 0,72 | Støv-4 manglet |
| 20/2002 | 55 | 12 | 5 | 72 | 0,85 | |
| 28/2002 | 57 | 10 | 3 | 70 | 0,85 | |
| 35/2002 | 44 | 7 | 6 | 57 | 0,77 | |
| Alle seks | 43 | 6 | 4 | 53 | 0,74 | 4 PC-er ble anbefalt |



Figur 27 Plott av målt og beregnet NO med modell 2B for treningsukene

Vurdering av modellene

Ved sammenligning av modellene (1A, 1B, 2A og 2B) så en at modellene som inkluderte andreordens kombinasjoner av variabler ga best resultater. Dette gjaldt modeller for NO både i målepunkt 1 og 2 og det gjaldt både modellering for enkeltuker og for de seks ukene samlet. Modellering av NO i målepunkt 1 ved modell 1B (Tabell 19), ga samlet sett best resultat, med korrelasjon 0,76 mellom målte NO konsentrasjoner og beregnede verdier etter modellen for seks uker samlet. Et forsøk på automatisk fjerning av *outliers* ga en modell med litt høyere korrelasjon mellom målte og beregnede verdier (0,78 mot 0,76). Modell 1B og 2B (se vedlegg C) ga brukbare korrelasjoner mellom målte og beregnede verdier for alle treningsukene samlet. Disse modellene hadde likevel en vesentlig svakhet: For høye målte verdier av NO konsentrasjonen var tendensen at de beregnede NO verdiene ble for lave, se Figur 25 og Figur 27. En sammenligning av modelltyper for enkeltuker (Figur 28), basert på resultatene i Tabell 18 - Tabell 21, viser at for uke 20 ga alle modelltypene omtrent like godt resultat, mens modelltype 1B ga best resultat for alle ukene unntatt uke 28, da modelltype 2B var best. Vedlegg C viser regresjonskoeffisientene for modell 1B og 2B.



Figur 28 Sammenligning av fire modelltyper for de seks treningsukene

Det er to nærliggende forklaringer på for lave predikerte verdier ved høye målte NO verdier i treningsukene:

- For observasjoner med manglende data på en eller flere variabler vil The Unscrambler likevel regne ut predikerte verdier for modellen, manglende data blir erstattet av gjennomsnittsverdier. I treningsukene forekom manglende data på støv, for målepunkt 4 hele uke 11.
- Når forholdene i tunnelen innvirket slik på modelleringsvariablene som de gjorde på tidspunkter da NO i forholdsvis få tilfeller hadde høy verdi, var det i langt flere tilfeller lavere NO. De er de mange tilfellene som bestemmer hvordan modellen blir.

Dersom en i praktisk tunnelstyring skal erstatter NO målinger med beregnede NO verdier vil det være spesielt viktig å få varsel når NO verdien er for høy.

Testing av PLS1-modellene

Måleresultater for testukene

Testukene ble valgt ut samtidig med treningsukene. Data for testukene ble glattet, ordnet og vurdert. Tabell 22 viser manglende data for støv i målepunkt 1 i hele uke 13, i målepunkt 4 i både uke 7 og 13, og i målepunkt 2 og 3 i kortere perioder. Ingen av de andre variablene hadde manglende data i testukene. Disse ukene ble likevel brukt som testuker, det var 7673 observasjoner (av 12082) uten manglende data på noen modelleringsvariabel. Måleresultatene for testukene viste følgende gjennomsnittsverdier i målepunkt 1 for testukene (verdiene i treningsukene i parentes): CO – konsentrasjon 13,08 (12,2) ppm, NO konsentrasjon 1,71 (1,91) ppm, støv 113 (98,5) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, vindfart 203 (190) cm/s, antall vifter i drift 8,3 (7,9).

Tabell 22 Oversikt over testuker og ordnede måledata

| År | Uke | Dato | Antall | Manglende data |
|----------------------------|------------------|---------------|--------|---|
| 2001 | 52 | 24.12 – 30.12 | 2016 | |
| 2002 | 07 | 11.02 – 17.02 | 2014 | Stov-4 hele uka |
| 2002 | 13 ²⁷ | 25.03 – 31.03 | 2004 | Stov-1 og stov-4 hele uka Stov-3 25.03 kl. 00:00 – 07:44 |
| 2002 | 21 | 20.05 – 26.05 | 2016 | |
| 2002 | 25 | 17.06 – 23.06 | 2016 | Stov-1, stov-2, stov-3, stov-4: 17.06 kl. 17:59 – 18.06 kl. 04:32 og 18.06 kl. 17:54 – 19.06 kl. 05:56 |
| 2002 | 31 | 29.07 – 04.08 | 2016 | Feilmålinger for stov-1 i perioden 01.08 kl. 02:08 – 06:54 og 02.08 kl. 00:56 – 07:02 er erstattet med ”manglende data” (i alt 119) |
| 2001/2002 alle 6 testukene | | | 12082 | Se ovenfor for hver enkelt uke |

Testresultater

Tabell 23 Resultater for testukene (N = 12082), PLS1-modell 1A, 1B, 2A, 2B

| Modell | Gjennomsnitt NO ²⁸ | | Max | | Korrelasjon ²⁹ |
|--------|-------------------------------|-----------|------|-----------|---------------------------|
| | Målt | Predikert | Målt | Predikert | |
| 1A | 1,71 | 2,07 | 11,6 | 7,04 | 0,651 |
| 1B | 1,71 | 2,02 | 11,6 | 4,91 | 0,705 |
| 2A | 1,58 | 1,81 | 11,6 | 5,26 | 0,712 |
| 2B | 1,58 | 1,83 | 11,6 | 4,80 | 0,725 |

²⁷ Uke 13, 2002 var påskeuka.

²⁸ Modell 1A og 1B predikerer NO i målepunkt 1, modell 2A og 2B: NO i målepunkt 2.

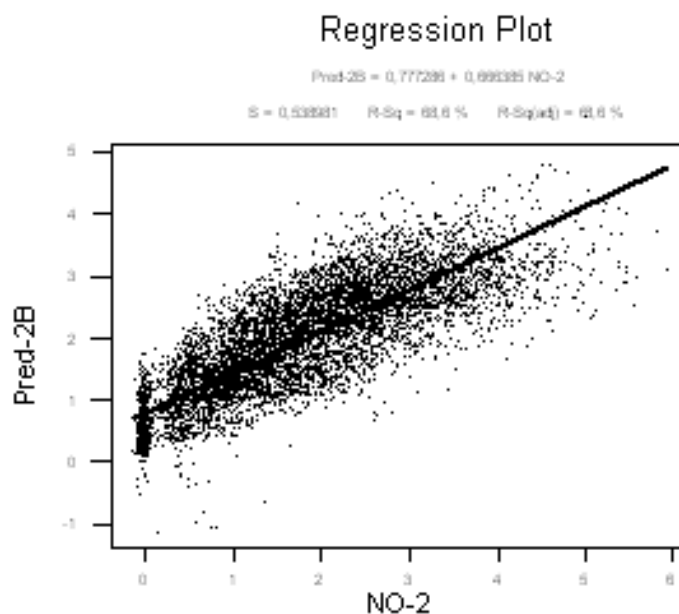
²⁹ Persons korrelasjonskoeffisient, korrelasjon mellom målte og predikerte verdier.

Resultater for testukene med alle observasjonene er vist i Tabell 23. I testukene var det manglende data for støv i minst ett målepunkt for 4409 av 12 082 observasjoner. For observasjoner med manglende data på en eller flere variabler vil The Unscrambler likevel regne ut predikerte verdier for modellen, manglende data blir erstattet av gjennomsnittsverdier. Dette vil ha en tendens til å gi for lave predikerte verdier.

Observasjonene med manglende data for minst en støvvariabel ble utelatt (hele uke 7 og uke 13 i 2002 og noen timer i uke 25 og 31). Alle PLS1 – modellene ble brukt på dette datasettet med de gjenværende 7673 observasjonene. Tabell 24 viser resultatet for modellene 1A og 1B (NO i målepunkt 1) og 2A og 2B (NO i målepunkt 2). Korrelasjonene mellom målte og beregnede verdier ble her høyere enn da observasjoner med manglende data på en eller flere støvvariabler ble tatt med. Det ble også bedre samsvar mellom maksimal målt og maksimal utregnet verdi. Figur 29 viser resultatet grafisk for modell 2B. Avvikene ser ut til å være tilfeldig fordelt langs regresjonslinja. Se vedlegg D for mer om testresultater.

Tabell 24 Resultater for testukene (N = 7673), PLS1-modell 1B og 2B

| Modell | Gjennomsnitt NO | | Max | | Korrelasjon |
|--------|-----------------|-----------|------|-----------|-------------|
| | Målt | Predikert | Målt | Predikert | |
| 1A | 1,72 | 2,13 | 7,12 | 7,04 | 0,725 |
| 1B | 1,72 | 2,05 | 7,12 | 4,91 | 0,769 |
| 2A | 1,66 | 1,88 | 5,94 | 5,26 | 0,812 |
| 2B | 1,66 | 1,88 | 5,94 | 4,80 | 0,829 |



Figur 29 Plott av målt og beregnet NO med modell 2B for testukene

Valg av modell

Modell 1B ga litt bedre resultater enn 2B for treningsukene, mens 2B ga best resultater for testukene. Begge modellene hadde den svakhet at høye NO konsentrasjoner ble predikert noe for lavt.

Modell 2B ga høyeste korrelasjoner mellom målte og beregnede verdier for NO i testukene, for observasjoner der det forelå måleverdier for alle modellvariablene var korrelasjonen 0,829. En korrelasjon på 0,829 er lovende, men resultatene her tyder på at alle de åtte målerne, fire for støv og fire for CO, må fungere for at korrelasjonen mellom målte og beregnede verdier for NO skal bli brukbar. De høyeste NO verdiene ble imidlertid predikert litt for lavt med modell 2B, også når det forelå måleverdier for alle modellvariablene. Dette er en alvorlig svakhet ved modellen. Problemet så ut til å bli større når det var manglende data for støv. Både i trenings- og testukene forekom manglende støvmålinger i et eller flere målepunkter i lengre perioder. Konklusjonen ble likevel at modell 2B var den beste av de modellene som ble vurdert.

Det var NO konsentrasjon som ble modellert her. Siden det er NO₂ som er den farlige gassen som skal holdes under visse grenseverdier i en tunnel, og det knytter seg noe usikkerhet til NO₂/NO_x forholdet, bør man ved eventuelle nye undersøkelser foreta NO₂ målinger og modellere NO₂ konsentrasjon direkte. For å få pålitelige måleresultater bør kjemi - luminescens NO_x måling benyttes. For å få med alle variasjoner bør måledata logges for et helt år.

Diskusjon

Gasser og støv

En nyere *review* artikkel oppsummerer studier av luftkvalitet i tunneler fra om lag de siste tjue år (El-Fadel & Hashisho, 2001). Det foreligger en rekke undersøkelser av luftkvalitet i vegtunneler som er kombinert med modellering som er blitt utført med ulike hensikter:

1. Estimere utslippsfaktorer fra trafikken generelt
2. Simulere forurensningskonsentrasjon inne i tunneler
3. Modellere forurensningskonsentrasjoner fra utslipp i tunneler ved tunnel portaler eller i ventilasjonsbygninger

De fleste undersøkelsene er av type 1, der forskjellige teoretiske modeller for utslipp fra kjøretøyer blir testet opp mot målte utslipp i tunneler. Denne undersøkelsen kommer nærmest type 2 i oversikten ovenfor.

Karbonmonoksid, CO

Grenseverdien for 15 minutters gjennomsnitt for CO konsentrasjon ved utløpet av tunnelen er 200 ppm, de målte verdiene med fire minutters midlingstid hadde 58 ppm som maksimum i treningsukene. I målepunkt 3, som er det nærmeste man kommer midten av tunnelen, var gjennomsnittet av målingene 7,3 ppm og alle målingene lå under 40 ppm, mot en grense - verdi for 15 minutt gjennomsnitt på 100 ppm. Ventilasjonen var dermed tilstrekkelig ut fra målt CO konsentrasjon, som lå langt under grenseverdien. Problemene med høy CO konsentrasjon i tunneler er vesentlig redusert de senere år på grunn av ny sammensetning av drivstoff (Chan et al. 1996, Kirchstetter et al. 1999, Kean et al. 2000, Chow & Chan 2003).

CO konsentrasjonen for hver time for treningsukene viste at gjennomsnittet lå høyest ca. kl. 15 – 19 og lavest ca. kl. 04 – 06, i målepunkt 1 og 2. Her foreligger ikke trafikkdata, så vi kan ikke sammenligne direkte med trafikk - mønsteret. CO konsentrasjonen for hver ukedag viste høyest gjennomsnitt søndag og nest høyest fredag. Gjennomsnittet var lavest tirsdag og onsdag. Dette kan ha sammenheng med mindre tungtrafikk og mer personbil - trafikken i helgene. Det var stor forskjell i gjennomsnittlig CO konsentrasjon fra uke til uke, dette gjaldt alle målepunktene i tunnelen. Gjennomsnittet var markert høyere for sommerukene, med omtrent tre ganger så høyt gjennomsnitt i uke 28 som i uke 11. Dette kan ha sammenheng med mer personbiltrafikk i ferietida.

I modeller for CO konsentrasjon i en tunnel blir det forutsatt at denne er økende gjennom tunnelen (Statens vegvesen, 2002). Dette viste seg å stemme her, i alle fall for gjennomsnittskonsentrasjonen for hver uke. Den faste ventilasjonsretningen bidrar til at vindfarten får samme retning og forurensningen vil derfor også i hovedsak bevege seg i en retning på tross av at tunnelen er tovegtrafikkert.

Nitrøse gasser, NO og NO₂

Grenseverdien for 15 minutters gjennomsnitt for NO konsentrasjon i midten av tunnelen er beregnet til 6,75 ppm, de målte verdiene i treningsukene hadde 6,0 ppm som maksimum i målepunkt 3. Grenseverdien for NO konsentrasjonen i enden av tunnelen er beregnet til 13,5 ppm, de målte verdiene i treningsukene hadde 9,4 ppm som maksimum i målepunkt 1. De målte verdiene var her gjennomsnitt for fire minutter, gjennomsnitt for 15 minutter lå da lavere. Ventilasjonen var dermed tilstrekkelig ut fra målt NO konsentrasjon. Grenseverdien for NO er beregnet ut fra en forutsetning om at NO₂ konsentrasjonen er maksimalt 10 % av NO_x konsentrasjonen (Statens vegvesen 2002, Darpas et al. 2000). Dersom denne forutsetningen ikke er korrekt, kan det være knyttet en viss usikkerhet til om NO₂ konsentrasjonen alltid var under grenseverdien 0,75 ppm i midten av tunnelen. Ut fra de gjeldende grenseverdier viser dermed denne undersøkelsen at NO₂ konsentrasjon er en langt mer kritisk faktor i forhold til gjeldende norske grenseverdier for tunneler enn CO konsentrasjon er, som også vist av Indrehus & Vassbotn (2001).

NO konsentrasjonen for hver time for treningsukene viste at gjennomsnittet lå høyest ca. kl. 18 – 21 og lavest ca. kl. 03 – 06, i målepunkt 1 og 2. NO konsentrasjon for hver ukedag viste høyeste gjennomsnitt mandag – torsdag, og lavest gjennomsnitt lørdag og nest lavest søndag. Dette gjenspeiler trafikkmønsteret på samme måte som for CO, men motsatt: NO er i langt større grad er knyttet til dieselmotorer og tungtransport enn til bensindrevne personbiler, og får høyest verdi på hverdager og lavest verdi i helgene. Lavere NO konsentrasjoner i helgene enn på hverdager ble også funnet i en undersøkelse i en 2 km lang motorvegtunnel i Osaka, Japan (Funasaka et al., 1998). I denne undersøkelsen ble trafikkvolumet målt og NO konsentrasjonen ble funnet å være proporsjonal med trafikkvolumet av dieselmotorer. I en undersøkelse fra en vegtunnel i California ble det konkludert med at tunge dieselmotorer var ansvarlig for nesten halvparten av nitrogenoksid utslippene (Kirchstetter et al., 1999).

Det var langt mindre forskjell i gjennomsnittlig konsentrasjon fra uke til uke for NO enn for CO. For målepunkt 1 lå økningen fra den beste til den verste uka på omtrent en tredjedel. Det var ikke noen systematisk forskjell mellom sommer- og vinterukene. Ukegjennomsnittene for NO konsentrasjonen viste en forholdsvis lineær økning gjennom tunnelen.

NO₂/NO_x forholdet

Denne undersøkelsen ga ikke ny kunnskap om dette forholdet siden NO₂ ikke ble målt. Det er NO₂ og ikke NO som blir sett på som den farlige gassen i tunneler. Grenseverdiene for NO i tunneler blir beregnet ut fra grenseverdier for NO₂ og bygger på en forutsetning om at NO₂ konsentrasjonen er maksimalt 10 % av NO_x konsentrasjonen. I en undersøkelse som viste en del høyere verdier for dette forholdet forekom de høye verdiene på tidspunkter da også NO₂ verdiene var høye og vindfarten i tunnelen var lav, dvs. tunnelen var dårlig ventilert (Indrehus & Vassbotn, 2001). I en japansk undersøkelse fra en vegtunnel ble det funnet at

NO₂/NO_x forholdet var lavt i weekenden, men høyt på hverdager³⁰ (Ishii et al., 1999). Bømlafjordtunnelen er nå godt ventilert (Aralt, 2002), og det gir grunn til å tro at NO₂/NO_x forholdet er på et normalt nivå. Likevel bør dette undersøkes spesielt.

CO/NO forholdet

Korrelasjonen mellom CO og NO i målepunkt 1 var 0,425 for testukene, dvs. en klart positiv korrelasjon, men svakere sammenheng enn for NO og støv. CO/NO forholdet ble beregnet for målepunkt 1 basert på målinger der NO > 1,5 ppm, dvs. for tidspunkter da det var en viss forurensning i tunnelen. Dette forholdet varierte noe fra uke til uke, det er grunn til å tro at dette har sammenheng med forskjell i trafikkmønsteret i ulike sesonger av året. I en tidligere undersøkelse ble CO konsentrasjonen funnet å være avhengig av både antall diesel- og bensindrevne kjøretøyer, mens NO konsentrasjonen var proporsjonal med antall dieselskjøretøyer (Funasaka et al., 1998). I Bømlafjordtunnelen fant man at CO/NO forholdet hadde høyest gjennomsnitt lørdag og søndag (gjennomsnitt 12) og i uke 28 (juli). I uke 28 var gjennomsnittet 10,3, mot 6,16 for alle testukene samlet, verdiene gjelder målepunkt 1. Trafikkdata mangler her, men helg og ferie er tid for personbiltrafikk og ut fra dette var funnene her som ventet.

I mange tidligere undersøkelser er CO/NO_x forholdet beregnet (Kirchstetter et al. 1996, Pierson et al. 1996, Gertler & Pierson 1996, Gertler et al. 1997, Rogak et al. 1998, Sjödin et al. 1998, El-Fadel & Hashisho 2000). I denne undersøkelsen ble NO_x ikke målt, men ved å anta at NO er 90 % av NO_x får man følgende verdier: Gjennomsnittlig CO/NO for testukene: 6,16, 95 % konfidensintervall (6,05, 6,27).

$$\text{Omregning: } \frac{CO}{NO} = \frac{CO}{0,90 \cdot NO_x} = 6,16 \quad \text{gir CO/NO}_x = 5,5.$$

I de nevnte tidligere undersøkelsene ble det funnet verdier for CO/NO_x forholdet mellom 5,1 og 12,5. CO/NO_x forholdet blir påvirket av flere faktorer, tungtrafikk/personbiler, nye eller gamle biler, bensin- eller dieselskjøretøyer, sammensetning av drivstoff. På grunn av manglende trafikkteiling kan man ikke gå videre med diskusjonen her.

Støv

Grenseverdien for støv i norske tunneler er 1,5 mg/m³ = 1500 µg/m³ ved utløpet av tunnelen, de målte verdiene i treningsukene hadde 673 µg/m³ som maksimum. I målepunkt 3 lå målte verdier under 653 µg/m³. Ventilasjonen var dermed tilstrekkelig ut fra målt støv i tunnelen, som lå under grenseverdien. Dette var ikke overraskende da styring av ventilasjonen i måleperioden i hovedsak var basert på støvkonsentrasjonen.

³⁰ Bare *summary* fra denne rapporten var på engelsk, men grafiske framstillinger i rapporten tyder på at det var målte verdier på dette forholdet opp til ca. 15 %.

Støv for hver time for treningsukene viser at gjennomsnittet lå høyest ca. kl. 14 – 17 og lavest ca. kl. 02 – 06, i målepunkt 1 og 2. Støv for hver ukedag viste høyeste gjennomsnitt mandag – torsdag, litt lavere fredag og lavest gjennomsnitt lørdag og søndag. Støv viste dermed omtrent det samme mønsteret som NO. Dette kan ha sammenheng med tungtransporten på hverdager. I den samme undersøkelse fra en vegtunnel i California som ble nevnt tidligere ble det konkludert med at tunge dieselskjøretøyer var ansvarlig for over tre fjerdedeler av eksospartikkelutslippene i trafikken (Kirchstetter et al., 1999).

NO/støv

Korrelasjonen mellom NO og støv i målepunkt 1 var 0,623 for testukene. NO/støv ble beregnet for alle tidspunkter der støv > 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og NO > 1,5 ppm i målepunkt 1. Den gjennomsnittlige NO/støv verdien for hver uke varierte fra 0,018 til 0,037, og minket når støvet økte. Det var ikke noen gjennomgående tendens i ukedags- eller årstidsvariasjonen. Gjennomsnittet var 0,0248 for testukene samlet, med 95 % konfidens -intervall (0,0245, 0,0250). For kvotienten mellom NO (målt i ppm) og støv (PM_{10} målt i $\mu\text{g}/\text{m}^3$) får vi da gjennomsnittlig 0,025.

CO/støv

Korrelasjonen mellom CO og støv i målepunkt 1 var 0,450 for testukene, dvs. en klart positiv korrelasjon, men likevel en svakere sammenheng enn for NO og støv. CO/støv ble regnet ut for tidspunkter der støv > 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Den gjennomsnittlige CO/støv verdien for hver uke varierte ganske mye, fra 0,020 til 0,196. CO/støv viste omtrent samme type ukedags- og ukevariasjon som CO/NO forholdet, med høyere verdier i helgene enn på hverdager og høyere verdier i sommerukene (20, 28 og 35) enn ellers. Gjennomsnittet var 0,129 for testukene samlet, med 95 % konfidensintervall (0,127, 0,131). For kvotienten mellom CO (målt i ppm) og støv (PM_{10} målt i $\mu\text{g}/\text{m}^3$) får vi da gjennomsnittlig 0,13.

Modeller for NO konsentrasjon

En av målsettingene for de utførte analyser var å se om det er forsvarlig å kutte ut NO / NO₂ målere i tunnelene. Dette da disse har en relativt dårlig nøyaktighet. For å kunne vurdere dette ble der utviklet modeller for NO konsentrasjon basert på målinger av støv og CO.

Tidligere undersøkelser har vist en god korrelasjon mellom finstøv og NO_x, spesielt for lave konsentrasjoner, både for målinger i trafikkert gate (Wåhlin & Palmgren, 1999) og i en tunnel (Gillies, 2001). I denne undersøkelsen har vi sett på korrelasjonen mellom PM_{10} og NO, for NO verdier opp til 9,4 ppm, korrelasjonene varierte her noe fra uke til uke og var lavere enn for den danske undersøkelsen, for målepunkt 1 var verdien 0,623 for treningsukene samlet. Korrelasjonen mellom CO og støv var enda lavere, 0,425 for målepunkt 1.

Ved å basere en modell for NO på både støv og CO i fire målepunkter, fant vi en modell som ga brukbar korrelasjon mellom målte og utregnede verdier for NO i målepunkt 2 i testukene (0,829). Likevel hadde modellen den svakhet at høye målte NO verdier ble predikert for lavt. For bruk i vegtunneler er det de høyere konsentrasjonene som er kritiske.

Forklaringsvariablene i den beste modellen var:

- Stov-1
- Stov-2
- Stov-3
- Stov-4
- CO-1
- CO-2
- CO-3
- CO-4
- Stov-1 · CO-1
- (Stov-1)²
- (Stov-2)²
- (CO-1)²

Følgende forhold taler imot å satse på å erstatte NO målinger med beregnede verdier basert på modellen:

- Ved høye konsentrasjoner av NO ga modellen for lave verdier
- Utregning av NO basert på målinger av CO og støv i fire målepunkter blir et veldig sårbart system.
- Grenseverdiene gjelder den farlige gassen NO₂. NO₂ konsentrasjonen burde ha vært modellert direkte, ikke NO.

Modelleringen ga likevel så bra resultater at det vil kunne forsvares å foreta en ny undersøkelse hvor man benytter kjemiluminescens NO_x måling.

Temperatur og luftfuktighet

Temperatur

Temperaturen inne i tunnelen viste stor grad av stabilitet, døgnvariasjonen var langt mindre inne i enn utenfor tunnelen. Siden viftene var mindre i drift om natta ble temperaturen inne i tunnelen mindre påvirket av temperaturen utenfor om natta enn om dagen. Korrelasjonen mellom temperaturen utenfor og inne i tunnelen i ulike målepunkter lå mellom 0,746 og 0,921, og den gjennomsnittlige temperaturen inne i tunnelen var langt mer påvirket av temperaturen utenfor enn vi hadde forventet. I vinterukene var gjennomsnittstemperaturen *høyere* inne i enn utenfor tunnelen, i sommerukene omtrent den samme som utenfor. I disse ukene var gjennomsnittstemperaturen i Sveio litt lavere enn i Føyeno, gjennomsnittstemperaturen midt i tunnelen lå omtrent midt mellom.

Luftfuktighet

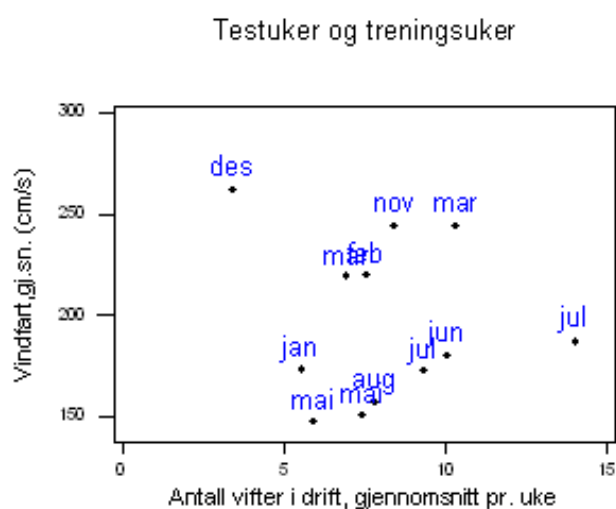
En av de ting som overrasket oss da loggedata ble visualisert, var de store variasjoner i relativ luftfuktighet som er i en tunnel. Under perioden ble det funnet at relativ luftfuktighet varierte fra ca 32 % (uke 11) til 97 % (maks verdi, ofte tåke). Heldigvis er her NO og CO målerne som er plassert i Bømlafjordtunnelen innebygget kompensasjon for endringer i relativ luftfuktighet. Luftfuktigheten inne i tunnelen var gjennomsnittlig lavere enn utenfor tunnelen i Sveio og i Føyeno, unntatt i uke 28 og 35 da den var

høyere i målepunkt 1 og 2 inne i tunnelen enn utenfor. Det var likevel en tydelig sammenheng mellom luftfuktigheten inne i og utenfor tunnelen, men luftfuktigheten utenfor hadde større døgnvariasjon, med laveste verdier på dagen da temperaturen var høyest. Da luftfuktigheten utenfor tunnelen var spesielt lav i uke 11, ble luftfuktigheten inne i tunnelen også lav.

Styrt ventilasjon

Vindfart

Viftene blir satt i gang for å gi en vindfart som er tilstrekkelig til å føre de forurensende stoffene ut av tunnelen hurtig nok til at konsentrasjonene ikke blir for høye i forhold til gjeldene grenseverdier. For støv er det også viktig at sikten ikke blir så lav at trafikkantene opplever det som et problem. Siden Bømlafjordtunnelen har fast ventilasjonsretning vil viftene påvirke vindfarten i en bestemt retning. Trafikken i den tovegstrafikkerte tunnelen vil påvirke vindfarten i begge retninger. Tendensen i dataene var likevel som ventet at vindfarten økte med antall vifter, korrelasjonen var 0,686. Ved å studere tidsrekkene for NO og vindfart og deskriptiv statistikk for treningsukene viste det seg at den gjennomsnittlige vindfarten ble lavere i sommerukene (uke 20, 28 og 35 i 2002) enn i vinterukene, sett i forhold til antall vifter i drift. Figur 30 viser dette grafisk for både trenings- og testukene, tendensen var klart den samme for testukene. Dette kan ha med trafikken å gjøre, resultatene på CO konsentrasjon indikerte en forskjell i trafikkmønsteret for sommer- og vinterukene, med betydelig mer personbil -trafikk om sommeren. Det er likevel vanskelig å vurdere dette nærmere her siden det ikke forelå trafikkdata. En annen mulig årsaksfaktor kan være temperaturforskjellen mellom tunnelen og området utenfor om vinteren.



Figur 30 Gjennomsnittlig vindfart og antall vifter i drift for tolv uker

Vifter

I ventilasjonsprogrammet, hovedtrinn 1, kan inntil 24 vifter startes ut fra støvkonsentrasjonen. Ved gjennomgang av tidsrekkene for hver variabel (vedlegg A) ser det ut til at høy NO konsentrasjon har vært årsak til at antall vifter i drift har gått fra 24 til 42 noen få ganger. Høye verdier av NO, uten at støv også hadde høy verdi, ser dermed ikke ut til å ha forekommet ofte. Ved start av flere vifter, dvs. ved å gå fra 24 til 42 vifter i drift, falt NO konsentrasjonen raskt igjen. Det var også tilfeller der høy verdi av støv ser ut til å ha startet flere vifter i hovedtrinn 2.

Ved innkopling av 42 vifter ble vindfarten gjennomsnittlig 4,3 m/s, og varierte mellom 3,2 og 5,2 m/s. Ved innkopling av 24 vifter, som er maksimum i hovedtrinn 1, ble vindfarten gjennomsnittlig 3,3 m/s, men varierte mellom 0,2 og 5,1 m/s. I sommerukene var det en tendens til at vindfarten ofte var nær null også på dagtid, det kan derfor være en ide å prøve ut et ventilasjonsprogram der ventilasjonen blir styrt slik at vindfarten holder seg på et visst nivå i de tidsrom av døgnet da det bruker å være mest trafikk mandag til fredag.

Konklusjoner

Viktige funn

- Bømlafjordtunnelen var tilstrekkelig ventilert i måleperioden ut fra gjeldende krav til luftkvalitet i tunneler. CO konsentrasjon og støv lå langt under grenseverdiene. NO₂ konsentrasjon lå under grenseverdiene som var utregnet med en antagelse om at NO₂ er høyst 10 % av NO_x. Det var likevel ikke god margin, NO₂ var en mer kritisk faktor i forhold til grenseverdiene enn CO og støv.
- CO/NO forholdet varierte en del og hadde høyest verdi i helgene og om sommeren. CO/støv viste omtrent samme variasjonsmønster som CO/NO forholdet. Dersom en antok at NO₂ er 10 % av NO_x, ble gjennomsnittet for CO/NO_x forholdet beregnet til 5,5.
- Det var som ventet en klar tendens til at NO konsentrasjonen økte når støv økte. Korrelasjonen mellom NO og støv var 0,623 i målepunkt 1 og 0,564 i målepunkt 2, for NO og CO var tilsvarende tall 0,425 og 0,523. NO konsentrasjonen økte dermed også med økende CO konsentrasjon, men sammenhengen var litt svakere enn for NO og støv.
- En PLS1-modell for NO konsentrasjon i målepunkt 2, basert på CO og støvmålinger i målepunkt 1 – 4, ga en korrelasjon mellom målte og beregnede verdier på 0,829 ved testing på data fra seks nye uker, men de utregnete verdiene for NO ble litt for lave ved høye NO konsentrasjoner.
- Temperaturen inne i tunnelen viste stor grad av stabilitet, døgnvariasjonen var langt mindre inne i enn utenfor tunnelen. I vinterukene var gjennomsnittstemperaturen *høyere* inne i enn utenfor tunnelen, i sommerukene omtrent den samme som utenfor.
- Det var en tydelig sammenheng mellom luftfuktigheten inne i og utenfor tunnelen, men luftfuktigheten utenfor tunnelen var gjennomsnittlig høyere og hadde større døgnvariasjon.
- Gjennomsnittlig vindfart i tunnelen ble lavere i sommerukene enn i vinterukene, sett i forhold til antall vifter i drift.

Forslag til ny undersøkelse

Dersom man vil arbeide videre for å utvikle en modell for NO₂ konsentrasjon basert på støv og CO målinger, bør kjemiluminescens NO_x måling benyttes. Ved en slik undersøkelse vil man også få belyst NO₂ /NO_x forholdet. For å få med alle variasjoner bør måledata logges for et helt år.

Referanser

Abbey, D. E., Nishino, N., McDonnell, W. F., Burchette, R. J., Knutsen, S. F., Beeson, W. L. & Yang, J. X.: *Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in nonsmokers*. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 1999, **159**, 373-382.

Aga, E., Samoli, E., Touloumi, G., Anderson, H. R., Cadum, E., Forsberg, B., Goodman, P., Goren, A., Kotesovec, F., Kriz, B., Macarol-Hiti, M., Medina, S., Paldy, A., Schindler, C., Sunyer, J., Tittanen, P., Wojtyniak, B., Zmirou, D., Schwartz, J. & Katsouyanni, K.: *Short-term effects of ambient particles on mortality in the elderly: results from 28 cities in the APHEA2 project*. European Respiratory Journal, 2003, **21**, 28S-33S.

Anderson, H. R., Limb, E. S., Bland, J. M., Deleon, A. P., Stranchan, D. P. & Bower, J. S.: *Health-effects of an air-pollution episode in London, December 1991*. Thorax, 1995, **50**, 1188-1193.

Aralt, T. T.: *Bømlaffordtunnelen – optimalisering av ventilasjon*. The Norwegian Public Road Administration (NPRA), Bergen, 2002, Rapport, Statens vegvesen Region vest.
<http://home.c2i.net/toraralt/ventilasjonstyring.pdf>

Barrefors, G.: *Air pollutants in road tunnels*. Sci. Total Environ., 1996, **190**, 431-435.

Brunekreef, B. & Holgate, S.T.: *Air pollution and health*. Lancet, 2002, **360**, 1233-1242.

Burnett, R. T., Cakmak, S., Brook, J. R. & Krewski, D.: *The role of particulate size and chemistry in the association between summertime ambient air pollution and hospitalisation for cardiorespiratory diseases*. Environ. Health Persp., 1997, **105**, 614-620.

Burnett, R. T., Smith-Doiron, M., Stieb, D., Cakmak, S. & Brook, J. R.: *Effects of particulate and gaseous air pollution on cardiorespiratory hospitalizations*. Archives of Environmental Health, 1999, **54**, 130-139.

Burnett, R. T., Brook, J., Dann, T., Delocla, C., Philips, O., Cakmak, S., Vincent, R., Goldberg, M. S. & Krewski, D.: *Association between particulate- and gas-phase components of urban air pollution and daily mortality in eight Canadian cities*. Inhalation Toxicology, 2000, **12**, 15-39.

Chan, L.Y., Zeng, L., Qin, Y. & Lee, S.C.: *CO concentration inside the cross harbour tunnel in Hong Kong*. Environmental International, 1996, **22**, 405-409.

Chen, K. S., Chung, C. Y. & Wang, S. W.: *Measurement and three-dimensional modelling of airflow and pollutant dispersion in an undersea*

traffic tunnel. Journal of the Air and Waste Management, 2002, **52**, 349-363.

Choudhury, A. H., Gordian, M. E. & Morris, S. S.: *Associations between respiratory illness and PM(10) air pollution*. Archives of Environmental Health, 1997, **52**: 113-117.

Chow, W. K. & Chan M. Y.: *Field measurements on transient carbon monoxide levels in vehicular tunnels*. Building and Environment, 2003, **38**, 227-236.

Darpas, Y., et al., *Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels*, Permanent International Association of Road Congresses (PIAC), La Defense Cedex, France, 2000, PIARC Publications, 05.9.B.

El-Fadel, M. & Hashisho, Z.: *Vehicular Emissions in Roadway Tunnels: A Critical Review*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2001, **31**, 125-174.

El-Fadel, M. & Hashisho, Z.: *Vehicular emissions and air quality assessment in roadway tunnels: the Salim Slam tunnel*. Transport Res. D. Tre., 2000, **5**, 355-372.

EC (1996). *Directive 96/62/EC of September 27 on ambient air quality assessment and management*. J. Europ. Commun. L296/55.

EC (1999). *Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air*. J. Europ. Commun. L163/41.

EC (2000). *Directive of the European Parliament and of the council 2000/69/EC of 16 November 2000 on limit values for benzene and carbon monoxide in ambient air*. J. Europ. Commun. L313/12.

Esbensen, K., Schönkopf, S, & Midtgaard, T.: *Multivariate Analysis in Practice*. Trondheim, 1994, Camo AS.

Fischer, P., Hoek, G., Brunekreef, B., Verhoeff, A. & van Wijnen, J.: *Air pollution and mortality in the Netherlands: are the elderly more at risk?* European Respiratory Journal, 2003, **21**, 34S-38S Suppl. 40.

Funasaka, K., Miyazaki, T., Kawaraya, T., Tsuruho, K. & Mizuno, T.: *Characteristics of particulates and gaseous pollutants in a highway tunnel*. Environmental pollution, 1998, **102**, 171-176.

Gauvin, S., Amro, S., Zmirou, D., Le Moullec, Y., Sahraoui, F., Pin, I., Neukirch, F., Momas, I., Lauvergne, N., Poilve, M. P. & Chiron, M.: *Road traffic, NO₂ exposure and respiratory function among children (VESTA study)*. International Journal of Vehicle design, 2001, **27**, 251-261.

- Gertler, A. W. & Pierson, W. R.: *Recent measurements of mobile source emission factors in North American tunnels*. The Science of the Total Environment, 1996, **189/190**, 107-113.
- Gertler, A. W., Wittorff, D. N., McLaren, R., Belzer, W. & Dann, T.: *Characterization of vehicle emissions in Vancouver BC during the 1993 Lower Fraser Valley oxidants study*. Atmospheric Environment, 1997, **31**, 2107-2112.
- Gillies, J. A., Gertler, A. W., Sagebiel, J. C. & Dippel, W. A.: *On-road particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) emissions in the Sepulveda tunnel, Los Angeles, California*. Environmental Science and Technology, 2001, **35**, 1054-1063.
- Goldberg, M. S., Burnett, R. T., Bailar, J. C., Brook, J., Bonvalot, Y., Tamblyn, R., Singh, R. & Valois, M. F.: *The association between daily mortality and ambient air particle pollution in Montreal, Quebec I. Nonaccidental mortality*. Environmental Research, 2001, **86**: 12-25.
- Guerreiro, C., Clench-Aas, J. & Bartonova, A.: *Air pollution exposure monitoring and estimation Part III. Development of new types of air quality indicators*. Journal of Environmental Monitoring, 1999, **1**, 327-332.
- Hoek, G., Brunekreef, B., Goldbohm, S., Fischer, P. & van den Brandt, P. A.: *Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study*. Lancet, 2002, **360**, 1203-1209.
- Holmen, B.A., Niemeier, D. A. & Meng, Y.: *Time-series analysis of above-road particulate matter at the Caldecott Tunnel exit*. Journal of the Air & Waste management Association, 2001, **51**, 601-615
- Indrehus, O. & Vassbotn, P. (1996): *Luftkvalitet i Høyangertunnelen april 1994 og april 1995*. Førde, Norway, 1997, HSF-rapport nr. 6/97.
- Indrehus, O. & Vassbotn, P.: *CO and NO₂ pollution in a long two-way traffic road tunnel: investigation of NO₂/NO_x ratio and modelling of NO₂ concentration*. J. Environ. Monit., 2001, **3**, 220-225.
- Ishii, K., Izumikawa, S., Nakamura, K., Hoshi, J., Sakurai, T., Tanabe, K., Moriguchi, Y. & Wakamatsu, S.: *A Study on Motor-Vehicle Exhaust from a Road Tunnel*, The Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection, 1999, Report 6/99.
- Katsouyanni, K., Touloumi, G., Samoli, E., Gryparis, A., Le Tertre, A., Monopoli, Y., Rossi, G., Zmirou, D., Ballester, F., Boumghar, A., Anderson, H. R., Wojtyniak, B., Paldy, A., Braunstein, R., Pekkanen, J., Schindler, C. & Schwartz, J.: *Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: Results from 29 European cities within the APHEA2 project*. Epidemiology, 2001, **12**, 521-531.

Kean, A. J. & Harley, R. A.: *On-road measurements of ammonia and other motor vehicle exhaust emissions*. Environmental Science and Technology, 2000, **24**, 3535-3539.

Kirchstetter, T. W., Singer, B. C., Harley, R. A., Kendall, G. B. & Chan, W.: *Impact of oxygenated gasoline use on California light-duty vehicle emissions*. Environmental Science & Technology, 1996, **30**, 661-670.

Kirchstetter, T. W., Singer B. C., Harley, R. A., Kendall, G. R. & Traverse, M.: *Impact of California reformulated gasoline on motor vehicle emissions. I. Mass emission rates*. Environmental Science & Technology, 1999, **33**, 318-328.

Kirchstetter, T. W., Harley, R. A., Kreisberg, N. M., Stolzenburg, M. R. & Hering, S. V.: *On-road measurement of fine particle and nitrogen oxide emissions from light- and heavy-duty motor vehicles*. Atmospheric Environment, 1999, **33**, 2955-2968.

Le Tertre, A., Medina, S, Samoli, E., Forsberg, B., Michelozzi, P., Boumghar, A., Vonk, J. M., Bellini, A., Atkinson, R., Ayres, J. G., Sunyer, J., Schwartz, J. & Katsouyanni, K.: *Short-term effects of particulate air pollution on cardiovascular diseases in eight European cities*. Journal of Epidemiology and Community Health, 2002, **56**, 773-779.

Lin, M., Chen, Y., Burnett, R. T., Villeneuve, P. J. & Krewski, D.: *Effect of short-term exposure to gaseous pollution on asthma hospitalisation in children: a bi-directional case-crossover analysis*. Journal of Epidemiology and community Health, 2003, **57**, 50-55.

Lovdata: *Forskrift om lokal luftkvalitet*. 2002.

<http://www.lovdata.no/for/sf/md/xd-20021004-1088.html>

Mann, J. K., Tager, I. B., Lurmann, F., Segal, M., Quesenberry, C. P., Lugg, M. M., Shan, J. & Van Den Eeden, S. K.: *Air pollution and hospital admissions for ischemic heart disease in persons with congestive heart failure or arrhythmia*. Environmental Health Perspectives, 2002, **110**, 1247-1252.

Maroziene, L. & Grazuleviciene, L.: *Maternal exposure to low-level air pollution and pregnancy outcomes: a population-based study*.

Environmental Health, 2002, 1-6. <http://www.ehjournal.net/content/1/1/6>

McDonnell, W. F., Nishino-Ishikawa, N., Petersen, F. F., Chen, L. H. & Abbey, D. E.: *Relationships of mortality with the fine and coarse fractions of long-term ambient PM10 concentrations in nonsmokers*. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 2000, **10**, 427-436.

Miljøverndepartementet: *Miljøstatus i Norge. Lokal luftkvalitet*. 2003.

http://www.miljostatus.no/templates/themepage_2749.aspx

Nyberg, F., Gustavsson, P., Jarup, L., Bellander, T., Berglund, N., Jakobsson, R. & Pershagen, G.: *Urban air pollution and lung cancer in Stockholm*. *Epidemiology*, 2000, **11**, 487-495.

Ormstad, H. & Løvik, M.: *Luftforurensning, astma og allergi – betydningen av ulike partikler*. *Tidsskrift for den norske Lægeforening*, 2002, **122**, 1777-1782.

Pierson, W. R., Gertler, A.W., Robinsin, N. F., Sagebiel, J. C., Zielinska, B., Bishop, G. A., Stedman, D. H., Zweidinger, R. B. & Ray, W. D.: *Real-world automotive emissions – Summaries of studies in the fort McHenry and Tuscarora Mountain tunnels*. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**, 2233-2256.

Pope, C. A.: *Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: Biologic mechanisms and who's at risk?* *Environmental Health Perspectives*, 2000, **108**, 713-723.

Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K. & Thurston, G. D.: *Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution*. *Jama-Journal of the American Medical Association*, 2002, **287**, 1132-1141.

Rogak, S. N., Pott, U., Dann, T. & Wang, D.: *Gaseous emissions from vehicles in a traffic tunnel in Vancouver, British Columbia*. *Journal of the Air and Waste Management*, 1998, **48**, 604-615.

Ritz, B., Yu, F., Chapa, G. & Fruin, S.: *Effect of air pollution on preterm birth among children born in Southern California between 1989 and 1993*. *Epidemiology*, 2000, **11**, 502-511.

Saez, M., Ballester, F., Barcelo, M. A., Perez-Hoyos, S., Bellido, J., Tenias, J. M., Ocana, R., Figueiras, A., Arribas, F., Aragones, N., Tobias, A., Cirera, L. & Canada, A.: *A combined analysis of the short-term effects of photochemical air pollutants on mortality within the EMECAM project*. *Environmental Health Perspectives*, 2002, **110**, 221-228.

Sandström, T., Forsberg, B. & Bylin G.: *Air quality in road tunnels. Health effects of nitrogen dioxide and aspects of co-pollutants*. *Swedish National Road Administration*, 2003, Publ. 2003:64.

Schwartz, J., Dockery, D. W. & Neas, L. M.: *Is daily mortality associated specifically with fine particles?* *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1996, **46**, 927-939.

Sjodin, A., Persson, K., Andreasson, K., Arlander, B. & Galle B.: *On-road emission factors derived from measurements in a traffic tunnel*. *International Journal of Vehicle Design*, 1998, **20**, 147-158.

Statens forurensningstilsyn (SFT, The Norwegian Pollution Control Authority): *Utslipp fra veitrafikk I Norge*, SFT, Oslo, 1999, TA-1622/99. <http://www.sft.no/publikasjoner/luft/1622/ta1622.pdf>

Statens vegvesen (NPRA, The Norwegian Public Road Administration), *Håndbok 021 Vegtunneler*, NPRA, Oslo, 2002, s. 95-97. (<http://www.vegvesen.no/tunnel/rapporter/handboker/>)

Stieb, D. M., Judek, S. & Burnett, R. T.: *Meta-analysis of time-series studies of air pollution and mortality: Effects of gases and particles and the influence of cause of death, age, and season*. Journal of the Air and Waste Management Association, 2002, **52**, 470-484.

Strand, V., Svartengren, M., Rak, S., Barck, C. & Bylin, G.: *Repeated exposure to an ambient level of NO₂ enhances asthmatic response to a non-symptomatic allergen dose*. European Respiratory Journal, 1998, **12**, 6-12.

Svartengren, M., Strand, V., Bylin, G., Jarup, L. & Pershagen, G.: *Short-term exposure to air pollution in a road tunnel enhances the asthmatic response to allergen*. European Respiratory Journal, 2000, **15**, 716-724.

Tjugum, S. A.: *Måling av sikt og turbiditet ved spreiiing av infraraudt lys*. Universitetet i Bergen, 1998, hovedoppgave i fysikk.

Tønnesen, D.: *Measurements of traffic air pollution in Høyanger road tunnel, spring 1994* (in Norwegian), Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, Norway, 1996, NILU OR 10/96.

Verhoeff, A. P., Hoek, G., Schwartz, J. & van Wijnen, J. H.: *Air pollution and daily mortality in Amsterdam*. Epidemiology, 1996, **7**, 225-230.

Wedberg, W. C.: *Simultaneous Gravimetric and Light Scatter Measurements of summer and winter Aerosols inside a Car Tunnel*. University of Bergen, Department of Physics, Bergen, 2000, Publ. no. LM378. <http://www.fi.uib.no/ie/pubs/LM378.pdf>

Wåhlin, P. & Palmgren, F.: *Trafikkens bidrag til fine og ultrafine partikler i Albanigade, Odense*. Danmarks Miljøundersøgelser, 1999.

Zanobetti, A. & Schwartz, J.: *Cardiovascular damage by airborne particles: Are diabetics more susceptible?* Epidemiology, 2002, **13**, 588-592.

Tabell- og figurliste

Tabeller

| | | |
|-----------|--|----|
| TABELL 1 | GRENSEVERDIER FOR CO OG NO ₂ I NORSKE VEGTUNNELER..... | 7 |
| TABELL 2 | LUFTKVALITETSKRITERIER UTENDØRS | 9 |
| TABELL 3 | PLASSERING AV MÅLESTASJONER, MED PARAMETRENER..... | 15 |
| TABELL 4 | MÅLEPARAMETRENER, -ENHETER, -METODER OG INSTRUMENTER..... | 16 |
| TABELL 5 | RESULTAT AV LODDTREKNING AV TRENINGSG- OG TESTUKER..... | 18 |
| TABELL 6 | OVERSIKT OVER POSISJONER OG VARIABELNAVN..... | 19 |
| TABELL 7 | OVERSIKT RÅDATA OG ORDNEDE DATA, TRENINGSGUKER..... | 19 |
| TABELL 8 | DESKRIPTIV STATISTIKK FOR CO KONSENTRASJON | 20 |
| TABELL 9 | DESKRIPTIV STATISTIKK FOR NO KONSENTRASJON | 22 |
| TABELL 10 | DESKRIPTIV STATISTIKK FOR STØV | 23 |
| TABELL 11 | DESKRIPTIV STATISTIKK FOR VIFTER I DRIFT OG VINDFART | 27 |
| TABELL 12 | KORRELASJONER MELLOM FUKTIGHET, CO, NO OG VIFTER..... | 30 |
| TABELL 13 | KORRELASJONER MELLOM TEMPERATUR, CO, NO OG VIFTER | 30 |
| TABELL 14 | KORRELASJONER MELLOM CO, NO OG STØV, MÅLEPUNKT 1 – 4..... | 31 |
| TABELL 15 | KONFIDENSINTERVALL FOR FORVENTET NO/STØV, MÅLEPUNKT 1..... | 32 |
| TABELL 16 | KONFIDENSINTERVALL FOR FORVENTET CO/NO, MÅLEPUNKT 1 | 33 |
| TABELL 17 | KONFIDENSINTERVALL FOR FORVENTET CO/STØV, MÅLEPUNKT 1..... | 34 |
| TABELL 18 | PLS1-RESULTATER FOR NO I MÅLEPUNKT 1, MODELLTYPE 1A..... | 39 |
| TABELL 19 | PLS1-RESULTATER FOR NO I MÅLEPUNKT 1, MODELLTYPE 1B | 39 |
| TABELL 20 | PLS1-RESULTATER FOR NO I MÅLEPUNKT 2, MODELLTYPE 2A | 40 |
| TABELL 21 | PLS1-RESULTATER FOR NO I MÅLEPUNKT 2, MODELLTYPE 2B | 41 |
| TABELL 22 | OVERSIKT OVER TESTUKER OG ORDNEDE MÅLEDATA..... | 43 |
| TABELL 23 | RESULTATER FOR TESTUKENE (N = 12082), PLS1-MODELL 1A, 1B, 2A, 2B | 43 |
| TABELL 24 | RESULTATER FOR TESTUKENE (N = 7673), PLS1-MODELL 1B OG 2B..... | 44 |

Figurer

| | |
|---|----|
| FIGUR 1 SKJEMATISK PLASSERING AV MÅLESTASJONER I TUNNELEN..... | 15 |
| FIGUR 2 GJENNOMSNIITTLIG CO KONSENTRASJON GJENNOM TUNNELEN | 20 |
| FIGUR 3 BOXPLOT AV DØGNFORDELING FOR CO KONSENTRASJON I MÅLEPUNKT 1 OG 2 | 21 |
| FIGUR 4 BOXPLOT AV UKEDAGSFORDELING CO KONSENTRASJON, MÅLEPUNKT 1 OG 2 | 21 |
| FIGUR 5 BOXPLOT AV DØGNFORDELING FOR NO KONSENTRASJON, MÅLEPUNKT 1 OG 2 | 21 |
| FIGUR 6 BOXPLOT AV UKEDAGSFORDELING NO KONSENTRASJON, MÅLEPUNKT 1 OG 2 | 21 |
| FIGUR 7 GJENNOMSNIITTLIG NO KONSENTRASJON GJENNOM TUNNELEN | 22 |
| FIGUR 8 GJENNOMSNIITTLIG STØVKONSENTRASJON GJENNOM TUNNELEN | 23 |
| FIGUR 9 BOXPLOT AV DØGNFORDELING AV STØV I MÅLEPUNKT 1 OG 2..... | 24 |
| FIGUR 10 BOXPLOT AV UKEDAGSFORDELING AV STØV I MÅLEPUNKT 1 OG 2..... | 24 |
| FIGUR 11 GJENNOMSNIITTLIG TEMPERATUR GJENNOM TUNNELEN | 24 |
| FIGUR 12 TIDSREKKER FOR TEMPERATUR I MÅLEPUNKT 1 OG 4, OG UTEFOR I SVEIO | 25 |
| FIGUR 13 GJENNOMSNIITTLIG LUFTFUKTIGHET GJENNOM TUNNELEN..... | 26 |
| FIGUR 14 TIDSREKKER FOR FUKTIGHET I MÅLEPUNKT 1 OG 4, OG UTEFOR I SVEIO..... | 26 |
| FIGUR 15 BOXPLOT AV DØGN- OG UKEDAGSFORDELING FOR VINDFART OG VIFTER | 28 |
| FIGUR 16 BOXPLOTT AV VINDFARTEN MOT ANTALL VIFTER I DRIFT I TUNNELEN..... | 28 |
| FIGUR 17 PLOTT AV LUFTFUKTIGHET MOT NO I MÅLEPUNKT 1 | 29 |
| FIGUR 18 PLOTT AV CO OG NO MOT STØV I MÅLEPUNKT 1 | 30 |
| FIGUR 19 PCA FOR CO, NO OG STØV I MÅLEPUNKT 1 – 4 | 31 |
| FIGUR 20 PLOTT AV NO/STØV-FORHOLDET OG NO MOT STØV, MÅLEPUNKT 1 | 32 |
| FIGUR 21 BOXPLOT AV UKEDAGSFORDELING FOR NO/STØV, MÅLEPUNKT 1 | 33 |
| FIGUR 22 BOXPLOT AV UKEDAGSFORDELING FOR CO/NO, MÅLEPUNKT 1 | 34 |
| FIGUR 23 BOXPLOT AV UKEDAGSFORDELING CO/STØV, MÅLEPUNKT 1..... | 35 |
| FIGUR 24 PLS1-RESULTAT FOR NO I MÅLEPUNKT 1, MODELL 1A | 39 |
| FIGUR 25 PLOTT AV MÅLT OG BEREGNET NO MED MODELL 1B FOR TRENINGUKENE..... | 40 |
| FIGUR 26 PLS1-RESULTATER FOR NO I MÅLEPUNKT 2, MODELL 2A | 41 |
| FIGUR 27 PLOTT AV MÅLT OG BEREGNET NO MED MODELL 2B FOR TRENINGUKENE..... | 41 |
| FIGUR 28 SAMMENLIGNING AV FIRE MODELLTYPER FOR DE SEKS TRENINGUKENE | 42 |
| FIGUR 29 PLOTT AV MÅLT OG BEREGNET NO MED MODELL 2B FOR TESTUKENE..... | 44 |
| FIGUR 30 GJENNOMSNIITTLIG VINDFART OG ANTALL VIFTER I DRIFT FOR TOLV UKER | 51 |

VEDLEGG

| | |
|--|-----------|
| VEDLEGG A | 2 |
| TIDSREKKER FOR TRENINGSSUKENE | 2 |
| Uke 48, 2001 | 2 |
| Uke 03, 2002 | 4 |
| Uke 11, 2002 | 6 |
| Uke 20, 2002 | 8 |
| Uke 28, 2002 | 10 |
| Uke 35, 2002 | 12 |
| VEDLEGG B | 14 |
| MÅLERESULTATER FOR TRENINGSSUKENE | 14 |
| Deskriptiv statistikk | 14 |
| Samvariasjon mellom variabler | 20 |
| VEDLEGG C | 24 |
| MODELLER..... | 24 |
| VEDLEGG D | 25 |
| MÅLERESULTATER FOR TESTUKENE | 25 |
| Deskriptiv statistikk | 25 |
| Samvariasjon mellom variabler | 25 |
| TESTRESULTATER | 27 |
| TABELL- OG FIGURLISTE VEDLEGG | 29 |

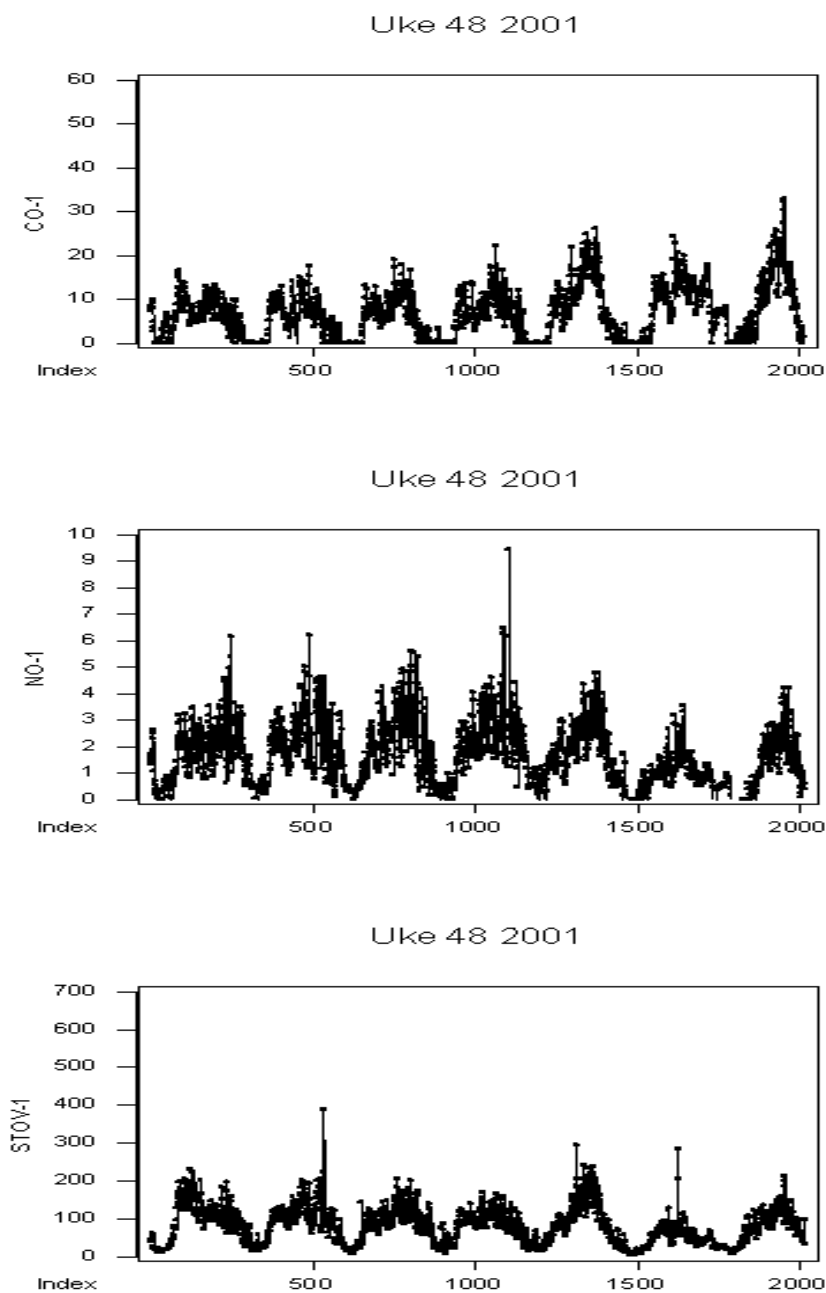
Tabell 1 Måleenheter

| Parameter | Måleenhet |
|------------------|--------------------------|
| CO gass | ppm |
| NO gass | ppm |
| Støv | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| Vindfart | cm/s |
| Temperatur | $^{\circ}\text{C}$ |
| Luftfuktighet | %RH |

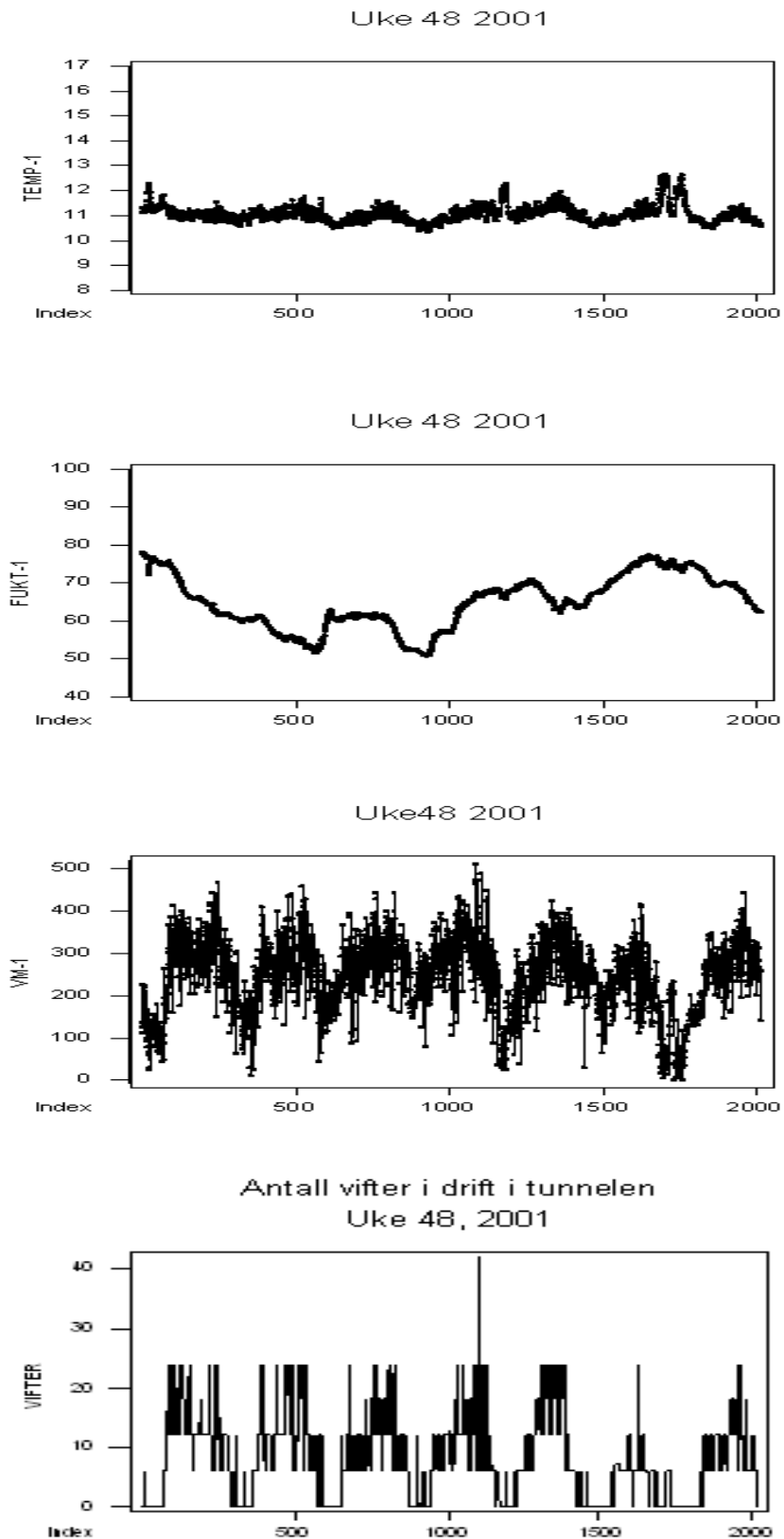
Vedlegg A

Tidsrekker for treningsukene

Tidsrekken gjelder målinger fra målestasjon 1, der forurensningen (CO, NO og støv) gjennomgående var høyere enn i de andre målepunktene. Det var 1963 - 2016 målinger pr. uke. Indeksen på 1. akse er måling nummer.

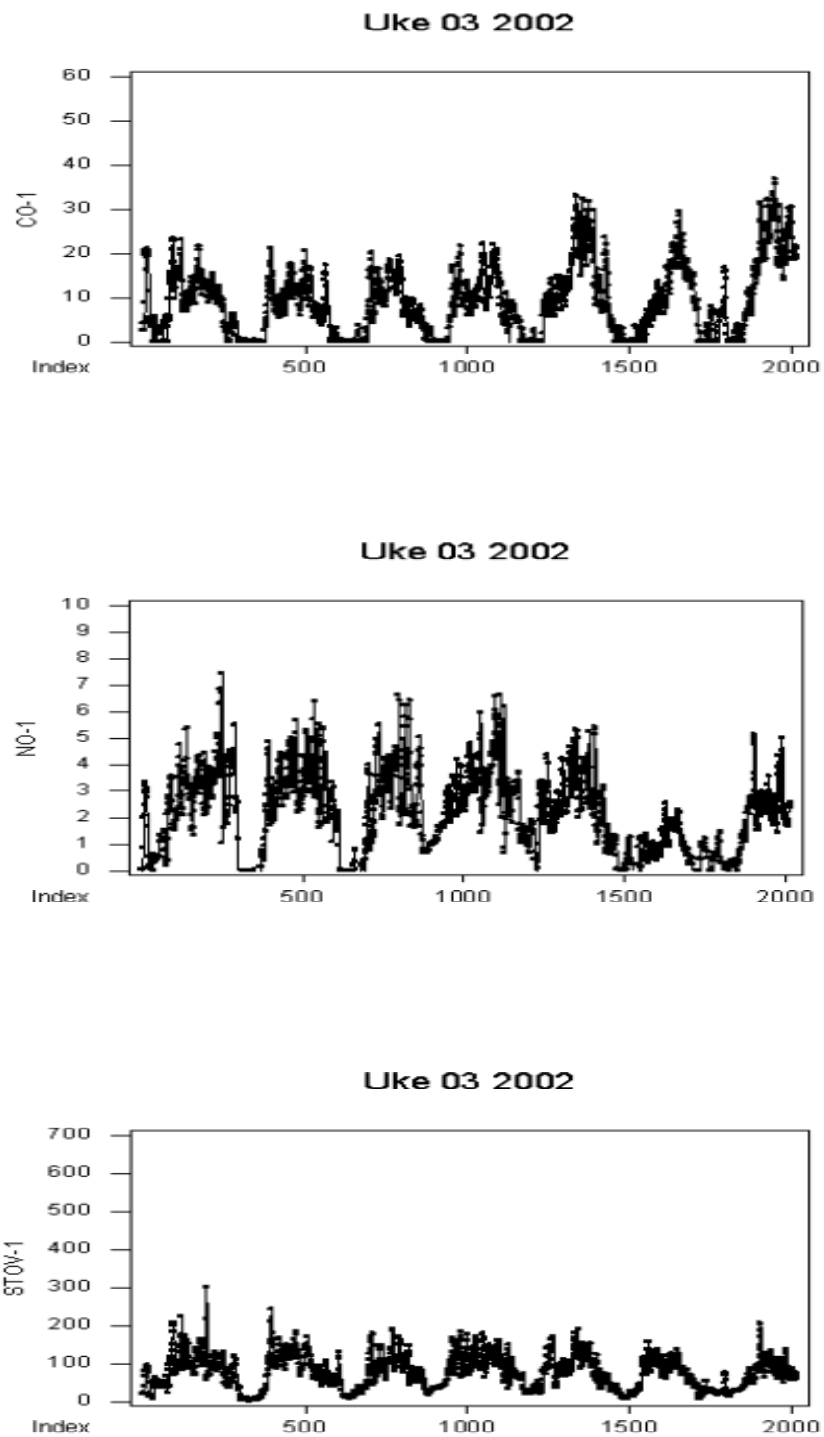
Uke 48, 2001

Figur 1 CO, NO og støv uke 48, 2001

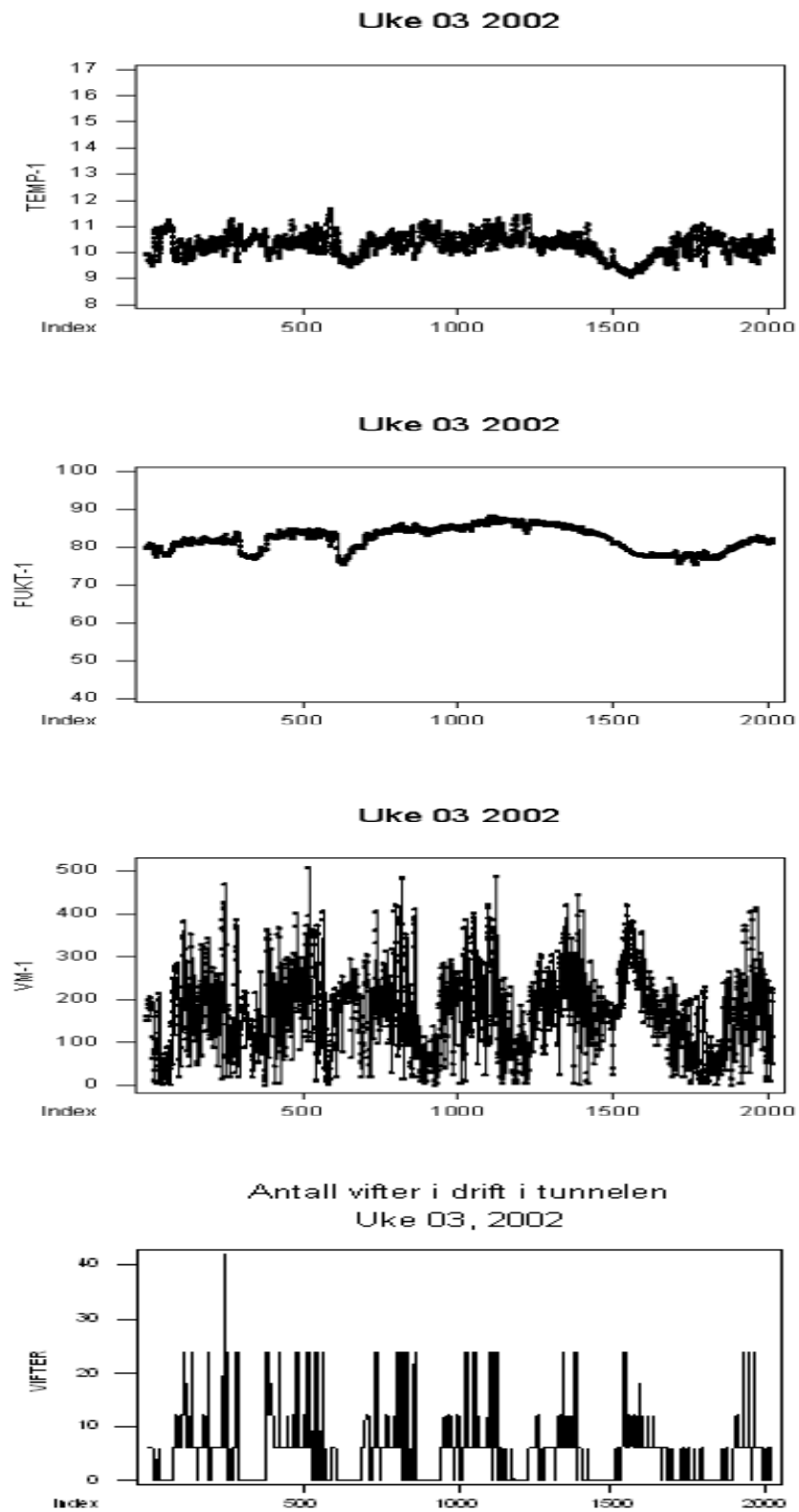


Figur 2 Temperatur, fuktighet, vindfart og vifter uke 48, 2001

Uke 03, 2002

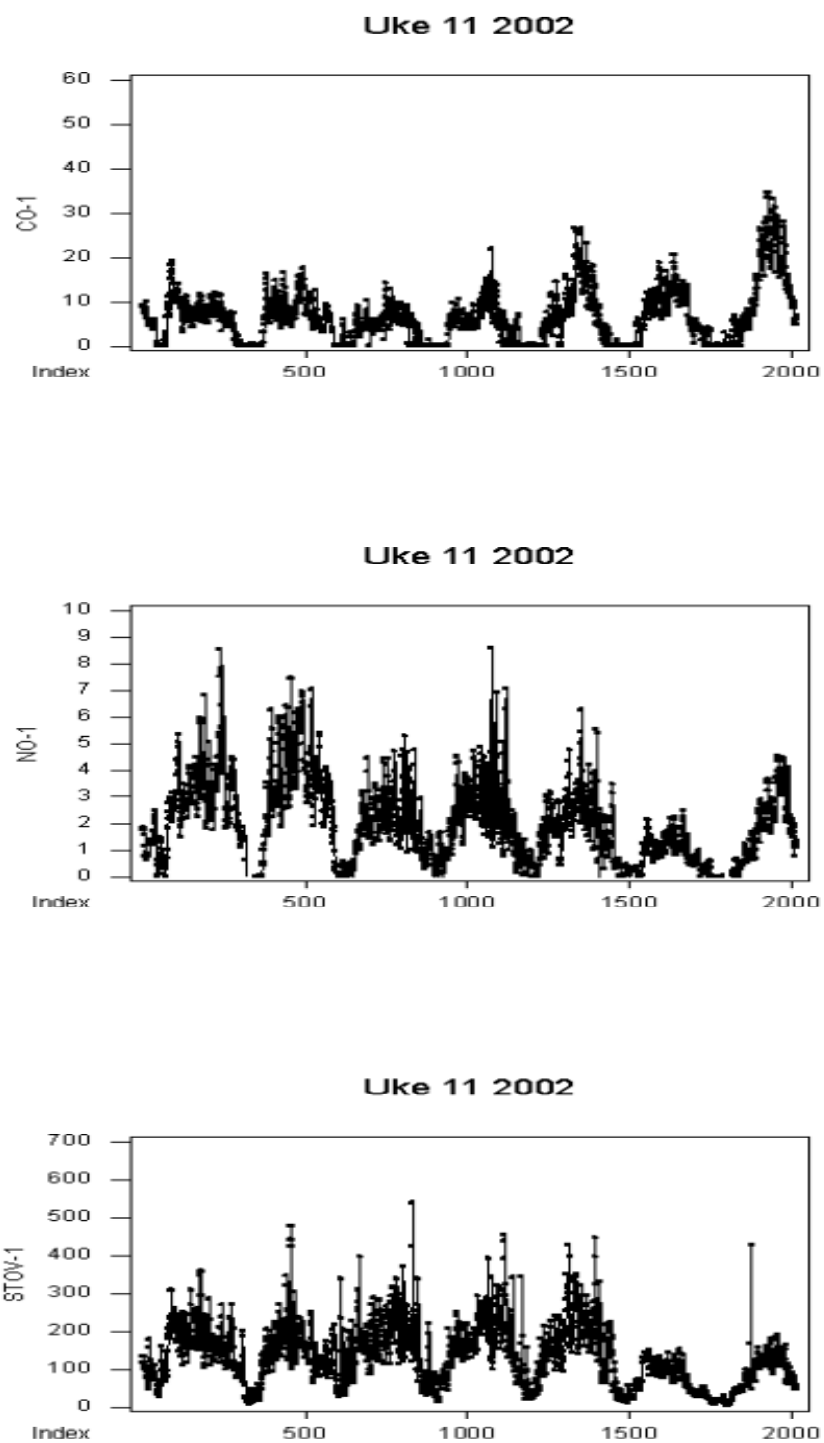


Figur 3 CO, NO og støv uke 03, 2002

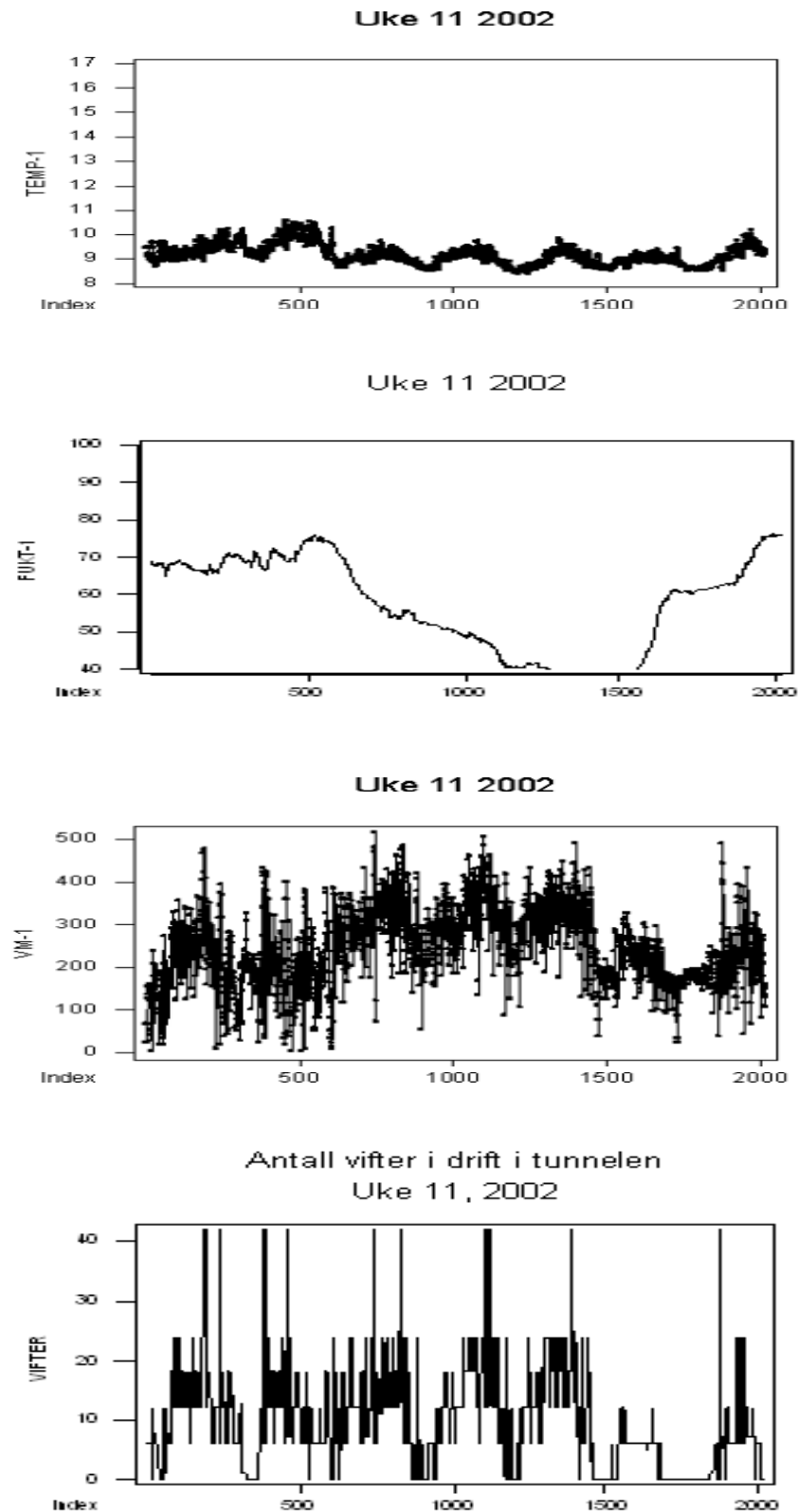


Figur 4 Temperatur, fuktighet, vindfart og vifter uke 03, 2002

Uke 11, 2002

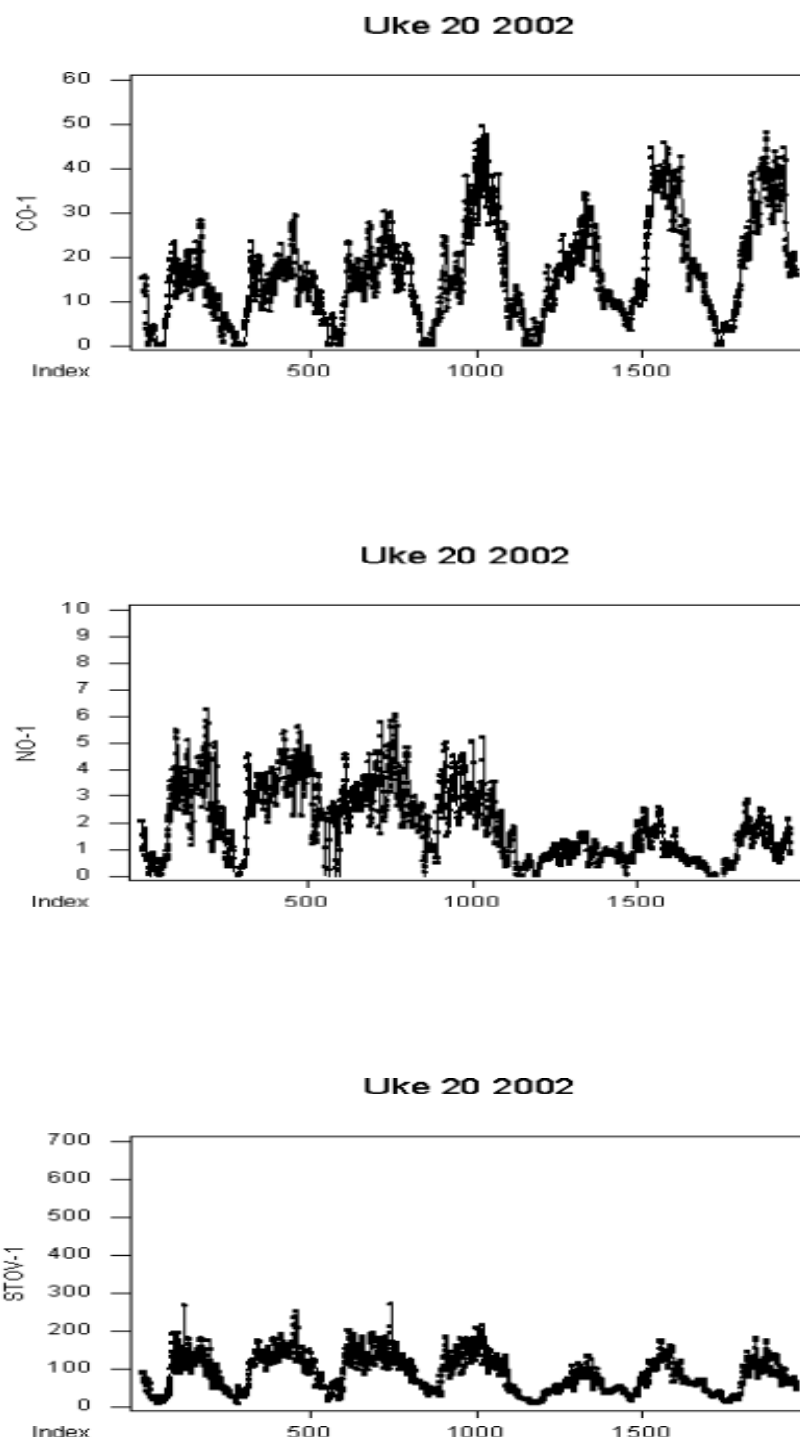


Figur 5 CO, NO og støv uke 11, 2002

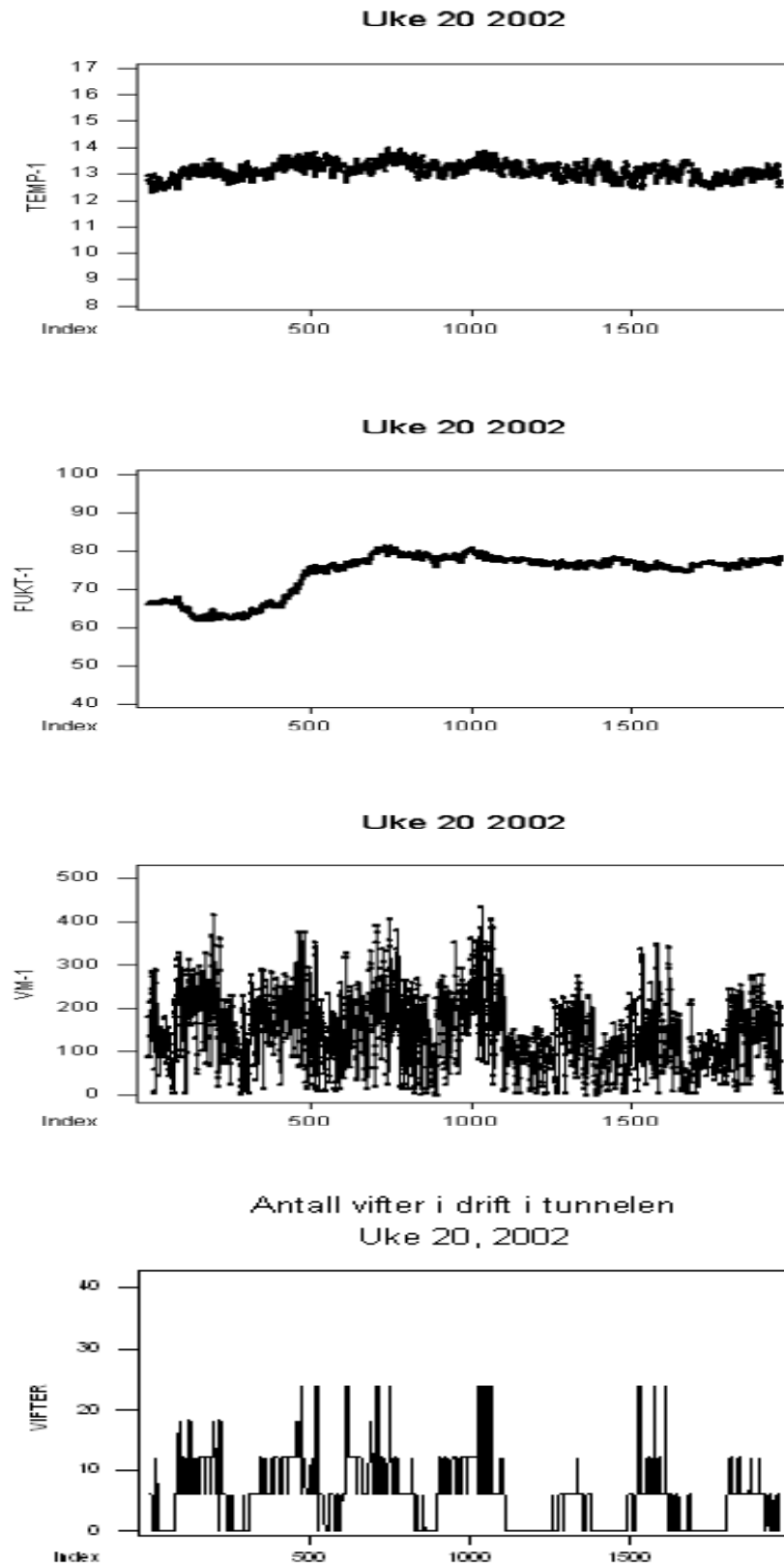


Figur 6 Temperatur, fuktighet, vindfart og vifter uke 11, 2002

Uke 20, 2002

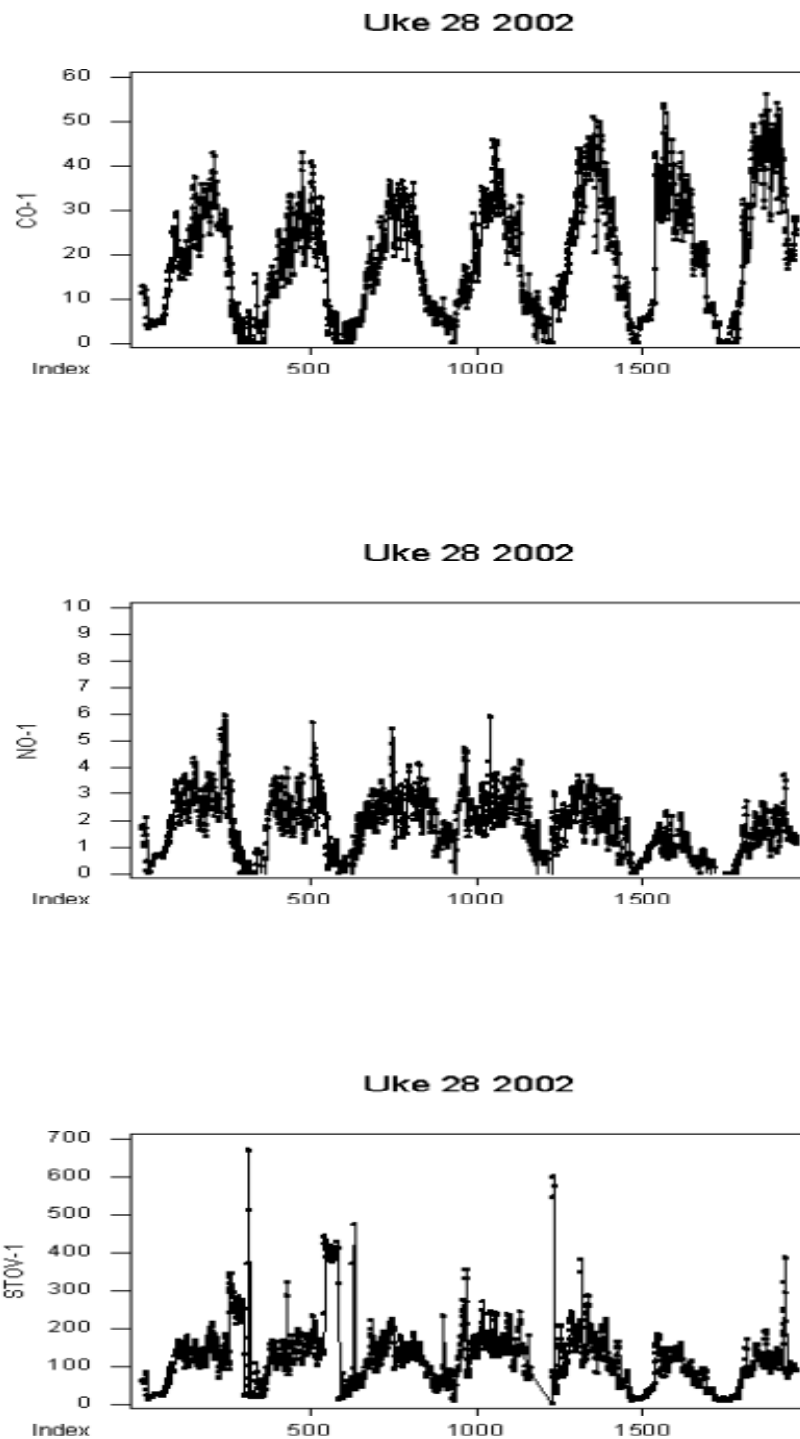


Figur 7 CO, NO og støv uke 20, 2002

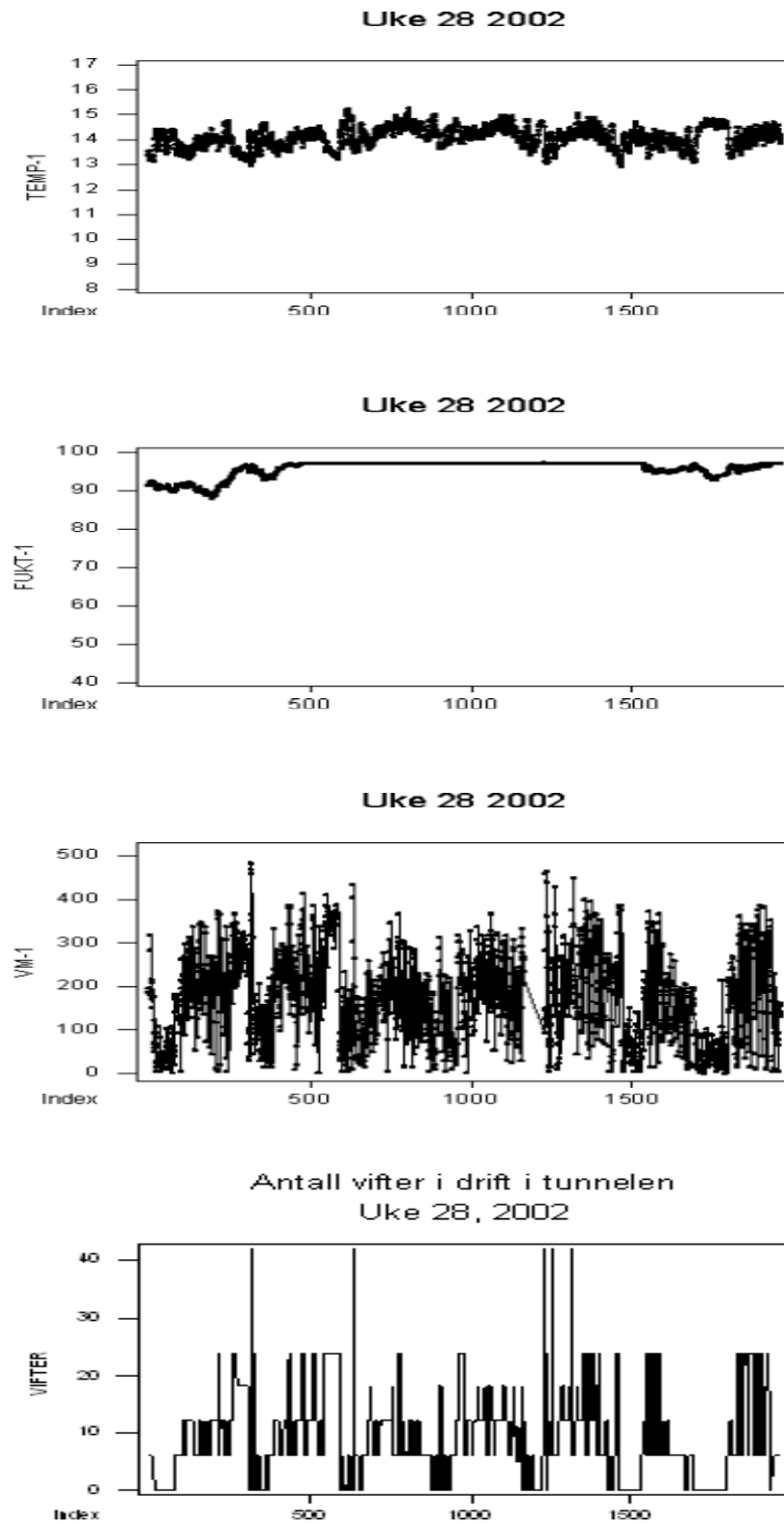


Figur 8 Temperatur, fuktighet, vindfart og vifter uke 20, 2002

Uke 28, 2002

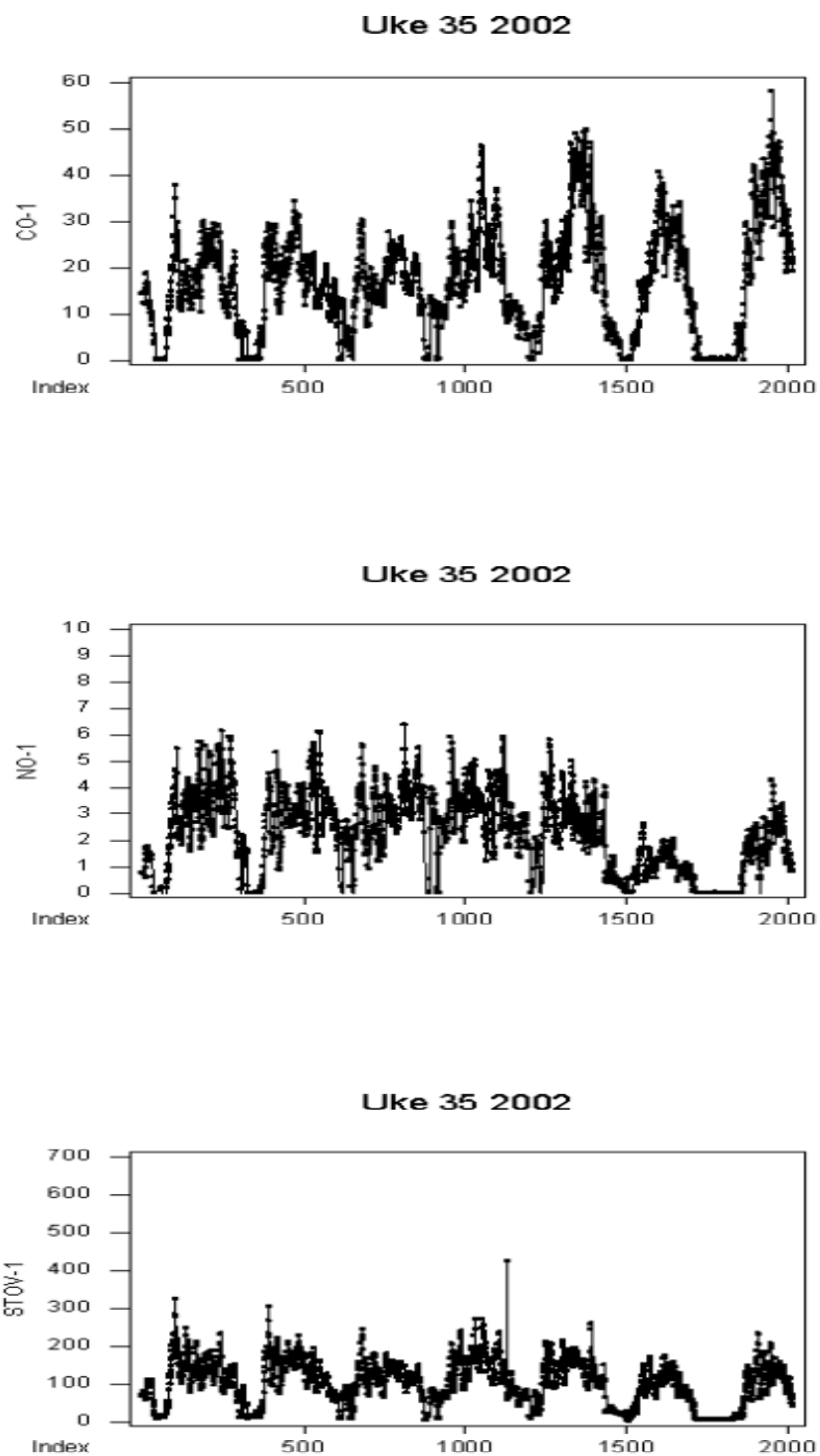


Figur 9 CO, NO og støv uke 28, 2002

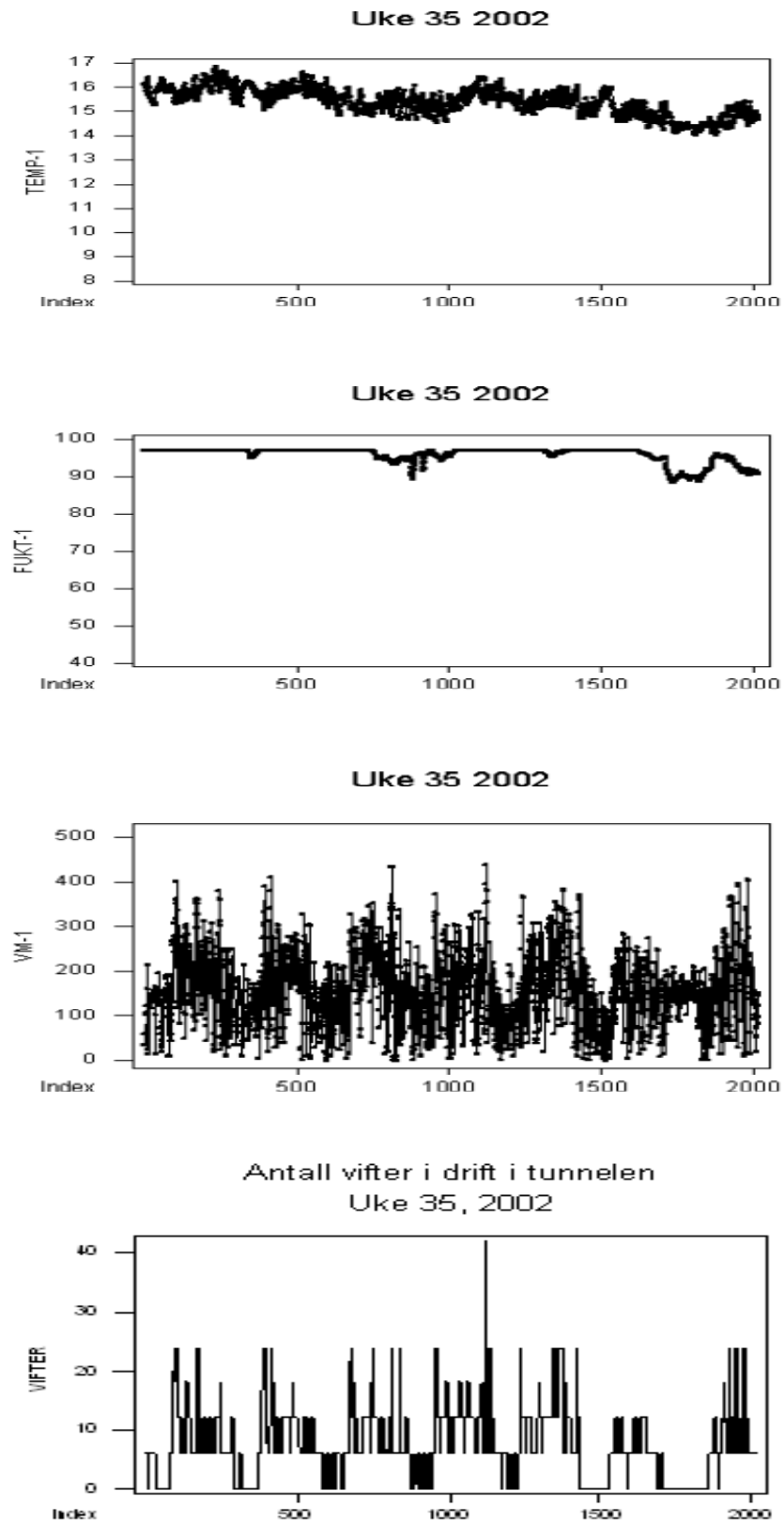


Figur 10 Temperatur, fuktighet, vindfart og vifter uke 28, 2002

Uke 35, 2002



Figur 11 CO, NO og støv uke 35, 2002



Figur 12 Temperatur, fuktighet, vindfart og vifter uke 35, 2002

Vedlegg B

Måleresultater for treningsukene

Deskriptiv statistikk

Tabell 2 Deskriptiv statistikk for CO, NO og støv i treningsukene

| Variable | N | Mean | Median | TrMean | StDev |
|-----------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|
| De seks ukene samlet | | | | | |
| CO-1 | 11992 | 12,227 | 9,687 | 11,358 | 10,847 |
| CO-2 | 11992 | 8,7751 | 6,9216 | 8,1285 | 8,0272 |
| CO-3 | 11992 | 7,2713 | 5,8962 | 6,7492 | 6,5626 |
| CO-4 | 11992 | 5,3288 | 4,3214 | 4,8422 | 5,4000 |
| CO-5 | 11992 | 2,1238 | 0,1465 | 1,6690 | 3,4718 |
| NO-1 | 11992 | 1,9099 | 1,8006 | 1,8441 | 1,3967 |
| NO-2 | 11992 | 1,7181 | 1,6449 | 1,6766 | 1,1153 |
| NO-3 | 11992 | 1,4577 | 1,3520 | 1,4067 | 1,0335 |
| NO-4 | 11992 | 1,1204 | 0,9705 | 1,0591 | 0,9000 |
| NO-5 | 11992 | 0,52667 | 0,34028 | 0,45173 | 0,64732 |

| Variable | N | N* | Mean | Median | TrMean | StDev |
|-----------------------------|-------|------|--------|--------|--------|--------|
| De seks ukene samlet | | | | | | |
| STOV-1 | 11915 | 77 | 98,545 | 93,997 | 94,118 | 65,369 |
| STOV-2 | 11992 | 0 | 93,744 | 86,819 | 89,044 | 60,887 |
| STOV-3 | 10709 | 1283 | 72,949 | 64,602 | 68,832 | 50,896 |
| STOV-4 | 9594 | 2398 | 51,282 | 46,657 | 48,637 | 33,903 |

| Variable | Minimum | Maximum | Q1 | Q3 |
|-----------------------------|----------|---------|---------|---------|
| De seks ukene samlet | | | | |
| CO-1 | -0,696 | 58,156 | 4,065 | 18,178 |
| CO-2 | -0,8423 | 47,7004 | 3,0213 | 13,1657 |
| CO-3 | -0,6775 | 39,6619 | 2,2889 | 10,8585 |
| CO-4 | -0,7508 | 34,2051 | 0,1648 | 8,2034 |
| CO-5 | -0,7141 | 27,1004 | -0,0549 | 3,7172 |
| NO-1 | -0,3815 | 9,4333 | 0,7385 | 2,8741 |
| NO-2 | -0,1038 | 6,1708 | 0,8423 | 2,4689 |
| NO-3 | -0,1343 | 5,9938 | 0,6684 | 2,1149 |
| NO-4 | -0,1099 | 5,4262 | 0,4456 | 1,6602 |
| NO-5 | -0,10376 | 5,13932 | 0,02136 | 0,79348 |
| STOV-1 | 0,513 | 669,942 | 47,340 | 134,159 |
| STOV-2 | 2,905 | 673,360 | 49,904 | 123,905 |
| STOV-3 | 0,855 | 653,023 | 37,770 | 98,099 |
| STOV-4 | -0,342 | 294,809 | 26,490 | 70,241 |

Tabell 3 Deskriptiv statistikk for temperatur i treningsukene

| Variable | N | Mean | Median | TrMean | StDev |
|-----------------------|----------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Uke 48, 2001 | | | | | |
| TEMP-SVE | 2016 | 6,1579 | 5,8667 | 6,1399 | 2,3061 |
| TEMP-1 | 2016 | 11,045 | 10,997 | 11,017 | 0,346 |
| TEMP-2 | 2016 | 11,655 | 11,603 | 11,629 | 0,317 |
| TEMP-3 | 2016 | 11,593 | 11,505 | 11,560 | 0,407 |
| TEMP-4 | 2016 | 10,483 | 10,431 | 10,451 | 0,502 |
| TEMP-5 | 2016 | 8,2305 | 8,0676 | 8,2127 | 1,0935 |
| TEMP-FOY | 2016 | 6,8067 | 6,5560 | 6,8050 | 1,8227 |
| Uke 03, 2002 | | | | | |
| TEMP-SVE | 2016 | 5,9917 | 6,1333 | 6,0103 | 0,7996 |
| TEMP-1 | 2016 | 10,263 | 10,294 | 10,264 | 0,448 |
| TEMP-2 | 2016 | 10,984 | 10,997 | 10,995 | 0,416 |
| TEMP-3 | 2016 | 11,210 | 11,124 | 11,187 | 2,126 |
| TEMP-4 | 2016 | 10,054 | 10,060 | 10,063 | 0,506 |
| TEMP-5 | 2016 | 8,2473 | 8,3801 | 8,2824 | 0,7038 |
| TEMP-FOY | 2016 | 6,7038 | 6,8960 | 6,7379 | 0,7555 |
| Uke 11, 2002 | | | | | |
| TEMP-SVE | 2016 | 4,7013 | 5,0000 | 4,6534 | 3,4020 |
| TEMP-1 | 2016 | 9,1641 | 9,1223 | 9,1431 | 0,4159 |
| TEMP-2 | 2016 | 9,7379 | 9,6496 | 9,7183 | 0,4324 |
| TEMP-3 | 2016 | 9,8195 | 9,7082 | 9,7905 | 0,5489 |
| TEMP-4 | 2016 | 8,5290 | 8,4582 | 8,5165 | 0,5426 |
| TEMP-5 | 2016 | 6,3029 | 6,5050 | 6,3432 | 1,0883 |
| TEMP-FOY | 2016 | 6,7231 | 6,3720 | 6,5740 | 2,5253 |
| Uke 20, 2002 | | | | | |
| TEMP-SVE | 1965 | 12,142 | 12,150 | 12,143 | 0,424 |
| TEMP-1 | 1965 | 13,114 | 13,126 | 13,116 | 0,298 |
| TEMP-2 | 1965 | 13,762 | 13,673 | 13,746 | 0,665 |
| TEMP-3 | 1965 | 13,107 | 13,107 | 13,103 | 0,412 |
| TEMP-4 | 1965 | 12,261 | 12,306 | 12,286 | 0,692 |
| TEMP-5 | 1965 | 13,885 | 13,520 | 13,722 | 3,267 |
| TEMP-FOY ¹ | | | | | |
| Uke 28, 2002 | | | | | |
| TEMP-SVE | 1963 | 14,884 | 14,933 | 14,860 | 1,906 |
| TEMP-1 | 1963 | 14,071 | 14,103 | 14,077 | 0,426 |
| TEMP-2 | 1963 | 15,103 | 15,119 | 15,107 | 0,301 |
| TEMP-3 | 1963 | 15,928 | 15,880 | 15,921 | 3,295 |
| TEMP-4 | 1963 | 15,493 | 15,490 | 15,491 | 0,398 |
| TEMP-5 | 1963 | 15,216 | 15,216 | 15,214 | 0,622 |
| TEMP-FOY | 1963 | 17,098 | 16,384 | 16,931 | 3,025 |
| Uke 35, 2002 | | | | | |
| TEMP-SVE | 2016 | 15,426 | 15,200 | 15,279 | 2,614 |
| TEMP-1 | 2016 | 15,388 | 15,431 | 15,394 | 0,558 |
| TEMP-2 | 2016 | 16,648 | 16,681 | 16,649 | 0,393 |
| TEMP-3 | 2016 | 17,583 | 17,365 | 17,542 | 1,227 |
| TEMP-4 | 2016 | 17,548 | 17,638 | 17,560 | 0,556 |
| TEMP-5 | 2016 | 17,603 | 17,658 | 17,610 | 0,922 |
| TEMP-FOY | 2016 | 19,025 | 18,256 | 18,734 | 3,891 |

¹ TEMP-FOY manglet alle data i uke 20 i 2002

Vedlegg B

| Variable | Minimum | Maximum | Q1 | Q3 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|
| Uke 48, 2001 | | | | |
| TEMP-SVE | 1,0667 | 12,0000 | 4,4000 | 8,0000 |
| TEMP-1 | 10,314 | 12,638 | 10,822 | 11,193 |
| TEMP-2 | 10,978 | 13,068 | 11,466 | 11,779 |
| TEMP-3 | 10,861 | 13,341 | 11,310 | 11,779 |
| TEMP-4 | 9,454 | 12,521 | 10,118 | 10,763 |
| TEMP-5 | 6,2316 | 10,8606 | 7,2668 | 9,3176 |
| TEMP-FOY | 2,8800 | 10,6320 | 5,4240 | 8,2880 |
| Uke 03, 2002 | | | | |
| TEMP-SVE | 3,7333 | 7,8667 | 5,4667 | 6,5333 |
| TEMP-1 | 9,044 | 11,642 | 9,982 | 10,548 |
| TEMP-2 | 9,767 | 12,111 | 10,743 | 11,271 |
| TEMP-3 | 6,622 | 16,544 | 9,532 | 12,926 |
| TEMP-4 | 8,595 | 11,505 | 9,767 | 10,411 |
| TEMP-5 | 6,0558 | 9,7278 | 7,8527 | 8,7121 |
| TEMP-FOY | 4,6960 | 7,9760 | 6,1220 | 7,2960 |
| Uke 11, 2002 | | | | |
| TEMP-SVE | -2,5333 | 13,6000 | 3,6000 | 6,2667 |
| TEMP-1 | 8,3801 | 10,5872 | 8,8684 | 9,3957 |
| TEMP-2 | 8,8879 | 10,9583 | 9,4153 | 9,9817 |
| TEMP-3 | 8,6926 | 11,8177 | 9,4348 | 10,1135 |
| TEMP-4 | 7,3254 | 10,0012 | 8,1848 | 8,8684 |
| TEMP-5 | 3,6143 | 8,2043 | 5,6456 | 7,1300 |
| TEMP-FOY | 1,8240 | 15,6320 | 5,4560 | 7,6940 |
| Uke 20, 2002 | | | | |
| TEMP-SVE | 11,075 | 13,244 | 11,837 | 12,462 |
| TEMP-1 | 12,326 | 13,947 | 12,911 | 13,331 |
| TEMP-2 | 12,345 | 15,744 | 13,224 | 14,279 |
| TEMP-3 | 12,208 | 14,279 | 12,794 | 13,419 |
| TEMP-4 | 9,864 | 13,966 | 11,935 | 12,716 |
| TEMP-5 | 7,960 | 23,984 | 11,304 | 15,896 |
| TEMP-FOY ² | | | | |
| Uke 28, 2002 | | | | |
| TEMP-SVE | 10,267 | 20,933 | 13,600 | 16,133 |
| TEMP-1 | 12,911 | 15,255 | 13,771 | 14,396 |
| TEMP-2 | 14,220 | 15,997 | 14,904 | 15,294 |
| TEMP-3 | 7,696 | 24,435 | 13,615 | 18,341 |
| TEMP-4 | 14,454 | 16,779 | 15,216 | 15,763 |
| TEMP-5 | 13,283 | 16,974 | 14,806 | 15,568 |
| TEMP-FOY | 11,936 | 27,352 | 14,968 | 18,768 |
| Uke 35, 2002 | | | | |
| TEMP-SVE | 9,867 | 24,400 | 13,733 | 16,267 |
| TEMP-1 | 14,005 | 16,857 | 15,001 | 15,802 |
| TEMP-2 | 15,587 | 17,677 | 16,349 | 16,935 |
| TEMP-3 | 14,806 | 21,466 | 16,662 | 18,439 |
| TEMP-4 | 16,076 | 18,869 | 17,189 | 17,951 |
| TEMP-5 | 15,138 | 19,474 | 16,759 | 18,322 |
| TEMP-FOY | 13,280 | 31,416 | 16,512 | 20,206 |

Her er det ikke tatt med oversikt for alle de seks ukene samlet.

² TEMP-FOY manglet alle data i uke 20 i 2002

Tabell 4 Deskriptiv statistikk for luftfuktighet i treningsukene

| Variable | N | Mean | Median | TrMean | StDev |
|-----------------------|----------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Uke 48, 2001 | | | | | |
| FUKT-SVE | 2016 | 84,445 | 85,500 | 84,780 | 10,721 |
| FUKT-1 | 2016 | 64,924 | 65,041 | 65,007 | 6,977 |
| FUKT-2 | 2016 | 62,895 | 62,624 | 62,960 | 6,975 |
| FUKT-3 | 2016 | 61,391 | 60,903 | 61,443 | 6,642 |
| FUKT-4 | 2016 | 63,658 | 62,600 | 63,708 | 6,714 |
| FUKT-5 | 2016 | 74,146 | 74,953 | 74,404 | 6,506 |
| FUKT-FOY | 2016 | 87,037 | 89,260 | 87,671 | 11,340 |
| Uke 03, 2002 | | | | | |
| FUKT-SVE | 2016 | 98,360 | 99,700 | 98,948 | 3,351 |
| FUKT-1 | 2016 | 82,023 | 82,363 | 82,054 | 3,134 |
| FUKT-2 | 2016 | 79,027 | 79,641 | 79,066 | 2,826 |
| FUKT-3 | 2016 | 76,944 | 77,676 | 77,041 | 2,831 |
| FUKT-4 | 2016 | 78,797 | 79,849 | 78,949 | 2,774 |
| FUKT-5 | 2016 | 88,303 | 88,577 | 88,395 | 1,859 |
| FUKT-FOY ³ | | | | | |
| Uke 11, 2002 | | | | | |
| FUKT-SVE | 2016 | 74,537 | 78,650 | 75,497 | 19,057 |
| FUKT-1 | 2016 | 57,295 | 60,695 | 57,432 | 12,567 |
| FUKT-2 | 2016 | 55,317 | 59,255 | 55,440 | 12,357 |
| FUKT-3 | 2016 | 54,018 | 57,692 | 54,157 | 12,096 |
| FUKT-4 | 2016 | 55,976 | 60,671 | 56,169 | 12,562 |
| FUKT-5 | 2016 | 65,351 | 71,401 | 65,801 | 14,306 |
| FUKT-FOY | 2016 | 71,083 | 77,600 | 71,921 | 21,561 |
| Uke 20, 2002 | | | | | |
| FUKT-SVE | 1965 | 76,632 | 85,600 | 77,347 | 17,973 |
| FUKT-1 | 1965 | 74,171 | 76,492 | 74,492 | 5,434 |
| FUKT-2 | 1965 | 70,617 | 72,903 | 70,962 | 5,605 |
| FUKT-3 | 1965 | 67,683 | 70,022 | 68,046 | 5,458 |
| FUKT-4 | 1965 | 66,232 | 68,630 | 66,625 | 5,723 |
| FUKT-5 | 1965 | 70,959 | 73,879 | 71,367 | 7,204 |
| FUKT-FOY | 1965 | 75,258 | 82,160 | 75,865 | 18,145 |
| Uke 28, 2002 | | | | | |
| FUKT-SVE | 1963 | 90,157 | 92,200 | 90,635 | 7,601 |
| FUKT-1 | 1963 | 95,728 | 97,098 | 95,989 | 2,202 |
| FUKT-2 | 1963 | 92,225 | 92,410 | 92,362 | 3,776 |
| FUKT-3 | 1963 | 87,310 | 87,405 | 87,411 | 3,802 |
| FUKT-4 | 1963 | 84,178 | 84,304 | 84,313 | 4,571 |
| FUKT-5 | 1963 | 85,713 | 85,745 | 85,891 | 5,037 |
| FUKT-FOY | 1963 | 86,978 | 89,680 | 87,936 | 12,259 |
| Uke 35, 2002 | | | | | |
| FUKT-SVE | 2016 | 85,848 | 88,200 | 86,547 | 11,254 |
| FUKT-1 | 2016 | 95,930 | 97,098 | 96,210 | 2,087 |
| FUKT-2 | 2016 | 89,709 | 89,993 | 89,840 | 5,249 |
| FUKT-3 | 2016 | 83,081 | 83,352 | 83,194 | 5,928 |
| FUKT-4 | 2016 | 76,283 | 77,615 | 76,430 | 6,618 |
| FUKT-5 | 2016 | 73,811 | 75,405 | 74,059 | 6,567 |
| FUKT-FOY | 2016 | 78,159 | 80,345 | 78,679 | 14,236 |

³ FUKT-FOY manglet alle data denne uka

Vedlegg B

| Variable | Minimum | Maximum | Q1 | Q3 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|
| Uke 48, 2001 | | | | |
| FUKT-SVE | 57,100 | 99,700 | 76,000 | 93,600 |
| FUKT-1 | 50,563 | 77,932 | 60,402 | 69,826 |
| FUKT-2 | 48,463 | 76,125 | 58,260 | 67,867 |
| FUKT-3 | 47,731 | 74,026 | 57,088 | 66,359 |
| FUKT-4 | 50,026 | 76,907 | 59,603 | 69,216 |
| FUKT-5 | 56,447 | 84,988 | 70,180 | 79,324 |
| FUKT-FOY | 56,530 | 99,580 | 78,773 | 97,587 |
| Uke 03, 2002 | | | | |
| FUKT-SVE | 76,900 | 99,700 | 98,800 | 99,700 |
| FUKT-1 | 75,344 | 88,235 | 79,202 | 84,597 |
| FUKT-2 | 73,269 | 84,768 | 76,589 | 81,326 |
| FUKT-3 | 70,388 | 81,545 | 74,960 | 79,177 |
| FUKT-4 | 71,682 | 83,206 | 76,840 | 80,837 |
| FUKT-5 | 80,837 | 92,215 | 87,063 | 89,749 |
| FUKT-FOY ⁴ | | | | |
| Uke 11, 2002 | | | | |
| FUKT-SVE | 20,400 | 99,700 | 66,500 | 87,800 |
| FUKT-1 | 34,986 | 76,345 | 45,607 | 68,355 |
| FUKT-2 | 33,082 | 75,149 | 44,252 | 66,189 |
| FUKT-3 | 32,276 | 72,756 | 42,903 | 64,870 |
| FUKT-4 | 32,667 | 75,320 | 44,685 | 67,434 |
| FUKT-5 | 32,716 | 86,770 | 51,741 | 76,998 |
| FUKT-FOY | 15,890 | 99,560 | 50,873 | 88,288 |
| Uke 20, 2002 | | | | |
| FUKT-SVE | 39,000 | 98,200 | 58,000 | 92,200 |
| FUKT-1 | 61,769 | 81,155 | 73,928 | 77,627 |
| FUKT-2 | 57,253 | 78,030 | 70,486 | 74,026 |
| FUKT-3 | 54,054 | 74,880 | 66,591 | 71,072 |
| FUKT-4 | 51,418 | 74,050 | 64,370 | 69,900 |
| FUKT-5 | 52,052 | 81,887 | 67,006 | 75,857 |
| FUKT-FOY | 35,480 | 99,510 | 56,575 | 91,115 |
| Uke 28, 2002 | | | | |
| FUKT-SVE | 59,000 | 99,700 | 85,100 | 96,000 |
| FUKT-1 | 87,942 | 97,171 | 95,169 | 97,122 |
| FUKT-2 | 82,693 | 97,684 | 89,798 | 95,657 |
| FUKT-3 | 77,493 | 93,655 | 84,646 | 90,628 |
| FUKT-4 | 73,098 | 91,580 | 80,593 | 88,553 |
| FUKT-5 | 71,877 | 94,314 | 82,083 | 90,164 |
| FUKT-FOY | 43,620 | 99,520 | 79,260 | 98,550 |
| Uke 35, 2002 | | | | |
| FUKT-SVE | 52,900 | 99,700 | 77,425 | 95,600 |
| FUKT-1 | 88,430 | 97,147 | 95,468 | 97,098 |
| FUKT-2 | 77,419 | 97,659 | 85,818 | 94,040 |
| FUKT-3 | 68,923 | 93,509 | 78,939 | 87,796 |
| FUKT-4 | 59,890 | 90,091 | 71,511 | 80,789 |
| FUKT-5 | 56,789 | 86,966 | 69,735 | 78,469 |
| FUKT-FOY | 40,990 | 99,500 | 69,693 | 88,615 |

Her er det ikke tatt med oversikt for alle de seks ukene samlet.

⁴ FUKT-FOY manglet alle data denne uka

Tabell 5 Deskriptiv statistikk for vindfart i treningsukene

| Variable | N | Mean | Median | StDev |
|-----------------------------|--------------------|--------|--------|--------|
| Uke 48, 2001 | 2016 | 245,29 | 255,01 | 88,57 |
| Uke 03, 2002 | 2016 | 172,73 | 174,44 | 94,55 |
| Uke 11, 2002 | 2016 | 245,15 | 238,29 | 90,49 |
| Uke 20, 2002 | 1963 ⁵ | 147,08 | 140,87 | 81,28 |
| Uke 28, 2002 | 1900 ⁶ | 172,31 | 174,32 | 100,34 |
| Uke 35, 2002 | 2012 ⁷ | 156,85 | 150,40 | 81,26 |
| De seks ukene samlet | 11923 ⁸ | 190,28 | 188,73 | 98,21 |

| Variable | Minimum | Maximum | Q1 | Q3 |
|-----------------------------|---------|---------|--------|--------|
| Uke 48, 2001 | -1,22 | 511,00 | 188,97 | 306,89 |
| Uke 03, 2002 | -1,95 | 506,36 | 101,57 | 228,28 |
| Uke 11, 2002 | 3,17 | 516,13 | 179,51 | 310,98 |
| Uke 20, 2002 | -1,71 | 433,36 | 86,67 | 203,86 |
| Uke 28, 2002 | -1,46 | 481,95 | 91,31 | 242,87 |
| Uke 35, 2002 | -1,46 | 438,00 | 101,32 | 208,99 |
| De seks ukene samlet | -1,95 | 516,13 | 120,61 | 257,82 |

Tabell 6 Deskriptiv statistikk for antall vifter i drift i treningsukene

| Variable | N | Mean | Median | TrMean | StDev |
|-----------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Uke 48, 2001 | 2016 | 8,437 | 6,000 | 8,030 | 7,077 |
| Uke 03, 2002 | 2016 | 5,488 | 6,000 | 4,753 | 6,290 |
| Uke 11, 2002 | 2016 | 10,321 | 12,000 | 9,791 | 8,463 |
| Uke 20, 2002 | 1965 | 5,912 | 6,000 | 5,423 | 5,651 |
| Uke 28, 2002 | 1963 | 9,275 | 6,000 | 8,861 | 7,702 |
| Uke 35, 2002 | 2016 | 7,792 | 6,000 | 7,313 | 6,255 |
| De seks ukene samlet | 11992 | 7,8730 | 6,0000 | 7,3331 | 7,182 |

| Variable | Minimum | Maximum | Q1 | Q3 |
|-----------------------------|---------|---------|--------|---------|
| Uke 48, 2001 | 0,000 | 42,000 | 0,000 | 12,000 |
| Uke 03, 2002 | 0,000 | 42,000 | 0,000 | 6,000 |
| Uke 11, 2002 | 0,000 | 42,000 | 6,000 | 18,000 |
| Uke 20, 2002 | 0,000 | 24,000 | 0,000 | 12,000 |
| Uke 28, 2002 | 0,000 | 42,000 | 6,000 | 12,000 |
| Uke 35, 2002 | 0,000 | 42,000 | 6,000 | 12,000 |
| De seks ukene samlet | 0,0000 | 42,0000 | 0,0000 | 12,0000 |

⁵ N* = 2 målinger manglet i uke 20⁶ N* = 63 målinger manglet i uke 28⁷ N* = 4 målinger manglet i uke 35⁸ N* = 69 målinger manglet i treningsukene

Samvariasjon mellom variabler

Tabell 7 Korrelasjoner mellom støv, CO og NO i uke 48, 2001

| | Stov-1 | Stov-2 | Stov-3 | Stov-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | NO-1 | NO-2 | NO-3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Stov-2 | 0,893 | | | | | | | | | | |
| Stov-3 | 0,814 | 0,913 | | | | | | | | | |
| Stov-4 | 0,810 | 0,887 | 0,917 | | | | | | | | |
| CO-1 | 0,637 | 0,568 | 0,489 | 0,499 | | | | | | | |
| CO-2 | 0,564 | 0,546 | 0,473 | 0,479 | 0,893 | | | | | | |
| CO-3 | 0,494 | 0,482 | 0,448 | 0,452 | 0,789 | 0,876 | | | | | |
| CO-4 | 0,421 | 0,425 | 0,401 | 0,435 | 0,665 | 0,745 | 0,841 | | | | |
| NO-1 | 0,766 | 0,703 | 0,628 | 0,607 | 0,591 | 0,487 | 0,391 | 0,291 | | | |
| NO-2 | 0,699 | 0,719 | 0,661 | 0,629 | 0,564 | 0,577 | 0,483 | 0,371 | 0,807 | | |
| NO-3 | 0,625 | 0,633 | 0,618 | 0,605 | 0,501 | 0,530 | 0,549 | 0,454 | 0,617 | 0,822 | |
| NO-4 | 0,541 | 0,575 | 0,589 | 0,610 | 0,398 | 0,443 | 0,481 | 0,492 | 0,449 | 0,634 | 0,850 |

Cell Contents: Pearson correlation. Korrelasjoner over 0,500 er markert.

Tabell 8 Korrelasjoner mellom støv, CO og NO i uke 03, 2002

| | Stov-1 | Stov-2 | Stov-3 | Stov-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | NO-1 | NO-2 | NO-3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Stov-2 | 0,744 | | | | | | | | | | |
| Stov-3 | 0,529 | 0,784 | | | | | | | | | |
| Stov-4 | 0,472 | 0,647 | 0,806 | | | | | | | | |
| CO-1 | 0,685 | 0,534 | 0,329 | 0,258 | | | | | | | |
| CO-2 | 0,546 | 0,570 | 0,392 | 0,282 | 0,868 | | | | | | |
| CO-3 | 0,436 | 0,476 | 0,451 | 0,361 | 0,737 | 0,877 | | | | | |
| CO-4 | 0,373 | 0,375 | 0,360 | 0,440 | 0,625 | 0,710 | 0,826 | | | | |
| NO-1 | 0,741 | 0,429 | 0,223 | 0,204 | 0,534 | 0,394 | 0,279 | 0,197 | | | |
| NO-2 | 0,652 | 0,541 | 0,336 | 0,291 | 0,485 | 0,499 | 0,394 | 0,296 | 0,816 | | |
| NO-3 | 0,568 | 0,481 | 0,461 | 0,416 | 0,423 | 0,459 | 0,499 | 0,392 | 0,638 | 0,826 | |
| NO-4 | 0,434 | 0,324 | 0,331 | 0,493 | 0,285 | 0,298 | 0,344 | 0,473 | 0,460 | 0,610 | 0,770 |

Tabell 9 Korrelasjoner mellom støv, CO og NO i uke 11, 2002

| | Stov-1 | Stov-2 | Stov-3 | Stov-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | NO-1 | NO-2 | NO-3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Stov-2 | 0,834 | | | | | | | | | | |
| Stov-3 | 0,479 | 0,539 | | | | | | | | | |
| Stov-4 | * | * | * | | | | | | | | |
| CO-1 | 0,427 | 0,369 | 0,411 | * | | | | | | | |
| CO-2 | 0,392 | 0,369 | 0,391 | * | 0,902 | | | | | | |
| CO-3 | 0,322 | 0,305 | 0,374 | * | 0,795 | 0,868 | | | | | |
| CO-4 | 0,251 | 0,232 | 0,284 | * | 0,671 | 0,724 | 0,835 | | | | |
| NO-1 | 0,666 | 0,559 | 0,333 | * | 0,536 | 0,473 | 0,408 | 0,304 | | | |
| NO-2 | 0,610 | 0,561 | 0,415 | * | 0,503 | 0,535 | 0,460 | 0,354 | 0,837 | | |
| NO-3 | 0,568 | 0,504 | 0,418 | * | 0,437 | 0,463 | 0,493 | 0,388 | 0,685 | 0,844 | |
| NO-4 | 0,501 | 0,450 | 0,323 | * | 0,344 | 0,371 | 0,413 | 0,455 | 0,530 | 0,674 | 0,841 |

Tabell 10 Korrelasjoner mellom støv, CO og NO i uke 20, 2002

| | Stov-1 | Stov-2 | Stov-3 | Stov-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | NO-1 | NO-2 | NO-3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Stov-2 | 0,866 | | | | | | | | | | |
| Stov-3 | 0,757 | 0,851 | | | | | | | | | |
| Stov-4 | 0,687 | 0,740 | 0,835 | | | | | | | | |
| CO-1 | 0,636 | 0,541 | 0,439 | 0,421 | | | | | | | |
| CO-2 | 0,614 | 0,598 | 0,483 | 0,442 | 0,926 | | | | | | |
| CO-3 | 0,600 | 0,581 | 0,559 | 0,503 | 0,849 | 0,896 | | | | | |
| CO-4 | 0,547 | 0,538 | 0,503 | 0,580 | 0,768 | 0,802 | 0,864 | | | | |
| NO-1 | 0,799 | 0,741 | 0,667 | 0,600 | 0,312 | 0,299 | 0,287 | 0,245 | | | |
| NO-2 | 0,745 | 0,827 | 0,734 | 0,623 | 0,333 | 0,396 | 0,370 | 0,317 | 0,849 | | |
| NO-3 | 0,701 | 0,760 | 0,809 | 0,716 | 0,352 | 0,408 | 0,485 | 0,415 | 0,698 | 0,837 | |
| NO-4 | 0,598 | 0,643 | 0,685 | 0,808 | 0,277 | 0,318 | 0,375 | 0,470 | 0,570 | 0,654 | 0,803 |

Cell Contents: Pearson correlation. Korrelasjoner over 0,500 er markert.

Tabell 11 Korrelasjoner mellom støv, CO og NO i uke 28, 2002

| | Stov-1 | Stov-2 | Stov-3 | Stov-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | NO-1 | NO-2 | NO-3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Stov-2 | 0,404 | | | | | | | | | | |
| Stov-3 | 0,280 | 0,771 | | | | | | | | | |
| Stov-4 | 0,254 | 0,681 | 0,760 | | | | | | | | |
| CO-1 | 0,335 | 0,668 | 0,560 | 0,485 | | | | | | | |
| CO-2 | 0,269 | 0,695 | 0,580 | 0,498 | 0,914 | | | | | | |
| CO-3 | 0,235 | 0,622 | 0,629 | 0,552 | 0,821 | 0,878 | | | | | |
| CO-4 | 0,163 | 0,510 | 0,508 | 0,624 | 0,706 | 0,760 | 0,835 | | | | |
| NO-1 | 0,463 | 0,722 | 0,567 | 0,494 | 0,560 | 0,482 | 0,422 | 0,316 | | | |
| NO-2 | 0,390 | 0,837 | 0,671 | 0,590 | 0,555 | 0,595 | 0,535 | 0,421 | 0,831 | | |
| NO-3 | 0,365 | 0,754 | 0,767 | 0,687 | 0,538 | 0,557 | 0,649 | 0,530 | 0,674 | 0,833 | |
| NO-4 | 0,238 | 0,585 | 0,606 | 0,785 | 0,403 | 0,431 | 0,493 | 0,604 | 0,467 | 0,611 | 0,767 |

Tabell 12 Korrelasjoner mellom støv, CO og NO i uke 35, 2002

| | Stov-1 | Stov-2 | Stov-3 | Stov-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | NO-1 | NO-2 | NO-3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Stov-2 | 0,790 | | | | | | | | | | |
| Stov-3 | 0,643 | 0,789 | | | | | | | | | |
| Stov-4 | 0,564 | 0,677 | 0,789 | | | | | | | | |
| CO-1 | 0,776 | 0,688 | 0,580 | 0,527 | | | | | | | |
| CO-2 | 0,683 | 0,740 | 0,633 | 0,590 | 0,900 | | | | | | |
| CO-3 | 0,609 | 0,664 | 0,694 | 0,640 | 0,792 | 0,881 | | | | | |
| CO-4 | 0,536 | 0,570 | 0,597 | 0,712 | 0,705 | 0,776 | 0,856 | | | | |
| NO-1 | 0,790 | 0,666 | 0,533 | 0,436 | 0,558 | 0,475 | 0,392 | 0,309 | | | |
| NO-2 | 0,640 | 0,770 | 0,638 | 0,524 | 0,486 | 0,558 | 0,481 | 0,362 | 0,789 | | |
| NO-3 | 0,574 | 0,679 | 0,762 | 0,654 | 0,463 | 0,530 | 0,590 | 0,473 | 0,601 | 0,817 | |
| NO-4 | 0,469 | 0,551 | 0,634 | 0,784 | 0,378 | 0,441 | 0,482 | 0,567 | 0,468 | 0,615 | 0,785 |

Korrelasjonene i Tabell 13 gjelder NO og CO i målepunktene 1 – 3 og fuktigheten i Sveio og i målepunktene 1 – 3 inne i tunnelen.

Tabell 13 Korrelasjoner mellom luftfuktighet og NO eller CO

| | NO-1 | NO-2 | NO-3 | CO-1 | CO-2 | CO-3 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Uke 48, 2001 | | | | | | |
| FUKT-SVE | -0,277 | -0,252 | -0,214 | -0,112 | -0,062 | -0,030 |
| FUKT-1 | -0,227 | -0,206 | -0,183 | 0,217 | 0,237 | 0,237 |
| FUKT-2 | -0,236 | -0,211 | -0,186 | 0,207 | 0,229 | 0,229 |
| FUKT-3 | -0,244 | -0,222 | -0,192 | 0,187 | 0,211 | 0,214 |
| Uke 03, 2002 | | | | | | |
| FUKT-SVE | 0,332 | 0,355 | 0,337 | 0,296 | 0,299 | 0,290 |
| FUKT-1 | 0,602 | 0,551 | 0,453 | 0,183 | 0,059 | -0,029 |
| FUKT-2 | 0,627 | 0,593 | 0,502 | 0,112 | -0,000 | -0,080 |
| FUKT-3 | 0,597 | 0,574 | 0,506 | 0,050 | -0,045 | -0,108 |
| Uke 11, 2002 | | | | | | |
| FUKT-SVE | 0,037 | 0,048 | 0,055 | -0,009 | 0,013 | 0,060 |
| FUKT-1 | 0,251 | 0,254 | 0,232 | 0,186 | 0,200 | 0,214 |
| FUKT-2 | 0,230 | 0,237 | 0,216 | 0,205 | 0,219 | 0,233 |
| FUKT-3 | 0,218 | 0,225 | 0,209 | 0,201 | 0,215 | 0,232 |
| Uke 20, 2002 | | | | | | |
| FUKT-SVE | -0,127 | -0,121 | -0,148 | -0,300 | -0,308 | -0,286 |
| FUKT-1 | -0,140 | -0,084 | -0,075 | 0,252 | 0,231 | 0,221 |
| FUKT-2 | -0,079 | -0,018 | -0,012 | 0,278 | 0,261 | 0,253 |
| FUKT-3 | -0,090 | -0,028 | -0,014 | 0,246 | 0,233 | 0,230 |
| Uke 28, 2002 | | | | | | |
| FUKT-SVE | -0,170 | -0,218 | -0,230 | -0,547 | -0,522 | -0,458 |
| FUKT-1 | -0,020 | -0,043 | -0,043 | -0,009 | -0,039 | -0,049 |
| FUKT-2 | 0,128 | 0,066 | 0,029 | -0,132 | -0,151 | -0,145 |
| FUKT-3 | 0,174 | 0,109 | 0,073 | -0,141 | -0,159 | -0,149 |
| Uke 35, 2002 | | | | | | |
| FUKT-SVE | -0,448 | -0,386 | -0,315 | -0,333 | -0,299 | -0,267 |
| FUKT-1 | 0,347 | 0,358 | 0,283 | 0,143 | 0,110 | 0,036 |
| FUKT-2 | 0,001 | 0,034 | 0,011 | -0,240 | -0,211 | -0,205 |
| FUKT-3 | -0,040 | -0,015 | -0,024 | -0,252 | -0,220 | -0,202 |

Cell Contents: Pearson correlation

Tabell 14 Korrelasjoner mellom fuktighet i sju målepunkter

| | FUKT-SVE | FUKT-1 | FUKT-2 | FUKT-3 | FUKT-4 | FUKT-5 |
|----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| FUKT-1 | 0,491 | | | | | |
| FUKT-2 | 0,527 | 0,987 | | | | |
| FUKT-3 | 0,569 | 0,971 | 0,994 | | | |
| FUKT-4 | 0,669 | 0,895 | 0,941 | 0,969 | | |
| FUKT-5 | 0,814 | 0,649 | 0,710 | 0,767 | 0,891 | |
| FUKT-FOY | 0,869 | 0,362 | 0,401 | 0,442 | 0,555 | 0,787 |

Cell Contents: Pearson correlation
Korrelasjoner for alle seks ukene samlet.

Korrelasjonene i Tabell 15 gjelder NO og CO i målepunktene 1 – 3 og temperaturen i Sveio og i målepunktene 1 – 3 inne i tunnelen.

Tabell 15 Korrelasjoner mellom temperatur og NO eller CO

| | NO-1 | NO-2 | NO-3 | CO-1 | CO-2 | CO-3 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Uke 48, 2001 | | | | | | |
| TEMP-SVE | 0,024 | 0,020 | -0,002 | 0,209 | 0,186 | 0,155 |
| TEMP-1 | 0,199 | 0,172 | 0,174 | 0,345 | 0,393 | 0,400 |
| TEMP-2 | -0,001 | 0,033 | 0,063 | 0,280 | 0,346 | 0,361 |
| TEMP-3 | -0,210 | -0,162 | -0,104 | 0,201 | 0,269 | 0,292 |
| Uke 03, 2002 | | | | | | |
| TEMP-SVE | 0,268 | 0,304 | 0,307 | 0,012 | 0,039 | 0,047 |
| TEMP-1 | 0,232 | 0,278 | 0,255 | -0,072 | -0,032 | -0,025 |
| TEMP-2 | 0,026 | 0,124 | 0,157 | -0,239 | -0,149 | -0,102 |
| TEMP-3 | -0,001 | -0,005 | 0,017 | -0,061 | -0,047 | -0,025 |
| Uke 11, 2002 | | | | | | |
| TEMP-SVE | 0,247 | 0,228 | 0,192 | 0,401 | 0,370 | 0,312 |
| TEMP-1 | 0,654 | 0,570 | 0,522 | 0,416 | 0,386 | 0,360 |
| TEMP-2 | 0,487 | 0,460 | 0,429 | 0,273 | 0,270 | 0,267 |
| TEMP-3 | 0,326 | 0,317 | 0,307 | 0,234 | 0,239 | 0,237 |
| Uke 20, 2002 | | | | | | |
| TEMP-SVE | 0,458 | 0,445 | 0,423 | 0,358 | 0,352 | 0,343 |
| TEMP-1 | 0,406 | 0,394 | 0,376 | 0,206 | 0,203 | 0,209 |
| TEMP-2 | 0,130 | 0,115 | 0,119 | 0,059 | 0,056 | 0,048 |
| TEMP-3 | 0,475 | 0,460 | 0,437 | 0,237 | 0,228 | 0,222 |
| Uke 28, 2002 | | | | | | |
| TEMP-SVE | 0,205 | 0,225 | 0,234 | 0,520 | 0,508 | 0,463 |
| TEMP-1 | 0,176 | 0,192 | 0,174 | 0,163 | 0,222 | 0,260 |
| TEMP-2 | 0,158 | 0,179 | 0,169 | 0,119 | 0,159 | 0,199 |
| TEMP-3 | -0,000 | -0,018 | -0,035 | -0,008 | -0,008 | -0,017 |
| Uke 35, 2002 | | | | | | |
| TEMP-SVE | 0,562 | 0,469 | 0,369 | 0,318 | 0,270 | 0,217 |
| TEMP-1 | 0,341 | 0,340 | 0,265 | 0,047 | 0,066 | 0,041 |
| TEMP-2 | 0,353 | 0,332 | 0,245 | 0,019 | 0,020 | -0,006 |
| TEMP-3 | 0,178 | 0,142 | 0,106 | 0,057 | 0,037 | 0,024 |

Cell Contents: Pearson correlation

Tabell 16 Korrelasjoner mellom temperatur i sju målepunkter

| | TEMP-SVE | TEMP-1 | TEMP-2 | TEMP-3 | TEMP-4 | TEMP-5 |
|----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TEMP-1 | 0,888 | | | | | |
| TEMP-2 | 0,881 | 0,990 | | | | |
| TEMP-3 | 0,746 | 0,833 | 0,841 | | | |
| TEMP-4 | 0,872 | 0,967 | 0,976 | 0,855 | | |
| TEMP-5 | 0,888 | 0,933 | 0,928 | 0,783 | 0,922 | |
| TEMP-FOY | 0,952 | 0,881 | 0,882 | 0,762 | 0,897 | 0,921 |

Cell Contents: Pearson correlation

Korrelasjoner for alle seks ukene samlet

Vedlegg C

Modeller**Tabell 17 Modell 1B, regresjonskoeffisienter, X-Vars + Interactions**

| | PC 01 | PC 02 | PC 03 | PC 04 | PC 05 |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| STOV-1 | 0,146 | 0,264 | 0,473 | 0,586 | 0,619 |
| STOV-2 | 0,129 | 0,19 | 0,219 | 0,237 | 0,196 |
| STOV-3 | 0,105 | 0,138 | 7,21E-02 | 3,27E-02 | -1,02E-02 |
| STOV-4 | 0,102 | 0,118 | 3,03E-02 | 4,16E-03 | 2,28E-02 |
| CO-1ma | 9,85E-02 | 0,106 | 0,255 | 0,308 | 0,348 |
| CO-2ma | 8,31E-02 | 4,62E-02 | 8,13E-02 | 6,39E-02 | 4,71E-02 |
| CO-3ma | 7,10E-02 | 6,48E-03 | -2,93E-02 | -7,66E-02 | -7,64E-02 |
| CO-4ma | 5,67E-02 | -3,06E-02 | -0,126 | -0,191 | -0,169 |
| STOV-1*CO-1 | -2,69E-02 | -7,11E-02 | 1,72E-02 | 0,143 | 0,163 |
| STOV-1**2 | 5,75E-04 | -5,26E-02 | -0,231 | -0,234 | -0,306 |
| STOV-2**2 | 1,60E-02 | -3,27E-02 | -0,233 | -0,19 | -0,105 |
| CO-1**2 | -4,03E-03 | -0,13 | -0,249 | -0,263 | -0,317 |

Tabell 18 Modell 2B, regresjonskoeffisienter, X-Vars + Interactions

| | PC 01 | PC 02 | PC 03 | PC 04 |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| STOV-1 | 0,116 | 0,171 | 0,226 | 0,303 |
| STOV-2 | 0,123 | 0,19 | 0,243 | 0,326 |
| STOV-3 | 0,107 | 0,155 | 0,122 | 8,72E-02 |
| STOV-4 | 0,105 | 0,126 | 4,84E-02 | -1,18E-02 |
| CO-1ma | 0,105 | 8,82E-02 | 0,132 | 0,134 |
| CO-2ma | 0,113 | 0,118 | 0,215 | 0,272 |
| CO-3ma | 0,102 | 7,78E-02 | 9,87E-02 | 8,04E-02 |
| CO-4ma | 8,45E-02 | 2,62E-02 | -3,69E-02 | -0,122 |
| STOV-1*CO-1 | -1,40E-02 | -5,47E-02 | 2,34E-02 | 0,137 |
| STOV-1**2 | -5,69E-03 | -5,59E-02 | -0,169 | -0,139 |
| STOV-2**2 | 4,89E-03 | -4,96E-02 | -0,218 | -0,214 |
| CO-1**2 | 1,30E-02 | -0,114 | -0,237 | -0,293 |

Tabell 17 viser beste modell for NO i målepunkt 1 og Tabell 18 tilsvarende for målepunkt 2. Ved utregning med disse modellene bruker man standardiserte måleverdier (1/StDev).

Støv i målepunkt 1 og 2 og CO i målepunkt 1 er de viktigste modellvariablene i modell 1B.

Støv i målepunkt 1 og 2 og CO i målepunkt 1 og 2 er de viktigste modellvariablene i modell 2B.

Vedlegg D

Måleresultater for testukene

Deskriptiv statistikk

Tabell 19 Deskriptiv statistikk for CO og NO i testukene

| Variabel | N | N* | Gj.sn. | Std. | Median | Max |
|----------|-------|----|--------|-------|--------|------|
| CO-1 | 12082 | 0 | 13,08 | 11,77 | 10,51 | 67,1 |
| CO-2 | 12082 | 0 | 9,41 | 8,74 | 7,67 | 54,8 |
| CO-3 | 12082 | 0 | 7,69 | 7,09 | 6,43 | 49,1 |
| CO-4 | 12082 | 0 | 5,61 | 5,72 | 4,71 | 40,1 |
| CO-5 | 12082 | 0 | 2,12 | 3,35 | 0,16 | 25,1 |
| NO-1 | 12082 | 0 | 1,71 | 1,43 | 1,54 | 11,6 |
| NO-2 | 12082 | 0 | 1,58 | 1,27 | 1,44 | 11,6 |
| NO-3 | 12082 | 0 | 1,31 | 1,11 | 1,18 | 8,7 |
| NO-4 | 12082 | 0 | 0,98 | 0,93 | 0,80 | 12,2 |
| NO-5 | 12082 | 0 | 0,43 | 0,58 | 0,18 | 7,0 |

Tabell 20 Deskriptiv statistikk for støv, vindfart og vifter i testukene

| Variabel | N | N* | Gj.sn. | Std. | Median | Max |
|----------|-------|------|--------|------|--------|-----|
| STOV-1 | 9686 | 2396 | 113 | 79 | 104 | 683 |
| STOV-2 | 11798 | 284 | 100 | 61 | 93 | 593 |
| STOV-3 | 11716 | 366 | 81 | 51 | 75 | 583 |
| STOV-4 | 7792 | 4290 | 58 | 38 | 53 | 454 |
| VM-1 | 12081 | 1 | 203 | 94 | 208 | 760 |
| VIFTER | 12082 | 0 | 8,32 | 7,87 | 6,00 | 46 |

Samvariasjon mellom variabler

Tabell 21 Korrelasjoner mellom støv, CO og NO i testukene

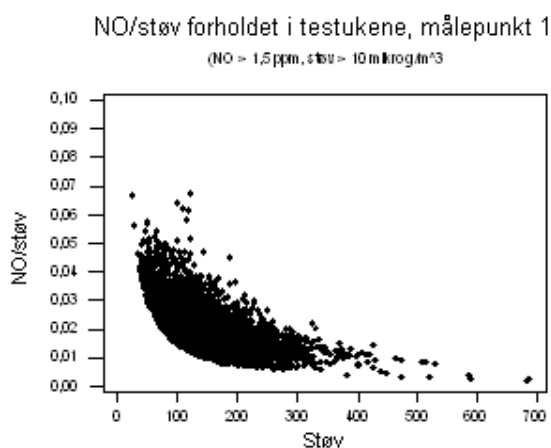
| | Stov-1 | Stov-2 | Stov-3 | Stov-4 | CO-1 | CO-2 | CO-3 | CO-4 | NO-1 | NO-2 | NO-3 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Stov-2 | 0,649 | | | | | | | | | | |
| Stov-3 | 0,546 | 0,879 | | | | | | | | | |
| Stov-4 | 0,446 | 0,777 | 0,863 | | | | | | | | |
| CO-1 | 0,508 | 0,560 | 0,469 | 0,517 | | | | | | | |
| CO-2 | 0,458 | 0,562 | 0,465 | 0,510 | 0,930 | | | | | | |
| CO-3 | 0,446 | 0,527 | 0,489 | 0,532 | 0,868 | 0,921 | | | | | |
| CO-4 | 0,400 | 0,496 | 0,457 | 0,577 | 0,807 | 0,851 | 0,897 | | | | |
| NO-1 | 0,581 | 0,700 | 0,611 | 0,625 | 0,534 | 0,486 | 0,451 | 0,404 | | | |
| NO-2 | 0,547 | 0,719 | 0,620 | 0,643 | 0,547 | 0,590 | 0,552 | 0,488 | 0,847 | | |
| NO-3 | 0,507 | 0,684 | 0,677 | 0,703 | 0,519 | 0,551 | 0,596 | 0,523 | 0,739 | 0,871 | |
| NO-4 | 0,444 | 0,590 | 0,590 | 0,745 | 0,480 | 0,510 | 0,537 | 0,583 | 0,644 | 0,755 | 0,845 |

Cell Contents: Pearson correlation. Korrelasjoner over 0,500 er markert.



Figur 13 Plott av CO og NO mot støv i målepunkt 1 i testukene

Figur 13 viser plott av CO og NO mot støv i målepunkt 1, med regresjonslinjer⁹. Her ble brukt data for alle seks ukene, men siden støv i målepunkt 1 hadde manglende data i uke 13 2002, ble det i praksis bare 5 uker.



Figur 14 Plott av NO/støv forholdet mot støv¹⁰ i målepunkt 1 i testukene

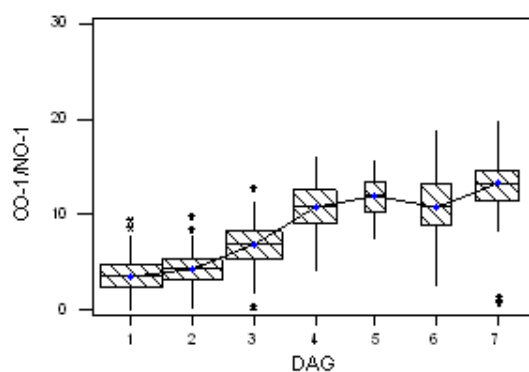
⁹ Likninger for regresjonslinjene for testuker:

$$CO-1 = 5,08794 + 0,0785480 STOV-1$$

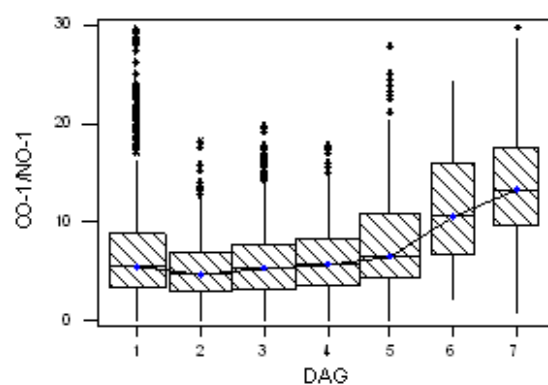
$$NO-1 = 0,619862 + 0,009373 STOV-1$$

¹⁰ Manglende data for støv 1 i uke 13 2002, plottet gjelder dermed 5 av testukene

Boxplot CO/NO (for NO>1,5 ppm) uke 13, 2002
Påskeuka i 2002



Boxplot CO/NO (for NO>1,5 ppm)
Resultat for testukene samla



Figur 15 Boxplot av ukedagsfordelingen for CO/NO i målepunkt 1 i testukene

Testresultater

Tabell 22 Deskriptiv statistikk for målt og predikert NO i alle testukene

| Variable | N | N* | Mean | Median | StDev |
|----------|-------|----|--------|--------|--------|
| NO-1 | 12082 | 0 | 1,7076 | 1,5381 | 1,4297 |
| NO-2 | 12082 | 0 | 1,5781 | 1,4374 | 1,2670 |
| Predic1A | 12081 | 1 | 2,0679 | 1,9830 | 0,9607 |
| Predic1B | 12081 | 1 | 2,0231 | 2,0800 | 1,1187 |
| Predic2A | 12081 | 1 | 1,8117 | 1,7410 | 0,7921 |
| Predic2B | 12081 | 1 | 1,8250 | 1,8510 | 0,8716 |

| Variable | Minimum | Maximum | Q1 | Q3 |
|----------|---------|---------|--------|--------|
| NO-1 | -0,1312 | 11,5543 | 0,5249 | 2,6467 |
| NO-2 | -0,1373 | 11,5726 | 0,5860 | 2,3469 |
| Predic1A | -0,2740 | 7,0430 | 1,4180 | 2,6530 |
| Predic1B | -8,5460 | 4,9080 | 1,2715 | 2,7960 |
| Predic2A | 0,0770 | 5,2610 | 1,2070 | 2,3345 |
| Predic2B | -1,1510 | 4,8030 | 1,1600 | 2,4790 |

Tabell 23 Korrelasjoner - målt og predikert NO i testukene (N = 12082)

| | NO-1 | NO-2 | Predic1A | Predic1B | Predic2A |
|----------|--------------|--------------|----------|----------|----------|
| NO-2 | 0,847 | | | | |
| Predic1A | 0,651 | 0,597 | | | |
| Predic1B | 0,705 | 0,641 | 0,738 | | |
| Predic2A | 0,659 | 0,712 | 0,868 | 0,783 | |
| Predic2B | 0,725 | 0,725 | 0,833 | 0,922 | 0,940 |

Cell Contents: Pearson correlation

Tabell 24 Deskriptiv statistikk - målt og predikert NO i testukene (N = 7673)

| Variable | N | Mean | Median | TrMean | StDev |
|----------|------|--------|--------|--------|--------|
| NO-1 | 7673 | 1,7182 | 1,5625 | 1,6504 | 1,3613 |
| NO-2 | 7673 | 1,6618 | 1,5778 | 1,6122 | 1,1967 |
| Pred-1A | 7673 | 2,1304 | 2,0910 | 2,0906 | 1,1118 |
| Pred-1B | 7673 | 2,0501 | 2,1100 | 2,0751 | 1,2775 |
| Pred-2A | 7673 | 1,8790 | 1,8400 | 1,8515 | 0,8900 |
| Pred-2B | 7673 | 1,8847 | 1,9390 | 1,8809 | 0,9625 |

| Variable | Minimum | Maximum | Q1 | Q3 |
|----------|---------|---------|--------|--------|
| NO-1 | -0,1312 | 7,1169 | 0,5768 | 2,6948 |
| NO-2 | -0,1373 | 5,9389 | 0,7141 | 2,4964 |
| Pred-1A | -0,2740 | 7,0430 | 1,2790 | 2,9015 |
| Pred-1B | -8,5460 | 4,9080 | 1,2345 | 3,0220 |
| Pred-2A | 0,0770 | 5,2610 | 1,2050 | 2,5130 |
| Pred-2B | -1,1510 | 4,8030 | 1,1800 | 2,6295 |

Tabell 25 Korrelasjoner - målt og predikert NO i testukene (N = 7673)

| | NO-1 | NO-2 | Pred-1A | Pred-1B | Pred-2A |
|---------|--------------|--------------|---------|---------|---------|
| NO-2 | 0,883 | | | | |
| Pred-1A | 0,725 | 0,697 | | | |
| Pred-1B | 0,769 | 0,731 | 0,701 | | |
| Pred-2A | 0,727 | 0,812 | 0,866 | 0,761 | |
| Pred-2B | 0,795 | 0,829 | 0,825 | 0,917 | 0,935 |

Tabell- og figurliste vedlegg

Tabelliste

| | |
|--|----|
| TABELL 1 MÅLEENHETER | 1 |
| TABELL 26 DESKRIPTIV STATISTIKK FOR CO, NO OG STØV I TRENINGUKENE..... | 14 |
| TABELL 27 DESKRIPTIV STATISTIKK FOR TEMPERATUR I TRENINGUKENE | 15 |
| TABELL 28 DESKRIPTIV STATISTIKK FOR LUFTFUKTIGHET I TRENINGUKENE | 17 |
| TABELL 29 DESKRIPTIV STATISTIKK FOR VINDFART I TRENINGUKENE | 19 |
| TABELL 30 DESKRIPTIV STATISTIKK FOR ANTALL VIFTER I DRIFT I TRENINGUKENE..... | 19 |
| TABELL 31 KORRELASJONER MELLOM STØV, CO OG NO I UKE 48, 2001..... | 20 |
| TABELL 32 KORRELASJONER MELLOM STØV, CO OG NO I UKE 03, 2002..... | 20 |
| TABELL 33 KORRELASJONER MELLOM STØV, CO OG NO I UKE 11, 2002..... | 20 |
| TABELL 34 KORRELASJONER MELLOM STØV, CO OG NO I UKE 20, 2002..... | 21 |
| TABELL 35 KORRELASJONER MELLOM STØV, CO OG NO I UKE 28, 2002..... | 21 |
| TABELL 36 KORRELASJONER MELLOM STØV, CO OG NO I UKE 35, 2002..... | 21 |
| TABELL 37 KORRELASJONER MELLOM LUFTFUKTIGHET OG NO ELLER CO | 22 |
| TABELL 38 KORRELASJONER MELLOM FUKTIGHET I SJU MÅLEPUNKTER..... | 22 |
| TABELL 39 KORRELASJONER MELLOM TEMPERATUR OG NO ELLER CO..... | 23 |
| TABELL 40 KORRELASJONER MELLOM TEMPERATUR I SJU MÅLEPUNKTER | 23 |
| TABELL 41 MODELL 1B, REGRESJONSKOEFFISIENTER, X-VARS + INTERACTIONS | 24 |
| TABELL 42 MODELL 2B, REGRESJONSKOEFFISIENTER, X-VARS + INTERACTIONS | 24 |
| TABELL 43 DESKRIPTIV STATISTIKK FOR CO OG NO I TESTUKENE | 25 |
| TABELL 44 DESKRIPTIV STATISTIKK FOR STØV, VINDFART OG VIFTER I TESTUKENE..... | 25 |
| TABELL 45 KORRELASJONER MELLOM STØV, CO OG NO I TESTUKENE | 25 |
| TABELL 46 DESKRIPTIV STATISTIKK FOR MÅLT OG PREDIKERT NO I ALLE TESTUKENE | 27 |
| TABELL 47 KORRELASJONER - MÅLT OG PREDIKERT NO I TESTUKENE (N = 12082)..... | 28 |
| TABELL 48 DESKRIPTIV STATISTIKK - MÅLT OG PREDIKERT NO I TESTUKENE (N = 7673)... | 28 |
| TABELL 49 KORRELASJONER - MÅLT OG PREDIKERT NO I TESTUKENE (N = 7673)..... | 28 |

Figurliste

| | |
|---|----|
| FIGUR 31 CO, NO OG STØV UKE 48, 2001..... | 2 |
| FIGUR 32 TEMPERATUR, FUKTIGHET, VINDFART OG VIFTER UKE 48, 2001..... | 3 |
| FIGUR 33 CO, NO OG STØV UKE 03, 2002..... | 4 |
| FIGUR 34 TEMPERATUR, FUKTIGHET, VINDFART OG VIFTER UKE 03, 2002..... | 5 |
| FIGUR 35 CO, NO OG STØV UKE 11, 2002..... | 6 |
| FIGUR 36 TEMPERATUR, FUKTIGHET, VINDFART OG VIFTER UKE 11, 2002..... | 7 |
| FIGUR 37 CO, NO OG STØV UKE 20, 2002..... | 8 |
| FIGUR 38 TEMPERATUR, FUKTIGHET, VINDFART OG VIFTER UKE 20, 2002..... | 9 |
| FIGUR 39 CO, NO OG STØV UKE 28, 2002..... | 10 |
| FIGUR 40 TEMPERATUR, FUKTIGHET, VINDFART OG VIFTER UKE 28, 2002..... | 11 |
| FIGUR 41 CO, NO OG STØV UKE 35, 2002..... | 12 |
| FIGUR 42 TEMPERATUR, FUKTIGHET, VINDFART OG VIFTER UKE 35, 2002..... | 13 |
| FIGUR 43 PLOTT AV CO OG NO MOT STØV I MÅLEPUNKT 1 I TESTUKENE | 26 |
| FIGUR 44 PLOTT AV NO/STØV FORHOLDET MOT STØV I MÅLEPUNKT 1 I TESTUKENE..... | 26 |
| FIGUR 45 BOXPLOT AV UKEDAGSFORDELINGEN FOR CO/NO I MÅLEPUNKT 1 I TESTUKENE 27 | |