

# TEKNISK RAPPORT



## HiST

Avdeling for Teknologi  
Institutt for maskinteknikk

Adresse :  
Sverresgt. 10B  
7004 Trondheim  
NORWAY

Telefon : 73 55 90 00  
Fax : 73 55 96 81

Tittel:

**Måling av virkningsgrad på støvrenseanlegget i Lærdalstunnelen**

KUNDE(R) :

CTA International ASA

FORFATTER(E):

Finn Drangsholt

INSTITUTTBESTYRER :

Olav Skaret

GRADERING :

Åpen

DATO:

2001-09-19

### Sammendrag :

HiST avdeling for teknologi har på oppdrag fra CTA International gjennomført virkningsgradsmålinger på støvrenseanlegget i Lærdalstunnelen. Lærdalstunnelen som går mellom Aurland og Håbakken er den første i sitt slag som er utstyrt med renseanlegg som fjerner både støv og nitrogendioksid fra tunnellufta.

I alt ble det gjennomført effektivitetstester med 5 forskjellige belastningsnivå - vanlig trafikk, oppstart av ett dieselaggregat, oppstart av 3 dieselaggregat, 3 dieselaggregat + feing av gatelegeme, feing av fortau.

Målingene viser ved vanlig trafikk, at rensestasjonen skiller ut 90 – 94 % av det totale forurensningsvolumet i tunnellufta.

KEYWORDS :

Dust cleaning system, efficiency testing, electrostatic precipitator

## **INNHold**

SAMMENDRAG	3
1 INNLEDNING	4
2 OPPBYGGING AV RENSEANLEGGET	4
3 TESTPROSEDYRER FOR MÅLING AV FILTEREFFEKTIVITET	5
4 VALG AV MÅLEUTSTYR OG MÅLEMETODE	6
5 TESTBETINGELSER OG RESULTAT	7
Vedlegg 1 : Virkningsgrader basert på partikkeltelling og veiing	11
Vedlegg 2 : Prinsippskisse av renseanlegget	12

## SAMMENDRAG

HiST avdeling for teknologi har på oppdrag fra CTA international gjennomført virkningsgradsmålinger på støvreanseanlegg i Lærdalstunnelen. Lærdalstunnelen som går mellom Aurland og Håbakken er med en lengde på 24,5 km verdens lengste veitunnel. Lærdalstunnelen er den første i sitt slag som er utstyrt med renseanlegg som fjerner både støv og nitrogen dioksid fra tunnellufta.

Renseanlegget som er utviklet spesielt for Lærdalstunnelen i samarbeid mellom Statens vegvesen, ABB Miljø og CTA International består av et partikkelfilter for utskilling av partikulære forurensninger og et kullfilter for fjerning av nitrogen dioksid. Partikkelfilteret består av mekanisk for- og etterfilter samt et elektrostatfilter. Renseanlegget er montert i egen bypass-tunnel ca 9 km fra Aurland.

Måling og beregning av partikkel- og masseutskillingsgrad i Lærdalstunnelen bygger på Eurovent 4/9. Til partikkeltelling benyttes partikkelteller av type MetOne med måleområde 0.3 – 10 µm. Til måling av støvmengde benyttes en elektronisk støvvekt av merke pDR1200, med måleområde 0.1 – 400 mg/m<sup>3</sup>.

Virkningsgradsmålingene i Lærdalstunnelen ble gjennomført i perioden 21. til 23. mai 2001. Fordi en av aksialviftene i renseanlegget ikke var operativ, ble testene utført med 50% av filterarealet avblendet. Sogndal vegvesen hadde lagt opp til testing med ulik forurensningsbelastning. I en nisje oppstrøms rensestasjonen var det rigget opp 3 dieselaggregat for produksjon av partikkelholdig avgass. I tillegg hadde man leid inn en feiebil for oppvirvling av støv fra gatelegeme og fortau.

I alt ble det gjennomført effektivitetstester med 5 forskjellige belastningsnivå - vanlig trafikk, oppstart av ett dieselaggregat, oppstart av 3 dieselaggregat, 3 dieselaggregat + feiing av gatelegeme, feiing av fortau. For de 3 sistnevnte driftsforholdene ble støvkonsentrasjonen for høye til at en kunne foreta partikkeltelling. For disse driftsforholdene finnes det derfor ikke måleresultat basert på partikkelantall.

For vanlig trafikk viser partikkeltellingene en renseseffekt på 86 % for de fineste fraksjonene og 95 % for de groveste fraksjonene. Elektronisk veiing av støv viser utskillingsgrader fra 83% til 97 % avhengig av belastning. Målingene viser ved vanlig trafikk, at rensestasjonen skiller ut 90 – 94 % av det totale forurensningsvolumet i tunnellufta.

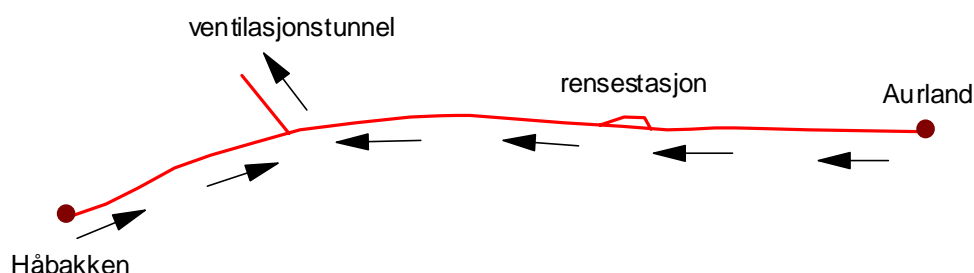
## 1 INNLEDNING

Med ferdigstilling av Lærdalstunnelen (nov. 2000) er stamveien mellom Oslo og Bergen ferjefri og uten vanskelige fjelloverganger. Lærdalstunnelen som går mellom Aurland og Håbakken er med en lengde på 24,5 km verdens lengste veitunnel.

Det er fra veimyndighetenes side lagt betydelig innsats i å utforme tunnelen slik at den oppfattes komfortabel og har god luftkvalitet. Som et resultat av dette er Lærdalstunnelen den første i sitt slag som er utstyrt med renseanlegg som fjerner både støv og nitrogendioksid fra tunnelufta.

Ventilasjon og renseanlegget i Lærdalstunnelen er dimensjonert for en maksimal belastning på 400 biler pr. time. Ventilasjon av tunnelen skjer ved at friskluft trekkes gjennom begge portalene, og blåses ut gjennom egen tverrslag beliggende 6.5 km fra Håbakken. I tverrslaget er det montert to aksialvifter med en samlet kapasitet på 1,7 mil. m<sup>3</sup>/h.

Tunnelstrekket mellom Aurland og tverrslaget er på 18 km. Ventilasjonsmessig utbalanseres strekket ved hjelp av 32 impulsvifter. Midt i dette strekket er det i en bypass-tunnel montert en renseanlegg som trekker av forurenset luft fra veitunnelen, fjerner støv og nitrogendioksid, og sender renset luft tilbake. Ved å rense lufta på denne måten kan en oppnå tilfredsstillende luftkvalitet med redusert luftmengde i hovedstrekket. Figur 1 viser skisse av tunnel og ventilasjonsprinsipp.



Figur 1 Ventilasjonsprinsipp – Lærdalstunnelen

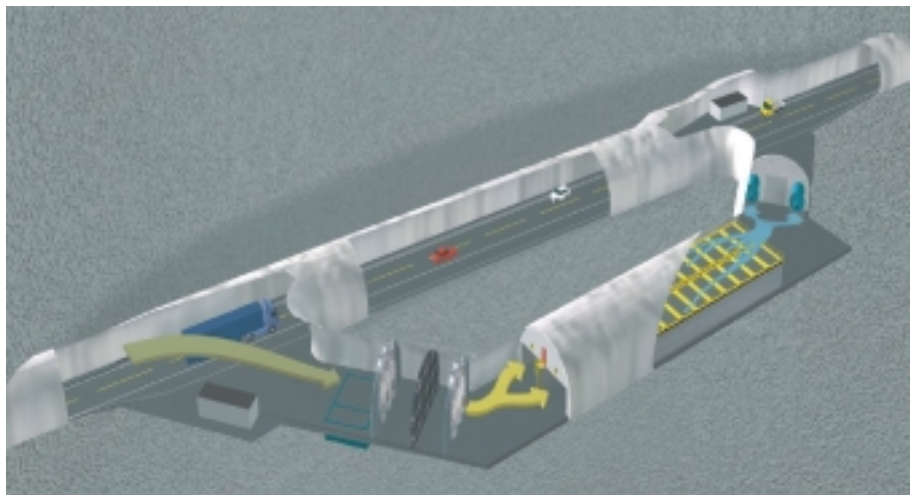
## 2 OPPBYGGING AV RENSEANLEGGET

Renseanlegget er utviklet spesielt for Lærdalstunnelen i et samarbeid mellom Statens vegvesen, ABB Miljø og CTA International. Renseanlegget som er montert i en egen bypass-tunnel består av et partikkelfilter for utskilling av partikulære forurensninger og et gassrenseanlegg for fjerning av nitrogendioksid. To aksialvifter montert i utløpet på bypass-tunnelen sørger for å trekke forurenset luft gjennom rensestasjonen.

Partikkelfilteret består av mekanisk for- og etterfilter samt et elektrostatfilter. Grovstøv skilles ut i forfilteret. Finstøv fjernes fra luftstrømmen ved hjelp av et moduloppbygd elektrostatfilter. Her lades støv ved passering av et kraftig elektrostatisk felt og skilles ut på oppsamlingsplater. Etterfilterets oppgave er å fange opp støvslipp fra elektrostatfilteret. Støvslipp kan forekomme hvis biltrafikken skaper raske trykkvariasjoner i rensestasjonen. For

lange tidsintervaller mellom vask kan også forårsake støvslipp. Alle filtersystemene er utstyrt med automatisk vaskeanlegg.

Gassrensaneanlegget består av et kullfilter med et gjennomstrømningsareal på 400 m<sup>2</sup>. Figur 1.2 viser skjematisk oppbygging av rensesstasjonen.



Figur 1.2 Skjematisk oppbygging av rensesstasjonen

### 3 TESTPROSEDYRER FOR MÅLING AV FILTEREFFEKTIVITET

De to standarder, ASHRAE 52.1 og EUROVENT 4/9 beskriver tre ulike testprosedyrer som kan benyttes til å vurdere et luftfilters evne til å fjerne partikulære forurensninger. Standardene er primært beregnet på laboratorietesting av filter som skal benyttes i generell ventilasjonssammenheng.

ASHRAE's avsvirtingstest er basert på måling av gjennomsnittlighet i prøvetakingsfiltere som eksponeres for luftprøver hentet oppstrøms og medstrøms testfilteret. Testfilterets virkningsgrad bestemmes ved å sammenlikne lysgjennomgangen i prøvetakingsfiltrene. Virkningsgraden (E) beregnes ved hjelp av likning (1):

$$E = 100 * (1 - (S_u/S_d) * (Y_d/Y_u)) \quad [\%] \quad (1)$$

S<sub>u</sub> : eksponeringstid - oppstrøms prøvetakingsfilter

S<sub>d</sub> : eksponeringstid - medstrøms prøvetakingsfilter

Y<sub>u</sub> : gjennomsnittlighet - oppstrøms prøvetakingsfilter

Y<sub>d</sub> : gjennomsnittlighet - medstrøms prøvetakingsfilter

Testmetoden krever ASHRAE teststøv og instrumentering for måling av gjennomsnittlighet.

ASHRAE's utskillingstest er identisk med tilsvarende metode beskrevet i EUROVENT 4/9. Testen utføres ved at en kjent mengde teststøv tilføres luftstrømmen oppstrøms test-filteret. Støv som ikke skilles ut i testfilteret fanges opp i et på forhånd veid absoluttfilter (HEPA). Testfilterets utskillingsgrad (A) beregnes ved hjelp av likning (2) :

$$A = 100 * ( 1 - (Wd/Wu)) [\%] \quad (2)$$

Wd : vekt på støv oppsamlet i HEPA-filte

Wu : vekt på tilført teststøv

Testmetoden krever ASHRAE teststøv og støvvekt med høy oppløsning/nøyaktighet.

EUROVENT's partikkeltest utføres ved å telle partikler oppstrøms og medstrøms testfilteret innenfor gitte fraksjonsområder. Antall fraksjonsområder og størrelsen på disse er knyttet til valg av måleutstyr. Partikkelutskillingsgraden er definert som forholdet mellom antall partikler utskilt i filteret og antall partikler registrert oppstrøms filteret.

Effektivitetsmålingene utføres ved en serie på 12 tellinger med varighet på 60 sekunder, utført suksessvis oppstrøms og medstrøms filteret. Mellom hver telling utføres rensing med varighet på 60 sekunder. Partikkelutskillingsgraden (E1) for en repetisjon beregnes etter følgende uttrykk :

$$E1 = (1 - (2 * n2 / (N1 + N3))) * 100 \quad [\%]$$

N1 : partikkelantall oppstrøms filteret ved tidspunkt 1

n2 : partikkelantall medstrøms filteret ved tidspunkt 2

N2 : partikkelantall oppstrøms filteret ved tidspunkt 3

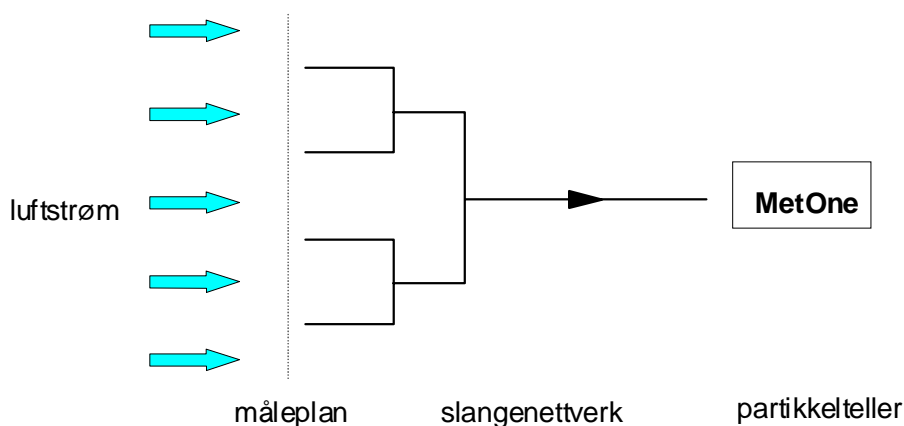
Endelig virkningsgrad skal være middelerdien av de seks repetisjonene E1.. E6. Som teststøv anbefaler EUROVENT at det benyttes latexpartikler eller forstøvet DEHS. Testmetoden krever bruk av partikkelteller og ventilarrangement for skifting mellom oppstrøms og medstrøms måleplan. Alternativt kan 2 samkalibrerte partikkeltellere benyttes.

Verken ASHRAE 52 eller EUROVENT 4/9 beskriver metoder for uttesting av filter i felt. Feltinstallasjoner kjennetegnes gjerne ved store dimensjoner, variabel forekomst av partikulære forurensninger og vanskelig måleteknisk tilgjengelighet. For større installasjoner vil kunstig tilførsel av partikulære forurensninger av praktiske årsaker som oftest være uaktuell. Utprøving av større anlegg må derfor baseres på partikulære forurensninger generert av de virkelige forurensningskildene som inngår i renseprosessen. Ved gjennomføring av virkningsgradsmålinger i felt må det derfor vurderes om noen av testmetodene beskrevet i standardene kan tilpasses det aktuelle måleobjektet.

#### 4 VALG AV MÅLEUTSTYR OG MÅLEMETODE

Måling og beregning av partikkel- og masseutskillingsgrad i Lærdalstunnelen vil bygge på Eurovent 4/9. Det benyttes fire målepunkt oppstrøms rensesstasjonen og 4 målepunkt medstrøms rensesstasjonen. Målepunktene koples i parallell via et symmetrisk slangenettverk som vist på figur 4.1. Slangenettverket er koplet slik at total slangelengde fra måleplan til partikkelteller blir lik for alle målepunkt (13 m).

Avsugd luftmengde i hvert målepunkt avstemmes med lufthastigheten i tunnelen, slik at avsugget blir tilnærmet isokinetisk. Figur 4.1 viser slangearrangement.



Figur 4.1. Slangearrangement for isokinetisk prøvetaking

Til partikkeltelling benyttes partikkelteller av type MetOne med måleområde 0.3 – 10  $\mu\text{m}$ . Måleområdet er inndelt i fem fraksjoner (0.3-0.5  $\mu\text{m}$ , 0.5-1.0  $\mu\text{m}$ , 1.0-3.0  $\mu\text{m}$ , 3.0-5.0  $\mu\text{m}$  og 5.0-10  $\mu\text{m}$ ). Det benyttes én partikkelteller som suksessivt teller partikler oppstrøms og medstrøms rensestasjonen. Veksling mellom oppstrøms og medstrøms måleplan skjer automatisk ved hjelp av ventilsjalter som styres i sekvens fra en PC.

Til måling av støvmengde benyttes en elektronisk støvvekt av merke pDR1200. Instrumentet har et måleområde fra 0.001 til 400  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Det benyttes én støvvekt som suksessivt registrerer støvkonsentrasjonen oppstrøms og medstrøms rensestasjonen. Veksling mellom oppstrøms og medstrøms måleplan skjer automatisk ved hjelp av ventilsjalter som styres i sekvens fra en PC.

Oppstrøms målepunkter plasseres i forkant av forfilteret. Medstrøms målepunkter plasseres i bakkant av etterfilteret. Målepunktene plasseres slik at de hver dekker  $\frac{1}{4}$  av strømningsarealet i rensestasjonen.

Før oppstart av virkningsgradsmålingene forutsettes det at CTA International har målt spenningsnivå på elektrofiltrene, og kontrollert at alle tekniske funksjoner fungerer som forutsatt. Videre må Sogndal vegverk sørge for at rensestasjonen er rengjort slik at en unngår oppvirvling av støv som kan være ansamlet mellom forfilter og etterfilter. Sogndal vegverk har ansvar for å driftsette nødvendig antall impulsviser i hovedtunnel, slik at en får de driftsforholdene rensestasjonen er dimensjonert for.

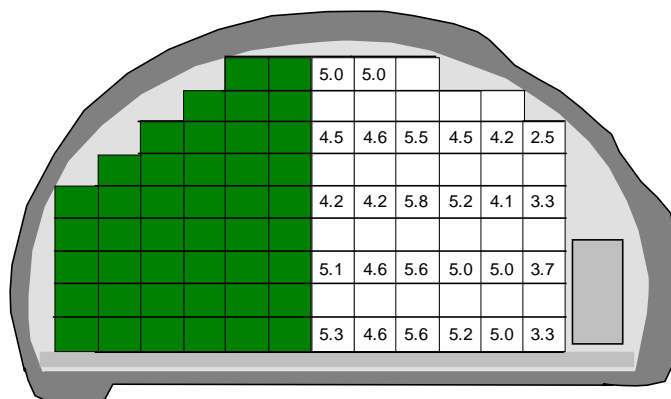
## 5 TESTBETINGELSER OG RESULTAT

Virkningsgradsmålingene i Lærdalstunnelen ble gjennomført i perioden 21. til 23. mai 2001. Da en av aksialviftene i renseanlegget ikke var operativ var det på forhånd (CTA International/Sogndal vegverk) besluttet at effektivitetstesting skulle gjennomføres med 50 % av filterarealet tildekket. Formålet med tildekkingen var å opprettholde prosjektert hastighet i den gjenværende (virksomme) delen av filteret. Figur 5.1 viser hvordan tildekkingen ble utført ved hjelp av presenning.



Figur 5.1. Tildekking av filterareal (50%).

Før oppstart av målingene ble luftmengden i hovedtunnel og rensesløyfa justert slik at luftlekkasjen på utsida av rensestasjonen var minimal. Lekkasjen ble kontrollert med røykampulle. Kontrollen viste at luftbevegelsen i hovedtunnelen mellom rensesløyfas innløp og utløp var svært lav. Lufthastigheten over elektrostatfilteret ble kontrollert ved hjelp hastighetsmåler (SwemaAir30). Resultatet av målingene er vist i figur 5.2. På bakgrunn av målingene beregnes middelhastigheten over filteret til 4.6 m/s.



Figur 5.2 Hastighetsmålinger – elektrostatfilter (alle tall i m/s)

Sogndal vegverk hadde lagt opp til testing med ulik forurensningsbelastning. I en nisje oppstrøms rensestasjonen var det rigget opp 3 dieselaggregat for produksjon av partikkelholdig avgass. I tillegg hadde man leid inn en feiebil for oppvirvling av støv fra gatelegeme og fortau. Figur 5.3 viser utstyr for produksjon av partikulære forurensninger.



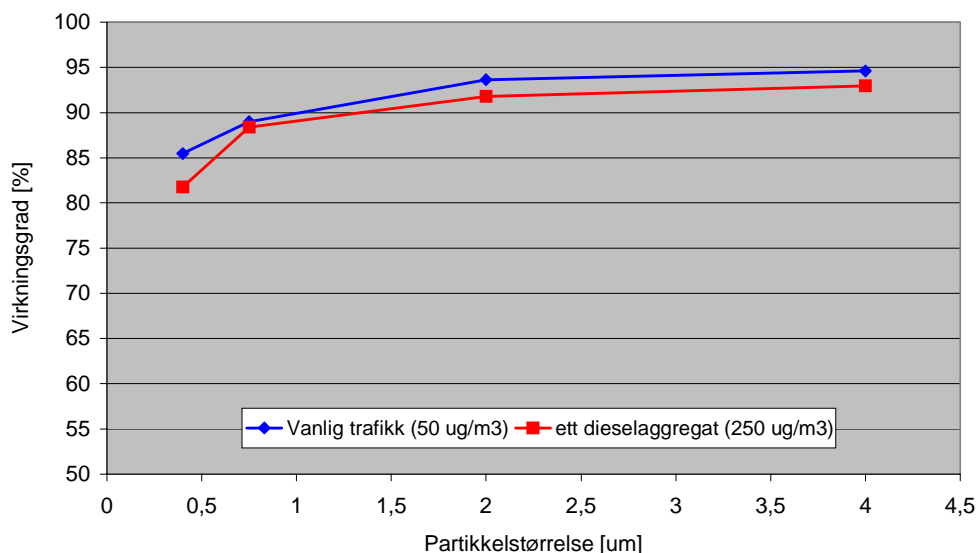


Figur 5.3 Utstyr for produksjon av støv/partikler.

I alt ble det gjennomført effektivitetstester med 5 forskjellige belastningsnivå - vanlig trafikk, oppstart av ett dieselaggregat, oppstart av 3 dieselaggregat, 3 dieselaggregat + feiing av gatelegeme, feiing av fortau. For de 3 sistnevnte driftsforholdene ble støvkonsentrasjonen målt til  $1 \text{ mg/m}^3$  eller mer. Dette er konsentrasjoner som langt overstiger partikkeltellerens måleområde. For disse driftsforholdene finnes det derfor ikke partikkeltellinger.

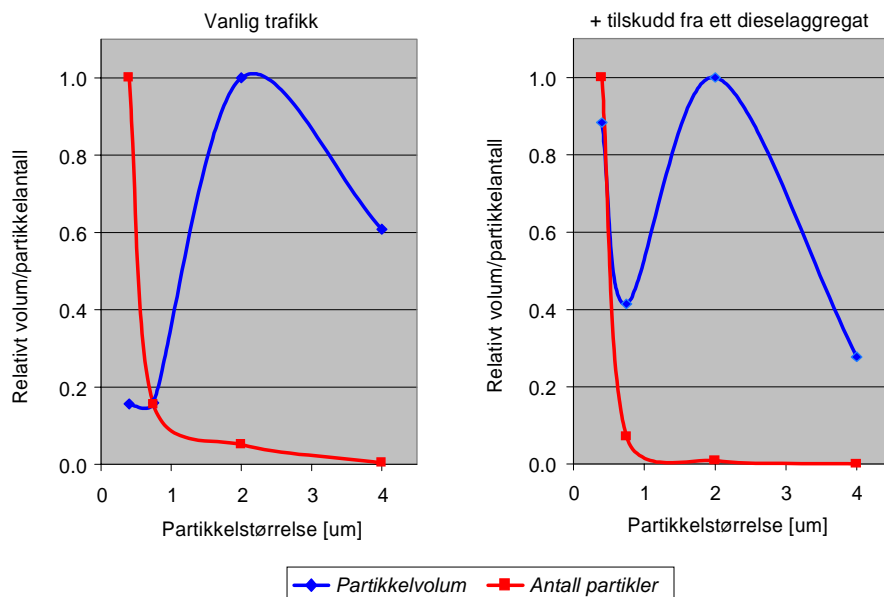
Under forsøkene ble det foretatt registrering av temperatur og fuktighetsforhold i tunnelen. Registreringene viste temperaturer mellom  $15.4$  og  $15.9$  °C og relativ fuktighet mellom 45 og 50 % RH.

Virkningsgradskurver basert på partikkeltelling (MetOne) er vist grafisk i figur 5.4. Tallmaterialet inklusive delresultater er presentert i vedlegg 1. Det er ikke foretatt virkningsgradsberegning for partikler større enn  $5 \mu\text{m}$  grunnet for lav forekomst av disse partikkelstørrelsene (mindre enn 1 partikkel pr liter). I diagrammet er hvert fraksjonsområde representert med sitt tyngdepunkt ( $0.4$ ,  $0.75$ ,  $2$  og  $4 \mu\text{m}$ ).



Figur 5.4. Partikkelutskillingsgrad for rensesstasjon i Lærdalstunnelen

Med utgangspunkt i partikkeltellingene har en i figur 5.5 laget en sammenstilling som viser relativt partikkelantall og partikkelvolum (partikkelmasse hvis alle partikler har samme egenvekt) for de ulike størrelsesfraksjonene.

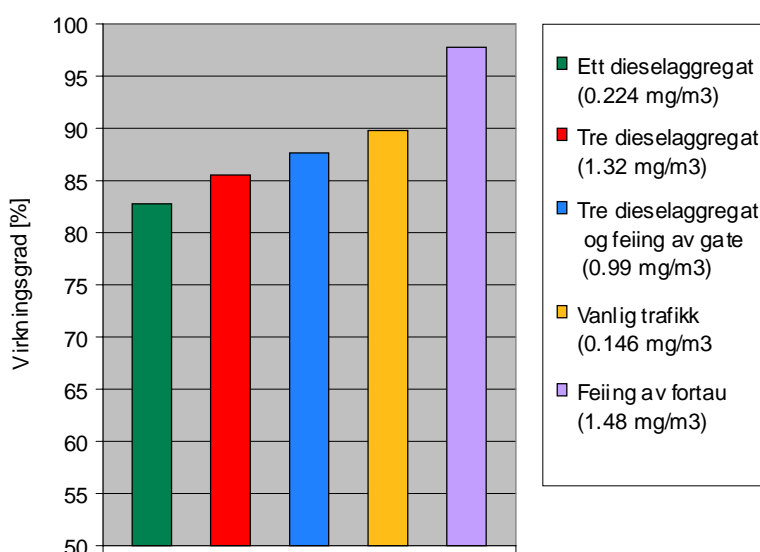


Figur 5.5 Relativt partikkelantall/partikkelvolum som funksjon av partikkelstørrelse

Spesifikt partikkelvolum viser at vanlig trafikk genererer en partikkelblanding der partikler med diameter mindre eller lik 1.0 µm utgjør ca. 7.5 volumprosent. Tilføres i tillegg tunnelufta partikler fra ett dieselaggregat øker volumandelen for denne fraksjonen ca 24 %.

Virkningsgrad knyttet til partikkelvolum finnes ved å summere partikkelvolumet for de ulike størrelsesfraksjonene oppstrøms og medstrøms rensanlegget og sammenlikne disse summene. For vanlig trafikk er denne virkningsgraden beregnet til 94 %. Ved tilførsel av forbrenningspartikler fra ett dieselaggregat beregnes virkningsgraden til 91 %.

Virkningsgrad basert på elektronisk veiing av støv (pDR1200) er vist i figur 5.6.



Figur 5.6 Utskillingsgrad som funksjon av ulike belastninger.

Av figur 5.6 ser vi at rensestasjonens virkningsgrad varierer fra 83 % til 98 % avhengig av støvkonsentrasjon og støvsammensetning. Høyest virkningsgrad er oppnådd når støvbelastningen i hovedsak består av oppvirvlet mineralstøv fra fortau. Ved feiing av fortau vil støvet hovedsakelig bestå av større partikler. Det oppnåes da god virkningsgrad både i forfilter, elektrofilter og etterfilter.

Lavest virkningsgrad er oppnådd når lufta tilføres partikulære forurensninger fra ett diesellaggregat. Virkningsgrader er her målt til 83 %. Sammenholdes dette resultatet med den volumetriske utskillingsgraden avledet fra partikkeltelling, ser vi at resultatet er 8 % lavere. En forklaring på dette avviket kan være at den ordinære biltrafikken som virvler opp støv fra gatelegemet kan ha vært forskjellig i de to testene. Mindre innslag av grovstøv gir lavere utskillingsgrad.

Av overnevnte kan vi slutte at utskillingsgrad basert på volum/vekt er nært knyttet til partikkelsammensetning. Består den partikulære forurensningen hovedsakelig av finfraksjoner i område 0.3 – 05  $\mu\text{m}$ , viser målingene en utskillingsgrad i område 83 til 86 %. Består forurensningen hovedsakelig av partikler  $> 10 \mu\text{m}$  kan det forventes virkningsgrad opp mot 97 %. For vanlig biltrafikk under sommerforhold ligger utskillingsgraden i området 90 til 94 %.

## Vedlegg 1. Virkningsgrader basert på partikkeltelling og elektronisk veiing

Partikkeltelling : vanlig trafikk

Måleserie	Virkningsgrad [%]				Volum
	0.3 – 0.5 µm	0.5 – 1.0 µm	1.0 – 3.0 µm	3.0 – 5.0 µm	
1	85.7	89.8	94.6	96.1	
2	86.2	90.1	94.9	95.5	
3	84.1	87.5	92.5	89.7	
4	86.1	89.6	93.8	94.7	
5	86.4	89.1	93.0	93.7	
6	83.8	86.9	91.1	93.8	
Middel :	85.5	89.0	93.6	94.6	93.8

Partikkeltelling : vanlig trafikk + tilskudd fra ett dieselaggregat

Måleserie	Virkningsgrad [%]				Volum
	0.3 – 0.5 µm	0.5 – 1.0 µm	1.0 – 2.0 µm	2.0 – 5.0 µm	
1	81.8	88.3	93.0	92.6	
2	83.0	89.8	91.7	93.5	
3	83.0	87.5	91.6	95.4	
4	79.6	88.3	90.5	92.4	
5	83.3	88.7	89.4	87.1	
6	79.6	86.8	92.8	92.8	
Middel :	81.8	88.4	91.8	93.0	90.5

Elektronisk veiing : Test 1 .. 5

Måleserie	Virkningsgrad [%]				
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
1	82.1	84.8	87.3	89.0	97.4
2	83.3	85.1	88.2	89.7	98.7
3	83.1	85.1	85.4	88.3	96.0
4	82.6	86.4	86.8	89.3	96.3
5	81.5	81.7	87.4	88.7	96.6
6	82.9	88.0	87.9	89.8	96.6
Middel :	82.8	85.5	87.7	89.8	97.8

Test 1 : vanlig trafikk + ett dieselaggregat

Test 2 : vanlig trafikk + tre dieselaggregat

Test 3 : vanlig trafikk + tre dieselaggregat + feiing av gatelegeme

Test 4 : vanlig trafikk

Test 5 : vanlig trafikk + feiing av fortau

## Vedlegg 2. Skisse av rensstasjon

