

# **BEREGNING AV VENTILASJONSBEHOV VED TUNNELDRIFT**



**NORGES VASSDRAGS- OG ELEKTRISITETSVESEN  
STATSKRAFTVERKENE**

## Beregning av ventilasjonsbehov ved tunneldrift.

### Forord.

I april 1972 startet et utvalg innen NVE - Statskraftverkene bestående av overingeniørene J. Lakselv, O. Johannessen og A. Aune en gjennomgåelse av tilgjengelig litteratur og rapporter fra prøver og undersøkelser om ventilasjonsforhold i tunneler.

Formålet med undersøkelsen var å finne frem til et egnet og tilstrekkelig nøyaktig beregningsgrunnlag for beregning av ventilasjonsbehov for aktuelle tunnelarbeider, samt å klarlegge de vesentligste faktorerers innvirkning på ventilasjonsforhold og behov.

Utvalget tok derfor tidlig kontakt med Yrkeshygienisk Institutt og Direktoratet for Arbeidstilsynet og har basert samlet vurdering av forurensningsblandinger i overensstemmelse med opplysninger som er mottatt derfra. Forøvrig er beregningsmetoden basert på teoretiske utredninger og foreliggende litteratur. Beregningsmetoden er sammenholdt med tilgjengelig rapportmateriale (målinger) såvel fra Statskraftverkernes anlegg som fra utenlandske tunnelarbeider, og har vist meget god overensstemmelse. For endel forhold som antas å ha innflytelse på ventilasjonsbehovet er til denne tid ikke det erfaringsmateriale tilgjengelig som trenges for en beregningsmessig behandling.

Det kan derfor bli nødvendig å justere deler av beregningsmetoden etterhvert som erfaring vinnes.

Oslo, den 7. mars 1973.

J. Lakselv

O. Johannessen

A. Aune

## Innhold.

|                |                                                 |    |    |
|----------------|-------------------------------------------------|----|----|
| 1.             | Generelt .....                                  | s. | 2  |
| 2.             | Forurensninger .....                            | "  | 2  |
| 2.2.           | Sprenggasser .....                              | "  | 3  |
| 2.3.           | Dieselavgasser .....                            | "  | 3  |
| 3.             | Yrkeshygieniske grenseverdier m.v. ....         | "  | 6  |
| 4.             | Rensing av avgass m.v. ....                     | "  | 8  |
| 5.             | Ventilasjonsluft .....                          | "  | 9  |
| 5.4.           | Tåkedannelse .....                              | "  | 11 |
| 6.             | Utleddning av beregningsformler .....           | "  | 11 |
| 6.2.           | Fortynning av skytegasspropp .....              | "  | 11 |
| 6.3.           | Fortynning av dieselavgasser .....              | "  | 14 |
| 6.3.3.1.       | Rullemotstand .....                             | "  | 15 |
| 6.3.4.1.       | Optimal lekkasje .....                          | "  | 18 |
| 7.             | Beregningseksempel .....                        | "  | 19 |
| 7.2.1.         | Lasting .....                                   | "  | 20 |
| 7.2.2.         | Utkjøring .....                                 | "  | 20 |
| 7.6.           | Ventilasjonspause, utløpsdiameter .....         | "  | 22 |
| 7.7.           | Nødvendig varmetilførsel for tåkehindring ..... | "  | 23 |
| Tabell I       | .....                                           | "  | 4  |
| Tabell II      | .....                                           | "  | 10 |
| Diagram fig. 1 | .....                                           | "  | 5  |
| Diagram fig. 2 | .....                                           | "  | 13 |

## Beregningsgrunnlag.

### 1. Generelt.

Beregningen skal bare være et hjelpemiddel for å sikre at ventilasjonsanlegg dimensjoneres med tilstrekkelig kapasitet. Beregningen tar bare hensyn til de vesentligste faktorer som påvirker ventilasjonsbehovet; andre faktorer som kan ha betydning uten at denne er tilstrekkelig klarlagt for en beregningsmessig behandling angis i de respektive avsnitt.

- 1.1. Kriteriet for å bedømme om ventilasjonen er tilstrekkelig eller ikke er konsentrasjonene av helsefarlige bestanddeler i tunnelluften. For de aktuelle forurensninger angir Yrkeshygienisk Institutt øvre grenseverdier. Vurdering av de forskjellige forurensninger og blandinger er som angitt i avsnitt 3.

- 1.2. Ventilasjonsprinsippet er for denne beregning forutsatt å være det vanlige med innblåsning av friskluft gjennom rør inn til stuff og retur av forurenset luft ut gjennom tunnelen.

Det forutsatte ventilasjonsprinsipp kan ikke skape yrkeshygienisk akseptable forhold i skytegassproppen og det forutsettes derfor at denne skal passeres med egnet beskyttelsesutstyr (masker).

### 2. Forurensninger.

- 2.1. Forurensningsartene er støv, damper og gasser.

- 2.1.1. Støv er vesentlig steinstøv og konsentrasjonen av dette forutsettes holdt nede på akseptabelt nivå ved hjelp av vannspyling såvel under boring som under lasting.

- 2.1.2. Damp av yrkeshygienisk betydning er utelukkende oljedamp fra trykkluftdrevne maskiner. Konsentrasjonene er ansett å være så små at de helt kan utelates ved beregning av ventilasjonsbehov.

- 2.1.3. Gassene representerer alt vesentlig av forurensning, og de gassarter som er aktuelle er karbonoksyder, nitrogenoksyder, svoveloksyder, aldehyder og acrolein.

## 2.2. Sprenggasser.

Sprengstoff av de typer som anvendes ved tunneldrift utvikler ca. 850-910 liter gass pr. kg. sprengstoff. Beregningen er basert på en gassutvikling på 900 liter pr. kg, og at denne sprenggassmengde inneholder opptil 7 liter nitrogenoksyder ( $\text{NO}$  og  $\text{NO}_2$ ). Denne gassmengde vil normalt også inneholde 15-26 liter karbonmonooksyd ( $\text{CO}$ ), men denne ( $\text{CO}$ ) blir ikke bestemmende for ventilasjonsbehovet.

Sprenggassene strømmes med stor hastighet ut i tunnelluften og blander seg derfor momentant med denne til en primær skytegasspropp. Sprenggasser vil også bli fanget i røysas luftvolum som er ca. 65 % av røysas volum i fast fjell, men konsentrasjonen av forurensninger i røys er ikke kjent. Den må antas ikke å være mindre enn konsentrasjonen i den primære skytegasspropp, og den vil bli frigjort i takt med opplastingen. Inntil videre er dette forhold innført i beregningen på basis av samme forurensningskonsentrasjon som for primær skytegasspropp.

## 2.3. Dieseldavgasser.

Forurensningene i dieseldavgasser er forutsatt å være avhengig av brennstoffforbruket. Som normal dieseldolje antas en olje med densitet ca. 0,86 kg/liter og denne sammensetning i vektprosent:

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| 86  | % C (karbon/kullstoff)   |
| 13  | " H (hydrogen/vannstoff) |
| 0,3 | " S (svovel)             |
| 0,7 | " Restelementer          |

For fullstendig forbrenning av slik dieseldolje kreves teoretisk 14,5 kg luft. For å sikre en fullstendig forbrenning må dieselmotorer operere med luftoverskudd. Størrelsen av dette avhenger av motortype, men antas her å være 15 % ved full motorbelastning og motoren må derfor tilføres  $16,7 \text{ kg} = 14 \text{ nm}^3$  luft pr. kg brennstoff. De tilhørende mengder og konsentrasjoner av forurensningsgasser er oppført i tabell I som gjelder "tørr" avgass, da vandampinnholdet vil være kondensert før analyse av sammensetningen kan foretas. Tabellens verdier er normale middelerverdier for målinger utført i praksis på motorer ved fullast.

Tabell I.

Avgassammensetning pr. kg brennstoff ved fullast og tilhørende ventilasjonsbehov.

| Avgass-komponent   | Andel i tørr avgass ved fullast<br>Vol. % | Andel i tørr avgass ved fullast<br>p.p.m. | Volum pr. kg brennstoff<br>cm <sup>3</sup> | TLV<br>p.p.m. | Friskluftbehov for fortynning til TLV i nm <sup>3</sup> |
|--------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub>    | 12                                        | 120.000                                   | 1.680.000                                  | 5.000         | 337                                                     |
| CO                 | 0,1                                       | 1.000                                     | 14.000                                     | 50            | 280                                                     |
| SO <sub>2</sub> x) | 0,025                                     | 250                                       | 3.500                                      | 5             | 700                                                     |
| NO <sub>2</sub>    | 0,013                                     | 130                                       | 1.830                                      | "C" - 5       | 366                                                     |
| NO                 | 0,087                                     | 870                                       | 12.010                                     | 25            | 480                                                     |
| Formaldehyd        | 0,001                                     | 10                                        | 140                                        | "C" - 5       | 28                                                      |
| Acrolein           | 0,00003                                   | 0,3                                       | 4,2                                        | 0,1           | 42                                                      |

x) SO<sub>2</sub> beregnet på grunnlag av S-innhold i drivstoffet.

Anm.: Sammensetning av tørr avgass er overensstemmende med målinger i praksis.

I bestemmelse av ventilasjonsbehov er CO<sub>2</sub>, CO og NO utelatt, og friskluftbehovet blir 1136 ): ~ 1200 nm<sup>3</sup>/kg brennstoff. Ved 1200 m<sup>3</sup> luft pr. kg dieselolje blir økningen i CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen 1400 p.p.m. Ren luft har CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen 300 p.p.m., og luft som er fullt belastet får derfor en CO<sub>2</sub>-konsentrasjon på 1700 p.p.m.

Anm.:

Karbonmonooksyd-konsentrasjonen er vesentlig mindre enn angitt i tabellen for delbelastninger.

Svoveldioksyd-konsentrasjonen er i tabellen angitt med beregnet verdi på grunnlag av oljens svovelinhold.

Nitrogenoksydene består vesentlig av NO og NO<sub>2</sub>, hvorav NO<sub>2</sub> utgjør ca. 13-14 % av summen. De dannes på grunn av varme, trykk og tilgjengelig fritt oksygen i forbrenningsrommet. Motortypen har stor innvirkning på dannelsen av nitrøse gasser og vanligvis gir motorer med direkte innsprøytning langt høyere konsentrasjoner enn for kammer- og hvirvelkammermotorer. (Se fig. 1).

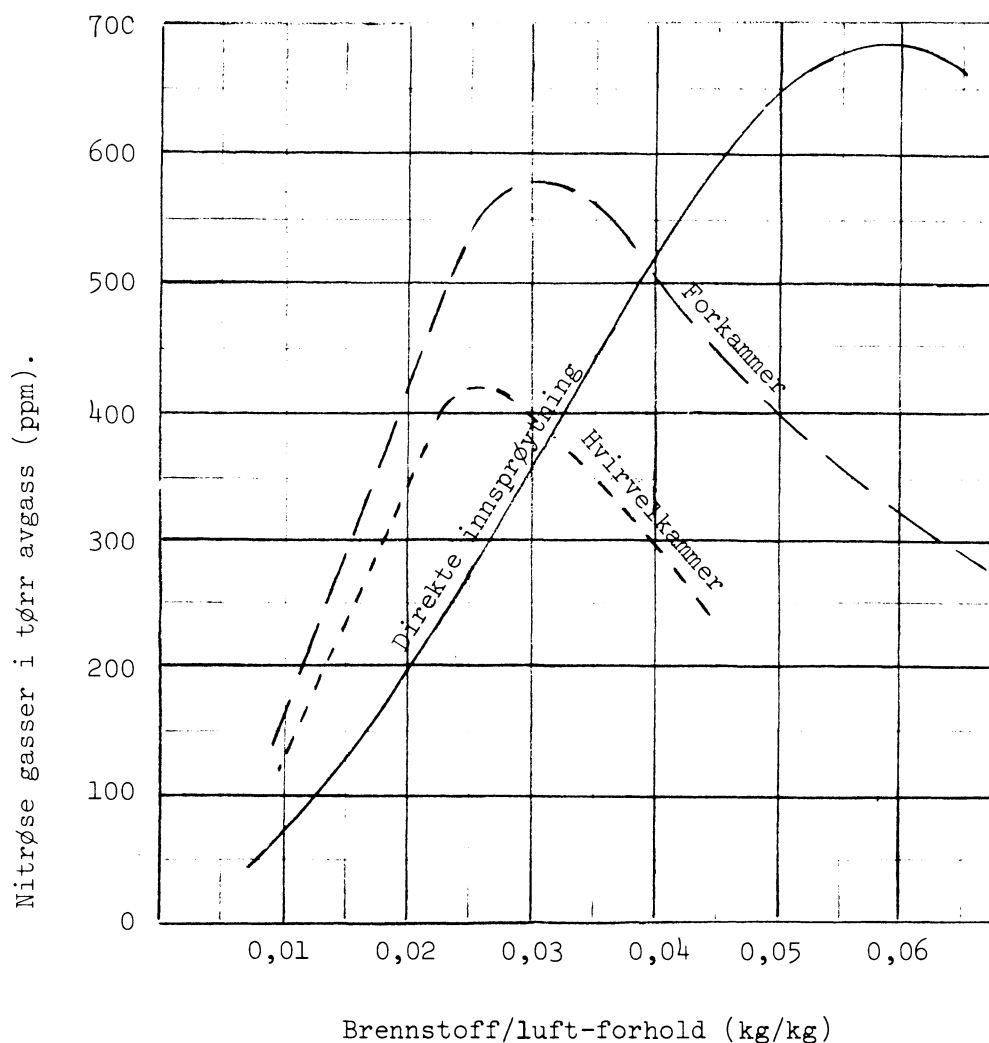


Fig. 1

Sammensetningen av diesellavgass som angitt i tabell I forutsetter at motoren får sugd inn den luftmengde den trenger for en fullstendig forbrenning. Luftmengden vil avta når lufttrykket synker - motorer som skal benyttes i større høyde enn ca. 1000 m over havet bør derfor ha redusert innsprøytingsmengde. Redusert luftmengde er ellers praktisk talt alltid en følge av luftfiltre med stor gjennomstrømningsmotstand, og det er derfor nødvendig å sikre at disse holdes tilstrekkelig rene.

#### 2.4. Forbrenningsgasser.

Forbrenning av propan og andre petroleumbrennstoffer for å hindre tåkedannelse gir også forurensningsgasser. Måling av ventilasjonsforhold bør derfor også omfatte virkning av slik forbrenning, men vi kan gå ut fra at forurensningskonsentrasjonene blir små.

Anm.: Kontrollmålinger, bl.a. ved Skjomen-anleggene, har vist konsentrasjoner i størrelsesorden 10-20 % av yrkeshygieniske grenseverdier.

#### 3. Yrkeshygieniske grenseverdier og vurdering av forurensningsblandinger.

Tabell I angir gjeldende yrkeshygieniske grenseverdier for de aktuelle forurensningsgasser. Etter kontakt med Yrkeshygienisk Institutt og Arbeidstilsynet for å få en best mulig vurdering av forurensningsblandinger, særlig hvor gasser med takverdier (merket "C" for Ceiling) inngår, er oppfatningen:

##### 3.1. Generelt om gassene.

Karbondioksyd ( $\text{CO}_2$ ) representerer hverken forgiftnings- eller etsningsfare. Konsentrasjonen av  $\text{CO}_2$  må imidlertid ikke bli så stor at luftens oksygeninnhold reduseres vesentlig.

Anm.: Måling av  $\text{CO}_2$ -konsentrasjonen gir et godt grunnlag for å beregne den brennstoffmengde som er forbrent i luften, da økningen utover 0,03 % (= 300 p.p.m.), som er normal konsentrasjon i ren luft, vil være proporsjonal med forbrent brennstoffmengde.

Karbonmonooksyd (CO) er giftig og opptas lett i blodet der den hindrer oksygentransporten. Virkningen av CO-forurensning er imidlertid reversibel såfremt konsentrasjonen ikke har vært for høy eller varer for lang tid.

Nitrogendioksyd ( $\text{NO}_2$ ) er en meget etsende gass som kan forårsake kroniske sårdannelser i lungevevet. Den har derfor yrkeshygienisk takverdi og blir av denne grunn og den konsentrasjon som er aktuell i tunnelventilasjonen medbestemmende for ventilasjonsbehovet.



Nitrogenoksyd (NO) er ikke etsende og brukes bl.a. som bedøvelsesmiddel. Med den konsentrasjon som blir aktuell i tunnelventilasjon innvirker den ikke på ventilasjonsbehovet. Den går med tiden over til NO<sub>2</sub>.

Svoveldioksyd (SO<sub>2</sub>) er en sterkt etsende gass som også kan forårsake sår-dannelser. Utvalget har derfor valgt å anse denne for å virke additivt sammen med NO<sub>2</sub> og forsterke etsevirkingen.

Aldehyder (vesentlig på grunn av formaldehyddelen) og akrolein påvirker ventilasjonsbehovet ved de aktuelle konsentrasjoner i liten grad, men de er antatt å virke additivt i forbindelse med NO<sub>2</sub> og SO<sub>2</sub>.

### 3.2. Grensekonsentrasjon for forurensningsblandinger.

På grunnlag av vurderingen av de enkelte forurensningsgasser anvender utvalget formelen

$$\frac{C_{NO_2}}{TLV_{NO_2}} + \frac{C_{SO_2}}{TLV_{SO_2}} + \frac{C_{Aldehyder}}{TLV_{Aldehyder}} + \frac{C_{Akrolein}}{TLV_{Akrolein}} \leq 1$$

Luftbehovet pr. kg dieselolje som forbrennes er satt til 1200 nm<sup>3</sup>, og summen av partialkoeffisientene blir da ca. 0,95. Summen er satt noe mindre enn 1 for å kompensere virkingen av mindre avvik i de forutsatte forhold.

### 3.3. Kommentarer.

Den foretatte vurdering utelater CO som medbestemmende faktor for ventilasjonsbehovet. Likevel bør enhver måling av ventilasjonsforhold også omfatte måling av CO-konsentrasjonen.

NO<sub>2</sub>-konsentrasjonen viser seg ved målinger å være lavere enn forventet. Det samme gjelder SO<sub>2</sub> som i de fleste tilfeller ikke lar seg påvise i tunnelluften. Dette kan skyldes en reaksjon mellom NO<sub>2</sub> og SO<sub>2</sub> f.eks.:



og som brukes ved fremstilling av svovelsyre. Forholdet er ikke eksperimentalt påvist å gjelde i tunnelatmosfæren, men antyder den sannsynligste forklaring på lave måleresultater for NO<sub>2</sub> og SO<sub>2</sub>.

4. Rensing av avgass, hindring av forurensninger.

4.1. Katalysator.

Katalysator krever en minstetemperatur på ca.  $250^{\circ}\text{C}$  for å være virksom. Ved tilsetning av ekstra luft i ekshausten videreforbrenner den da CO til  $\text{CO}_2$ . Katalysatorer gir samtidig den uønskede effekt at de omdanner endel NO til den langt farligere  $\text{NO}_2$  som er en av de bestemmende forurensningsgasser for tunnelventilasjon. Da dieselmotorer utvikler beskjedne mengder CO, bør ikke katalysator anbefales brukt for dieselmotorer i tunneldrift.

4.2. Scrubber.

Scrubbere er vaskesystemer for avgass. Vanlige scrubbere er ikke påvist å ha rensende virkning av betydning på avgassens kritiske forurensninger, og anses derfor som uaktuelle.

4.3. Drivstoffspesifikasjoner.

Alle forurensningsgasser er produkter fra forbrenning av drivstoffet. Enkelte forurensninger kan derfor holdes under en viss grense ved å spesifisere maksimale delinnhold i drivstoffet. Kun svovelinholdet er aktuelt og spesifiseres ofte til f.eks. max. 0,3 %, for å sikre små mengder utviklet  $\text{SO}_2$ . Som angitt i pkt. 3.3 er det en mulighet for at svovelinholdet bidrar til å holde  $\text{NO}_2$ -konsentrasjonene nede og med det svovelinhold dagens dieselolje har ( $S_{\text{max}} = 0,4 \%$ ) synes det ikke å være skjellig grunn til å anbefale strengere spesifikasjoner for svovelinhold i dieseloljen.

4.4. Spesifikasjon av motortyper.

Det fremgår av fig. 1 og anmerkninger til pkt. 2.3 at motortypen har innflytelse på forurensningsmengder i avgassen. Motorer med direkte innsprøytning bør derfor søkes unngått brukt i tunneler. Som eksempler på egnet motorvalg angis i første rekke fabrikatene Deutz og Caterpillar, dvs. det samme som vi har i våre lokomotiver og dieseldrevne lastere. Dette stemmer også overens med den oppfatning U.S. Bureau of Mines gir uttrykk for, og en rekke gruver i U.S.A. og Canada er gått over til disse motorfabrikata - i første rekke Deutzmotorer.

## 5. Ventilasjonsluft.

### 5.1. Generelt.

Beregningen av ventilasjonsbehov er basert på at absolutt ren luft blir innblåst i ventilasjonssystemet. Det må derfor omsorgsfullt påses at returluft fra tunnelen ikke kan bli sugd inn i ventilasjonsledningen.

### 5.2. Luftens innsugningstilstand.

Ren luft karakteriseres i innsugningstilstand av trykk, temperatur og relativ fuktighet eller duggpunktstemperatur.

Settes:

|                          |   |                     |
|--------------------------|---|---------------------|
| barometertrykk           | = | p (mm Hg)           |
| temperatur               | = | t (°C)              |
| relativ fuktighet        | = | r                   |
| evt. duggpunkttemperatur | = | t <sub>d</sub> (°C) |

kan tørrluftandelen  $Q_{tørr}$  beregnes.

Vanndampens metningstrykk (P<sub>m</sub>) og andel (x) i forhold til tørr luft for temperaturer mellom - 20 og + 30°C er angitt i Tabell II.

Relativ fuktighet er forholdet mellom vanndampens trykk ved duggpunktstemperatur og metningstrykket ved aktuell temperatur. ( $r \cdot P_{m_t} = P_{m_{t_d}}$ ).

Vi får da:

$$Q_{tørr} = Q \cdot \frac{P - P_{m_{t_d}}}{760} \cdot \frac{293}{273 + t} \quad (\text{nm}^3)$$

Ventilasjonsluft som innsuges med høy temperatur og høy fuktighet inneholder derfor redusert tørrluftmende.

### 5.3. Luftens utblåsningstilstand.

Ventilasjonsluften har ved utblåsning på stuff som regel en temperatur på 8 - 10°C. (Variasjonene i løpet av året er små). Luft som er innsugd ute med høy temperatur vil derfor ved utblåsning ha fått større relativ fuktighet. Hvis duggpunktstemperaturen ved innsugning er høyere enn lufttemperaturen ved utblåsning er noe vann blitt utfelt i ledningen. Luftens fuktighetsinnhold ved utblåsning varierer derfor sterkt med årstidene.

Tabell II

Vanndampens metningstrykk ( $p_m$ ) og metningsmengde pr. kg tørr luft ( $x$ ).

| t<br>°C | $p_m$<br>kp/m <sup>2</sup> | $p_m$<br>mm Hg | x<br>g/kg luft | t<br>°C | $p_m$<br>kp/m <sup>2</sup> | $p_m$<br>mm Hg | x<br>g/kg luft | t<br>°C | $p_m$<br>kp/m <sup>2</sup> | $p_m$<br>mm Hg | x<br>g/kg luft |
|---------|----------------------------|----------------|----------------|---------|----------------------------|----------------|----------------|---------|----------------------------|----------------|----------------|
| - 20    | 10,50                      | 0,772          | 0,654          | - 3     | 48,48                      | 3,566          | 3,030          | 14      | 162,97                     | 11,99          | 10,30          |
| - 19    | 11,56                      | 0,850          | 0,720          | - 2     | 52,74                      | 3,879          | 3,30           | 15      | 173,86                     | 12,79          | 11,00          |
| - 18    | 12,71                      | 0,935          | 0,792          | - 1     | 57,32                      | 4,216          | 3,59           | 16      | 185,37                     | 13,63          | 11,74          |
| - 17    | 13,96                      | 1,027          | 0,870          | 0       | 62,26                      | 4,579          | 3,90           | 17      | 197,55                     | 14,53          | 12,54          |
| - 16    | 15,33                      | 1,128          | 0,955          | 1       | 66,97                      | 4,93           | 4,20           | 18      | 210,42                     | 15,48          | 13,37          |
| - 15    | 16,82                      | 1,238          | 1,048          | 2       | 71,98                      | 5,29           | 4,51           | 19      | 224,02                     | 16,48          | 14,25          |
| - 14    | 18,44                      | 1,357          | 1,150          | 3       | 77,29                      | 5,69           | 4,85           | 20      | 238,40                     | 17,54          | 15,19          |
| - 13    | 20,19                      | 1,486          | 1,260          | 4       | 82,95                      | 6,10           | 5,20           | 21      | 253,56                     | 18,65          | 16,18          |
| - 12    | 22,12                      | 1,627          | 1,379          | 5       | 88,96                      | 6,54           | 5,58           | 22      | 269,56                     | 19,83          | 17,24          |
| - 11    | 24,20                      | 1,780          | 1,509          | 6       | 95,35                      | 7,01           | 5,98           | 23      | 286,44                     | 21,07          | 18,33          |
| - 10    | 26,46                      | 1,946          | 1,650          | 7       | 102,15                     | 7,51           | 6,42           | 24      | 304,23                     | 22,38          | 19,51          |
| - 9     | 28,89                      | 2,125          | 1,801          | 8       | 109,38                     | 8,05           | 6,88           | 25      | 322,98                     | 23,76          | 20,77          |
| - 8     | 31,56                      | 2,321          | 1,969          | 9       | 117,05                     | 8,61           | 7,36           | 26      | 432,74                     | 25,21          | 22,09          |
| - 7     | 34,43                      | 2,532          | 2,149          | 10      | 125,20                     | 9,21           | 7,88           | 27      | 363,54                     | 26,74          | 23,47          |
| - 6     | 37,54                      | 2,761          | 2,343          | 11      | 133,84                     | 9,84           | 8,44           | 28      | 385,43                     | 28,35          | 24,93          |
| - 5     | 40,90                      | 3,008          | 2,552          | 12      | 143,01                     | 10,52          | 9,02           | 29      | 408,46                     | 30,04          | 26,49          |
| - 4     | 44,54                      | 3,276          | 2,781          | 13      | 152,69                     | 11,23          | 9,64           | 30      | 432,67                     | 31,82          | 28,14          |

#### 5.4. Tåkedannelse.

Lufttilstanden ved utblåsning har stor innvirkning på tåkedannelsen på stuff når trykkluftdrevne maskiner benyttes. Utløpstemperaturen fra f.eks. bormaskiner er ca.  $-55^{\circ}\text{C}$  og når denne blandes med ventilasjonsluften kan blandingstemperaturen bli så lav at duggpunktet underskrides. Det vann som da ikke kan holdes som vanndamp blir utfelt som tåke. Om ventilasjonsluften ikke er mettet med vanndamp kan økning av ventilasjonsluftmengde i forhold til trykkluftforbruk gi mindre tendens til tåkedannelse, men det er lettere å hindre tåke ved oppvarming av luften. Tåkefare konstateres lett ved å benytte to termometre - et tørt og et vått. Såfremt det tørre termometer viser høyere temperatur enn det våte er oppvarmingen tilstrekkelig til å hindre tåke. Eksempel på beregning av nødvendig varmetilførsel under aktuelle forhold er tatt med i beregningsavsnittet. (se 7.7).

### 6. Utledning av beregningsformler.

#### 6.1. Generelt.

Tilførselen av ventilasjonsluft må være tilstrekkelig til å fortynne forurensningskonsentrasjonene ned til yrkeshygienisk akseptable verdier. Beregningen vil derfor omfatte både beregning av utviklet forurensningsmengde og den luftmengde som kreves for tilstrekkelig fortynning.

#### 6.2. Fortynning av skytegasspropp.

Ved salvesprengningen oppstår en blanding inne på stuff av luft og forurensningsgasser p.g.a. sprengstoffet. Den forurensede proppens lengde vil som regel bli så stor at en del av denne rekker forbi ventilasjonsrørets munning. Den del av skytegassproppen som rekker forbi rørmunningen kan bare fortynnes av lekkasjeluft fra ventilasjonsrøret, beregningen er derfor ikke gyldig for denne del av skytegassproppen. Beregningen gjelder forurensningskonsentrasjonen i tunnelluften ved rørets munning.

- 6.2.1 Beregningene forutsetter at den innblåste friskluftmengde gir tilstrekkelig turbulens til å sikre god blanding av ventilasjonsluft og skytegass. Erfaringsmessig synes dette krav oppfylt for utløpshastigheter i området 5 - 15 m/sek. når avstanden (a) fra rørmunning til stuff oppfyller

$$\underline{a \leq 6 \cdot v_0 \cdot d_0}$$

der a er avstand i m,  $v_0$  = utløpshastighet i m/sek. og  $d_0$  = utløpsdiameter i m.

Formelen kan også uttrykkes

$$\underline{a \leq \frac{Q_0}{8 d_0}} \quad \text{eller} \quad \underline{a \leq 0,87 \sqrt{Q_0 \cdot v_0}}$$

der  $Q_0$  = innblåst luftmengde i  $m^3/\text{min}$ . Formlene er basert på tilgjengelige opplysninger om hastigheter i luftstråle som strømmer ut i stillestående luft, og avstanden tilsvarende en resthastighet på 1 m/sek. Luftstrålen må rettes mot stoff og ikke mot tunnelens vegger eller røysa.

#### 6.2.2. Utleddning av fortynningsformel.

Setter ventilasjonsluftstrømmen  $= Q_0$  ( $m^3/\text{min.}$ )  
 avstanden rørmunning - stoff =  $a$  (m)  
 tunneltverrsnittet  $= F$  ( $m^2$ )  
 ventilasjonstid  $= t$  (min.)  
 forurensningskonsentrasjon  $= c$

I tiden  $dt$  bortføres  $c \cdot Q_0 \cdot dt$  som gir en forandring i forurensningskonsentrasjonen innenfor rørenden  $dc$ , slik at denne etter tiden  $dt$  blir  $(c + dc)$ .

Vi får da ligningen

$$c \cdot Q_0 \cdot dt = c \cdot a \cdot F - (c + dc) a \cdot F$$

$$): c \cdot Q_0 \cdot dt = - a \cdot F \cdot dc \quad \text{eller} \quad \frac{dc}{c} = - \frac{Q_0}{a \cdot F} dt$$

Integreres ligningen fås

$$\ln c = - \frac{Q_0 \cdot t}{a \cdot F} + C$$

der  $C$  beregnes av  $c = c_0$  for  $t = 0$  som gir  $C = \ln c_0$ .

Forurensningskonsentrasjonen synker derfor med tiden etter formelen

$$c = c_0 \cdot e^{-\frac{Q_0 \cdot t}{a \cdot F}}$$

Formelen benyttes i formen

$$\ln \frac{c_0}{c} = \frac{Q_0}{a \cdot F} \cdot t \quad \text{der} \quad \frac{c_0}{c} = f \quad \text{er det nødvendige fortynningsforhold}$$

for  $c =$  lik yrkeshygienisk grenseverdi ( $c_{TLV}$ ), og vi får

$$t_a = \ln f \frac{a \cdot F}{Q_0}$$

=====

der  $t_a$  er den tid (min.) som medgår til  $c$  i tunnelluften ved rørmunningen er sunket til  $c_{TLV}$ .

6.2.3. Opprinnelig forurensningskonsentrasjon ( $c_o$ ) kan beregnes av skyteproppens lengde som

$$c_o = \frac{1000 \cdot S \cdot V}{F \cdot L}$$

der  $S$  = sprengstofforbruk (kg),  $V$  = forurensningssgassens volum pr. kg. sprengstoff (liter),  $F$  = tunneltverrsnitt ( $m^2$ ) og  $L$  = proppens lengde (m).

Nødvendig fortynningsforhold ( $f$ ) for fortynning til yrkeshygienisk grenseverdi blir

$$f = \frac{c_o}{c_{TLV}} = \frac{1000 S \cdot V}{c_{TLV} \cdot F \cdot L}$$

For våre forhold regnes  $c_{TLV}$  for  $NO_2$  bestemmende og vi får

$$f = \frac{c_o}{c_{TLV}} = \frac{1000 \cdot 7 \cdot S}{5 \cdot F \cdot L} = \frac{1400 S}{F \cdot L}$$

Diagram 2 angir  $\ln f$  (naturlig logaritme for tallet  $f$ ) i avhengighet av  $S$  og  $F$ .

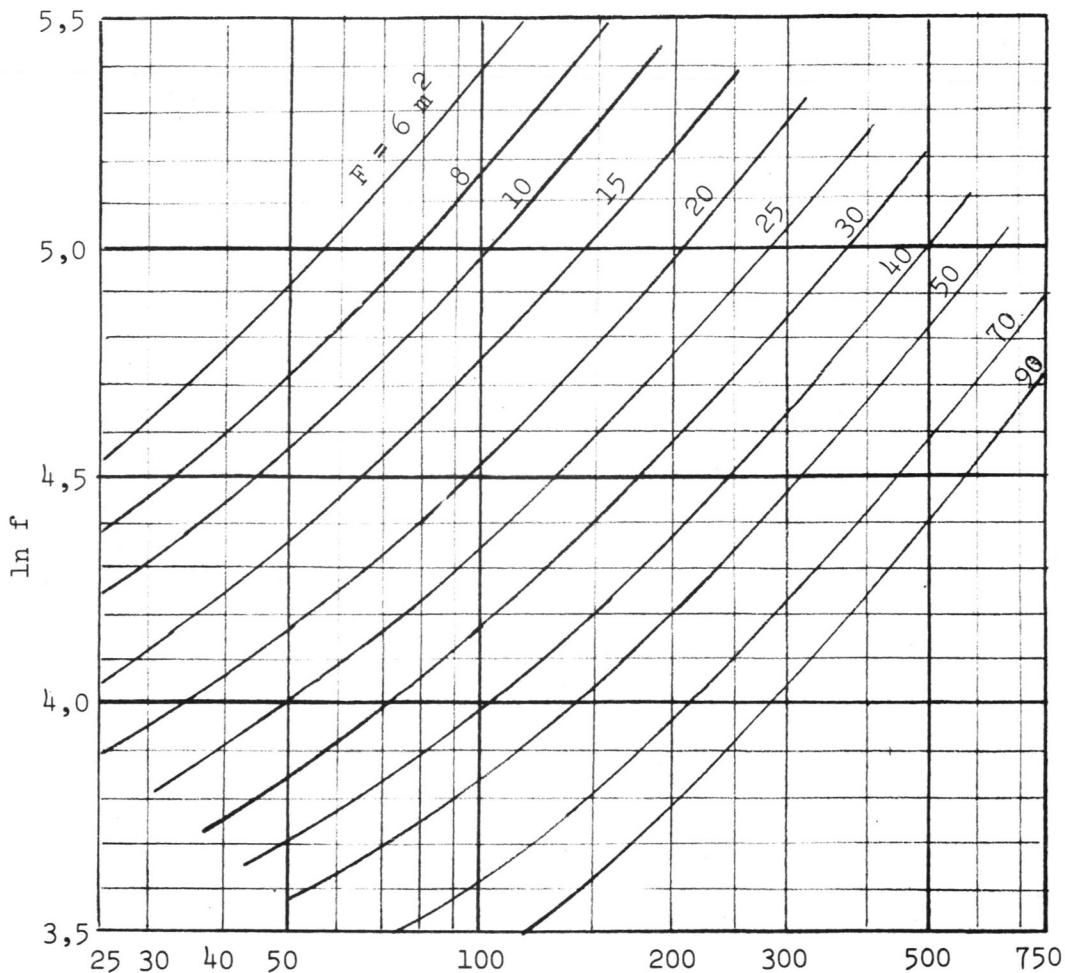


Fig. 2.

Sprengstoff pr. salve (kg).

#### 6.2.4. Fortrengning av skytegasser.

Skal forholdene være yrkeshygienisk akseptable ytterligere strekning  $b$  (m) utover fra rørmunningen vil tilleggstiden  $t_b$  (min.) bli

$$t_b = \frac{b \cdot F}{Q_0}$$

Total ventilasjonspause  $t_P$  (min.) blir altså  $t_a + t_b$

$$t_P = \frac{F}{Q_0} (a \cdot \ln f + b)$$

#### 6.3. Fortynning av forurensninger ved lasting og utkjøring.

Forurensninger som utvikles ved lasting og utkjøring blir tilført tunnel-luften etterhvert og blander seg med denne. Ventilasjonen må være tilstrekkelig til å gi yrkeshygienisk akseptable forurensningskonsentrasjoner.

##### 6.3.1. Skytegasser fra røysa.

Ved opplastingen frigjøres forurensningsgasser som er fanget i røysas hulvolum. Dette kan settes til ca. 65 % av røysas volum i fast fjell. Forurensningskonsentrasjonen i hulvolumet settes lik  $c_0$ . Ved en lastekapasitet  $B$  (fm<sup>3</sup>/min.) kreves da

$$Q_r = 0,65 B \cdot f$$

der  $f$  = forholdet  $c_0/c_{TLV}$

##### 6.3.2. Avgasser fra dieseldrevet lastemaskin.

Dieselforbruket for lastemaskiner er avhengig av så usikre faktorer at direkte målinger og erfaringstall må anvendes.

Det må regnes med forbruket i de perioder lastingen har full effekt - dvs. med lastekapasitet på basis av vibrograftertid. Målinger synes å bekrefte forbruk angitt som middel i Caterpillar's Performance Data Hand Book:

|     |          |     |          |
|-----|----------|-----|----------|
| 941 | 12,9 l/h | 920 | 11,4 l/h |
| 951 | 15,9 "   | 930 | 14,- "   |
| 977 | 28,- "   | 950 | 17,4 "   |
| 983 | 42,8 "   | 966 | 23,5 "   |
|     |          | 980 | 34,1 "   |
|     |          | 988 | 41,6 "   |
|     |          | 992 | 66,6 "   |



og de angitte verdier kan benyttes for en overslagsmessig beregning.

For et diesellojeforbruk  $b$  i (l/h) blir nødvendig lufttilførsel

$Q_L$  ( $m^3/min.$ ):

$$Q_L = 17,2 \cdot b.$$

Summen av  $Q_r$  og  $Q_L$  må tilføres på stuff og vi setter denne lik  $Q_0$ .

### 6.3.3. Avgasser fra utkjøring.

Ved kjøring virker krefter rettet mot bevegelsen og motoreffekten benyttes for å overvinne disse krefter. Kreftene som motvirker kjøretøyenes bevegelser kan inndelles i:

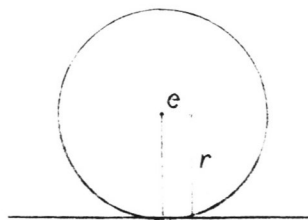
Rullemotstand

Luftmotstand og

Stigningsmotstand

#### 6.3.3.1. Rullemotstand.

Rullemotstanden  $M_R$  uttrykkes ved  $M_R = f_R \cdot G$  der  $G$  er totalvekt for kjøretøyet og  $f_R$  er spesifikk rullemotstand.



$f_R$  kan forklares som forholdet  $\frac{e}{r}$  ):  $f_R = \frac{e}{r}$ .

$f_R$  avtar derfor med økende hjuldiameter,

$e$  avtar med økende lufttrykk i dekkene

og økning i kjørebaneens fasthet. Kjørebane og dekkenes lufttrykk har derfor stor innflytelse på spesifikk rullemotstand  $f_R$ . Tekniske håndbøker gir vanlige verdier for  $f_R$ , (denne er fra Bosch Kraftfahrtechnisches Taschenbuch).

Luftgummihjul på faste dekker eller valset grusdekke  $f_R = 0,015$

- " - " valset pukk eller sand

$f_R = 0,02 - 0,025$

- " - " jordvei eller åkerjord

$f_R = 0,05 - 0,1$

Stålhjul på skinner

$f_R = 0,001 - 0,002$

x) Se anm. 1 bakerst.

6.3.3.2. Luftmotstanden  $M_L$  uttrykkes som  $M_L = c_W \cdot A \cdot v^2$  der  $c_W$  er den spesifikke luftmotstand for kjøretøyets form,  $A$  er kjøretøyets tverrsnittsareal (areal på tvers av kjøreretningen) og  $v$  er kjøretøyets hastighet.  $M_L$  øker derfor med hastighetens kvadrat, men når ikke samme størrelsesorden som  $M_R$  før hastigheten er økt til ca. 70 - 80 km/h.  $M_L$  blir derfor liten ved

de aktuelle kjørehastigheter i tunnel og vi setter

$$M_R + M_L = f \cdot G$$

På basis av målinger fra tunnel med god fast kjørebane er funnet  $f \approx 0,02$ .

Det vil være forskjell på verdien av  $f$  for lastet ( $f_L$ ) og for ulastet kjøretøy ( $f_T$ ). Den angitte  $f$  er middelerdi.

- 6.3.3.3. Stigningsmotstand  $M_s$  uttrykkes ved  $M_s = s \cdot G$  der  $s$  er stigningen. ( $s$  skal egentlig være sinus til stigningsvinkelen, men p.g.a. de små stigningsvinkler er feilen ved å angi  $s = \text{stigning (tg)}$  minimal).  $s$  er positiv i motbakke, negativ i unnabakke. Her regnes  $s$  som positiv ved stigning mot stuff.

- 6.3.3.4. Kjøretøyets relative lasteevne.

Er kjøretøyets tomvekt  $T$  og vekten av lasset  $L$  betegner forholdet  $\frac{L}{T} = n$  kjøretøyets relative lasteevne.

- 6.3.3.5. Kjørearbeid.

Total kjøremotstand  $M_K$  som må overvinnes med motorkraft er

$$M_K = M_R + M_L + M_S$$

Forutsatt at  $M_K$  ikke blir negativ i noen av kjøreretningene blir summen av  $M_K$  innover og utover

$$a) \quad M = T (f_T + s) + (T + L) (f_L - s) = T (f_T + f_L) + L (f_L - s)$$

blir ( $f_T + s$ ) negativ blir

$$b) \quad M = (T + L) (f_L - s)$$

Blir ( $f_L - s$ ) negativ blir

$$c) \quad M = T (f_T + s)$$

Herav følger at kjørearbeidet ( $A_T$ ) pr. m tunnel og minutt blir

$$\text{for forhold som a) } A_T = B \left( \frac{f_T}{n} + f_L \left( 1 + \frac{1}{n} \right) - s \right)$$

$$\text{for forhold som b) } A_T = B \left( 1 + \frac{1}{n} \right) (f_L - s) \quad \text{og}$$

$$\text{for forhold som c) } A_T = \frac{B}{n} (f_T + s)$$

der B er transportkapasiteten (= lastekapasitet) regnet i kg/min., og  $A_T$  regnes i kg m/m min.

#### 6.3.3.6. Kjøretøyets kjøreeffekt.

Kjøretøyenes drivverk har en virkningsgrad = 0,9 (variasjonene er små). Kjøretøyer med torque converter vil redusere denne med converterens virkningsgrad som kan settes til 0,85. Kjøreeffekten er motoreffekten ganger drivverkets virkningsgrad ( $\eta_d$ ). Se anm. 2 bakerst.

#### 6.3.3.7. Drivstofforbruk.

Dieselmotorer har et spesifikt brennstofforbruk på ca. 200 g/HKh og utvikler altså ca. 5 HKh pr. kg brennstoff. Som kjøreeffekt fås  $5 \cdot \eta_d$  dvs. 4,5 HKh pr. kg brennstoff for vanlige kjøretøyer uten torque converter. (Med torque converter fås ca. 3,85 HKh).

Sammenhengen mellom kjørearbeid ( $A_T$ ) og drivstofforbruk (b) er

$$b \cdot 5 \cdot 75 \cdot 3600 \cdot \eta_d = A_t$$

for  $\eta_d = 0,9$  gir da 1 kg brennstoff  $A_T = 1.215.000$  kpm  
Se anm. ovenfor.

#### 6.3.3.8. Luftbehov.

Tidligere (pkt. 3.2) er luftbehovet for fortynning av dieselavgass satt til  $1200 \text{ nm}^3$  pr. kg drivstoff. Luftbehovet  $q_B$  i  $\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{min.}$  blir derfor

$$q_B = 1200 \cdot b = A_T \frac{1200}{1.215.000} = 0,000987 \cdot A_T \text{ (m}^3/\text{m} \cdot \text{min.)}$$

eller ved innførelse av formelene for  $A_T$  i pkt. 3.3.5.

$$\text{a) } q_B = 0,000987 B \left( \frac{f_T}{n} + f_L \left( 1 + \frac{1}{n} \right) - S \right)$$

$$\text{b) } q_B = 0,000987 B \left( 1 + \frac{1}{n} \right) (f_L - S)$$

$$\text{c) } q_B = 0,000987 \frac{B}{n} (f_T - S)$$

#### 6.3.3.9. Tunnelluftens egenkapasitet.

Er tunnellufta ved kjøringens begynnelse helt ren vil den oppta forurensningene fra kjøring til den når den akseptable forurensningskonsentrasjon. Den tid ( $t_F$ ) som medgår før dette forhold oppstår er

$$t_F = \frac{F}{q_B} \text{ (min.)}$$

$t_F$  vil som regel være vesentlig større enn den tid utkjøringen varer. Blir  $t_F$  mindre enn utkjøringstiden kan tilfredsstillende forhold i tunnelen bare oppnås ved tilførsel av lekkasjeluft fra røret, såfremt tunnelen ikke er vesentlig kortere enn  $X_k$  (se 6.3.4).

#### 6.3.4. Ventilasjonsbehov og fordeling.

##### 6.3.4.1. Optimal lekkasje.

Såfremt lekkasjen fra røret ( $q_R$ ) er lik  $q_B$  eller større

$$Q_x \geq Q_0 + q_B \cdot x$$

=====

der  $x$  = avstand (m) målt utover fra rørmunningen og  $Q_0$  = luftstrøm ved rørmunning ( $m^3/min.$ ), vil ventilasjonen være tilfredsstillende uansett hvor lenge utkjøringen varer.

Settes utkjøringstiden for salven  $t_u$  (min.) vil lekkasjen  $q_B$  kreves over strekning  $X_k$  (m) som er den avstand luftpartikler som ved utkjøringens begynnelse var ved rørmunningen har beveget seg utover tunnelen i løpet av utkjøringstiden.

Ved  $X_k$  er lufthastigheten i tunnelen  $\frac{Q_0 + q_B \cdot X_k}{F}$ . Middelhastigheten over strekningen er  $\frac{2 Q_0 + q_B \cdot X_k}{2 F}$  og vi får

$$X_k = t_u \frac{2 Q_0 + q_B \cdot X_k}{2 F}$$

$$): X_k = \frac{2 t_u \cdot Q_0}{2F - q_B \cdot t_u} = \frac{\frac{t_u}{F} Q_0}{1 - \frac{t_u}{F} \frac{q_B}{2}}$$

=====

##### 6.3.4.2. Mindre enn optimal lekkasje.

Dette innebærer at  $q_R < q_B$  og at luftmengden  $Q_S$  ved rørmunningen må økes utover  $Q_0$ .

Vi får:

$$Q_S = \frac{Q_0}{1 - \frac{t_u}{F} (q_B - q_R)}$$

Største og bestemmende forurensningskonsentrasjon fås ved avstand

$X_k$  (m) fra rørmunning

$$X_k = t_u \frac{2 Q_S + q_R \cdot X_k}{2 F}$$

$$): X_k = \frac{2 t_u Q_S}{2F - t_u \cdot q_R} = \frac{\frac{t_u}{F} \cdot Q_O}{\left(1 - \frac{t_u}{F} (q_B - q_R)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{t_u}{F} \cdot \frac{q_R}{2}\right)\right)}$$

== =====

#### 6.3.4.3. Uten lekkasje

Formelene i pkt. 6.3.4.2 kan benyttes ved å sette  $q_R = 0$ .

$$Q_S = \frac{Q_O}{1 - \frac{t_u}{F} q_B}$$

og

$$X_k = \frac{\frac{t_u}{F} \cdot Q_O}{1 - \frac{t_u}{F} q_B}$$

#### 7. Beregningseksempel.

Beregningen er foretatt for tunnel drevet ved Rana-anleggene. Tunnel-driftens kjente data av betydning for ventilasjonsbehovet er:

|                                            |                            |
|--------------------------------------------|----------------------------|
| Tunnelforprofil:                           | $F = 50 \text{ m}^2$       |
| Salvelangde:                               | 3,6 m                      |
| Fjellets densitet                          | $2,6 \text{ t/m}^3$        |
| Lastemaskin: Caterpillar                   | 977                        |
| Brutto lastekapasitet                      | $90 \text{ fm}^3/\text{h}$ |
| Trucker: Kockum                            | KL-420                     |
| Sprengstofforbruk pr. salve                | ca. 240 kg                 |
| Avstand fra ventilasjonsrørende til stuff: | ca. 45 m max.              |

7.2. Av beregningsformlene i pkt. 6.2 fremgår at luftmengden som leveres på stuff bare har innflytelse på ventilasjonspausens varighet. Såfremt denne pause ikke blir uakseptabelt lang er derfor ventilasjonsbehovet for lasting og utkjøring avgjørende.

### 7.2.1. Lasting.

Av diagram 2 avleses  $\ln f = 4,3$ , dette tilsvarer  $f \approx 75$ . For den lastekapasitet som var blir derfor behovet for gasser i røysa:

$$Q_r = 0,65 \cdot \frac{90}{60} \cdot 75 \approx \underline{73 \text{ m}^3/\text{min.}}$$

Det antas etter pkt. 6.3.2. at 977 forbruker 22 l/h (som tilsvarer ca. 19 kg/h).

977 får derfor et ventilasjonsbehov

$$Q_L = 17,2 \cdot 22 \approx \underline{378,4 \text{ m}^3/\text{min.}}$$

Summen av  $Q_r$  og  $Q_L$  må leveres stuff

$$\text{): } \underline{\underline{Q_O}} = 73 + 378 = \underline{\underline{451 \text{ m}^3/\text{min.}}}$$

### 7.2.2. Utkjøring.

Som angitt i pkt. 6.3.3.2 regnes  $f = 0,02$  og  $S$  settes = 0. Forholdet mellom truckens tomvekt og lassets vekt settes = 1.

Transportkapasiteten tilsvarer lastekapasiteten derfor

$$\underline{B} = \frac{90 \cdot 2,6 \cdot 1000}{60} = \underline{3900 \text{ kg/min.}}$$

Transportbehovet blir da

$$q_B = 0,000987 \cdot 3900 \cdot 0,02 \left(1 + \frac{2}{1}\right) = \underline{0,23 \text{ m}^3/\text{m min.}}$$

### 7.3. Ventilasjonsfordeling ved optimal lekkasje.

På stuff må leveres  $Q_O = 451 \text{ m}^3/\text{min.}$  Langs røret må lekkasjen være  $q_B = 0,230 \text{ m}^3/\text{m min.}$  Den lengde lekkasjen må skje over avhenger av utkjøringstiden  $t_u$ .

$$\underline{t_u} = \frac{3,6 \cdot 50}{90} \cdot 60 = \underline{120 \text{ min.}}$$

Lekkasjelengden  $X_k$  blir da

$$X_k = \frac{451}{\frac{50}{120} - \frac{0,23}{2}} = \underline{1171 \text{ m.}}$$

Ved  $X_k$  må leveres

$$\underline{Q_{X_k}} = 451 + 0,23 \cdot 1171 = \underline{720 \text{ m}^3/\text{min.}}$$

Ved optimal lekkasje kreves derfor

720 m<sup>3</sup>/min. 1171 m fra stuff, hvorav 269 m<sup>3</sup>/min. fordeles jevnt langs rørledningen som lekkasje og 451 m<sup>3</sup>/min. leveres på stuff.

7.4. Ventilasjonsfordeling ved lekkasje ( $q_R$ ) mindre enn  $q_B$ .

Fremdeles gjelder  $Q_0$  som funnet i 7.3, men  $q_R$  settes lik 0,05 m<sup>3</sup>/min. (som tilsvarende litt under 10 % pr. km).

Til stuffen må leveres

$$Q_S = \frac{451}{1 - \frac{120}{50} (0,23 - 0,05)} = 762 \text{ m}^3/\text{min.}$$

Det kritiske ventilasjonspunkt  $X_k$  ligger i avstanden

$$\underline{X_k} = \frac{\frac{120}{50} 451}{\{1 - \frac{120}{50} (0,23 - 0,05)\} \cdot (1 - \frac{120}{50} \cdot \frac{0,05}{2})} = \underline{1945 \text{ m}}$$

og ved  $X_k$  må luftstrømmen være.

$$\underline{Q_{X_k}} = 762 + 0,05 \cdot 1945 = \underline{860 \text{ m}^3/\text{min.}}$$

7.5. Ventilasjonsfordeling uten lekkasje.

På stuff vil kreves

$$\underline{Q_S} = \frac{451}{1 - \frac{120}{50} \cdot 0,23} = \underline{1007 \text{ m}^3/\text{min.}}$$

og det kritiske ventilasjonspunkt  $X_k$  blir

$$X_k = \frac{\frac{120}{50} \cdot 451}{1 - \frac{120}{50} \cdot 0,23} = \underline{2523 \text{ m.}}$$

): luften i tunnelen blir fullt forurensset 2523 m bak stuff.

7.6. Ventilasjonspause og utløpsdiameter.

Av diagram 2 finnes for 240 kg sprengstoff og 50 m<sup>2</sup> profil ln f = 4,3.  
Det forutsettes at forholdene skal være yrkeshygienisk akseptable i en avstand av 100 m fra stuff.

7.6.1. Optimal lekkasje.

$$\text{Utløpsdiameter } \underline{d_o} \leq \frac{Q_o}{8a} = \underline{1,25 \text{ m}}$$

som gir utløpshastighet  $v_o$

$$\underline{v_o} \geq \frac{Q_o}{\frac{\pi}{4} d_o^2 \cdot 60} = \underline{6,2 \text{ m/s.}}$$

Fortynningstiden  $t_a$  blir

$$t_a = \frac{45 \cdot 50}{451} \cdot 4,3 = 21,5 \text{ min.}$$

Fortrengningstiden  $t_b$  blir

$$t_b = \frac{55 \cdot 50}{451} = 6,1 \text{ min.}$$

Total ventilasjonspause blir

$$t_a + t_b = 21,5 + 6,1 = \underline{27,6 \text{ min.}}$$

7.6.2. Ved forhold som for 7,4.

$$\text{Utløpsdiameter } \underline{d_o} \leq \frac{Q_s}{8a} = \frac{762}{8,45} = \underline{2,12 \text{ m}}$$

som betinger utløpshastighet  $v_o$

$$\underline{v_o} \geq \frac{Q_s}{\frac{\pi}{4} d_o^2 \cdot 60} = \underline{3,6 \text{ m/s.}}$$

Fortynningstid  $t_a$  blir

$$t_a = \frac{45 \cdot 50}{762} \cdot 4,3 = 12,8 \text{ min.}$$

Fortrengningstiden  $t_b$  blir

$$t_b = \frac{55 \cdot 50}{762} = 3,6 \text{ min.}$$



Total ventilasjonspause

$$t_a + t_b = 12,8 + 3,6 = \underline{16,4 \text{ min.}}$$

7.6.3. Ved forhold som for 7.5.

$$\text{Utløpsdiameter } d_o \leq \frac{1007}{8,45} = \underline{2,80 \text{ m}}$$

som gir utløpshastighet  $v_o$

$$v_o \geq \frac{1007}{\frac{\pi}{4} d_o^2 \cdot 60} = \underline{2,72 \text{ m/min.}}$$

Fortynningstiden  $t_a$  blir

$$t_a = \frac{45 \cdot 50}{1007} \cdot 4,3 = \underline{9,6 \text{ min.}}$$

Fortrengningstiden  $t_b$  blir

$$t_b = \frac{55 \cdot 50}{1007} = \underline{2,7 \text{ min.}}$$

Total ventilasjonspause blir

$$t_a + t_b = 9,6 + 2,7 = \underline{12,3 \text{ min.}}$$

7.7. Nødvendig varmetilførsel for tåkehindring.

Boring: 4 stk. GD PR-123

Trykkluftforbruk pr. maskin ca.  $15 \text{ m}^3/\text{min.}$

Avløpstemperatur ca.  $-55^\circ\text{C.}$

Trykkluften: Trykk  $6,5 \text{ ato.}$ , temperatur  $10^\circ\text{C}$

Ventilasjon: Ca.  $650 \text{ m/min.}$  i rørutløpet

Temperatur  $10^\circ\text{C}$

Relativ fuktighet 80 %, tilsvarende duggpunktstemperatur  $6,8^\circ\text{C.}$

Av ventilasjonsluften kan bare ca. 30 % antas å rekke inn til det aktuelle område, her regnes med  $200 \text{ m}^3/\text{min.}$

Vanninnhold - temperatur etter Tabell II (pkt. 4,2).

Blandingstemperaturen  $t$  blir

$$t = \frac{200 \cdot 10 - 4 \cdot 15 \cdot 55}{260} = \underline{-5^\circ\text{C.}}$$

Vanninnhold i blandingen  $X_b$  blir

$$X_b = \frac{200 \cdot 7,88 \cdot 0,8 + 4,15 \cdot \frac{7,88}{6,5 + 1}}{260} = \underline{5,1 \text{ g/kg.}}$$

Første ledd angir vann i ventilasjonsluften og utgjør over 95 % av den totale vannmengde.

For å holde 5,1 g/kg i dampform er duggpunktet  $3,7^\circ\text{C}$  (100 % relativ fuktighet). Dette krever en temperaturøkning for blandingen på

$$3,7 + 5 = 8,7^\circ\text{C}$$

For å øke temperaturen i  $1 \text{ m}^3$  luft  $1^\circ\text{C}$  trengs 0,29 kcal. (Beregnet av 7 kcal for  $24 \text{ m}^3$ ). Nødvendig varmetilførsel Q blir

$$Q = 260 \cdot 0,29 \cdot 8,7 = \underline{656 \text{ kcal/min.}} = \underline{39.360 \text{ kcal/h.}}$$

$$(Q = 45,8 \text{ kW}).$$

Alle vanlige hydrokarboner (propan, bensin, petroleum, fyringsolje etc.) utvikler ved forbrenning ca. 10.000 kcal/kg.

Det vil derfor medgå ca.  $\frac{39.360}{10.000} = \underline{3,94 \text{ kg/h.}}$  for å hindre tåkedannelse.

  
A. Aune

Anm. 1. Weserhütte angir:

|                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Betong, asfalt, glatt og hard       | $F_R = 0,015 - 0,020$ |
| Makadam glatt og fast               | " = 0,025 - 0,030     |
| Kis eller jord, glatt og hard, fast | " = 0,030 - 0,035     |
| Kis eller jord, ikke kompakt, løs   | " = 0,035 - 0,040     |
| Dekke, våt og sølete, fast grunn    | " = 0,040 - 0,050     |
| Løst og hullede dekke               | " = 0,060 - 0,080     |
| Sand eller jord, bløt grunn         | " = 0,10 - 0,14       |
| Jord, gjennomfuktet, bløt           | " = 0,16 - 0,20       |

Anm. 2.

Weserhütte angir  $\eta = 0,81$   
med torque converter  $\eta = 0,75$