

NILU
OPPDRAGSRAPPORT NR 46 /79
REFERANSE: 22679
DATO: JANUAR 1980

SPREDNING AV SPORSTOFF FRA
TINGSTADTUNNELEN, GÖTEBORG

AV

YNGVAR GOTAAS

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM
NORGE

FORORD

Denne rapporten inneholder resultater fra spredningsforsøk med sporstoff i Tingstadtunnelen (Gøteborg) i september 1979, utført etter oppdrag fra Oslo Veivesen.

En takker Gatukontoret i Gøteborg for tillatelsen til å utføre forsøkene. En spesiell takk til kontrollpersonellet ved tunnelen og deres leder Lorentz Olsson, for all hjelp under gjennomføringen.

INNHOILDSFORTEGNEISE

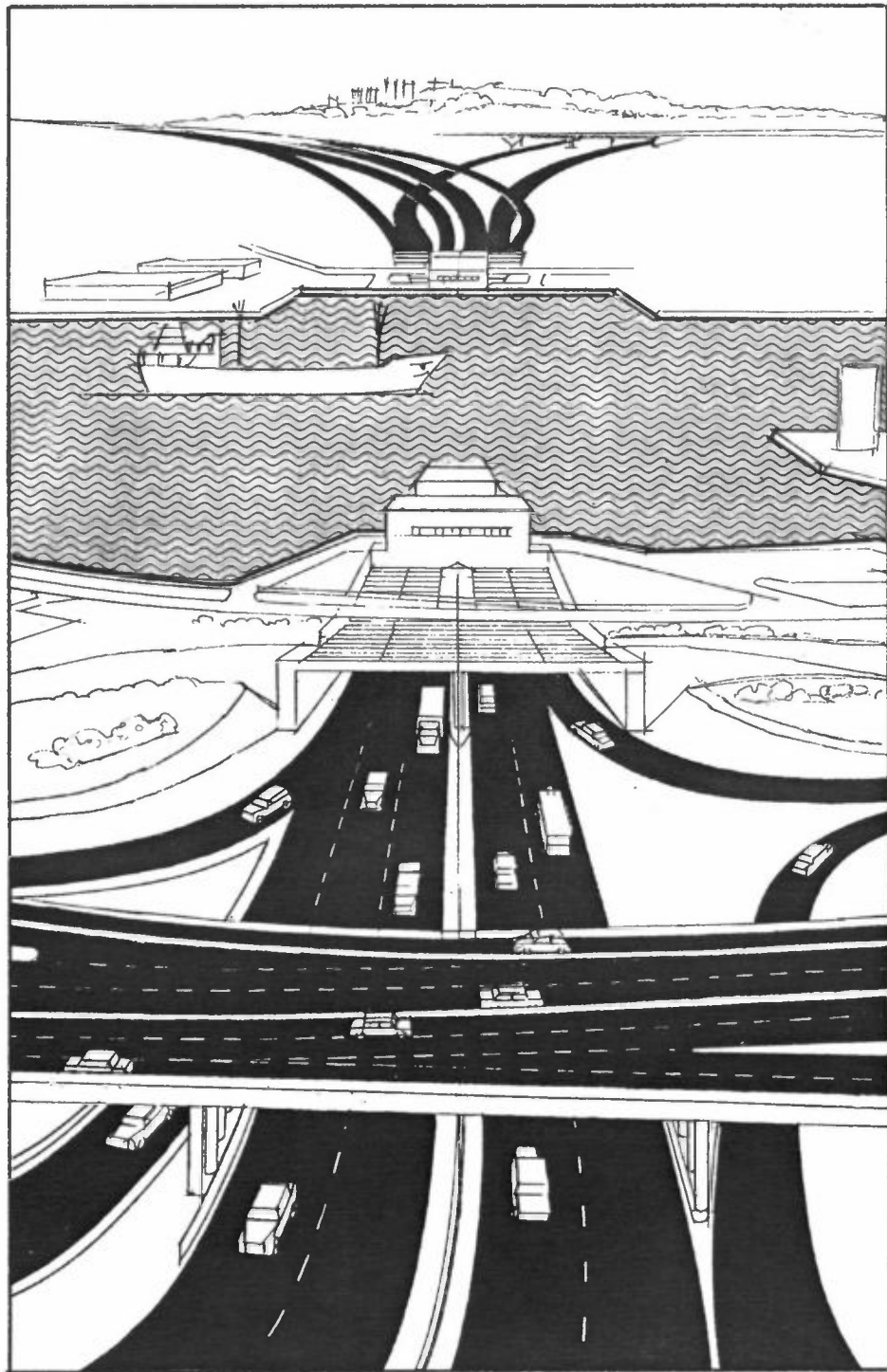
	Side
FORORD	3
SAMMENDRAG	7
1 INNLEDNING	9
2 MÅLEOPPLEGG	9
2.1 Tingstadtunnelen	9
2.2 Sporstoff, utslipp og prøvetaking	10
2.3 Meteorologiske målinger	13
3 MÅLEDATA	13
4 RESULTATER	15
5 SAMMENLIKNING MED ANDRE SPORSTOFFUNDERSØKELSER	18
5.1 Tap av sporstoff gjennom solskjermene	18
5.2 Resirkulasjon - Tap av sporstoff til motgående tunnelløp	18
5.3 Variasjon av maksimalkonsentrasjonen med avstanden fra tunnelåpningen	19
5.4 Vertikal utstrekning	21
5.5 Trafikk og strømningshastighet i tunnelen	21
5.6 Temperaturforhold	22
6 KONKLUSJON - SAMMENSTILLING MED BEREGNINGENE FORETATT VED GRUNNLINJEN	22
7 REFERANSER	23
VEDLEGG A: Konsentrasjonsmålinger - enkeltverdier ..	25
VEDLEGG B: Konsentrasjonsfordelinger figurene 4-13 .	29
VEDLEGG C: Trykktap og stempeltrykk i vegtunnelen ..	41

SAMMENDRAG

Sporstoff ble sluppet i en 450 m lang veitunnel (Tingstad-tunnelen i Gøteborg). Formålet var å undersøke spredningen av luftforurensninger utenfor en tunnelåpning.

Forsøkene viste at konsentrasjonen av sporstoff avtok nær eksponensielt med avstanden fra åpningen, i god overensstemmelse både med japanske forsøk, og med beregninger NILU har utført ved Grunnlinjen i Oslo. En betydelig mengde av utslippet, ca 50%, ble spredt gjennom solskjermer i taket ved tunnelåpningen. En langt mindre andel (ca 10%) ble resirkulert inn i motsatt tunnel-løp. Den relative konsentrasjonen, dvs. forholdet mellom konsentrasjonen i en avstand X og i selve tunnelåpningen, økte med luftutstrømningshastigheten fra tunnelen, og avtok med økende vindstyrke i lufta i omgivelsene. Den dominerende parameteren var imidlertid utstrømningshastigheten. Luftutstrømningen skaper større turbulens rett utenfor åpningen enn den generelle atmosfæriske turbulensen i området.

Luftstrømningshastigheten fra tunnelen ble målt til ca 6 m/s i middel under forsøkene. Dette stemmer godt med beregninger ut fra trafikk-tetthet og kjørehastighet i tunnelen. Det generelle vindfeltet i omgivelsene hadde liten eller ingen innvirkning på utluftningen av tunnelen.



Figur 1: Tingstadtunnelen sett mot nord (Gatukontoret, Gøteborg).

SPREDNING AV SPORSTOFF FRA
TINGSTADTUNNELEN, GØTEBORG

1 INNLEDNING

Norsk institutt for luftforskning (NILU) gjennomførte 23 - 28. september 1979 spredningsundersøkelser ved Tingstad-tunnelen i Gøteborg, etter oppdrag av Oslo veivesen. Formålet var å undersøke spredningen av luftforurensninger som kommer ut av en tunnelåpning, samt å etterprøve tidligere antagelser NILU har gjort om spredning av forurensende stoffer ved den planlagte grunnlinje (tunnel) i Oslo (1).

Forsøk i japanske tunneler med utslipp av sporstoff (2) tyder på eksponensiell reduksjon av konsentrasjonen med avstanden og at utstrømmingshastigheten er den viktigste parameter. Vindhastighet og temperaturforskjellen tunnelluft/uteluft er også av betydning. Franske modellforsøk (3) og utslipp av sporstoff i Bryntunnelen i Oslo (4) viser at en ikke ubetydelig del av utslippet kan resirkuleres inn i motgående tunnelløp. Forsøkene i Bryntunnelen viste videre at en ennå større andel kan gå ut gjennom sol-skjermer i taket ved tunnelåpningen.

Det ble i Tingstadtunnelen valgt å slippe sporstoff i sørgående løp. En plasserte prøvetakere i og utenfor utløpet og også i motgående tunnelløp.

2 MÅLEOPPLEGG

2.1 Tingstadtunnelen

Den 450 m lange Tingstadtunnelen går under Gøtaelven. Det er adskilte løp for de to retninger av trafikken. Beliggenhet og

dimensjoner fremgår av figurene 1, 2 og 3. Spesielt vil en påpeke solskjermene over tunnelåpningene. De består av et flettverk av tynne plater som danner en sammenhengende flate av rektangulære, loddrette åpninger. Virkningen på luftstrømmen under var vanskelig å vurdere. Slipp av såpebobler viste imidlertid ingen dominerende vertikal luftstrøm, men en turbulent utveksling av luft.

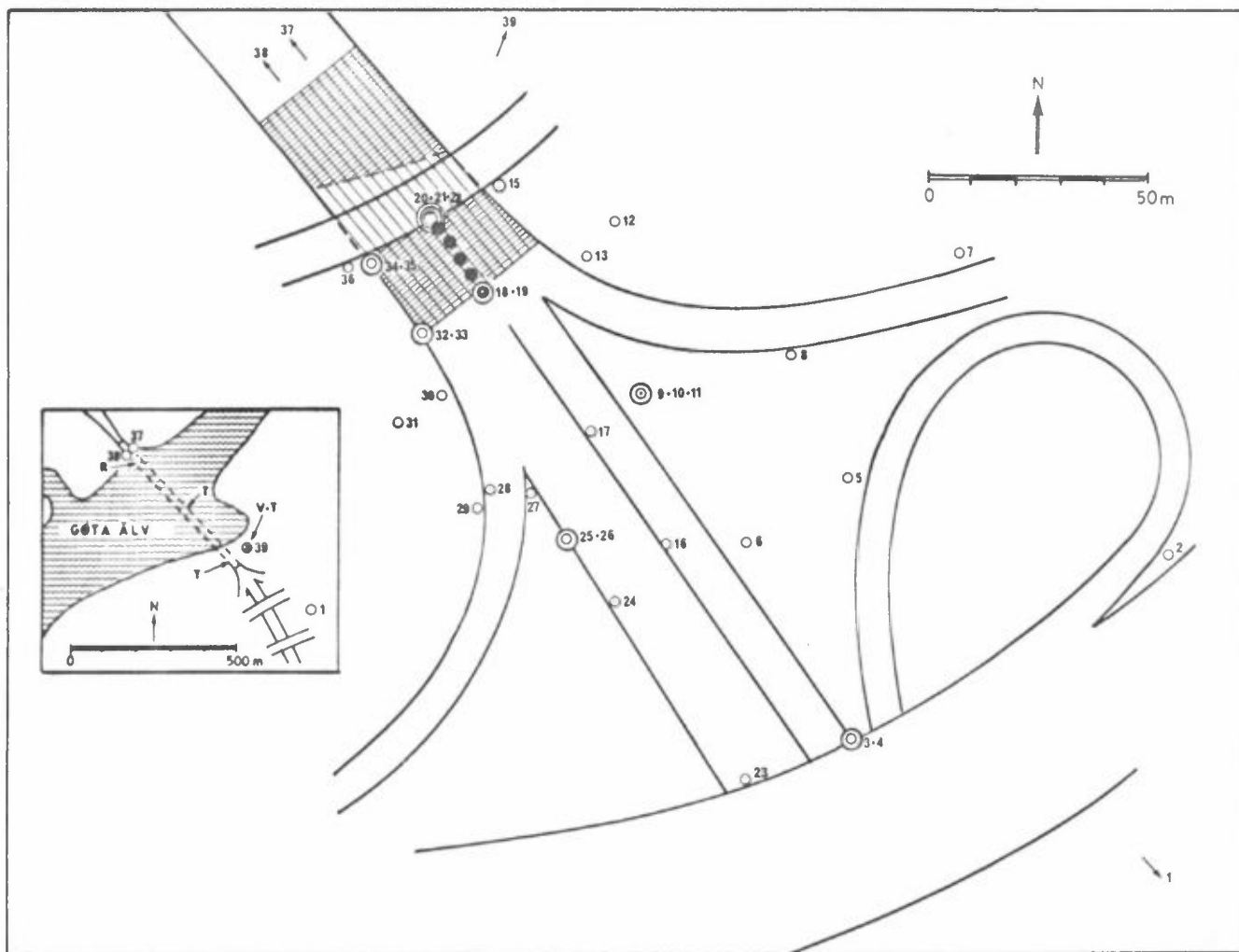
Ved normal trafikk er tunnelen selv-ventilerende. Kulloksyd-målere og/eller siktmåler setter automatisk igang mekanisk ventilasjon ved overskridelse av grenseverdier. Dette skjedde under to av de ti forsøkene. Vifter førte da luft inn i en langsgående servicegang. Herfra ble den presset ut i tunnellopene (4).

Området utenfor søndre tunnelåpning ble valgt som forsøksfelt. Det er lett tilgjengelig og relativt åpent. Det ligger dessuten rett utenfor kontrollhuset. Dette lettet i sterk grad det praktiske opplegget. Tunnelåpningen ligger noe forsenket i terrenget, med markerte skråninger tett ved. Terrenget stiger også litt sørover. Utenfor veidekket er marken gressdekket. Det er ingen markerte hindringer for luftstrømmen, bortsett fra broen og noen busker på skråningen ved tunnelåpningen.

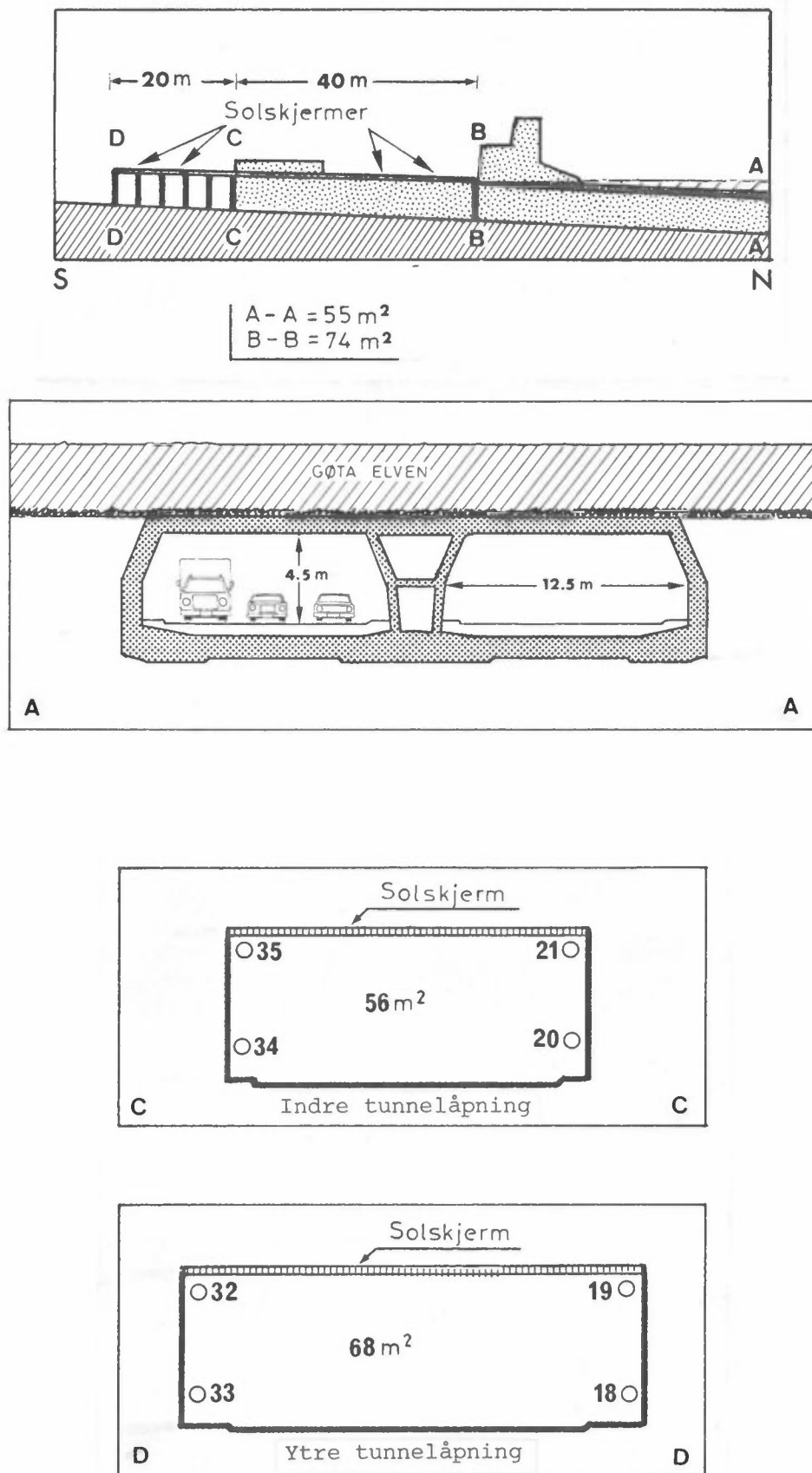
2.2 Sporstoff, utslipp og prøvetaking

Svovelhexafluorid (SF_6) er en luktfri, ufarlig og inert gass. En meget stor fordel er den meget lave deteksjonsgrense. I praksis kan en måle konsentrasjoner ned til 10^{-11} . Usikkerheten er anslått til under $\pm 5\%$ (5).

Luftprøver ble tatt i tunnelåpningen, i området utenfor og også i begge tunnellop nord for utslippet.



Figur 2: Plassering av prøvetakerne.
Hvor flere høyder angir første tall prøvepunktet i laveste høyde.
R - utslippspunkt
V - vindmåling
T - temperaturmåling



Figur 3: Snitt av Tingstادتunnelen (Gatukontoret, Gøteborg).
Prøvetakere i indre og ytre tunnelåpning.

Mellom "indre" og "ytre" tunnelåpning er de to løpene bare adskilt av søyler. Det er vanskelig å bedømme luftutvekslingen som oppstår. Prøvetakerne ble derfor plassert i hjørnene av både "indre" og "ytre" tunnelåpning. Plasseringen av prøvetakerne er vist i figurene 2 og 3.

På et par av målestedene ble prøvetakere plassert i forskjellige høyder over bakken. For øvrig var standard høyde 1.5 m. Prøvetaking startet 5 min etter utslippet og varte 15 min. Utslippet varte i 25-30 min. Utslippsmengden var konstant = $3 \cdot 10^{-6}$ m³/s, med unntak av forsøk nr 1 = $2 \cdot 10^{-6}$ m³/s.

2.3 Meteorologiske målinger

Luftstrømmen ved utslippet inne i tunnelen og ved "indre" og "ytre" tunnelåpning ble målt med håndvindmålere (1-minuttsmålinger).

Det ytre generelle vindfelt ble registrert av en vindmåler (type Woelfle), plassert 5 m over bakken på et åpent felt utenfor kontrollbygningen. Her ble også lufttemperaturen (2 m over bakken) registrert.

Temperatur i 0.5 m høyde ble videre registrert på det laveste punktet i tunnelen og ved indre tunnelåpning.

3 MÅLEDATA

Tabell 1 viser trafikk, vind, temperatur og luftstrømdata. Enkeltkonsentrasjonene er gitt i Vedlegg A. Figurene 4-13, Vedlegg B, viser observerte konsentrasjonsfordelinger.

Tabell 1: Forsøksdata, Tingstادتunnelen, september 1979.
 Utslipp: Varighet 25-30 min, start 5 min før
 15 min prøvetaking. Mengde = $3 \cdot 10^{-6}$ m³/s
 (forsøk 1: $2 \cdot 10^{-6}$ m³/s).

DATO	FORSØK									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	25.9	25.9	25.9	26.9	26.9	26.9	26.9	27.9	27.9	27.9
<u>Start</u>										
prøvetaking (15 min)	1030	1300	1530	0800	1410	1615	2120	0935	1115	1500
<u>Biler/min</u>										
mot S	38 ¹	41	60	60	40	79	17	16 ²	37	60
mot N	41	41	65	65	47	73	26	23	38	51
<u>Vind(5m)</u>										
Retn.grader	240	260	190	190	230	240	170	250	250	270
hast m/s	2.8	3.2	3.3	5.7	4.1	3.6	1.5	5.1	6.5	6.5
<u>Temp</u>										
Tunnel midten	11.5	12.3	12.9	12.9	15.0	14.9	13.0	13.5	13.8	13.5
Tunnelåpning	12.9	13.5	14.0	13.0	15.5	16.3	14.0	14.7	15.0	15.2
Ute(2 m)	12.1	12.2	12.3	12.6	14.9	13.9	12.9	13.9	13.2	15.0
<u>Luftstrøm m/s</u> <u>nær utslipp</u>										
mot S	5.3	6.9	5.6	5.6	5.7	6.5	3.7	5.9	6.0	5.8
mot N	5.1	6.5	6.0	6.4	5.8	4.9	4.2	5.8	5.5	5.9
<u>Indre snitt</u>										
mot S	3.0	5.3	3.8	4.7	5.2	3.6	3.9	4.5	3.3	3.7
mot N	1.7	3.2	2.3	3.5	2.3	2.6	1.8	2.8	2.7	2.6
<u>Ytre snitt</u>										
mot S	1.9	4.3	2.7	3.4	5.3	1.8	2.4	2.1	3.5	3.3

1) redusert hastighet (50 km/t) - vifter igang

2) redusert hastighet (50 km/t) - vifter igang

4 RESULTATER

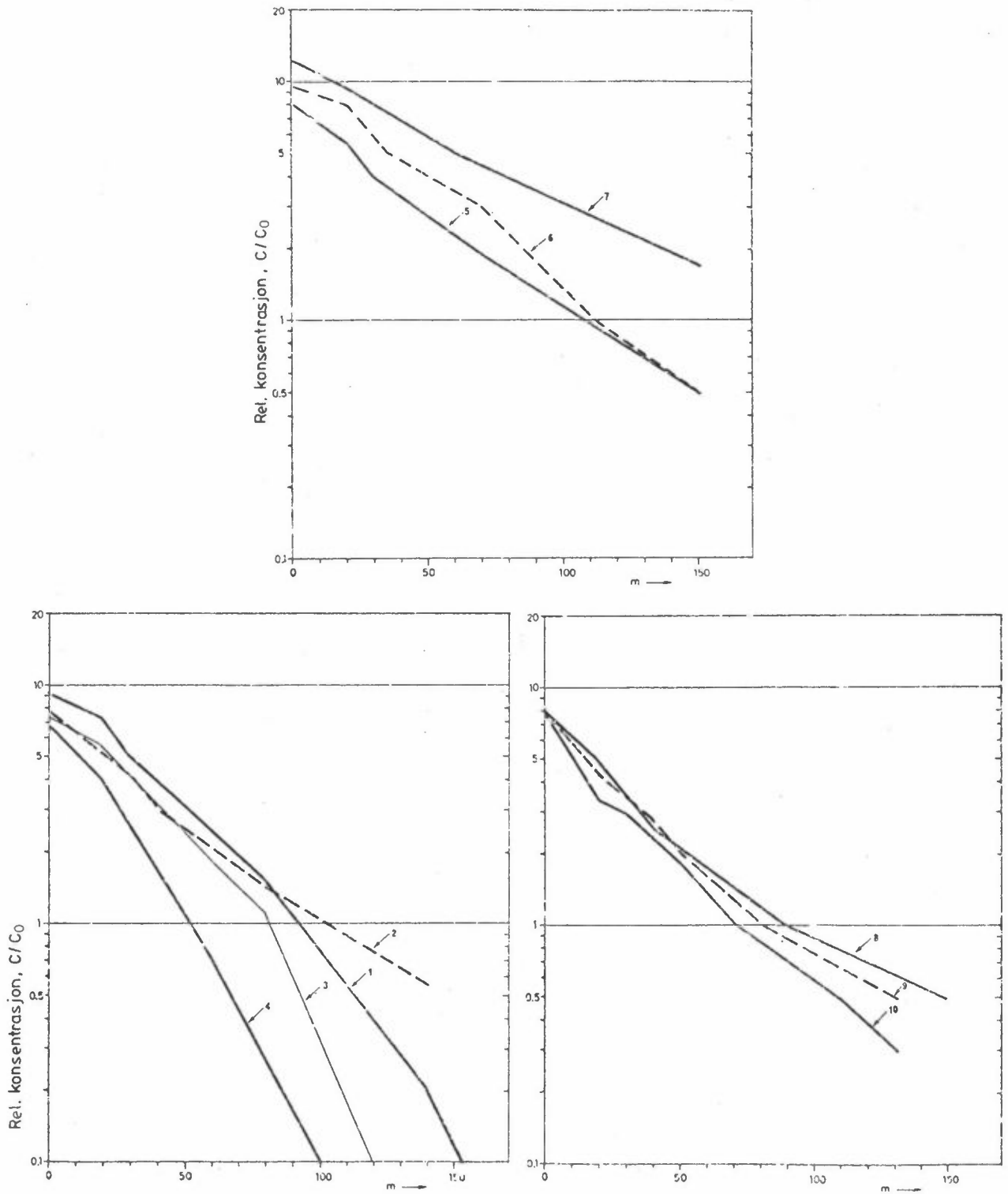
Skyen av sporstoff forlater tunnelåpningen med en relativt stor utstrømmingshastighet. Fortynningen skjer i første omgang vesentlig ved indusert turbulens. Etterhvert som utstrømmingshastigheten avtar, skyldes den videre uttynning atmosfæreturbulensen.

Figur 4-13, vedlegg B, viser tydelig hvordan skyaksen dreies av vinden, men også hvordan skyen trekkes med av luftdraget fra trafikken. Dette vist spesielt tydelig under forsøk 7, figur 10. I den lavestliggende del av forsøksområdet, utenfor tunnelåpningen, var det da vesentlig hvirvler fra trafikken som bestemte luftbevegelsene, selv om det var en registrert motvind på 1.5 m/s.

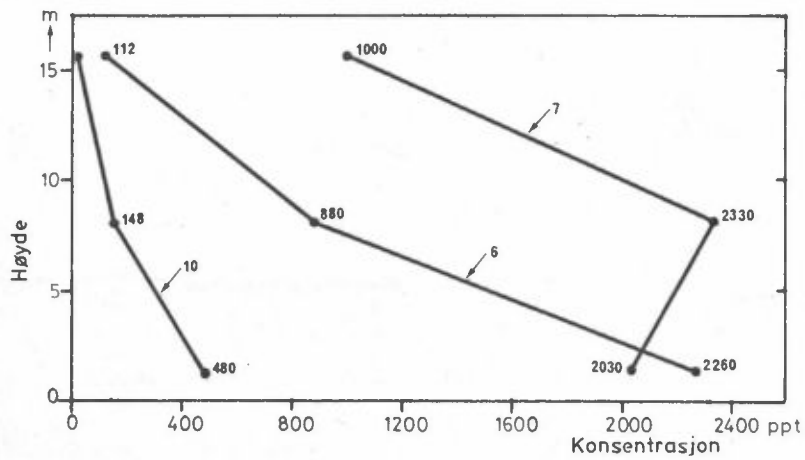
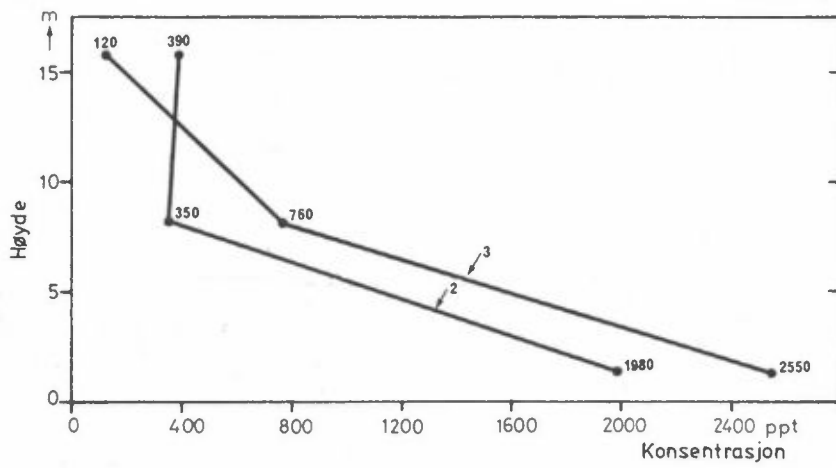
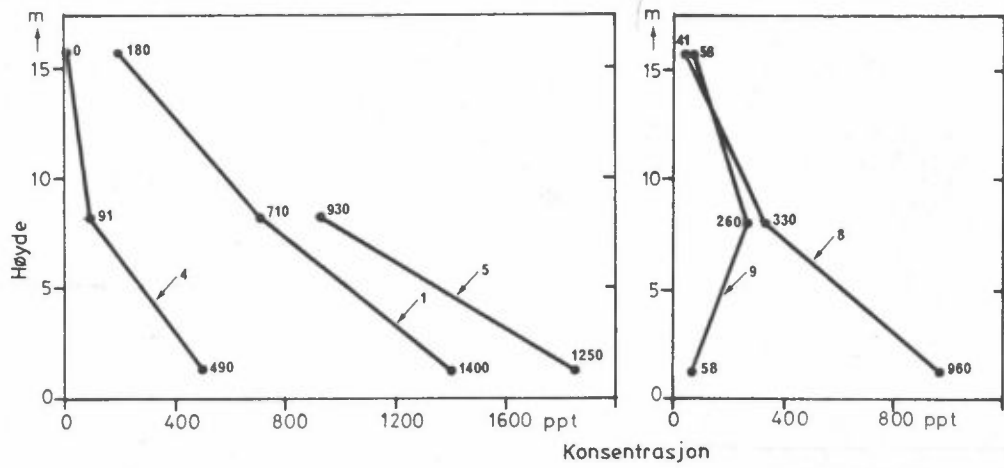
Avtagningen av maksimalkonsentrasjonen, C , med avstanden fra tunnelåpningen er vist i figur 14. I det log/lineære diagram er den nær rettlinjert. Dette understøtter den japanske antakelsen om eksponensiell avtagning (2).

$$C = C_0 \exp(-kx) \quad (1)$$

hvor C_0 er konsentrasjonen i tunnelåpningen (her indre), x avstanden og k en konstant. At dette også gjelder mellom indre og ytre tunnelåpning kan forklares, dels ved utvidelsen av tunneltverrsnittet, dels ved at skilleveggen mellom de to løp her er borte, og at det skjer en blanding med luft i motgående tunnelløp. Figur 15 viser et vertikalsnitt, referert til målepunktene 9, 10 og 11 i henholdsvis 1.5 m, 8.2 m og 15.8 m over bakken.



Figur 14: Maksimum bakkekonsentrasjoner som funksjon av avstand fra indre tunnelåpning.



Figur 15: Konsentrasjonsfordeling i mast (målepunktene 8, 9 og 10).

5 SAMMENLIKNING MED ANDRE SPORSTOFFUNDERSØKELSER

5.1 Tap av sporstoff gjennom solskjermene

I Bryntunnelen anslo Lamb (5) et tap på 20%-60% gjennom en solskjerm i taket nær tunnelåpningen. Tilsvarende estimat ved Tingstadttunnelen avhenger av hvor godt en kan anslå den midlere strømningshastighet og den midlere konsentrasjon i åpnings-tverrsnittet.

Fra middelkonsentrasjonen i det indre tverrsnitt beregnes fluksen. Sammenholdes denne med utslippet, får vi et tap gjennom indre solskjermtak på i middel 35%. Totalt tap ved ytre tverrsnitt blir i middel 65%. Trolig suges noe av utslippet inn i hvirvler bak bilene og føres med uten å fordeles jevnt over hele tunnel-tverrsnittet. I så fall er den estimerte middelkonsentrasjon for lav, og beregnet tap gjennom solskjermen blir for høyt. De relativt lave konsentrasjoner målt i le av solskjermene utenfor tunnelen kan tyde på dette.

Under de tre siste forsøkene ble det målt vertikale konsentrasjonsgradienter gjennom det ytre solskjermtaket. I middel avtok konsentrasjonen til 1/10 over en vertikal avstand på 1 m. Med en antatt turbulent diffusjonskoeffisient, $K \approx 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, blir totalfluksen gjennom ytre solskjermtak 10% av utslippet. $K = 2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ gir 20% tap. Tar en med tapet gjennom indre kan det samlede tap gjennom solskjermene anslås til mellom 20% og 60% også i Tingstadttunnelen.

5.2 Resirkulasjon - Tap av sporstoff til motgående tunnellop

Lamb (5) fant i Bryntunnelen at 0.4% til 12% ble resirkulert inn i motgående tunnellop. Franske modellforsøk (3) viser en resirkulasjon på opptil 30%-50% av utslippet under spesielle vindforhold (tverrvind). For en tilsvarende avstand mellom tunnellopene som i Tingstadttunnelen fant de ved svak vind en resirkulasjon på 10%-30%. I Tingstadttunnelen var den i middel 10%. Estimat for hvert forsøk er gitt i tabell 2.

Tabell 2: Beregnete resirkulasjoner for hvert enkelt forsøk.
Q : utslippsrate, *Q*₁ : fluks nordover,
*Q*₂: resirkulert fluks sydover.

FORSØK											
Resirkulasjon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Middel
<i>Q</i> ₁ / <i>Q</i> %	6	10	10	12	1	9	16	14	10	14	10
<i>Q</i> ₂ / <i>Q</i> %	0.2	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2	0.6	0.2	0.3	0.3	0.3

Som en ser overføres bare ubetydelige mengder stoff fra nordgående til sørgående tunnellop. Dette skyldes nok til en viss grad en gjennomgående vestlig vindretning. Men selv ved svak vind, forsøk 7, var ikke den totale resirkulasjon større enn 0.6%.

5.3 Variasjon av maksimalkonsentrasjonen med avstanden fra tunnelåpningen.

De japanske forsøkene (2) indikerer, som vist i ligning (1), en eksponensiell avtagning av maksimalkonsentrasjonen med avstanden. Som en første tilnærming sette de

$$k = k_I = \frac{8.79}{\sqrt{A_T} V_T^{2.6}} \quad (3)$$

hvor *A*_T = tunnelverrsnittet. *V*_T = luftstrømmens hastighet i tunnelen.

Ved multipel korrelasjonsanalyse (*r* = 0.90) finner de

$$k = k_{II} = \frac{3.48}{V_T^{1.95} \sqrt{A_T}} \cdot \exp(0.116\Delta T - 0.203 \frac{V_T}{U} + 0.313 \sin \theta) \quad (3)$$

Midlere strømningsforhold i Tingstad-tunnelen og i de japanske tunneler var meget like. Dette fremgår av tabell 3.

Det er en fordel ved direkte sammenlikning, men gjør det vanskelig å generalisere.

Tabell 3: Midlere strømningsparametre (standardavvik i parentes)

	Tingstad	Japan
Middel lufthast. (V_T) - m/s	5.7 (0.8)	5.8 (1.8)
Middel vindhast. (U) - m/s	4.2 (1.6)	4.0 (2.8)
Temp. diff. (tunnel - ute) - °C	1.1 (0.7)	1.8 (1.3)
Vinkel : vind/tunnel - grader	95 (40)	100 (69)

Tabell 4 viser verdier av k_I og k_{II} i Tingstad-tunnelen.

Tabell 4: Reduksjoner i maksimumskonsentrasjonen, C med avstanden, x, uttrykt ved $k = x \cdot \ln C_0 / C$ (10^{-2} m^{-1}).

	FORSØK									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tingstad	2.6	2.0	2.5	3.9	2.0	2.1	1.3	2.3	2.6	3.0
Japan k_I	1.5	0.7	1.3	1.3	1.3	0.9	3.9	1.2	1.1	1.2
Japan k_{II}	1.9	1.2	1.9	2.2	1.8	1.6	1.5	2.2	2.2	1.8

Bruk av k_{II} , ligning (3), gir bedre tilnærming til observerte verdier enn k_I , også i Tingstad-tunnelen. Men begge sett av verdier er lavere enn de observerte. At overensstemmelsen må betegnes som god, kommer kanskje bedre frem i tabell 5. Den viser avstand fra tunnelåpningen til hvor konsentrasjonen er falt til 1/10.

Tabell 5: Avstand fra tunnelåpning til $C/C_0 = 0.1$

Middelverdi	Avstand
$k_I = 2.4$	158 m
$k_{II} = 1.3$	120 m
$k_{obs} = 1.7$	95 m

Japanerne har også modifisert ligningene ved å innføre x^m istedenfor x . Verdien av eksponenten m varierer med hastigheten V_T . Den blir imidlertid meget nær 1. Det er vanskelig å bestemme verdien av m i Tingstad tunnelen, men krummingen på kurvene i figur 15 tyder på verdier såvel større som mindre enn 1.

5.4 Vertikal utstrekning

Figur 15 viser vertikale konsentrasjonsfordelinger. For alle forsøk untatt 7 og 9 var skyaksen nær masten. I spredningsstudier lar en ofte konsentrasjonsverdien $1/10$ av maksimum betegne øvre grense (høyden) av skyen. Det gir en midlere høyde på 16 m i 45 m avstand. Det er 11.5 m høyere enn tunnelåpningen. Antar vi at den vertikale fordeling er Gaussisk, gir dette standard avvik $\sigma_z = 5$ m. For ustabil og nær nøytral sjikting settes $\sigma_z = a \cdot x^{0.9}$. Her er $a = 0.17$. I følge Pasquill (6) svarer dette til instabil sjikting og meget ujevnt terreng. Dette kan synes rimelig for turbulent vertikal utveksling over og nær trafikk.

5.5 Trafikk og strømningshastighet i tunnelen.

Vegnormal for geometriske utforminger (7), utgitt av Statens Vegvesen, gir en formel for sammenhengen mellom strømningshastighet, V_T , og trykktapet gjennom tunnelen. Videre gir den sammenhengen mellom stempeleffekten fra bilene, trafikktetthet, bilhastighet, V , og den naturlige lufthastighet forårsaket av ytre vindforhold. Se vedlegg C.

Tabell 1 viser liten eller ingen lufthastighetsforskjell mellom de to tunnellop under samme trafikkbelastning. Den naturlige lufthastighet neglisjeres (<0.5 m/s). Det gir

$$V_T = \text{konst.} \cdot \sqrt{N} \cdot v$$

hvor N = antall biler i tunnelen.

Den gitte geometri, 80% personbiler og 20% lastebiler gir en midlere strømningshastighet i sørgående løp på 8.3 m/s. Den observerte var 5.7 m/s. Den beregnede verdi synes noe høy, men stemmer godt overens med fluksberegninger. Videre er det mulig at hastighetsmålingene nær veggen gir noe for lave verdier av middelhastigheten i tverrsnittet.

5.6 Temperaturforhold

Vanntemperaturen rundt tunnelen varierer lite og kan settes til ca 6°C . Med en lufttemperatur mellom 11 grader og 15 grader kunne en vente avkjøling av luften som strømmer inn. Dette skjer i meget liten utstrekning. Bare under forsøkene 1 og 8 var temperaturen midt i tunnelen lavere enn utenfor. Gjennomstrømningshastigheten blir for stor til store temperaturendringer. Det som observeres er en netto temperaturstigning ved åpningen på i middel vel én grad. Denne må tilskrives avgitt varme fra trafikken.

6 KONKLUSJON - SAMMENLIKNING MED BEREGNINGENE FORETATT VED GRUNNLINJEN.

Grønskei (1) har konsentrert sine beregninger til forurensningsforhold under svak vind. Ved vindstyrke på ca 1 m/s, finner han 1/10 konsentrasjon i en avstand på 80 m under gode blandingsforhold, ca 120 m under dårlige. Forsøk 7, med vindstyrke under 1.5 m/s og stabil luft gir ca 130 m. Overensstemmelsen i avstand må sies å være meget bra, når en tar i betraktning forventede variasjoner i såvel måle- som beregningsresultater.

- (6) Pasquill, F. Atmospheric diffusion.
London, Halsted Press, 1974, s 375.
- (7) Statens Vegvesen Vegnormalen. Geometriske utforminger.
Oslo 1977. Kapittel XIII, avsnitt 3.

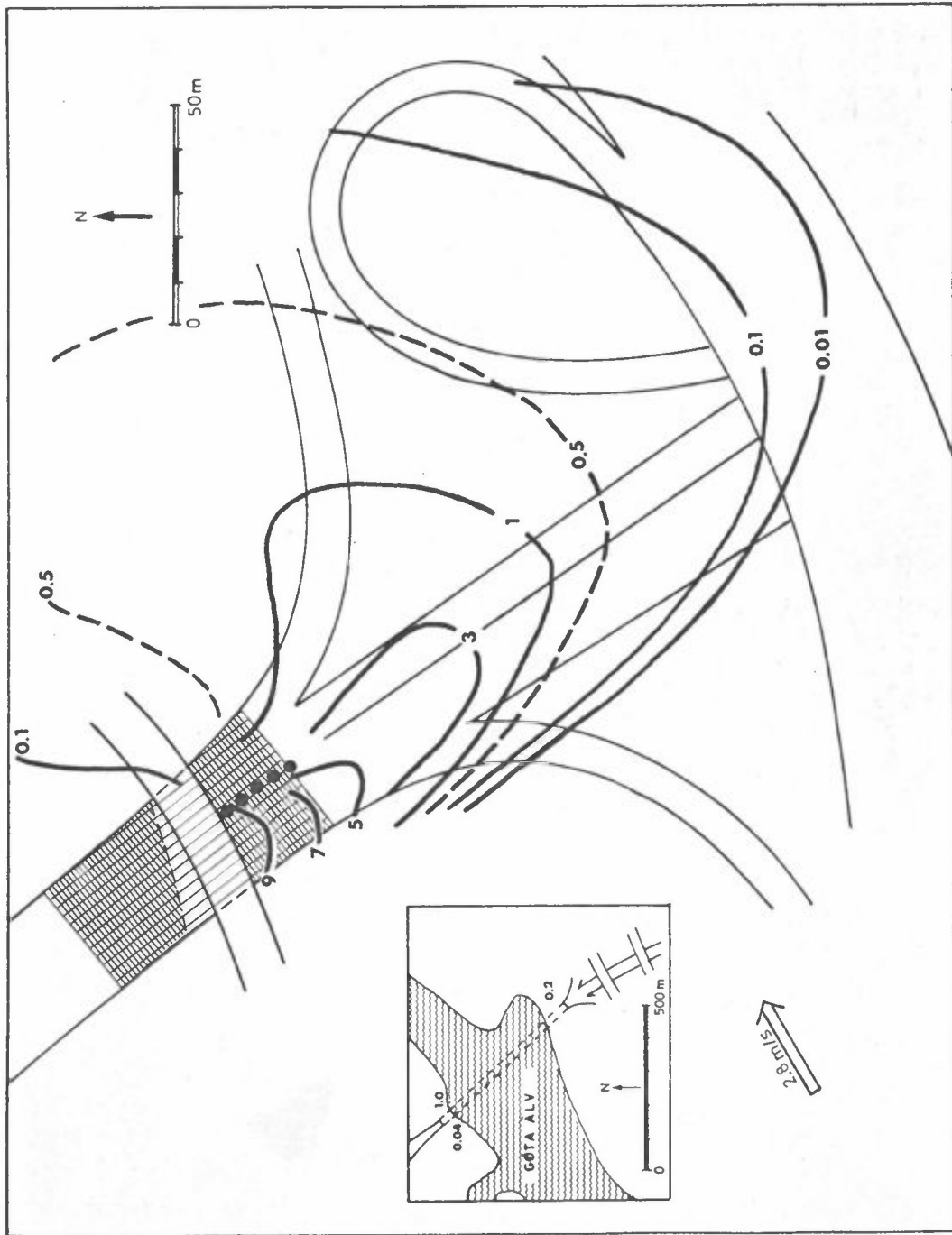
VEDLEGG A
KONSENTRASJONSMÅLINGER -
ENKELTVERDIER

Prøvetaker nr.	FORSØK NR									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	-	-	-	0	0	0	-
2	0	52	0	-	0	0	0	0	7	15
3	10	55	2	-	-	-	165	0	0	0
4	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0
5	-	-	-	0	165	168	46	68	58	25
6	250	565	100	15	170	220	-	-	58	30
7	340	380	2	5	500	510	10	365	400	265
8	640	780	220	41	920	-	340	440	450	335
9	1400	1980	2550	490	1850	2260	2030	960	58	480
10	710	1350	760	91	930	880	2330	330	260	148
11	180	390	120	0	-	112	1000	41	58	15
12	500	390	960	830	640	910	-	660	620	620
13	730	620	1130	1130	830	1170	1350	975	860	920
14	1300	1400	2000	1810	1980	2400	2750	1830	1740	1750
15	110	56	700	880	175	230	1130	68	52	
16	700	1400	1100	-	660	1000	3600	-	138	63
17	2400	25	3050	1030	2900	3550	4150	-	1030	780
18	2400	4000	2600	2650	3550	3400	6200	-	2700	2600
19	2600	3620	3100	2850	2800	3500	6400	2050	2000	1980
20	6200	7800	7400	6900	8200	8700	1300	-	8000	7800
21	6200	7400	7150	5250	8200	8700	12350	8100	8400	7200
22	-	-	-	1320	-	-	-	-	-	-
23	0	-	0	-	-	-	20	-	-	-
24	-	-	-	10	10	-	-	0	-	-
25	-	-	-	-	-	10	-	-	12	0
26	30	20	7	0	18	-	930	0	-	-
27	350	640	520	52	530	265	440	10	74	47
28	10	82	58	10	-	0.2	-	-	0	10
29	0	7	10	0	0	0	425	0	1	0
30	1730	2400	2320	1400	2000	2450	6100	700	760	-
31		-		136	210	205	780	250	74	15
32	4800	5200	5450	4000	5600	8050	9500	4450	4300	2950
33	4200	4400	3900	2250	5000	-	8200	4750	5400	3250
34	5600	4800	5900	5750	6200	9700	10200	5900	-	4750
35	5500	5300	5800	5700	6000	9650	-	6200	5500	4350
36	-	-	-	15	0	-	-	-	-	-
37	660	800	910	1030	140	980	2030	1350	1000	1300
38	25	20	52	53	20	170	94	25	30	33
39	136	140	380	365	430	920	-	-	-	-

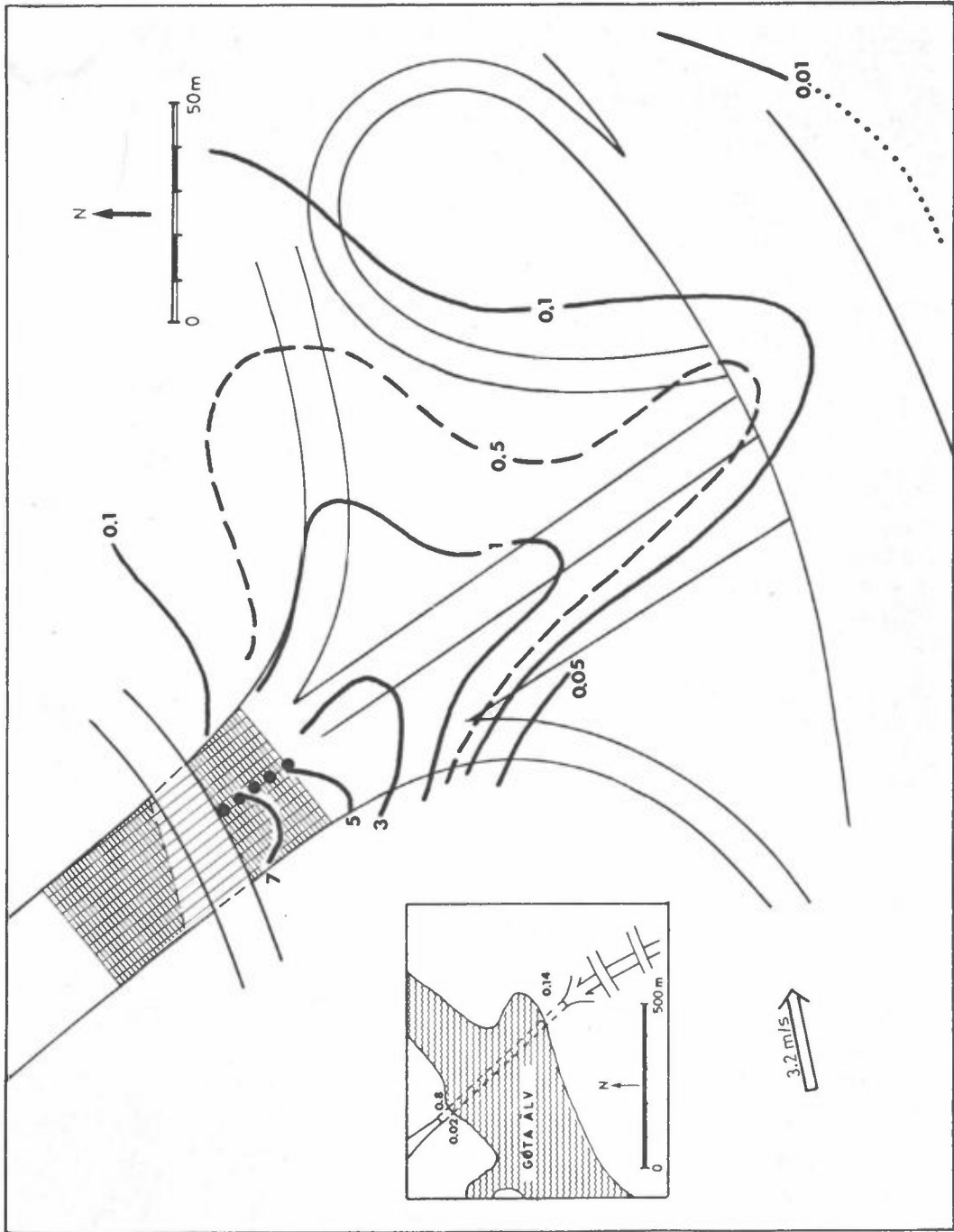
VEDLEGG B

KONSENTRASJONSFORDELINGER

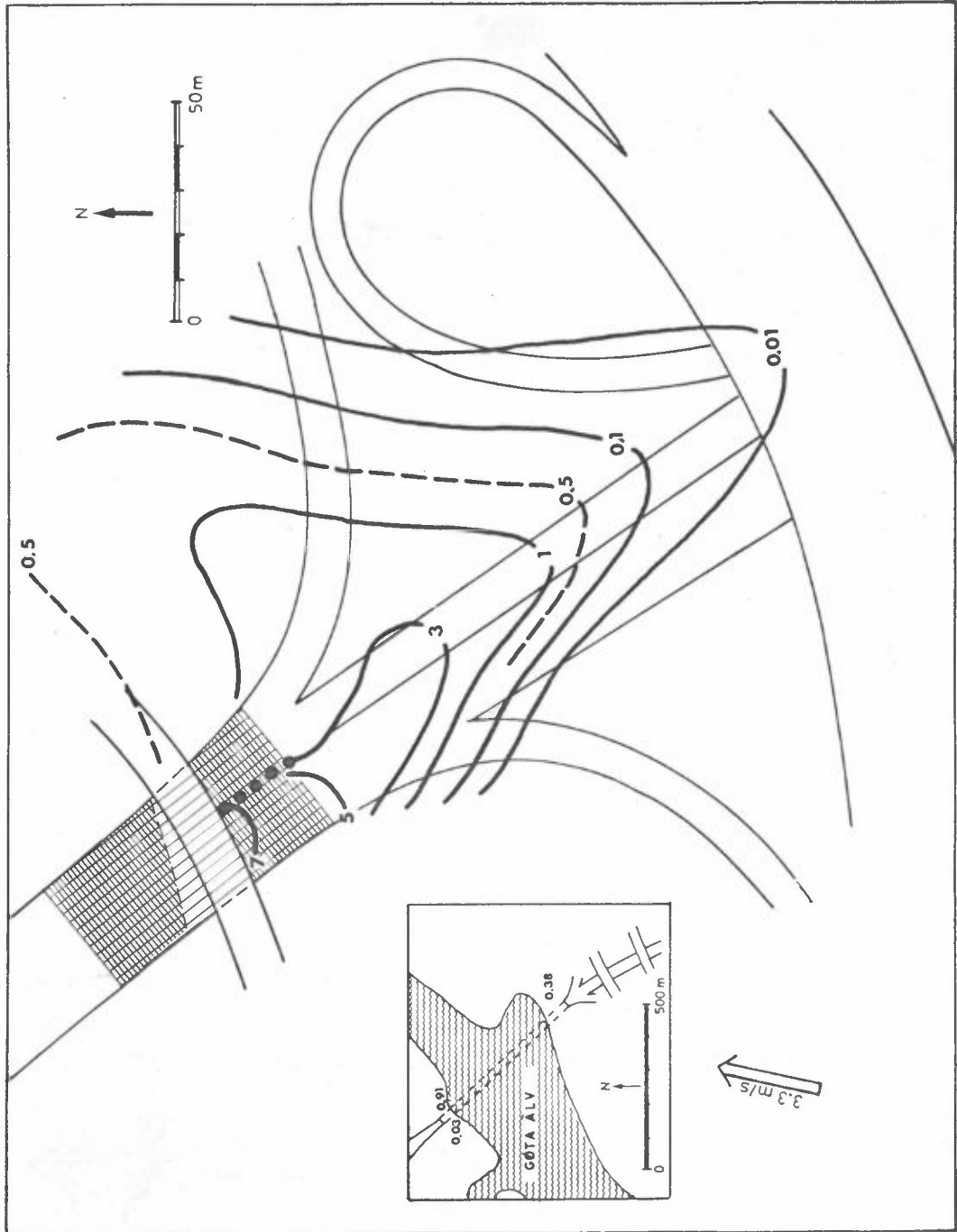
FIGURENE 4 - 13



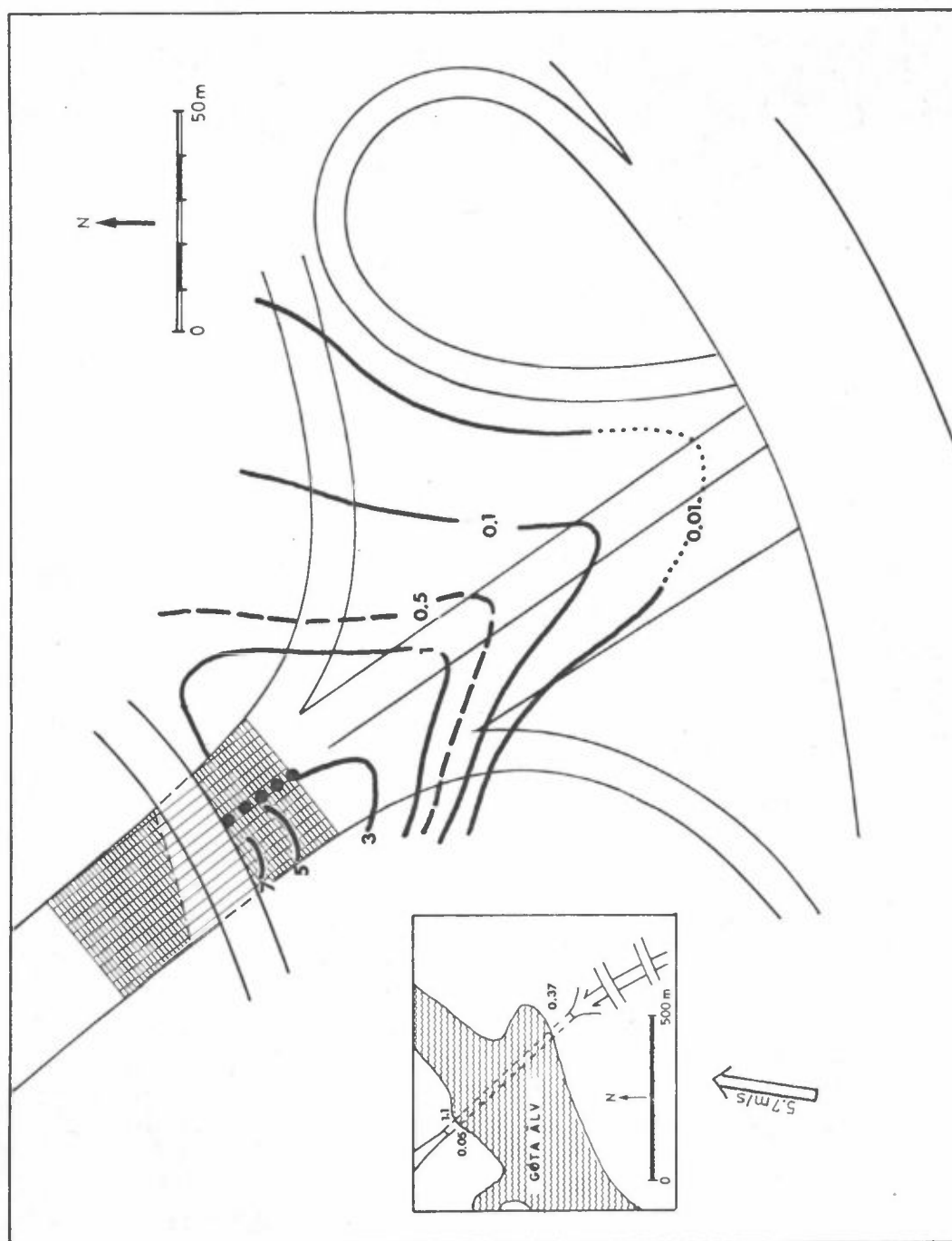
Figur 4: Forsøk 1 - 25 september 1979.



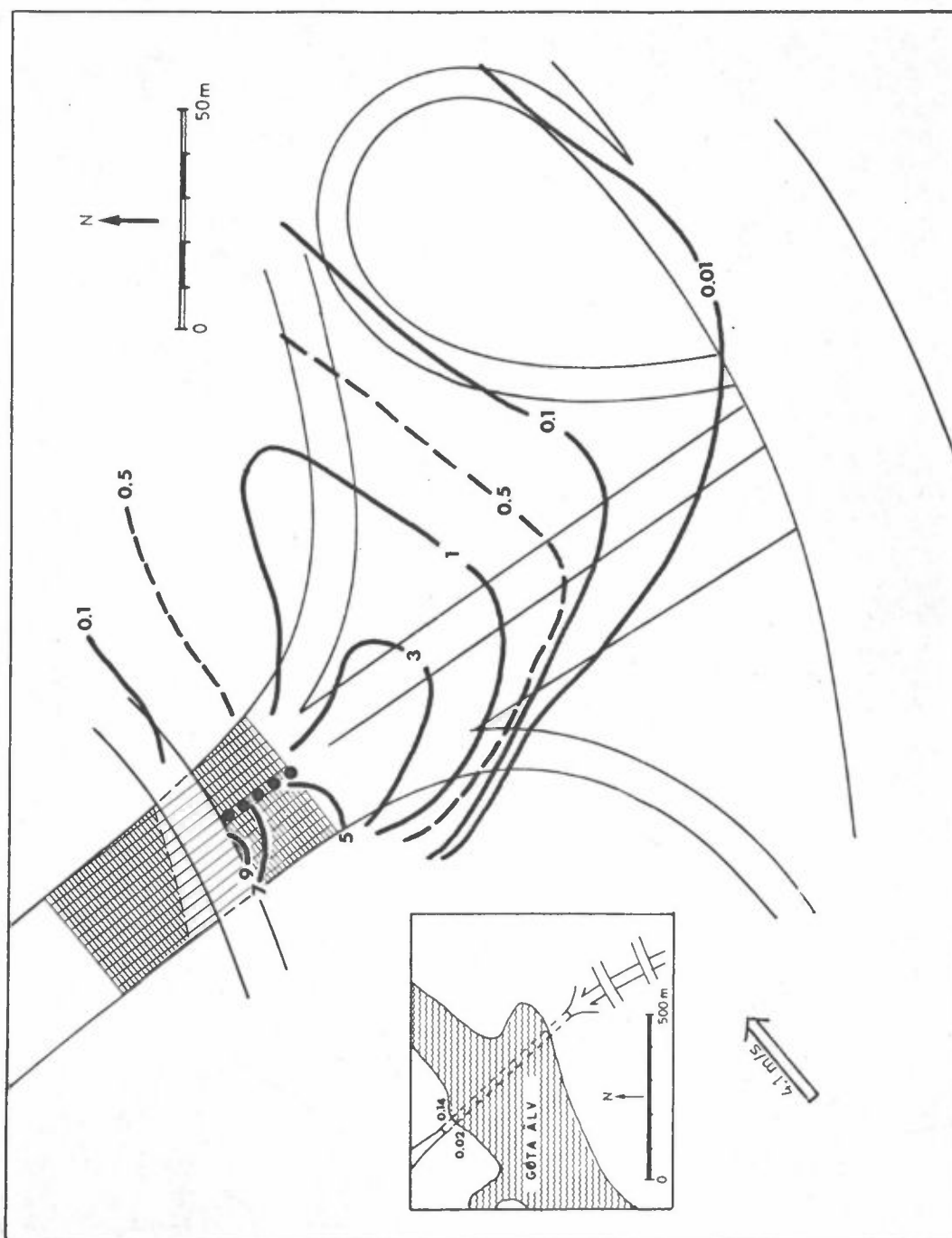
Figur 5: Forsøk 2 - 25 september 1979.



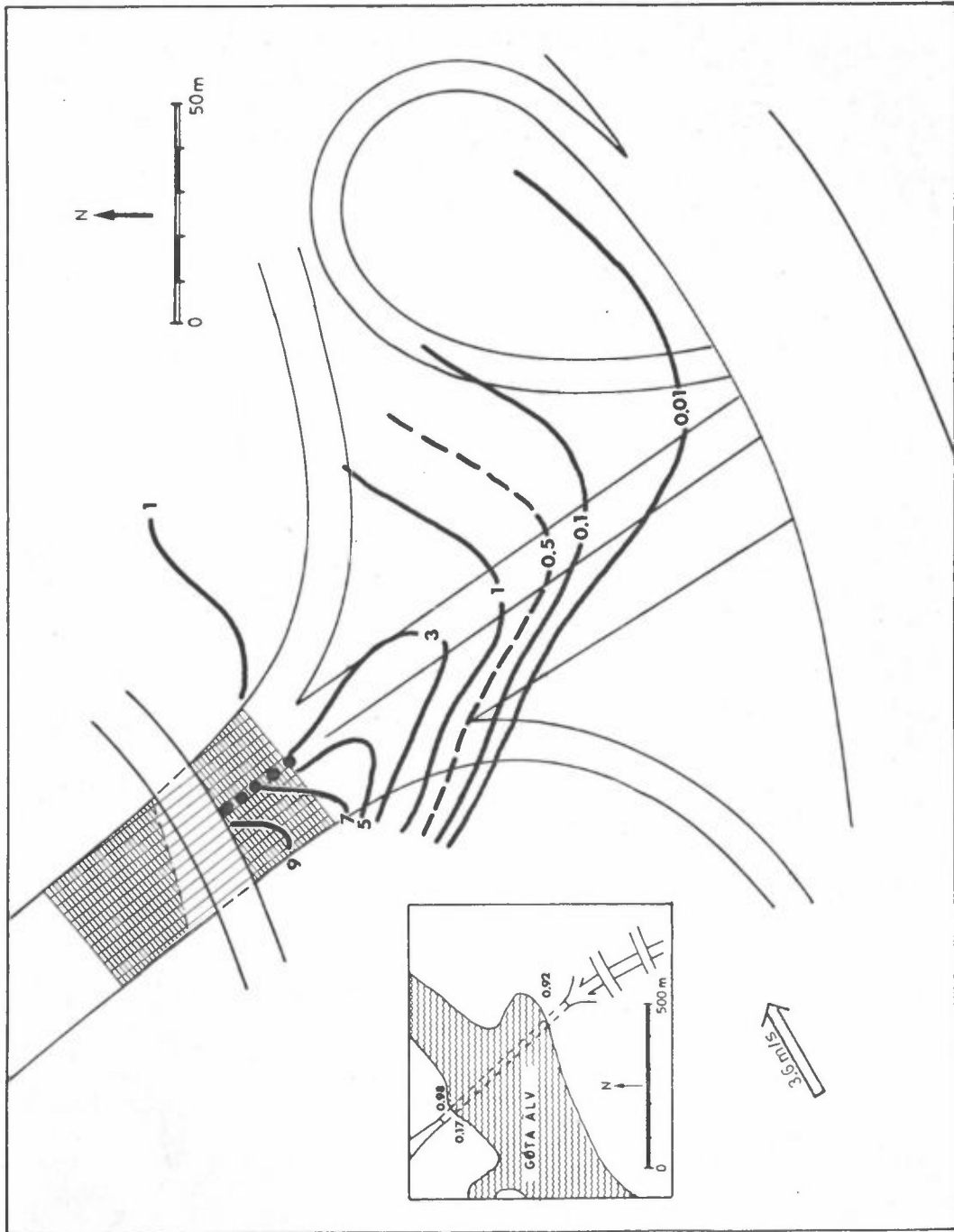
Figur 6: Forsøk 3 - 25 september 1979.



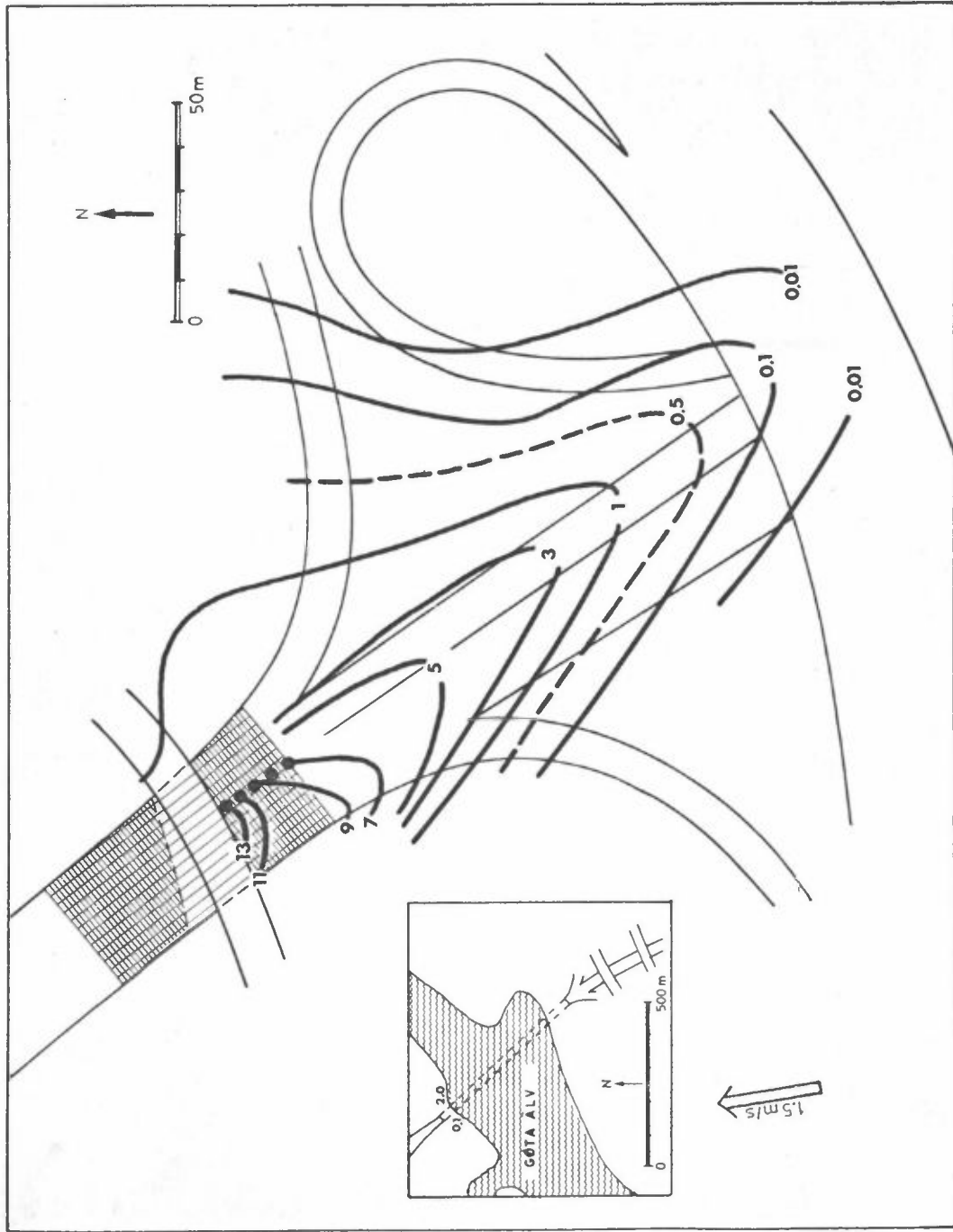
Figur 7: Forsøk 4 - 26 september 1979.



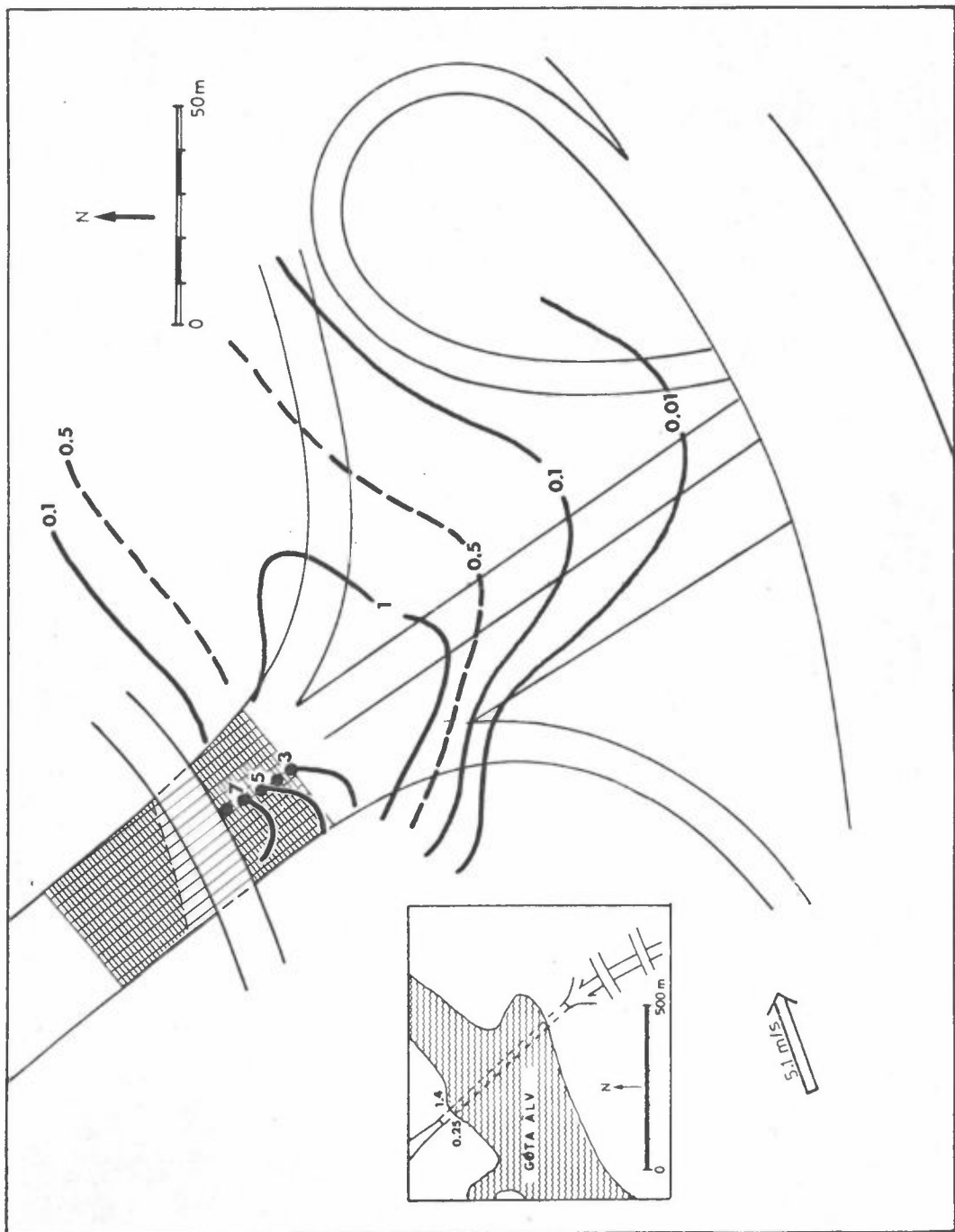
Figur 8: Forsøk 5 - 26 september 1979.



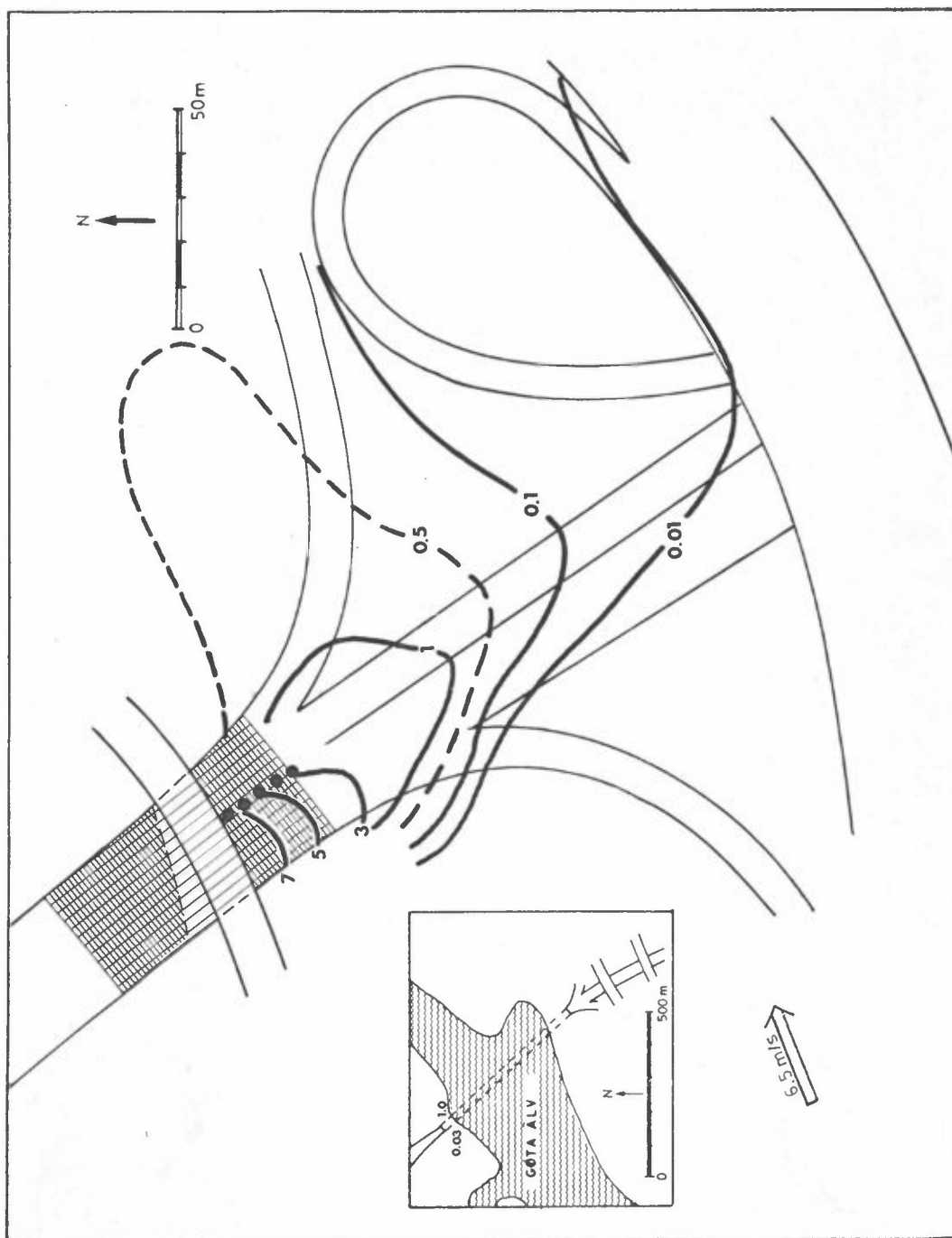
Figur 9: Forsøk 6 - 26 september 1979.



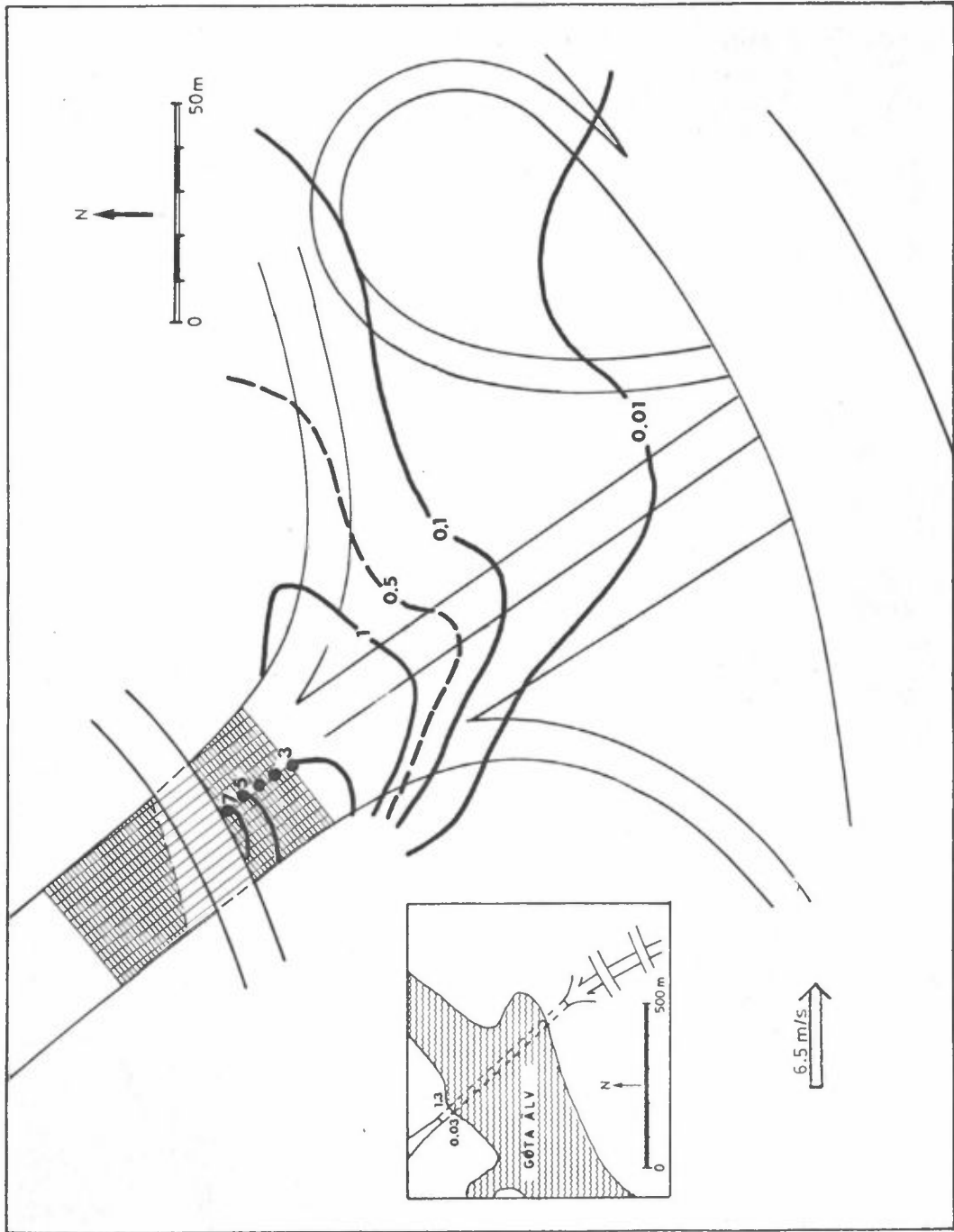
Figur 10: Forsøk 7 - 26 september 1979.



Figur 11: Forsøk 8 - 27 september 1979.



Figur 12: Forsøk 9 - 27 september 1979.



Figur 13: Forsøk 10 - 27 september 1979.

VEDLEGG C

TRYKKTAP OG STEMPELTRYKK
I VEGTUNNELER

Fra "geometrisk utforming", (kapittel XIII, avsnitt 3),
utgitt av Statens Vegvesen, gjengis følgende formler for
langslufting og stempeleffekt fra kjøretøyer.

LANGSLUFTING (forenklet formel)

$$\Delta p = \rho/2 (b_i + \lambda \frac{L}{D} + 1) V_T^2$$

Δp = trykktapet gjennom tunnelen, N/m³

ρ = luftens tetthet, kg/m³

b_i = koeffisient for innløpstag 0.5

λ = koeffisient for strømmingstag

(≈ 0.05 , i råsprengt tunnel)

L = tunnallengde, m

D = hydraulisk diameter, m

V_T = lufthastighet, m/s

STEMPELEFFEKTE FRA KJØRETØY (envegstrafikk)

$$P_F = \rho/2 \cdot \frac{b_F \cdot A_F}{(1 - \frac{A_F}{A_T})^2} \cdot N(V-u)^2$$

P_F = "stempelkraft", N

A_T = tunneltverrsnitt, m²

A_F = biltverrsnitt

personbiler $A_F \approx 2 \text{ m}^2$

lastebiler og busser $A_F \approx 4-8 \text{ m}^2$

N = antall biler inne i tunnelen på et gitt tidspunkt.

V = trafikkfart, m/s

u = lufthastighet (meteorologiske effekter), m/s

b_F = formfaktor for å finne effektiv motstandsflate

personbiler $b_F \approx 0.5$

lastebiler og

busser $b_F \approx 1.0-1.7$

Under forsøkene i Tingstad tunnelen var de meteorologiske ventilasjonskrefter små, $u \approx 0$. Langsluftingen skyldtes derfor stempeleffekten. Med $\lambda = 0.05$, $A_F = 4 \text{ m}^2$, $A_t = 55 \text{ m}^2$
 $D = 8.3 \text{ m}$, $V = 20 \text{ m/s}$ ($\approx 70 \text{ km/t}$) og $N = L \cdot P / (V \cdot 60)$, hvor $P =$
total antall biler som passerer pr min. gir dette:

$$V_T = 2.3 \sqrt{P \cdot V} \quad (= 0.8 \sqrt{N \cdot V})$$



NILU

TLF. (02) 71 41 70

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING

(NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FORSKNINGSRÅD)
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM
ELVEGT. 52.

RAPPORTTYPE Oppdragsrapport	RAPPORTNR. OR 46/79	ISBN--82-7247-147-7
DATO JANUAR 1980	ANSV.SIGN. O.F.Skogvold	ANT.SIDER OG BILAG 44 3
TITTEL Spredning av sporstoff fra Tingstad- tunnelen, Gøteborg		PROSJEKTLEDER Y.Gotaas
FORFATTER(E) Y. Gotaas		NILU PROSJEKT NR 22679
		TILGJENGELIGHET ** A
OPPDRAAGSGIVER Oslo Veivesen		OPPDRAAGSGIVERS REF.
3 STIKKORD (å maks.20 anslag)		
Tunnel	Sporstoff	Spredning
REFERAT (maks. 300 anslag, 5-10 linjer) Sporstoff ble sluppet i den 450 m lange Tingstad-tunnelen. Formålet var å undersøke spredningen av luftforurensninger utenfor en tunnelåpning. Fortynningen med avstanden var nær eksponensiell. Dominerende parameter var utstrømmingshastigheten. Ytre vindforhold var også av betydning. En betydelig mengde av utslippet (ca 50%) diffundererte ut gjennom solskjermen i taket ved tunnelåpningen. Resirkulasjonen var langt mindre.		
TITTEL Tracer investigation of air pollution around the outlet of a road tunnel.		
ABSTRACT (max. 300 characters, 5-10 lines) Tracer experiments were conducted in a road tunnel to study the spread of air pollutants outside the tunnel. Concentrations decreased exponentially with distance. Outlet air-speed was the main parameter. Outer windfield was also of importance. About half the amount emitted escaped through sunshades mounted in the tunnel roof near the opening. Only a small fraction was recirculated into the parallel, opposite tunnel.		

**Kategorier: Åpen - kan bestilles fra NILU A
Må bestilles gjennom oppdragsgiver B
Kan ikke utleveres C