

NILU  
OPPDRAGSRAPPORT 37/81  
REFERANSE: 23179  
DATO: AUGUST 1981

SPREDNING AV SPORSTOFF  
FRA VEGTUNNELER I BERGEN

AV  
YNGVAR GOTAAS

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING  
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM  
NORGE

ISBN-82-7247-264-3

FORORD

Etter oppdrag fra Hordaland vegkontor og Vegdirektoratet utførte Norsk Institutt for Luftforskning (NILU) i november 1980 spredningsforsøk med sporstoff i og ved tunneler i Bergen. Undersøkelsen er et ledd i en vurdering av forurensningsbelastninger ved planlagte, fremtidige tunneler.

Vi takker Hordaland vegkontor for verdifull assistanse. En spesiell takk til Bro- og Tunnelselskapet A/S, som stilte såvel personell som lokaler til disposisjon.

### SAMMENDRAG

I alt 7 spredningsforsøk er utført ved 2 tunneler i Bergen. Sporstoff er sluppet fra bil i fart. Luftstrømmen ut av tunnelen dominerer spredningsbildet nær utløpet. Typiske avstander til ti ganger fortynning av tunnelutslippet var 50 til 150 m.

Sporstoff sluppet fra bil i fart ved planlagt tunnelutløp dokumenterte dårlig spredning i en stabil kaldluftstrøm.

Sporstoff ble også sluppet i en luftesjakt. Spredningsforholdene var relativt ugunstige. Den minste fortynning, 17 ganger, ble målt i 70 m avstand.

INNHALDSFORTEGNELSE

	Side:
FORORD .....	3
SAMMENDRAG .....	5
1 INNLEDNING .....	9
2 MÅLEOPPLEGG .....	9
2.1 Eidsvågtunnelen .....	9
2.2 Løvsakktunnelen .....	11
2.3 Prosjektert tunnel (Nordre innfartsåre) ...	11
2.3.1 Sandviken, nordre utløp .....	11
2.3.2 Nygårdstangen, søndre utløp .....	15
2.4 Utslipp i sjakt 9, Løvsakktunnelen .....	15
2.5 Sporstoff og prøvetaking .....	15
2.6 Meteorologiske målinger .....	17
3 MÅLERESULTATER .....	17
4 VURDERING AV RESULTATENE .....	17
4.1 Dosering - middelkonsentrasjoner .....	17
4.2 Eidsvåg-tunnelen .....	20
4.3 Løvsakktunnelen .....	22
4.4 Sjakt 9, Løvsakktunnelen .....	24
4.5 Sandviken - Nordre innfartsåre .....	24
4.6 Nygårdstangen .....	26
5 KONKLUSJON .....	26
6 REFERANSER .....	27
VEDLEGG A: Midlere konsentrasjoner - tabeller	29
VEDLEGG B: Fordeling av midlere konsentrasjoner - figurer	35

## SPREDNING AV SPORSTOFF FRA VEGTUNNELER I BERGEN

### 1 INNLEDNING

Norsk Institutt for Luftforskning (NILU) gjennomførte 3.-7. november 1980 forsøk med utslipp av sporstoff i Løvestakktunnelen og Eidsvågtunnelen, samt utenfor planlagte tunnelåpninger ved Sandviken og Nygårdsparken. Formålet var å undersøke spredningen av forurensninger fra biltrafikken.

Liknende undersøkelser er foretatt i tunneler med envegstrafikk (1,2,3). Sporstoffet er da sluppet i et punkt i tunnelen. I Bergen har tunnelløpene to-veis trafikk. For best å simulere reelle utslippsforhold skjedde utslippene i Bergenstunnelene fra bil i fart.

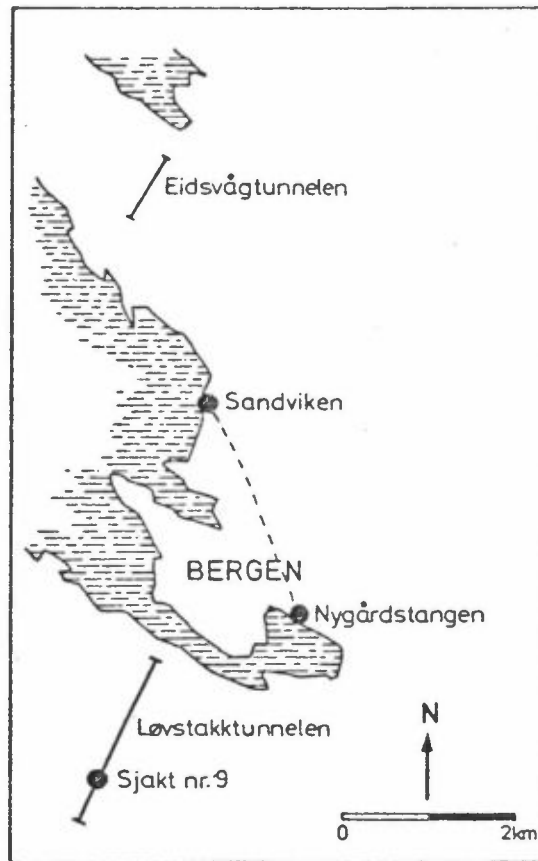
### 2 MÅLEOPPLEGG

Figur 1 viser beliggenheten av Eidsvågtunnelen, Løvestakktunnelen og prosjektert tunnel (Nordre innfartsåre).

#### 2.1 Eidsvågtunnelen

Eidsvågtunnelen er 842 m lang, 8,25 m bred og har 2 motgående kjørefelt. Høyden er 5,6 m i midten og 4 m ved kantene. Tverrsnittet er 40 m<sup>2</sup>. I midten av tunnelen fører en sjakt opp til overflaten. I tunneltaket er plassert vifter for langsgående ventilasjon. Bare disse viftene var igang under forsøkene og da slik at det var en gjennomgående luftstrøm rettet mot syd.

Målingene av sporstoff var konsentrert til området utenfor søndre utløp. Se figur 2.



Figur 1: Beliggenhet av tunneler og forsøksområder.



Figur 2: Eidsvågtunnelen, mot S.

Utslipp av sporstoff startet 1 km sønnenfor utløpet. Det skjedde kontinuerlig mens bilen kjørte gjennom tunnelen, snudde og returnerte. Prosedyren ble gjentatt med samlet utslippstid maksimalt 6-7 minutter.

Figur 3 viser plasseringen av prøvetakerne. De var forhåndsprogrammert, og startet umiddelbart etter utslippstart og gikk i 15 min. I løpet av dette tidsrom regnet en med at stoffet hadde drevet forbi.

## 2.2 Løvtakktunnelen

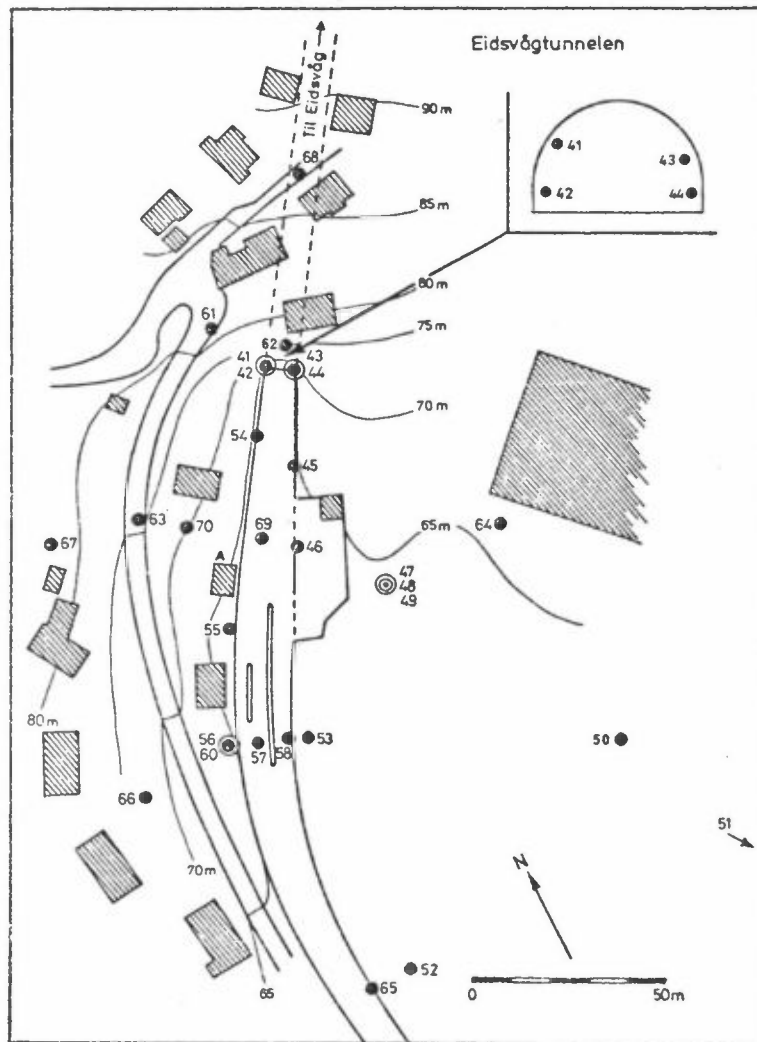
Løvtakktunnelen er 2032 m lang, 9 m bred og har 2 motgående kjørefelt. Høyden midt i tunnelen er 5.85 m, 4.10 m ved kjørekantene. Nordre utløp vider seg gradvis ut over en lengde på 23 m slik at tverrsnittet øker fra 45 m<sup>2</sup> til 90 m<sup>2</sup>. Ventilasjonssystemet har en rekke sjakter, utstyrt med vifter, se figur 4. Under forsøkene ble frisk luft suget inn med utstrømming gjennom begge tunnelåpninger. Ingen vifter var igang i den del av tunnelen hvor utslipp av sporstoff ble foretatt (ett unntak: 6.november). Utslipp av sporstoff startet i tunnelen, 750 m fra nordre åpning og fortsatte til toppen av Puddefjordsbroen, tilsvarende under kjøring motsatt vei. Figur 5 viser plassering av prøvetakerne. Prøvetakingen var som ved Eidsvågtunnelen.

## 2.3 Prosjektert tunnel (Nordre innfartsåre)

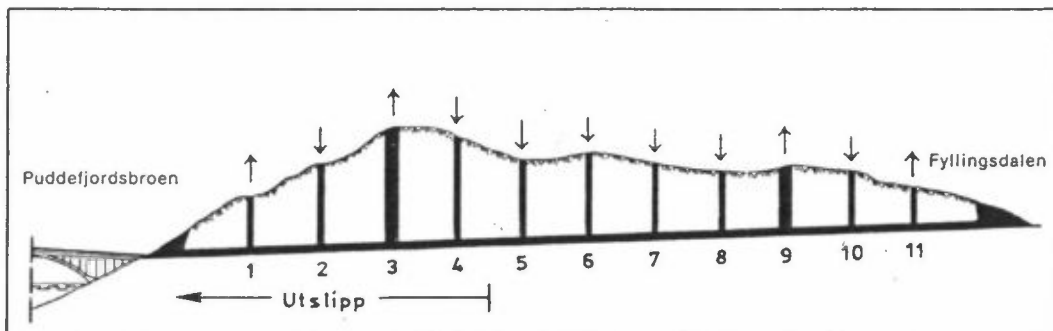
### 2.3.1 Sandviken, nordre utløp

Ved Sandviken er terrenget sterkt hellende, med et lite dalsøkk som fører ned mot Gamle Bergen. Sporstoff ble sluppet fra bil som kjørte på riksveien en kveld med dårlige spredningsforhold (stabil kaldluftstrøm). Figur 6 viser plasseringen av prøvetakerne.

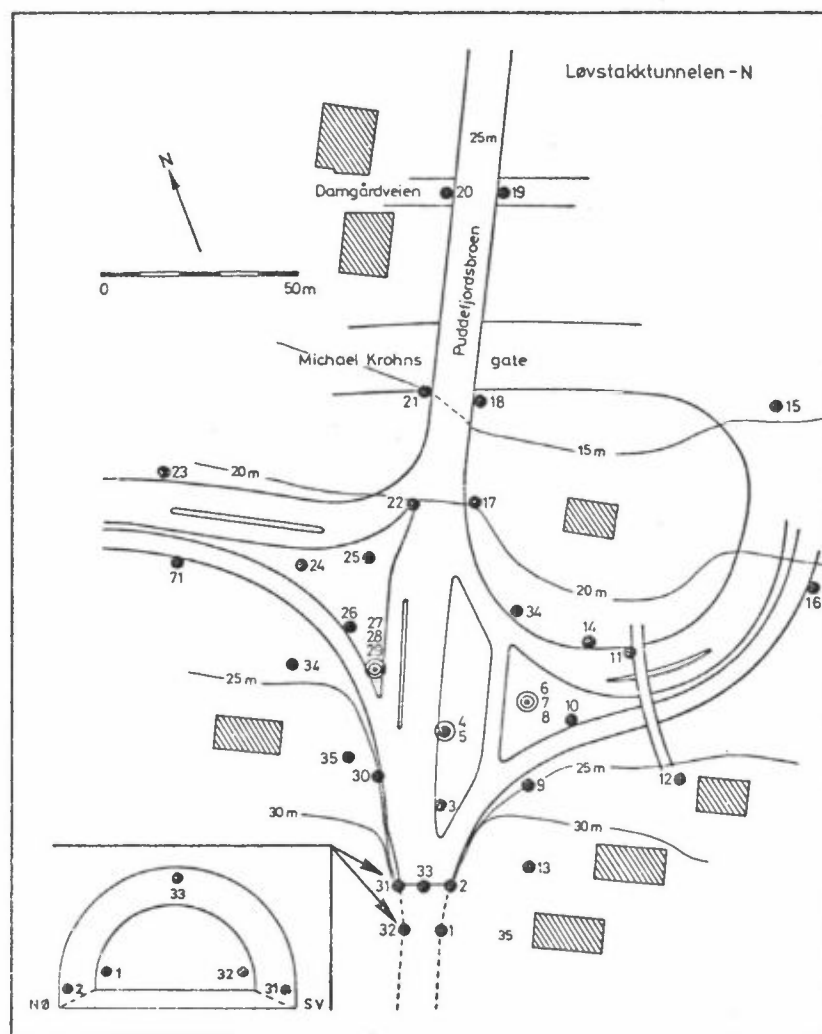




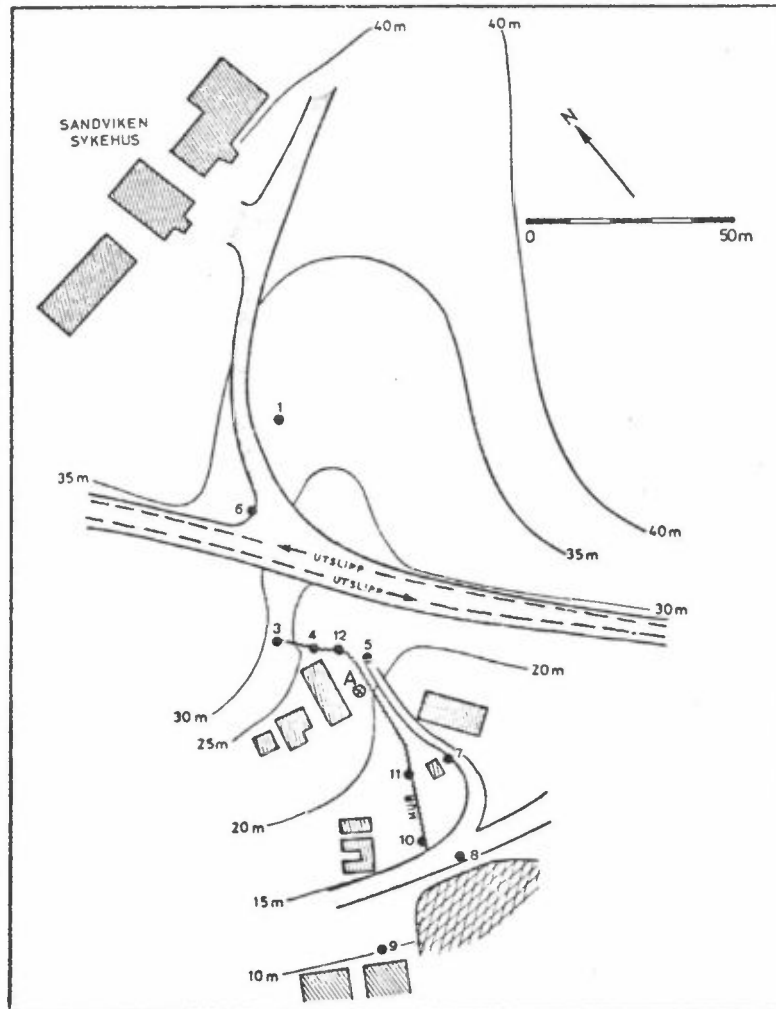
Figur 3: Eidsvågtunnelen. Plassering av prøvetakere.  
Høyde over bakken 1.5 m.  
Unntak: 41-3,5 m, 43-3 m, 47-10 m, 48-5 m, 56-8 m.  
A: CO-måler.



Figur 4: Løvstakktunnelen. Lengdesnitt.  
Under forsøk: innsugning i sjakt 9,  
andre sjakter ute av funksjon.



Figur 5: Løvstakktunnelen. Plassering av prøvetakere.  
Høyde over bakken 1.5 m.  
Unntak: 4-3 m, 33-5.5 m, 7 og 28-7 m, 6 og 27-11 m.



Figur 6: Sandviken, Plassering av prøvetakere.  
A: punkt for måleserie.

### 2.3.2 Nygårdstangen, søndre utløp

Det andre utløp av Nordre innfartsåre er planlagt til Nygårdstangen, mellom Kalfarveien og jernbanen. Utslipp av sporstoff skjedde fra bil som kjørte Kalfarveien frem og tilbake. Dette skjedde en kveld med klarvær og stabil luft. Figur 7 viser plasseringen av prøvetakerne. Det var ventet en kaldluftstrøm ned fjellsiden mot jernbanen. Denne uteble og det var istedet vindstille. Bare de aller nærmeste prøvetakerne ga resultater og forsøket må betegnes som nærmest mislykket.

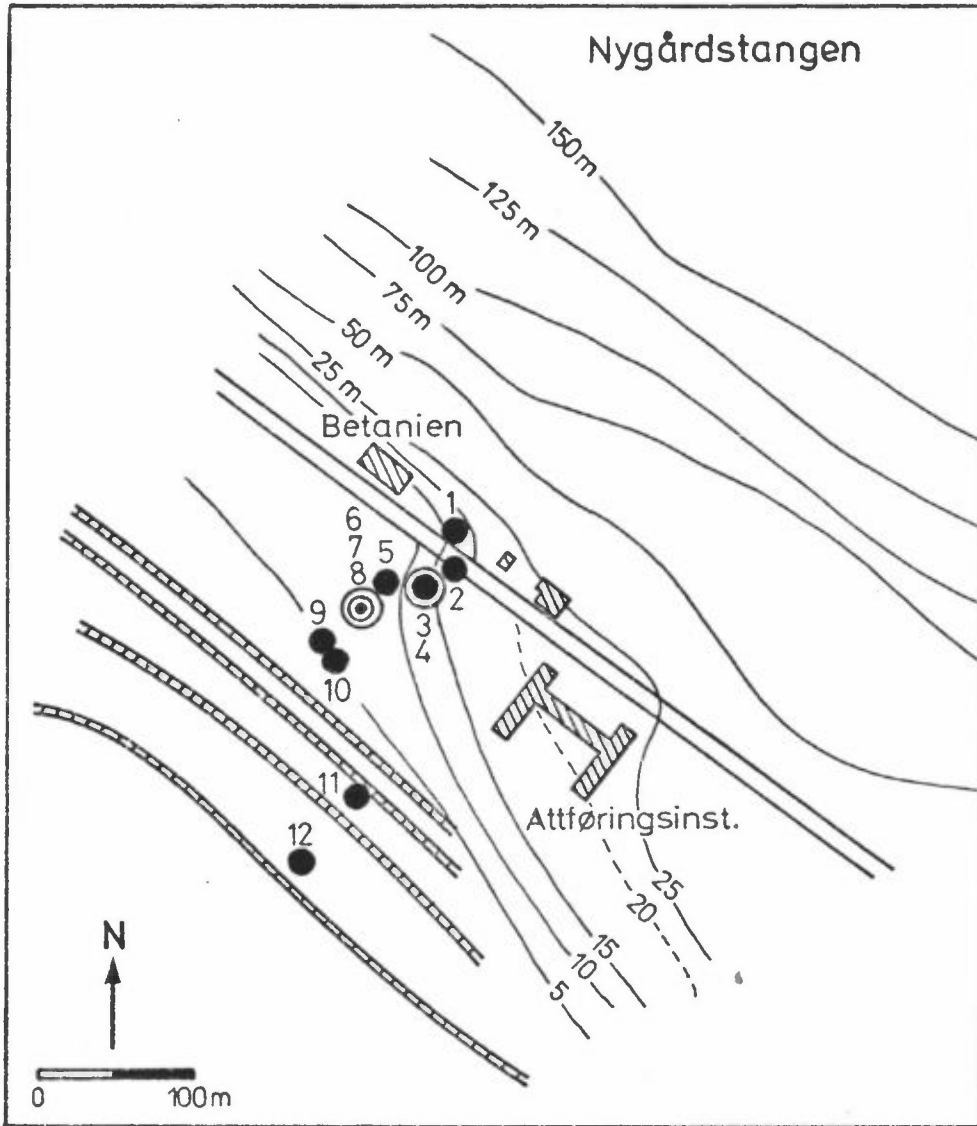
### 2.4 Utslipp i sjakt 9, Løvstakktunnelen

Spredning av forurensninger ved lufting gjennom sjakt ble simulert ved å slippe sporstoff i nedre åpning i sjakt 9, mens viften var igang for full utlufting. Utslipppet var gjennom en 4 m høy skorstein med indre tverrsnitt på 22 m<sup>2</sup>. Figur B8, vedlegg B, viser terrenget og plassering av prøvetakerne. Spredningen er vist ved isolinjer av fortykningen (konsentrasjon i utslipp/målt konsentrasjon).

### 2.5 Sporstoff og prøvetaking

Som sporstoff ble brukt svovelhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Dette er en luktfri, ufarlig og inert gass som er detekterbar i meget lave konsentrasjoner, i praksis ned til 10<sup>-11</sup>. Usikkerheten er anslått til ± 5% (4). Prøvetakingen foregår ved at luft suges inn i sprøyter. Innsugningen av luft skjer automatisk gjennom 15 minutter. Starttiden er programmert.

Analysen skjer ved hjelp av gasskromatograf. Under forsøkene i Bergen var denne plassert i kontrollhuset til Bro- og Tunnelsekskapet, ved søndre innløp til Løvstakktunnelen. Analysene ble utført umiddelbart etter forsøkene. Resultatene forelå i løpet av 2 timer.



Figur 7: Nygårdstangen. Plassering av prøvetakere.

## 2.6 Meteorologiske målinger

Vindmålere var plassert i 10 m høye master utenfor Eidsvåg-tunnelen, ved Sandviken og Nygårdstangen. Luftstrømmene i og utenfor tunnelene ble forøvrig målt med håndvindmålere. Retning og styrke av de svakeste vinder ble estimert ved drift av såpebobler. Temperaturen av tunnelluft og uteluft ble målt med håndtermometer. Målinger i 2 forskjellige høyder ga vertikal temperaturgradient. Ved Sandviken og Nygårdstangen ble temperaturfordelingen registrert ved ballongsonderinger opp til 100 m over bakken.

## 3 MÅLERESULTATER

Tabell 1 gir oversikt over utslipp, trafikk tetthet og værforhold. Enkeltmålinger er gitt i Vedlegg A. Tabell A1: Løvstakktunnelen, tabell A2: Eidsvågtunnelen og tabell A3: Sandviken, sjakt 9 i Løvstakktunnelen og Nygårdstangen.

## 4 VURDERING AV RESULTATENE

### 4.1 Middelkonsentrasjoner i relasjon til utslipp

Prøvetakerne suget inn luft i løpet av 15 minutter, og den totale mengde SF<sub>6</sub> ble målt. Hver måling ga derfor som resultat en middelkonsentrasjon, C. Hvis vi forutsetter at alt stoff passerte prøvetakeren i løpet av oppsamlingsperioden, svarer imidlertid denne middelkonsentrasjon til den konsentrasjon som ville bli målt ved et kontinuerlig utslipp forutsatt at utslippsmengden pr. tidsenhet da var lik totalmengden ved enkeltutslipp. Ett eller flere enkeltutslipp kan på denne måte simulere utslipp fra en kontinuerlig strøm av biler.

Tabell 1: Forsøksbetingelser.

Forsøk nr.	Dato	Tid	Sted	UTSLIPP SF <sub>6</sub>		TRAFIKK		VIND - m/s				TEMP.				
				cc/min	km/t	Bill i tunnel	Biler mot B fra B	indre Ø	V	Ø	ytre V	Ø	Ute styrke	retn.	tunnel åpning	ute ΔT/10m
1	3.11	1326 - 1341	LØVSTAKKEN	-	55	50sx4	71	78	3.3	1.3	2.3	-	1.3	V	8.9	0.0
2	4.11	0820 - 0835	LØVSTAKKEN	950	55	50sx2	150	96	4.7	3.3	3.3	1.2	0.2	Ø	5.8	3.2 1.0 0.2
3	4.11	1120 - 1135	EIDSVÅG	730	50	65sx2	108	100	1.7	3.5	0.4	SØ			-	7.0 5.2 0.1
4	4.11	2120 - 2135	SANDVIKEN	400	40	2 x 2 passer- inger	-	-	-	-	-	-	0.9	-		0.8 0.2
5	5.11	1010 - 1025	LØVSTAKKEN	950	55	50sx2	92	47	3.7-2.3	3.0	0.9	0.1- 0.3	NV		6.6	5.4 2.1 0.0
6	5.11	1545 - 1550	LØVSTAKKEN SJAKT NR 9	400 (5 min)	55 m <sup>3</sup> /s 2.5 m/s	-	-	-	-	-	-	0.8	NV			5.1 -0.05
7	5.11	2145 - 2200	NYGÅRDSTANGEN	900	50	2	-	-	-	-	-	0.1	VAR			0.0
8	6.11	1050 - 1105	EIDSVÅG	500	55	55sx2	-	-	-	1.5	2.5	0.3	N		7.0	5.6 3.2 1.0
9	6.11	1445 - 1500	LØVSTAKKEN	400 <sup>1)</sup>	55	27sx2	112	159	2.8	2.8	0.7-0.9	0.2			7.2	4.5 4.5 -0.3
10	7.11	0945 - 1000	EIDSVÅG	500	50	65sx2	124	90	-	-	-	0.1	VAR		-	1.5 -1.0 0.7

1) Utslipp bare i tunnel

Alt stoff sluppet i tunnelen må føres ut tunnelåpningen med luftstrømmen. Konsentrasjonen når her et maksimum, som er omvendt proporsjonalt med utstrømningshastigheten. Den vil dominere bidraget til målte middelkonsentrasjoner nær tunnelåpningen. I lengre avstand og nær veibanen vil bidraget fra passerende biler dominere. Nær tunnelåpningen kan det være hensiktsmessig å uttrykke spredningen ved en fortynningsgrad,  $F = C_o/C$ , hvor  $C_o$  er middelkonsentrasjonen i utløpet over 15 min (900 s).  $C_o$  er da gitt ved

$$C_o = \frac{q_1 \cdot L \cdot N}{V \cdot A \cdot u \cdot \Delta t} \quad (1)$$

Her er:

$Q_T$  = total utstrømning av  $SF_6$  gjennom tunnelåpning ( $m^3$ )

$q_t$  = utslipp av  $SF_6$  pr tidsenhet ( $m^3/s$ )

$L$  = tunnellengde for utslipp (m)

$V$  = bilhastighet (m/s)

$N$  = antall kjøringer

$u$  = midlere utstrømningshastighet (m/s)

$A$  = tverrsnitt av tunnelåpning ( $m^2$ )

$\Delta t$  = prøvetakingstid (900 s)

For vurdering av bidraget fra passerende biler, er det vanskeligere å oppgi en midlere konsentrasjon.

Midlere utslipp pr meter veibane, midlet over 15 min er  $N \cdot q_t / V \cdot 900$ . Et estimat av initialkonsentrasjonen,  $C_{OL}$  fås ved å anta jevn fordeling i ett initialtverrsnitt, her satt til  $2 m^2$ .

En mer konvensjonell måte er å sette fluksen av stoff gjennom målepunktet lik utslippsmengden. Dette gjøres enklest ved å innføre en skalahøyde, høyden av stoffskyen om den var konstant fordelt vertikalt. Skalahøyden kan bestemmes i hvert enkelt målepunkt. Denne metoden vil bli brukt for målingene ved Sandviken. Ved utslippet gjennom sjakten i Løvstakktunnelen brukes fortykning



som illustrasjon og fluksbetraktninger for estimering av skalahøyde og av spredningsparameter.

#### 4.2 Eidsvågtunnelen

Under forsøkene i Eidsvågtunnelen var som nevnt kun de langsgående vifter igang, med utblåsing sydover. Fordeling av midlere konsentrasjoner er vist i figurene B1, B2 og B3 (vedlegg B). Den midlere konsentrasjon i utstrømningen,  $C_o$ , kan finnes fra målingene i tunnelåpningen eller fra ligning (1). Utslippet i Eidsvågtunnelen skjedde i hele tunnelens lengde. Den lave utstrømningshastigheten førte til at tunnelen ikke ble helt tømt for sporstoff i måleperioden. Beregningene vil derfor gi høyere verdier enn de målte. Målingene i tunnelåpningen viser en systematisk skjevhet. Se tabell 2. Konsentrasjonen er alltid størst i lav høyde ved utgående trafikk.

Tabell 2: Relative konsentrasjoner i søndre åpning, Eidsvågtunnelen.

Dato	Vest		Øst	
	1.2 m	3 m	2.5 m	1.2 m
4.11	1	0.37	0.57	0.43
6.11	1	0.38	0.68	0.43
7.11	1	0.43	0.64	0.31
Middel	1	0.39	0.63	0.39

Disse relative konsentrasjonene, sett i forhold til verdiene 1-2 m over bakken på vestsiden i åpningen, er såpass konstante at den skjeve fordelingen ikke kan skyldes tilfeldigheter.

Trafikken skaper luftvirvler. Tidvis suges luft inn i åpningen. Dette er mest markert for inngående trafikk. Den midlere utstrømningshastighet er også lavest på denne side. Hvor bilene forlater tunnelen blir det tendens til innsug i øvre del, med innblanding av frisk luft som gir de laveste konsentrasjoner. Den midlere konsentrasjon i tunnelåpningen,  $C_o$ , er trolig nær den målte maksimalverdi, høyere enn den midlere, og som nevnt lavere enn den beregnede. Den er her anslått til 1.2 ganger midlet av de målte verdier.

Tabell 3 viser antatte verdier av  $C_o$  og avstanden til fortytning  $F = 10$ . Videre er gitt verdier av  $C_{OL}$ .

Tabell 3: Antatt midlere konsentrasjon av  $SF_6$  i tunnelåpning,  $C_o$ , langs linjekilden,  $C_{OL}$ , og avstand<sup>6</sup> til fortytning  $F=10$ .

Dato	$C_o$	$C_{OL}$	Avstand ( $F=10$ )
4.11	$8 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	85 m
6.11	$6 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-10}$	> 60 m
7.11	$6 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-10}$	≈ 200 m

Konsentrasjonsbildene, figurene B1, B2 og B3, viser alle en typisk jetutstrømning med aksene nær forlengelsen av tunnelen. Samtidig er det en markert strøm opp skråningen mot nord. Dette er spesielt tydelig den 6.11. Målepunkt 62, plassert ved huset rett over tunnelen, viser alle dagene en fortytning på litt under 20. Den maksimale avstand til 600 ppt, tilsvarende fortytning  $F = 10$ , er størst den 7. november. Initialkonsentrasjonen fra linjekilden er 900 ppt. Fra målinger i god avstand fra tunnelåpningen, hvor linjekilden gir eneste bidrag, fremgår at bidraget fra denne avtar raskt med avstanden fra veibanen. Konsentrasjone over 1500 ppt inntraff i en avstand godt over 100 m og i god avstand fra veibanen. Avstanden til  $F = 10$  av tunnelluften var derfor over 150 m. Mastemålingene tyder på høyest konsentrasjoner nær bakken. Den 4. november syntes de jevnt fordelt. Temperatursjiktningen var stabil, spesielt under de 2 siste forsøkene. Forholdet mellom utstrømningshastighet og vindhastighet har tidligere vist seg

å være en viktig parameter (1). Den var desidert størst 7.november (16 mot 6 de andre dagene). Det kan forklare de relativt høye konsentrasjoner denne dag.

Fordeling av CO fra biltrafikken vil vise det samme relative bildet. En ide om størrelsen får vi ved å anta et midlere utslipp pr bil på 25 g CO/km. Antar vi biltetthet som observert 7.november, totalt 200 passeringer i løpet av 15 min, gir dette et totalt utslipp i tunnelen på ca 5 g CO/sek. Antar vi videre at det har bygget seg opp en stasjonær situasjon, må samme mengde CO strømme ut pr sek. Med en utstrømningshastighet på 2 m/s gir dette  $C_o = 60 \text{ mg/m}^3$ .

Estimerte CO-konsentrasjoner i punkt A (figurene B1, B2 og B3) er henholdsvis  $6 \text{ mg/m}^3$ ,  $5 \text{ mg/m}^3$  og  $19 \text{ mg/m}^3$  mot observerte  $2.9 \text{ mg/m}^3$ ,  $4.5 \text{ mg/m}^3$  og  $6 \text{ mg/m}^3$ .

#### 4.3 Løvestakktunnelen

Fordeling av midlere konsentrasjoner er vist i figurene B4, B5, B6 og B7 (vedlegg B).

Den relative fordeling av midlere konsentrasjoner i utløpet er vist i tabell 4.

Tabell 4: Relative, målte middelkonsentrasjoner i utløpet av Løvestakktunnelen. Målepunkt nr. i parentes.

Dato	Indre utløp		Ytre utløp		
	Øst (1)	Vest (32)	Øst (2)	Øvre (33)	Vest (31)
3.11	1	(0.07)	0.96	0.25	0.45
4.11	1	0.80	0.90	0.75	0.40
5.11	1	1	1.0	0.05	0.55
6.11	1	0.80	1.1	0.75	0.25

Beregnete og antatte midlere konsentrasjoner fra ligning 1 og målingene i utløpet er gitt i tabell 5.

Tabell 5: Beregnede og antatt midlere konsentrasjoner i ppt i utløpet av Løvstakktunnelen. Midlere konsentrasjon langs linjekilden,  $C_{OL}$ .

Dato	C-beregnet		$C_o$ -målt		$C_o$ antatt	$C_{OL}$
	indre	ytre	indre	ytre		
3.11	-	-	-	-	$2.5 \cdot 10^{-9}$	-
4.11	$1.0 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-9}$	$3.4 \cdot 10^{-9}$	$2.6 \cdot 10^{-9}$	$5.0 \cdot 10^{-9}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$
5.11	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$
6.11	$3.1 \cdot 10^{-9}$	$5.4 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$	$1.2 \cdot 10^{-9}$	$2.0 \cdot 10^{-9}$	-

Stoff ble sluppet i nordligste 800 m av tunnelen, og alt stoff har trolig passert utløpet i løpet av måleperioden. Forskjellen i konsentrasjon ved indre og ytre utløp skyldes at det er brukt midlere observerte hastigheter som kan avvike noe fra de virkelige.

Fra tabellene og figurene trekker vi følgende konklusjoner:

- Som ved Eidsvågtunnelen er konsentrasjonen markert høyest hvor trafikken og luftstrømmen går ut. Målingene nær tunneltaket (pkt. 33) tyder på relativt god blanding. Den lave verdi observert under taket 5.11 kan skyldes at ved dette forsøk var det igang en vifte for innsug på strekningen sporstoff ble sluppet. Utstrømning langs taket, uten blanding i tverrsnittet, kan forklare den lave målte verdi.
- Maksimale avstander til en fortykning på  $F = 10$  er 50 til 100 m, altså noe kortere enn ved Eidsvågtunnelen. Dette kan skyldes det mer åpene terreng. I tilfellet med markert vind, 3.11., er det tydelig hvordan plumen dreies av vinden. Forøvrig kan en også se stoff trekkes med av trafikken langs høyre avkjøringsvei. De tre første forsøksdagene var det stabil luft, tildels med inversjon.

Det synes vanskelig å trekke konklusjoner i hvilken grad temperatursjiktningen påvirker konsentrasjonene nær utløpet, selv om sjiktningen varierte fra meget stabil (inversjon) til ustabil.

Relativ fordeling av konsentrasjoner av CO skulle være som for SF<sub>6</sub>. Fra trafikkteellingene og antatt utslipp på 25 g/bil/km i nordre tunnelhalvdel blir estimerte konsentrasjoner i utløpet de 4 dagene (3.11., 4.11., 5.11. og 6.11.) henholdsvis 44 mg/m<sup>3</sup>, 38 mg/m<sup>3</sup>, 29 mg/m<sup>3</sup> og 60 mg/m<sup>3</sup>.

#### 4.4 Sjakt 9, Løvstakktunnelen

Figur B8 (vedlegg B) viser fortyningen av utslippet gjennom sjakt nr. 9. Minimum fortyning,  $F = 13$ , inntraff i avstand 70 m. I et tverrsnitt av plumen av lengde 70 m er midlere bakkekonsentrasjon  $2.8 \cdot 10^{-9}$ . Antas konstant konsentrasjon til høyde  $h$ , finner vi, idet fluksen er lik totalutslippet,  $h = 14$  m. Dette svarer til et standardavvik,  $\sigma_z = 16$  m hvis vi antar gaussisk fordeling. Vesentlig høyere kan ikke SF<sub>6</sub>-skyen ha nådd. De rådende værforhold må en anta ga relativt høye bakkekonsentrasjoner, slik at  $F = 13$  kan være representativ for minimum fortyning under ugunstige forhold ved denne sjakt.

Måleserien (vedlegg B) viser en maksimal øyeblikkskonsentrasjon tilsvarende en øyeblikksfortyning  $F = 7$ , mens den midlere (15 min) fortyning var  $F = 15$ . Serien tyder forøvrig på retningsendringer av plumaksen under forsøket.

#### 4.5 Sandviken - Nordre innfartsåre

Figur B9 (vedlegg B) viser hvordan midlere konsentrasjoner avtar med avstanden fra veibanen, samt vertikal temperaturfordeling. Antas konsentrasjonen i skyen konstant med høyden, kan skyhøyden estimeres. Fluksen gjennom hvert tverrsnitt må være lik utslipps-

mengden pr lengdeenhet,  $Q_L$ . Fra  $Q_L = 2.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ SF}_6/\text{m/s}$  finnes skyhøyden  $h$ , eller om vi antar gaussisk (normal) fordeling standardavviket  $\sigma_z$  ( $=0.8 h$ ). I tabell 6 er også angitt tilsvarende verdier for den tilsvarende turbulente diffusjonskoeffisient,  $K_z = \sigma_z^2 \cdot u/4x = d(\sigma_z^2)/dx \cdot u/4$ .

Tabell 6: Skyhøyde  $h$ , standardavvik  $\sigma_z$ , turbulent diffusjonskoeffisient  $K_z$ .

Avstand (m)	Skyhøyde (m)	$\sigma_z$ (m)	$K_z$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
2	1.8	1.4	
15	5.4	4.3	0.24
40	8	6.4	0.18
65	10	8.0	0.18
90	10	8.0	$\approx 0.0$

Estimering av  $\sigma_z$  og  $K_z$  er tatt med, da det foreligger meget få liknende målinger under inversjonsforhold.

Den turbulente diffusjonskoeffisienten,  $K_z$ , avtar med avstanden fra veibanen. Det passer med at ved og nær veibanen dominerer turbulens skapt av biltrafikken. Denne turbulensen avtar med avstanden og etterhvert blir spredningen bestemt av atmosfæreturbulensen. I meget stabil sjikting er denne svak og  $K_z$  blir meget liten. Verdiene av  $\sigma_z$  er av samme størrelse som funnet ved amerikanske undersøkelser (5), men er litt større nær veibanen og avtar noe mindre med avstanden.

Beregning av CO-konsentrasjoner gir relativt lave verdier. En bil-tetthet på 1000 biler/time og midlere utslipp 25 g/km gir  $Q_{CO} = 7 \text{ mg/m/s}$ . Fordelt over en høyde på 10 m gir dette en konsentrasjon på  $0.9 \text{ mg/m}^3$  ved den observerte vindhastighet på 0.8 m/s. Dette gjelder i avstand 60-100 m. Ved fortauskanten (2 m) blir konsentrasjonen ca  $5 \text{ mg/m}^3$ .

Måleserien (vedlegg B) viser at stoffet passerte punkt A (35 m) i løpet av ca 20 s. Tyngdepunktet passerte etter 45 s, tilsvarende en midlere transporthastighet på 0.8 m/s.

#### 4.6 Nygårdstangen

Som tidligere nevnt var vindhastigheten for lav i forhold til måleperiodens lengde. De målte midlere konsentrasjoner er derfor altfor lave de fleste steder som f.eks. på jernbaneområdet. Bare prøvetakerne nr 1 og 2, henholdsvis 10 m på oversiden og 3 m nedenfor veibanen kan nyttes ved overslagsberegninger. Totalutslipp av SF<sub>6</sub> enhet var  $Q_L = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m SF}_6$ . Med samme biltetthet og utslipp av CO pr meter som antatt for Sandviken, og ved å sammenholde med SF<sub>6</sub>-målingene, kommer vi frem til en CO-konsentrasjon på 7 mg/m<sup>3</sup> i 10 m avstand (nordsiden av veibanen).

### 5 KONKLUSJON

Spredningsforsøkene ble utført under meget rolige vindforhold. Det hadde den fordel å kunne simulere spredning under dårlige spredningsforhold. For utslippet fra tunnelåpningene bød det ikke på problemer i de nære områder. Derimot ble målte konsentrasjoner i lengre avstand fra tunnelen og fra veibanen trolig for lave. Dette var imidlertid av liten betydning for spredningsbildet i de antatt mest utsatte områder.

Luften som strømmer ut av tunnelåpningen viser de høyeste konsentrasjoner ved åpningen. Tregheten i luftstrømmen ga et spredningsbilde nær tunnelåpningen som bare i liten grad var bestemt av de ytre vindforhold. Nær tunnelåpningen og veibanen var fortynningen i første rekke bestemt av turbulensen skapt av biltrafikken. Det var meget rolige vindforhold under forsøkene. En fikk derfor ikke studert spredningen under sterk eller middels vind. En må i slike situasjoner vente sterkere fortynning. Spredningsbildet utenfor og nær tunnelåpningen vil dessuten i større grad være bestemt av atmosfærens forhold (vind og stabilitet).





## VEDLEGG A

### MIDLERE KONSENTRASJONER - TABELLER

Tabell A2: Eidsvåg tunnelen - middelkonsentrasjoner (15 min) i ppt.  
 Høyder: 41:3,5 m, 43:3 m, 47:10 m, 48:5 m, 56:8 m.  
 Øvrige høyder: 1,5 m.

Målepunkt	3 (4.11)	8 (6.11)	10 (7.11)
41	4073	2925	3545
42	11000 (ca)	7875	8550
43	6300	5400	5445
44	4770	4725	3420
45	225	1553	675
46	54	306	630
47	-	0	defekt
48	27	0	72
49	41	0	293
50	13	-	-
51	0	0	0
52	9	0	0
53	13	0	0
54	3105	2115	3420
55	1395	473	1553
56	360	45	959
57	131	923	1049
58	18	261	130
59	-	-	-
60	383	0	1665
61	1440	698	135
62	428	378	315
63	549	266	338
64	0	0	122
65	36	252	13
66	360	405	1463
67	-	-	176
68	-	-	0
69	-	-	1328
70	-	-	355

Tabell A1: Løvestakktunnelen. Middelkonsentrasjoner (15 min.) i ppt.  
 Høyder over bakken: 4:3 m, 33:5,5 m, 7 og 28:7 m, 6 og 27:11 m.  
 Øvrige høyder: 1,5 m.

Målepunkt	Forsøk nr. (dato)			
	1 (3.11)	2 (4.11)	5 (5.11)	9 (6.11)
1	3240	3780	13000 (ca)	1620
2	3105	3375	13000 "	1823
3	feil	2408	5580	405
4	608	882	1958	176
5	293	1125	1193	199
6	248	207	2250	54
7	-	-	698	45
8	203	180	765	77
9	630	257	80	45
10	248	315	324	23
11	117	374	90	-
12	108	feil	0	0
13	45	0	0	0
14	81	396	158	0
15	23	711	473	0
16	81	9	68	18
17	234	18	630	23
18	-	36	1395	26
19	360	0	1665	0
20	0	536	1688	0
21	0	423	990	0
22	-	414	1688	18
23	-	198	27	23
24	-	360	0	32
25	-	347	180	41
26	0	0	0	26
27	-	540	0	45
28	-	729	9	36
29	0	563	13	32
30	45	45	63	23
31	496	1620	7200	405
32	225	3060	13000 (ca)	1305
33	833	2790	450	1215
34	-	-	338	9
35	-	-	-	0
36	-	-	-	13

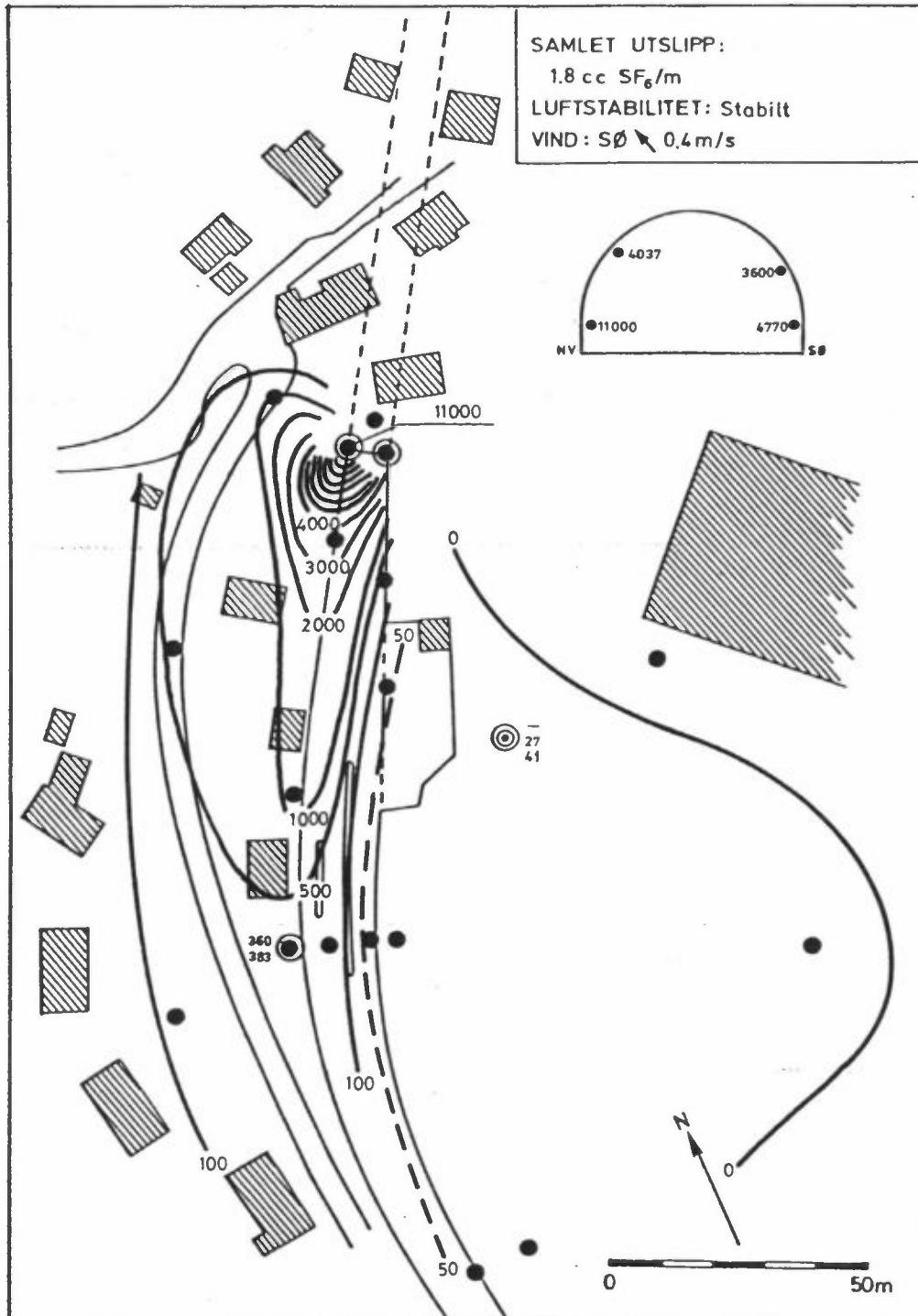
Tabell A3: Middelmålinger (15 min) i ppt.

Målepunkt	SANDVIKEN (4.11)	LØVSTAKKEN-SJAKT 9 (5.11)	NYGÅRDSTANGEN (5.11)
1	0	23	2520
2	1395	788	923
3	450	1913	387
4	495	2790	185
5	432	1350	162
6	0	0	18
7	369	2948	23
8	293	2700	9
9	293	1845	1
10	180	2948	13
11	0	2385	13
12	428	1148	27

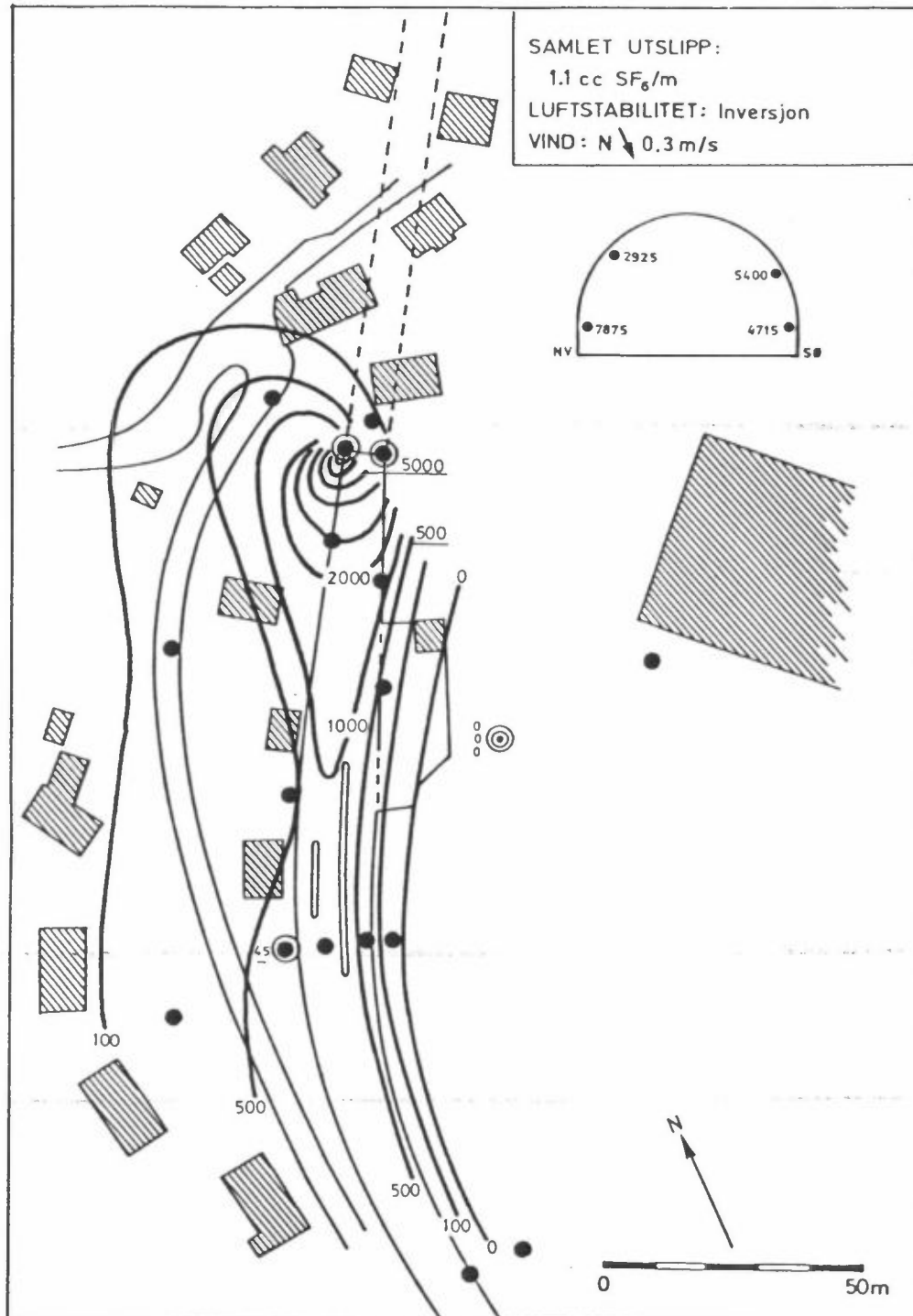
<u>Pkt. C (4.11)</u>		<u>Pkt. B (5.11)</u>	
Tid etter utslipp	ppt	Tidspunkt	ppt
20 s	0	15.51.00	5085
23 "	9	20	3780
29 "	9	30	6750
32 "	0	40	17000
35 "	0	50	15000
38 "	9	52.00	13000
41 "	540	10	10000
44 "	1058	20	10000
47 "	1980	30	6425
50 "	968	40	7900
		53.00	4005
		30	423

## VEDLEGG B

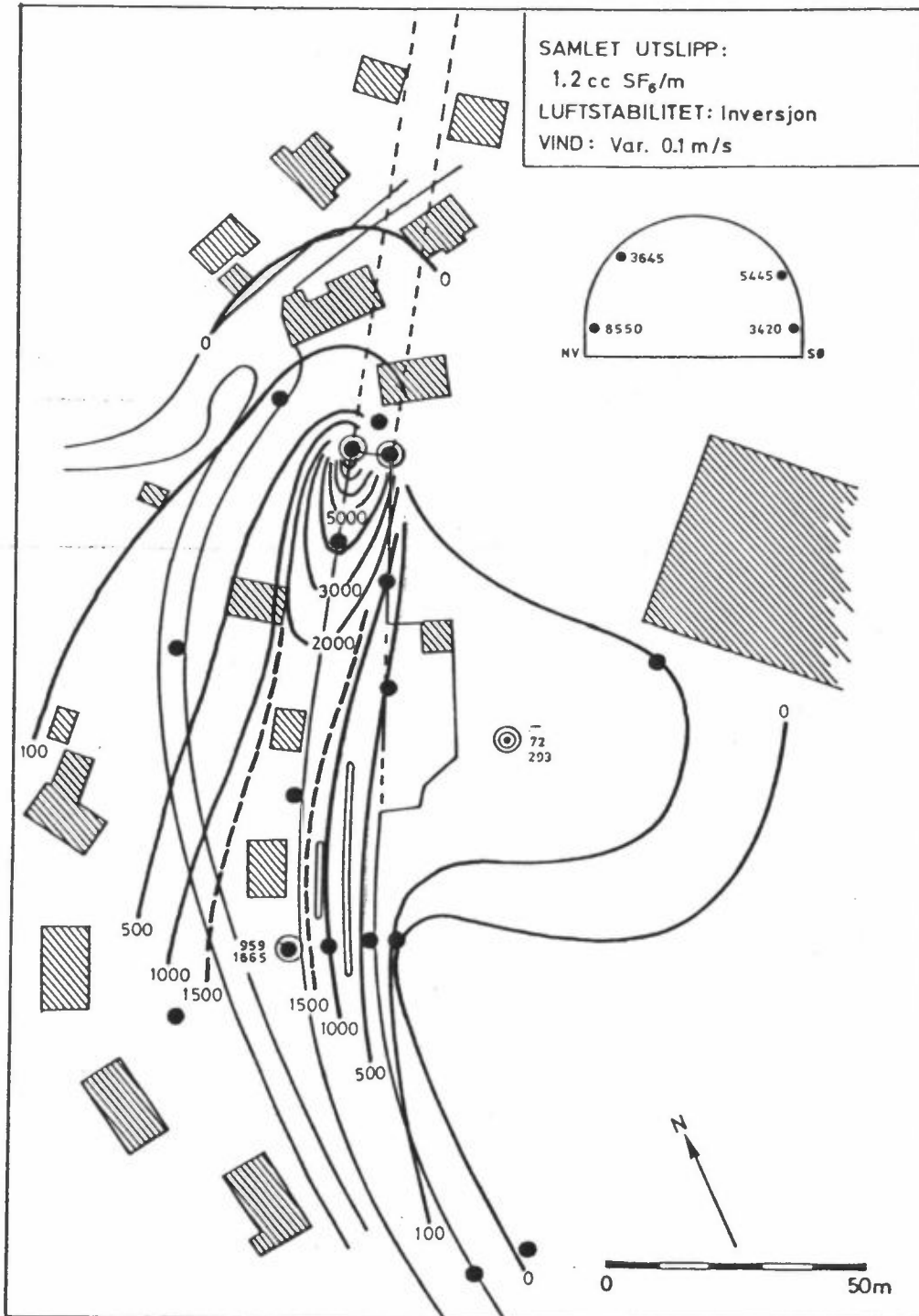
KONSENTRASJONSFORDELINGER - FIGURER



Figur B1: Midlere konsentrasjoner - ppt.  
Eidsvågtunnelen 4.11.80.

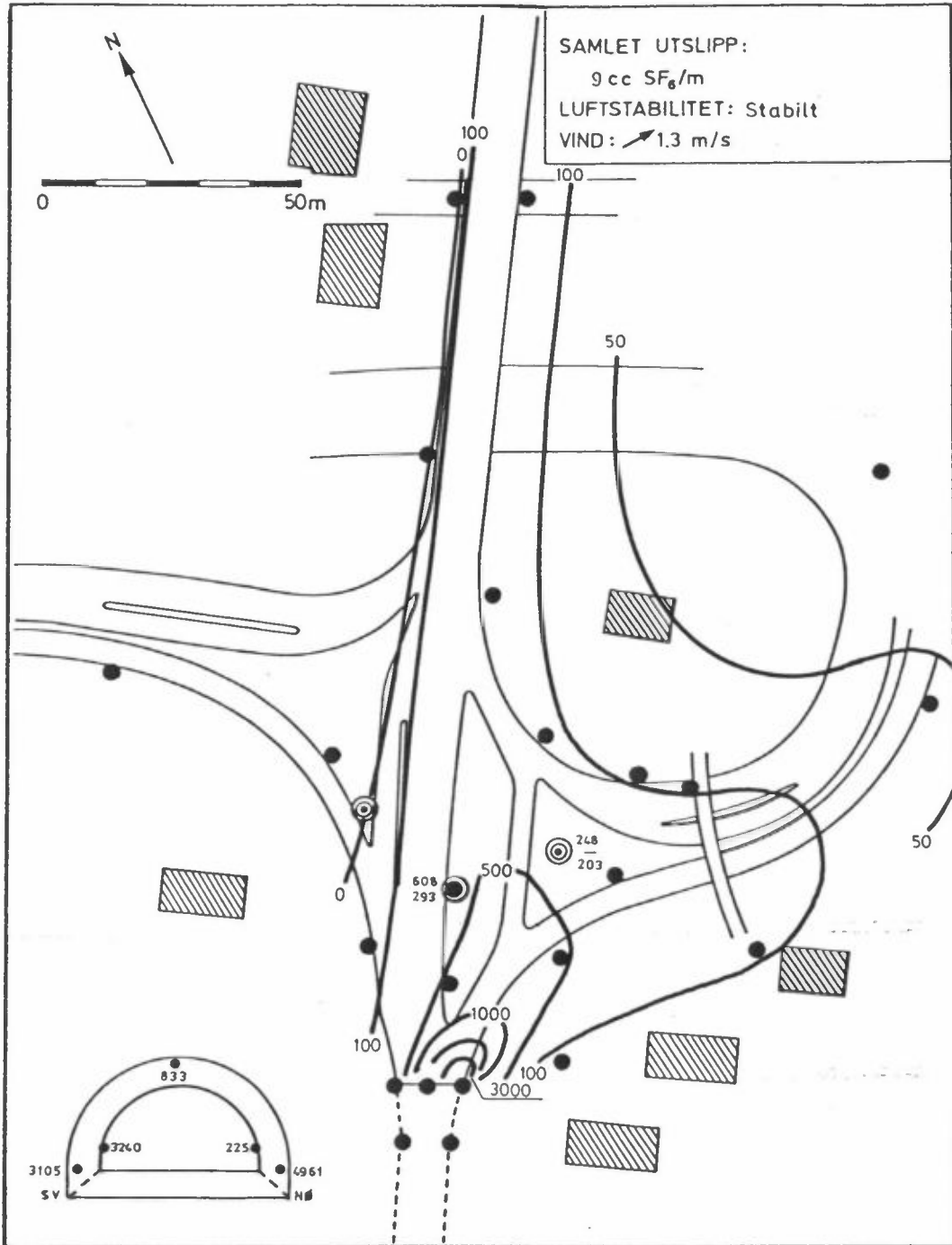


Figur B2: Midlere konsentrasjoner - ppt.  
Eidsvågtunnelen 6.11.80.

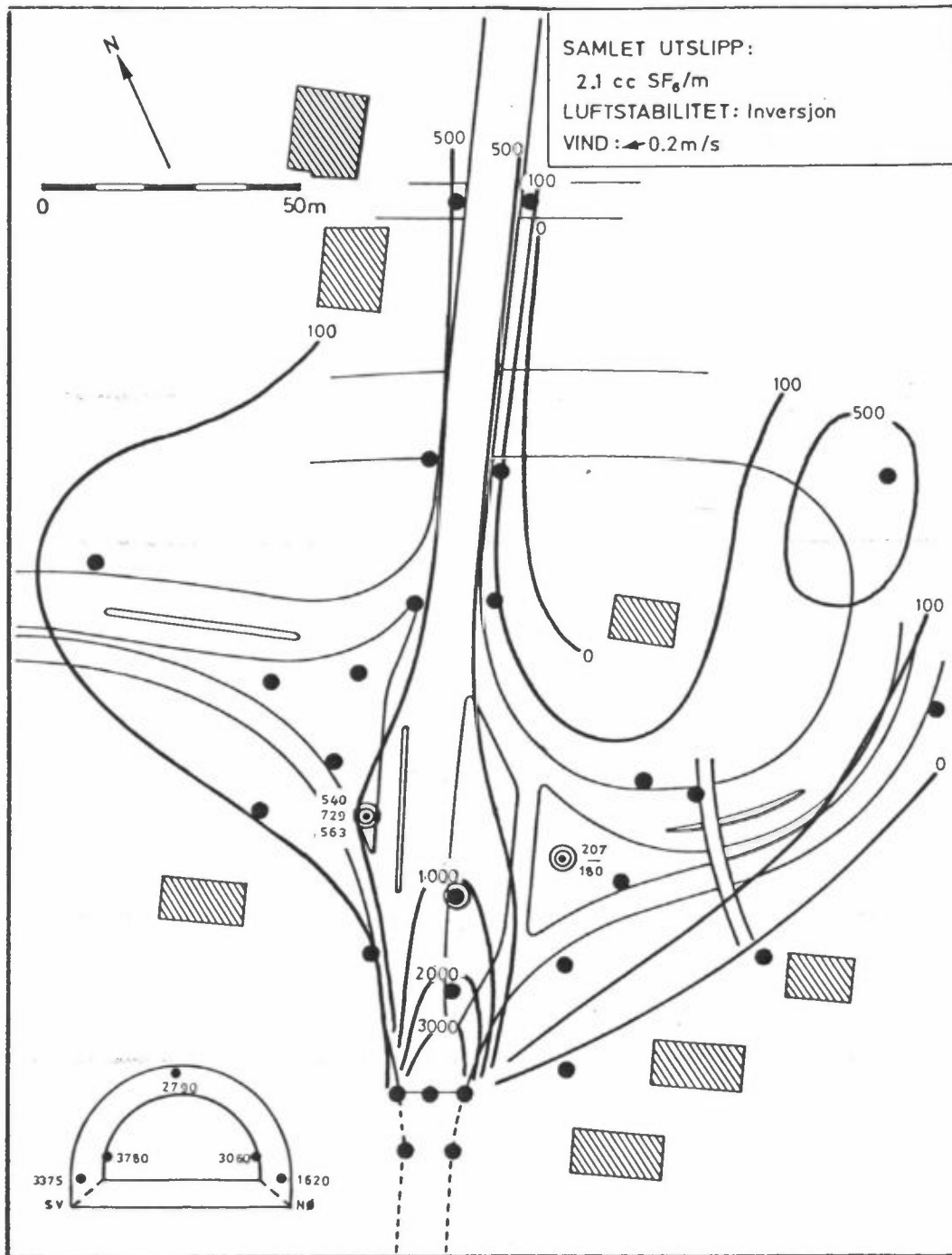


Figur B3: Midlere konsentrasjoner - ppt.  
Eidsvågtunnelen 7.11.80.

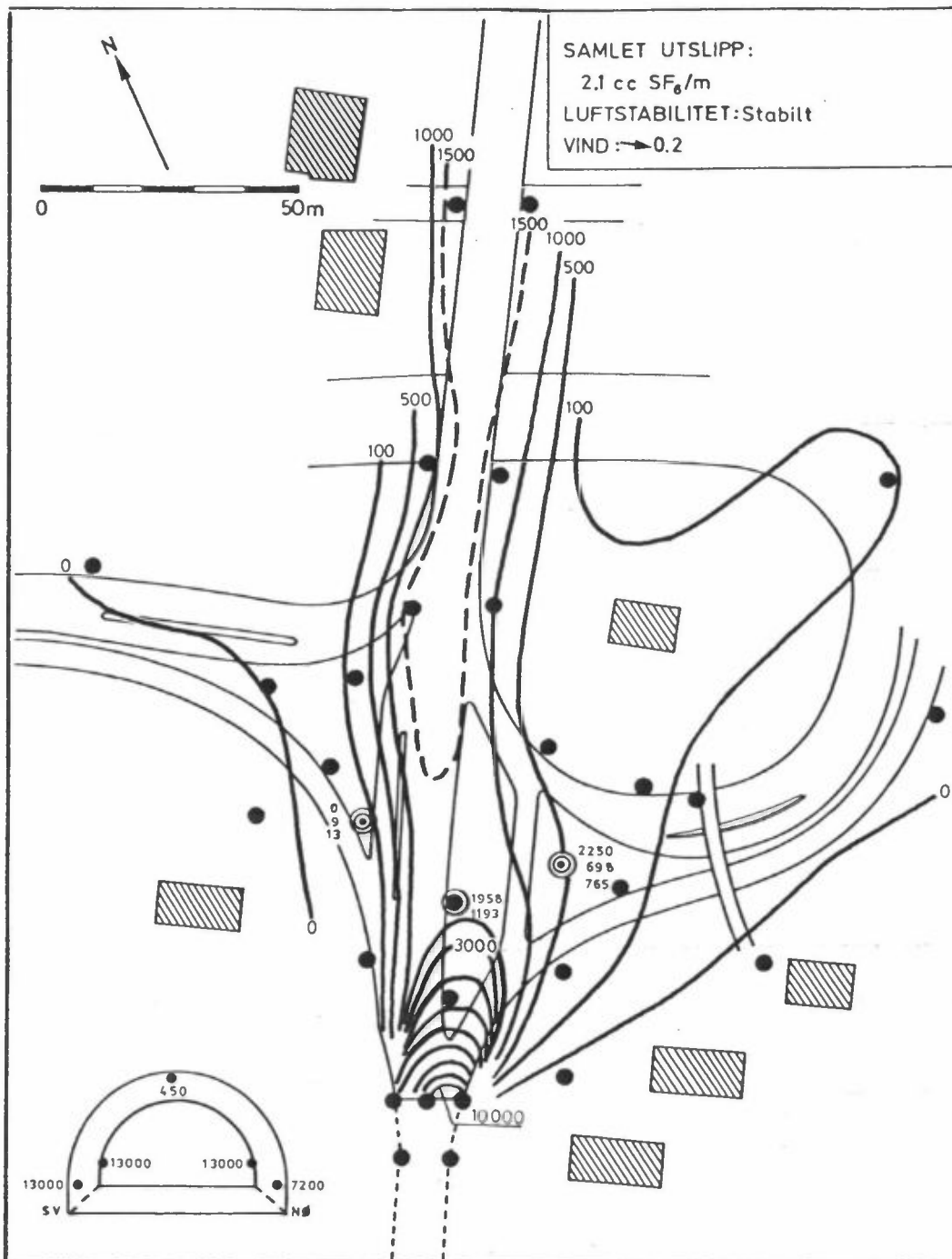




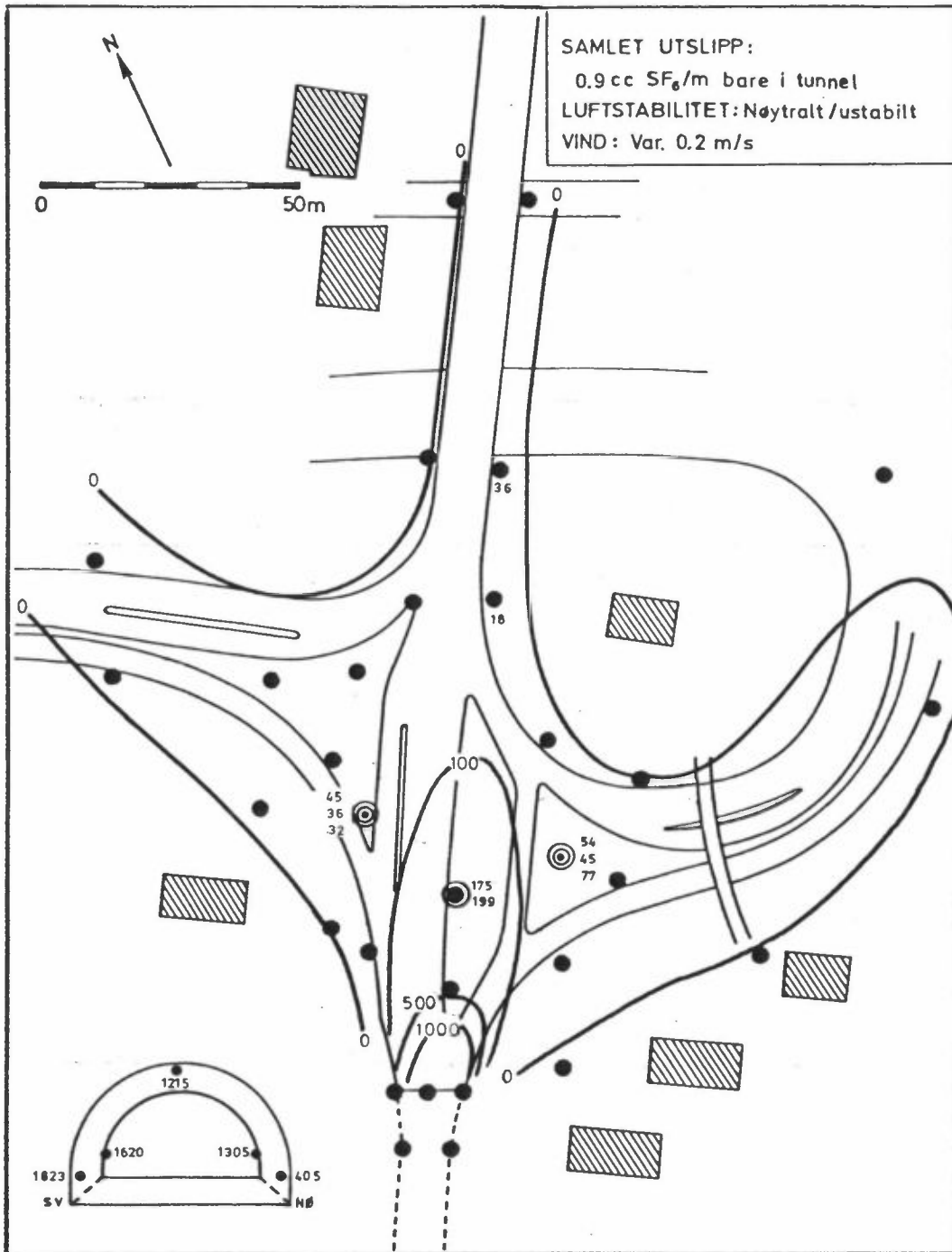
Figur B4: Midlere konsentrasjoner - ppt.  
Løvstakktunnelen 3.11.80.



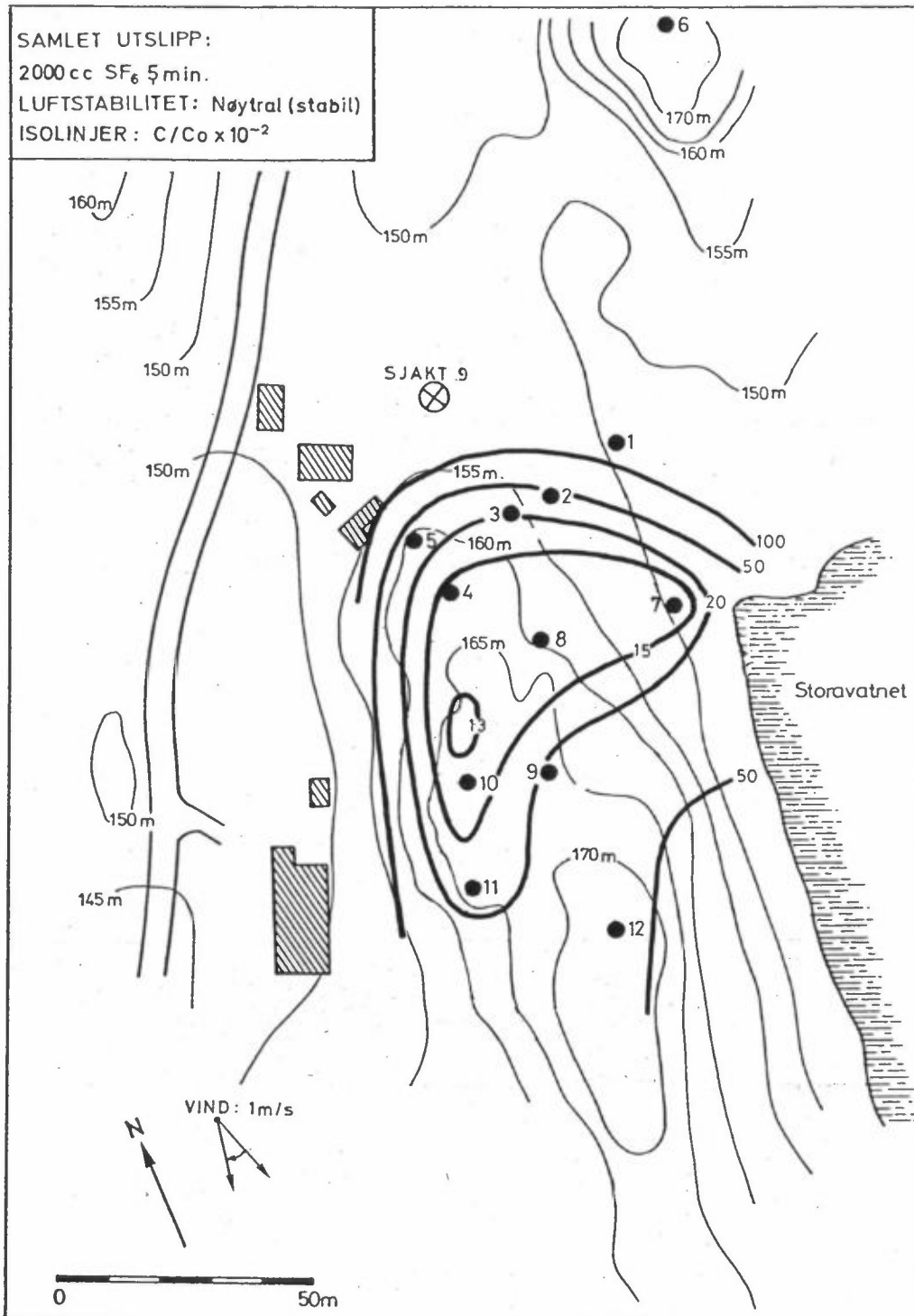
Figur B5: Midlere konsentrasjoner - ppt.  
Løvtakktunnelen 4.11.80.



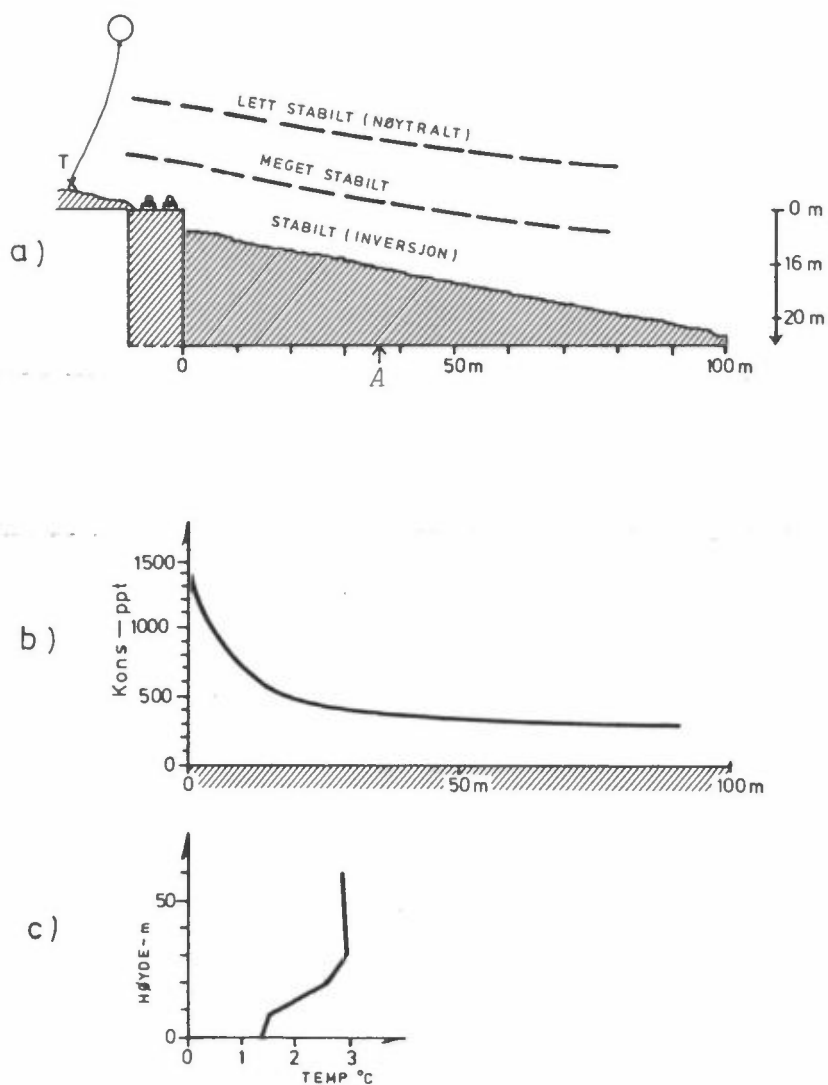
Figur B6: Midlere konsentrasjoner - ppt.  
Løvstakktunnelen 5.11.80.



Figur B7: Midlere konsentrasjoner - ppt.  
Løvstakktunnelen 6.11.80.

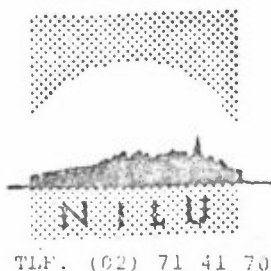


Figur B8: Løvstakktunnelen, sjakt 9.  
Fortynning  $F = C/C_0$   
 $C =$  målt,  $C_0 =$  utslipp.  
B: punkt for måleserie.



Figur B9: Sandviken 4.11.80.

- a) - Vertikalsnitt. T - punkt for temperatursondering.
- b) - Fordeling av middelkonsentrasjon med avstand.
- c) - Temperatursnitt i punkt T.
- A - punkt for måleserie.



# NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING

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

TLF. (02) 71 41 70

RAPPORTTYPE OPPDRAGSRAPPORT	RAPPORTNR. 37 /81	ISBN--82-7247-264-3
DATO AUGUST 1981	ANSV.SIGN. B. Ottar	ANT.SIDER 45
TITTEL Spredning av sporstoff fra vegtunneler i Bergen.		PROSJEKTLEDER K.E. Grønскеi
FORFATTER(E) Yngvar Gotaas		NILU PROSJEKT NR 23179
		TILGJENGELIGHET ** A
OPPDRAGSGIVER Hordaland Vegkontor		OPPDRAGSGIVERS REF.
3 STIKKORD (å maks.20 anslag)		
Vegtunnel	Sporstoff	Spredning
REFERAT (maks. 300 anslag, 5-10 linjer)		
<p>Ialt 7 spredningsforsøk med sporstoff er foretatt i tunneler i Bergen. Sporstoffet ble sluppet fra bil i fart. Resultatene viser at luftstrømmen ut tunnelen dominerer spredningen nærmest utløpet. Ti gangers fortykning ble målt i avstand 50 m - 150 m. Utslipp av sporstoff ble også foretatt langs vei og i lufts jakt.</p>		
TITLE Dispersion of tracer in roadtunnels in Bergen.		
ABSTRACT (max. 300 characters, 5-10 lines)		
<p>Dispersion experiments in road tunnels were performed in Bergen. SF<sub>6</sub> tracer was released from a moving car. Dispersion patterns close to the outlet are to a high degree determined by the outgoing jetlike airstream. A ten times dilution were observed at distances of 50 m to 150 m. Tracer releases were also done along the road and in a ventilation shaft.</p>		

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