

# Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter

**Marie Berge Holmen**

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Medveileder: Johan Halvarsson, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for energi- og prosessteknikk



EPT-M-2013-21

## MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Marie Berge Holmen

Våren 2013

Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter  
*Demand controlled ventilation and air quality using vertical discharge cowls*

### Bakgrunn og målsetting

For å redusere energibruken brukes behovsstyrt ventilasjon i stor utstrekning i nye bygninger og i eldre bygninger som rehabiliteres. Dette innebærer at friskluftsmengder og avkastmengder varierer med antall tilstedeværende i bygningen. For avkast av brukluft betyr det at hastigheten gjennom avkaståpningen vil variere.

For å oppnå best mulig luftkvalitet i bygningen er det viktig at luften ved friskluftsinntaket er renest mulig. En mulig forurensningskilde er luft som overføres fra avkaståpninger. I kandidatens prosjektoppgave er ulike løsninger og beregningsmetoder for utforming og plassering av avkast og luftinntak behandlet.

En mye brukt løsning for avkast er såkalte jethetter. Disse blåser luften vertikalt oppover med relativt høy hastighet for at overstrømning til nærliggende luftinntak unngås. Ved bruk av behovsstyrt ventilasjon vil imidlertid denne hastighet variere betydelig. Oppgaven går ut på å undersøke hva denne variasjonen betyr for luftkvaliteten i luftinntak.

### Mål

Målet med prosjektoppgaven er å finne fram til kriterier for design og bruk av jethetter for behovsstyrt ventilasjon med hensyn til samspill mellom tilstedeværelse, ytre værforhold og plassering av avkast og inntak.

### Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Litteraturstudie knyttet til inntak-/avkastdesign inklusive strømming rundt bygninger og utendørs luftforurensninger. Oppdatering av studiet gjort i prosjektoppgaven.
2. Planlegge og prøve ut metoder for feltmåling av luftstrøm fra jethetter og kortslutning til luftinntak.
3. Utføre målinger på bygninger med jethetter og behovsstyrt ventilasjon.
4. Sammenligne måleresultater med modeller fra prosjektoppgaven.
5. Vurdere om jethetter er egnet i kombinasjon med behovsstyrt ventilasjon, og hvordan de eventuelt bør dimensjoneres og plasseres. Plassering av luftinntak inkluderes i denne vurderingen.
6. Rapportering

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesssteknikk.

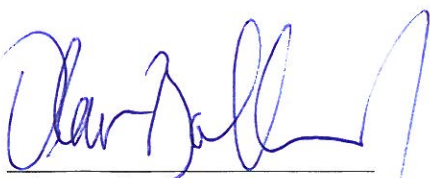
Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, instituttnavn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningsteknisk, varmeteknisk)  
 Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 14. januar 2013



Olav Bolland  
*Instituttleder*



Hans Martin Mathisen  
*Faglig ansvarlig/veileder*

Medveileder: Johan Halvarsson

## Sammendrag

I forbindelse med et økende fokus på energieffektive bygg har behovsstyrt ventilasjon blitt en vanlig ventilasjonsløsning. Selv om behovsstyring skal sikre lavt energiforbruk uten å gå på bekostning av inn klima er det mye diskutert om dette oppnås i praksis. En årsak er at behovsstyrt ventilasjon medfører svært varierende luftmengder, som innebærer store variasjoner i bevegelsesmengde over avkast. Til tross for de ulike strømningsforholdene som kan forekomme er jethetter generelt akseptert som en løsning hvor god luftkvalitet ved luftinntak oppnås til enhver tid. I den forbindelse er det behov for å undersøke om jethetter og behovsstyring i alle tilfeller medfører akseptabel luftkvalitet.

Det er i denne oppgaven kartlagt omlufts faktorer mellom luftinntak og avkast for tre ulike bygninger i Trondheim, hvorav to av bygningene benytter jethette og behovsstyrt ventilasjon. Oppgaven har fokusert på å undersøke hvordan omlufts faktor varierer med design og plassering av luftinntak og avkast, luftmengder og vindforhold.

I oppgaven ble det først utført et litteraturstudium om luftkvalitet, behovsstyrt ventilasjon og jethetter som avkast. Litteratur og forskningsstudier som omhandler spredning av avkastluft fra bygninger og vesentlige faktorer som spiller inn, med spesielt fokus på bevegelsesmengde over utløpet, ble presentert.

Videre ble det utført konsentrasjonsmålinger av sporgass i luftinntak og avkast på tre bygninger. Målingene ble utført ved varierende luftmengder og vindforhold. To ulike beregningsmetoder for fortykning av forurensninger ble benyttet for å sammenligne måleresultatene med teoretiske modeller. Resultatene ble deretter vurdert mot strømningssteori og veiledninger for plassering og design av luftinntak og avkast.

Måleresultatene viste betydelig lavere omlufts faktorer for bygningene som benytter jethette i kombinasjon med behovsstyrt ventilasjon enn på bygningen med kombinert hette for luftinntak og avkast. I tillegg var det store forskjeller i omlufts faktorer på de to bygningene med jethette og behovsstyring. Sannsynlige årsaker til reduksjonene i omlufts faktorer er høyere avkast, mindre resirkulasjonssoner og større bevegelsesmengde over utløpet. For anlegget med store bevegelsesmengder kan i tillegg kort avstand mellom luftinntak og avkast medføre lite omluft. De teoretiske beregningene av omlufts faktorer ga hovedsakelig høyere verdier enn feltmålingene. Beregninger av kastelengde er imidlertid anvendelig for å sammenligne ulike produkter og dimensjoner når jethettens og luftinntakets plassering, hastighetsprofil og vindforhold ikke tas i betraktning.

Det bør spesifiseres hva som menes med jetavkast i veiledninger da ulike jethetter medfører varierende bevegelsesmengde ved samme trykkfall. For å sikre at jethetter gir en jeteffekt med VAV bør det fastsettes et minimumskrav som medfører en viss bevegelsesmengde i hetten, enten i form av dokumentert kastelengde eller hastighet over utløp. Ulike tiltak for å oppnå større bevegelsesmengde til enhver tid er å kombinere VAV med CAV, øke tilført luftmengde uten tilstedeværelse eller sette prosjekterte luftmengder ved en lavere brukssamtidighet. Tiltakene kan medføre høyere trykkfall og energiforbruk, men muliggjør ivaretagelse av både energieffektivitet og god luftkvalitet.

## Summary

An increased focus on energy efficiency has led to enhanced use of demand controlled ventilation in buildings. Although the purpose is to achieve low energy consumption without detriment to the indoor climate, it is debated whether this is achieved in practice. Demand controlled ventilation leads to large variations in air flow rate, which causes considerable variety in exhaust momentum. Despite the fluctuating air flow which can occur, vertical discharge cowls are generally accepted as products which attend good air quality. This highlights the need for investigating whether vertical discharge cowls in combination with demand controlled ventilation result in compliance with existing presumptions.

This paper considers exhaust-to-intake dilution for three different buildings in Trondheim, of which two buildings use demand controlled ventilation and vertical discharge cowls. The focus in the paper is the amount of exhaust air being transported to the air intake due to building air intake and exhaust design, wind conditions and air flow rates.

For this project, a literature study on indoor air quality, demand controlled ventilation and vertical discharge cowls were first conducted. Literature and research studies on dilution of exhaust air and the importance of exhaust momentum were summarized.

Moreover, measurements of tracer gas concentrations in intake and exhaust air ducts at three different buildings were performed. The measurements were carried out at different wind conditions and air flow rates. Two methods for documenting dilution were verified by comparison with the measurement results. In addition, the results were assessed against flow theory and building guidelines for air intake and exhaust design.

Measurement results indicate higher dilution factors for the buildings which utilize vertical discharge cowls and demand controlled ventilation than the building with a combined unit for exhaust and air intake. Additionally, great disparity in dilution factors was shown for the two cases with vertical discharge cowls. Possible reasons for the dilution increase are higher exhaust momentum, smaller recirculation regions and higher exhaust stacks. In the case of high exhaust momentum, a short distance between building air intake and exhaust can cause increased dilution. The theoretical calculations gave substantially lower dilution factors than the measurements. Based on the results, none of the methods proved to be suitable for documenting dilution factors. Throw length calculations is however useful to compare different products and dimensions when the vertical discharge cowl and air intake location, velocity profile and wind conditions are not taken into account.

Building guidelines should specify the meaning of jet exhaust since different vertical discharge cowls lead to great diversity in exhaust momentum at same pressure drop. Criteria to ensure a high jet momentum of the exhaust should be determined, either as minimum throw length or exhaust velocity. Various measures to achieve greater momentum at all times is to combine VAV with CAV, increase the supply airflow for unoccupied rooms or set the maximum air flow at a lower occupancy. These measures may result in higher pressure drop and energy consumption, but makes preservation of both energy efficiency and air quality possible.

## Forord

Denne rapporten er utarbeidet i forbindelse med min masteroppgave ved Institutt for energi- og prosesssteknikk (EPT) ved NTNU høsten 2012. Oppgaven representerer avslutningen av fem veldig bra studieår i Trondheim.

Anledningen benyttes til å takke min hovedveileder ved NTNU, Hans Martin Mathisen, for faglig bistand under utarbeidelsen av rapporten. I tillegg vil jeg takke min medveileder, Johan Halvarsson, for god hjelp underveis. Oppgaven har vært praktisk krevende og mange personer har vært involvert for å få gjennomført forsøkene. Jeg ønsker derfor også å takke alle som har hjulpet meg i laboratoriet på EPT, samt driftspersonell ved NTNU og Charlottenlund ungdomsskole.

Til slutt vil jeg takke Marius Fortun Birkenes for all motivasjon og støtte!



---

Marie Berge Holmen  
Trondheim, 06.06.13





# Innhold

Sammendrag .....	III
Summary .....	IV
Forord .....	V
Innhold .....	VII
Figurer .....	IX
Tabeller.....	XI
Symboler .....	XII
1. Innledning .....	1
1.1    Kontekst .....	1
1.2    Bakgrunn.....	1
1.3    Omfang og oppbygning .....	2
1.4    Mål .....	2
2. Teori og begreper om ventilasjon .....	3
2.1    Luftkvalitet, forurensninger og ventilasjon.....	3
2.2    Omluft og jethetter .....	4
2.3    Behovsstyrt ventilasjon .....	5
2.4    Brukssamtidighet .....	7
2.5    Samtidighetsfaktor .....	8
3. Spredning av avkastluft fra bygninger .....	11
3.1    Introduksjon .....	11
3.2    Luftstrømmer rundt bygninger.....	12
3.3    Vindforhold .....	16
3.4    Utforming av avkast.....	20
4. Bevegelsesmengde .....	23
4.1    Introduksjon .....	23
4.2    Nærliggende bygninger og bebyggelsestetthet .....	23
4.3    Områder med høye forurensningskonsentrasjoner .....	24
4.4    Nedslag fra avkast .....	25
4.5    Nedslag fra takkonstruksjoner .....	25
4.6    Resirkulasjonssoner og avkast .....	25
5. Forskningsmetode .....	27
5.1    Forskningsobjekter.....	27

5.2	Ekspérimentelt oppsett.....	28
5.3	Forsøksprosedyre .....	29
5.4	Bearbeiding av måleresultater.....	31
6.	Beregninger med teoretiske modeller .....	33
6.1	Introduksjon .....	33
6.2	Fortynning .....	33
6.3	Kastelengde.....	34
7.	Resultater .....	37
7.1	NTNU Varmeteknisk – Testmålinger .....	37
7.2	NTNU Verkstedteknisk.....	38
7.3	Charlottenlund ungdomsskole.....	39
8.	Diskusjon .....	41
8.1	NTNU Varmeteknisk – Testmålinger .....	41
8.2	NTNU Verkstedteknisk.....	44
8.3	Charlottenlund ungdomsskole.....	48
8.4	Feilkilder .....	52
9.	Konklusjon.....	55
10.	Videreføring av arbeidet.....	57
11.	Referanser.....	59
12.	Vedlegg .....	i

# Figurer

Figur 1: Anbefalte avstander mellom luftinntak og avkast for vanlige avkast (SINTEF Byggforsk, 1999). .....	4
Figur 2: Samtidighetsfaktor for kontorlokaler (Halvarsson, 2012). .....	9
Figur 3: Luftstråle fra avkast plassert på tak (Wilson og Winkel, 1982). .....	11
Figur 4: Strømningsmønster rundt rektangulær isolert bygning (ASHRAE, c2009, kap. 24). .....	12
Figur 5: Strømningsmønster for fire ulike bygningsformer med og uten takkonstruksjon (Wilson, 1979). .....	13
Figur 6: Effekt av avstand mellom bygg og bygningshøyde på spredning av forurensning (Awbi, 2003). .....	14
Figur 7: Innvirkning av bygningsformer og vindforhold på forurensningskonsentrasjoner. ....	15
Figur 8: Effekt av bygningsavstand på forurensningskonsentrasjoner (Hajra og Stathopoulos, 2012). .....	16
Figur 9: Relativ konsentrasjon på taknivå med ulik vindhastighet i forhold til kritisk verdi (Wilson, 1982). .....	17
Figur 10: Strømningsmønstre over høye, flate bygninger for vindretning 90° og 45° på fasade (Wilson, 1979). .....	18
Figur 11: Vindrose for Trondheim fra år 2003 til 2012 (Meteorologisk Institutt, 2013a). .....	19
Figur 12: Resirkulasjonssoner og nødvendig avkashøyde for å unngå sonene (ASHRAE, c2011, kap. 45). .....	20
Figur 13: Bygningsform og resirkulasjonssoner (Wilson og Winkel, 1982). .....	21
Figur 14: Spredning av avkastluft mot nabobygg ved vindretning mot emitterende bygg (Wilson et al., 1998). .....	24
Figur 15: Plassering av luftinntak og avkast på forskningsobjektene. ....	27
Figur 16: Illustrasjon av jethetter (Swegon, 2012; TROX Auranor, 2012a). .....	28
Figur 17: Prinsipiell skisse av eksperimentelt oppsett. ....	28
Figur 18: Illustrasjon av spredningen til en fri sirkulær stråle (Skåret, 2000). .....	34
Figur 19: Beliggenhet for NTNU Varmeteknisk (Google, 2013). .....	iii
Figur 20: Bygningskonstruksjonen med plassering av luftinntak og avkast på NTNU Verkstedteknisk. ....	iv
Figur 21: Kritisk vindretning på NTNU Verkstedteknisk (Google, 2013). .....	v
Figur 22: Beliggenhet for NTNU Verkstedteknisk (Google, 2013). .....	vi
Figur 23: Bygningskonstruksjonen med plassering av luftinntak og avkast på NTNU Verkstedteknisk. ....	vii
Figur 24: Kritisk vindretning på NTNU Verkstedteknisk (Sweco Grøner, 2007; Google, 2013). .....	viii
Figur 25: Beliggenhet for Charlottenlund ungdomsskole (Google, 2013). .....	ix
Figur 26: Plassering av luftinntak og avkast på nordlig del av Charlottenlund ungdomsskole. ....	x
Figur 27: Kritisk vindretning på Charlottenlund ungdomsskole (Google, 2013). .....	xi
Figur 28: Illustrasjon av vindgenerator og kalibrering av vindmåler. ....	xiv
Figur 29: Forhold mellom spenning vindmåler og hastighet TSI VelociCalc Plus 8388 for kalibrering. ....	xv
Figur 30: Forhold mellom hastighet vindgenerator og hastighet TSI VelociCalc Plus 8388 for funksjonstest. ....	xvi
Figur 31: Forhold mellom differensialtrykk vindgenerator og TSI VelociCalc 8388 Plus trykkmåler. ....	xvii
Figur 32: Konverteringsdiagram fra trykk over avtrekksvifte til luftmengder. ....	xxii
Figur 33: Grafisk fremstilling av konsentrasjoner på dag 2 for NTNU Varmeteknisk. ....	xxxi
Figur 34: Plassering av vindmåler på NTNU Varmeteknisk. ....	xxxv
Figur 35: Vindforhold for NTNU Varmeteknisk på dag 1. ....	xxxvi
Figur 36: Vindforhold for NTNU Varmeteknisk på dag 2. ....	xxxvi
Figur 37: Vindhastighet for NTNU Varmeteknisk på dag 4. ....	xxxvi
Figur 38: Vindretning for NTNU Varmeteknisk på dag 4. ....	xxxvii
Figur 39: Vind og konsentrasjon i inntak på dag 4 for gassmengde 0,35 l/min og luftmengder 500 m <sup>3</sup> /h. ....	xxxvii
Figur 40: Bilder av strømning fra røykappull på NTNU Varmeteknisk. ....	xxxviii
Figur 41: Målepunkter på NTNU Verkstedteknisk. ....	xlii
Figur 42: Plassering av vindmåler på NTNU Verkstedteknisk. ....	xliv
Figur 43: Vindhastighet for NTNU Verkstedteknisk på dag 1. ....	xliv
Figur 44: Vindretning for NTNU Verkstedteknisk på dag 1. ....	xliv
Figur 45: Vindhastighet for NTNU Verkstedteknisk på dag 2. ....	xlv
Figur 46: Vindretning for NTNU Verkstedteknisk på dag 2. ....	xlv
Figur 47: Vindhastighet for NTNU Verkstedteknisk på dag 3. ....	xlv
Figur 48: Vindretning for NTNU Verkstedteknisk på dag 3. ....	xlvi

Figur 49: Målte vindforhold og konsentrasjon i luftinntak på dag 2 for store luftmengder. ....	xlvi
Figur 50: Bilder av strømning fra røykappull på NTNU Verkstedteknisk.....	xlvii
Figur 51: Plassering av vindmåler på Charlottenlund ungdomsskole. ....	lii
Figur 52: Vindhastighet for Charlottenlund ungdomsskole på dag 1.....	lii
Figur 53: Vindretning for Charlottenlund ungdomsskole på dag 1. ....	liii
Figur 54: Vindhastighet for Charlottenlund ungdomsskole på dag 2.....	liii
Figur 55: Vindretning for Charlottenlund ungdomsskole på dag 2. ....	liii
Figur 56: Vindhastighet for Charlottenlund ungdomsskole på dag 3.....	liv
Figur 57: Vindretning for Charlottenlund ungdomsskole på dag 3. ....	liv
Figur 58: Vindforhold og konsentrasjon i luftinntak på dag 3 for store luftmengder. ....	liv
Figur 59: Bilder av strømning fra røykappull på Charlottenlund ungdomsskole. ....	lv

# Tabeller

Tabell 1: Tids- og avstandsskala for vindforhold (SINTEF Byggforsk, 1999). .....	16
Tabell 2: Avkasthøyde over takflate og avstander mellom luftinntak og avkast. ....	27
Tabell 3: Målte omlufts faktorer på NTNU Varmeteknisk.....	37
Tabell 4: Beregnede omlufts faktorer for NTNU Varmeteknisk. ....	37
Tabell 5: Beregnede kastelengder og fortykning for NTNU Varmeteknisk. ....	37
Tabell 6: Målte omlufts faktorer på NTNU Verkstedteknisk. ....	38
Tabell 7: Beregnede omlufts faktorer for NTNU Varmeteknisk. ....	38
Tabell 8: Beregnede kastelengder og fortykning for NTNU Verkstedteknisk. ....	38
Tabell 9: Målte omlufts faktorer på Charlottenlund ungdomsskole.....	39
Tabell 10: Beregnede omlufts faktorer for Charlottenlund ungdomsskole. ....	39
Tabell 11: Beregnede kastelengder og fortykning for Charlottenlund ungdomsskole. ....	39
Tabell 12: Grenselagsparametere for NTNU Varmeteknisk. ....	iii
Tabell 13: Informasjon om luftinntak og avkast for takhatt på NTNU Varmeteknisk. ....	iv
Tabell 14: Grenselagsparametere for NTNU Verkstedteknisk. ....	vi
Tabell 15: Informasjon om luftinntak og avkast på NTNU Verkstedteknisk (Sweco Grøner, 2007; Swegon, 2012; Swegon, 2013).....	vii
Tabell 16: Grenselagsparametere for Charlottenlund ungdomsskole. ....	ix
Tabell 17: Informasjon om avtrekksvifte, luftinntak og avkast på Charlottenlund ungdomsskole (Sweco Grøner, 2005; TROX Auranor, 2012a). ....	x
Tabell 18: Resultater fra vindhastighetskalibrering. ....	xv
Tabell 19: Resultater fra funksjonstest av hastighetsmåler. ....	xvi
Tabell 20: Resultater fra funksjonstest av differensialtrykkmåler. ....	xvii
Tabell 21: Grenselagsparametere (ASHRAE, c2011, kap. 45).....	xx
Tabell 22: Målepunkter i sirkulære kanaler (Johansson og Svensson, 1998).....	xxi
Tabell 23: Korreksjonsfaktor for kanalform, $k_2$ , ved sirkulært tverrsnitt (Johansson og Svensson, 1998). ....	xxi
Tabell 24: Basekonsentrasjon målt på dag 3 for NTNU Varmeteknisk.....	xxix
Tabell 25: Lystgasskonsentrasjoner på NTNU Varmeteknisk for dag 1 og 2. ....	xxx
Tabell 26: Lystgasskonsentrasjoner på NTNU Varmeteknisk for varierende tilsatt gassmengde og konstante små luftmengder på dag 4.....	xxxii
Tabell 27: Korrelasjon mellom varierende mengde tilsatt lystgass og omlufts faktor for dag 4. ....	xxxiv
Tabell 28: Hastighetsberegning av luftmengder. ....	xxxiv
Tabell 29: Beregning av luftmengder med sporgassmålinger. ....	xxxiv
Tabell 30: Oppsummering av luftmengdemålinger for NTNU Varmeteknisk. ....	xxxv
Tabell 31: Hastighetsrater på NTNU Varmeteknisk. ....	xxxvii
Tabell 32: Basekonsentrasjon målt på dag 1 for NTNU Verkstedteknisk.....	xxxix
Tabell 33: Lystgasskonsentrasjoner på NTNU Verkstedteknisk for små luftmengder. ....	xl
Tabell 34: Lystgasskonsentrasjoner på NTNU Verkstedteknisk for store luftmengder.....	xli
Tabell 35: Hastighetsberegning av luftmengder for NTNU Verkstedteknisk. ....	xlii
Tabell 36: Beregning av luftmengder med sporgassmålinger på NTNU Verkstedteknisk. ....	xliii
Tabell 37: Oppsummering av luftmengdemålinger for NTNU Verkstedteknisk.....	xliii
Tabell 38: Hastighetsrater for NTNU Verkstedteknisk. ....	xlvi
Tabell 39: Basekonsentrasjon målt på dag 1 for Charlottenlund ungdomsskole.....	xlvi
Tabell 40: Lystgasskonsentrasjoner på Charlottenlund ungdomsskole for små luftmengder. ....	xlix
Tabell 41: Lystgasskonsentrasjoner på Charlottenlund ungdomsskole for store luftmengder. ....	l
Tabell 42: Beregning av luftmengder ved trykkmåling på Charlottenlund ungdomsskole. ....	li
Tabell 43: Beregning av luftmengder med sporgassmålinger på NTNU Verkstedteknisk. ....	li
Tabell 44: Oppsummering av luftmengdemålinger for Charlottenlund ungdomsskole. ....	lii
Tabell 45: Hastighetsrater for Charlottenlund ungdomsskole. ....	lv

# Symboler

$a$ : eksponent for grensesjikt [-]

$A$ : areal [ $m^2$ ]

$B$ : rate av luftmengde uten tilstedeværelse og med maksimale luftmengder [-]

$C$ : konsentrasjon [ $mg/m^3$ ]

$\tilde{c} = \tan \varphi$ : utvidelseskoeffisient [-]

$d$ : diameter [ $m$ ]

$D$ : fortynningsfaktor [-]

$f$ : omluftsfaktor [-]

$h, H$ : høyde [ $m$ ]

$\bar{i}$ : impulsfaktor [-]

$i$ : turbulensintensitet [-]

$I$ : integral [-]

$k$ : korreksjon høyde [ $m$ ]

$\tilde{k}$ : korreksjonsfaktor [-]

$\bar{k}$ : kastelengde [ $m$ ]

$L$ : lengde [ $m$ ]

$\dot{m}$ : gassstrøm [ $l/min$ ]

$M$ : hastighetsrate [-]

$OF$ : brukssamtidighet [-]

$P$ : trykk [ $Pa$ ]

$q$ : luftmengde [ $m^3/h$ ], [ $m^3/s$ ]

$r$ : radius [ $m$ ]

$S$ : samtidighetsfaktor [-]

$T$ : temperatur [ $^{\circ}C$ ]

$U$ : vindhastighet [ $m/s$ ]

$\bar{U}$ : gjennomsnittlig vindhastighet [ $m/s$ ]

$V$ : hastighet luftstråle [ $m/s$ ]

$\bar{V}$ : spenning [volt]

$x$ : horisontal retning/avstand fra ventilasjonsutløp og til et punkt nedstrøms [ $m$ ]

$y$ : horisontal avstand/retning [ $m$ ]

$z$ : vertikal avstand/retning [ $m$ ]

$\bar{z}$ : ruhetslengde [ $m$ ]

## Greske symboler

$\beta$ : hettefaktor [-]

$\delta$ : grenselagstykkelse [ $m$ ]

$\varepsilon$ : kontraksjonskoeffisient [-]

$\rho$ : tetthet [ $kg/m^3$ ]

$\sigma$ : standardavvik [%]

$\bar{\sigma}$ : størrrelse på kilde [ $m$ ]

$\varsigma$ : vertikal separasjon [ $m$ ]

$\omega$ : omdreininger per minutt [ $rpm$ ]

### **Suffiks**

*a: avkast*

*b: basetilfelle*

*CAV: konstante luftmengder*

*DCV: behovsstyrt ventilasjon*

*e: avkast*

*g: sporgass*

*høy: tilfelle med høye verdier*

*korr: korrigert verdi*

*krit: kritisk tilfelle*

*lav: tilfelle med lave verdier*

*met: meteorologisk stasjon*

*mg/m<sup>3</sup>: benevning mg/m<sup>3</sup>*

*min: minimum*

*maks: maksimum, prosjektert, dimensjonerende*

*n: vilkårlig tall*

*o: omgivelser*

*p: fra polarpunkt til utløp*

*ppm: benevning ppm*

*s: punkt langs luftstrålens senterlinje*

*t: tilluft*

*topp: høyeste punkt av luftinntak, resirkulasjonssoner og bygningskonstruksjoner på tak*

*TSI: hastighets – og trykkmåler, TSI VelociCalc Plus 8388*

*VAV: variable luftmengder*

*å: gjennomsnitt i løpet av et år*

*\*: friksjon*

*1,2,3 ...: nummerering av parametre*





# 1. Innledning

## 1.1 Kontekst

Denne masteroppgaven blir skrevet i en tid hvor det er stort fokus på å utvikle bygninger med lavt energibehov. Bygninger står i dag for omtrent 40 % av totalt energiforbruk i Norge og energieffektivisering kan medføre en betydelig reduksjon i denne andelen (Miljøfakta, 2013). Behovsstyrt ventilasjon er en av mange tekniske løsninger som benyttes for å redusere energiforbruket i bygninger og bruken av behovsstyrt ventilasjon forventes å øke fremover.

Samtidig som energieffektive bygninger er et dominerende tema, er det flere faktorer som impliserer at luftkvalitet vil ha økende betydning for helse, samt produktivitet og effektivitet på arbeidsplassen (Hanssen og Halvarsson, 2012). En stadig økende andel av befolkningen bor i byer og forurensede områder, samtidig som mennesker oppholder seg rundt 90 % av tiden innendørs i slike områder med mye forurensning. Allergi og astma er i dag de eneste barnesykdommene med økende forekomst, noe som knyttes til mer eksponering i forurensede miljøer (Bakke, 2012).

Norske byggeforskrifter har hatt en brå utvikling mot stadig strengere krav til energieffektive bygg. Selv om hensikten er å oppnå lavere energiforbruk uten at det får konsekvenser for innneklimaet, er det mye diskutert om dette fokuset i perioder har gått på bekostning av luftkvalitet og andre vesentlige innneklimaparametere. I senere tid har innneklima blitt vektlagt i større grad, men det er fortsatt behov for å vurdere om både energieffektivitet og innneklima blir ivaretatt for ulike tekniske løsninger.

## 1.2 Bakgrunn

Høsten 2012 ble det gjennomført et fordypningsprosjekt av Holmen (2012) som omhandler hvordan inntaks- og avkastløsninger bør utformes for å oppnå god luftkvalitet ved luftinntak. Ulike tekniske løsninger, utforming av bygninger og plassering ble vurdert med hensyn til luftkvalitet. I tillegg ble det gjort beregninger med ulike metoder og tekniske løsninger for hvor mye omluft fra avkastenheter som forventes å forekomme ved luftinntak. Denne masteroppgaven er en videreføring av arbeidet fra forrige høst.

I arbeidet rundt oppgaven ble det tydelig at jethetter er generelt akseptert som en løsning hvor det oppnås god luftkvalitet ved luftinntak, uavhengig av bruksmåte og innvirkning fra eksterne faktorer. Norske veiledninger gir i noen tilfeller fritak fra anbefalinger ved bruk av jethetter, blant annet hevder Byggdetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999) at "for jethetter er stor avstand mellom luftinntak og avkast ikke nødvendig". Dette er på tross av at virkemåten til jethetter vanligvis dokumenteres med teoretiske beregninger eller laboratorietester som baseres på strålens strømningsmønster i et isolert miljø. I dokumentasjonen tas det ikke hensyn til vind, turbulens eller andre faktorer som kan ha innvirkning på spredningen av forurensninger. Det settes heller ikke krav til bevegelsesmengde over utløpet for å sikre en jeteffekt. I den forbindelse er det behov for å undersøke om jethetter i praksis alltid medfører tilfredsstillende luftkvalitet, samt hvordan eksterne faktorer og varierende luftmengder virker inn på luftkvaliteten ved bruk av jethette.

### **1.3 Omfang og oppbygning**

I kapittel 2 til 4 presenteres innledningsvis teori om ventilasjon og behovsstyring, strømningsmønster fra avkast og bevegelsesmengdens betydning for omluft. I kapittel 5 foreligger forskningsmetoden som er benyttet i feltmålingene for å innhente data om omlufts faktorer. Beregningsmetodene fra fordypningsprosjektet av Holmen (2012) er presentert i kapittel 6. Resultatene fra både målinger og beregninger, samt diskusjon av disse, foreligger i henholdsvis kapittel 7 og 8. Til slutt følger konklusjon i kapittel 9 og videreføring av arbeidet i kapittel 10.

I fordypningsprosjektet av Holmen (2012) ble plassering og utforming av luftinntak vurdert, både ut ifra etablert teori og beregninger. I denne oppgaven ligger fokuset på utforming av avkast, men plassering av luftinntak og avkast er vurdert i helhet for bygningene hvor målinger ble utført. Teoridelen tar for seg forurensningskonsentrasjoner for ulike punkter nedstrøms fra avkast, blant annet ved nærliggende bygninger. Feltstudien er imidlertid begrenset til konsentrasjoner i kun ett målepunkt på de aktuelle bygningene. I tillegg er innvirkning fra nærliggende bygninger på strømningsmønsteret omtalt i teorien, men tillagt lite vekt i analysen grunnet bygningenes utforming og lokasjon.

Metodene fra fordypningsprosjektet benyttes kun for å vurdere metodenes validitet ved å sammenligne målte og beregnede verdier. For en analyse av modellenes oppbygning og begrensninger henvises det til Holmen (2012).

For mulig gjennomføring av studien ble det benyttet mye tid i laboratoriet til forberedelser av feltarbeidet. En rekke personer bidro til gjennomføring av målingene. Omfanget av oppgavens praktiske del er tildelt lite vekt i selve oppgavebesvarelsen, men dette er delvis gjenspeilet i vedleggene.

### **1.4 Mål**

Målet med oppgaven er å utarbeide kriterier for bruk av jethette i kombinasjon med behovsstyrt ventilasjon. Oppgaven har til hensikt å vurdere når det er hensiktsmessig å benytte jethetter, om jethetter i praksis medfører tilfredsstillende luftkvalitet og hvordan varierende luftmengder påvirker luftkvaliteten til enhver tid. Retningslinjer for bruk av jethette utarbeides på grunnlag av teori fra tidligere studier og resultater fra oppgaven.

## 2. Teori og begreper om ventilasjon

### 2.1 Luftkvalitet, forurensninger og ventilasjon

At mennesker oppholder seg i snitt 90 % av sin livstid innendørs impliserer at inneklimate er svært viktig for menneskers generelle velvære (Novakovic et al., 2007). I tillegg viser studier at menneskers komfort, helse og produktivitet blir påvirket av inneklimate (Nilsson, c2003). WHO (World Health Organization) definerer inneklimate ut ifra faktorene termisk, akustisk, atmosfærisk, mekanisk og aktiv miljø (Novakovic et al., 2007). Det atmosfæriske miljø er enstydig med innendørs luftkvalitet og er dels et uttrykk for forekomsten av forurensninger i luften. Siden dårlig luftkvalitet direkte kan medføre redusert helse, kroniske sykdommer og i de verste tilfeller dødsfall anses atmosfærisk miljø som en svært viktig faktor for inneklimateets kvalitet.

Det fins flere definisjoner av akseptabel innendørs luftkvalitet. Et fellestrekk er at brukernes oppfatning er avgjørende for hvor god luftkvaliteten anses å være. Dette impliserer at det vil være ulike krav til luftkvalitet for bygninger med forskjellige brukere og bruksmønstre (Hanssen og Halvarsson, 2012). I tillegg vil måling av forurensninger i luften kun gi informasjon om deler av begrepet luftkvalitet. ASHRAE definerer akseptabel innendørs luftkvalitet som:

*Luft hvor det er ingen kjente forurensninger av skadelige konsentrasjoner, slik det er bestemt av kompetente myndigheter, og hvor et vesentlig flertall (80 % eller flere) ikke uttrykker utilfredshet (Novakovic et al., 2007).*

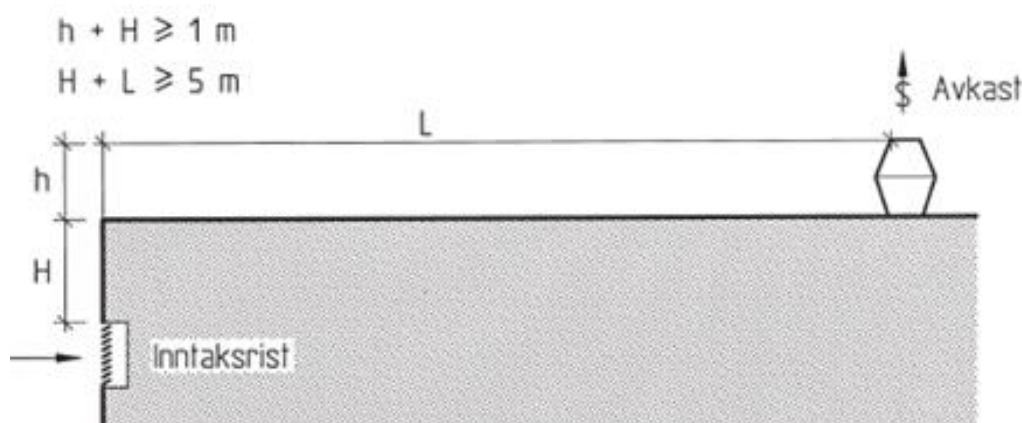
Selv om forurensninger vanligvis eksisterer i luft uten å være skadelig for mennesker, er det høye konsentrasjoner av stoffer eller tilstedeværelse i ugunstig miljø som gjør dem farlige. Awbi (2003) har klassifisert de vanligste innendørs forurensningene slik:

- Tobakksrøyk
- Lukt
- Karbondioksid
- Fukt
- Kjemiske forbindelser (formaldehyd, VOC, radon, ozon osv.)
- Aerosoler (mikroorganismer, støv osv.)

Forurensningskonsentrasjoner innendørs avhenger hovedsakelig av rengjøring og vedlikehold, bygningsmaterialer og inventar, forurensende prosesser i bygget, utendørs forurensningskilder og ventilasjon. For sistnevnte er det ikke tilstrekkelig å tilføre nok luftmengder til å oppnå et godt luftskifte og fjerning av forurensninger fra innendørs kilder. Det er i tillegg avgjørende at den tilførte luften er av god kvalitet. For mekaniske ventilasjonsanlegg er plassering og design av luftinntak og avkast vesentlig (REHVA, 2007). Luftinntak må plasseres slik at nærliggende forurensningskilder har liten innvirkning på luftkvaliteten ved inntaket. Et vanlig problem er at forurenset luft fra avkast forekommer i luftinntaket og i den videre presentasjonen vil det derfor fokuseres på avkast som forurensningskilde. For en mer omfattende beskrivelse av luftkvalitet, forurensninger og ventilasjon henvises det til Holmen (2012).

## 2.2 Omluft og jethetter

Avkast og luftinntak er ofte plassert i nærheten av hverandre på tak for å unngå store trykkforskjeller i ventilasjonsanlegget, for å benytte det tilgjengelige takarealet og for å muliggjøre varmegjenvinning til tross for bruk av lite kanaler og bygningsareal. Dette kan imidlertid medføre problemer med at avkastluft havner i luftinntaket slik at innendørs forurensninger forekommer i friskluften. Selv om forurensningskonsentrasjonen fortynnes før den når inntaksristen kan mengden omluft bli stor nok til at luftkvaliteten er uakseptabel. Omlufts faktoren betegner andelen av avkastluft som blir resirkulert i luftinntaket og blir anbefalt i Byggedetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999) til å ligge under 1 % i mindre bygninger. Det er ikke gitt noen anbefaling til maksimal omlufts faktor i større bygg, men akseptabel grenseverdi bør vurderes ut ifra hvilke forurensninger som forekommer i avkastluften og bruksområdet i lokalene som forsynes med friskluft fra det aktuelle luftinntaket. For vanlige avkast anbefaler Byggedetaljer 552.360 en høydeforskjell mellom luftinntak og avkast på 1 meter, hvorav avkast er plassert høyest. Anbefalt vertikal og horisontal avstand er vist i figur 1. Utforming av luftinntak og avkast er avgjørende for hvor mye omluft som forekommer og det vil senere i rapporten undersøkes nærmere hvilke faktorer som er av betydning for graden av omluft.



**Figur 1: Anbefalte avstander mellom luftinntak og avkast for vanlige avkast (SINTEF Byggforsk, 1999).**

Jethetter blir ofte benyttet i tilfeller hvor det er kort avstand mellom luftinntak og avkast som medfører høy risiko for omluft, eller hvor det stilles spesielt strenge krav til luftkvalitet. Jethetter er avkasthetter for utblåsning av luft med høy hastighet (TROX Auranor, 2012a). Hensikten med jethetter er å effektivt fjerne forurensninger fra bygg slik at risikoen for omluft reduseres (Mysen og Polak, 2001). Byggedetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999) påstår at jethette er den løsningen som gir best fortynning av avkastluften og minst omluft ved luftinntak. For jethetter gir Byggedetaljer 552.360 fritak fra anbefalingene til avstander som er vist i figur 1.

I følge Wilson et al. (1998) bør det benyttes høye hastigheter over utløp for å skape en jetstråle med høy fortynning når det er fare for at luftstrålen vil fanges i en turbulent sone fra en høyere nærliggende bygning. For de fleste bygninger i tettbebygde strøk vil det være fare for at dette inntreffer ved spesielle vindretninger. I følge ASHRAE (c2011, kap. 45) bør

hastigheter over utløp alltid være over 10 m/s for å oppnå en jetstråle med høy stigning og tilstrekkelig fortykning av forurensninger. Så høye hastigheter benyttes ikke i praksis for vanlige avkast, men kan oppnås med jethetter. Selv om jethetter er gunstig for luftkvaliteten i bygninger, begrenses bruken av investerings- og energikostnader, støy og vibrasjoner som løsningen medfører (Petersen et al., 2002b). Andre begrensninger kan være estetikk eller restriksjoner i byggehøyde.

Ved dimensjonering av jethette må to ulike hensyn betraktes; lavt trykktap over hetten og god luftkvalitet over luftinntak. Førstnevnte skal ivareta lave støynivåer og energieffektivitet ved å holde trykktap og dermed energikostnader til viftedrift på et akseptabelt nivå. Under prosjektering ivaretas kriteriet ved å fastsette akseptable verdier for maksimalt trykktap over jethetter, hvorav en vanlig anbefaling er 70 Pa (Swegon, 2013). Kriteriet for god luftkvalitet ivaretas ved å sette en minimumsgrense for trykktap over hetten. I bransjen er det imidlertid ikke samme fokus på minste akseptable trykktap over jethetten som det er for maksimal verdi (Swegon, 2013; TROX Auranor, 2012b). I tillegg er det store forskjeller i dimensjoneringsdiagrammer og trykktap som forekommer over hetten for produktene fra ulike produsenter. Trykktapet over hetten er for et spesifikt produkt avgjørende for hvilken bevegelsesmengde som oppnås over utløpet, men det maksimale trykktapet som aksepteres er vanligvis uavhengig av hvilken jethette som benyttes. Ved et bestemt trykktap vil dermed ulik bevegelsesmengde oppnås ut ifra valg av produkt og produsent.

### **2.3 Behovsstyrt ventilasjon**

Behovsstyrt ventilasjon (DCV) innebærer å variere den tilførte luftmengden gjennom ventilasjonsanlegget etter behov (Drangsholt, 1992). Hensikten er å minimere luftmengdene som tilføres og redusere energiforbruket til ventilasjon, uten at det går på bekostning av inn klimaet (Novakovic et al., 2007; Carter, 2005). Det fins ulike definisjoner av behovsstyrt ventilasjon, hvorav noen omfatter både konstante luftmengder (CAV) og variable luftmengder (VAV). I Norge er det imidlertid vanlig å benytte begrepet VAV synonymt med behovsstyrt ventilasjon, mens CAV-systemer ikke betraktes som DCV (Halvarsson, 2012). Denne definisjonen vil være gjeldende i den videre presentasjonen, slik at systemer hvor tilført luftmengde styres etter behovsvariasjoner er omfattet av begrepet behovsstyrt ventilasjon.

Ved å styre luftmengdene etter sensorer som er plassert i rommet oppnås behovsstyrt ventilasjon. For at behovsstyrt ventilasjon skal resultere i besparelser må et fåtall forurensningskilder dominere og variere i størrelse over tid (Novakovic et al., 2007). Luftmengdene kan styres ut ifra ulike indikatorer som tilstedeværelse, tid, CO<sub>2</sub>-konsentrasjon eller andre inn klimaparametere. I tillegg må indikatoren være mulig å detektere slik at luftmengdene kan varieres etter de signalene som til enhver tid registreres. Energibesparelsene ved bruk av behovsstyrt ventilasjon sammenlignet med CAV er størst i rom med varierende og tidvis høy personbelastning (Maripuu, 2009). I følge Mysen et al. (2005) er behovsstyrt ventilasjon spesielt gunstig i skoler med store åpne områder hvor personbelastningen kan variere mye i løpet av arbeidsdagen. Halvarsson (2012) hevder at det også er et stort energisparepotensial i å benytte behovsstyrt ventilasjon i kontorbygg. I begge bygningskategoriene er CO<sub>2</sub>, hovedsakelig fra menneskelig utånding, en dominerende

forurensningskilde hvor variasjonen i konsentrasjon ofte benyttes som indikator for styring av luftmengder.

Behovsstyrt ventilasjon kan baseres på ulike reguleringsprinsipper. Dersom tilstedeværelse er behovsindikator benyttes vanligvis en trinnvis regulering av tilførte luftmengder med to trinn (Mysen et al., 2005). Når personer er til stede i rommet vil maksimale luftmengder tilføres, mens dersom det ikke registreres personer reduseres luftmengdene til et bestemt nivå. En slik regulering medfører at kun to ulike luftmengder kan tilføres rommet og mengden er uavhengig av hvor mange personer som er til stede utover én person. For CO<sub>2</sub> som indikator er det mulig å regulere luftmengdene kontinuerlig eller i flere trinn. Ved tilstedeværelse vil CO<sub>2</sub>-nivået i rommet øke og de tilførte luftmengdene reguleres etter dette. CO<sub>2</sub>-nivået øker proporsjonalt med antall personer i rommet, slik at ved mange personer til stede kan større luftmengder benyttes enn dersom få personer befinner seg i rommet. Uten personbelastning vil luftmengder også i dette tilfellet reduseres til et bestemt minimumsnivå.

Besparelse i luftmengder ved å benytte behovsstyrt ventilasjon kan variere med behovsindikator. I en studie av Mysen et al. (2005) ble luftmengder i flere klasserom med et gjennomsnitt på 22 personer til stede, med et designnivå på 30 personer, beregnet over et døgn. Gjennomsnittlige luftmengder ved bruk av CO<sub>2</sub> og tilstedeværelse som behovsindikator var henholdsvis 43 % og 54 % sammenlignet med CAV. Studien sier ikke noe om variasjonen av luftmengder over tid, men resultatene viser at det er mulig å oppnå en betydelig reduksjon i luftmengder ved bruk av VAV i stedet for CAV. Størst forskjell i luftmengder mellom VAV og CAV oppsto med CO<sub>2</sub> som behovsindikator siden luftmengdene da styres kontinuerlig etter antall personer til stede i stedet for trinnvis. Så lenge personer befinner seg i rommet vil maksimale luftmengder tilføres når tilstedeværelse benyttes som indikator, og dette kan medføre en mye høyere tilførsel av luft enn det behovet tilsier.

Behovsstyrt ventilasjon er både et kostnads- og energieffektivt alternativ til ventilasjonssystemer som opererer med konstante luftmengder gjennom hele driftstiden (Fisk og De Almeida, 1998). Det er utført en rekke studier som bekrefter at VAV kan medføre store energibesparelser. I studien av Mysen et al. (2005) ble energiforbruk til ventilasjon i skoler ved å benytte CO<sub>2</sub> og tilstedeværelse som styringsprinsipper beregnet. Resultatene viste reduksjoner til henholdsvis 38 og 51 % av forbruket ved et CAV-anlegg. Dette representerer også delvis besparelsen i luftmengder. Sørensen (2002) simulerte energibesparelse for ulike behovsindikatorer og personbelastninger. Resultatene viste en betydelig energibesparelse sammenlignet med CAV, mellom 25 og 70 %. Fisk og De Almeida (1998) og Mysen et al. (2003) presiserer imidlertid at hvert system må vurderes opp mot bruksmønster, samt tekniske og bygningsspesifikke data, for å beregne kostnad- og energieffektivitet. For noen systemer kan de økte investeringskostnadene for kontroll og regulering medføre at behovsstyrt ventilasjon ikke er kostnadseffektivt, men at det uansett fører til energibesparelser. VAV muliggjør imidlertid økonomiske besparelser ved å dimensjonere aggregat og kanaler for mindre luftmengder basert på samtidighetsbetraktninger (Halvarsson, 2012). Kostnadseffektiviteten til et VAV-anlegg avhenger både av investering- og vedlikeholdskostnader, samt energipriser i brukstiden (Maripuu, 2009).

Selv om behovsstyrt ventilasjon fremstår som en god løsning for energibesparelser, må også innvirkning på luftkvalitet betraktes. Behovet for friskluft vurderes ofte ut ifra forurensningskilder i rommet, men forurensningskonsentrasjoner i friskluften er også vesentlig for hvilken luftkvalitet som oppnås innendørs. Denne forurensningskonsentrasjonen over luftinntaket kan variere med ulike luftmengder. Petersen og Ratcliff (1991) hevder i forbindelse med laboratorieavkast at konstante luftmengder over hele driftstiden er å foretrekke over variable luftmengder siden høye hastigheter over avkast bidrar til reduserte forurensningskonsentrasjoner. Selv om det settes strenge krav til avkastluft fra laboratorier, vil samme prinsipper gjelde for avkastluft med lavere forurensningsnivåer og mindre helseisiklo. Dersom det benyttes variable luftmengder bør laveste hastighet som forekommer imøtekomme de kriteriene som er satt til hastigheter over utløp (ASHRAE, c2011, kap. 45). I dag er imidlertid ofte praksis å designe ventilasjonsanlegg ut ifra de prosjekterte luftmengdene. Dette innebærer at maksimale luftmengder danner grunnlaget for de hensyn som blir tatt til luftkvalitet.

## **2.4 Brukssamtidighet**

Brukssamtidighet i en bygning er av stor betydning for å forutse hvordan et DCV-system vil fungere og for å utforme et optimalt anlegg. Det er sjelden at alle rom i et bygg benyttes samtidig, noe som medfører at for systemer med behovsstyrt ventilasjon er tilførte luftmengder vanligvis mindre enn summen av de maksimale luftmengdene i hele bygget. Antall personer i bygningen, hvor personene befinner seg og til hvilken tid er vesentlige parametere for bruksmønsteret (Halvarsson, 2012). Dette er avgjørende for hvilke besparelser som er mulig å oppnå med behovsstyrt ventilasjon og hvor store variasjoner i luftmengder som oppstår.

Det fins ulike måter for å angi brukssamtidighet, blant annet etter andel personer tilstede i bygget og etter andel soner som er i bruk (Halvarsson, 2012). Brukssamtidighetsfaktoren angir i begge tilfeller raten av faktisk bruk av lokalene til enhver tid sammenlignet med en referanseverdi. Referansen settes vanligvis til henholdsvis totalt antall personer som bygget er prosjektert for eller antall soner i bygget. Videre vil brukssamtidighet for soner benyttes dersom annet ikke er spesifisert.

Det er utført en rekke studier på brukssamtidighet for kontorbygg i ulike land. Maripuu (2009), Halvarsson et al. (2006) og Bernard et al. (2003) har alle undersøkt brukssamtidighet i kontorbygg. Studiene benyttet tilstedeværelse som behovsindikator og andel rom i bruk som brukssamtidighet, mens tidsperioden for forsøkene varierte mellom to uker og ett år. Resultatene fra studiene viser store avvik i brukssamtidighet, med gjennomsnittlige verdier i arbeidstiden mellom 13 % og 54 %. Dette skyldes delvis at det benyttes ulike forskningsmetoder og definisjoner. I tillegg er samtidighet avhengig av både bygningen og av virksomheten i bygget (Maripuu, 2009). Selv om alle byggene er klassifisert som kontorbygg kan det være store forskjeller, blant annet mellom industri og universiteter. Ulike styringsprinsipper for ventilasjonsanleggene kan også medføre ulikheter. I målingene utført av Halvarsson og Maripuu er signaler fra bevegelsesdetektor brukt for detektering av tilstedeværelse. Disse bruker en tidsforsinkelse, det vil si at det løper en tid fra den siste detekterte bevegelse frem til at ventilasjonen reduseres. Større tidsforsinkelse vil medføre en

høyere målt brukssamtidighet enn den reelle personbelastningen tilsvarer (Halvarsson, 2012). Selv om studiene har store forskjeller, bekrefter resultatene at det er betydelig sparepotensial i å variere luftmengder etter brukssamtidighet.

Få studier er utført på brukssamtidighet i skolebygg. Mysen et al. (2005) undersøkte norske grunnskoler ved å måle andel elever tilstede. Gjennomsnittlig brukssamtidighet i alle klasserom i skoletiden var 94 %. Faktoren ble beregnet til 74 % dersom tilstedeværelsen ble målt i forhold til antall personer klasserommene var designet for i stedet for antall elever i klassen. Faktoren kan ikke direkte sammenlignes med resultater for kontorbygg, siden det benyttes brukssamtidighet for henholdsvis personer og soner. Forfatterne konkluderer imidlertid med at det er store sparepotensial i skolebygg.

## 2.5 Samtidighetsfaktor

For å estimere variasjoner i luftmengde og energibesparelser ved bruk av behovsstyrt ventilasjon kan en samtidighetsfaktor, som er en funksjon av brukssamtidighet, benyttes. Samtidighetsfaktoren er raten mellom tilførte luftmengder på et tidspunkt og nødvendige luftmengder når brukssamtidigheten er 100 % (Halvarsson, 2012), forutsatt at luftmengdene styres med tilstedeværelse eller CO<sub>2</sub> som behovsindikator. Det presiseres at samtidighetsfaktor ikke nødvendigvis er synonymt med andelen tilført luftmengde i forhold til prosjektert luftmengde, siden maksimal luftmengde kan velges til en lavere brukssamtidighet enn 100 %. Maripuu (2009) målte blant annet en maksimal brukssamtidighet på 70 %, som muliggjør betydelige besparelser i dimensjonering av ventilasjonsanlegg ved å sette maksimale luftmengder mindre enn ved brukssamtidighet på 100 %. Dette innebærer imidlertid at dersom samtidigheten for noen tidspunkt er høyere enn denne valgte verdien vil ikke ventilasjonsanlegget være i stand til å levere nødvendige luftmengder til bygget ved akseptabelt trykkfall.

Variasjonene i luftmengder som kan forekomme ved behovsstyrt ventilasjon er avhengig av anleggets spesifikasjoner og bruksmønsteret i bygget. For systemer med bevegelsesdetektorer, trinnvis styring i to trinn og like luftmengder i alle soner definerer Mysen et al. (2003) samtidighetsfaktoren som:

$$S = OF + (1 - OF) \cdot B \quad (1)$$

$$B = \frac{q_{min}}{q_{maks}} \quad (2)$$

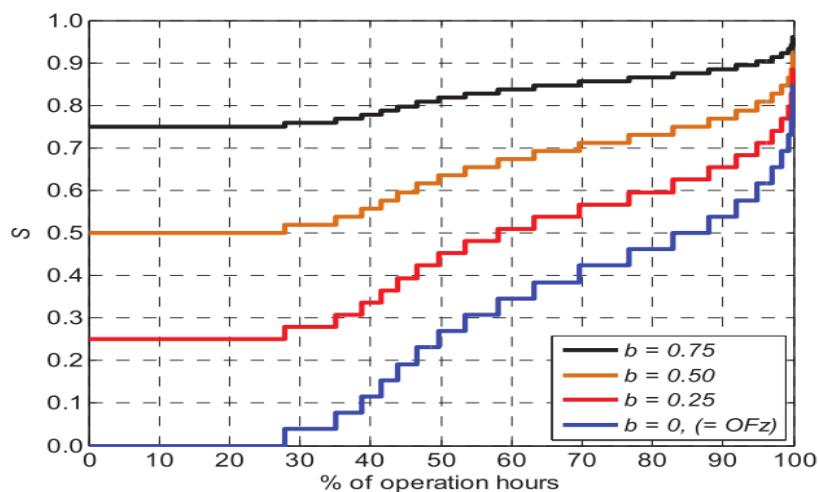
Dersom maksimale luftmengder er satt ved brukssamtidighet på 100 % er luftmengdene:

$$q_{DCV} = q_{CAV} \cdot S \quad (3)$$

Formlene kan benyttes for systemer med ulike luftmengder i sonene ved at samtidighetsfaktoren beregnes for hver enkelt sone for deretter å finne total samtidighetsfaktor. Dersom det benyttes CO<sub>2</sub>-sensorer som indikator vil imidlertid beregning av samtidighetsfaktor kreve dynamiske beregninger (Halvarsson, 2012). Dette vil ikke omtales nærmere i denne rapporten.



De fleste studier som omhandler behovsstyrt ventilasjon og samtidighet fokuserer på energibesparelser og det er funnet lite forskning som er konsentrert rundt variasjon i luftmengder over tid. Halvarsson (2012) kartla imidlertid brukssamtidighet for et kontorbygg i Norge over et år og benyttet resultatene til å beregne samtidighetsfaktoren etter formel (1). Varighetskurven i figur 2 viser hvordan samtidighetsfaktoren varierer i kontorlokalene. Det kommer tydelig frem at luftmengdene som forekommer er sterkt avhengig av raten mellom luftmengdene uten og med tilstedeværelse, som tilsvarer faktor  $b$  i figuren. Dersom lufttilførselen stenges av når det ikke er personer til stede, slik at  $B = 0$ , vil samtidighetsfaktoren være enstydig med brukssamtidigheten som kan variere mellom 0 og 1. Hvis minimumsluftmengder settes til 50 % av maksimale luftmengder, det vil si  $B = 0,5$ , kan samtidighetsfaktoren aldri bli lavere enn 0,5. Dette viser at minimumsluftmengder som tilføres uten personbelastning er avgjørende for hvor store variasjoner som forekommer i luftmengdene i ventilasjonsanlegget og hvilke besparelser i luftmengder og energiforbruk som kan oppnås.



**Figur 2: Samtidighetsfaktor for kontorlokaler (Halvarsson, 2012).**

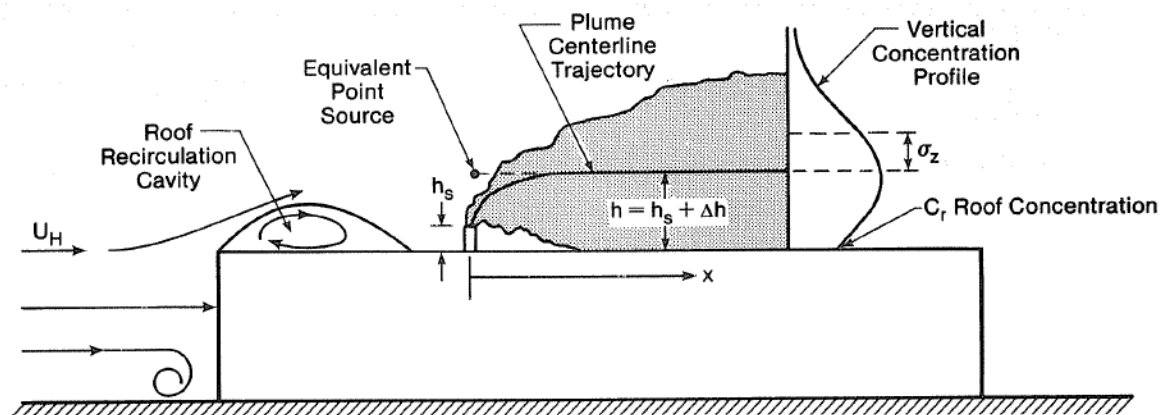


## 3. Spredning av avkastluft fra bygninger

### 3.1 Introduksjon

Hvordan forurenset avkastluft sprer seg i omgivelsene er et komplisert fenomen som det er utført atskillige studier på. De komplekse strømningsforholdene som kan oppstå rundt bygninger og de mange faktorene som virker inn på strømmingen medfører at det er utfordrende å forutse hvor forurensete soner vil oppstå og dermed bestemme optimal plassering og utforming av luftinntak og avkast. Selv om anlegget er godt prosjektert for normale forhold, kan avkastluft i tilfeller med andre luftmengder eller vindforhold medføre et ugunstig strømningsmønster slik at forurensninger havner i luftinntak. En innføring i design og plassering av luftinntak og avkast for å oppnå lave forurensningsnivåer er gitt av Holmen (2012).

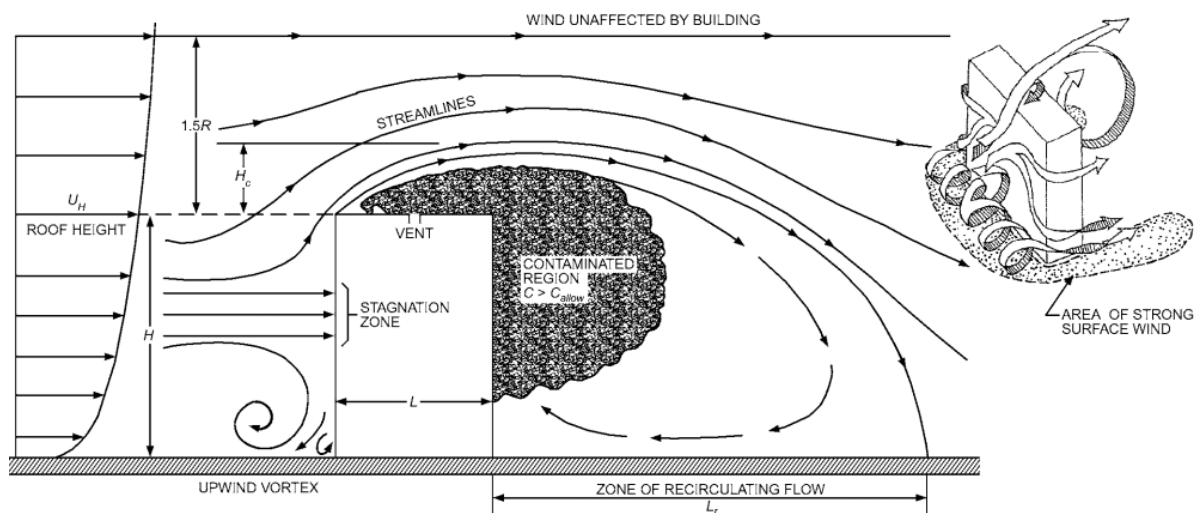
I figur 3 er vanlig strømningsmønster fra utløp vist for en rektangulær isolert bygning med vindretning normalt på fasade (Wilson og Winkel, 1982). En innblanding av omliggende luft medfører at luftstrålen utvides og forurensningskonsentrasjonen fortynnes med økt avstand fra utløp. Vindforhold og eventuelt andre strømninger medfører en avbøyning av strålen fra vertikal til horisontal retning. I de fleste tilfeller er imidlertid bygninger lokalisert i et bebygget strøk eller i et område med trær eller andre hindre som påvirker strømningsmønsteret før, over og etter bygningen. I tillegg har de fleste bygg kompliserte former som medfører endring i strømningsmønsteret og forekomst av turbulente områder, såkalt resirkulasjonssoner. En slik sone er vist på takflaten til venstre i figur 3. I sonene kan forurensninger fanges i turbulente strømmer eller virvler og videre medføre en strøm av forurensninger mot luftinntak. Resirkulasjonssoner kan oppstå etter alle hindre som medfører endring i strømningsmønsteret, men de vanligste problemsonene er bak bygningskonstruksjoner og teknisk rom, samt ved fasader. Størrelsen av sonene avhenger av bygningens eller hinderets dimensjoner, hovedsakelig bredde og høyde, og kan beregnes etter en metode presentert i ASHRAE Handbook - HVAC Applications (ASHRAE, c2011, kap. 45). Slike momenter vil medvirke til andre strømningsmønstre enn det som fremkommer av illustrasjonen. Videre vil derfor faktorer som kan påvirke strømmingen fra avkast presenteres.



Figur 3: Luftstråle fra avkast plassert på tak (Wilson og Winkel, 1982).

### 3.2 Luftstrømmer rundt bygninger

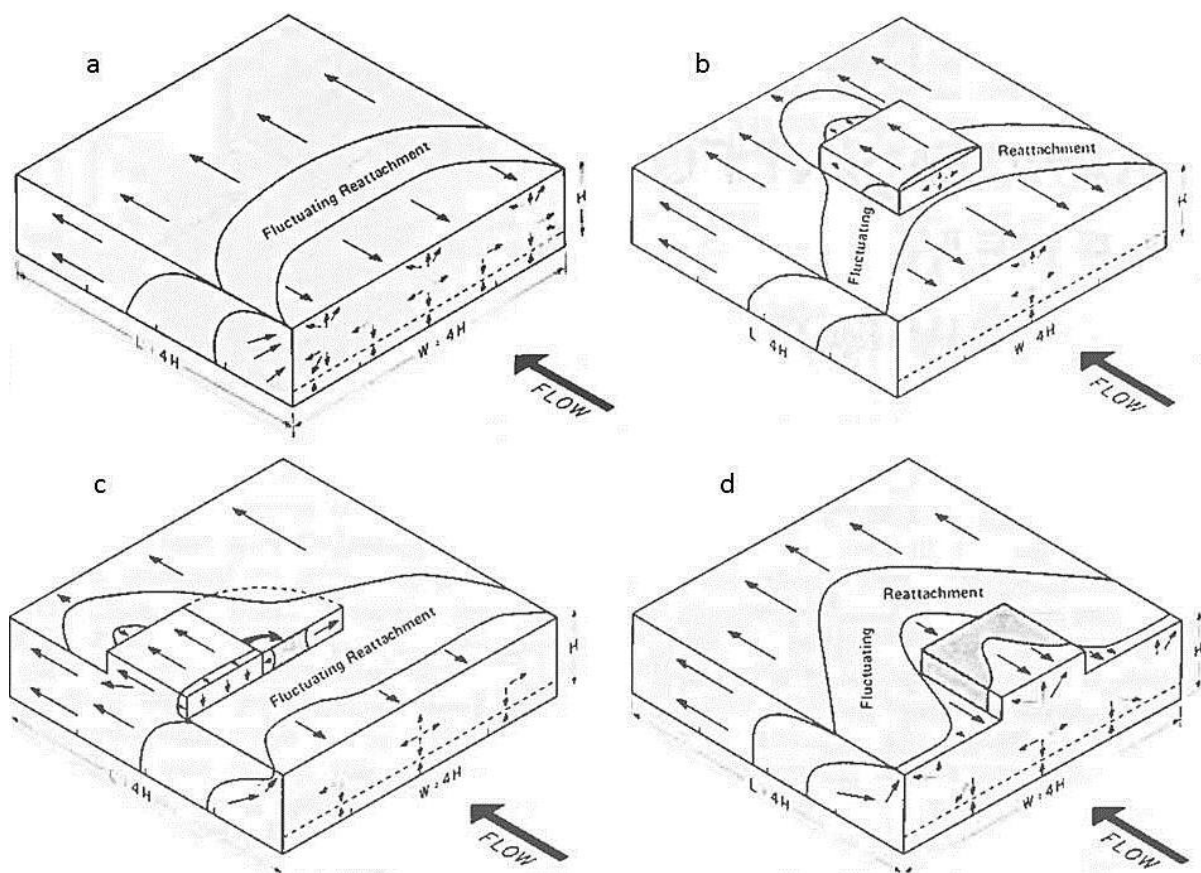
Bygninger og andre hindringer påvirker luftstrømmer i stor grad. Det er utført en rekke studier i nyere tid som omhandler strømningsmønstre rundt isolerte bygninger hvorav etablerte resultater er oppsummert i ASHRAE Handbook - Fundamentals (ASHRAE, c2009, kap. 24). Figur 4 viser hvordan luftstrømmer som støter normalt på en isolert rektangulær bygning endres grunnet bygningskonstruksjonen. Før bygningen er friksjon grunnet overflateruhet på bakken årsak til at hastigheten på luftstrømmene øker med høyde over bakkenivå. Hastighetsprofilen gir en trykkforskjell som ved sammenstøt fører til at de nedre luftstrømmene bøyes nedover og danner høye hastigheter og turbulente områder på bakken. Slike soner vil ofte ha en høy forurensningskonsentrasjon siden forurensninger på bakkenivå vil bevares i resirkulasjonssonen. Luftstrømmene vil etter hvert bevege seg på siden og videre til baksiden av bygget hvor forurensningene kan legge seg på grunn av en bakevjeeffekt. Slik kan det forekomme høye forurensningskonsentrasjoner nært bakkenivå rundt hele bygget og plassering av luftinntak anbefales derfor med en minimumshøyde over bakken.



Figur 4: Strømningsmønstre rundt rektangulær isolert bygning (ASHRAE, c2009, kap. 24).

Trykkforskjellen på fasaden medfører også at øvre luftstrømmer bøyes opp over taket og videre bøyes av til baksiden av bygget hvor det legger seg i en resirkulasjonssone. Dersom avkast er plassert på tak og luftinntak er plassert i nedstrøms vindretning kan luftstrømmene føre forurenset avkastluft til luftinntaket. Dette vil være tilfellet i figur 4 dersom inntak plasseres på tak eller fasade i det forurensete området fra avkastluften merket "contaminated region". Luftinntak bør plasseres på den siden av bygningen som vender mot vinden i tilfeller hvor dette forurensete området kan oppstå. Plasseringen kan imidlertid gi utfordringer med varierende trykk over inntaksrist plassert på vindutsatt fasade, spesielt på øvre del av bygningen. Dette påvirker vifteeffekten på inntakssiden av ventilasjonsanlegget (Rock og Moylan, 1999). Det optimale er å plassere luftinntak i et område som både er lite vindutsatt og hvor det ikke forekommer en opphopning av forurensning, men dette kan være utfordrende i praksis siden resirkulasjonssonen ofte oppstår i skjermede områder uten vind. I tillegg vil det variere hvilken fasade resirkulasjonssonen legger seg ved, siden det avhenger av vindretningen til enhver tid.

For kompliserte bygningsformer kan strømningsmønsteret avvike betraktelig fra det som fremgår av illustrasjonen. Generelt vil utstikkere og andre avvik fra bygningskroppen føre til at strømningslinjer bøyes av og at resirkulasjonssoner oppstår. Blant annet kan U-formede bygninger medføre mye turbulens og en opphopning av forurensninger i området omsluttet av bygningen (ASHRAE, c2011, kap. 45). Wilson (1979) utførte en vannkanalstudie på et utvalg bygningsformer med flate tak for å undersøke forskjeller i strømningsmønstre grunnet ulike konstruksjoner. For en rektangulær bygning med og uten takkonstruksjon er resultatene vist i figur 5. Det første området er resirkulasjonssonen som oppstår grunnet avbøyning av strømningslinjer langs fasaden og over tak hvorav den turbulente strømmingen i sonen er angitt ved at strømmingen går motsatt vei av vindretningen. “Fluctuating reattachment” angir området hvor den turbulente sonen opphører slik at strømningslinjene videre vil følge takflaten (se figur 3). Illustrasjonen viser at takkonstruksjoner kompliserer strømningsmønsteret over bygninger i stor grad og at resirkulasjonssonene varierer strekt med plassering av takkonstruksjonen. En av årsakene til at strømningsmønsteret påvirkes i så stor grad er at det oppstår et nedslag av luft bak konstruksjonen. I følge ASHRAE (c2011, kap. 45) forekommer nedslag når luftstrømmer med lav hastighet trekkes nedover grunnet undertrykk ved takflaten.



**Figur 5: Strømningsmønster for fire ulike bygningsformer med og uten takkonstruksjon (Wilson, 1979).**

Strømningsmønstre rundt bygninger har stor innvirkning på hvordan forurensninger sprer seg. Thompson (1993) utførte en vindtunnelstudie av hvordan spredningen fra punktkilder med ulike plasseringer påvirkes av et nærliggende bygg. Resultatene viser at bygningen har stor innvirkning på konsentrasjoner både i tilfeller med forurensningskilder lenge før, over og like etter bygget. Gupta et al. (2012b) har med en vindtunnelstudie undersøkt effekten av å plassere en takkonstruksjon før avkast på tak for en isolert bygning. Resultatene viser at konstruksjonen kan medføre høyere forurensningskonsentrasjoner ved luftinntak plassert nedstrøms for utløpet. Dette kan også forklares med nedslagseffekten bak takkonstruksjonen. Effekten øker med skrå vindhastigheter, bredde på takkonstruksjonen og for lave bygninger hvor resirkulasjonssonen på tak er mindre. Hajra et al. (2010) sammenlignet tilsvarende situasjoner med ulike beregnings- og simuleringsmodeller, samt en vindtunnelstudie, for fortynning av forurensninger. Også disse resultatene viste at forurensningskonsentrasjon i nedstrøms luftinntak øker med tilstedeværelse av en takkonstruksjon. Forfatteren forklarer resultatene med at takkonstruksjoner medfører mer turbulens som hindrer luftstrålens spredning.

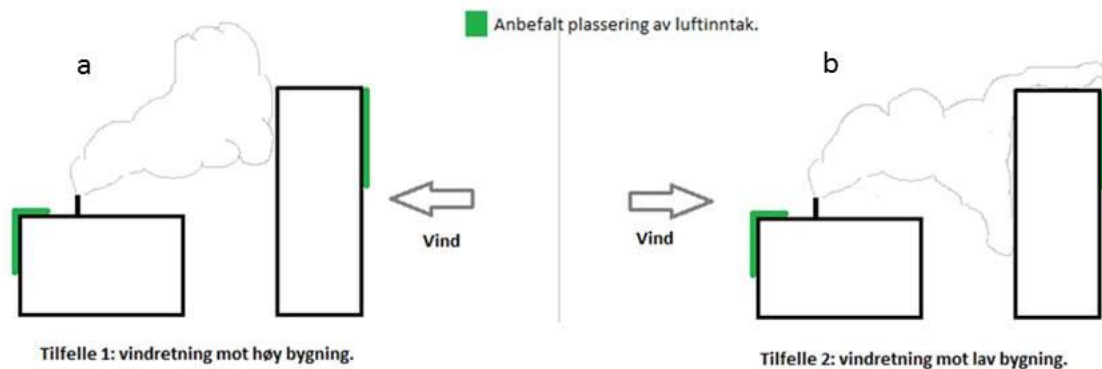
For uisolerte bygninger kan også strømningsmønsteret vise store avvik fra situasjonene som oppstår for isolerte bygg. I en studie utført av Nazridoust og Ahmadi (2006) ble spredningen av forurensning i et tettbebyggt område simulert med en todimensjonal modell. Resultatene viser at bygningshøyde og avstand mellom bygninger er avgjørende for om resirkulasjonssoner dannes mellom bygg. For at forurensninger som forekommer ved bakkenivå skal fortynnes og føres bort må luftstrømmer som beveger seg over bylandskapet ha plass til å trenge ned mellom bygninger. Tilfellet hvor luftstrømmene ikke trenger ned er illustrert til venstre i figur 6, mens en situasjon hvor det oppnås luftskifte er vist til høyre. Dersom luften ikke strømmer ned til bakkenivå kan det oppstå høye forurensningskonsentrasjoner mellom bygningene helt opp til taknivå. Dersom avkastluft fra ventilasjon føres fra utløp på tak og bak bygningen, slik som det er illustrert i figur 4, kan også disse forurensningene akkumuleres i området.



**Figur 6: Effekt av avstand mellom bygg og bygningshøyde på spredning av forurensning (Awbi, 2003).**

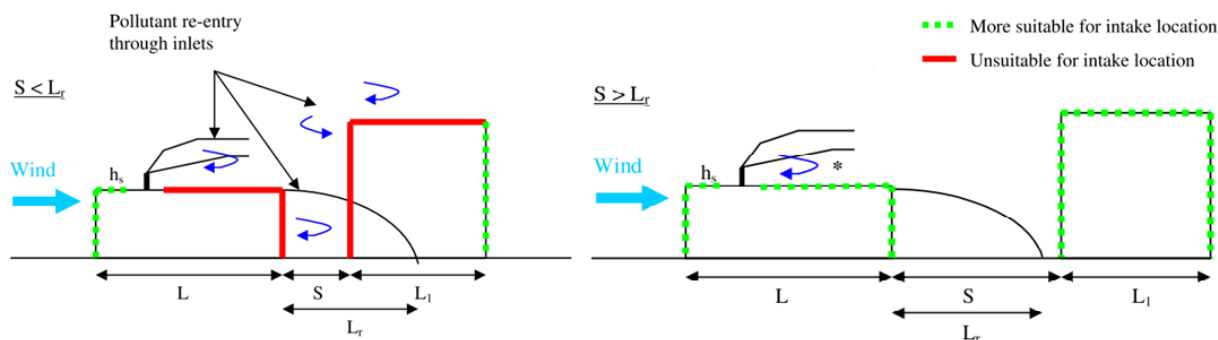
Ventilasjonsavkast fra nærliggende bygninger kan ha en betydelig effekt på forurensningskonsentrasjoner rundt bygninger. I en studie av Lateb et al. (2011) ble det utført simuleringer på hvordan avkast fra en lav bygning påvirker forurensningskonsentrasjonene rundt en høy bygning. I studien ble to ulike vindretninger betraktet; normalt på fasaden til den høyeste bygningen med den lave bygningen nedstrøms og med en vindretning motsatt vei. Resultatene viser at forurensningene vil legge seg langs fasaden på den høyeste bygningen i begge tilfeller, som illustrert i figur 7. Figuren er basert på en illustrasjon av Petersen et al. (2002a). For vindretning mot det høye bygget vil bygningen fungere som en skjerm og gi et

trykkfall på baksiden av bygningen i forhold til vindretningen. Avkastluft som slippes fra tak på den lave bygningen vil legge seg langs fasaden på det høyere bygget, selv om vindretningen tilsier at strømmingen beveger seg motsatt vei. Med vindretning normalt på den lave bygningen er det vinden som fører forurensningene mot fasaden på det høye bygget. Resultatene stadfester at det generelt er vanskelig å unngå at avkast for en lavere bygning påvirker luftkvaliteten rundt nærliggende bygninger (Petersen et al., 2002a). For et tilfelle hvor den høyeste bygningen emitterer forurensninger mot en lav bygning vil det imidlertid oppnås god fortykning av forurensningene før luftstrålen når den lave bygningen. Dette er bekreftet i en vannkanalstudie av Wilson et al. (1998), hvor det også kom frem at avstand mellom byggene har neglisjerbar innvirkning på de forurensningskonsentrasjonene som oppstår over laveste bygning. Motsatt vindretning vil være enda mer gunstig for strømningsforholdene siden den lave bygningen får høyeste bygning til å virke mindre slik at resirkulasjonssonen på tak reduseres.



**Figur 7: Innvirkning av bygningsformer og vindforhold på forurensningskonsentrasjoner.**

Hajra et al. (2011) og Hajra og Stathopoulos (2012) utførte vindtunnelstudier på hvordan situasjonen illustrert i figur 7 innvirker på forurensningskonsentrasjoner ved den emitterende bygningen, for henholdsvis tilfelle a og b. Studiene ble utført for ulike høyder og bredder av det ikke-emitterende bygget og varierende avstand mellom bygningene. I begge tilfeller er høyden av bygget og avstanden mellom bygningene kritisk for forurensningskonsentrasjonen rundt det emitterende bygget i forhold til om det var isolert. I tilfelle a, med vindretning mot det ikke-emitterende bygget, oppstår det høyere konsentrasjoner ved den emitterende bygningen med økt bredde og høyde av det ikke-emitterende bygget siden dette vil medføre mer skjerming og større resirkulasjonssoner. En avstand mellom bygningene som overstiger lengden på resirkulasjonssonen medfører lavere konsentrasjoner enn ved kortere avstander siden forurensningene da unnslipper de turbulente sonene. I tilfelle b, med vind i retning av den emitterende bygningen, er også høyde og bredde avgjørende for spredningen av forurensninger siden små bygninger vil være en mindre hindring for spredningen av luftstrålen. Det er vesentlig for forurensningskonsentrasjonen om det ikke-emitterende bygget befinner seg i det andre byggets resirkulasjonssone. Dersom avstanden mellom bygningene er kort vil forurensningene forbli i resirkulasjonssonen slik at det oppstår høye konsentrasjoner ved den emitterende bygningen. Effekten av avstand mellom bygninger på forurensningskonsentrasjoner er vist i figur 8.



**Figur 8: Effekt av bygningsavstand på forurensningskonsentrasjoner (Hajra og Stathopoulos, 2012).**

### 3.3 Vindforhold

Vindforhold har stor betydning for hvordan forurensninger spres seg både lokalt og globalt. Tabell 1 viser en oversikt over de vindforholdene som kan påvirke forurensningene i et område og i hvilke avstander og tidsskalaer de opptrer (Byggdetaljer 552.360, 1999). Forurensninger fra globalskala har liten betydning for ventilasjonsløsninger siden konsentrasjonene fra denne skalaen vil være homogene over et stort område. Mikro- og mesoskalaforurensninger vil imidlertid ha større innvirkning på den lokale luftkvaliteten og har stor relevans ved design og plassering av luftinntak og avkast. Dette innebærer også at vindforholdene på mikro- og mesoskala er avgjørende for forurensningskonsentrasjonene som vil oppstå i et område. Også andre meteorologiske forhold som temperatur og fuktighet kan virke inn på strømmingene.

**Tabell 1: Tids- og avstandsskala for vindforhold (SINTEF Byggforsk, 1999).**

	Tidsskala	Avstandsskala
Mikroskala	1 s – 1 t	1 mm – 1 km
Mesoskala	1 t – 12 t	1 km – 100 km
Makroskala	12 t – 1 uke	100 km – 10 000 km
Globalskala	1 uke –	10 000 km

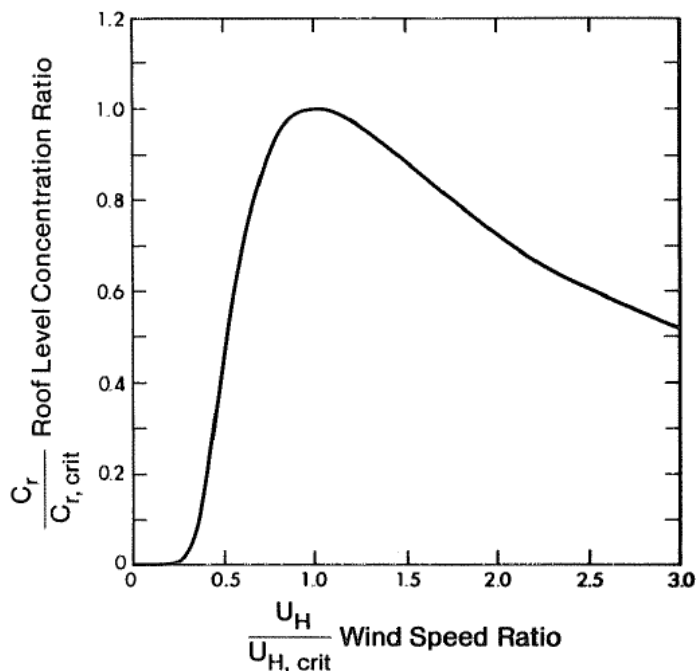
Vind er den klimaparameteren med størst variasjoner i lokalt klima og styrken kan på få sekunder svinge  $\pm 50$  % rundt en middelerdi over 10 minutter (Hansen et al., 1997). De store variasjonene gjør det utfordrende å analysere reelle situasjoner kun med tilgjengelige gjennomsnittlige måledata i form av vindroser fra nærliggende klimastasjoner. Lokale forhold som bygninger og andre hindringer kan også medføre store avvik fra målte verdier i nærliggende områder slik at tilgjengelig vindstatistikk ikke nødvendigvis gir en nøyaktig fremstilling av vindforholdene rundt et spesifikt bygg. Vindstatistikk kan likevel gi et forenklet bilde av situasjonen som er nyttig når bygninger med gode strømningsforhold skal designes.

Vindhastighet er avgjørende for om det dannes resirkulasjonssoner mellom bygninger. For et gitt bygg med konstant avstand til nærliggende bygninger resulterer høy vindstyrke i lavere forurensningskonsentrasjoner mellom byggene. Disse funnene ble gjort i studien av Nazridoust og Ahmadi (2006) hvor forurensninger i et tettbebygd område ble simulert.



Funnene begrunnes med at høyere vindhastighet genererer større virvler og mer turbulens slik at det oppnås et høyere luftskifte mellom byggene. Resultater fra studien viser i tillegg at differansen i forurensningskonsentrasjon på fasaden mot vinden og på fasaden i le øker med økt vindhastighet. Forurensningskilder som ventilasjonsavkast, bilutslipp og industri er tatt i betraktning i studien.

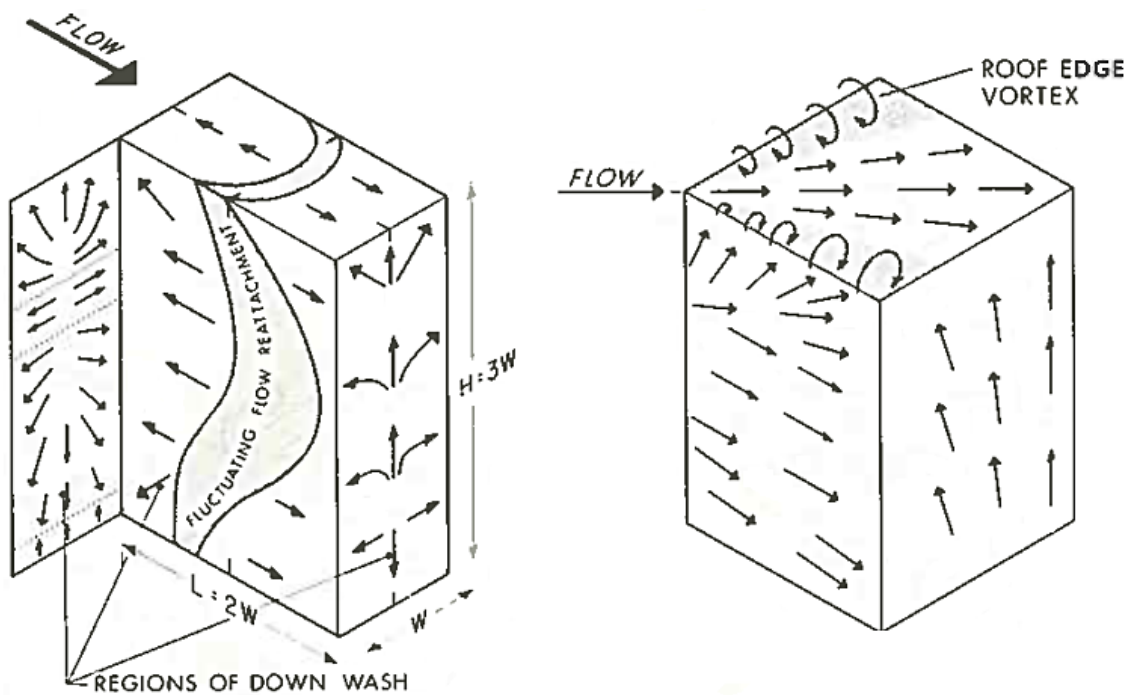
Forurensningskonsentrasjoner på taknivå i tilfeller hvor avkast er plassert på tak reduseres ikke nødvendigvis med økt vindhastighet. For ethvert avkast er det en kritisk vindhastighet som medfører maksimale forurensningskonsentrasjoner i et spesifikt punkt fra utløpet (Petersen et al., 2002b). Bevegelsesmengde og vindhastighet vil være årsak til at en lavere konsentrasjon oppstår for tilfeller med henholdsvis lavere og høyere vindhastighet. For avkast plassert på tak vil lavere vindhastighet enn den kritiske medføre høyere stigning av luftstrålen og dermed lavere forurensningskonsentrasjoner langs takflaten. En høyere vindhastighet enn den kritiske medfører mer fortynning fra de store luftstrømmene som vinden fører med seg, siden det oppstår mer innblanding av friskluft. Dette innebærer at i tilfeller hvor vindstyrken øker fra en lav verdi kan økningen i vindhastighet ha en ugunstig innvirkning på forurensningskonsentrasjonen langs takflaten, som illustrert i figur 9. Den kritiske vindhastigheten for et spesifikt utløp øker med utløpshastighet, luftmengde og avkashøyde. Verdien sier imidlertid kun noe om relativ forurensningskonsentrasjon og ikke absolutte verdier. Kritisk vindhastighet kan beregnes ut ifra en metode presentert av Wilson (1982). Vindhastighetens innvirkning på forurensningskonsentrasjoner vil beskrives nærmere i kapittel 4.1.



**Figur 9: Relativ konsentrasjon på taknivå med ulik vindhastighet i forhold til kritisk verdi (Wilson, 1982).**

Vindretningen påvirker i hvilken retning forurenset luft føres og kan ved ugunstige vindsituasjoner lede til høye forurensningskonsentrasjoner i områder hvor det kreves god luftkvalitet. For forskjellige vindretninger vil det oppstå ulike strømningsmønstre og

forurensede soner. Figur 10 illustrerer dette for en rektangulær bygning ved to ulike vindretninger; normalt og  $45^\circ$  på en fasade (Wilson, 1979). Størst forskjell i strømningsmønster kan observeres ved takkant, hvor det for  $45^\circ$  vindretning oppstår betydelig mer virvler og turbulens enn for normal vindretning. De turbulente områdene og strømmingens avhengighet av vindretning medfører utfordringer med å forutse strømmingen til forurenset luft. Dette skaper utfordringer med å designe bygninger og tekniske løsninger som tar hensyn til forurensninger til enhver tid. Bygninger bør imidlertid designes etter hensyn til de vindforholdene som forekommer oftest og vindforhold som kan gi uakseptable situasjoner. Den vindretningen som medfører strømming fra avkast i retning av luftinntaket vil videre betegnes kritisk vindretning.



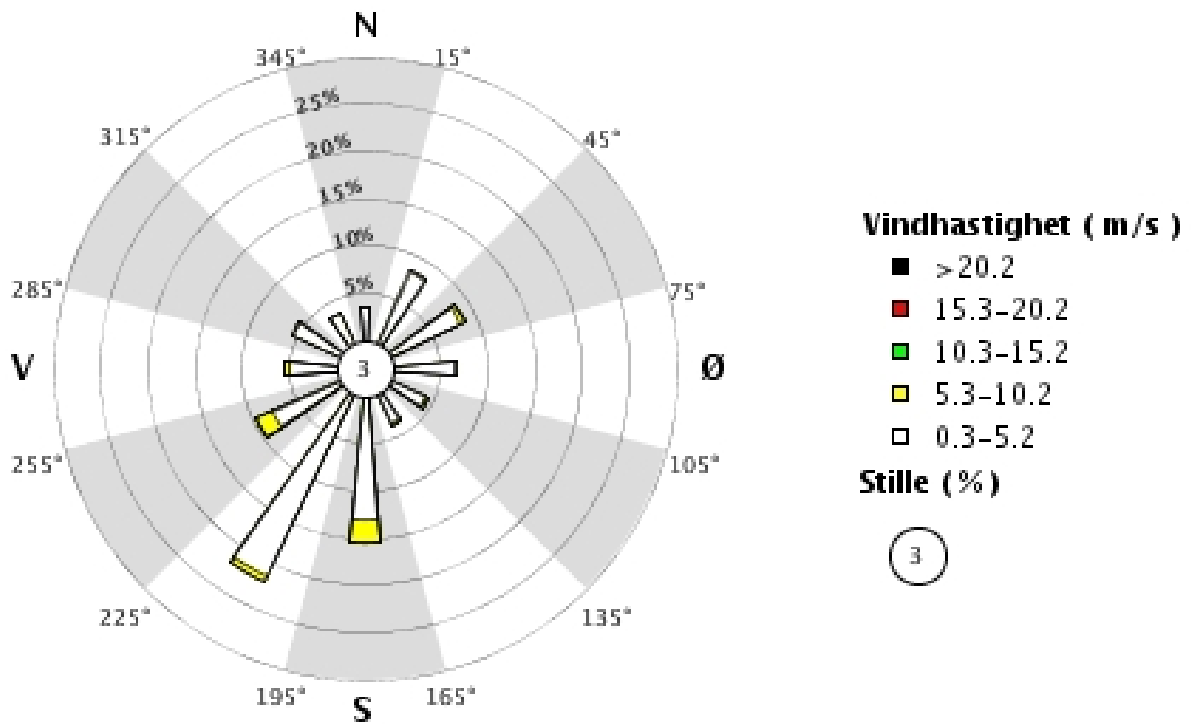
**Figur 10: Strømningsmønstre over høye, flate bygninger for vindretning  $90^\circ$  og  $45^\circ$  på fasade (Wilson, 1979).**

For bygninger med takkonstruksjoner kan vindretning få betydning for flere strømningsforhold. Studier av Saathoff et al. (2002), Snyder (1994) og Schulman et al. (2000) viser at graden av nedslag er sterkere for skrå vindretninger enn når vinden treffer parallelt med fasaden. Dette kan skyldes at det formes mer virvler nær kanten av bygningskonstruksjonen når vinden treffer skrått.

Selv om vindretning antas å være avgjørende for strømningsretning av forurensninger fra utløp, er ikke dette nødvendigvis tilfellet. Studien av Lateb et al. (2011) viser at vindretning har mindre betydning for hvor forurensede soner oppstår dersom to nærliggende bygninger har ulik høyde, hvorav den laveste bygningen har avkast plassert på tak. Forurensningene vil legge seg langs fasaden på den høyeste bygningen både dersom vinden treffer normalt på laveste og høyeste bygning, som illustrert tidligere i figur 7.

### Vindforhold i Trondheim

Figur 11 viser vindforhold i Trondheim ved Voll målestasjon over de siste ti årene (Meteorologisk Institutt, 2013a). Vindhastighet er vist som en frekvensfordeling i vindrosen, mens vindretning er angitt som sektorer på 30°. Fremherskende vindretning i Trondheim er sør-sørvest og det forekommer hovedsakelig vindhastigheter under 5,3 m/s. Bygninger i Trondheim bør derfor ikke ha luftinntaket plassert nord-nordøst for avkast, siden dette medfører hyppig forekomst av kritisk vindretning.

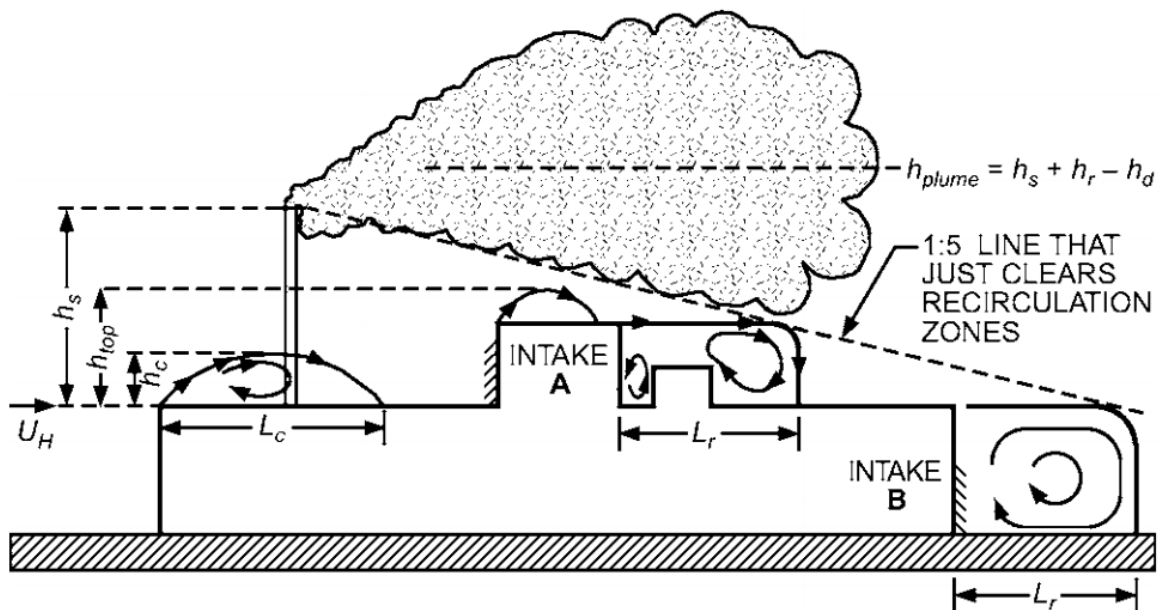


Figur 11: Vindrose for Trondheim fra år 2003 til 2012 (Meteorologisk Institutt, 2013a).

### 3.4 Utforming av avkast

Avkastenhets utforming påvirker spredningen av forurensninger fra utløpet. En rekke studier har undersøkt hvordan avkasthøyde for enheter plassert på tak innvirker på forurensningskonsentrasjoner nedstrøms. En vindtunnelstudie av Wilson og Winkel (1982) bekrefter at en økning i avkasthøyde fra horisontal flate reduserer forurensningskonsentrasjonen på tak. Resultater fra en vindtunnelstudie av Schulman og Schire (2000) viser i tillegg at økningen medfører en forskyvning i maksimalkonsentrasjonen fra takflaten til lenge etter bygningen. Dette kan forklares med spredningen av en luftstråle som er illustrert i figur 3. Et høyt utløp kan derfor være gunstig for å oppnå lavere forurensningskonsentrasjoner på taket.

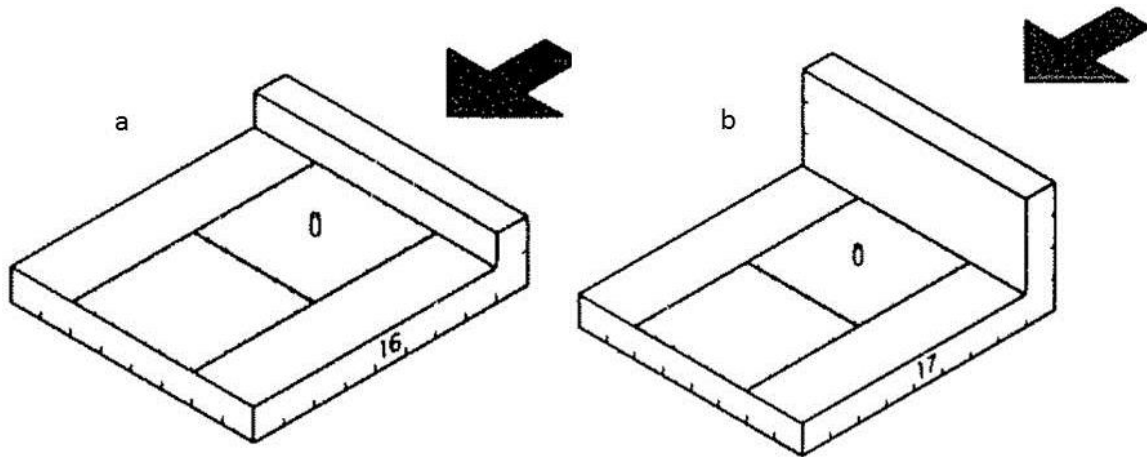
I følge Wilson og Britter (1982) kan en opphopning av forurensninger i resirkulasjonssoner bare unngås ved å benytte avkastenheter hvor utløpet er høyt nok til å unngå de turbulente sonene, som illustrert i figur 12. Det er imidlertid ikke tilstrekkelig at utløpet ligger over de turbulente sonene. I tillegg må luftstrålen fra utløpet gå klar av sonene nedstrøms, selv når utvidelsen av strålen grunnet innblanding av luft tas i betraktning. Figuren viser betydningen av resirkulasjonssonene nedstrøms for utløpet. Spesielt kan det forekomme høye forurensningskonsentrasjoner over inntak B dersom luftstrålen ikke går klar av resirkulasjonssonen som ligger over luftinntaket. Figuren illustrerer i tillegg at avkasthøyde må vurderes ut ifra høyeste punkt på bygningskonstruksjon i stedet for takflaten som utløpet er plassert på.



**Figur 12: Resirkulasjonssoner og nødvendig avkasthøyde for å unngå sonene (ASHRAE, c2011, kap. 45).**

Wilson og Winkel (1982) utførte en vindtunnelstudie om hvordan ulike avkasthøyder og bygningsformer påvirker forurensningskonsentrasjoner på taknivå. Resultatene viser at det har ingen effekt på forurensningskonsentrasjoner langs tak å øke høyden på utløpet så lenge luftsøylen forblir i en resirkulasjonssone. Bygningens utforming vil være avgjørende for om luftsøylen heves over turbulente områder, som illustrert i figur 13. For tilfelle a, med en lav

byggningskonstruksjon, oppnås lavere konsentrasjoner med et høyt utløp. For tilfelle b vil det imidlertid kreves et uakseptabelt høyt utløp for å overkomme resirkulasjonssonen som dannes etter den høye konstruksjonen. Det vil dermed for alle aktuelle avkasthøyder for tilfelle b forekomme høye konsentrasjoner på taknivå.



**Figur 13: Bygningsform og resirkulasjonssoner (Wilson og Winkel, 1982).**

Wilson et al. (1998) har undersøkt ulike plasseringer av avkast på flate tak og innvirkningen på forurensningskonsentrasjoner med en vannkanalstudie. Det ble gjort interessante funn for en bygning med en avkasthøyde som tilsvarte 25 % av bygningshøyden. Fortynningen av forurensninger er mye lavere dersom avkast plasseres nær den enden av bygningen som vender mot vinden i stedet for midt på eller ved enden av bygningen. Årsaken er at avkast plassert mot vinden havner i resirkulasjonssonen som dannes ved fasaden (se figur 3). I tilfeller med to bygninger av ulik høyde, med utløp og vindretning som i figur 7b, har imidlertid plassering av avkast liten effekt på forurensningskonsentrasjoner.

Spredningen av forurensninger fra avkast er også avhengig av egenskapene til luftstrålen. Stor bevegelsesmengde kan medføre mindre fuktinntrengning i ventilasjonsanlegget og at luftstrålen med forurenset luft føres høyere vertikalt fra takflaten. Siden egenskapene til luftstrålen over utløp er et viktig fokus i oppgaven vil dette betraktes i et eget kapittel. Momentene tidligere presentert som avgjørende for spredningen av avkastluft vil også videre vurderes i sammenheng med bevegelsesmengde. Oppdrift grunnet temperaturforskjeller mellom luftstrålen og omgivelsesluften vil ikke betraktes siden det i følge CIBSE (1999) er neglisjerbart for avkast.



## 4. Bevegelsesmengde

### 4.1 Introduksjon

For å oppnå liten grad av omluft mellom inntak og avkast er det nødvendig å føre den forurensede luften langt bort fra luftinntak. Vindhastighet, luftstrålens hastighet og utløpsareal er vesentlige faktorer for hvor høyt en luftstråle vil stige fra et utløp (ASHRAE, c2011, kap. 45). Mens luftstrålens hastighet og utløpsareal bestemmer strålens bevegelsesmengde, representerer vindhastighet den strømningsmotstanden som strålen møter. Selv om turbulens og strømningsforhold grunnet nærliggende konstruksjoner også påvirker strålens stigning, betraktes vindforhold som en forenkling av det kompliserte strømningsmønsteret som kan forekomme (Petersen et al., 2002a). For et spesifikt avkast på en gitt bygning er det kun hastighetene og vindretning som varierer og medfører vekslende høyde på luftstrålen. Forholdet mellom luftstrålens hastighet over utløpet og vindhastighet for isoterme luftstråler vil videre betegnes hastighetsrate (Wilson et al., 1998; Gupta et al., 2012b):

$$M = \frac{V_e}{U_{maks}} \quad (4)$$

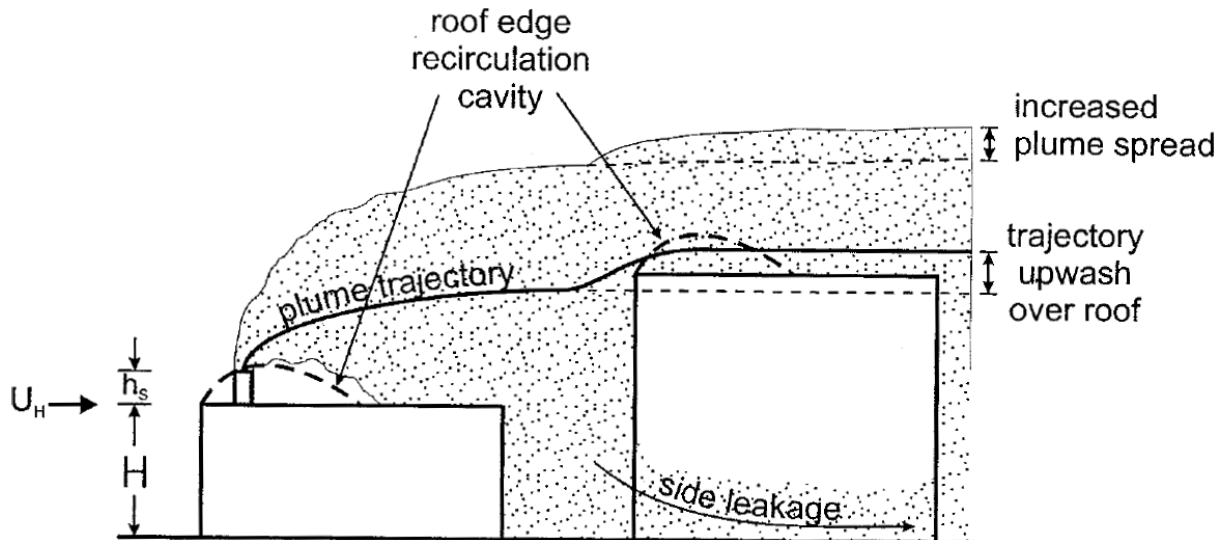
For en gitt vindhastighet og utløpsdiameter representerer endret hastighetsrate en forandring i luftstrålens bevegelsesmengde over utløpet.

For isolerte rektangulære bygninger har flere studier vist at en økning i hastighetsrate for avkast på tak medfører lavere forurensningskonsentrasjoner ved taknivå. Dette stemmer med teorien presentert i kapittel 3.3 når vindhastigheten er lavere enn den kritiske verdien og bevegelsesmengden er konstant. Schulman og Scire (1991) utførte en vindtunnelstudie for å undersøke forurensningskonsentrasjoner ved ulike hastighetsrater. Wilson et al. (1998) benyttet vannkanaler for å utføre tilsvarende undersøkelser. Begge studier resulterte i anbefalinger om høye hastigheter over utløp for å oppnå god luftkvalitet langs takflater. Disse resultatene er i dag anerkjente og benyttes i veiledninger for design av inntak og avkast (Byggdetaljer 552.360, 1999; CIBSE, 1999; Petersen et al., 2002a; Petersen et al., 2002b; ASHRAE, c2011). Videre vil bevegelsesmengdens innvirkning i ulike situasjoner presenteres.

### 4.2 Nærliggende bygninger og bebyggelsestetthet

En av de største fordelene med å øke hastighet over utløpet at det oppnås mer innblanding av omliggende luft i luftstrålen som videre medfører mer fortykning av forurensningskonsentrasjoner (Wilson et al., 1998). Et annet moment er at luftstrålen kan nå et høyere vertikalt nivå og føres lengre bort fra bygningen før vindforhold blir dominerende. I følge Wilson et al. (1998) kan imidlertid stor bevegelsesmengde medføre problemer med luftkvaliteten for nærliggende bygninger dersom nabobygget er høyere enn utløpet på bygget som betraktes. Resultatene stammer fra vannkanalstudien som ble utført for rektangulære bygninger av ulike størrelser og gjelder kun for vindretning mot den emitterende bygningen. Spredning av forurenset avkastluft fra emitterende bygning til nabobygg for gjeldende vindretning er illustrert i figur 14. For små bevegelsesmengder vil høye forurensningskonsentrasjoner forekomme på taket av bygningen som betraktes, mens

forurensningene videre vil føres langs siden av nabobygget. Dersom bevegelsesmengden er stor vil forurensningene transporteres langt over taknivå på den emitterende bygningen, men det vil videre forkomme høye konsentrasjoner på taket av den nærliggende bygningen. Forurensningskonsentrasjonen på taknivå til det emitterende bygget vil i tillegg øke med redusert avstand mellom bygningene, siden nabobygget vil blokkere strømningsmønsteret i større grad.



Figur 14: Spredning av avkastluft mot nabobygg ved vindretning mot emitterende bygg (Wilson et al., 1998).

### 4.3 Områder med høye forurensningskonsentrasjoner

I følge Wilson et al. (1998) har bevegelsesmengde betydning for i hvilke områder høye forurensningskonsentrasjoner oppstår, slik som det fremgår i kapittel 4.2. Ved små bevegelsesmengder og lave avkastenheter plassert på tak kan det oppstå høye konsentrasjoner langs takflaten på den emitterende bygningen. Forekomsten reduseres med økt hastighet over utløp. Dette er bekreftet i vindtunnelstudien av Wilson og Winkel (1982), hvor det ble funnet at økt utløpshastighet medfører lavere forurensningskonsentrasjon på tak. De samme resultatene ble funnet i vindtunnelstudien utført av Schulman og Scire (1991). Resultatene viser i tillegg at for en rektangulær bygning vil den maksimale konsentrasjonen skifte fra å befinne seg på taknivå til å oppstå lenge etter bygningen når bevegelsesmengden øker. Høye konsentrasjoner ble imidlertid aldri registrert i området like etter bygningen, kun på taknivå og langt nedstrøms fra bygget. Det ble i tillegg funnet lite endring i forurensningskonsentrasjon langs bygningens vegg så lenge høyeste konsentrasjon befant seg på taknivå, men forurensningene langs bygningsveggen økte i takt med avstand fra bygningen hvor høye konsentrasjoner oppsto. Ideell plassering av luftinntak vil dermed variere mellom vegg og tak ut ifra bevegelsesmengde over utløpet. Dette fremhever behovet for å sette ulike designkriterier og veiledninger for plassering av inntak ut ifra avkastluftens bevegelsesmengde.



#### **4.4 Nedslag fra avkast**

En av årsakene til at høye forurensningskonsentrasjoner registreres langs takflaten når avkastenheter er plassert på tak er at det kan oppstå et nedslag av forurenset luft langs utløpet. Sherlock og Stalker har gjennom vindtunnelstudier utført i 1941 funnet at en hastighetsrate på over 1,5 gir lite problemer med nedslag av forurenset avkastluft fra utløpet (Canepa, 2004). Her benyttes det vanligvis en vindhastighet som overstiges 1 % av tiden i løpet av et år ved beregninger. Store bevegelsesmengder bør derfor benyttes for avkastenheter plassert på tak for å redusere risikoen for omluft i tilfeller hvor luftinntak også er plassert på taknivå. Dette er av spesielt stor betydning i tilfeller med kort avstand mellom luftinntak og avkast, siden den forurensede luften vil legge seg i området under utløpet uten å bli særlig fortennet. Flere studier indikerer at grad av nedslag i tillegg er avhengig av avkasthøyde og at økning av høyden har samme effekt som å øke hastighetsraten (Lateb et al., 2011). Økt høyde har imidlertid størst effekt på å redusere forurensningskonsentrasjoner på tak i tilfeller hvor bevegelsesmengden fra utløpet er liten.

#### **4.5 Nedslag fra takkonstruksjoner**

Nedslag kan i følge Canepa (2004) oppstå etter bygningskonstruksjoner, som illustrert i figur 4. Teknisk rom på tak eller andre takkonstruksjoner kan også medføre problemer med nedslag. Saathoof et al. (2002) utførte en vindtunnelstudie på hvordan takkonstruksjoner innvirker på spredning av avkastluft. Resultatene viser at fortykning av forurensninger reduseres kraftig ved tilstedeværelse av en takkonstruksjon, sannsynligvis grunnet en reduksjon i luftstrålens spredning oppover. Reduksjonsfaktoren avhenger av målepunkt og hastighetsraten over utløpet. Årsaken til at bevegelsesmengde er avgjørende for reduksjonen er sterkt relatert til nedslagseffekten bak takkonstruksjonen. En hastighetsrate på 1,5 gir mindre fortykning enn høyere hastighetsrater ved tilstedeværelse av takkonstruksjonen. Siden vindforhold ikke kan kontrolleres, må en høy hastighetsrate sikres ved å benytte høye hastigheter over avkast.

#### **4.6 Resirkulasjonssoner og avkast**

I kapittel 3.4 ble det diskutert hvordan ulike avkasthøyder og bygningsformer påvirker forurensningskonsentrasjoner på taknivå, spesielt med tanke på om forurensningene fanges i resirkulasjonssoner. Wilson et al. (1998) undersøkte med en vannkanalsimulering hvordan ulike bygningshøyder, hastighetsrater og avkasthøyder innvirker på forurensningskonsentrasjoner. Resultatene viste store reduksjoner i konsentrasjoner ved bruk av høyt avkast og høy hastighetsrate i forhold til tilfeller med lavere verdier. Dette bekrefter at høye hastigheter og hastighetsrater i mange tilfeller bør benyttes for å redusere forurensningskonsentrasjoner på tak.

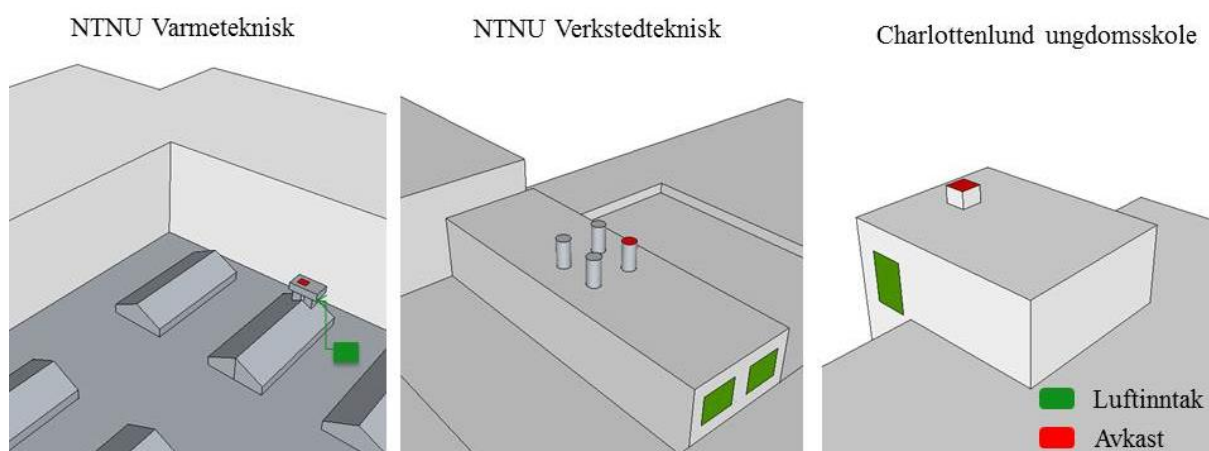
Petersen et al. (2002a) hevder at det ikke er nødvendig med et avkast som er høyere enn nærliggende bygningskonstruksjoner for å oppnå lave forurensningskonsentrasjoner. Høy stigning av strålen er i følge forfatteren tilstrekkelig for at forurensningene unnslipper resirkulasjonssonene, i strid med resultatene til Wilson og Winkel (1982). Dette er tilfellet i figur 14 dersom utløpet befinner seg i resirkulasjonssonen mens luftstrålen likevel beveger seg over det kritiske området. Luftstrålens stigning er som tidligere nevnt avhengig av

vindhastighet, utløpsareal og luftstrålens hastighet. Stor bevegelsesmengde kan dermed forebygge en opphopning av forurensninger i resirkulasjonssoner.

## 5. Forskningsmetode

### 5.1 Forskningsobjekter

Det har blitt utført feltmålinger på ventilasjonsanlegg ved tre ulike bygninger i Trondheim; NTNU Varmeteknisk, NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole. For hvert av byggene ble det samlet inn data for ett luftinntak og ett avkast som tilhører samme aggregat og bygning. Førstnevnte er et laboratorieanlegg som ikke benytter jethette, men en kombinert hatt for luftinntak og avkast. Målinger har blitt utført på bygningen som en referanse for andre typer avkast, for å teste og utvikle det eksperimentelle oppsettet og for å undersøke strømningsmessige forhold. En beskrivelse av NTNU Varmeteknisk er å finne i vedlegg 1.1. Både NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole benytter jethette i kombinasjon med behovsstyrt ventilasjon. Mens førstnevnte er et fullstendig VAV-anlegg benytter anlegget på skolen delvis VAV og delvis CAV som styringsprinsipper. Teknisk rom er plassert på taket av bygningene, hvorav jethettene befinner seg på tak av teknisk rom og luftinntak på vegg. For en detaljert beskrivelse av bygningskonstruksjonene til NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole henvises det til henholdsvis vedlegg 1.2 og vedlegg 1.3. Plassering av luftinntak og avkast på de ulike bygningene er illustrert i figur 15, mens avkasthøyde og avstander mellom luftinntak og avkast er gitt i tabell 2. Avstandsangivelse er gitt i henhold til Byggdetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999), oppgitt i kapittel 2.2. Figur 16 illustrerer utformingen av jethettene som det er utført målinger på.

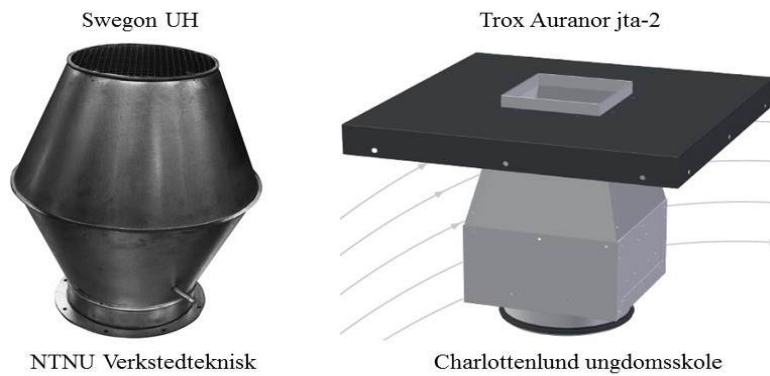


Figur 15: Plassering av luftinntak og avkast på forskningsobjektene.

Tabell 2: Avkasthøyde over takflate og avstander mellom luftinntak og avkast.

Bygning	$h$ [m]	$H$ [m]	$L$ [m]	Totale avstander	
				$H + h$ [m]	$H + L$ [m]
NTNU Varmeteknisk	*	*	0,2	0,4	0,6
NTNU Verkstedteknisk	2,7	1,5	10,5	4,2	12,0
Charlottenlund ungdomsskole	0,8	1,2	3,4	2,0	4,6

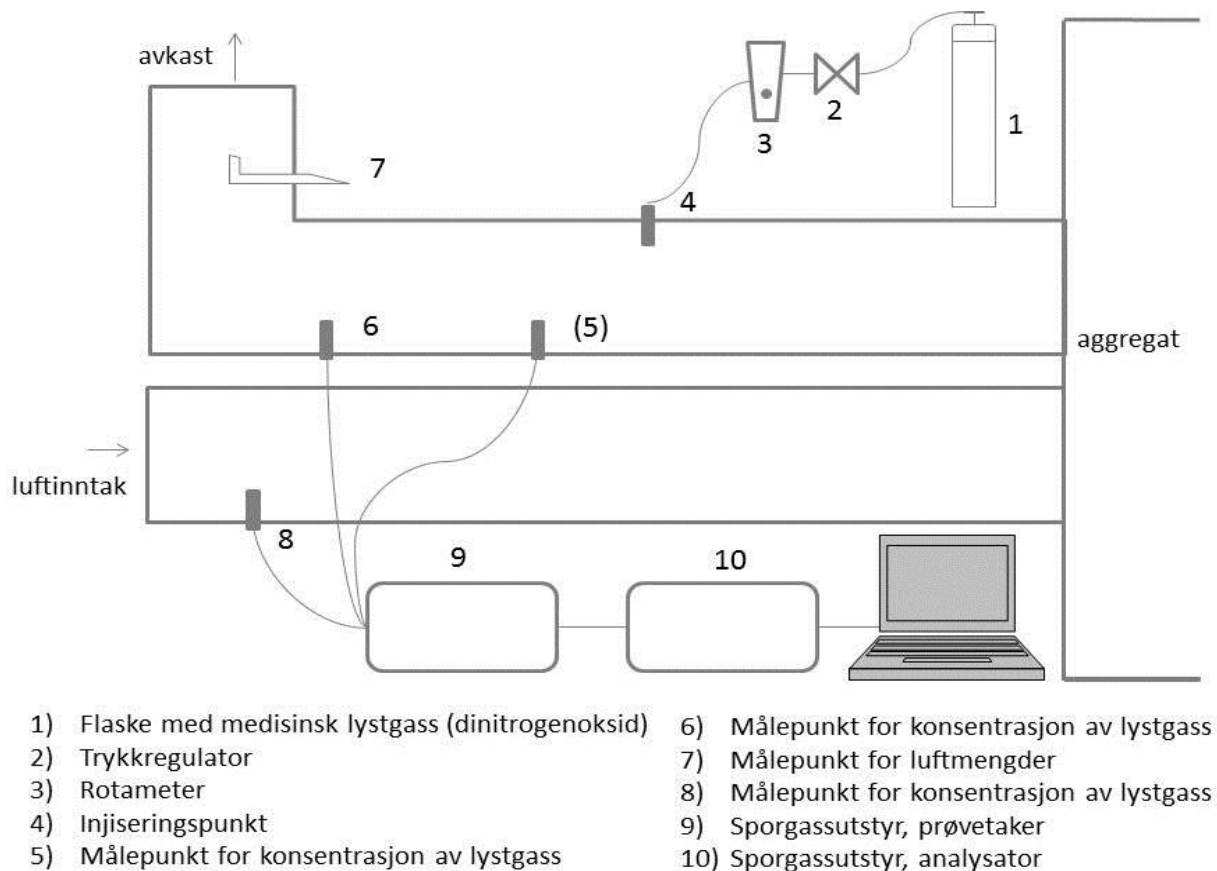
\*Luftinntaket ligger over takflaten.



Figur 16: Illustrasjon av jethetter (Swegon, 2012; TROX Auranor, 2012a).

## 5.2 Eksperimentelt oppsett

Det eksperimentelle oppsettet på ventilasjonsanleggene for å måle omluftsfaktor mellom luftinntak og avkast er vist i figur 17. Punkt 5, målepunkt for lystgass, ble kun benyttet i testmålingene på NTNU Varmeteknisk for å kontrollere innblandingen av lystgass i ulike punkter i avkastkanalen. I tillegg til oppsettet på ventilasjonsanleggene som er vist i figur 17 ble en vindmåler plassert på nærliggende tak til avkast. Det ble også benyttet røykappuller for å observere strømningsmønsteret rundt bygningene, men disse forsøkene ble utført uavhengig av eksperimentene på ventilasjonsanleggene. Beskrivelser av måleinstrumentene som er benyttet under forsøkene, samt kalibrering av disse, er gitt i vedlegg 2. En risikovurdering av eksperimentet er å finne i vedlegg 6.



Figur 17: Prinsipiell skisse av eksperimentelt oppsett.

### 5.3 Forsøksprosedyre

Omluftsfaktor mellom luftinntak og avkast ble undersøkt ved å tilsette lystgass (dinitrogenoksid) ved atmosfærisk trykk i et punkt like etter aggregatet i avkastkanalen. Den fjerde dagen på NTNU Varmeteknisk ble det imidlertid benyttet et hullet rør for injisering av sporgass langs kanalens tverrsnitt. Mengdene lystgass som ble injisert fra gassbeholderen ble regulert med et rotameter for å tilsvare mellom 40 og 90 mg/m<sup>3</sup> i avkastkanalen, med også noe lavere verdier for testmålingene på NTNU Varmeteknisk. Årsaken til den varierende konsentrasjonen var usikkerhet ved dosering, siden VAV-anleggene medfører variasjoner i luftmengdene og dermed en variabel lystgasskonsentrasjon selv med konstant tilførsel av gass. Ved å utføre feltmålinger på eksisterende anlegg oppstår det begrensninger i mulig utførelse og fremgangsmåte vil derfor variere noe mellom bygningene. Dette vil videre spesifiseres for hver enkelt bygning.

Lystgasskonsentrasjonen ble målt med sporgassutstyr nedstrøms i avkastkanalen. For alle bygningene var målepunktet plassert flere 90° bend og et totalt kanalstrek på minst 5 meter etter injiseringspunktet, hvor det ble antatt en homogen blanding av luft og lystgass. På NTNU Varmeteknisk ble det i tillegg benyttet et målepunkt for konsentrasjon i avkast like etter injiseringspunktet, for å undersøke innblandingen av lystgass både tidlig og sent i kanalen. Det første punktet var plassert kun én meter etter injiseringspunktet og etter et bend på 30°. Konsentrasjonen av lystgass ble også målt i inntakskanalen like etter luftinntaket på alle bygningene. Injiserings- og målepunktene befant seg omtrent 15 cm inn mot kanalens senter fra kanalvegg.

Målingene av lystgasskonsentrasjon ble utført kontinuerlig ved å benytte sporgassutstyr med korrigerende for vandamp. Tre ulike målepunkt ble kartlagt, hvorav det tok ett minutt mellom hver måling. Dette innebar at for hvert målepunkt ble det utført en ny måling omtrent hvert tredje minutt. For NTNU Varmeteknisk var to av målepunktene plassert i avkast og ett i inntakskanalen. I de to resterende byggene ble kun ett målepunkt i avkastkanalen kartlagt, i tillegg til ett punkt i inntakskanalen og ett i teknisk rom. Sistnevnte ble benyttet som et kontrollpunkt for at konsentrasjonen ikke skulle overstige grenseverdier gitt i administrativ norm på 90 mg/m<sup>3</sup>, med maksimal overskridelse til 135 mg/m<sup>3</sup> i 15 minutter (Arbeidstilsynet, 2011). Dette var imidlertid en mindre aktuell problemstilling i testmålingene siden et annet tilkoblingsutstyr med mindre lekkasjer til rommet ble benyttet. I tillegg var det et større luftskifte i laboratoriet på NTNU Varmeteknisk enn i teknisk rom på de andre to bygningene.

Forholdene ved ulike vindforhold og luftmengder ble kartlagt ved at målinger ble utført over flere dager for hver bygning. Målingene har imidlertid blitt gjort over en begrenset periode og vindforholdene i perioden har avgjort hvilke situasjoner som ble kartlagt. For alle bygningene ble målinger utført for kritisk vindretning i tillegg til andre tilfeldige vindforhold som forekom i perioden. Det ble kun utført målinger på ett bygg per dag.

Før lystgass ble tilkoblet ventilasjonsanlegget ble basekonsentrasjonen i inntakskanalen kartlagt. Deretter ble det gjort målinger både ved store og små luftmengder. På NTNU Varmeteknisk og NTNU Verkstedteknisk ble luftmengdene overstyrt til maksimalt pådrag, mens det ikke var mulig ved Charlottenlund ungdomsskole. Målinger ble derfor utført på

tidspunkt med høy personbelastning. På NTNU Varmeteknisk ble også mindre luftmengder stilt inn manuelt, mens for Charlottenlund ungdomsskole og NTNU Verkstedteknisk ble dette målt på tider av døgnet med få personer tilstede i lokalene. For hver situasjon ble målinger utført i omtrent en time. I noen tilfeller forekom imidlertid ikke så lange perioder med stabile luftmengder, slik at måleperioden var noe kortere.

Under måling av lystgasskonsentrasjon ble luftmengdene i avkastkanalen kartlagt med ulike metoder avhengig av ventilasjonsanleggets utforming og styringsprinsipp. Anleggene som ble betraktet har ikke lange kanalstrekk uten komponenter som påvirker strømningsmønsteret. For luftmengdemålinger i anlegg med flere bend og andre hindringer som gir mye omrøring anbefaler Johansson og Svensson (1998) sporgassmålinger med lystgass. Dette forutsetter imidlertid en homogen konsentrasjon av lystgass i målepunktet. På Charlottenlund ungdomsskole og NTNU Verkstedteknisk er det benyttet et rotameter som er kalibrert for luft. Dette medfører at luftmengdemålinger ved lystgass ikke er pålitelig for disse anleggene (Johansson og Svensson, 1998). Det ble derfor i tillegg benyttet andre metoder for å kontrollere luftmengdemålingene. På Charlottenlund ungdomsskole ble det benyttet eksisterende system for trykkmåling over avtrekksvifte til å finne luftmengder. TSI VelociCalc Plus 8388 ble koblet på eksisterende system for å måle trykkforskjellen over viften, hvorav luftmengdene ble avlest fra et diagram som var oppgitt på aggregatet. Siden luftmengdene varierte over måleperioden ble målinger over avtrekksviften utført omtrent hvert 10. minutt.

På NTNU Verkstedteknisk ble TSI VelociCalc Plus 8388 benyttet til å måle hastigheter etter metoden “punktvis hastighetsmåling med varmetrådsanemometer” av Johansson og Svensson (1998). Metoden går ut på å beregne en snitthastighet ut ifra flere målinger av kanalens tverrsnitt og benytte korreksjonsfaktorer for temperatur, trykk og kanalform for å finne luftmengdene. Det var imidlertid kun mulig å utføre målinger over halve tverrsnittet og med en hastighetsmåler hvor temperatur ved kalibrering er ukjent. Avstand fra bend til målepunkt nedstrøms var 9 meter, som tilsvarer 9 ganger diameter. Denne avstanden bør være tilstrekkelig for å oppnå en jevn hastighetsprofil. Selv om noen av retningslinjene ikke er oppfylt, så betraktes metoden som akseptabel for å vurdere variasjonen i luftmengder og hastighet over utløp i kombinasjon med sporgassmålinger. På NTNU Varmeteknisk ble luftmengdene målt på samme måte som på NTNU Verkstedteknisk og kontrollert mot både sporgassmålinger og avleste luftmengder fra aggregatet. På begge bygningene ble hastighetsmålingene utført kun én gang per scenario, siden luftmengdene ble overstyrt.

Lokale vindforhold ble kartlagt ved å plassere en vindmåler på nærliggende tak til avkast. Av praktiske hensyn ble ikke vindmåleren plassert på høyeste punkt på noen av bygningene. For NTNU Varmeteknisk var vindmåleren plassert på samme takflate som avkast, men mot den åpne fasaden, som vist i figur 34 i vedlegg 5.1. Selv om det var muligheter for å kartlegge vindforholdene lengre fra den høyere bygningskonstruksjonen i et mer åpent område, var det av interesse å observere innvirkningen av bygningskonstruksjonen på vindforholdene. Både på NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole sto vindmåleren plassert på et lavere tak enn jethettene, men i et åpent område. Dette er illustrert for bygningene i henholdsvis figur 42 i vedlegg 5.2 og figur 51 i vedlegg 5.3. Vindmåleren ble stilt inn

manuelt, med referanse mot nord som ble kontrollert mot et kompass. Både vindretning- og hastighet ble registrert hvert sekund.

I tillegg til å måle graden av omluft mellom avkast og luftinntak ble strømningsmønsteret utendørs rundt byggene undersøkt. Det ble benyttet røykappuller for å generere røyk og observere luftstrømmene rundt bygningene. Appullene ble plassert enten i nærheten av avkast for å simulere strømningsmønsteret fra utløpet, eller ved takkant hvor det kan formes resirkulasjonssoner. Røykappuller ble kun benyttet for én vindsituasjon per bygning. Det var ønskelig å utføre observasjoner for alle kartlagte vindforhold, men dette var ikke gjennomførbart grunnet branntekniske hensyn.

#### 5.4 Bearbeiding av måleresultater

Måleresultater for perioder med stabil tilsetning av sporgass, samt stabile vindforhold og luftmengder, ble valgt ut. Det ble sett bort ifra de første to målingene per målepunkt etter en endring i en av parameterne luftmengde, vindforhold eller tilført gassmengde. De store luftmengdene i avkast medfører at en stabil tilstand kan forekomme svært raskt, mens det i inntakskanalen kan ta noe lengre tid. Dette skyldes delvis den lange avstanden fra injiseringpunktet i avkast til målepunktet i inntakskanalen. I tillegg kan eksterne strømningsforhold medføre at forurensninger fanges i resirkulasjonssoner og dermed bruker lengre tid på å nå luftinntaket. Resultatene fra testmålingene ved NTNU Varmeteknisk ble benyttet for å vurdere hvor fort forurensningskonsentrasjonene stabiliserer seg. Det ble konkludert med at fem minutter er tilstrekkelig for å oppnå nærmere stabile forhold. Her er det tatt høyde for at varierende strømningsforhold på andre bygninger kan medføre noe lengre tid for stabilisering enn det som ble observert ved NTNU Varmeteknisk. Oppgitt tidspunkt for målingene er når analysatoren begynner å hente inn gass fra målepunktet.

Utvalget i de relevante periodene med stabile forhold var begrenset til mellom 7 og 20 målinger for hvert målepunkt per periode. Siden konsentrasjonene i avkast og luftinntak ble målt med ett minutt mellomrom anses verdiene mellom avkast og luftinntak å være gjensidig uavhengige. Det innebærer at en måling i avkast er uavhengig av påfølgende måling i tilluftskanalen, og motsatt. Det samme gjelder for basekonsentrasjonen siden denne ble målt før konsentrasjonene i avkast og luftinntak. Målinger i avkast og luftinntak ved tilsetning av sporgass er altså uavhengige av målingene utført for basekonsentrasjonen.

Den statistiske metoden Bootstrap ble ansett for å være egnet for bearbeiding av måleresultatene siden få måleverdier var hentet inn per periode. Kriterier for bruk av metoden er i tillegg oppfylt siden målingene antas å være gjensidig uavhengige. Metoden går ut på å produsere en rekke datasett ut ifra en mindre datasamling slik at utvalget blir større (Efron og Tibshirani, 1993). Her ble metoden benyttet for å produsere et større utvalg av omluftsfaktorer etter følgende formel:

$$f = \frac{C_t - C_b}{C_a} \quad (5)$$

1 000 ulike omluftsfaktorer ble beregnet for hver relevante måleperiode ved å hente tilfeldige måleverdier fra luftinntak, avkast og base. Basekonsentrasjonen i luftinntaket som ble målt

kun én av dagene per bygning ble benyttet i alle omluftsberegningene for samme bygg. Deretter ble gjennomsnitt og standardavvik beregnet ut ifra de tilfeldig genererte omlufts faktorene. Dette resulterte i en gjennomsnittlig omlufts faktor med standardavvik for hele den stabile perioden. Prosedyren ble gjentatt for hvert stabilt tilfelle på bygningene. Den statistiske metoden er nærmere beskrevet i vedlegg 3.1.

Vindforholdene som ble målt på tak av bygningene ble kontrollert mot klimaforhold hver time ved Voll målestasjon av Meteorologisk Institutt (2013b). Vindhastighetene ved Voll ble korrigert for lokale forhold, som høyde og terreng, ved bygningenes plassering. Korrigeringsmetoden er hentet fra ASHRAE Handbook – Fundamentals (ASHRAE, c2009, kap. 24) og presentert i vedlegg 3.2. I tillegg er korreksjonsfaktorer for de ulike bygningene presentert i vedlegg 1.1, vedlegg 1.2 og vedlegg 1.3. Det ble i ettertid av målingene oppdaget feil i måleutstyret og unøyaktig kalibrering. Korrigerte vindforhold ved Voll målestasjon har derfor blitt benyttet i tilfeller hvor de målte vindforholdene anses som upålitelige.

Verdier for beregning av luftmengder ble målt etter metodene oppgitt i kapittel 5.3. Beregning av luftmengder ved lystgassmålinger, differensialtrykkmålinger over avtrekksvifte og hastighetsmålinger er beskrevet i Vedlegg 3.3. For differensialtrykkmålinger på Charlottenlund ungdomsskole er en nærmere beskrivelse av avtrekksviften gitt i vedlegg 1.3. For hver representativ periode er luftmengder beregnet etter to eller tre ulike metoder. Representative luftmengder er bestemt ved å vurdere resulterende luftmengder ved de ulike metodene, avrundet til nærmeste 100 m<sup>3</sup>/h for NTNU Varmeteknisk og til nærmeste 1000 m<sup>3</sup>/h for NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole. Avrundingen utføres siden de beregnede luftmengdene er av lav nøyaktighet. Siden beregnede luftmengder kan avvike ved de ulike metodene er det gjort en vurdering av påliteligheten til metodene for hver bygning og hvordan de ulike resultatene skal vektlegges. Grunnlaget for vurderingen er avvik i beregningsresultatene og om kriterier for å benytte metodene er imøtekommet, som diskutert i kapittel 5.3.



## 6. Beregninger med teoretiske modeller

### 6.1 Introduksjon

Holmen (2012) undersøkte tre ulike metoder for å vurdere omluft fra avkast til luftinntak. Geometrisk metode presentert i ASHRAE Handbook - HVAC Applications (ASHRAE, c2011, kap. 45) kan ikke benyttes til å vurdere omluft i eksisterende ventilasjonsanlegg siden den kun resulterer i en teknisk løsning som skal medføre god luftkvalitet i inntaket. De to andre metodene er benyttet for å vurdere ventilasjonsløsningene på NTNU Varmeteknisk, Charlottenlund ungdomsskole og NTNU Verkstedteknisk for de vindforholdene og luftmengdene som forekommer under målingene. Følgende beskrivelser av metodene er hentet fra Holmen (2012).

### 6.2 Fortynning

Det er utviklet flere metoder for å beregne fortynning av forurensninger fra avkast til et nærliggende punkt som luftinntak og andre soner som krever friskluft. Metodene gir et forenklet bilde av hvordan forurensninger fra kilder vil spre seg rundt bygget, rundt nærliggende bygninger og i atmosfæren. Hvilke faktorer som vurderes ved beregning av fortynning avhenger av modellene. Holmen (2012) har vurdert ulike fortynningsmodeller og benyttet metoden presentert i ASHRAE Handbook – HVAC Applications (ASHRAE, c2011, kap. 45) til beregninger og vurdering av fortynning. Den resulterende fortynningen kan videre konverteres til omluftsfaktor mellom avkast og luftinntak. Gupta, et al. (2012a) har imidlertid sammenliknet ASHRAE fortynningsmetoder fra 2003, 2007 og 2011 ved bruk av vindtunnel- og feltstudier. Resultatene viser at modellen fra 2011 generelt gir høye konsentrasjoner, men at nøyaktigheten av resultatene øker med avstand fra avkast.

Metoden fra 2011 baserer seg på at luftstrålen fra avkast sprer seg fra horisontal retning som en Gaussisk klokkeformet kurve. Hvor mye spredning som forekommer avhenger av avstanden i direkte linje fra utløpet. Den direkte linjen mellom to punkter er angitt som korteste avstand dersom det strekkes en streng mellom punktene, og tar dermed hensyn til både vertikale og horisontale avstander. I tillegg vil høydeforskjell mellom avkast og horisontal flate være avgjørende for spredningen. I modellen vil spredning forekomme på grunn av tre fenomener:

- Vindforhold: er avgjørende for fortynning og strømningsforhold til avkastluften.
- Turbulens: innvirker på spredningen av luftstrålen både horisontalt og vertikalt.
- Bevegelsesmengde: avgjør hvor langt luftstrålen føres uten innvirkning fra vind og turbulens.

Metoden kan benyttes for å beregne fortynning både for oppbygde og lave avkast, men benytter noe ulik modell for de to tilfellene. Videre i oppgaven vil fortynningsmetoden derfor presenteres enten som *modell for lavt avkast* eller *modell for oppbygd avkast*. Det betegnes som lavt dersom den vertikale separasjonen er 0, noe som hovedsakelig er tilfellet dersom utløpet ikke er høyeste punkt på bygningen. Siden den fortynningen som finner sted til enhver tid er relatert til de skiftende strømningsforholdene, gir metoden er gjennomsnittlig minimal fortynningsfaktor i en periode på mellom 10 og 15 minutter:

$$D_s = \frac{4U_{maks}\bar{\sigma}_y\bar{\sigma}_z}{V_e d_e^2} \cdot e^{\frac{\zeta^2}{2\bar{\sigma}_z^2}} \quad (6)$$

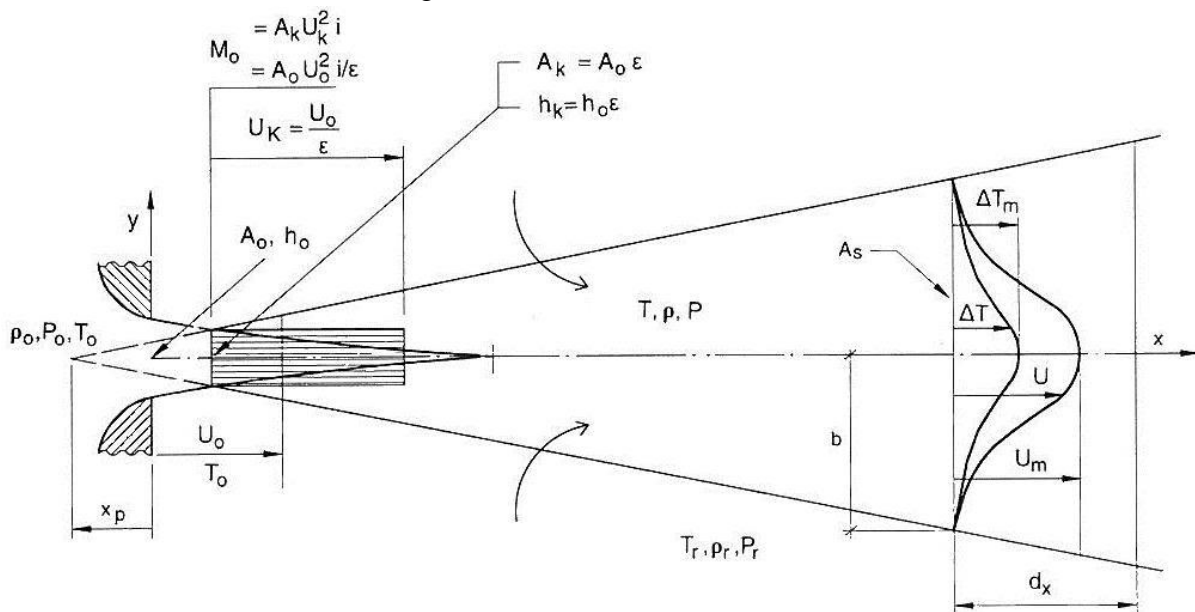
Formelen gir forholdet mellom forurensningskonsentrasjon over utløpet og i et punkt langs luftstrålens senterlinje ved taknivå. For lavt avkast benyttes formelen uten eksponenten. Metoden er nærmere beskrevet i vedlegg 4.1.

Metoden er tilrettelagt for å finne det mest kritiske tilfellet som kan forekomme ut ifra en dimensjonerende vindhastighet. I beregningene vil den vindhastigheten som forekommer når målingene blir utført benyttes, men alle beregningene gjelder for kritisk vindretning. Varmeteknisk betraktes som lavt avkast siden bygningskonstruksjonen er høyere enn avkast. På Verkstedteknisk og Charlottenlund er avkast høyere enn nærliggende hindringer slik at tilfellene betraktes som oppbygde avkast.

### 6.3 Kastelengde

I kapittel 6.2 ble bevegelsesmengde presentert som en medvirkende faktor til fortykning av forurensninger langs horisontal flate. I jetstråler utnyttes dette prinsippet ved at luftstrålen med forurenset luft har en høy hastighet vertikalt oppover.

En fri jet er en luftstråle som strømmer fra et utløp og ut i omgivelser hvor det er et fritt grensesjikt mot omliggende luft (Awbi, 2003). Siden luftstrålen er i bevegelse mens den omliggende luften er antatt stillestående vil det oppstå turbulens i grensesjiktet som medfører en innblanding av omgivelsesluft i strålen (Skåret, 2000). Luftmengden vil dermed øke med økende avstand fra utløpet og strålen brer seg utover med en gitt vinkel. På grunn av innblanding av omgivelsesluft vil det forekomme en fortykning av forurensninger i strålen. Utbredelsen av strålen er vist i figur 18.



Figur 18: Illustrasjon av spredningen til en fri sirkulær stråle (Skåret, 2000).

Ved å anta at det statiske trykket i luftstrålen er konstant og lik omgivelsestrykket vil bevegelsesmengden i strålen være bevart, slik at strålens hastighet reduseres med økt luftmengde. Det tas ikke hensyn til eksterne påvirkninger på luftstrålen i form av turbulens, vind- og strømningsforhold, som innebærer at spredning og avbøying av luftstrålen neglisjeres i beregningene. Fortynningsmetoden fra kapittel 6.2 eller andre fortynningsmodeller kan benyttes for å vurdere innvirkning fra turbulens og vind. Ved en viss hastighet antas det imidlertid at vind- og strømningsforhold vil ha større betydning for strømningsmønsteret enn strålens hastighet. Kastelengden bestemmes som den avstanden fra utløpet hvor strålens hastighet er redusert til en viss verdi (Mathisen, 2012). Her er hastigheten i kastelengden satt til verdien hvor vinden antas å være dominerende for strømningsmønsteret. Fortynningen kan dermed beregnes i den avstanden fra utløpet hvor det antas at vindforhold vil være avgjørende for luftstrålens og forurensningens strømningsretning.

Det er beregnet kastelengder og fortynning på bygningene for en slutthastighet på 2 m/s etter formler presentert av Skåret (2000), hvorav beregningsmetoden er beskrevet i vedlegg 4.2. Fortynningen angir hvor mye forurensningskonsentrasjonen har blitt tynnet ut i punktet hvor hastigheten har nådd 2 m/s grunnet innblanding av omliggende luft. I følge Tjelflaat (2012) vil oppdrift ha liten betydning for stråler med de temperaturdifferanser som kan forventes mellom avkast- og uteluft. Derfor er det antatt at luftstråler fra jethetter er tilnærmet isoterme. I tillegg er jethettene antatt å ha gitter som hinder strømmingen minimalt, slik at impulsfaktoren kan antas å være 1. Jethettene er utformet med en innsnevring av tverrsnittet. Dette kan medføre en kontraksjon av luftstrålen slik at minste areal av luftstrålen er nedstrøms fra utløpet. For jethettene vil det imidlertid forekomme en minimal kontraksjon og det kan antas en kontraksjonskoeffisient på 1 (Tjelflaat, 2012).

På NTNU Varmeteknisk og Charlottenlund ungdomsskole er det benyttet en kvadratisk jethette. Siden formler for kvadratiske jetstråler ikke er gitt av Skåret (2000) er disse utledet fra de generelle formlene i vedlegg 4.2. NTNU Verkstedteknisk benytter en sirkulær jethette, hvorav formlene er utledet av Skåret (2000) og oppsummert i vedlegget.



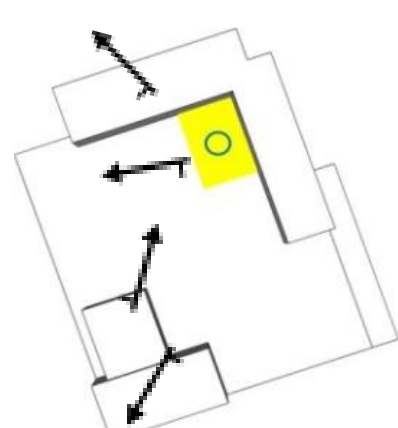
## 7. Resultater

Følgende tabeller viser resulterende omlufts faktorer både fra feltmålinger og teoretiske beregninger. For tilfeller hvor vindretningen skiftet under feltmålingene er det oppgitt resultater for to ulike vindforhold på samme dag. Oppgitte vindforhold er korrigerede vinddata for Voll målestasjon, hvorav informasjon er hentet fra Meteorologisk Institutt (2013b). Omlufts faktor beregnet etter ASHRAE Fortynningsmetode fra 2011 gjelder for kritisk vindretning fra avkast mot luftinntaket. I tabellene for kastelengder er hastighet over avkast oppgitt. Dette er beregnet som luftmengder over areal, uten å ta hensyn til hastighetsprofilen.

### 7.1 NTNU Varmeteknikk – Testmålinger

Tabell 3 viser omlufts faktorer fra testmålingene på NTNU Varmeteknikk. I tabell 4 og tabell 5 er resultater for beregninger med henholdsvis ASHRAE Fortynningsmetode og kastelengde med fortynning gitt. For fullstendige resultater fra feltmålingene henvises det til vedlegg 5.1.

**Tabell 3: Målte omlufts faktorer på NTNU Varmeteknikk.**

Dag	Små luftmengder			Store luftmengder			Vindforhold	
	$q$	$f$	$\sigma$	$q$	$f$	$\sigma$	$U$	retning
1	500 m <sup>3</sup> /h	7,0 %	0,7 %	1100 m <sup>3</sup> /h	4,3 %	0,6 %	1,9 m/s	
2	500 m <sup>3</sup> /h	6,0 %	1,2 %	1100 m <sup>3</sup> /h	4,2 %	1,1 %	1,9 m/s	
4	500 m <sup>3</sup> /h	6,4 %	1,2 %	-	-	-	1,2 m/s	
4	500 m <sup>3</sup> /h	6,2 %	0,8 %	1100 m <sup>3</sup> /h	2,3 %	0,4 %	1,6 m/s	

**Tabell 4: Beregnede omlufts faktorer for NTNU Varmeteknikk.**

Dag	$U$	$f_{q,lav}$	$f_{q,høy}$
1	1,9 m/s	8,9 %	19,6 %
2	1,9 m/s	8,9 %	19,6 %
4	1,2 m/s	14,1 %	-
4	1,6 m/s	10,6 %	23,2 %

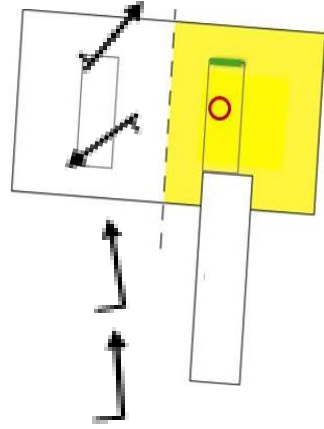
**Tabell 5: Beregnede kastelengder og fortynning for NTNU Varmeteknikk.**

$q$	$V_e$	$x$	$D$
500 m <sup>3</sup> /h	0,9 m/s	0,0 m	-
1 000 m <sup>3</sup> /h	1,7 m/s	0,0 m	-

## 7.2 NTNU Verkstedteknisk

Resulterende omlufts faktorer fra feltmålingene på NTNU Verkstedteknisk er vist i tabell 6. Tabell 7 gir omlufts faktorer ved beregning etter ASHRAE Fortynningsmetode, mens i tabell 8 er resultater fra beregninger for kastelengde og fortynning gitt. I tillegg til å beregne kastemengde og fortynning for luftmengdene som forekom under målingene, så er det beregnet for prosjekterte luftmengder på 16 700 m<sup>3</sup>/h og minste luftmengder som kan forekomme ut ifra styringsprinsipp på vel 5000 m<sup>3</sup>/h. I vedlegg 5.2 er fullstendige resultater fra feltmålingene lagt ved.

**Tabell 6: Målte omlufts faktorer på NTNU Verkstedteknisk.**

Dag	Små luftmengder			Store luftmengder			Vindforhold	
	$q$	$f$	$\sigma$	$q$	$f$	$\sigma$	$U$	retning
1	-	-	-	16000 m <sup>3</sup> /h	2,0 %	0,2 %	1,7 m/s	
1	12000 m <sup>3</sup> /h	1,6 %	0,3 %	16000 m <sup>3</sup> /h	1,9 %	0,5 %	1,6 m/s	
2	12000 m <sup>3</sup> /h	1,7 %	0,2 %	16000 m <sup>3</sup> /h	2,7 %	0,7 %	3,8 m/s	
3	12000 m <sup>3</sup> /h	1,8 %	0,5 %	16000 m <sup>3</sup> /h	2,4 %	0,3 %	4,2 m/s	

**Tabell 7: Beregnede omlufts faktorer for NTNU Varmeteknisk.**

Dag	$U$	$f_{q,lav}$	$f_{q,høy}$
1	1,7 m/s	-	1,3 %
1	1,6 m/s	4,4 %	0,7 %
2	3,8 m/s	8,7 %	9,1 %
3	4,2 m/s	9,3 %	9,2 %

**Tabell 8: Beregnede kastelengder og fortynning for NTNU Verkstedteknisk.**

$q$	$V_e$	$x$	$D$
5 010 m <sup>3</sup> /h	1,8 m/s	0 m	-
12 000 m <sup>3</sup> /h	4,2 m/s	10,8 m	4,1
16 000 m <sup>3</sup> /h	5,7 m/s	15,2 m	5,4
16 700 m <sup>3</sup> /h	5,9 m/s	15,9 m	5,6

### 7.3 Charlottenlund ungdomsskole

Omluftsfaktor fra feltmålinger på Charlottenlund ungdomsskole er gitt i tabell 9. I tabell 10 og tabell 11 er beregningsresultater for henholdsvis ASHRAE Fortynningsmetode og kastelengde med fortykning gitt. Kastelengde og fortykning er beregnet både for de luftmengdene som forekom under feltmålingene, for prosjekterte luftmengder på 23 000 m<sup>3</sup>/h og for de minste luftmengdene som kan forekomme ut ifra styringsprinsipp på vel 10 000 m<sup>3</sup>/h. Fullstendige resultater fra feltmålingene på Charlottenlund ungdomsskole er å finne i vedlegg 5.3.

**Tabell 9: Målte omluftsfaktorer på Charlottenlund ungdomsskole.**

Dag	Små luftmengder			Store luftmengder			Vindforhold	
	$q$	$f$	$\sigma$	$q$	$f$	$\sigma$	$U$	retning
1	12000 m <sup>3</sup> /h	0,2 %	0,1 %	15000 m <sup>3</sup> /h	0,3 %	0,1 %	4,1 m/s	
2	13000 m <sup>3</sup> /h	0,4 %	0,1 %	17000 m <sup>3</sup> /h	0,2 %	0,1 %	2,5 m/s	
3	12000 m <sup>3</sup> /h	0,3 %	0,1 %	17000 m <sup>3</sup> /h	0,4 %	0,1 %	2,3 m/s	

**Tabell 10: Beregnede omluftsfaktorer for Charlottenlund ungdomsskole.**

Dag	$U$	$f_{q, lav}$	$f_{q, høy}$
1	4,1	19,8 %	16,3 %
2	2,5	4,8 %	0,5 %
3	2,3	4,8 %	0,2 %

**Tabell 11: Beregnede kastelengder og fortykning for Charlottenlund ungdomsskole.**

$q$	$V_e$	$x$	$D$
10 281 m <sup>3</sup> /h	5,1 m/s	10,1 m	4,9
12 000 m <sup>3</sup> /h	5,9 m/s	12,0 m	5,7
13 000 m <sup>3</sup> /h	6,4 m/s	13,2 m	6,2
15 000 m <sup>3</sup> /h	7,4 m/s	15,5 m	7,1
17 000 m <sup>3</sup> /h	8,4 m/s	17,8 m	8,1
23 000 m <sup>3</sup> /h	11,4 m/s	24,6 m	10,9





## 8. Diskusjon

### 8.1 NTNU Varmeteknisk – Testmålinger

Målte omlufts faktorer på NTNU Varmeteknisk ligger generelt mellom 2,3 og 7,0 %. Dette ligger langt over anbefalingen i Byggetal 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999) på 1 %. Den anbefalte verdien er imidlertid utarbeidet for mindre bygninger, noe som verken NTNU Varmeteknisk, NTNU Verkstedteknisk eller Charlottenlund ungdomsskole kan klassifiseres som. Akseptabel omlufts faktor må vurderes ut ifra bygningens bruksområde, som er en lite relevant betraktning for anlegget siden det er et laboratorieanlegg.

Måleresultatene fra NTNU Varmeteknisk viser tydelig at små luftmengder medfører høyere omlufts faktor enn store luftmengder. Dette gir samsvar med teorien om at økt hastighetsrate gir mer fortykning av forurensninger. Ved luftmengder på 500 m<sup>3</sup>/h oppnås en omlufts faktor på mellom 6 og 7 %, mens ved større luftmengder på 1000 m<sup>3</sup>/h er omlufts faktoren omtrent halvert til mellom 2,3 og 4,3 %. Stor bevegelsesmengde medfører at forurensningene transporteres lengre vertikalt fra utløpet og dermed lengre fra luftinntaket. Dette stemmer godt overens med teori om bevegelsesmengde og strømning fra avkast når vindforholdene har liten innvirkning på strømmingen.

Den kombinerte hetten for luftinntak og avkast er utformet slik at luftinntaket ligger lavere enn utløpet og at avkastluften føres vertikalt oppover. Dette er gunstig for å oppnå lave forurensningskonsentrasjoner siden avkastluften vanligvis er varmere enn omgivelsene og derfor stiger. Ulempen med den kombinerte hetten er den ekstremt korte avstanden mellom luftinntak og avkast, samt de små luftmengdene. Plasseringen av hetten i bygningsavlukket er også svært ugunstig og samsvarer med illustrasjonen i figur 13, kapittel 3.4, for én fasade. Det er en konstant resirkulasjonssone som omslutter både avkast og luftinntak slik at den oppadrettede strålen med avkastluft fanges i sonen og forurensninger videre havner i luftinntaket. Siden bygningskonstruksjonene som medfører at sonen dannes er to meter høy og omslutter to fasader, forventes sonen å være av stor utstrekning. I følge studien av Wilson og Winkel (1982) er plasseringen av avkast i resirkulasjonssonen så ugunstig at høyere avkast eller større bevegelsesmengde ikke ville forbedret situasjonen. Det oppnås imidlertid en forbedring av omlufts faktor ved større bevegelsesmengde, som samsvarer med teori presentert av Petersen et al. (2002a). Lengre avstand mellom luftinntak og avkast ville sannsynligvis ikke forbedret situasjonen så lenge begge enheter befinner seg innenfor resirkulasjonssonen. Totalt er løsningen fullstendig i strid med teori om plassering av luftinntak og avkast, hovedsakelig når det gjelder å ta hensyn til nærliggende bygningskonstruksjoner og forurensede soner.

Vindhastighetene som ble målt på NTNU Varmeteknisk er vesentlig lavere enn klimadata fra Meteorologisk Institutt (2013b). Figur 37 i vedlegg 5.1 viser vindstille forhold for store deler av dag 4. Høyeste målte vindhastighet er 0,5 m/s, mens klimadata gir snitthastighet på 1,6 m/s. Selv om klimadata er korrigert for lokale forhold som høyde og terreng, er den høyere bygningskonstruksjonen ikke tatt i betraktning. I følge klimadata skifter vindretningen midt på dagen, men dette er ikke registrert i de lokale målingene. Grafen er generelt preget av store svingninger i vindretning og resirkulasjonssonene kan ha større innvirkning på

strømningsretningen enn den faktiske vindretningen. Avvikene mellom de målte vindforholdene lokalt på tak og lokale klimadata fra Meteorologisk Institutt bekrefter at den høyere bygningskonstruksjonen preger vindforholdene på taket i stor grad. Takkonstruksjonene reduserer vindhastighetene og medfører en resirkulasjonssone med virvler og skiftende strømningsretning langs den høye fasaden for alle vindretninger. Resultatene stemmer overens med studien av Lateb et al. (2011) som hevder vindforhold har liten betydning for forurensningskonsentrasjoner dersom en bygningskonstruksjon skjermer for vinden. Forurensningene vil for alle vindforhold legge seg langs den høye bygningsfasaden hvor den kombinerte hetten for luftinntak og avkast er plassert.

For små luftmengder varierer omlufts faktoren fra 6,0 til 7,0 % ved ulike dager og vindforhold. Standardavviket på mellom 0,7 og 1,2 % for de ulike dagene indikerer begrenset variasjon i måleresultatene. Dette antyder imidlertid at omlufts faktoren i praksis kan være stabil for alle vindforholdene som har blitt kartlagt. Det er heller ikke funnet noen god strømningsmessig forklaring på variasjonen i omlufts faktor, men en stabil omlufts faktor stemmer godt overens med etablert teori. Figur 7 gir godt samsvar med situasjonen som oppstår. Vindretning har lite betydning for hvor forurensede soner oppstår når to nærliggende bygninger har ulik høyde, hvorav den laveste bygningen har avkast plassert på tak. Forurensninger legger seg langs fasaden på den høyeste bygningen både dersom vinden treffer normalt på laveste og høyeste bygning. For NTNU Varmeteknisk er to av fire fasader dekket av en høyere bygning, slik at forurensningene vil legge seg i området hvor den kombinerte hetten er plassert for alle vindretninger. Situasjonen medfører en stabil og høy omlufts faktor uavhengig av hvilke vindforhold som opptrer.

Omlufts faktoren er mye lavere på dag 4 enn dag 1 og 2 for store luftmengder. Den fjerde dagen ble det benyttet et hullet rør for injisering av sporgass som kan ha medført endringer i konsentrasjonen. Resultatene for små luftmengder på dag 4 ser imidlertid ikke ut til å være preget av injiseringen i flere punkter. Ulike luftmengder kan prege strømmingen forskjellig og medføre andre resultater for store luftmengder ved bruk av hullet rør.

Det er registrert svært store avvik, på opp til 40 % (se vedlegg 5.1), mellom målte konsentrasjoner i målepunkt 1 og 2 i avkastkanalen. Siden første målepunkt ligger like etter injiseringspunktet og et lite bend er det grunn for å tro at lystgassen ikke er fullstendig innblandet i området. I alle perioder er det registrert høyere verdier i punkt 1 enn i punkt 2. Dette kan forklares med at målepunktet ligger på samme side av kanalen som injiseringspunktet og at høyest konsentrasjoner derfor opptrer på den siden av kanalen. Figur 33 i vedlegg 5.1 viser tydelig at konsentrasjonen i målepunkt 2 i avkast er relativt stabil mens i målepunkt 1 oppstår det periodiske svingninger i konsentrasjonen. Også i inntakskanalen oppstår det store svingninger, men dette kan ha årsak i strømningsforhold utendørs. Svingningene i målepunkt 1 kan skyldes en ufullstendig innblanding og turbulente soner etter bendet. De jevne resultatene i målepunkt 2 som ligger langt nedstrøms i kanalen gir grunn for å anta at konsentrasjonen er stabilisert. Bendene medfører turbulens og innblanding av lystgassen i avkastluften. Dette danner grunnlag for å vurdere to 90° bend som tilstrekkelig for å oppnå stabile resultater, også på de andre bygningene.

Tabell 26 og tabell 27 i vedlegg 5.1 viser hvordan omluftsfaktor varierer med ulik mengde tilsatt lystgass. Omlufts faktorer mellom 6,1 til 6,7 % ble registrert ved å variere gassmengden fra 0,07 til 0,35 l/min. Det er imidlertid ikke en tydelig korrelasjon mellom økt tilsatt gassmengde og endring i omlufts faktor. Standardavviket som ble beregnet til 1,2 % for de laveste gassmengdene og 0,8 % for de høyeste indikerer begrenset variasjon i måleresultatene. Det er imidlertid også liten variasjon i omlufts faktorene, mellom 6,1 og 6,7 %. At standardavviket er mindre med høyere konsentrasjon i avkastkanalen viser at resultatene ved store gassmengder er noe mer pålitelige enn ved mindre gass. Siden det ikke er funnet en korrelasjon mellom tilsatt gassmengde og omlufts faktor antas det at resultater med ulik konsentrasjon i avkast er sammenlignbare og at målt omlufts faktor er uavhengig av tilsatt gassmengde, men med feilkilder som kan gi noe måleavvik (se kapittel 8.4).

Fluktuasjoner i vindforhold gir ingen tydelig innvirkning på konsentrasjoner i luftinntak, men det er grunnlag for å vurdere om det er en sammenheng. Et eksempel er tilfellet på dag fire som er vist i figur 39, vedlegg 5.1. I grafen er den noen konsentrasjonsmålinger som utpeker seg når det blåser rundt 2 m/s fra vest. Det observeres topper i konsentrasjonen i de samme periodene. Høyeste konsentrasjon i inntaksluften er målt under 4 minutter etter et av vindkastene på 2 m/s. At det tar noen minutter mellom maksimumsverdiene blir målt kan skyldes at forurensningene er opphopet i en resirkulasjonszone en stund etter vindkastet. Ved disse vindforholdene presses forurensningene mot veggen nærmest inntak- og avkastenheten og kan medføre at forurensningene blir fanget i området i større grad enn ved vindstille forhold. Økningen i konsentrasjon varierer imidlertid ikke i samme størrelsesorden som vindhastighet og det er registrert vindkast som ikke kan knyttes direkte til høye konsentrasjonsmålinger. Derfor er det grunn for å anta at svingningene i konsentrasjon hovedsakelig skyldes andre feilkilder (se kapittel 8.4).

Omlufts faktorene som er beregnet med ASHRAE Fortynningsmetode er svært høye sammenlignet med resultatene fra målinger på NTNU Varmeteknisk. Metoden gir høyere omlufts faktorer med store luftmengder sammenlignet med små luftmengder, motsatt av resultatene fra målingene. Dette stemmer godt med funn fra en tidligere studie av Gupta et al. (2012b) som er utført på metoden, spesielt for korte avstander mellom luftinntak og avkast. Modellen baseres på teorien om kritisk vindhastighet og konsentrasjonen vil derfor følge svingningene i figur 9, kapittel 3.3. I beregningene ble det benyttet korrigeret vindhastighet fra Meteorologisk Institutt (2013b) som er vesentlig høyere enn de lokale hastighetene som ble målt på tak. Modellen kan dermed beregne for forhold på motsatt side av kritisk vindhastighet enn det som faktisk er tilfellet. Dette kan forklare omvendt korrelasjon mellom luftmengder og omlufts faktor for målt og beregnet tilfelle. For en grundigere vurdering av hvordan parametere i metoden påvirker omlufts faktorer henvises det til Holmen (2012). Siden hastigheten over utløpet er mindre enn 2 m/s, som er satt til slutthastighet for kastelengden, oppnås ingen kastelengde på NTNU Varmeteknisk.

Strømningsmønsteret fra røykappullen var preget av raske fluktuasjoner og mange endringer i strømningsretning. Resultatene som er vist i figur 40, vedlegg 5.1, viser tydelig hvordan strømningsretningen endrer seg i ulike retninger i løpet av de få minuttene hvor røyk ble generert. Den dominerende strømningsretningen var stigende med noe helning mot

nærliggende vegg, som vist på bilde 2 i figur 40. Flere av bildene viser hvordan røyken til tider hadde en nedadgående retning som kan skyldes nedslag fra avkast eller bygningskonstruksjonen. Dette stemmer godt overens med hvordan virvler i resirkulasjonssoner beveger seg, som vist i figur 4. For alle de kartlagte tilfellene ble det registrert hastighetsrater under 1,5, som vist i tabell 31 i vedlegg 5.1. Dette indikerer også at nedslag forekommer. Observasjoner av strømningsmønster bekrefter at vindforhold har liten innvirkning på de lokale strømningsforholdene ved avkast og luftinntak. Resirkulasjonssonene er dominerende ved alle vindforhold og medfører virvler og turbulente forhold som gir svært varierende strømningsretning.

## **8.2 NTNU Verkstedteknisk**

Omluftsfaktorene som ble målt på NTNU Verkstedteknisk ligger mellom 1,6 og 2,7 %. Det er en vesentlig forbedring fra de målte omluftsfaktorene på NTNU Varmeteknisk, men ligger over anbefalt grenseverdi til Byggdetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999) på 1 %. For kontorbygg med få kritiske forurensningskilder innendørs og normale krav til luftinntak kan dette være akseptable verdier. Forbedringen kan skyldes flere forhold, hvorav bruk av jethette med større bevegelsesmengde er en vesentlig faktor. At utløpet på NTNU Verkstedteknisk er på høyde med nærliggende bygningskonstruksjon, i stedet for å være omsluttet av bygningen som på NTNU Varmeteknisk, kan også ha stor betydning for omlufts faktoren. Luftinntaket er i tillegg plassert over 10 meter nedstrøms fra jethetten, som gir gode muligheter for fortykning av forurensninger før de havner i luftinntaket.

Luftinntaket på NTNU Verkstedteknisk er plassert på den bygningsfasaden som vender ut mot et åpent landskap. Selv om bygget ligger i et område med en rekke høye bygninger, kan fasaden med luftinntaket anses som isolert. Vindforhold antas derfor å ikke ha større innvirkning på opphopninger i området rundt luftinntaket, men er avgjørende for hvor resirkulasjonssoner oppstår. Det forventes en stor resirkulasjonssone med forurenset luft på fasaden med luftinntaket ved vindretninger fra sør, grunnet forholdene som er vist i figur 4. Siden vind fra sørvest er dominerende i Trondheim kunne luftinntaket vært plassert på en annen fasade for å unngå høy forekomst av kritisk vindretning. Til tross for resirkulasjonssonen over luftinntaket ved vindretninger fra sør er plasseringen av luftinntaket i henhold til teori om forurensede soner og anbefalinger for plassering av luftinntak.

Jethettens utløp ligger kun 0,2 meter over høyeste taknivå, men hele 2,7 meter over takflaten hvor jethetten er plassert. Høyt avkast har samme positive innvirkning på omlufts faktor som en høy hastighetsrate, mens i dette tilfellet er plassering ikke i henhold til teorien. Utløpet ligger så lavt at det er stor sannsynlighet for at strålen ikke går klar av resirkulasjonssonen som dannes over jethetten grunnet den høyere bygningskonstruksjonen. Dette bekrefter betydningen av å betrakte høyeste konstruksjon når høyden på avkast bestemmes. Det er også sannsynlig at forurensningene følger takflaten til den turbulente sonen som dannes etter teknisk rom ved luftinntaket, slik at forurensninger som havner i den turbulente sonen vil ende i luftinntaket. Generelt har bygningen en komplisert design som gjør det utfordrende å forutse alle turbulente soner som kan oppstå. Utløpet kunne vært hevet mer for å sikre at forurensningene ikke havner i resirkulasjonssonen og for å legge til rette for fortykning av forurensninger. Avstanden mellom luftinntak og avkast på 10 meter er langt bedre enn

anbefalingen på 5 meter, selv uten å benytte jethette, men dette kan ha en negativ innvirkning på omlufts faktoren. En kort avstand mellom luftinntak og avkast ville kreve et lavere avkast for at luftstrålen ikke skal havne i resirkulasjonssonen. At løsningen medfører lavere omluft forutsetter imidlertid at luftmengdene er så store at det ikke oppstår nedslag av forurensninger langs avkast. Ut ifra anbefalingene i Byggdetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999) anses utformingen av luftinntak og avkast å være gunstig, men teori fra tidligere studier indikerer at løsningen ikke er optimal. Et høyere avkast og plassering av luftinntak på en annen fasade kunne ha medført bedre forhold.

Måleresultatene fra NTNU Verkstedteknisk viser mer omluft ved store enn ved små luftmengder, motsatt av resultatene fra NTNU Varmeteknisk. Det stemmer ikke med teorien om at økt hastighetsrate medfører lavere forurensningskonsentrasjoner på taknivå. Selv om målepunktet er plassert på fasaden like under taknivå og ikke på tak, er det antatt at punktet er representativt for variasjonen i forurensningskonsentrasjoner på taket siden forurensningene sannsynligvis vil følge takflaten til fasaden. På NTNU Varmeteknisk er den kombinerte hetten for avkast og luftinntak plassert i et skjermet område med lite påvirkning fra vindforhold, slik at utløpshastighet er den avgjørende faktoren for endringer i omlufts faktor. På NTNU Verkstedteknisk er imidlertid utløpet plassert i et mer åpent område hvor eksterne faktorer kan påvirke omlufts faktoren i større grad. De eksterne strømningsforholdene kan blant annet påvirke transporten av forurensninger ulikt ved varierende bevegelsesmengde over utløp, som blant annet er tilfellet for den kritiske vindhastigheten presentert av Wilson (1982). Situasjonen med mindre luftmengder kan befinne seg langt ifra kritiske forhold, mens store luftmengder kan medføre at kritisk vindhastighet inntreffer. Figur 9 gir imidlertid ikke informasjon om absolutt fortykning, kun relativt til fortykningen ved kritiske forhold. Resultatene bekrefter teorien om at stor bevegelsesmengde kan gi høyere omlufts faktor ved noen vindforhold, men det presiseres at relativ omluft er av mindre interesse enn de absolutte omlufts faktorene. De høyeste konsentrasjonene som kan forekomme, altså ved kritisk vindhastighet, bør danne grunnlaget for å sammenligne løsninger for luftinntak og avkast. Det vil imidlertid sjelden forekomme vindstyrker i Trondheim som er like høye som den kritiske verdien og det kan antas lavere omlufts faktorer for de fleste vindforhold. I følge teorien gir stor bevegelsesmengde lavere maksimal konsentrasjon enn liten bevegelsesmengde. Ventilasjonsanlegg bør derfor prosjekteres for høye hastigheter over utløpet, til tross for at resultatene fra NTNU Verkstedteknisk indikerer at høye hastigheter medfører mer omluft.

Siden store luftmengder i alle tilfeller medfører høyere omlufts faktor er det godt grunnlag for å anta at måleresultatene er pålitelige. Feilkilder kan imidlertid gi usikkerhet i resultatene. Blant annet tilføres det mer lystgass ved store luftmengder for å oppnå tilsvarende konsentrasjon i avkast, slik at lekkasjer kan forårsake en større feilkilde ved store enn ved små luftmengder. Dette vil diskuteres nærmere i kapittel 8.4.

På dag 2 og 3 har vinden en retning direkte fra jethetten til luftinntaket. For disse tilfellene forekommer også de høyeste omlufts faktorene. Resultatene stemmer godt med teori om at kritisk vindretning er når vinden fører forurensningene fra avkast mot luftinntaket. I tillegg forekommer de laveste hastighetsratene på disse dagene (se tabell 38, vedlegg 5.2), siden vindhastighetene er høye. Dette kan også være årsaken til de høye omlufts faktorene.

Hastighetsratene ligger under 1,5 på dag 2 og 3 og det er sannsynlig at nedslag forekommer fra avkast. Dette medfører at forurensninger havner i resirkulasjonssonen. Takkonstruksjonen har i tillegg større innvirkning på omluftsfaktoren ved så lave hastighetsrater. Bevegelsesmengden over utløpet har mindre dominans for forurensningenes strømning enn ved lavere vindhastigheter, slik at den forurensede luften har en strømningsretning mer horisontalt. For første tilfellet på dag 1 er strømningsretningen tilnærmet kritisk vindretning, men tilfellet gir lavere omluftsfaktor. Dette kan forklares med at hastighetsraten er høyere og forurensningene transporteres lengre oppover fra utløpet. Dette er i tillegg den vindhastigheten som er mest representativ for normale forhold i Trondheim, slik at det hovedsakelig kan forventes omluftsfaktorer på under 2 % ved NTNU Verkstedteknisk. Siden vindforholdene ikke kan kontrolleres må det prosjekteres med høy hastighet over utløp for å oppnå høy hastighetsrate og lave omluftsfaktorer.

Det er ikke funnet noen vesentlige forskjeller i resultatene fra dag 1 med store luftmengder, selv om vindretningene er vidt forskjellige. Det første tilfellet har en vindretning som fører forurensningene direkte mot luftinntak, mens det andre tilfellet gir vind i motsatt retning. Omluftsfaktoren ved det første tilfellet forventes derfor å være høyere, noe som ikke har inntruffet. Resultatene indikerer at andre strømningsforhold enn vindforholdene er dominerende for strømmingen fra jethetten. Årsaken kan være at forurensningene havner i resirkulasjonssonen som dannes etter det høyere påbygget. I følge studien av Wilson og Britter (1982) kan høyden på utløpet være utilstrekkelig til at forurensningene unnslipper resirkulasjonssonen som også dekker luftinntaket. Dermed vil turbulens og virvler i resirkulasjonssonen være avgjørende for strømmingen mellom jethetten og luftinntaket, mens vindretning er av liten betydning for strømningsmønsteret.

Ved prosjekterte luftmengder oppnås en maksimal hastighet over jethettens utløp på 5,9 m/s ut ifra hastighetsberegninger ved luftmengder over utløpsareal. Maksimalhastigheten ligger langt under den anbefalte verdien fra ASHRAE (c2011, kap. 45) på 10 m/s som skal sikre akseptabel luftkvalitet. I beregningene ligger til grunn en antagelse om jevn hastighetsprofil over utløpet. I jethette UH av Swegon som benyttes på NTNU Verkstedteknisk medfører en kon i nederste del av hetten at luften tvinges til siden og akselereres. Det kan derfor forventes noe høyere snitthastigheter over utløp enn det beregningen tilsier, selv om det ikke har lyktes å finne dokumentasjon på dette. At jethettens øverste del er innsnevret og tvinger luften mot senter av jethetten har i følge Tjelflaat (2012) også neglisjerbar betydning for hastigheten. Tverrsnittarealet inn på hetten og over utløpet er det samme, slik at akselerasjonen rundt konen er det eneste som øker bevegelsesmengden fra kanalen til jethettens utløp. Konen medfører i tillegg store støttap som gir høye trykktap over jethetten. Dette begrenser mulighetene for til enhver tid å oppnå store bevegelsesmengder over utløpet med VAV, uten at anbefalinger til maksimalt trykktap overskrides.

Siden ventilasjonsanlegget på NTNU Verkstedteknisk benytter CO<sub>2</sub> som behovsindikator kan samtidighetsfaktor og luftmengder ikke beregnes etter formlene av Mysen et al. (2003). Etter definisjonen av samtidighetsfaktor kan faktoren imidlertid beregnes som raten mellom tilførte luftmengder på et tidspunkt og prosjekterte luftmengder, forutsatt at prosjekterte luftmengder tilsvarer brukssamtidighet på 1. De minste luftmengdene som forekom under målingene, ved

samtidighetsfaktor på 0,72, gir beregnet hastighet på 4,2 m/s over utløpet. Alle målingene ble imidlertid utført på dagtid i kontortiden, slik at det forventes mindre luftmengder på andre tidspunkt av døgnet når samtidigighetsfaktoren antas å være lavere. Minste samtidigighetsfaktor som kan oppnås ut ifra styringsprinsipp er 0,3, som gir luftmengder på kun 5 000 m<sup>3</sup>/h. Dette vil medføre en beregnet hastighet på kun 1,8 m/s, som er av samme størrelsesorden som avkast uten jethette og som ikke gir noe kastelengde. Siden optimal plassering av luftinntak i følge Schulman og Scire (1991) avhenger av bevegelsesmengde over utløpet, medfører dette utfordringer med å utforme et anlegg som gir god luftkvalitet for alle luftmengder som kan forekomme. Ut ifra teorien om hastighetsrate stilles det spørsmål ved om jethetten medfører noe bedre luftkvalitet over luftinntak ved så lave hastigheter enn det et vanlig avkast ville medført. Største bidraget fra jethetten vil i et slikt tilfelle være høydeøkningen fra taknivå på grunn av jethettens størrelse. Det er ikke gitt noen spesifikk anbefaling av leverandør eller produsent til laveste trykkfall som bør benyttes over jethetten, som innebærer at hensyn til luftkvalitet ikke ivaretas.

Det er ikke funnet noen direkte sammenheng mellom sterke vindkast og høye forurensningskonsentrasjoner i luftinntak. Figur 49 i vedlegg 5.2 viser vindhastighet og konsentrasjon for dag 2 hvor vinden går i retning fra avkast og direkte mot luftinntaket. De høyeste konsentrasjonene som er målt ser ikke ut til å ha noen sammenheng med vindforholdene. Skrå vindretninger medfører i følge Wilson (1979) mer turbulens, men de store fluktuasjonene i vindretning og usikkerhet i målinger gir lite grunnlag for å vurdere om dette er tilfellet. Siden luftinntaket har en plassering i den forurensede sonen som tilsvarer plasseringen i figur 4, kan resirkulasjonssonen være skyld i skiftende konsentrasjon. En annen forklaring er at variasjonen i målt lystgasskonsentrasjon skyldes feilkilder, som er nærmere diskutert i kapittel 8.4.

Beregninger av omlufts faktor med ASHRAE Fortynningsmetode gir hovedsakelig høyere resultater enn ved feltmålinger, med unntak av tilfellene med store luftmengder på dag 1. At omlufts faktoren øker med vindhastighet tyder på at bevegelsesmengden er dominerende for omlufts faktoren på dag 1, som tilsvarer tilfellet hvor vindhastigheten er lavere enn den kritiske verdien (se figur 9). De høye hastighetene på dag 2 og 3 medfører trolig tilfeller nærmere den kritiske vindhastigheten enn på dag 1. Bevegelsesmengde har liten betydning for omlufts faktoren ved høye vindhastigheter, som kan forklares med at hastighetsratene er relativt like (se tabell 38, vedlegg 5.2). For små luftmengder er forskjellen i hastighetsrate større og medfører større forskjeller i omlufts faktor. En grundigere vurdering av beregningsmetoden er utført av Holmen (2012).

Beregningene gir kastelengder på 10,8 og 15,2 meter for henholdsvis små og store luftmengder ved slutt hastighet på 2 m/s. Fortynning på mellom 0 og 5,6 innebærer at forurensningskonsentrasjonen er redusert til 0 og 18 % av den opprinnelige konsentrasjonen over utløpet når strålen har nådd kastelengden. Disse resultatene gjelder imidlertid i et isolert miljø og kan avvike mye ved høye vindhastigheter. Beregningsmetoden tar heller ikke hensyn til at konen kan ha påvirket hastighetsprofilen slik at det i praksis oppnås høyere hastigheter over utløp.

Røykempull ble brukt den andre dagen, hvor det var høye vindhastigheter med retning mot nord. Røyken fra ampullen, som var plassert ved foten av jethetten, gikk direkte mot luftinntaket (se figur 50, vedlegg 5.2). Røyken beveget seg konstant med vindretningen nordover med ubetydelige avbøyninger. Selv om røyken fra ampullen ikke har en stor oppadgående bevegelsesmengde, så illustrerer resultatene hvor stor innvirkning vindforhold kan ha på strømningsretningen. Et annet interessant resultat er at vindforholdene dominerte røykens strømningsmønster selv om røykempullen var plassert i området som antas å være en resirkulasjonssone; omtrent 2 meter lavere enn høyeste bygningskonstruksjon. Avstanden fra fasaden til røykempullen var imidlertid 13 meter, som kan være tilstrekkelig for å unngå den turbulente sonen. Det presiseres at så høye vindhastigheter som forekom på dag 2 er uvanlige i Trondheim og det vil sjelden forekomme tilfeller hvor vindforholdene er like dominerende for strømningsmønsteret.

### **8.3 Charlottenlund ungdomsskole**

På Charlottenlund ungdomsskole ble det målt omlufts faktorer på mellom 0,2 og 0,4 %, som ligger godt innenfor anbefalt grenseverdi til Byggedetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999). Bygningsformen følger samme prinsipper som NTNU Verkstedteknisk, slik at forbedringen fra omlufts faktorene på NTNU Varmeteknisk kan begrunnes likt. Lengre avstand mellom avkast og luftinntak, avkast som høyeste punkt på bygningen og bruk av jethette kan være årsaker til de lavere omlufts faktorene.

Omlufts faktorene på Charlottenlund ungdomsskole er også vesentlig lavere enn resultatene fra NTNU Verkstedteknisk, selv om begge bygningene benytter jethette. Plassering av luftinntak og avkast på bygningene følger samme prinsipper, med avkast plassert på tak og luftinntak på vegg av teknisk rom, men det er også noen vesentlige forskjeller i konstruksjonene. Utløpet på Charlottenlund ungdomsskole ligger høyere over nærliggende bygningskonstruksjoner, med 0,8 meter over taknivå. I tillegg ligger bygningen i et noe mer isolert område og det er ingen høye bygningskonstruksjoner på skolen eller nærliggende bygninger som påvirker strømmingen i større grad. På NTNU Verkstedteknisk medfører bygningskonstruksjonen en resirkulasjonssone like under jethettens utløp, mens dette ikke vil forekomme på Charlottenlund ungdomsskole. Selv om fasaden på teknisk rom kan medføre en liten resirkulasjonssone, som vist på figur 3, forventes denne å være av vesentlig mindre omfang siden bygningskonstruksjonen som genererer sonen er mindre. En annen fordel på skolen er at det benyttes større bevegelsesmengde over utløpet, som medfører at forurensningene føres lengre opp fra jethetten før vinden antas å dominere strømmingen. Avstand mellom luftinntak og avkast på Charlottenlund er kun 3 meter, som er vesentlig kortere enn på NTNU Verkstedteknisk.

Avstanden mellom luftinntak og avkast imøtekommer ikke anbefalingene i Byggedetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999) for vanlige avkast, men gir samsvar med tidligere studier. I følge Schulman og Scire (1991) vil områder med høye forurensninger avhenge av bevegelsesmengde og høyde på avkast, slik at optimal plassering av luftinntak må vurderes i sammenheng med disse faktorene. Den korte avstanden mellom luftinntak og avkast kan ha en positiv innvirkning på omlufts faktoren ved Charlottenlund ungdomsskole, siden luftstrålen fra utløpet lettere går klar for resirkulasjonssonen over luftinntaket (se figur 12). Dette



forutsetter at hastighetsratene er høyere enn 1,5 slik at nedslag fra utløpet unngås. For de målte forholdene er dette hovedsakelig tilfellet (se tabell 45, vedlegg 5.3). Fritaket for avstandskravene i Byggetaljer 552.360 er derfor hensiktsmessig dersom en hastighetsrate på over 1,5 ivaretas til enhver tid. En forbedring kunne imidlertid vært oppnådd ved å plassere luftinntaket på motsatt fasade, siden dette ville medført at kritisk vindretning forekom sjeldnere. Avkast på Charlottenlund ungdomsskole har i følge relevant teori en optimal utforming. Jethetten har en akseptabel høyde, er plassert på midten av takflaten hvor det ikke forekommer resirkulasjonssoner og bygningen har en ukomplisert utforming som påvirker strømningsforholdene i liten grad. Ut ifra måleresultatene og strømningssteori anses luftinntak og avkast på Charlottenlund ungdomsskole å være svært velfungerende.

Variasjonen i resultatene fra 0,2 til 0,4 % er så liten at det ikke er grunnlag for å vurdere hvordan ulike vindforhold og luftmengder innvirker på omluften. Standardavviket på 0,1 % indikerer svært lite variasjon i måleresultatene. En sammenligning av konsentrasjon i luftinntak og vindforhold er vist i figur 58, vedlegg 5.3, men fluktuerende vind ser ikke ut til å ha noen innvirkning på konsentrasjonsnivåene. I måleperioden forekom svært høye vindhastigheter, slik at omlufts faktorer ved normale vindforhold i Trondheim ikke har blitt kartlagt. Selv for de uvanlige vindforholdene er hastighetsraten godt over 1,5, med unntak av tilfellet på dag 1 med små luftmengder og vindhastighet på 4,1 m/s. Dette er imidlertid vindforhold som vil forkomme ekstremt sjeldent og nedslag langs jethetten vil sannsynligvis ikke forekomme for de fleste dager i året. Ut ifra teorien om hastighetsrate så gir lavere vindhastigheter mindre omluft når det antas at vindhastigheten er mindre enn den kritiske. Den kritiske verdien øker med utløpshøyde og hastighet. Siden det benyttes et høyt utløp og stor bevegelsesmengde er det grunn for å tro at kritisk verdi ligger over de kartlagte forholdene. Dette gir grunnlag for å anta at det store deler av året ikke forekommer omluft mellom luftinntak og avkast på Charlottenlund ungdomsskole. I tillegg belyser det er annen fordel med store luftmengder. Siden det hovedsakelig forekommer lave vindhastigheter i Trondheim vil en høy kritisk verdi medføre at maksimalkonsentrasjon forekommer sjelden.

Ved prosjerterte luftmengder oppnås en maksimal hastighet over jethettens utløp på 11,4 m/s, som nesten er en dobling av maksimal hastighet på NTNU Verkstedteknisk. Også her er hastighetsberegninger utført ved luftmengder over utløpsareal, med en antagelse om jevn hastighetsprofil over utløpet. Jethette jta-2 av TROX Auranor som benyttes på Charlottenlund ungdomsskole er en kvadratisk hette med en kontinuerlig innsnevring av tverrsnittareal. På grunn av den kontinuerlige reduksjonen i areal antas hastighetsprofilen over utløpet å være mindre forstyrret enn i jethette UH av Swegon. Innsnevringen medfører også at arealet over utløpet er mindre enn i kanalen, som er årsaken til at bevegelsesmengden øker. At innsnevringen i jethetten tvinger strømningslinjene mot senter av jethetten er også her av liten betydning for hastigheten. Den kontinuerlige innsnevringen i areal medfører mindre trykktap over hetten enn i jethette UH av Swegon, som kommer tydelig frem av dimensjoneringsdiagrammene i databladene. Mindre støttap er også medvirkende til at det oppnås høyere maksimal hastighet over jethettens utløp uten å gå på bekostning av anbefalinger til maksimalt trykkfall over hetten. Dette indikerer at produktvalg har stor betydning for hvilke bevegelsesmengder som oppnås over jethetten.

Siden ventilasjonsanlegget på Charlottenlund ungdomsskole benytter CO<sub>2</sub> som behovsindikator og styres både etter VAV og CAV, kan formlene av Mysen et al. (2003) ikke benyttes. Samtidighetsfaktor kan imidlertid beregnes som raten mellom tilførte luftmengder på et tidspunkt og prosjekterte luftmengder, forutsatt at prosjekterte luftmengder tilsvarer samtidighet på 1. Minste samtidighetsfaktor som kan oppnås ut ifra styringsprinsipp er da 0,45, som gir luftmengder på vel 10 000 m<sup>3</sup>/h og minste hastighet over utløp på 5,1 m/s. Dette er en vesentlig forbedring fra hastighetene ved NTNU Verkstedteknisk. Luftmengdene er imidlertid mindre enn anbefalingen av TROX Auranor (2012a) på 15 000 m<sup>3</sup>/h som skal sikre stor bevegelsesmengde over utløpet. Dette impliserer at de minste luftmengdene som kan forekomme ikke har blitt tatt i betraktning ved prosjektering når luftkvalitetskrav har blitt vurdert, slik som ASHRAE (c2011, kap. 45) anbefaler. De minste luftmengdene som forekom under målingene, ved samtidighetsfaktor på 0,52, gir beregnet hastighet på 5,9 m/s over utløpet. Dette er også vesentlig høyere enn på NTNU Verkstedteknisk, selv med en lavere samtidighetsfaktor. Generelt forekommer betydelig større bevegelsesmengder over utløpet på Charlottenlund ungdomsskole enn på NTNU Verkstedteknisk, som kan være en vesentlig årsak til de lavere omlufts faktorene.

Både på NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole ligger høyest målte samtidighetsfaktor uten overstyring på rundt 0,7. Dette gir trykkfall langt under den maksimale grensen som er satt. Selv om det kun er få dager som er kartlagt, så er det grunn for å anta at luftmengder opp mot det som er prosjektert sjelden forekommer. Dette kan begrunnes med at målingene er utført på tidspunkt på dagen hvor det forventes høy personbelastning. Resultatene viser at store innsparinger i dimensjonering av anlegget kunne vært oppnådd dersom maksimale luftmengder hadde blitt satt til en lavere brukssamtidighet ved prosjektering. Dette kunne medført både høyere samtidighetsfaktorer og mindre dimensjoner på kanaler og jethetter, selv med uendrede luftmengder. Et mindre utløpsareal på hetten ville videre medført større bevegelsesmengder over utløpet til enhver tid og høyere trykkfall. En vurdering av brukssamtidigheten er derfor vesentlig for å oppnå høye hastigheter over jethetten. Ulempen med en slik neddimensjonering er at anlegget ikke vil være i stand til å levere nok luft dersom brukssamtidigheten overstiger den samtidigheten som har blitt satt til maksimal luftmengde, eventuelt at det maksimalt tillatte trykkfallet overstiges. Ut ifra studiene av Maripuu (2009), Halvarsson (2012), Bernard et al. (2003) og Mysen et al. (2005) er det imidlertid svært liten sannsynlighet for at brukssamtidighet nærmere 1 forekommer for kontorer og skoler.

Større bevegelsesmengde kan også sikres ved å benytte en høyere minimumsluftmengde for VAV eller ved å benytte CAV i kombinasjon med VAV. For både NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole tilføres 30 % av de maksimale luftmengdene når det er lave CO<sub>2</sub>-konsentrasjoner i rommet. På førstnevnte bygning, hvor hele anlegget baseres på VAV, medfører dette en minste samtidighetsfaktor på 0,3. Dersom minimumsluftmengder hadde blitt satt opp ville det også økt den minste samtidighetsfaktoren som kan forekomme i anlegget og redusert variasjonen i luftmengder mellom maksimalt og minste pådrag. Løsninger medfører imidlertid mindre energibesparelse ved bruk av VAV og virker dermed mot formålet med behovsstyrt ventilasjon. En annen løsning for å ivareta både

energieffektivitet og god luftkvalitet er å kombinere VAV med rom som benytter CAV på samme ventilasjonsanlegg, slik som på Charlottenlund ungdomsskole. Minste samtidighetsfaktor som kan forekomme på skolen er 0,45, som er en vesentlig økning fra NTNU Verkstedteknisk. Dette medfører at forskjellen i bevegelsesmengde for beste og verste tilfelle er mindre, og det er enklere å utforme et anlegg som imøtekommer krav til både laveste og høyeste trykkfall over jethetten. Det presiseres at CAV bør benyttes dersom dette er hensiktsmessig med tanke på bruksmønster i lokalene og ikke for å oppnå høyere bevegelsesmengde. I sistnevnte tilfelle vil løsningen ha samme negative effekt på energieffektiviteten som å øke minimumsluftmengder.

ASHRAE Fortynningsmetode gir beregnede omlufts faktorer for dag 1 som er vesentlig høyere enn ved målinger. Det er tydelig at den lave hastighetsraten medfører høye beregnede omlufts faktorer og at hastighetsraten er av stor betydning i metoden. For de resterende dagene gir tilfellene med stor luftmengde godt samsvar med målte verdier. For mindre luftmengder ser den korte avstanden mellom luftinntak og avkast ut til å ha større betydning for omlufts faktorene og høyere verdier er beregnet. Det presiseres at vindforholdene gjelder ved kritisk vindretning, som innebærer at beregninger og målinger ikke har like betingelser for dag 2 og 3. For en mer detaljert vurdering av beregningsmetoden henvises det til Holmen (2012).

De beregnede kastelengdene for tilfellene som forekom under feltmålingene er noe høyere for Charlottenlund ungdomsskole enn for NTNU Varmeteknisk. På sistnevnte bygg ble de beste forholdene som kan forekomme kartlagt, siden luftmengdene ble overstyrt til prosjekterte luftmengder. På Charlottenlund ungdomsskole ble imidlertid kun forholdene når luftmengdene var maksimalt 74 % av de prosjekterte luftmengdene undersøkt. Ved prosjekterte luftmengder oppnås en beregnet kastelengde på hele 24,6 meter, som er en vesentlig økning fra 15,9 meter på NTNU Verkstedteknisk. Avviket skyldes ulik bevegelsesmengde over utløpet siden de ulike jethettene gir forskjellig trykktap. Jethettene på NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole er prosjektert med et omtrentlig trykkfall på henholdsvis 70 og 50 Pa. Likevel oppnås det større bevegelsesmengde og lengre kastelengder på Charlottenlund ungdomsskole. Årsaken er at det benyttes en jethette med en annen utforming som gir en mindre trykktapskoeffisient for hetten. Beregningsmetoden tar som allerede nevnt ikke hensyn til at hastighetsprofilene kan være ujevne. Fortynning på mellom 4,9 og 10,9 på Charlottenlund ungdomsskole tilsvarer at forurensningene har blitt fortynnet til mellom 9 og 18 % av opprinnelig konsentrasjon når luftstrålen har nådd kastelengden.

Det var ikke muligheter for å teste med røykappull i nærheten av jethettens utløp og ampullen ble isteden brukt ved bygningens fasade som vender mot nord. På tidspunktet hvor forsøket ble utført på dag 3 var vindretningen fra vest, slik at i følge teorien skulle en resirkulasjonssone dannes på takflaten like etter fasaden (se figur 3). Dette kan tydelig observeres på bilde 1 (figur 59, vedlegg 5.3). Under forsøket var vindretningen noe skiftende og strømming langs takflaten forekom til tider, som vist i bilde 2. Denne strømmingen var ikke preget av turbulens siden avstanden fra røykappullen til den sørlige fasaden som ble truffet av vinden var stor nok til å unngå resirkulasjonssonen. Selv om strømningsforholdene ved

teknisk rom ikke ble undersøkt, så kan det trekkes paralleller til strømningsmønstrene ved bygningsfasaden. Siden teknisk rom utgjør et lite takareal har jethetten på tak kun en avstand på mellom 2 og 6 meter fra fasadene. Det er derfor interessant å vurdere om utløpet kan havne i en resirkulasjonssone på tak. Siden de målte omlufts faktorene er så lave er det grunn for å tro at jethetten har en plassering og høyde som gjør at utløpet ikke havner i en resirkulasjonssone ved de vindforholdene som har blitt undersøkt. I tillegg er høyden på teknisk rom så liten at det forventes en resirkulasjonssone av lite omfang.

## 8.4 Feilkilder

### *Omlufts faktorer*

Resultatene fra feltmålingene kan være preget av måleusikkerhet og feilkilder. Spesielt oppstår det mange feilkilder ved feltarbeid siden en rekke innvirkende faktorer ikke er mulig å kontrollere. Her er det gitt en oversikt over faktorer som har blitt vurdert som feilkilder og hvor betydningsfulle de anses å være for resultatene:

- **Lekkasjer fra teknisk rom til luftprøver**

Luftprøvene som hentes inn fra kanalene kan være utsatt for lekkasjer i flere punkter; et utett kanalnett kan medføre at lystgass i teknisk rom gir en høyere konsentrasjon av lystgass i kanalen enn det som forekommer over luftinntaket. Det kan også oppstå lekkasjer i tilkoblingspunktene for ledningene mellom målepunktet i kanalen og sporgassutstyret. På NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole har imidlertid konsentrasjonen i teknisk rom til tider vært høy, opp til 50 mg/m<sup>3</sup>. Kontrollpunktet var omtrent 0,5 meter over gulvhøyde i området hvor gassflasken og injiseringspunktet befant seg. Konsentrasjonen ble drastisk redusert til 5 mg/m<sup>3</sup> på et par minutter ved å ventilere rommet. Denne drastiske endringen i konsentrasjon i teknisk rom ga ikke noe utslag på målte konsentrasjoner i luftinntaket. Dette danner grunnlag for å anta at systemet er relativt tett og at feilkilden kan neglisjeres.

- **Lekkasjer i utstyr for injisering av gass**

De høye konsentrasjonene som ble registrert i teknisk rom på NTNU Verkstedteknisk og Charlottenlund ungdomsskole bekrefter at det forekom lekkasjer i utstyret for injisering av gass. Lekkasjer kan ha forekommet i koblingene mellom ulike enheter i det eksperimentelle oppsettet til injiseringspunktet, blant annet i koblingene fra ledningene til gassflasken, rotameteret og injiseringspunktet. Siden det allerede er konkludert med ingen lekkasjer videre fra teknisk rom til luftprøvene, så vil ikke dette medføre målefeil i omlufts faktorene.

- **Utskiftning av luftprøve i gassanalyatoren**

En annen feilkilde kan være ufullstendig utskiftning av luft i gassanalyatoren mellom prøvene. Luftprøvene hentes inn gjennom slanger, analyseres og ventileres dermed ut av analysekammeret. Dersom ikke all luft har blitt skiftet ut mellom to prøver for avkast og luftinntak kan dette medføre en høyere målt konsentrasjon i luftinntak enn det som er tilfellet.

- **Lekkasje via varmegjenvinner**

Gassen ble tilsatt i avkastkanalen etter varmegjenvinneren og viften. En lekkasje fra avkast til inntakskanal via varmegjenvinneren antas å være lite sannsynlig, siden dette innebærer et tilbakeslag av luft motsatt av strømningsretningen.

- **Inhomogen gassblanding i målepunkt**

I målepunktene for lystgasskonsentrasjon er det antatt en homogen gassblanding, på grunnlag av mange bend og lange kanalstrekk fra injisering- til målepunkt. Dersom konsentrasjonen i praksis ikke er stabilisert i målepunktene kan de måle verdiene være lite representative for mengden omluft i kanalene. Lystgassen har også noe høyere tetthet enn luft, som kan medføre at gassen legger seg nederst i kanalen dersom omrøringen fungerer dårlig. Konsentrasjonene har kun blitt målt i ett punkt per kanal, slik at ujevnheter i konsentrasjon over tverrsnittet har ikke blitt kartlagt i måleprosedyren.

- **Måleusikkerhet i gassanalysator**

Det har blitt benyttet vannkompensering ved analyser i sporgassutstyret. Dette er en funksjon som skal medføre mindre måleusikkerhet med årsak i infrarød stråling. Maksimal analysetid på 50 sekunder har blitt benyttet for å oppnå høyest mulig målenøyaktighet. Noe måleavvik kan likevel forekomme og minste detekterbare konsentrasjon er anslått til 0,15 ppm (LumaSense Technologies, 2009).

- **Unøyaktig basekonsentrasjon**

Basekonsentrasjonen som ble benyttet i omluftsberegninger ble bestemt ut ifra målinger på dag 1 for hver enkelt bygning. Beregning av omluftsfaktor er svært sensitiv for endringer i basekonsentrasjonen, spesielt for lave konsentrasjoner i avkast. Dette skyldes at omlufts faktoren er et forholdstall mellom konsentrasjon i tilluft og avkast. I tillegg får konsentrasjonen store utslag på omlufts faktor ved lave konsentrasjoner i luftinntak siden differansen mellom målt konsentrasjon i inntak og basekonsentrasjonen benyttes for å beregne omlufts faktor.

### *Luftmengdemålinger*

Luftmengdeberegninger ved å måle differensialtrykkvifte kan være preget av unøyaktighet i måleinstrumentet. Under kalibrering av TSI VelociCalc 8388 Plus kunne ikke vindgeneratoren levere høyere trykkdifferanser enn 160 Pa (se vedlegg 2.4). Trykkmåleren er benyttet for høyere trykkdifferanser enn det som er kalibrert for, men det er antatt at høyere trykk vil følge samme korreksjonslikning. Dette kan gi noe målefeil i resultatene, men innenfor det som er akseptabelt for bruksområdet. Det er ikke diskutert feilkilder i forhold til andre beregningsmetoder da de beregnede luftmengdene anses å være av tilstrekkelig nøyaktighet for den aktuelle anvendelsen.

## *Vindmålinger*

Hastigheter som er registrert av vindmåleren viser generelt store avvik fra de værforholdene som er oppgitt av Meteorologisk Institutt (2013b), spesielt ved lave hastigheter. Dette skyldes delvis treghet i hastighetsmåleren som spesielt påvirker omdreiningene når vindhastigheten er lav. På dager med lave hastigheter er det store deler av tiden registrert vindstille forhold grunnet tregheten. I tillegg er det vesentlige feilkilder i kalibreringen av vindmåleren for lave hastigheter. Kalibreringen ble utført mot TSI VelociCalc Plus 8388, i stedet for direkte mot vindgeneratoren, som også kan ha kalibreringsfeil. I tillegg dekker ikke utløpet av vindtunnelen arealet på hastighetsmåleren, slik at kreftene som virker på hastighetsmåleren vil avvike fra et reelt tilfelle. Figur 29 i vedlegg 2.2 viser tydelige avvik mellom målte verdier og trendlinjen som har blitt benyttet for kalibrering, spesielt er avviket stort for verdier under 3 m/s. Resultatene fra vindmålinger er imidlertid pålitelige for å vurdere raske fluktuasjoner i de lokale vindforholdene.

Vindmåleren stilles inn på referansevindretning med  $0^\circ$  i nord etter kompass. Denne innstillingen gjøres manuelt ved starten av hver dag hvor det utføres målinger. Den manuelle håndteringen medfører måleusikkerhet for vindretning som kan variere for hver dag. Dette anses imidlertid for å være en akseptabel feilkilde for målingene som utføres, siden det hovedsakelig refereres til hovedvindretninger og trendlinjer. Resultatene viser godt samsvar med værforholdene som er kartlagt av Meteorologisk Institutt (2013b), men med noe avvik grunnet manuell innstilling. Det er i tillegg observert mindre treghet i retningsmåler enn i hastighetsmåler under feltarbeidet.

## 9. Konklusjon

I denne oppgaven har omlufts faktorer ved tre ulike bygninger i Trondheim blitt kartlagt, hvorav to av bygningene benytter jethette og behovsstyrt ventilasjon. Oppgaven har fokusert på å undersøke hvordan omlufts faktor varierer med design av luftinntak og avkast, luftmengder og vindforhold.

Det oppnås betydelig lavere målte omlufts faktorer på bygningene som benytter jethette enn på bygningen med kombinert hette for luftinntak og avkast. Bygningen uten jethette hadde i tillegg til mindre bevegelsesmengde over utløpet også en ugunstig plassering av luftinntak og avkast. Forbedring på bygningene med jethette kan derfor hovedsakelig skyldes tre faktorer:

- Avkast er høyeste punkt på bygningskonstruksjonen
- Det benyttes jethette som gir større bevegelsesmengder
- Avstanden mellom avkast og luftinntak er lengre

Det er vesentlige forskjeller i målte omlufts faktorer for bygningene som benytter jethette og behovsstyrt ventilasjon. Avgjørende faktorer som skiller ut bygningen med minst omluft er:

- Større høydeforskjell mellom avkast og høyeste bygningskonstruksjon
- Større klaring fra avkast til nærmeste resirkulasjonssone
- Større bevegelsesmengde over jethettens utløp
- Vesentlig kortere avstand mellom luftinntak og avkast

Det bør spesifiseres hva som menes med jetavkast i veiledninger siden ulike jethetter medfører varierende bevegelsesmengde ved samme trykkfall. I følge etablert teori oppstår hovedsakelig de laveste omlufts faktorene ved høye hastighetsrater, det vil si ved høye forholdstall mellom luftstrålens hastighet over utløpet og vindhastigheten. Dette bekrefter betydningen av å benytte store bevegelsesmengder over jethetten for å oppnå god luftkvalitet over luftinntaket. For å sikre at jethetter gir en jeteffekt med VAV bør det fastsettes et minimumskrav som medfører en viss bevegelsesmengde i jethetten, enten i form av dokumentert kastelengde eller hastighet over utløpet. Fritaket for avstandskriterier mellom luftinntak og avkast i Byggdetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999) er kun hensiktsmessig dersom en hastighetsrate over 1,5 imøtekomes til enhver tid. Det er i tillegg avgjørende at plassering av luftinntak og avkast i nærheten av resirkulasjonssoner unngås.

Ulike tiltak for å oppnå større bevegelsesmengde til enhver tid er å kombinere VAV med CAV, øke tilført luftmengde uten tilstedeværelse eller sette prosjekterte luftmengder ved en lavere brukssamtidighet. Tiltakene kan medføre høyere trykkfall og energiforbruk, men muliggjør ivaretagelse av både energieffektivitet og god luftkvalitet.

ASHRAE Fortynningsmetode gir hovedsakelig svært høye omlufts faktorer sammenlignet med feltmålinger og anses som lite pålitelig for å vurdere omluft. Design av luftinntak og avkast bør i stedet vurderes ut ifra etablert teori om resirkulasjonssoner og strømningsmønstre rundt bygg. Beregningsmetoden for kastelengde tar ikke hensyn til jethettens plassering, hastighetsprofil og vindforhold. Kastelengde kan derfor ikke benyttes for å vurdere omluft, men er egnet til å sammenligne ulike jethetter og dimensjoner ved jevne hastighetsprofiler.





## 10. Videreføring av arbeidet

Denne oppgaven har kartlagt omlufts faktorer på tre bygninger i Trondheim ved ulike luftmengder og vindforhold. På grunn av lite tilgang på relevante bygninger og begrenset tid har bare noen forhold blitt undersøkt. Det har vært flere vesentlige forskjeller i tilfellene som har blitt kartlagt, som har medført utfordringer med å trekke generelle konklusjoner om hvordan ulike parametere innvirker på omluften. Det ville vært interessant å gjøre en mer omfattende studie innenfor samme problemstilling hvor parametere som antas å innvirke på omlufts faktoren varieres enkeltvis. Dette innebærer å kartlegge:

- Flere bygninger med jethetter og behovsstyrt ventilasjon
- Flere ulike vindretninger, hvorav kritisk vindretning er et av tilfellene
- Ulike vindhastigheter, hvorav samme hastigheter og normale vindstyrker kartlegges ved alle vindretninger
- Ulike bevegelsesmengder, hvorav samme hastighetsrater kartlegges ved alle vindretninger og bygninger

En grundigere studie kan avdekke sammenhenger mellom omlufts faktorer og variasjon i ulike parametere, samt danne grunnlag for å vurdere de ulike parameternes betydning. Mer måledata kan også muligens oppklare årsaken til de resultatene fra feltmålingene som har vært avvikende fra etablert teori og de resterende resultatene. Dette forutsetter å utføre målinger over en vesentlig lengre periode enn det som har blitt gjort i denne oppgaven, men hvor målinger kun gjøres på de dagene hvor vindforholdene er av interesse. For å kunne vurdere om jethetter medfører lavere omlufts faktorer bør målinger i tillegg utføres på noen referansebygg som ikke benytter jethette. Disse bygningene bør ha en design som er i henhold til veiledninger og anbefalinger. Målemetoden som har blitt benyttet for feltarbeidet i denne oppgaven anses som egnet for videre studier, men en forbedring kunne vært å redusere feilkilder ved blant annet å måle konsentrasjoner i flere punkter over samme kanaltverrsnitt.

På begge bygningene med jethette og behovsstyrt ventilasjon som ble betraktet i oppgaven er design og plassering av luftinntak og avkast hovedsakelig i henhold til teori og veiledninger, selv uten å benytte jethette. Siden anbefalinger i Byggdetaljer 552.360 (SINTEF Byggforsk, 1999) gir fritak for avstandsregler ved bruk av jethette ville det vært interessant å undersøke anlegg som har ugunstige plasseringer og korte avstander mellom jethette og luftinntak. Referansebygg uten jethette som har tilsvarende bygningskonstruksjon burde i tillegg kartlegges. Dette kan danne grunnlag for å avgjøre når det er hensiktsmessig å benytte jethetter og hvilke kriterier som bør settes for bruk.

I oppgaven ble det avdekket at ulike jethetter medfører betydelige forskjeller i trykktap. Jethetter varierer i både utforming og virkemåte, slik at jetstrålene kan ha svært ulike hastighetsprofiler og bevegelsesmengder. Det lyktes i noen tilfeller ikke med å finne dokumentasjon på jethettens virkemåte, selv etter samtaler med cirka 10 personer i bransjen (Swegon, 2013; Bodø Industri, 2013; Alfsen og Gunderson, 2013). Dette understreker behovet for å undersøke hvordan design påvirker jetstrålen. Det ville vært av interesse å utføre forsøk for å finne optimal design av jethetter, både med lavest mulig trykktap og ivaretagelse av stor bevegelsesmengde som kriterier.

De teoretiske beregningsmodellene benyttet i oppgaven ga lite samsvar med målte omlufts faktorer. Det er derfor behov for å finne andre beregningsmetoder som er bedre egnet for å vurdere omluft. Selv om CFD-beregninger er ressurskrevende bør det vurderes som et alternativ til beregninger med fortynningsmetoder. Resultater fra CFD-beregninger kan sammenlignes med målte omlufts faktorer for å vurdere validitet og om metoden er egnet til å vurdere omluft. I tillegg kunne en studie om de benyttede beregningsmodellene og CFD-beregninger vært av interesse for å få bedre oversikt over hvilke tilfeller som gir god validitet og når metodene er uegnet.

Ved prosjektering av bygninger tas det lite hensyn til plassering av luftinntak og avkast på nærliggende bygningskonstruksjoner. I følge teorien presentert i denne oppgaven kan forurensninger fra nærliggende bygninger skape store problemer med luftkvaliteten. Det kan derfor være av interesse å undersøke ved feltstudier hvordan ulik bevegelsesmengde, samt utforming av luftinntak og avkast, påvirker forurensningsnivåer i luftinntak på nærliggende bygg.

## 11. Referanser

- ALFSEN OG GUNDERSON. 20.05. 2013: *Telefonsamtale med prosjektingeniør Olav Gunderson i Alfsen og Gunderson.*
- ARBEIDSTILSYNET 2011. Veiledning om administrative normer for forurensning i arbeidsatmosfære. Trondheim: Arbeidstilsynet.
- ASHRAE c2009. Airflow around buildings (Chapter 24). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Atlanta, GA.: ASHRAE.
- ASHRAE c2011. Building air intake and exhaust design (Chapter 45). *ASHRAE handbook - HVAC Applications*. Atlanta, GA.: ASHRAE.
- AWBI, H. B. 2003. *Ventilation of buildings*, New York, Taylor & Francis.
- BAKKE, J. V. 2012. Indoor climate and health. Asthma, allergy and hypersensitivity. Water damage and health. Forelesning i TEP 14: Innemiljø og klimatisering av bygninger. Trondheim: NTNU.
- BERNARD, A. M., VILLENAVE, J. G. & LEMAIRE, M. C. Potential of savings for demand controlled ventilation (DCV) in office buildings. AIVC 24th Conference & BETEC conference - Ventilation, Humidity control and energy, 2003 Washington, USA. 163-166.
- BODØ INDUSRI. 20.05. 2013: *Telefonsamtale med Sten Helge Hanssen.*
- CANEP, E. 2004. An overview about the study of downwash effects on dispersion of airborne pollutants. *Environmental Modelling and Software*, 19, 1077-1087.
- CARTER, J. J. P., RONALD L.; COCHRAN, BRAD C.; 2005. Designing Exhaust Systems to Minimize Energy Costs. *ASHRAE Journal*, Vol. 47, No. 7, 18-22.
- CIBSE 1999. *Minimising Pollution at Air Intakes*, CIBSE.
- COUNIHAN, J. 1975. Adiabatic Atmospheric Boundary Layers. *Atmospheric Environment Vol 9*.
- DRANGSHOLT, F. 1992. *The applicability of demand controlled ventilating systems for assembly halls*. NTH.
- EFRON, B. & TIBSHIRANI, R. J. 1993. *An introduction to the bootstrap*, Boca Ranton, Fla., Chapman & Hall.
- FISK, W. J. & DE ALMEIDA, A. T. 1998. Sensor-based demand-controlled ventilation: A review. *Energy and Buildings*, 29, 35-45.
- GOOGLE. 2013. *Google maps*. URL: maps.google.com [Besøkt 15.04.13].
- GUPTA, A., STATHOPOULOS, T. & SAATHOFF, P. 2012a. Evaluation of ASHRAE dilution models to estimate dilution from rooftop exhaust. *ASHRAE Transactions*, 118 (Part 1).
- GUPTA, A., STATHOPOULOS, T. & SAATHOFF, P. 2012b. Wind tunnel investigation of the downwash effect of a rooftop structure on plume dispersion. *Atmospheric Environment*, 46, 496-507.
- HAJRA, B. & STATHOPOULOS, T. 2012. A wind tunnel study of the effect of downstream buildings on near-field pollutant dispersion. *Building and Environment*, 52, 19-31.
- HAJRA, B., STATHOPOULOS, T. & BAHLOUL, A. 2010. Assessment of pollutant dispersion from rooftop stacks: ASHRAE, ADMS and wind tunnel simulation. *Building and Environment*, 45, 2768-2777.
- HAJRA, B., STATHOPOULOS, T. & BAHLOUL, A. 2011. The effect of upstream buildings on near-field pollutant dispersion in the built environment. *Atmospheric Environment*, 45, 4930-4940.
- HALVARSSON, J. 2012. *Occupancy Pattern in Office Buildings : Consequences for HVAC system design and operation*. phd, NTNU.
- HALVARSSON, J., MATHISEN, H. M., HANSSON, S. O. & KOLSAKER, K. Measured occupancy in an office building. 2006 Lisboa. 55-58.

- HANSEN, H. E., KJERULF-JENSEN, P. & STAMPE, O. B. 1997. *Varme- og klimateknik: grundbog*. Lyngby, DANVAK.
- HANSEN, S. O. & HALVARSSON, J. 2012. Air quality and air requirements. Forelesning i TEP 14: Innemiljø og klimatisering av bygninger. Trondheim: NTNU.
- HOLMEN, M. B. 2012. BREEAM og VVS. Trondheim: NTNU.
- JOHANSSON, P. & SVENSSON, A. 1998. Metoder för mätning av luftflöden i ventilationsinstallationer. Stockholm: Byggeforskningsrådet.
- LATEB, M., MASSON, C., STATHOPOULOS, T. & BEDARD, C. 2011. Effect of stack height and exhaust velocity on pollutant dispersion in the wake of a building. *Atmospheric Environment*, 45, 5150-5163.
- LUMASENSE TECHNOLOGIES 2009. Gas Detection Limits. LumaSense Technologies.
- MARIPUU, M. L. 2009. *Demand controlled ventilation (DCV) systems in commercial buildings. Functional requirements on systems and components*. . Chalmers University of Technology.
- MATHISEN, H. M. 2012. Building Services, Forelesning i TEP 14: Innemiljø og klimatisering av bygninger. Trondheim: NTNU.
- METEOROLOGISK INSTITUTT. 2013a. *eklima*. URL: [eklima.met.no](http://eklima.met.no) [Besøkt 08.04.13].
- METEOROLOGISK INSTITUTT. 2013b. *yr*. URL: [yr.no](http://yr.no) [Besøkt 20.04.13].
- MILJØFAKTA. 2013. *Bygg*. URL: <http://miljofakta.no/naeringsliv/bygg/> [Besøkt 04.06.13].
- MYSEN, M., BERNTSEN, S., NAFSTAD, P. & SCHILD, P. G. 2005. Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in Norwegian primary schools. *Energy and Buildings*, 37, 1234-1240.
- MYSEN, M. & POLAK, K. 2001. Energieffektiv viftedrift: Prosjekteringsveiledning. Blindern, Oslo: Norges byggforskningstitutt.
- MYSEN, M., RYDOCK, J. P. & TJELFLAAT, P. O. 2003. Demand controlled ventilation for office cubicles - Can it be profitable? *Energy and Buildings*, 35, 657-662.
- NAZRIDOUST, K. & AHAMADI, G. 2006. Airflow and pollutant transport in street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- NAZRIDOUST, K. & AHMADI, G. 2006. Airflow and pollutant transport in street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94, 491-522.
- NILSSON, P. c2003. *Achieving the desired indoor climate: energy efficiency aspects of system design*, Lund, Studentlitteratur.
- NOVAKOVIC, V., HANSEN, S. O., THUE, J. V., WANGENSTEEN, I. & GJERSTAD, F. O. 2007. *ENØK i bygninger : effektiv energibruk*, Oslo, Gyldendal undervisning.
- NÆSS, R. 22.03.13 2013: *Samtale med driftspersonell ved Charlottenlund ungdomsskole*.
- PETERSEN, R. L., COCHRAN, B. C. & CARTER, J. J. 2002a. Specifying exhaust and intake systems. *ASHRAE Journal*, 44, 30-37.
- PETERSEN, R. L., COCHRAN, B. C. & LECOMPTE, J. W. Specifying exhaust systems that avoid fume reentry and adverse health effects. *ASHRAE Transactions* 2002, June 22, 2002 - June 26, 2002, 2002b Honolulu, HI, United states. Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc., 1039-1049.
- PETERSEN, R. L. & RATCLIFF, M. A. An Objective Approach to Laboratory Stack Design. The 1991 Annual Meeting, 1991 Indianapolis, United States. Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc.
- REHVA 2007. 9: Hygiene requirement for ventilation and air-conditioning. *REHVA guidebook*. Brussels: Rehva.
- ROCK, B. A. & MOYLAN, K. A. 1999. Placement of ventilation air intakes for improved IAQ. *ASHRAE Transactions*, 105, PART 1/.
- SAATHOFF, P. J., LAZURE, L. P., STATHOPOULOS, T. & PEPERKAMP, H. The influence of a rooftop structure on the dispersion of exhaust from a rooftop stack.

- ASHRAE Transactions 2002, June 22, 2002 - June 26, 2002, 2002 Honolulu, HI, United States. Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc., 1029-1037.
- SCHULMAN, L. L. & SCIRE, J. S. 1991. The Effect of Stack Height, Exhaust Speed, and Wind Direction on Concentrations from a Rooftop Stack. *ASHRAE Transactions*, 97, part 2.
- SCHULMAN, L. L., STRIMAITIS, D. & SCHIRE, J. 2000. Development and evaluation of the PRIME plume rise and building downwash model. *Air & Waste Management Association*, 50, 378-390.
- SHAROVA, N. 2013. Rotameterskala for lystgass for Vøgtlin FLV-CSSS-SM. NorECs.
- SINTEF BYGGFORSK 1999. Byggdetaljer 552.360: Plassering av friskluftinntak og avkast for å minske forurensning. Oslo: Norges Byggforskning.
- SKÅRET, E. 2000. *Ventilasjonsteknisk håndbok*, Oslo, Norges byggforskning.
- SNYDER, W. H. Downwash of Plumes in the Vicinity of Buildings: A Wind-Tunnel Study (Book Chapter). Reprint: Downwash of Plumes in the Vicinity of Buildings: A Wind-Tunnel Study (Book Chapter). 1994 United States. 16p.
- SWECO GRØNER 2005. FDV- manual for Charlottenlund ungdomsskole. In: AS, S. G. (ed.).
- SWECO GRØNER 2007. FDV- manual for NTNU Verkstedteknisk. In: AS, S. G. (ed.). Trondheim.
- SWEGON 2012. Datablad for UH jethette. Swegon AS.
- SWEGON. 15.04. 2013: *Mailkorrespondanse med salgsansvarlig Leif Helge Valaas*.
- SØRENSEN, B. 2002. *Applications and Energy Consumption of Demand Controlled Ventilation Systems – Modelling, Simulation and Implementation of Modular Build Dynamic VAV Systems and Control Strategies*. Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- THOMPSON, R. S. 1993. Building amplification factors for sources near buildings: a wind-tunnel study. *Atmospheric Environment. Part A, General Topics*, 27 A, 2313-2325.
- TJELFLAAT, P. O. 16.11. 2012: *Samtale om jetstrømning*.
- TROX AURANOR 2012a. Datablad for JTA-2 Jethette. TROX Auranor Norge AS.
- TROX AURANOR. 10.09.12 2012b: *Telefonsamtale med utviklingssjef Tore Stenbråten*.
- WILSON, D. J. 1979. Flow patterns over flat-roofed buildings and application to exhaust stack design. *ASHRAE Transactions*, 85, 284-295.
- WILSON, D. J. Critical wind speeds for maximum exhaust gas reentry from flush vents at roof level intakes. Technical and Symposium Papers Presented at the 1982 Semiannual Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1982 Houston, TX, USA. ASHRAE, 503-513.
- WILSON, D. J. & BRITTER, R. E. 1982. Estimates of building surface concentrations from nearby point sources. *Atmospheric Environment - Part A General Topics*, 16, 2631-2646.
- WILSON, D. J., FABRIS, I. & ACKERMAN, M. Y. Measuring adjacent building effects on laboratory exhaust stack design. Proceedings of the 1998 ASHRAE Annual Meeting, June 21, 1998 - June 24, 1998, 1998 Toronto, Can. ASHRAE, 1012-1028.
- WILSON, D. J. & WINKEL, G. The effect of varying exhaust stack height on contaminant concentration at roof level. Technical and Symposium Papers Presented at the 1982 Semiannual Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1982 Houston, TX, USA. ASHRAE, 515-533.



## 12. Vedlegg

Vedlegg 1. Presentasjon av bygninger .....	iii
Vedlegg 1.1 NTNU Varmeteknisk .....	iii
Vedlegg 1.2 NTNU Verkstedteknisk.....	vi
Vedlegg 1.3 Charlottenlund ungdomsskole.....	ix
Vedlegg 2. Måleutstyr og kalibrering.....	xiii
Vedlegg 2.1 Måleinstrumenter .....	xiii
Vedlegg 2.2 Kalibrering av vindmåler .....	xiv
Vedlegg 2.3 Funksjonstest av TSI VelociCalc Plus 8388 Hastighetsmåler .	xvi
Vedlegg 2.4 Funksjonstest av TSI VelociCalc Plus 8388 Trykkmåler .....	xvii
Vedlegg 3. Beregningsmetoder for målinger .....	xix
Vedlegg 3.1 Statistisk metode – Bootstrap.....	xix
Vedlegg 3.2 Korreksjon av vindhastighet .....	xx
Vedlegg 3.3 Luftmengdeberegninger .....	xxi
Vedlegg 4. Beregningsmetoder med teoretiske modeller.....	xxiii
Vedlegg 4.1 ASHRAE Fortynningsmetode.....	xxiii
Vedlegg 4.2 Kastelengde .....	xxvi
Vedlegg 5. Resultater .....	xxix
Vedlegg 5.1 Resultater NTNU Varmeteknisk – Testmålinger.....	xxix
Vedlegg 5.2 Resultater NTNU Verkstedteknisk .....	xxxix
Vedlegg 5.3 Resultater Charlottenlund ungdomsskole .....	xlviii
Vedlegg 6. Risikovurdering.....	lvi





## Vedlegg 1. Presentasjon av bygninger

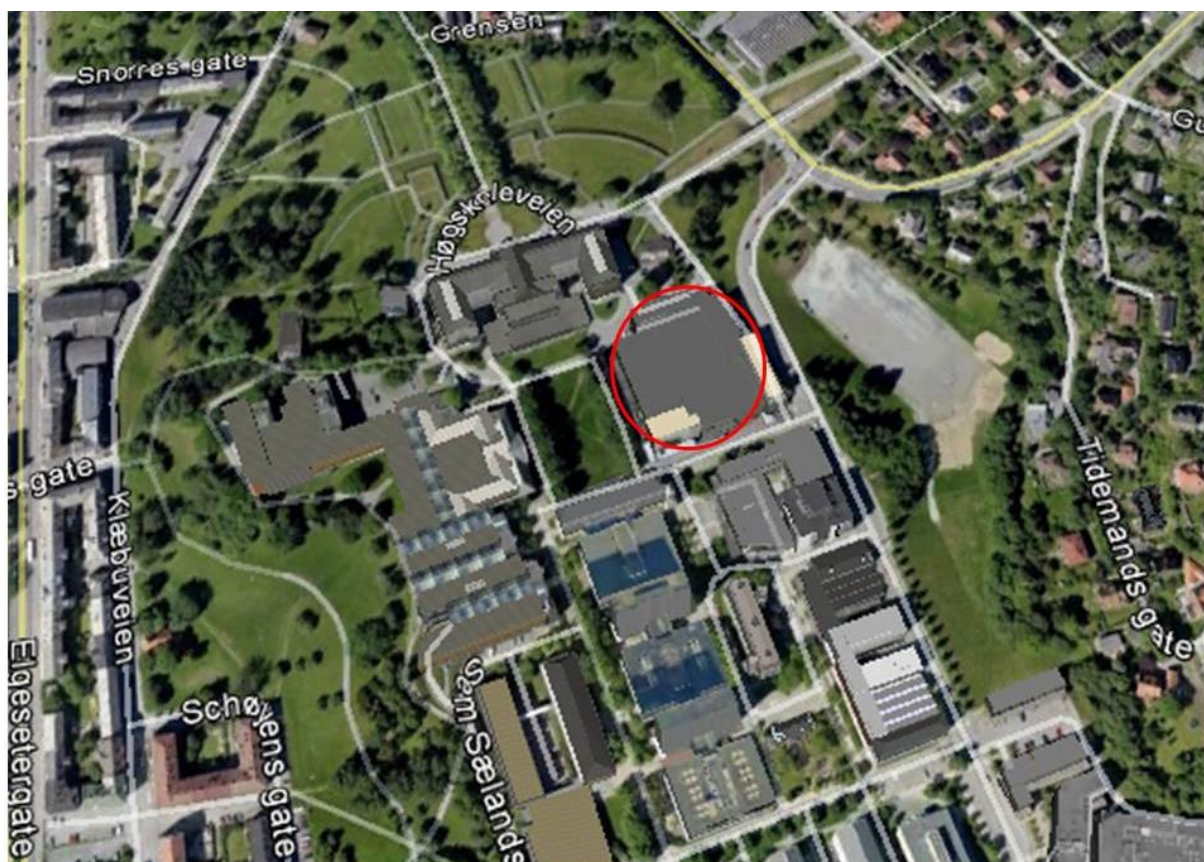
### Vedlegg 1.1 NTNU Varmeteknisk

#### Lokasjon og bebyggelsestetthet

NTNU Varmeteknisk er en del av NTNU Gløshaugen med beliggenhet like utenfor Trondheim sentrum. Området er bebygd med både lave og høye bygninger og middels avstand mellom byggene. På tross av den høye bebyggelsestettheten på NTNU er bygningshøydene i området for lave og området for lite til at det kan klassifiseres som et bysenter (ASHRAE, c2009, kap. 24). Gløshaugen er dermed klassifisert som en forstad med grenselagsparametere som vist i tabell 12 (ASHRAE, c2011, kap. 45). Bygningens plassering er vist i figur 19. NTNU Varmeteknisk ligger omtrent 41 moh. og 2,7 km fra nærmeste offisielle målestasjon for klima; Voll målestasjon (Meteorologisk Institutt, 2013b).

**Tabell 12: Grenselagsparametere for NTNU Varmeteknisk.**

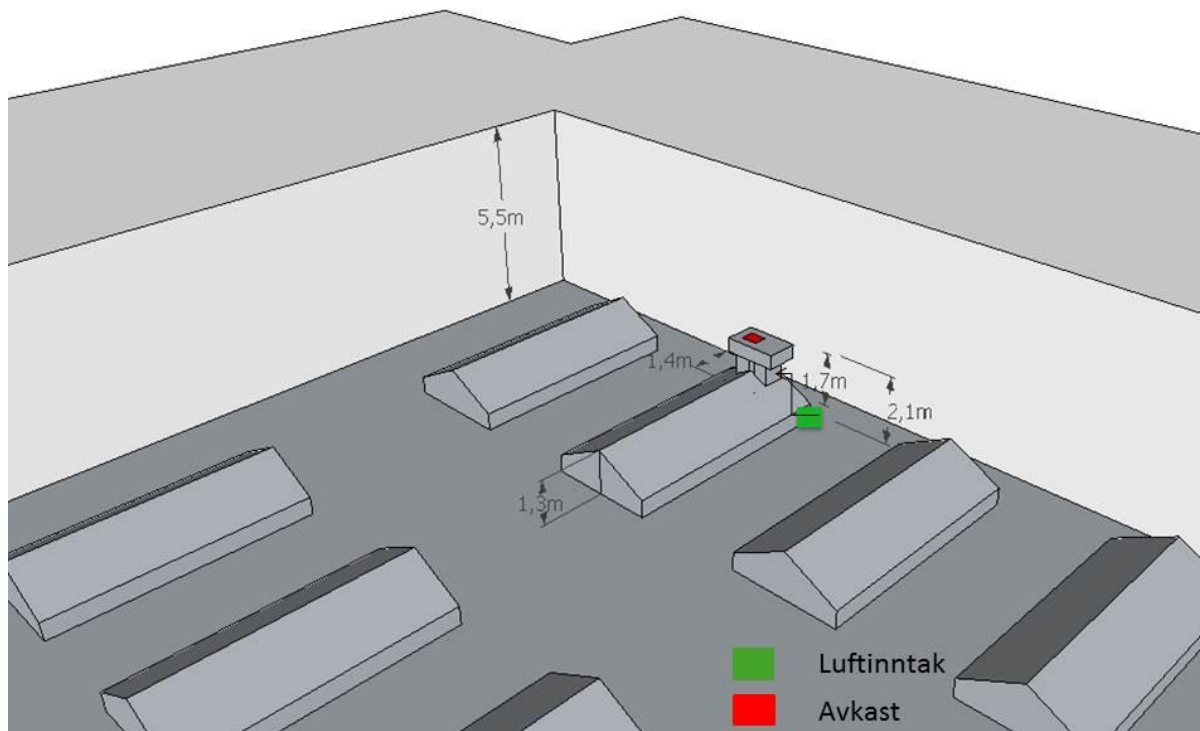
Beskrivelse	By- og forstadsområder, skog og annet terreng med tett bebyggelse av bolighus eller større bygninger og hindringer. Området må være minst 460 meter i lengde eller 10 ganger høyden av hindringene i vindretningen som betraktes.
EkspONENT, $a$	0,22
Grenselagstykkelse, $\delta$	370 m
Ruhetslengde, $\bar{z}$	0,65 m



**Figur 19: Beliggenhet for NTNU Varmeteknisk (Google, 2013).**

### Bygningskonstruksjon, luftinntak og avkast

På bygningens tak er det en rekke luftinntak og avkast som betjener kontorlokaler og laboratorier. Enheten som betraktes er ikke en jethette, men en kombinert hatt for luftinntak og avkast. Den forurensede luften blåses ut gjennom en åpning på taket av takhatten, mens luftinntaket befinner seg langs alle de fire veggene av hatten. Inntaket er i tillegg dekket med en ekstra hette for å hindre inntrengning av partikler og fukt. Takhatten er plassert skjermet på tak like etter en takkonstruksjon på to etasjer, med over 50 meters avstand til de to andre bygningsfasadene. Taket som enheten er plassert på er dekket av takkonstruksjoner og opphøyde takvinduer. Den totale bygningshøyden er 18 m, mens takhøyden ved takhatten er 12,5 m. Bygningskonstruksjonen og plassering av luftinntak og avkast er illustrert i figur 20, mens ytterligere informasjon er gitt i tabell 13.



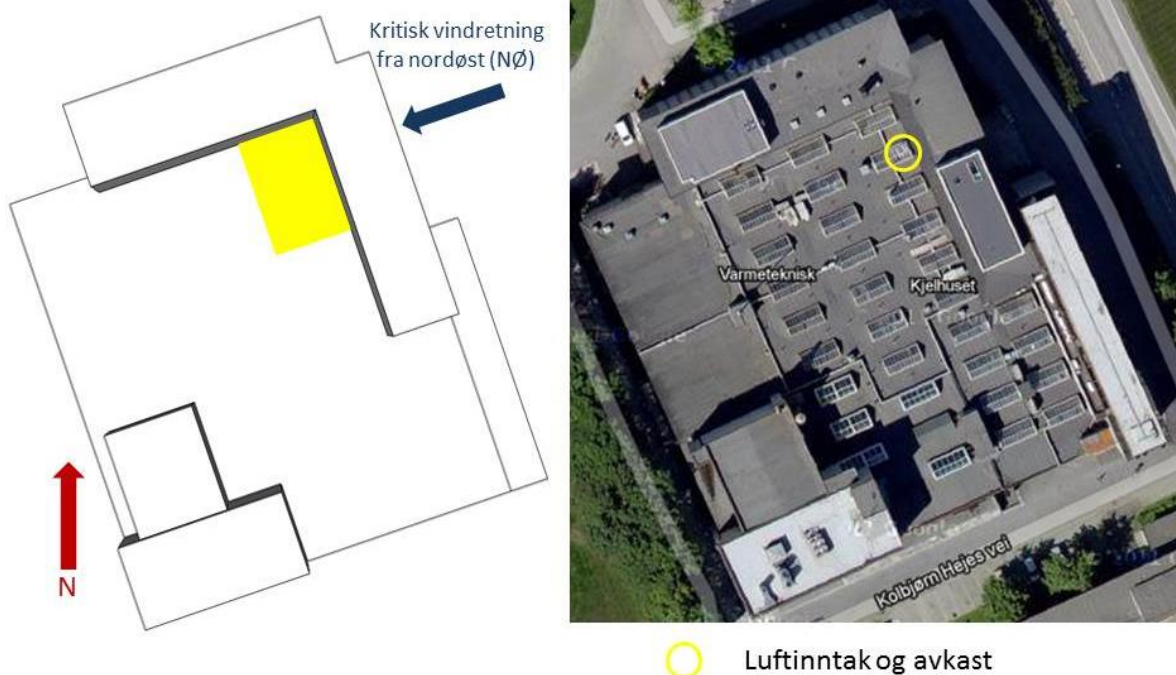
**Figur 20: Bygningskonstruksjonen med plassering av luftinntak og avkast på NTNU Verkstedteknisk.**

**Tabell 13: Informasjon om luftinntak og avkast for takhatt på NTNU Varmeteknisk.**

<i>Avkast</i>	
Bredde	0,4 m
Dybde	0,4 m
Prosjekterte luftmengder	1 000 m <sup>3</sup> /h
Maksimal hastighet over utløp	1,7 m/s
<i>Luftinntak</i>	
Høyde	0,3 m
Bredde	4*0,5 m
Minste inntakshøyde over takflate	1,7 m
Prosjekterte luftmengder	1 000 m <sup>3</sup> /h

### *Kritiske vindforhold*

Den kombinerte enheten for inntak og avkast er plassert like etter en toetasjes konstruksjon i nord og øst. Vind fra nord eller øst kan dermed medføre en turbulent sone i området hvor enheten er plassert. Enheten ligger svært skjermet til i lang avstand fra de andre fasadene og med mange takkonstruksjoner i nærheten som kan forstyrre strømningsmønsteret. Ved vind fra sør eller vest vil vindforholdene påvirkes av takkonstruksjonene i tillegg til at forurensningene føres mot den toetasjes konstruksjonen som blokkerer videre strømming. Selv om ingen vindretninger anses å være optimale, så er vind fra nordøst mest kritisk, siden dette antas å skape mest turbulens over luftinntak og avkast. Enheten er plassert kun 1,4 meter fra den 6 meter høye veggen i nordøst. Tilfellet er illustrert i figur 21.



**Figur 21: Kritisk vindretning på NTNU Verkstedteknisk (Google, 2013).**

### *Styring av ventilasjonsanlegget*

Aggregatet som benyttes til å utføre testmålinger er plassert i et laboratorium og anvendes kun til forsøk. Luftmengdene kan styres i to trinn; 400 m<sup>3</sup>/h og 1 000 m<sup>3</sup>/h.

### *Personbelastning*

Ventilasjonsanlegget leverer friskluft og fjerner forurenset luft i et testrom som kun benyttes til forsøksprosjekter. Det vil ikke være personer tilstede under forsøkene.

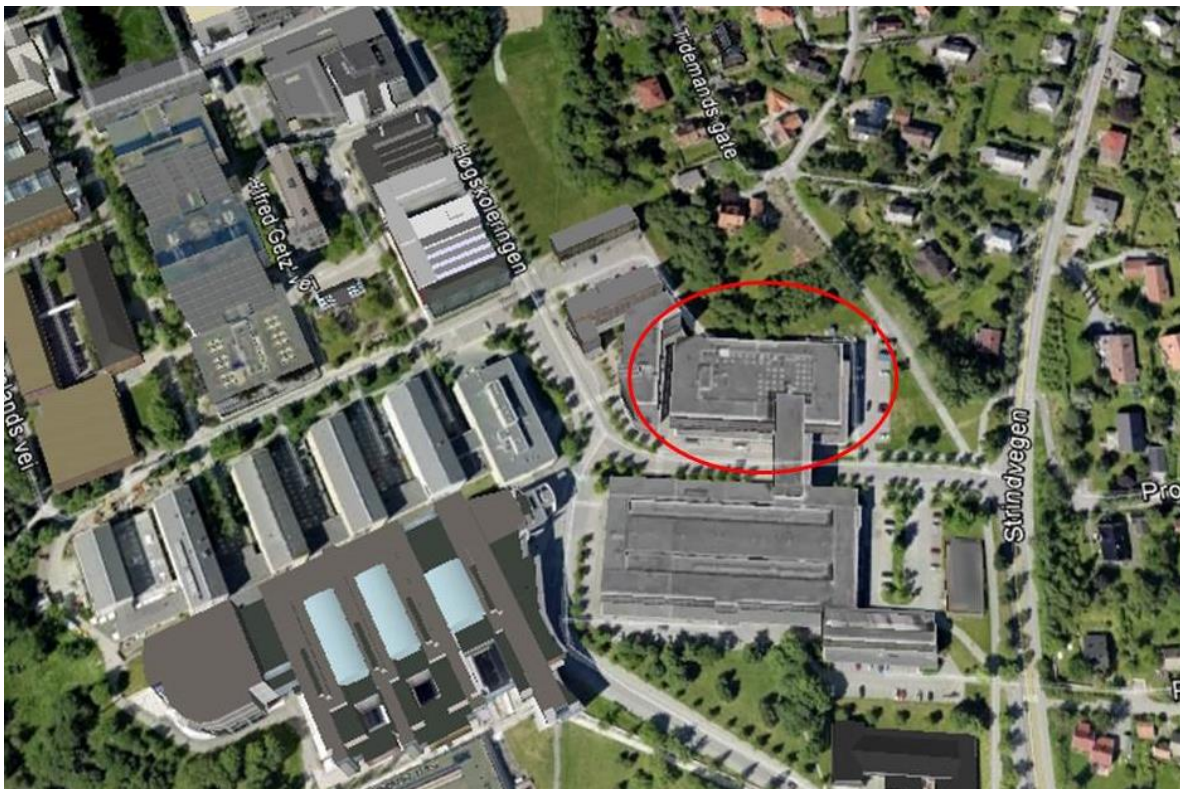
## Vedlegg 1.2 NTNU Verkstedteknisk

### Lokasjon og bebyggelsestetthet

NTNU Verkstedteknisk er en del av NTNU Gløshaugen og har samme beskrivelse av lokasjon som NTNU Varmeteknisk. Bygningens plassering er vist i figur 22 og grenselagsparameterne hentet fra ASHRAE (c2011, kap. 45) er gitt i tabell 14. Bygget er opprinnelig fra 1964, men teknisk rom på tak er et påbygg fra 2007. NTNU Verkstedteknisk ligger omtrent 44 moh. og 2,2 km fra nærmeste offisielle målestasjon for klima; Voll målestasjon (Meteorologisk Institutt, 2013b).

**Tabell 14: Grenselagsparametere for NTNU Verkstedteknisk.**

Beskrivelse	By- og forstadsområder, skog og annet terreng med tett bebyggelse av bolighus eller større bygninger og hindringer. Området må være minst 460 meter i lengde eller 10 ganger høyden av hindringene i vindretningen som betraktes.
EkspONENT, $a$	0,22
Grenselagstykkelse, $\delta$	370 m
Ruhetslengde, $\bar{z}$	0,65m

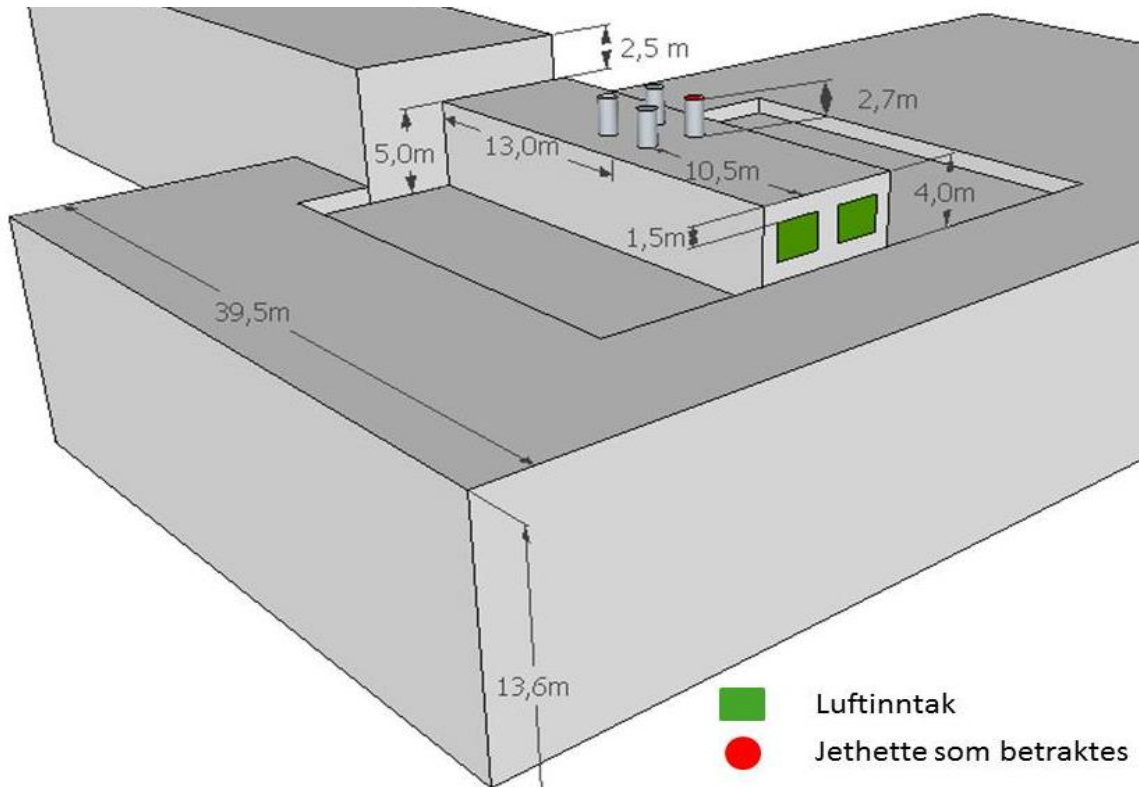


**Figur 22: Beliggenhet for NTNU Verkstedteknisk (Google, 2013).**

### Bygningskonstruksjon, luftinntak og avkast

På bygningens tak er det to tekniske rom, hvorav det østlige vil betraktes i denne oppgaven (se figur 24). Det er plassert like etter Perleporten, som er en høyere bygningskonstruksjon enn teknisk rom. Den totale bygningshøyden fra bakkenivå til toppen av Perleporten er 20,1

meter. Østlig teknisk rom er en del av byggets 4. etasje og rommer fire ulike aggregat. Et luftinntak som betjener alle fire systemene er plassert på vegg av teknisk rom. På taket er det fire jethetter som hvert betjener et system, men i denne oppgaven vil kun aggregat VE54 og tilhørende jethette betraktes. En illustrasjon av den aktuelle delen av bygningskonstruksjonen med mål, samt plassering av luftinntak og avkast, er gitt i figur 23. Ytterligere informasjon om ventilasjonsanlegget er gitt i tabell 15.



**Figur 23: Bygningskonstruksjonen med plassering av luftinntak og avkast på NTNU Verkstedteknisk.**

**Tabell 15: Informasjon om luftinntak og avkast på NTNU Verkstedteknisk (Sweco Grøner, 2007; Swegon, 2012; Swegon, 2013)**

<i>Jethette</i>	
Produsent	Swegon
Produkt-id	UH
Dimensjon	Ø 1000
Areal over utløp	0,8 m <sup>2</sup>
Utløpets høyde over takflate	2,7 m
Prosjekterte luftmengder	16 700 m <sup>3</sup> /h
Maksimal hastighet over utløp	5,9 m/s
Anbefalt minimalt trykkfall Swegon	-
Anbefalt maksimalt trykkfall Swegon	70 Pa*
<i>*Tilsvarende cirka 6 m/s over utløp</i>	
<i>Luftinntak</i>	
Høyde	2,0 m
Bredde	2*2,5 m
Prosjekterte luftmengder	72 000 m <sup>3</sup> /h

### *Kritiske vindforhold*

Jethetten er plassert 13 meter etter en høyere konstruksjon, med utløp omtrent 0,2 meter høyere. Dersom vinden kommer fra sør kan det oppstå en turbulent sone i området hvor jethetten er plassert og over luftinntaket. I tillegg vil luftinntaket befinne seg nedstrøms for jethetten ved slike vindforhold. Vindretning fra sør er derfor antatt å være kritisk, som illustrert i figur 24.



**Figur 24: Kritisk vindretning på NTNU Verkstedteknisk (Sweco Grøner, 2007; Google, 2013).**

### *Styring av ventilasjonsanlegget*

Aggregat VE54 forsyner 2. etasje i østre del av bygget med friskluft. Dette området omfatter datarom og grupperom tilgjengelig for ansatte og studenter ved NTNU. Lokalene benyttes både til undervisning og til individuelle studier. Det benyttes CO<sub>2</sub> som behovsindikator i alle rom og luftmengdene reguleres i to trinn. Ved konsentrasjon lavere enn 700 ppm tilføres 30 % av prosjekterte luftmengder til rommet, mens når konsentrasjonen overstiger 700 ppm økes luftmengdene til maksimalt pådrag.

VAV-styring gjelder i driftstiden som hovedsakelig er fra 0600 til 1930 mandag til fredag. Utenom disse tidspunktene er ventilasjonen avslått uavhengig av om personer befinner seg i lokalene. I perioder av året hvor personbelastningen er høy, det gjelder eksamensperiodene i november/desember og mai/juni, benyttes det hverken nattsinking eller helgesinking og ventilasjonsanlegget går kontinuerlig.

### *Personbelastning*

Personbelastningen i lokalene kan variere betydelig med årets sesonger. Siden både studenter og ansatte ved NTNU har tilgang til lokalene antas høyeste personbelastning å forekomme i kontortiden fra kl. 0800 til kl. 1600 på hverdager. Personer kan også oppholde seg i lokalene på kveldstid og i helger, spesielt i eksamensperiodene. Under forsøkene vil luftmengdene delvis overstyres slik at målte luftmengder ikke nødvendigvis samsvarer med brukssamtidigheten.

### Vedlegg 1.3 Charlottenlund ungdomsskole

#### Lokasjon og bebyggelsestetthet

Charlottenlund ungdomsskole er et nyere bygg fra 2005 med beliggenhet like utenfor Trondheim sentrum. Området består av lave bygninger og er klassifisert som en forstad etter retningslinjer av ASHRAE (c2009, kap. 24; c2011, kap. 45), som vist i tabell 16. Bygningens plassering er vist i figur 25. Charlottenlund skole ligger omtrent 70 moh. og 2,5 km fra nærmeste offisielle målestasjon for klima; Voll målestasjon (Meteorologisk Institutt, 2013b).

**Tabell 16: Grenselagsparametere for Charlottenlund ungdomsskole.**

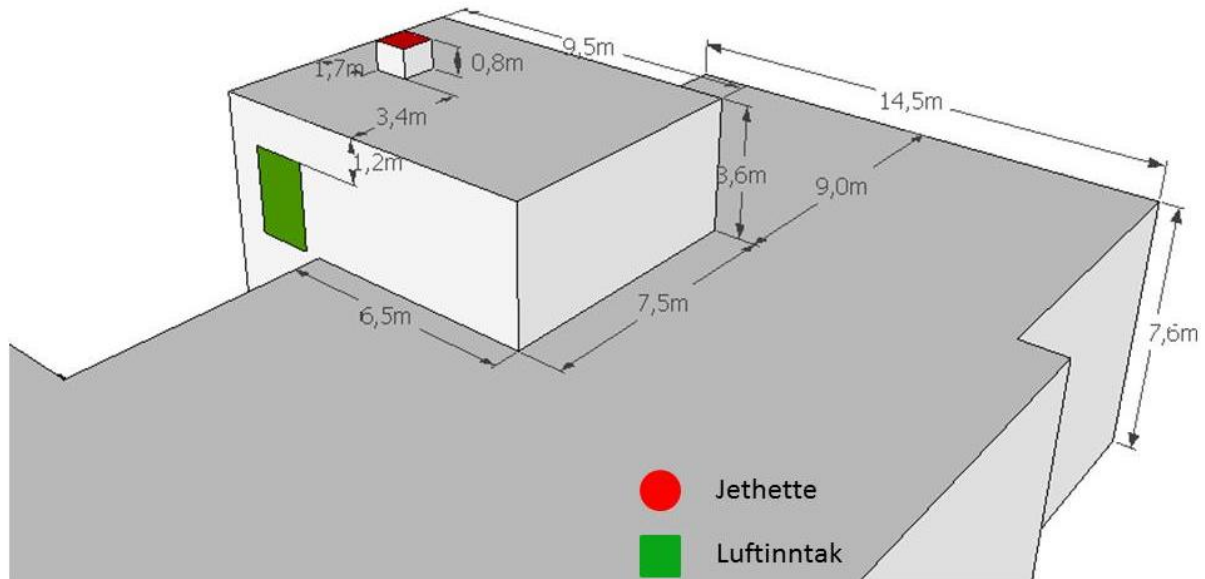
Beskrivelse	By- og forstadsområder, skog og annet terreng med tett bebyggelse av bolighus eller større bygninger og hindringer. Området må være minst 460 meter i lengde eller 10 ganger høyden av hindringene i vindretningen som betraktes.
EkspONENT, $a$	0,22
Grenselagstykkelse, $\delta$	370 m
Ruhetslengde, $\bar{z}$	0,65 m



**Figur 25: Beliggenhet for Charlottenlund ungdomsskole (Google, 2013).**

#### Bygningskonstruksjon, luftinntak og avkast

Det er flere luftinntak og avkast på bygningen, men i denne oppgaven vil kun luftinntaket og jethetten på nordsiden av bygget betraktes. Disse betjener system 360.02 og er plassert på henholdsvis vegg og tak av teknisk rom, som illustrert i figur 26. Teknisk rom regnes som bygningens 3. etasje, hvorav total bygningshøyde inkludert teknisk rom er 11,2 m. I figuren er også bygningens dimensjoner og avstanden mellom luftinntak og avkast vist. Informasjon om luftinntak og avkast er å finne i tabell 17.



**Figur 26: Plassering av luftinntak og avkast på nordlig del av Charlottenlund ungdomsskole.**

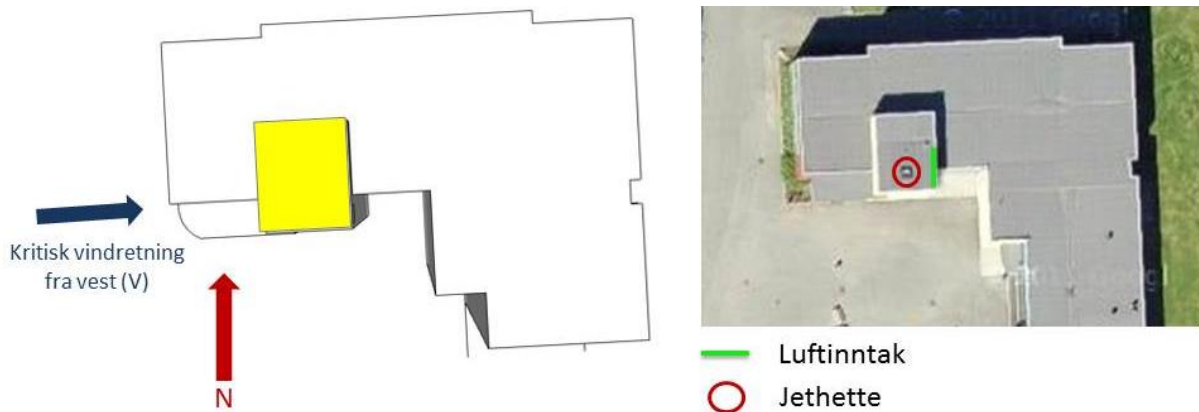
**Tabell 17: Informasjon om avtrekksvifte, luftinntak og avkast på Charlottenlund ungdomsskole (Sweco Grøner, 2005; TROX Auranor, 2012a).**

<i>Jethette</i>	
Produsent	TROX
Produkt-id	JTA-2
Dimensjon	1000
Areal over utløp	0,56 m <sup>2</sup>
Høyde over takflate	0,8 m
Prosjekterte luftmengder	23 000 m <sup>3</sup> /h
Trykkfall ved prosjekterte luftmengder	cirka 50 Pa
Maksimal hastighet over utløp	11,4 m/s
Anbefalt minimal luftmengde TROX	15 000 m <sup>3</sup> /h
Anbefalt maksimal luftmengde TROX	32 000 m <sup>3</sup> /h*
* Gir trykkfall på cirka 70 Pa	
<i>Luftinntak</i>	
Høyde	2,4 m
Bredde	1,6 m
Prosjekterte luftmengder	23 000 m <sup>3</sup> /h
<i>Avtrekksvifte</i>	
Produsent	PM-luft
Produkt-id	BCRWD -035



### *Kritiske vindforhold*

Vind fra vest vil medføre en resirkulasjonssone i området bak teknisk rom, etter at luftstrømmene har passert jethetten. Siden dette kan føre til en opphopning av forurensninger over luftinntaket er vestlig vind satt som kritisk vindretning. Dette er illustrert i figur 27.



**Figur 27: Kritisk vindretning på Charlottenlund ungdomsskole (Google, 2013).**

### *Styring av ventilasjonsanlegget*

Systemet 360.02 som betraktes betjener base 2 og 3 av bygget, både 1. og 2. etasje. Det baseres hovedsakelig på VAV, men deler av systemet er CAV. I elevarealene og lærerrommene benyttes VAV hvor luftmengdene reguleres etter CO<sub>2</sub>-konsentrasjon og romtemperatur. Dersom CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er lavere enn 600 ppm er tilføres cirka 30 % av prosjekterte luftmengder. Luftmengden øker når konsentrasjonen overstiger 600 ppm og gir maksimalt pådrag ved 1000 ppm. Maksimal luftmengde tilføres også dersom temperaturen overstiger 25 °C. 66 % av de prosjekterte luftmengdene reguleres etter dette prinsippet.

I noen grupperom benyttes bevegelsesfølere for VAV-styring, slik at maksimale luftmengder tilføres dersom det er personer til stede i rommet. Dersom temperaturen blir høy vil også maksimale luftmengder tilføres. Når det ikke registreres tilstedeværelse i rommet settes luftmengden til et minimum på cirka 30 % av maksimal luftmengde. 13 % av de prosjekterte luftmengdene blir regulert med 2-trinns VAV. De resterende rommene benytter CAV og får tilført konstante luftmengder til enhver tid. Dette gjelder gang, fellesarealer, lager, noen grupperom, garderobes og toaletter, som totalt utgjør 21 % av de prosjekterte luftmengdene.

Det benyttes nattsinking på ventilasjonsanlegget (Næss, 2013). Vanligvis er det avslått i helgene og i tidsrommet fra kl. 17 til kl. 06. på hverdager, men dette kan variere noe ut ifra tid på året. Brukerne har mulighet til å overstyre nattsinkingen med tidsbrytere i aktuelle rom.

### *Personbelastning*

Normal brukstid for bygningen er i skoletiden fra 0800 til 1600. I denne perioden vil høyest personbelastning forekomme siden både ansatte og elever da befinner seg på skolen. På kveldstid kan det også forekomme noe bruk av lærerrommene, samt elevarealene ved spesielle arrangementer. Luftmengdene overstyres ikke under målingene.



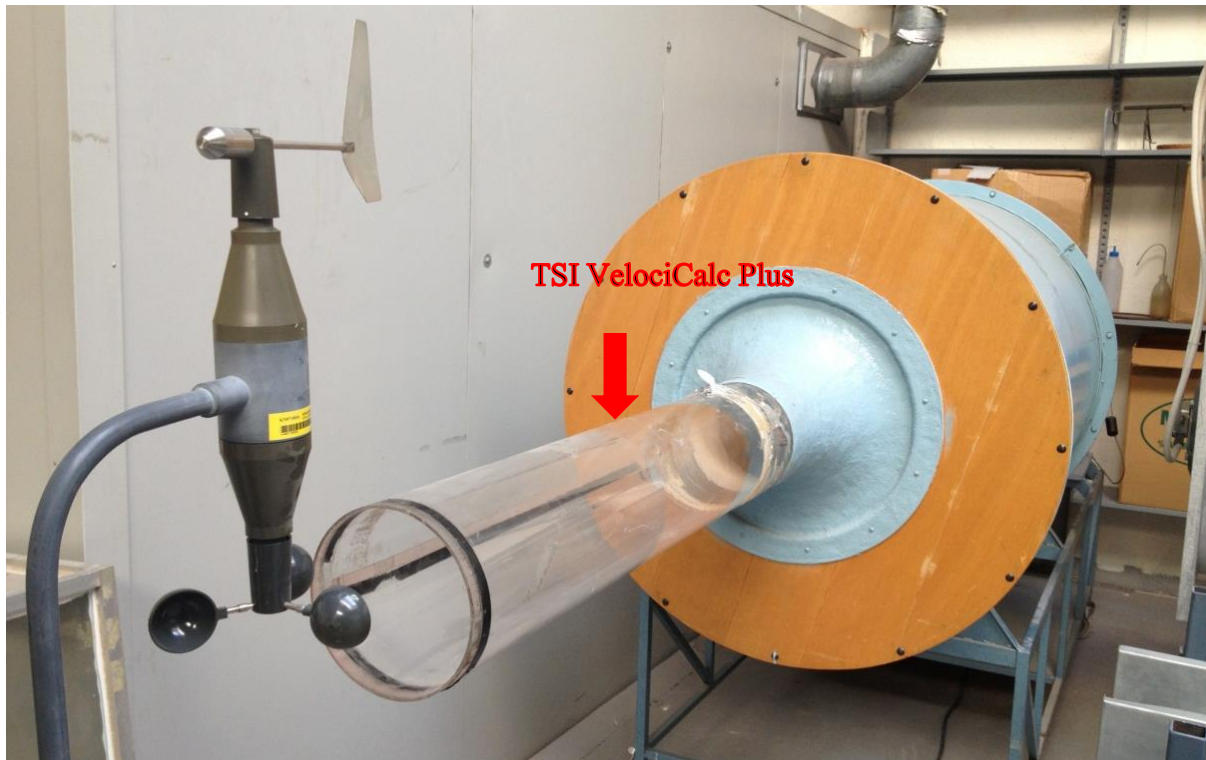
## Vedlegg 2. Måleutstyr og kalibrering

### Vedlegg 2.1 Måleinstrumenter

- Gassflaske
  - Medisinsk lystgass Yara Industrial 100 %, flytende
- Trykkregulator
  - Trykkregulator koblet til gassflaske, ukjent produkt
- Rotametre
  - Purgemaster 'SNAP-IN' Small Flowmeter, A6131B.  
0,04 – 0,35 NI/min N<sub>2</sub>O ved ATM og 20 °C.
  - Vøgtlin rotameter, FLV-CSSS-SM.  
1-18 NI/min luft ved 1,013 bar og 20 °C.
- Plastslanger
  - Slange PU 4MM PUR98-4/2-25B
  - Slange PU 6MM
  - Slange PU 8MM
- Hastighets- og trykkmåler
  - TSI VelociCalc Plus 8388 (sist kalibrert januar 1997)
- Sporgassutstyr
  - Brüel & Kjær (Innova), Multipoint sampler and doser Type 1303
  - Brüel & Kjær (Innova): Multi-gas monitor Type 1302
  - Programvare 7620
- Røykappuller
  - Brandax VS, hvit røyk, 55 m<sup>3</sup>, brenntid 3-4 min
- Vindmåler
  - Ukjent produkt

## Vedlegg 2.2 Kalibrering av vindmåler

Vindmåleren ga retningsdata med nord som referanse på 0°, mens hastighet kun ble gitt som et spenningsignal. Vindmåleren ble derfor kalibrert for vindhastighet ved å benytte vindgeneratoren som vist i figur 28.

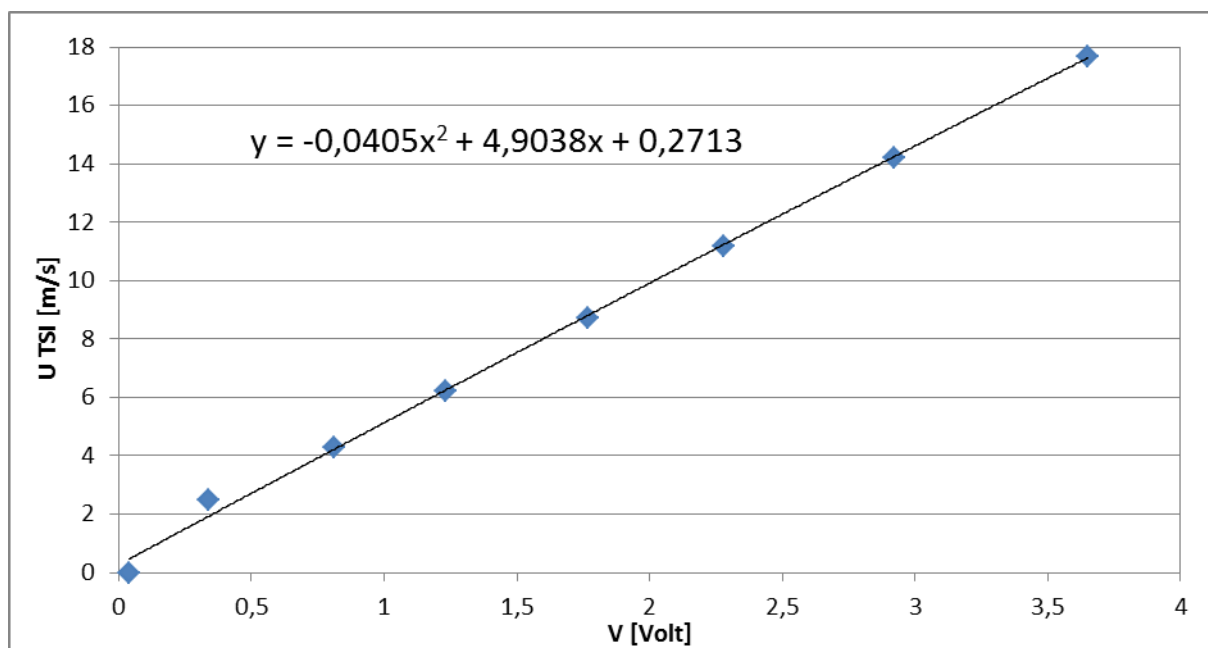


**Figur 28: Illustrasjon av vindgenerator og kalibrering av vindmåler.**

Pådraget fra vindgeneratoren ble variert fra 0 til 18 m/s. Hastighetsmåleren TSI VelociCalc Plus 8388 ble plassert i begynnelsen av røret for å måle lufthastigheten i senter. Vindmåleren var plassert med den ene skålen langs senterlinjen i plastrøret. Hastighetsverdiene ble avlest manuelt på TSI VelociCalc Plus ved stabiliserte verdier, mens spenningen fra vindmåleren ble logget på data. Et gjennomsnitt av 5 000 spenningsverdier målt hvert 100 ms ble benyttet for å kalibrere spenning mot hastighet. Resultatene er vist i tabell 18 og figur 29.

**Tabell 18: Resultater fra vindhastighetskalibrering.**

$U$ [m/s]	$\bar{V}$ [volt]	$\omega$ [rpm]
0	0,04	0
2,5	0,34	500
4,3	0,81	800
6,2	1,23	1100
8,7	1,77	1500
11,2	2,28	1900
14,2	2,92	2400
17,7	3,65	2950



**Figur 29: Forhold mellom spenning vindmåler og hastighet TSI VelociCalc Plus 8388 for kalibrering.**

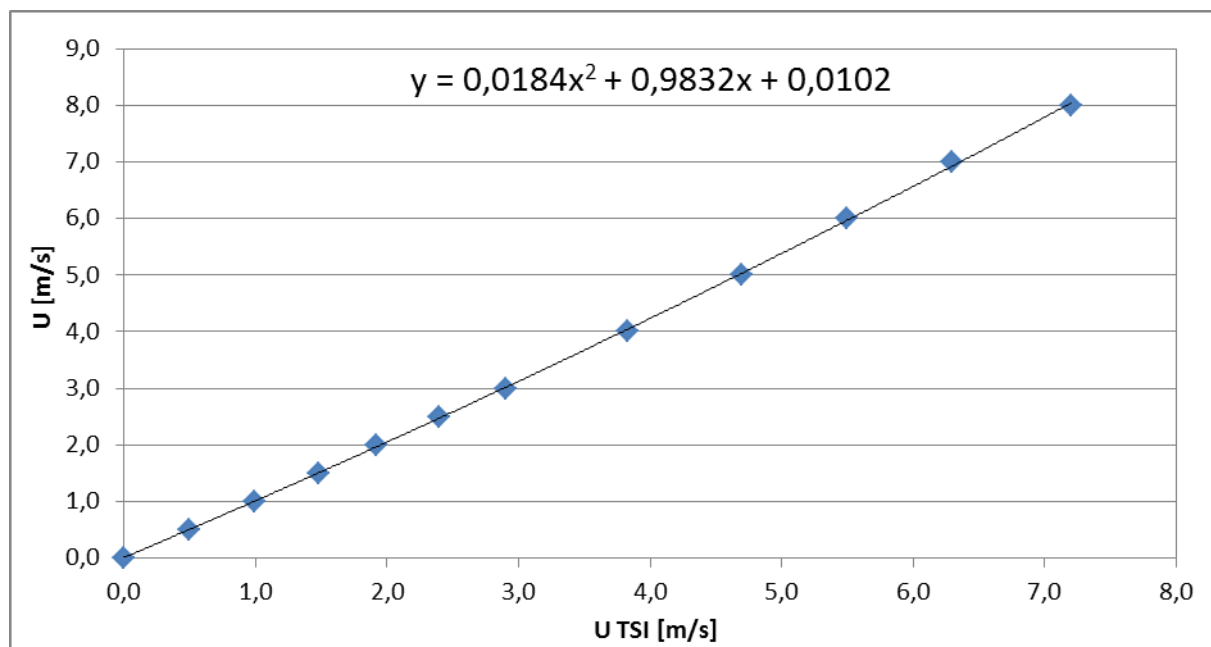
Kalibreringen ble utført av labtekniker Stein Kristian Skånøy ved NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk (EPT).

### Vedlegg 2.3 Funksjonstest av TSI VelociCalc Plus 8388 Hastighetsmåler

Hastighetsmåleren i TSI VelociCalc Plus 8388 ble funksjonstestet ved å benytte vindgeneratoren som vist i figur 28. Omdreiningene ble holdt konstant på 1500 rpm mens spjeldåpningen ble regulert. Det var oppgitt diagrammer for avlesning av hastighet ved gitt spjeldåpning og omdreining ved instrumentet. Resultatene som gir forholdet mellom hastighet fra vindgeneratoren og hastighet TSI VelociCalc Plus 8388 er vist i tabell 19 og figur 30. En trendlinje med polynom av andre grad gir beste tilpasning til resultatene. TSI VelociCalc Plus 8388 korrigeres derfor med ligningen oppgitt i figur 30, som er et polynom av andre grad.

**Tabell 19: Resultater fra funksjonstest av hastighetsmåler.**

Spjeldåpning [mm]	U [m/s]	U TSI [m/s]
-	0,0	0,00
7	0,5	0,49
17	1,0	0,99
27	1,5	1,48
37	2,0	1,92
47	2,5	2,40
57	3,0	2,90
76	4,0	3,83
96	5,0	4,70
116	6,0	5,50
138	7,0	6,30
163	8,0	7,20



**Figur 30: Forhold mellom hastighet vindgenerator og hastighet TSI VelociCalc Plus 8388 for funksjonstest.**

## Vedlegg 2.4 Funksjonstest av TSI VelociCalc Plus 8388 Trykkmåler

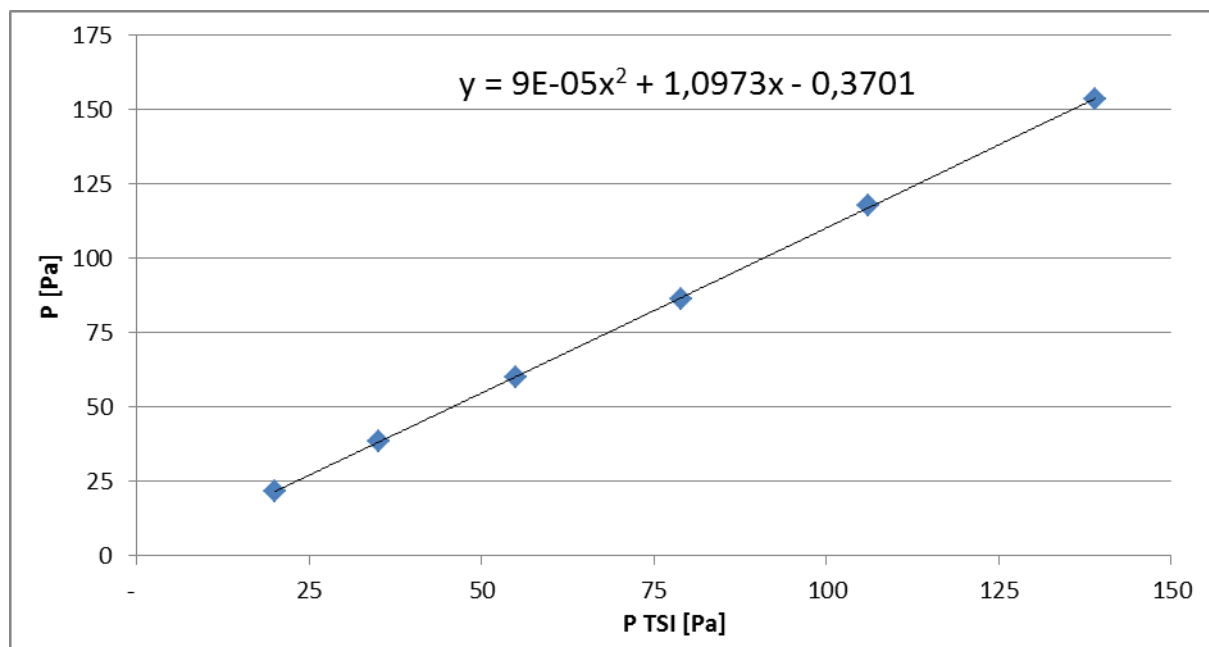
Trykkmåleren i TSI VelociCalc Plus 8388 ble funksjonstestet ved å benytte vindgeneratoren som vist i figur 28. Omdreiningene var konstante på 2 775 rpm mens spjeldåpningen ble regulert. Lufthastighet ved gitte omdreininger og spjeldåpning ble lest av et diagram på vindgeneratoren. Et pitotrør ble koblet til TSI VelociCalc Plus 8388 og differensialtrykket ble avlest. Differensialtrykket i vindgeneratoren ble beregnet med tetthet  $1,2 \text{ kg/m}^3$  etter formel:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (7)$$

Resultatene som gir forholdet mellom differensialtrykket i vindgeneratoren og avlest av TSI VelociCalc Plus 8388 er vist i tabell 20 og figur 31. TSI VelociCalc Plus 8388 korrigeres derfor med trendlinjen, som er et polynom av andre grad, oppgitt i figur 31.

**Tabell 20: Resultater fra funksjonstest av differensialtrykkmåler.**

Spjeldåpning [mm]	V [m/s]	P [Pa]	$P_{TSI}$ [Pa]
63	6	21,6	20
83	8	38,4	35
106	10	60,0	55
130	12	86,4	79
156	14	117,6	106
188	16	153,6	139



**Figur 31: Forhold mellom differensialtrykk vindgenerator og TSI VelociCalc 8388 Plus trykkmåler.**





### Vedlegg 3. Beregningsmetoder for målinger

#### Vedlegg 3.1 Statistisk metode – Bootstrap

Bootstrap er en computerbasert statistisk metode som medfører høy nøyaktighet av statistiske estimater (Efron og Tibshirani, 1993). Metoden baseres på å produsere en rekke datasett ut ifra en mindre datasamling slik at det oppnås et større pseudoutvalg. Dette utføres ved gjentatte tilfeldige utvalg fra den opprinnelige datasamlingen. I denne sammenheng er metoden benyttet for å presentere innsamlet data om lystgasskonsentrasjon og vurdere nøyaktigheten til datasamlingen. Metoden er spesielt gunstig siden utvalget med målinger av lystgasskonsentrasjon er lite.

Det tas utgangspunkt i følgende utvalg:

*målinger av konsentrasjon i luftinntak:*

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (8)$$

*målinger av konsentrasjon i avkast:*

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (9)$$

*målinger av basekonsentrasjon i luftinntak:*

$$\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_p) \quad (10)$$

Vektorene  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  og  $\mathbf{z}$  kan være av ulike størrelser. Siden målingene er hentet på ulike tidspunkt antas det gjensidig uavhengighet for  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  og  $\mathbf{z}$ .

En tilfeldig omluftsfaktor baseres på å hente tilfeldige målinger fra  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  og  $\mathbf{z}$  som betegnes  $x_i$ ,  $y_k$  og  $z_j$ . Omluftsfaktoren,  $f$ , kan da beregnes med følgende formel:

$$f_r = \frac{x_i - z_j}{y_k} \quad (11)$$

hvor

$$i \in 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$j \in 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$k \in 1, 2, \dots, p \quad (14)$$

$$r \in 1, 2, \dots, 1000 \quad (15)$$

Denne prosedyren gjentas 1 000 ganger slik at det produseres 1 000 tilfeldige omluftsfaktorer i vektoren,  $\mathbf{f}$ :

$$\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_{1000}) \quad (16)$$

Gjennomsnittlig omluftsfaktor beregnes ut ifra de tilfeldig genererte omluftsfaktorene i  $f$  etter følgende formel:

$$\bar{f} = \frac{1}{1000} \sum_{r=1}^{1000} f_r \quad (17)$$

Standardavvik beregnes etter følgende formel:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{1000} \sum_{r=1}^{1000} (f_r - \bar{f})^2} \quad (18)$$

Notasjonene som tilhører vedlegg 3.3 er beskrevet direkte i kapittelet. Den generelle symbollisten er derfor ikke gjeldende for Statistisk metode - Bootstrap.

### Vedlegg 3.2 Korreksjon av vindhastighet

Denne metoden er hentet fra ASHRAE Handbook – Fundamentals (ASHRAE, c2009, kap. 24). Metoden benyttes for å korrigere vindhastigheten fra et område til en annen lokasjon ved å ta hensyn til høyde og grenselagsparametere presentert i tabell 21. I Tabellen er ruhetslengden,  $\bar{z}$ , presentert som  $z_o$ . En nærmere beskrivelse av terrengkategoriene er gitt i ASHRAE Handbook – Fundamentals (ASHRAE, c2009, kap. 24).

**Tabell 21: Grenselagsparametere (ASHRAE, c2011, kap. 45).**

<b>Terrain Category</b>	<b><math>z_o</math>, m</b>	<b><math>a</math></b>	<b><math>\delta</math>, m</b>
Flat, water, desert	0.01	0.10	213
Flat, airport, grassland	0.05	0.14	274
Suburban	0.65	0.22	365
Urban	2.0	0.33	457

Det er tatt utgangspunkt i vinddata fra Voll målestasjon i Trondheim for å beregne vindhastighet ved bygningene som betraktes. Målestasjonen ligger i åpent terreng etter kategori 3 og har parametere:

$$H_{met} = 10m$$

$$\delta_{met} = 274m$$

$$a_{met} = 0,14$$

Korrigert vindhastighet beregnes etter følgende formel:

$$U_{maks} = U_{met} \left( \frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left( \frac{H}{\delta} \right)^a \quad (19)$$

Vindhastigheten gjelder for høyden over bakkenivå,  $H$ , og tar ikke hensyn til lokale hindringer for strømningsmønsteret som bygninger eller trær.

### Vedlegg 3.3 Luftmengdeberegninger

#### Hastighet

Denne metoden for beregning av luftmengder ved hastighetsmålinger med varmetrådsanemometer er hentet fra Johansson og Svensson (1998), metodebetegnelse A31 og A32. Krav til varmetrådsanemometeret er at sonden er tilnærmet punktformet med like grovt eller mindre grovt skaft enn tilsvarende prandtlrør. Varmetrådsanemometeret må i tillegg være kalibrert ved samme temperatur som i kanalen.

Det utføres hastighetsmålinger i sirkulære kanaler for punktene som er vist i tabell 22. Deretter beregnes en gjennomsnittshastighet som korrigeres for kanalform med korreksjonsfaktor,  $\tilde{k}_2$ , vist i tabell 23. Luftmengdene beregnes ut ifra korrigert hastighet og kanalens tverrsnittareal etter følgende formel:

$$q = \bar{U}_{korr} \cdot A = \bar{U} \cdot \tilde{k}_2 \cdot A \quad (20)$$

**Tabell 22: Målepunkter i sirkulære kanaler (Johansson og Svensson, 1998).**

Nominell diameter <sup>1)</sup> , D mm	Placering av måtpunkter	a mm	b mm	c mm	d mm	Figur
200	$a = 0,10 \cdot D$	20	100	180	-	
250	$b = 0,50 \cdot D$	25	125	225	-	
315	$c = 0,90 \cdot D$	32	158	283	-	
400		40	200	360	-	
500	$a = 0,043 \cdot D$	22	145	355	478	
630	$b = 0,29 \cdot D$	27	185	445	603	
800	$c = 0,71 \cdot D$	34	230	570	766	
1000	$d = 0,957 \cdot D$	43	290	710	957	
1250		54	360	890	1196	

**Tabell 23: Korreksjonsfaktor for kanalform,  $\tilde{k}_2$ , ved sirkulært tverrsnitt (Johansson og Svensson, 1998).**

Diameter, D mm	$k_2$
$D \leq 160$	0,96
$160 < D \leq 400$	0,97
$400 < D \leq 1250$	0,98

Det antas at hastighetsprofilene under målingene imøtekommer kravene som er satt for å kunne benytte metoden.

## Sporgass

Metoden for beregning av luftmengder ved sporgassmålinger er hentet fra Johansson og Svensson (1998). Det forutsettes at mengden tilført sporgass er kontinuerlig. I tillegg må sporgassen være godt innblandet i luften i punktet hvor målingene utføres. Rotameteret som benyttes for tilsetning av gass må være kalibrert for den aktuelle sporgassen.

Konvertering av lystgasskonsentrasjoner fra  $\text{mg}/\text{m}^3$  til ppm utføres ved følgende formel (Arbeidstilsynet, 2011):

$$C_{ppm} = C_{\text{mg}/\text{m}^3} * \frac{24,45 \text{ l/mol}}{44,01 \text{ g/mol}} \quad (21)$$

Ved beregninger tas det hensyn til en basekonsentrasjon i luften. Luftmengdene i avkastkanalen beregnes med konsentrasjoner oppgitt i ppm etter følgende formel:

$$q_a = \frac{\dot{m}_g}{C_a - C_b} \quad (22)$$

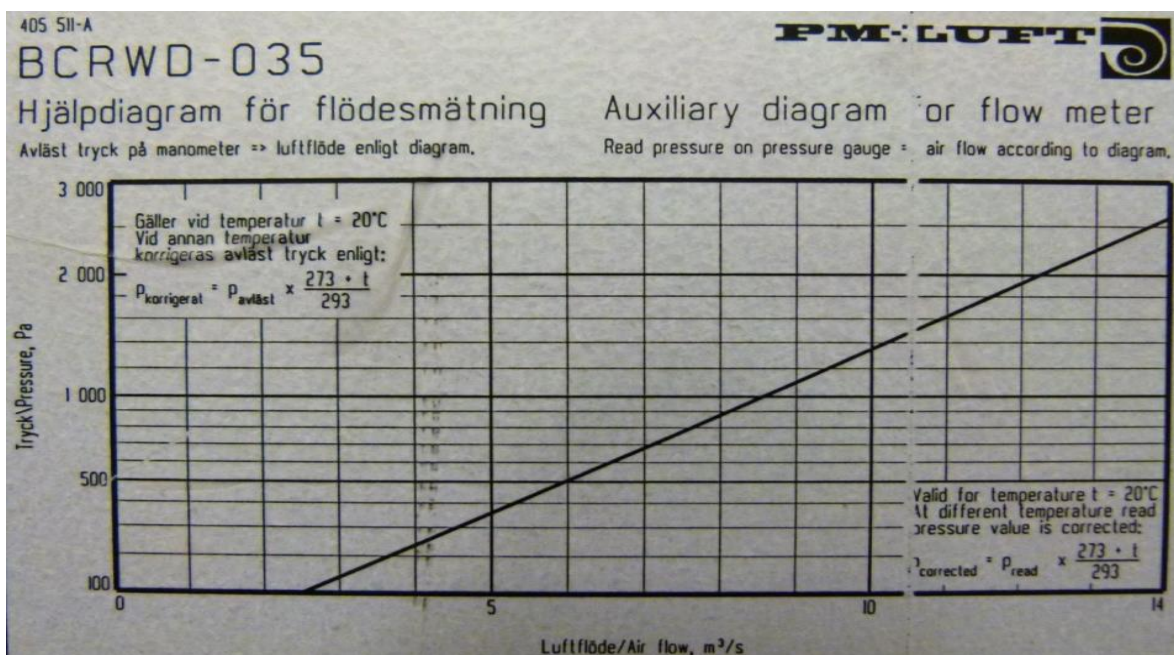
I beregningene er det ikke tatt hensyn til temperaturdifferanser mellom injisert sporgass og luften i avkastkanalen.

## Differensialtrykk

Diagram for beregning av luftmengder ut ifra avlest trykkdifferanse over avtrekksvifte var oppgitt på aggregatet på Charlottenlund ungdomsskole, se figur 32. Målt trykkdifferanse korrigeres for temperatur ved formel:

$$P = P_b \cdot \frac{273 + T}{293} \quad (23)$$

Deretter har luftmengder blitt avlest etter korrigert trykkdifferanse.



Figur 32: Konverteringsdiagram fra trykk over avtrekksvifte til luftmengder.

## Vedlegg 4. Beregningsmetoder med teoretiske modeller

### Vedlegg 4.1 ASHRAE Fortynningsmetode

Dette er en gjengivelse av metoden for beregning av fortynning av forurensningskonsentrasjoner som er presentert i ASHRAE Handbook – HVAC Applications (ASHRAE, c2011, kap. 45). Metoden benyttes til beregning av laveste fortynningsfaktor som kan forekomme for oppbygd og lavt avkast, men har noe ulike fremgangsmåter for de to tilfellene.

Avkasthøyden som benyttes i beregningene gjelder for et avkast som benytter hette for å beskytte mot regn i avkast. Slike avkast kan medføre at avkastluften bøyes i en nedadgående retning ved utløpet. Dersom det benyttes mer åpne avkastløsninger vil luftstrålen bevege seg fritt oppover fra utløpet. Det tas imidlertid ikke hensyn til oppdrift. Korreksjonsfaktoren er:

$$k_{\bar{t}} = \min\{\beta h_1, \beta h_2\} \quad (24)$$

hvor

$$h_1 = \left\{ \left( \frac{3F_m x}{\bar{\beta}^2 U_{maks}^2} \right)^{1/3} \right\} \quad (25)$$

$$h_2 = \frac{0.9[F_m \cdot U_{maks}/U_*]^{1/2}}{U_{maks} \bar{\beta}} \quad (26)$$

$$F_m = V_e^2 \left( \frac{d_e^2}{4} \right) \quad (27)$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{3} + \frac{U_{maks}}{V_e} \quad (28)$$

$$\frac{U_{maks}}{U_*} = 2.5 \cdot \ln(H/\bar{z}) \quad (29)$$

$$d_e = \sqrt{4A_e/\pi} \quad (30)$$

Maksimal dimensjonerende vindhastighet,  $U_{maks}$ , bør være minst den hastigheten som overstiges 1 % av tiden i løpet av en time. Dersom informasjon om denne vindhastigheten ikke er tilgjengelig kan  $U_{maks}$  beregnes som 2,5 ganger den gjennomsnittlige vindhastigheten i løpet av et år. I tillegg gjøres korreksjoner for terrengtype etter tabell 21 i vedlegg 3.2.

$$U_{maks} = 2,5U_{\bar{a}} \mp 0,4 \quad (31)$$

$$U_{maks} = U_{met} \left( \frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left( \frac{H}{\delta} \right)^a \quad (32)$$

En annen korrigerende avkasthøyden gjøres for å ta hensyn til lufthastighet over utløpet. For lave lufthastigheter kan strålen falle langs utsiden av avkast, i form av nedslag, Dersom hastigheten er lav må derfor den dimensjonerende avkasthøyden økes. Korreksjonsfaktoren er:

$$k_{V,e} = d_e \left( 3.0 - \beta \frac{V_e}{U_{maks}} \right) \quad for \quad \frac{V_e}{U_{maks}} < 3.0 \quad (33)$$

$$k_{V,e} = 0 \quad for \quad \frac{V_e}{U_{maks}} > 3.0 \quad (34)$$

Den vertikale separasjonen avgjør om metode for lavt eller oppbygd avkast skal benyttes. Vertikal separasjon beregnes som differansen mellom høyden på luftstrålens senterlinje og høyeste punkt av bygningskonstruksjonen, luftinntak og turbulente områder. Byggets geometri må undersøkes for å finne høyeste punkt på bygget som kan være et hinder for spredningen av forurensninger. Vertikal separasjon beregnes med formel (35) til (37). Dersom den vertikale separasjonen er 0, benyttes metode for lavt avkast. Avkasthøyden,  $h_b$ , kan enten beregnes ut ifra *Metode 1 – Geometrisk* som er gjengitt av Holmen (2012) eller settes til en valgfri verdi for å finne fortykning for den spesifikke avkasthøyden.

$$\zeta = h_s - h_{topp} \quad for \quad h_s > h_{topp} \quad (35)$$

$$\zeta = 0 \quad for \quad h_s > h_{topp} \quad (36)$$

hvor

$$s = h_b + k_i - k_{V,e} \quad (37)$$

Luftstrålen fra utløpet vil bevege seg i en retning,  $x$ , som avhenger av vindretningen. Strålen vil imidlertid spres i andre retninger på grunn av turbulens. Det tas hensyn til turbulens både i horisontal retning,  $y$ , på tvers av vindretningen og vertikal retning,  $z$ . Ruhetslengden bestemmes etter tabell 21 i vedlegg 3.2. Spredningen av luftstrålen,  $\bar{\sigma}_y$  og  $\bar{\sigma}_z$ , kan beregnes ut ifra turbulensintensitetene,  $i_x$ ,  $i_y$  og  $i_z$  ved å benytte formel (38) til (44):

$$n = 0.24 + 0.096 \log_{10} \bar{z} + 0.016 (\log_{10} \bar{z})^2 \quad (38)$$

$$i_x = n \cdot \frac{\ln\left(\frac{30}{\bar{z}}\right)}{\ln\left(\frac{z}{\bar{z}}\right)} \quad (39)$$

$$i_y = 0.75 i_x \quad (40)$$

$$i_z = 0.5 i_x \quad (41)$$

$$\bar{\sigma}_b = 0.35 d_e \quad (42)$$

$$\bar{\sigma}_y = \sqrt{i_y^2 x^2 + \bar{\sigma}_b^2} \quad (43)$$

$$\bar{\sigma}_z = \sqrt{i_z^2 x^2 + \bar{\sigma}_b^2} \quad (44)$$

Det er ikke angitt hvor formlene for turbulensintensitet er hentet fra eller hvilken teori som ligger til grunn. Lengden  $z$  som benyttes i formel (39) er heller ikke beskrevet i ASHRAE Handbook – HVAC Applications (ASHRAE, c2011, kap. 45). I følge Counihan (1975) er turbulens en funksjon av ruhetslengde og vertikal høyde. Derfor er  $z$  antatt å være bygningshøyde i dette tilfellet, noe som stemmer godt overens med beregningseksempler gitt i ASHRAE Handbook – HVAC Applications.

Dersom den vertikale separasjonen er 0 og metode for lavt avkast benyttes, kan  $x$  antas å være den direkte avstanden mellom luftinntak og avkast. Den direkte avstanden gir den korteste avstanden mellom luftinntak og avkast, hvor både vertikale, horisontale og skrå lengder inngår.

Fortynning ved luftinntak beregnes ut ifra kalkulerte verdier for luftstrålens spredning og vertikal separasjon, samt hastigheter og størrelse på avkast. For lavt avkast kan det eksponentielle uttrykket neglisjeres siden den vertikale separasjonen er 0. Fortynningsfaktoren,  $D_s$ , representerer forholdet mellom forurensningskonsentrasjon over utløpet og høyeste konsentrasjon på luftsøylen senterlinje ved taknivå, her ved luftinntaket. Dersom luftinntak er plassert på vegg og avkast på tak er lav er det foreslått at den beregnede fortynningen multipliseres med 2.

$$D_s = \frac{4U_{maks}\bar{\sigma}_y\bar{\sigma}_z}{V_e d_e^2} \cdot e^{\frac{\sigma_z^2}{2\bar{\sigma}_z^2}} \quad (45)$$

Det beregnes fortynning for den antatte ruhetslengden og for 50 % økning og reduksjon av den antatte ruhetslengden, med den maksimale dimensjonerende vindhastighet. Ruhetslengder bestemmes ut ifra tabell gitt i vedlegg 3.2. For oppbygd avkast gjøres det i tillegg beregninger for 30 % økning og reduksjon i den maksimale dimensjonerende vindhastigheten. For lavt avkast antas en dimensjonerende vindhastighet på 2 m/s. Dette baseres på at lavere vindhastigheter gir mer turbulens som medfører høyere fortynning. Det tilfellet av dimensjonerende vindhastighet og ruhetslengde som gir lavest fortynning vil angi det mest kritiske tilfellet som kan oppstå.

## Vedlegg 4.2 Kastelengde

Skåret (2000) presenterer følgende likninger for å beregne kastelengde og fortynning, der kastelengdene er gitt som  $\bar{k}$  og fortynning som  $D = \frac{q}{q_e}$ :

*Generelle formler*

$$\frac{V_s}{V_o} = \sqrt{\frac{\rho_e \bar{i}}{\rho_o \varepsilon}} \sqrt{\frac{A_o}{A_s I_4}} \quad (46)$$

$$\frac{q}{q_e} = \sqrt{\frac{\rho_e \bar{i}}{\rho_o \varepsilon}} \sqrt{\frac{A_s I_2^2}{A_e I_4}} \quad (47)$$

*Runde aksielle stråler*

$$\frac{V_s}{V_o} = \sqrt{\frac{\rho_e \bar{i}}{\rho_o \varepsilon}} \frac{1,54}{\tilde{c}} \frac{\sqrt{A_e}}{(\bar{k} + x_p)} \quad (48)$$

$$D = \frac{q}{q_e} = \sqrt{\frac{\rho_e \bar{i}}{\rho_o \varepsilon}} 1,24 \tilde{c} \frac{\bar{k} + x_p}{\sqrt{A_e}} \quad (49)$$

Formlene for runde aksielle stråler gitt direkte av Skåret (2000), men kan også utledes fra de generelle formlene.

*Kvadratiske stråler med fri utvidelse i alle retninger*

Strålingstverrsnitt for kvadratiske stråler:

$$A_s = 4r^2 = 4\tilde{c}^2(\bar{k} + x_p)^2 \quad (50)$$

Standardintegral (Skåret, 2000):

$$I_n = \int_0^1 \left[ 1 - \left(\frac{z}{r}\right)^{1,5} \right]^n \frac{dA}{A_s}; \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (51)$$

Beregning av integraler:

$$\frac{dA}{A_s} = \frac{8z \cdot dz}{4r^2} = 2 \frac{z}{b} d\left(\frac{z}{b}\right) \quad (52)$$

$$I_2 = \int_0^1 \left[ 1 - \left(\frac{z}{r}\right)^{1,5} \right]^2 \frac{dA}{A_s} = 2 \int \left[ 1 - \left(\frac{z}{r}\right)^{1,5} \right]^2 \frac{z}{r} d\left(\frac{z}{r}\right) = 0,256 \quad (53)$$

$$I_4 = \int_0^1 \left[ 1 - \left(\frac{z}{r}\right)^{1,5} \right]^4 \frac{dA}{A_s} = 2 \int \left[ 1 - \left(\frac{z}{r}\right)^{1,5} \right]^4 \frac{z}{r} d\left(\frac{z}{r}\right) = 0,134 \quad (54)$$



Utleddning av formler for kvadratiske stråler med utgangspunkt i formel (48) og (49):

$$\frac{V_s}{V_e} = \sqrt{\frac{\rho_e \bar{i}}{\rho_o \varepsilon}} \sqrt{\frac{A_0}{4\tilde{c}^2(\bar{k} + x_p)^2 I_4}} = \sqrt{\frac{\rho_e \bar{i}}{\rho_o \varepsilon}} \cdot \frac{1,37}{\tilde{c}} \cdot \frac{\sqrt{A_e}}{(\bar{k} + x_p)} \quad (55)$$

$$D = \frac{q}{q_e} = \sqrt{\frac{\rho_o \bar{i}}{\rho_r \varepsilon}} \sqrt{\frac{4\tilde{c}^2(\bar{k} + x_p)^2 I_2^2}{A_e I_4}} = \sqrt{\frac{\rho_e \bar{i}}{\rho_o \varepsilon}} \cdot 1,40\tilde{c} \cdot \frac{(\bar{k} + x_p)}{\sqrt{A_e}} \quad (56)$$

En illustrasjon av strålens spredning er vist i kapittel 6.3, figur 18. Det er imidlertid benyttet andre notasjoner i figuren enn i utledningene.



## Vedlegg 5. Resultater

### Vedlegg 5.1 Resultater NTNU Varmeteknisk – Testmålinger

#### *Datoer for målinger*

Dag 1: 19.03.13

Dag 2: 21.03.13

Dag 3: 04.04.13

Dag 4: 05.04.13

#### *Konsentrasjoner*

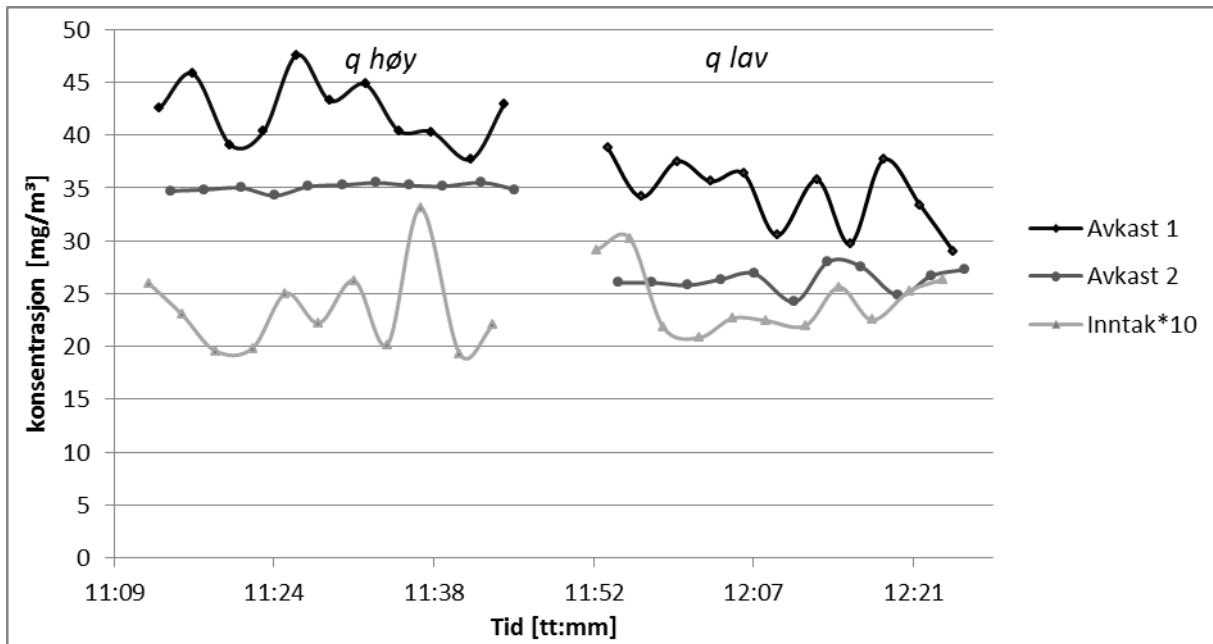
Basekonsentrasjonen i avkast og inntak viser konsentrasjonen av lystgass i luften, uten at lystgass har blitt tilsatt i ventilasjonsanlegget. Basetilfellet ble målt på dag 3 og resultater er vist i tabell 24. I tabell 25 vises konsentrasjoner ved store og små luftmengder for dag 1 og 2. En grafisk fremstilling av konsentrasjonene målt på dag 2 er vist i figur 33. Tabell 26 gir resultater ved varierende tilsatt gassmengde og konstante små luftmengder, mens korrelasjon mellom varierende mengde tilsatt lystgass og omluftsfaktor for avkast 2 er vist i tabell 27.

**Tabell 24: Basekonsentrasjon målt på dag 3 for NTNU Varmeteknisk.**

Avkast 1		Avkast 2		Luftinntak	
Tid [tt:mm:ss]	C <sub>a1</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Tid [tt:mm:ss]	C <sub>a2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Tid [tt:mm:ss]	C <sub>t</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]
09:07:46	1,006	09:08:56	0,972	09:09:56	0,920
09:10:56	0,975	09:11:56	0,983	09:12:56	0,945
09:13:56	0,952	09:14:56	0,938	09:15:56	0,901
09:16:56	0,940	09:18:26	0,961	09:19:26	0,889
09:20:26	0,933	09:21:26	0,920	09:22:26	0,907
09:23:26	0,921	09:24:26	0,900	09:25:26	0,846
09:26:26	0,925	09:27:26	0,929	09:28:46	0,889
09:29:46	0,897	09:30:46	0,899	09:31:46	0,857
09:32:46	0,900	09:33:46	0,922	09:34:46	0,853
09:35:46	0,906	09:36:46	0,915	09:37:56	0,832
09:38:56	0,894	09:39:56	0,848	09:40:56	0,789
09:41:56	0,856	09:42:56	0,871	09:43:56	0,824
09:44:56	0,890	09:45:56	0,896	09:46:56	0,858
09:48:26	0,899	09:49:26	0,872	09:50:26	0,812
Snitt	0,921	Snitt	0,916	Snitt	0,866

**Tabell 25: Lystgasskonsentrasjoner på NTNU Varmeteknisk for dag 1 og 2.**

		Dag 1						Dag 2					
		Avkast 1		Avkast 2		Luftinntak		Avkast 1		Avkast 2		Luftinntak	
		Tid	C <sub>a1</sub>	Tid	C <sub>a2</sub>	Tid	C <sub>t</sub>	Tid	C <sub>a1</sub>	Tid	C <sub>a2</sub>	Tid	C <sub>t</sub>
		[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]
Q <sub>lav</sub>		14:13:26	38,922	14:14:25	34,150	14:15:25	3,136	11:54:03	38,801	11:55:03	26,032	11:53:03	2,917
		14:16:25	36,809	14:17:35	32,943	14:18:35	3,577	11:57:03	34,154	11:58:03	26,051	11:56:03	3,024
		14:19:36	44,694	14:20:35	31,975	14:21:36	2,969	12:00:18	37,532	12:01:18	25,802	11:59:03	2,183
		14:22:35	55,951	14:23:36	32,604	14:24:35	3,302	12:03:18	35,631	12:04:18	26,371	12:02:18	2,084
		14:25:36	56,155	14:26:35	32,697	14:28:05	3,203	12:06:18	36,357	12:07:18	26,883	12:05:18	2,268
		14:29:05	42,776	14:30:06	34,310	14:31:05	2,788	12:09:18	30,525	12:10:53	24,230	12:08:18	2,245
		14:32:05	50,788	14:33:06	32,193	14:34:05	3,247	12:12:53	35,776	12:13:53	28,006	12:11:53	2,199
		-	-	-	-	-	-	12:15:53	29,717	12:16:53	27,569	12:14:53	2,562
		-	-	-	-	-	-	12:18:53	37,671	12:20:13	24,822	12:17:53	2,251
		-	-	-	-	-	-	12:22:13	33,371	12:23:13	26,705	12:21:13	2,524
	-	-	-	-	-	-	12:25:13	28,956	12:26:13	27,287	12:24:13	2,634	
Q <sub>hov</sub>		13:35:45	39,706	13:36:55	33,302	13:38:15	2,360	11:10:43	41,540	11:11:43	36,254	11:09:08	2,707
		13:39:15	40,323	13:40:15	32,088	13:41:15	2,282	11:13:43	42,545	11:14:43	34,727	11:12:43	2,599
		13:42:16	35,414	13:43:15	31,491	13:44:15	2,371	11:16:43	45,794	11:17:43	34,844	11:15:43	2,303
		13:45:16	40,229	13:46:21	32,574	13:47:30	2,396	11:20:03	39,094	11:21:03	35,017	11:18:43	1,959
		13:48:31	32,889	13:49:30	32,164	13:50:31	2,156	11:23:03	40,334	11:24:03	34,277	11:22:03	1,983
		13:51:30	34,946	13:52:31	31,342	13:53:30	1,900	11:26:03	47,586	11:27:03	35,127	11:25:03	2,502
		-	-	-	-	-	-	11:29:03	43,256	11:30:13	35,275	11:28:03	2,223
		-	-	-	-	-	-	11:32:13	44,817	11:33:13	35,499	11:31:13	2,624
		-	-	-	-	-	-	11:35:13	40,434	11:36:13	35,243	11:34:13	2,020
		-	-	-	-	-	-	11:38:13	40,302	11:39:13	35,163	11:37:13	3,309
	-	-	-	-	-	-	11:41:43	37,711	11:42:43	35,516	11:40:43	1,933	
	-	-	-	-	-	-	11:44:43	42,903	11:45:43	34,863	11:43:43	2,203	



Figur 33: Grafisk fremstilling av konsentrasjoner på dag 2 for NTNU Varmeteknisk.

**Tabell 26: Lystgasskonsentrasjoner på NTNU Varmeteknisk for varierende tilsatt gassmengde og konstante små luftmengder på dag 4.**

$\dot{m}$ [l/min]	Avkast 1		Avkast 2		Luftinntak	
	Tid [tt:mm:ss]	$C_{a1}$ [mg/m <sup>3</sup> ]	Tid [tt:mm:ss]	$C_{a2}$ [mg/m <sup>3</sup> ]	Tid [tt:mm:ss]	$C_t$ [mg/m <sup>3</sup> ]
0,07	09:45:00	12,891	09:43:00	14,133	09:44:00	1,974
	09:48:00	13,002	09:46:00	14,095	09:47:00	1,624
	09:51:00	15,025	09:49:00	13,984	09:50:00	1,814
	09:54:20	10,961	09:52:20	12,675	09:53:20	1,511
	09:57:20	14,478	09:55:20	12,636	09:56:20	1,590
	10:00:20	10,970	09:58:20	12,287	09:59:20	1,670
	10:03:30	13,363	10:01:30	13,020	10:02:30	1,513
	10:06:30	11,305	10:04:30	11,768	10:05:30	1,877
	10:09:30	14,334	10:07:30	12,025	10:08:30	1,655
	10:13:00	14,758	10:10:30	12,611	10:12:00	1,535
	10:16:00	10,005	10:14:00	12,498	10:15:00	1,605
	10:19:00	10,491	10:17:00	12,073	10:18:00	1,594
	10:22:20	15,509	10:20:00	12,568	10:21:00	1,723
	10:25:20	7,592	10:23:20	12,403	10:24:20	1,767
	10:28:20	13,926	10:26:20	11,610	10:27:20	1,510
	10:31:30	8,536	10:29:20	11,386	10:30:20	1,834
0,14	10:40:30	25,140	10:38:30	31,752	10:39:30	3,012
	10:44:05	38,747	10:42:05	31,752	10:43:05	3,180
	10:47:05	27,252	10:45:05	30,114	10:46:05	3,373
	10:50:05	47,555	10:48:05	30,807	10:49:05	3,293
	10:53:25	40,852	10:51:25	30,172	10:52:25	2,692
	10:56:25	27,426	10:54:25	30,614	10:55:25	3,156
	10:59:25	41,818	10:57:25	30,139	10:58:25	3,167
	11:02:35	41,835	11:00:25	32,069	11:01:35	2,478
	11:05:35	36,820	11:03:35	30,158	11:04:35	3,177
	11:08:35	40,308	11:06:35	30,472	11:07:35	3,142
	11:12:10	23,091	11:09:35	28,775	11:10:35	2,419
	11:15:10	24,944	11:13:10	29,674	11:14:10	2,748
	11:18:10	34,496	11:16:10	29,607	11:17:10	3,169
	11:21:30	30,504	11:19:10	28,120	11:20:10	3,201
	11:24:30	24,704	11:22:30	30,501	11:23:30	2,353
	11:27:30	31,488	11:25:30	29,862	11:26:30	2,353
11:30:30	39,383	11:28:30	29,148	11:29:30	2,548	
0,21	11:39:45	19,499	11:37:45	45,768	11:38:45	3,172
	11:43:15	33,396	11:40:45	43,954	11:42:15	3,201
	11:46:15	31,548	11:44:15	43,932	11:45:15	3,072
	11:49:15	33,846	11:47:15	42,807	11:48:15	3,090
	11:52:35	27,367	11:50:15	44,167	11:51:35	3,371
	11:55:35	29,909	11:53:35	41,747	11:54:35	3,105
	11:58:35	20,316	11:56:35	45,057	11:57:35	4,735
	12:01:50	22,444	11:59:35	42,632	12:00:35	3,912

	12:04:50	24,808	12:02:50	40,984	12:03:50	3,270
	12:07:50	34,685	12:05:50	43,070	12:06:50	3,046
	12:10:50	22,627	12:08:50	42,483	12:09:50	4,642
	12:14:25	20,042	12:12:25	41,566	12:13:25	3,790
	12:17:25	23,414	12:15:25	41,279	12:16:25	3,846
	12:20:25	19,271	12:18:25	41,808	12:19:25	3,723
	12:23:45	23,202	12:21:45	42,777	12:22:45	3,280
	12:26:45	20,473	12:24:45	42,350	12:25:45	2,940
	12:29:45	27,141	12:27:45	42,542	12:28:45	3,410
	12:32:55	24,941	12:30:45	42,741	12:31:55	3,158
	12:42:30	53,418	12:39:55	65,976	12:40:55	4,674
	12:45:30	55,408	12:43:30	68,492	12:44:30	4,912
	12:48:30	87,021	12:46:30	66,038	12:47:30	4,705
	12:51:50	41,820	12:49:30	64,877	12:50:30	4,587
	12:54:50	64,214	12:52:50	67,619	12:53:50	4,153
	12:57:50	69,850	12:55:50	64,672	12:56:50	4,900
	13:00:50	61,858	12:58:50	66,518	12:59:50	4,433
	13:04:05	81,736	13:02:05	67,751	13:03:05	5,433
0,28	13:07:05	52,170	13:05:05	67,529	13:06:05	4,886
	13:10:05	87,075	13:08:05	64,527	13:09:05	4,677
	13:13:40	61,132	13:11:40	65,262	13:12:40	5,428
	13:16:40	67,025	13:14:40	63,651	13:15:40	4,791
	13:19:40	69,965	13:17:40	65,370	13:18:40	6,599
	13:23:00	54,956	13:20:40	65,638	13:22:00	4,661
	13:26:00	68,996	13:24:00	64,849	13:25:00	5,006
	13:29:00	85,979	13:27:00	66,529	13:28:00	5,411
	13:32:10	72,772	13:30:00	64,281	13:31:10	4,729
	13:41:45	99,539	13:39:10	89,862	13:40:10	6,796
	13:44:45	82,641	13:42:45	90,641	13:43:45	6,122
	13:47:45	68,545	13:45:45	87,873	13:46:45	6,184
	13:50:45	106,580	13:48:45	88,540	13:49:45	6,775
	13:54:05	80,657	13:52:05	88,956	13:53:05	6,635
	13:57:05	107,230	13:55:05	91,174	13:56:05	5,522
	14:00:05	87,583	13:58:05	86,988	13:59:05	6,434
0,35	14:03:20	84,898	14:01:20	87,122	14:02:20	5,763
	14:06:20	87,583	14:04:20	89,078	14:05:20	5,689
	14:09:20	90,631	14:07:20	86,214	14:08:20	8,526
	14:12:50	76,021	14:10:20	88,259	14:11:50	6,786
	14:15:50	89,024	14:13:50	89,472	14:14:50	6,377
	14:18:50	91,605	14:16:50	88,110	14:17:50	5,944
	14:22:10	80,983	14:19:50	90,527	14:20:50	5,883
	14:25:10	91,741	14:23:10	86,940	14:24:10	5,925
	14:28:10	111,710	14:26:10	94,185	14:27:10	6,036

**Tabell 27: Korrelasjon mellom varierende mengde tilsatt lystgass og omluftsfaktor for dag 4.**

$\dot{m}$	$q$	$f$	$\sigma$
0,07 l/min	500 m <sup>3</sup> /h	6,4 %	1,2 %
0,14 l/min	500 m <sup>3</sup> /h	6,7 %	1,2 %
0,21 l/min	500 m <sup>3</sup> /h	6,1 %	1,2 %
0,28 l/min	500 m <sup>3</sup> /h	6,2 %	0,8 %
0,35 l/min	500 m <sup>3</sup> /h	6,2 %	0,8 %

### Luftmengder

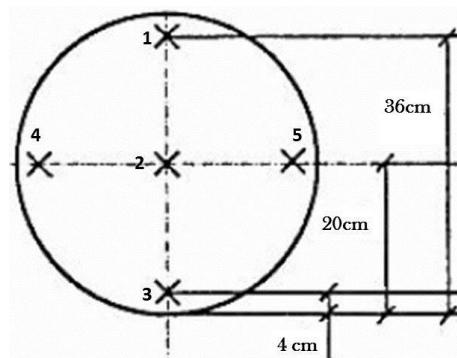
Luftmengdene er beregnet etter målinger utført på dag 4 og metoder presentert i vedlegg 3.3. Disse resultatene er benyttet for å korrigere oppgitte luftmengder fra aggregat på 400 og 1000 m<sup>3</sup>/h for alle målingene.

### Hastighetsmålinger med TSI VelociCalc Plus 8388

Tabell 28 viser luftmengder beregnet ut ifra målte hastigheter for NTNU Varmeteknisk.

**Tabell 28: Hastighetsberegning av luftmengder.**

Målepunkt	$V_{q,lav}$ [m/s]	$V_{q,høy}$ [m/s]
1	1,1	2,7
2	1,1	2,6
3	1,2	2,5
4	1,2	2,8
5	1,1	2,6
Snitthastighet, $\bar{U}$ [m/s]	1,2	2,6
Korreksjonsfaktor, $\tilde{k}_2$ [-]	0,97	0,97
Korrigert hastighet, $\bar{U}_{korr}$ [m/s]	1,1	2,6
Tverrsnittsareal, $A$ [m <sup>2</sup> ]	0,13	0,13
Luftmengder, $q$ [m <sup>3</sup> /h]	507	1153



### Sporgassmålinger

Det er benyttet rotameter Purgemaster A6131B, som er kalibrert for lystgass. Konsentrasjonene som er oppgitt i tabell 29 er gjennomsnittlige måleverdier for punktet i avkastkanalen som ligger lengst fra injiseringspunktet.

**Tabell 29: Beregning av luftmengder med sporgassmålinger.**

	Tilfelle $q_{lav}$	Tilfelle $q_{høy}$
Tilsatt lystgass, $\dot{m}$ [l/min]	0,21	0,35
Konsentrasjon avkast, $C_{a2}$ [ppm]	23,8	19,9
Basekonsentrasjon avkast, $C_{ba2}$ [ppm]	0,51	0,51
Luftmengder, $q$ [m <sup>3</sup> /h]	541	1083



### Oppsummering

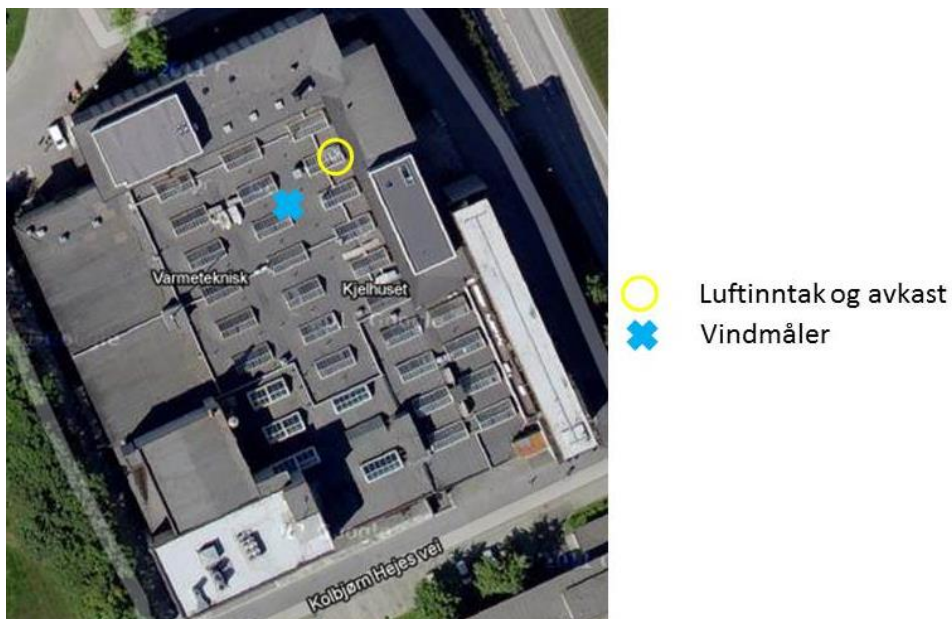
Begge målemetodene gir større luftmengder enn avlesning fra aggregatet, men metodene gir tilnærmet samme resultat. Det er valgt å benytte et avrundet gjennomsnitt til nærmeste 100 m<sup>3</sup>/h av de målte luftmengdene som en representativ luftmengde. Dette gir luftmengder på 500 og 1100 m<sup>3</sup>/h på NTNU Varmeteknisk, som vist i tabell 30.

**Tabell 30: Oppsummering av luftmengdemålinger for NTNU Varmeteknisk.**

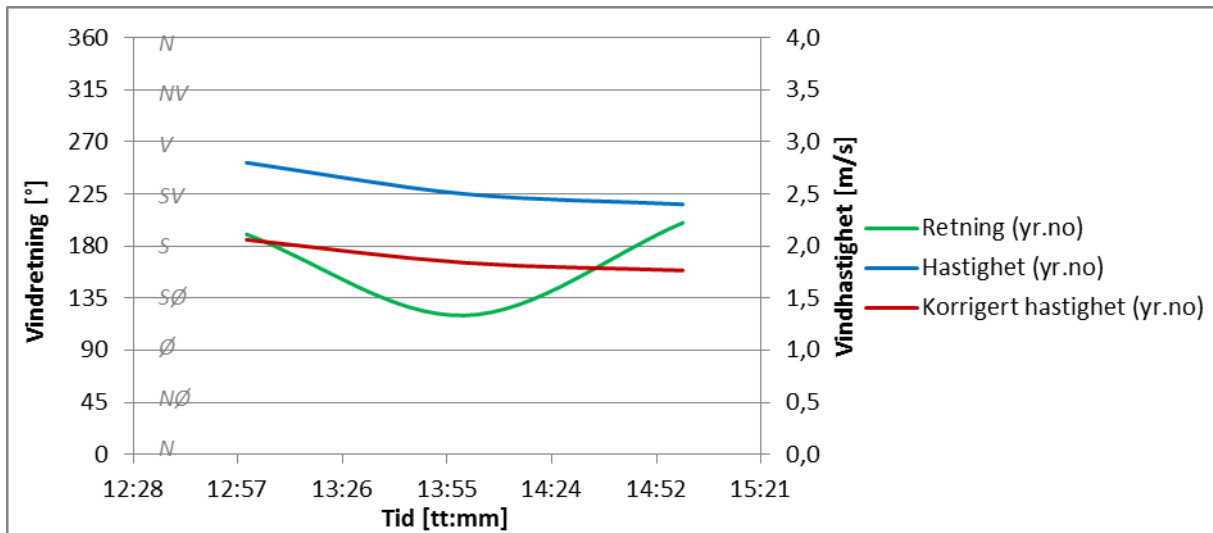
	$q_{lav}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{høy}$ [m <sup>3</sup> /h]
Avlesning aggregat	400	1 000
Hastighetsmålinger	507	1 153
Sporgassmålinger	543	1 088
Representativ luftmengde	500	1 100

### Vindforhold

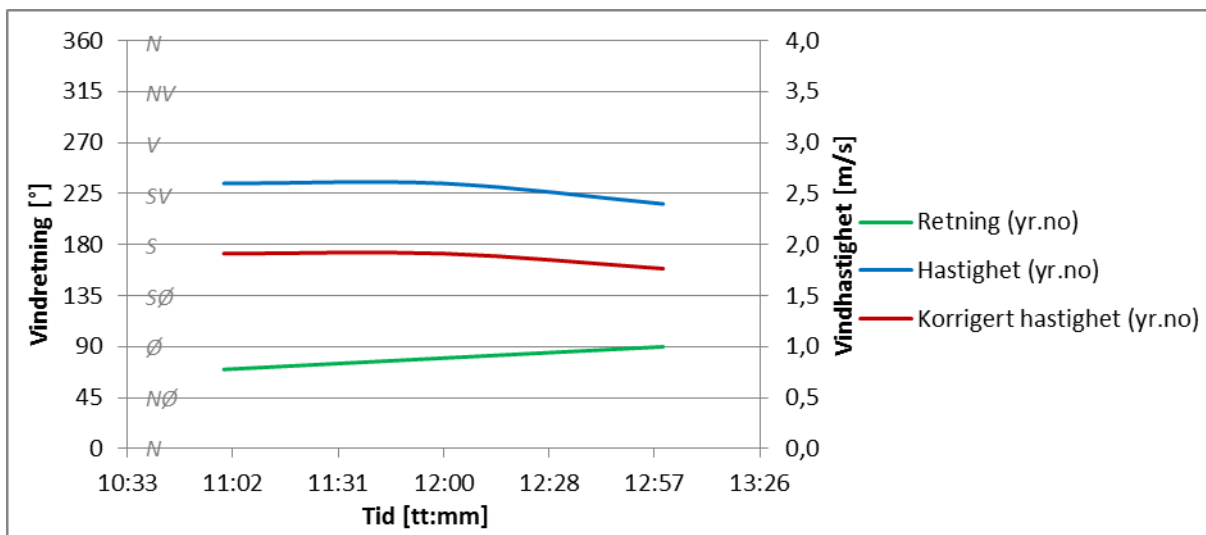
Vindforholdene har blitt kartlagt ved å benytte lokale målinger og data hentet i etterkant av målingene for målestasjonen på Voll fra Meteorologisk Institutt (2013b). Sistnevnte oppgir vindforhold per time og har blitt korrigert for lokale vindforhold ved å benytte korreksjonsmetoden fra ASHRAE Handbook – Fundamentals (ASHRAE, c2009, kap. 24) som er presentert i vedlegg 3.2. Lokale målinger ble utført ved en vindmåler plassert som vist i figur 34. Vindhastighet- og retning for dag 1, 2 og 4 er vist i figur 35 til figur 38. På dag 1 og 2 har ikke lokale målinger blitt benyttet, grunnet en defekt i måleutstyret. Figur 39 viser korrelasjonen mellom konsentrasjon i luftinntak og vindforhold på fjerde dagen ved luftmengder 500 m<sup>3</sup>/h og mengde tilsatt lystgass på 0,35 l/min. I grafen er vindhastighet vist per sekund mens vindretning kun hvert minutt for å få en lesbar graf.



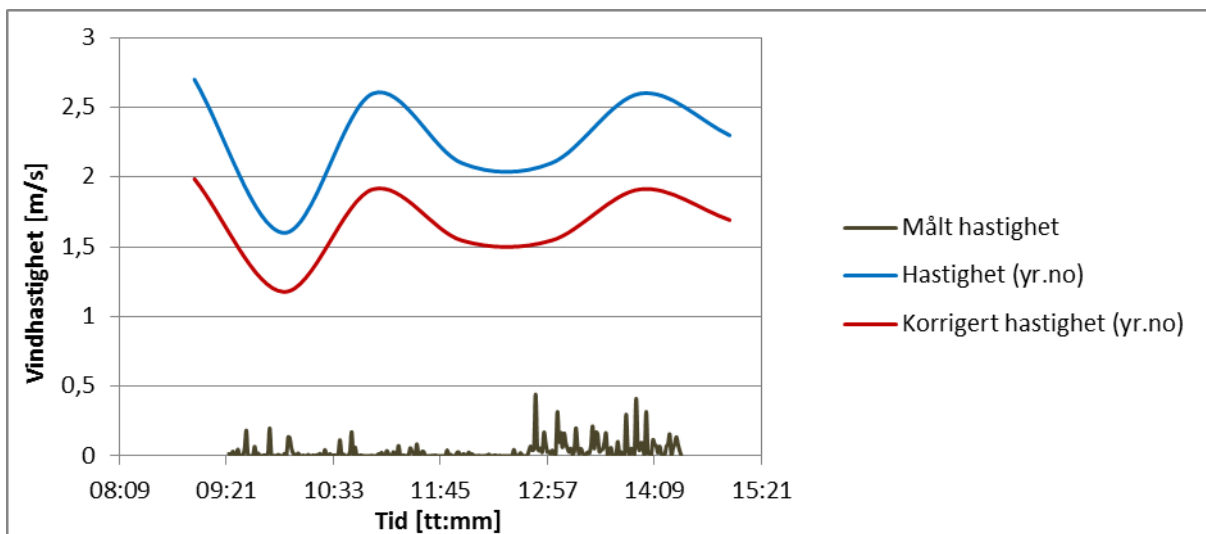
**Figur 34: Plassering av vindmåler på NTNU Varmeteknisk.**



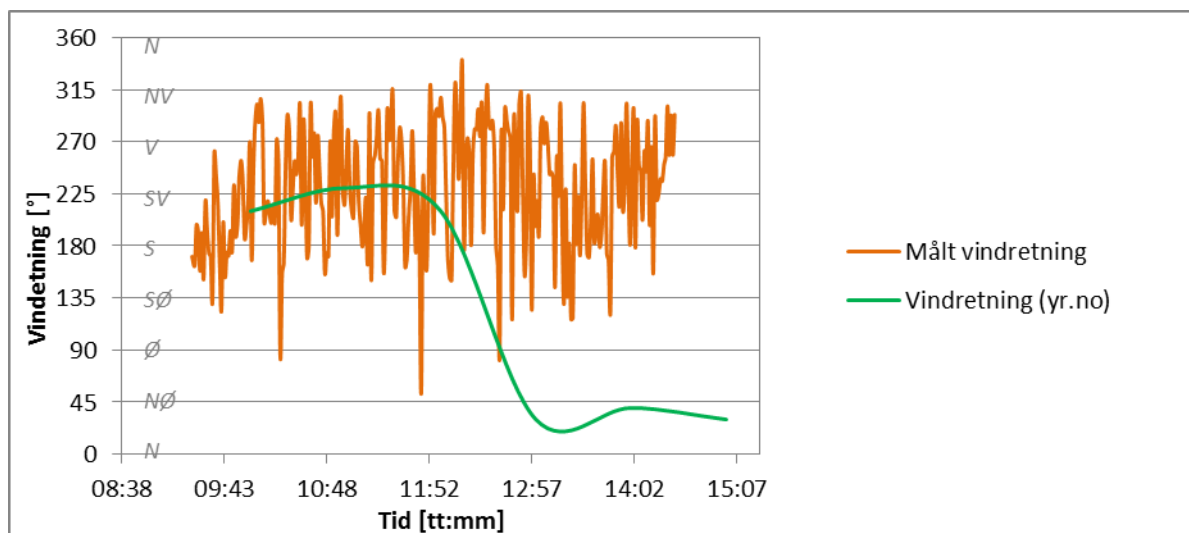
Figur 35: Vindforhold for NTNU Varmeteknisk på dag 1.



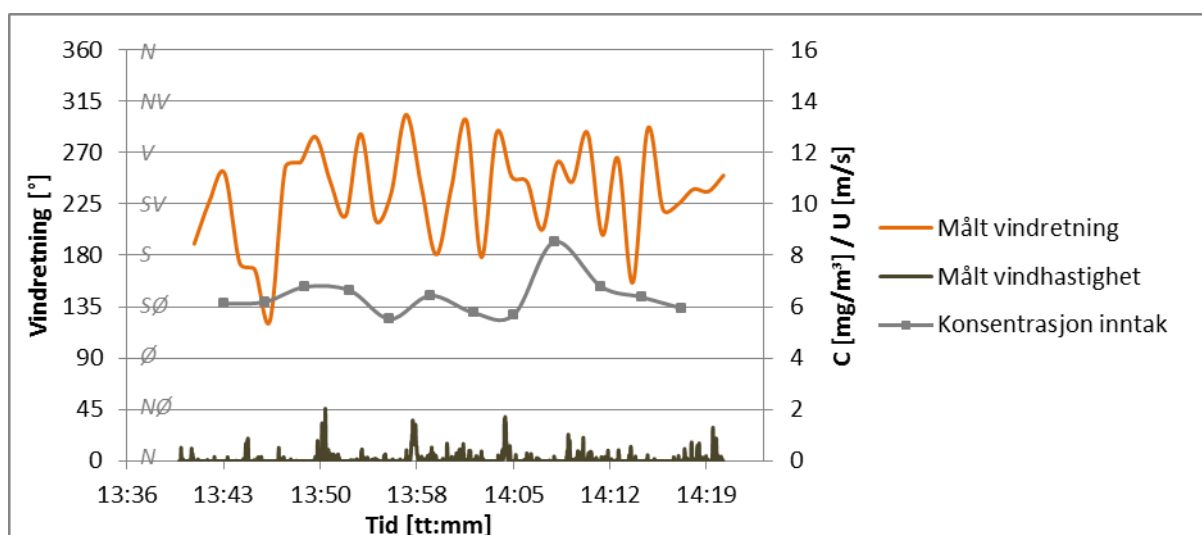
Figur 36: Vindforhold for NTNU Varmeteknisk på dag 2.



Figur 37: Vindhastighet for NTNU Varmeteknisk på dag 4.



Figur 38: Vindretning for NTNU Varmeteknisk på dag 4.



Figur 39: Vind og konsentrasjon i inntak på dag 4 for gassmengde 0,35 l/min og luftmengder 500 m<sup>3</sup>/h.

### Hastighetsrater

Hastighetsrater for de kartlagte tilfellene på NTNU Varmeteknisk er vist i tabell 31. Her er hastighet over avkast beregnet som luftmengder over areal, uten å ta hensyn til hastighetsprofilen.

Tabell 31: Hastighetsrater på NTNU Varmeteknisk.

Dag	$U$ [m/s]	Små luftmengder		Store luftmengder	
		$V$ [m/s]	$M$ [-]	$V$ [m/s]	$M$ [-]
1	1,9	0,9	0,5	1,7	0,9
2	1,9	0,9	0,5	1,7	0,9
4	1,2	0,9	0,8	-	-
4	1,6	0,9	0,6	1,7	1,1

### *Røykempull*

En røykempull var plassert like ved siden av avkast og ble brukt mellom kl. 1000 og kl. 1003 på dag 4. Strømningsforholdet er vist i figur 40.



**Figur 40: Bilder av strømning fra røykempull på NTNU Varmeteknisk.**

## Vedlegg 5.2 Resultater NTNU Verkstedteknisk

### Datoer for målinger

Dag 1: 10.04.13

Dag 2: 11.04.13

Dag 3: 15.04.13

### Konsentrasjoner

Basekonsentrasjonen i avkast og inntak viser konsentrasjonen av lystgass i luften, uten at lystgass har blitt tilsatt i ventilasjonsanlegget. Basetilfellet ble målt på dag 1 og er vist i tabell 32. Lystgasskonsentrasjoner ved tilsetning av gass i avkastkanalen er vist i tabell 33 og tabell 34 for henholdsvis små og store luftmengder. Tabellene viser kun måleresultatene for stabile perioder av luftmengder og tilsatt sporgass.

**Tabell 32: Basekonsentrasjon målt på dag 1 for NTNU Verkstedteknisk.**

Avkast		Luftinntak	
Tid [tt:mm:ss]	C <sub>a</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Tid [tt:mm:ss]	C <sub>t</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]
10:34:36	1,103	10:36:01	1,023
10:37:56	1,059	10:38:56	0,969
10:40:51	1,015	10:41:51	0,905
10:43:46	0,972	10:44:46	0,912
10:47:11	0,990	10:48:11	0,890
10:50:06	0,962	10:51:06	0,895
10:53:01	0,977	10:54:01	0,840
10:56:16	0,921	10:57:16	0,853
10:59:11	0,918	11:00:11	0,848
11:02:06	0,918	11:03:06	0,845
11:05:01	0,892	11:06:11	0,877
11:08:06	0,928	11:09:06	0,830
11:11:01	0,887	11:12:01	0,836
11:13:56	0,893	11:14:56	0,820
11:17:21	0,866	11:18:21	0,873
11:20:16	0,952	11:21:16	0,846
Snitt	0,953	Snitt	0,879

**Tabell 33: Lystgasskonsentrasjoner på NTNU Verkstedteknisk for små luftmengder.**

Dag 1				Dag 2				Dag 3			
Avkast		Luftinntak		Avkast		Luftinntak		Avkast		Luftinntak	
Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>	Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>	Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>
[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]
12:56:26	57,451	12:57:26	1,615	14:53:55	83,345	14:54:55	2,374	11:16:34	64,102	11:14:34	1,651
12:59:26	56,132	13:00:26	1,641	14:56:55	83,587	14:58:05	2,374	11:19:34	64,628	11:17:34	1,766
13:02:26	57,376	13:03:26	1,684	15:00:05	86,339	15:01:05	2,195	11:23:04	61,978	11:20:34	1,913
13:05:26	58,683	13:06:36	1,701	15:03:05	83,147	15:04:05	2,252	11:26:04	64,664	11:24:04	2,764
13:08:36	58,565	13:09:36	1,740	15:06:05	81,125	15:07:05	2,016	11:29:04	62,043	11:27:04	1,830
13:11:36	61,976	13:12:36	1,828	15:09:40	82,866	15:10:40	2,257	11:32:04	62,364	11:30:04	1,778
13:14:36	57,145	13:16:11	1,823	15:12:40	86,437	15:13:40	2,583	11:35:24	68,033	11:33:24	1,882
13:18:11	56,679	13:19:11	1,922	15:15:40	84,826	15:16:40	2,221	11:38:24	64,983	11:36:24	1,824
13:21:11	57,222	13:22:11	1,952	15:19:00	80,379	15:20:00	2,209	11:41:24	67,768	11:39:24	1,805
13:24:11	64,292	13:25:11	1,825	15:22:00	84,258	15:23:00	2,097	11:44:34	68,517	11:42:24	2,005
13:27:31	62,442	13:28:31	1,814	15:25:00	82,958	15:26:00	2,035	11:47:34	69,066	11:45:34	2,129
13:30:31	62,925	13:31:31	1,825	15:28:10	80,440	15:29:10	2,070	11:50:34	66,859	11:48:34	2,150
13:33:31	63,673	13:34:31	1,824	15:31:10	85,535	15:32:10	2,261	11:54:09	68,206	11:51:34	2,146
13:36:41	64,431	13:37:41	1,877	15:34:10	79,243	15:35:10	2,250	11:57:09	66,785	11:55:09	2,089
13:39:41	66,382	13:40:41	2,259	15:37:40	81,688	15:38:40	2,216	12:00:09	66,658	11:58:09	2,216
-	-	-	-	15:40:40	80,879	15:41:40	2,632	12:03:29	69,170	12:01:09	2,883
-	-	-	-	15:43:40	86,098	15:44:40	2,361	12:06:29	64,387	12:04:29	2,553

**Tabell 34: Lystgasskonsentrasjoner på NTNU Verkstedteknisk for store luftmengder.**

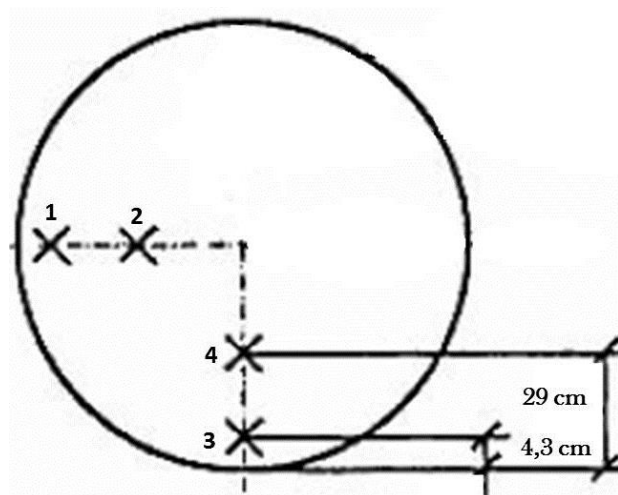
Dag 1				Dag 2				Dag 3			
Avkast		Luftinntak		Avkast		Luftinntak		Avkast		Luftinntak	
Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>	Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>	Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>
[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]
11:38:31	69,944	11:39:31	2,201	13:51:55	70,056	13:52:55	2,202	12:15:39	69,407	12:13:39	2,509
11:41:31	69,293	11:42:31	2,225	13:54:55	65,554	13:55:55	2,273	12:18:39	74,228	12:16:39	2,459
11:44:31	73,496	11:45:31	2,287	13:58:05	67,902	13:59:05	2,865	12:21:39	67,295	12:19:39	2,511
11:48:06	68,669	11:49:06	2,277	14:01:05	64,857	14:02:05	2,425	12:25:14	67,005	12:23:14	2,286
11:51:06	68,192	11:52:06	2,316	14:04:05	65,936	14:05:05	2,707	12:28:14	65,651	12:26:14	2,497
11:54:06	72,061	11:55:06	2,554	14:07:05	66,169	14:08:35	2,933	12:31:14	69,287	12:29:14	2,425
11:57:26	74,157	11:58:26	2,196	14:10:35	70,314	14:11:35	2,475	12:34:34	67,302	12:32:14	2,778
-	-	-	-	14:13:35	69,982	14:14:35	2,533	12:37:34	73,545	12:35:34	2,519
-	-	-	-	14:16:35	69,738	14:17:55	2,482	12:40:34	66,561	12:38:34	2,636
12:06:36	69,457	12:07:36	2,251	14:19:55	68,055	14:20:55	2,567	12:43:44	66,720	12:41:34	2,507
12:09:36	74,544	12:10:36	2,159	14:22:55	72,493	14:23:55	3,097	12:46:44	64,992	12:44:44	2,845
12:12:36	69,601	12:13:36	2,004	14:25:55	68,821	14:26:55	2,582	-	-	-	-
12:16:06	69,499	12:17:06	2,122	14:29:05	65,697	14:30:05	2,148	-	-	-	-
12:19:06	70,360	12:20:06	2,186	14:32:05	69,821	14:33:05	2,841	-	-	-	-
12:22:06	71,354	12:23:06	3,080	14:35:05	66,010	14:36:05	2,767	-	-	-	-
12:25:06	73,208	12:26:26	2,134	14:38:35	65,549	14:39:35	4,463	-	-	-	-
-	-	-	-	14:41:35	67,883	14:42:35	2,470	-	-	-	-
-	-	-	-	14:44:35	64,758	14:45:35	2,557	-	-	-	-

## Luftmengder

Luftmengdene er beregnet etter metoder presentert i vedlegg 3.3.

### Hastighetsmålinger

Det var ikke muligheter for å utføre hastighetsmålinger over hele tverrsnittet til avkastkanalen på NTNU Verkstedteknisk. Målingene ble utført i punktene vist i figur 41 og hastighetsprofilen er antatt å være symmetrisk om senterpunktet. En oversikt over målte hastigheter og beregnede luftmengder for alle dager er vist i tabell 35.



Figur 41: Målepunkter på NTNU Verkstedteknisk.

Tabell 35: Hastighetsberegning av luftmengder for NTNU Verkstedteknisk.

Målepunkt	Dag 1		Dag 2		Dag 3	
	$V_{q,lav}$ [m/s]	$V_{q,høy}$ [m/s]	$V_{q,lav}$ [m/s]	$V_{q,høy}$ [m/s]	$V_{q,lav}$ [m/s]	$V_{q,høy}$ [m/s]
1	4,6	6,7	4,5	6,6	4,6	6,1
2	5,4	7,3	5,5	7,2	5,6	7,1
3	4,0	4,8	3,7	4,7	3,5	4,5
4	5,3	5,4	4,9	5,4	4,6	5,5
Snitthastighet, $\bar{U}$ [m/s]	4,8	6,0	4,6	6,0	4,6	5,8
Korreksjonsfaktor, $\bar{k}_2$ [-]	0,98	0,98	1,0	1,0	0,98	0,98
Korrigert hastighet, $\bar{U}_{korr}$ [m/s]	4,7	5,9	4,5	5,8	4,5	5,7
Tverrsnittsareal, $A$ [m <sup>2</sup> ]	0,79	0,79	0,8	0,8	0,79	0,79
Luftmengder, $q$ [m <sup>3</sup> /h]	13332	16755	12861	16506	12630	1601

### Sporgassmålinger

Det er benyttet rotameter Vögtlin FLV-CSSS-SM som er kalibrert for luft under målingene. For å finne mengde lystgass som er tilført er det benyttet et konverteringsdiagram for lystgass (Sharova, 2013). Tabell 36 viser beregning av luftmengder ved sporgassmålinger ved NTNU Verkstedteknisk. Konsentrasjonene som er oppgitt er gjennomsnittlige måleverdier for punktet i avkastkanalen.



**Tabell 36: Beregning av luftmengder med sporgassmålinger på NTNU Verkstedteknisk.**

Tilfelle	Dag 1		Dag 2		Dag 3	
	$q_{lav}$	$q_{høy}$	$q_{lav}$	$q_{høy}$	$q_{lav}$	$q_{høy}$
Tilsatt lystgass, $\dot{m}$ [l/min]	5,48	8,15	8,15	8,15	6,16	8,15
Konsentrasjon avkast, $C_a$ [ppm]	33,5	39,6	45,2	37,6	36,6	38,0
Basekonsentrasjon avkast, $C_{ba}$ [ppm]	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Luftmengder, $q$ [m <sup>3</sup> /h]	9951	12500	10948	13171	10245	13052

### Oppsummering

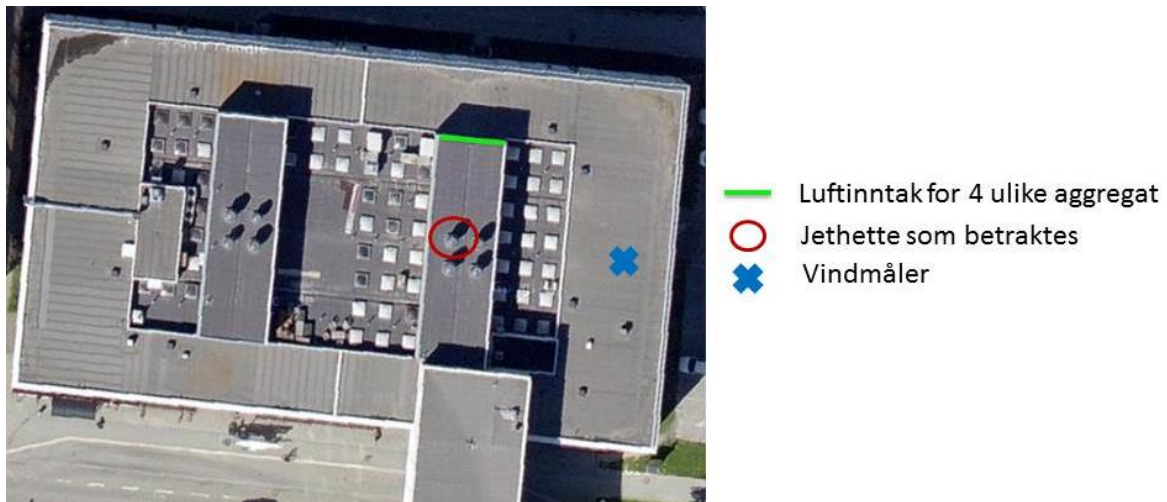
Det er relativt store avvik mellom hastighets- og sporgassmålingene. Siden luftmengdeberegninger ved Charlottenlund ungdomsskole ga dårlig samsvar med de mer pålitelige trykkmålingene, antas det at metoden generelt gir lite pålitelige resultater når det benyttes et rotameter som er kalibrert for en annen gass. Det er derfor valgt å vektlegge hastighetsmålingene for å finne representative luftmengder, avrundet til nærmeste 1000 m<sup>3</sup>/h. Dette gir luftmengder på 12 000 og 16 000 m<sup>3</sup>/h på NTNU Verkstedteknisk for alle dagene hvor det har blitt utført målinger.

**Tabell 37: Oppsummering av luftmengdemålinger for NTNU Verkstedteknisk.**

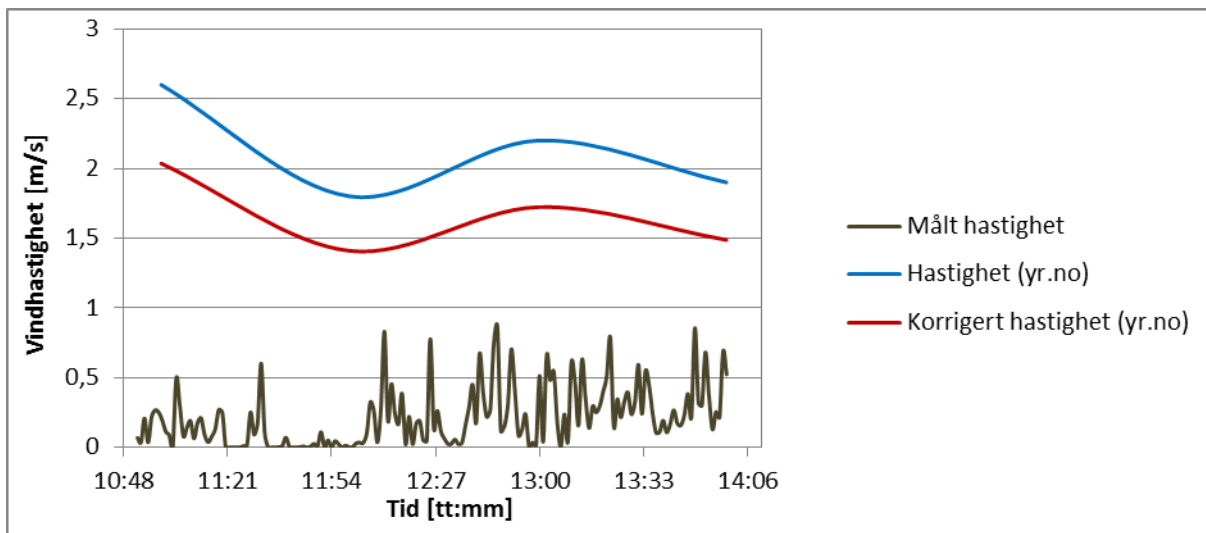
	Dag 1		Dag 2		Dag 3	
	$q_{lav}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{høy}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{lav}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{høy}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{lav}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{høy}$ [m <sup>3</sup> /h]
Hastighetsmålinger	13332	16755	12861	16507	12630	16014
Sporgassmålinger	9951	12500	10948	13171	10245	13052
Representative luftmengder	12000	16000	12000	16000	12000	16000

### Vindforhold

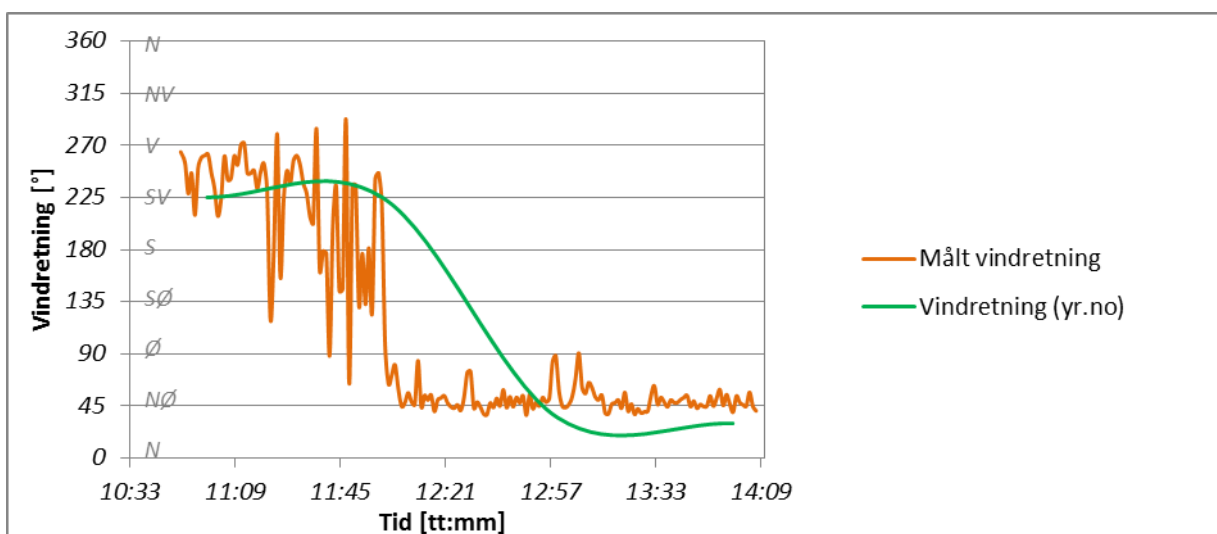
Vindforholdene har blitt kartlagt ved å benytte lokale målinger og data hentet i etterkant av målingene for målestasjonen på Voll fra Meteorologisk Institutt (2013b). Sistnevnte oppgir vindforhold per time og har blitt korrigert for lokale vindforhold ved å benytte korreksjonsmetoden presentert i ASHRAE Handbook – Fundamentals (ASHRAE, c2009, kap. 24) som er presentert i vedlegg 3.2. Det ble benyttet en vindmåler for å kartlegge lokale vindforhold, med plassering som vist i figur 42. Figur 49 viser korrelasjonen mellom konsentrasjon i luftinntak og vindforhold den andre dagen ved store luftmengder. I figuren er vindhastighet og – retning vist per 10. sekund for å få en lesbar graf.



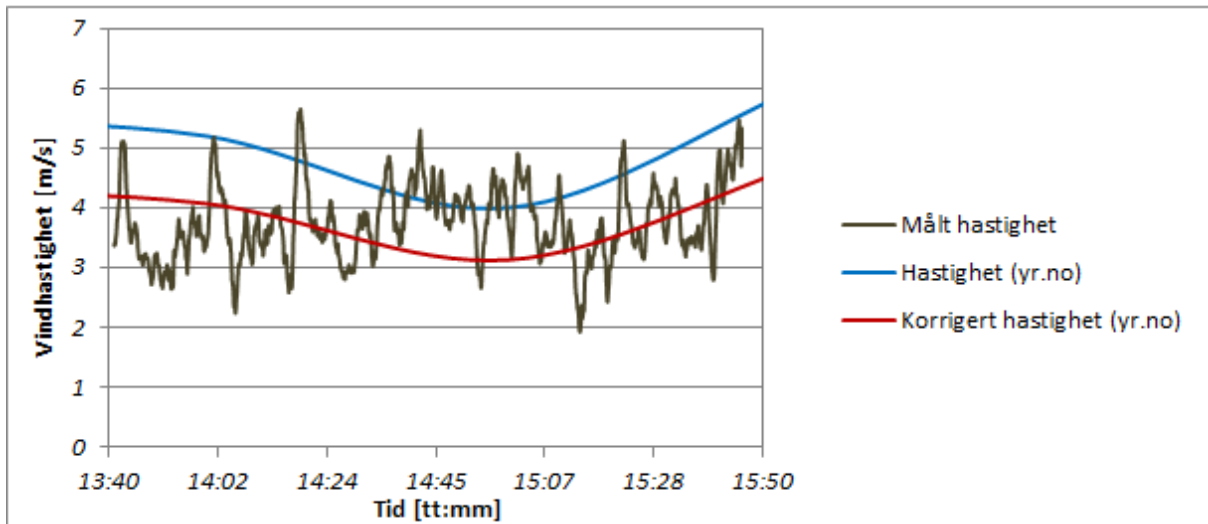
**Figur 42: Plassering av vindmåler på NTNU Verkstedteknisk.**



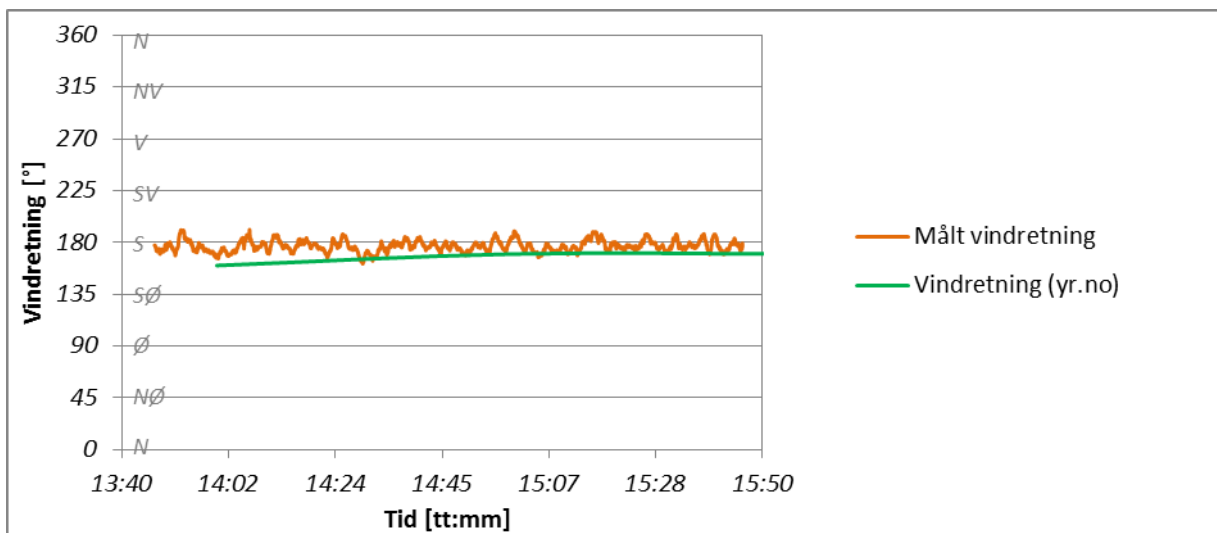
**Figur 43: Vindhastighet for NTNU Verkstedteknisk på dag 1.**



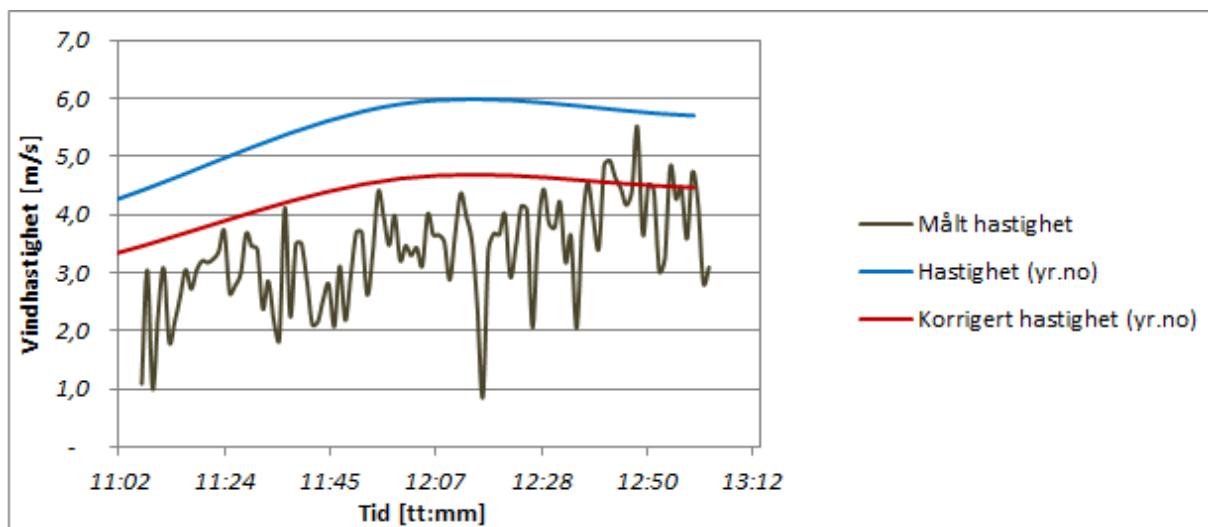
**Figur 44: Vindretning for NTNU Verkstedteknisk på dag 1.**



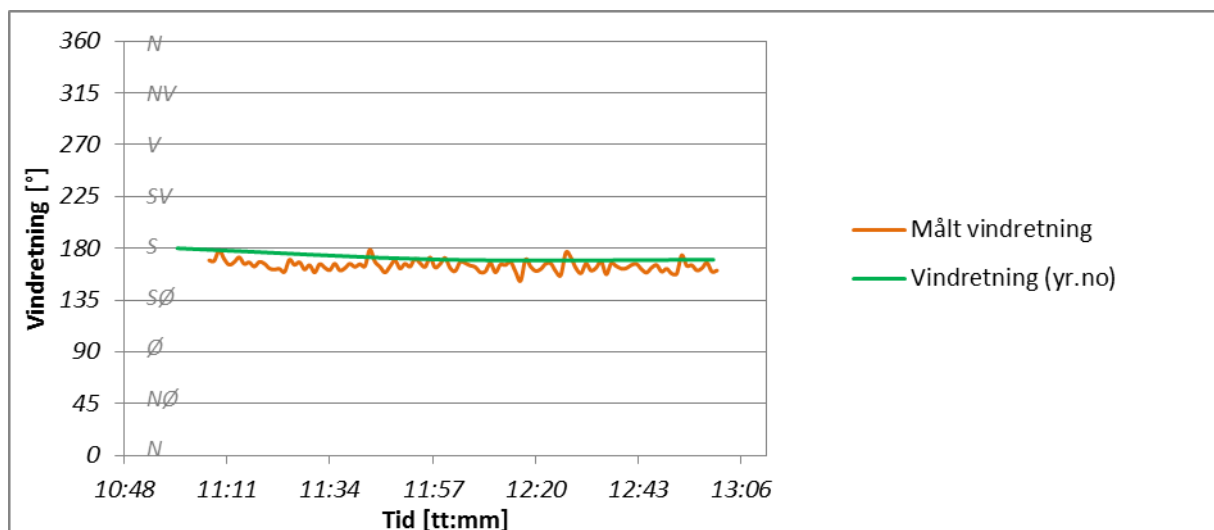
Figur 45: Vindhastighet for NTNU Verkstedteknisk på dag 2.



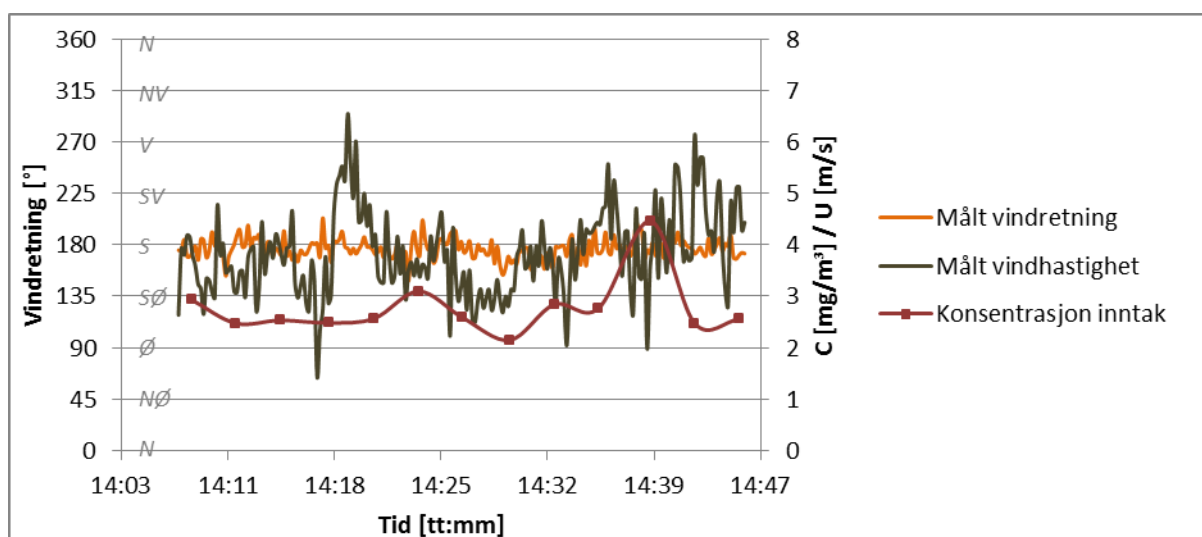
Figur 46: Vindretning for NTNU Verkstedteknisk på dag 2.



Figur 47: Vindhastighet for NTNU Verkstedteknisk på dag 3.



Figur 48: Vindretning for NTNU Verkstedteknisk på dag 3.



Figur 49: Målte vindforhold og konsentrasjon i luftinntak på dag 2 for store luftmengder.

### Hastighetsrater

Hastighetsrater for de kartlagte tilfellene på NTNU Verkstedteknisk er vist i tabell 38. Her er hastighet over avkast beregnet som luftmengder over areal, uten å ta hensyn til hastighetsprofilen.

Tabell 38: Hastighetsrater for NTNU Verkstedteknisk.

Dag	$U$ [m/s]	Små luftmengder			Store luftmengder	
		$V$ [m/s]	$M$ [-]	$V$ [m/s]	$M$ [-]	
1	1,7	-	-	5,7	3,4	
1	1,6	4,2	2,6	5,7	3,6	
2	3,8	4,2	1,1	5,7	1,5	
3	4,2	4,2	1,0	5,7	1,4	

### *Røykappull*

En røykappull var plassert ved siden av jethetten på taknivå og ble brukt mellom kl. 1340 og kl. 1343 på dag 2. Strømningsforholdet er vist i figur 50.



**Figur 50: Bilder av strømming fra røykappull på NTNU Verkstedteknisk.**

### Vedlegg 5.3 Resultater Charlottenlund ungdomsskole

#### *Datoer for målinger*

Dag 1: 17.04.13

Dag 2: 18.04.13

Dag 3: 19.04.13

#### *Konsentrasjoner*

Basekonsentrasjonen i avkast og inntak viser konsentrasjonen av lystgass i luften, uten at lystgass har blitt tilsatt i ventilasjonsanlegget. Basetilfellet ble målt på dag 1 og er vist i tabell 39. Lystgasskonsentrasjoner hvor lystgass har blitt tilsatt i avkastkanalen er vist i tabell 40 og tabell 41 for henholdsvis små og store luftmengder. Tabellene viser kun måleresultatene for stabile perioder av luftmengder og tilsatt sporgass.

**Tabell 39: Basekonsentrasjon målt på dag 1 for Charlottenlund ungdomsskole.**

Avkast		Luftinntak	
Tid [tt:mm:ss]	C <sub>a</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Tid [tt:mm:ss]	C <sub>t</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]
13:55:19	0,926	13:56:19	0,875
13:58:19	0,925	13:59:29	0,833
14:01:29	0,857	14:02:29	0,836
14:04:29	0,860	14:05:29	0,773
14:07:29	0,840	14:08:59	0,800
Snitt	0,882	Snitt	0,824

**Tabell 40: Lystgasskonsentrasjoner på Charlottenlund ungdomsskole for små luftmengder.**

Dag 1				Dag 2				Dag 3			
Avkast		Luftinntak		Avkast		Luftinntak		Avkast		Luftinntak	
Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>	Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>	Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>
[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]
15:44:14	57,850	15:45:14	0,959	07:32:43	49,566	07:33:43	1,012	07:26:42	70,022	07:27:52	1,045
15:47:14	58,047	15:48:14	0,944	07:35:43	43,778	07:37:13	0,976	07:29:52	58,616	07:30:52	1,071
15:50:34	55,767	15:51:34	0,978	07:39:13	45,713	07:40:13	0,972	07:32:52	71,656	07:33:52	1,062
15:53:34	51,769	15:54:34	0,997	07:42:13	43,254	07:43:13	0,992	07:35:52	63,371	07:36:52	1,078
15:56:34	57,870	15:57:34	0,925	07:45:13	46,489	07:46:13	1,125	07:39:22	60,423	07:40:22	1,016
15:59:44	52,605	16:00:44	0,926	07:48:33	46,091	07:49:33	1,075	07:42:22	72,396	07:43:22	1,052
16:02:44	44,088	16:03:44	0,928	07:51:33	51,087	07:52:33	0,942	07:45:22	73,592	07:46:22	1,058
-	-	-	-	07:54:33	42,058	07:55:33	0,987	07:48:42	65,967	07:49:42	1,055
-	-	-	-	07:57:43	54,868	07:58:43	1,103	07:51:42	61,938	07:52:42	0,994
-	-	-	-	08:00:43	50,050	08:01:43	1,044	07:54:42	65,498	07:55:42	1,040
-	-	-	-	08:03:43	54,605	08:04:43	1,008	07:57:57	71,828	07:58:57	1,046
-	-	-	-	-	-	-	-	08:00:57	66,596	08:01:57	1,060
-	-	-	-	-	-	-	-	08:03:57	60,307	08:04:57	1,004
-	-	-	-	-	-	-	-	08:06:57	76,026	08:08:27	1,085
-	-	-	-	-	-	-	-	08:10:27	58,382	08:11:27	1,010

**Tabell 41: Lystgasskonsentrasjoner på Charlottenlund ungdomsskole for store luftmengder.**

Dag 1				Dag 2				Dag 3			
Avkast		Luftinntak		Avkast		Luftinntak		Avkast		Luftinntak	
Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>	Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>	Tid	C <sub>a</sub>	Tid	C <sub>t</sub>
[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[tt:mm:ss]	[mg/m <sup>3</sup> ]
15:00:29	78,343	15:01:29	0,945	12:06:13	49,287	12:07:43	0,891	09:09:37	51,515	09:10:37	1,015
15:03:34	76,232	15:04:34	1,007	12:09:43	58,300	12:10:43	0,893	09:12:37	54,201	09:13:37	1,042
15:06:34	68,637	15:07:34	0,961	12:12:43	47,673	12:13:43	0,906	09:15:37	57,216	09:16:37	0,974
15:10:09	70,825	15:11:09	1,027	12:15:43	48,558	12:17:03	0,886	09:18:57	56,160	09:19:57	1,125
15:13:09	79,068	15:14:09	1,028	12:19:03	46,925	12:20:03	0,915	09:21:57	45,154	09:22:57	1,043
15:16:09	70,643	15:17:09	1,051	12:22:03	46,206	12:23:03	0,938	09:24:57	47,630	09:25:57	1,105
15:19:29	69,481	15:20:29	1,054	12:25:03	53,406	12:26:03	0,943	-	-	-	-
15:22:29	65,914	15:23:29	0,982	12:28:13	53,121	12:29:13	0,869	-	-	-	-
-	-	-	-	12:31:13	61,935	12:32:13	0,921	-	-	-	-
-	-	-	-	12:34:13	59,600	12:35:13	0,982	-	-	-	-
-	-	-	-	12:37:48	51,742	12:38:48	0,950	-	-	-	-
-	-	-	-	12:40:48	53,001	12:41:48	1,008	-	-	-	-



## Luftmengder

Luftmengdene er beregnet etter metoder presentert i vedlegg 3.3.

### Trykkmålinger

Trykkmålingene er utført over avtrekksviften på eksisterende anlegg. En oversikt over målte differensialtrykk og beregnede luftmengder, avrundet til nærmeste  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ , for alle dager er vist i tabell 42.

**Tabell 42: Beregning av luftmengder ved trykkmåling på Charlottenlund ungdomsskole.**

Tilfelle	Dag 1		Dag 2		Dag 3	
	$q_{lav}$	$q_{høy}$	$q_{lav}$	$q_{høy}$	$q_{lav}$	$q_{høy}$
Tid start:	15:45	15:00	07:32	12:05	07:25	09:09
Tid stopp:	16:05	15:23	08:10	12:42	08:10	09:26
Trykkmåling nr.:	$q_{lav}$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	$q_{høy}$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	$q_{lav}$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	$q_{høy}$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	$q_{lav}$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	$q_{høy}$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
1	185	285	191	283	177	314
2	174	263	181	305	173	339
3	163	252	189	333	172	337
4	-	245	185	329	171	-
5	-	-	185	325	173	-
Snitt trykk, $P$ [Pa]	174	261	186	315	173	330
Snitt luftmengder, $q$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	12200	15100	12600	16900	12200	16700

### Sporgassmålinger

Det er benyttet rotameter Vögtlin FLV-CSSS-SM som er kalibrert for luft under målingene. For å finne mengde lystgass som er tilført er det benyttet et konverteringsdiagram for lystgass (Sharova, 2013). Tabell 43 viser beregning av luftmengder ved sporgassmålinger på Charlottenlund ungdomsskole. Konsentrasjonene som er oppgitt er gjennomsnittlige måleverdier for punktet i avkastkanalen.

**Tabell 43: Beregning av luftmengder med sporgassmålinger på NTNU Verkstedteknisk.**

Tilfelle	Dag 1		Dag 2		Dag 3	
	$q_{lav}$	$q_{høy}$	$q_{lav}$	$q_{høy}$	$q_{lav}$	$q_{høy}$
Tilsatt lystgass, $\dot{m}$ [l/min]	6,81	9,51	5,48	8,15	6,81	8,15
Konsentrasjon avkast, $C_a$ [ppm]	30,0	40,2	26,6	29,2	36,9	28,9
Basekonsentrasjon avkast, $C_{ba}$ [ppm]	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
Luftmengder, $q$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	13840	14369	12581	17057	11214	17224

### Oppsummering

Det er relativt store avvik mellom differensialtrykk- og sporgassmålingene, hvorav trykkmålingene antas å være av høyest nøyaktighet siden det ikke er avdekket vesentlige feilkilder ved målemetoden. Det er derfor valgt å benytte hastighetsberegningene ut ifra målinger av differensialtrykk til å sette representative luftmengder, men avrundet til nærmeste  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dette gir noe varierende representative luftmengder for de ulike dagene, som vist i tabell 44.

**Tabell 44: Oppsummering av luftmengdemålinger for Charlottenlund ungdomsskole.**

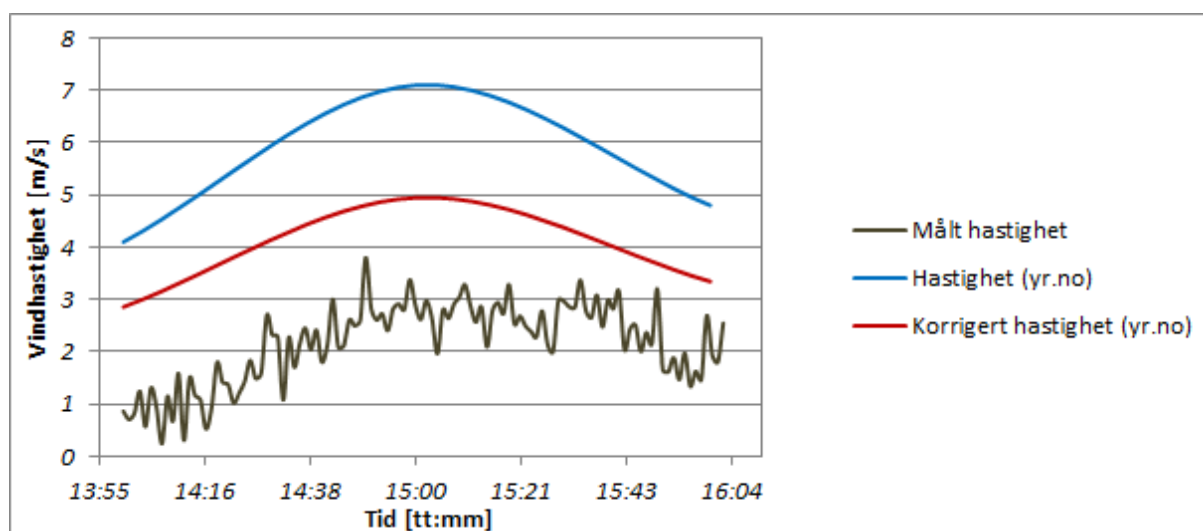
	Dag 1		Dag 2		Dag 3	
	$q_{lav}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{høy}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{lav}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{høy}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{lav}$ [m <sup>3</sup> /h]	$q_{høy}$ [m <sup>3</sup> /h]
Differensialtrykkmålinger	12200	15100	12600	16900	12200	16700
Sporgassmålinger	13840	14369	12581	17057	11214	17224
Representative luftmengder	12000	15000	13000	17000	12000	17000

### Vindforhold

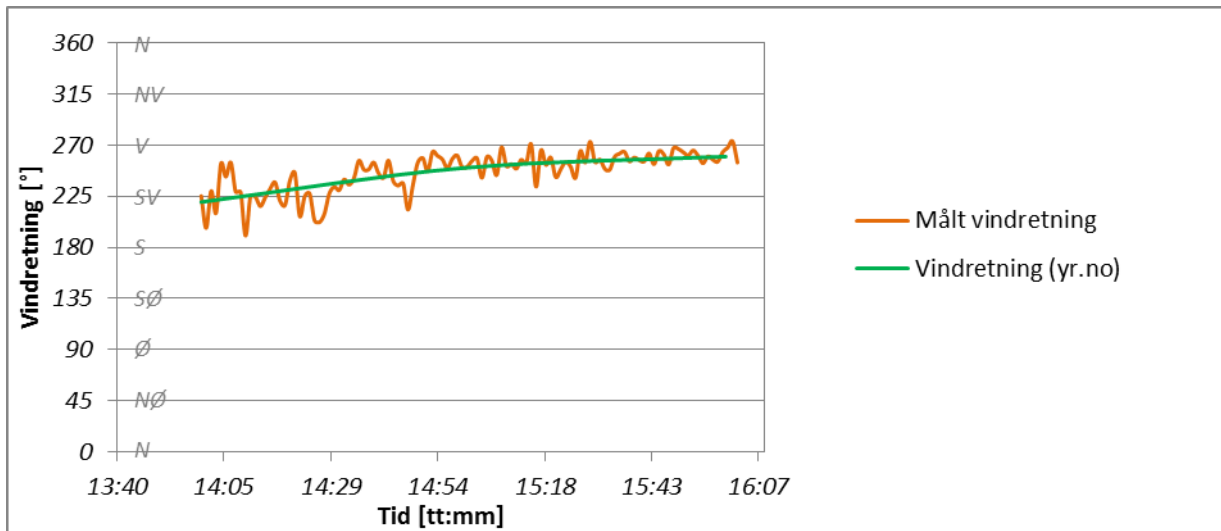
Vindforholdene har blitt kartlagt ved å benytte lokale målinger og data hentet i etterkant av målingene for målestasjonen på Voll fra meteorologisk institutt (Meteorologisk Institutt, 2013b). Sistnevnte oppgir vindforhold per time og har blitt korrigert for lokale vindforhold ved å benytte korreksjonsmetoden presentert i ASHRAE Handbook – Fundamentals (ASHRAE, c2009, kap. 24) som er oppsummert i vedlegg 3.2. En vindmåler ble benyttet for å kartlegge lokale vindforhold, hvor vindmåleren var plassert som vist i figur 51. I figur 52 til figur 57 er vindforhold for dag 1 til 3 på Charlottenlund ungdomsskole gitt. Figur 58 viser korrelasjonen mellom konsentrasjon i luftinntak og vindforhold den tredje dagen ved store luftmengder. I grafen er vindhastighet og – retning vist per 10. sekund for å få en lesbar graf.



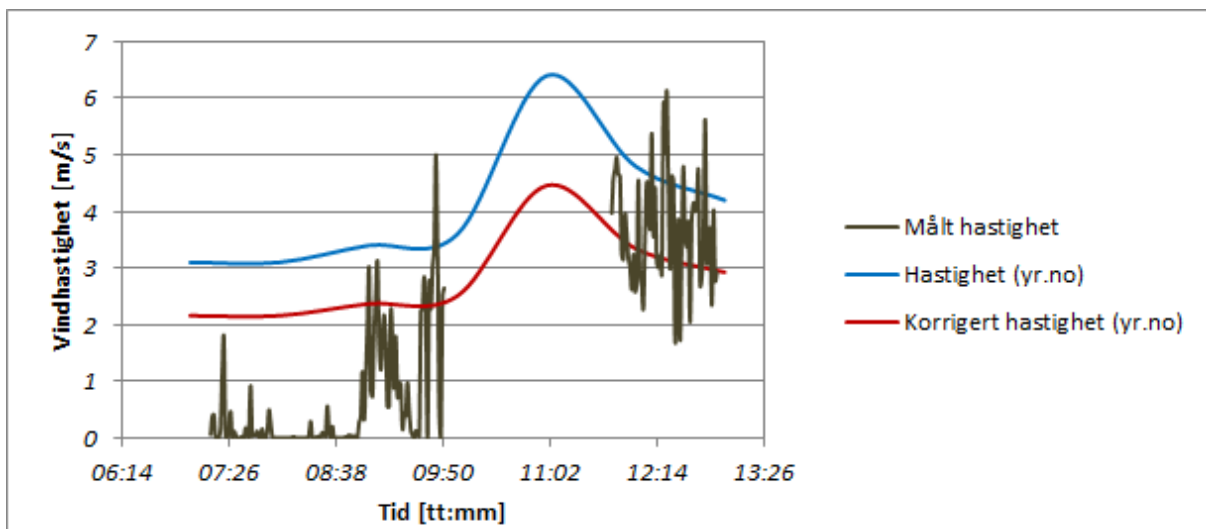
**Figur 51: Plassering av vindmåler på Charlottenlund ungdomsskole.**



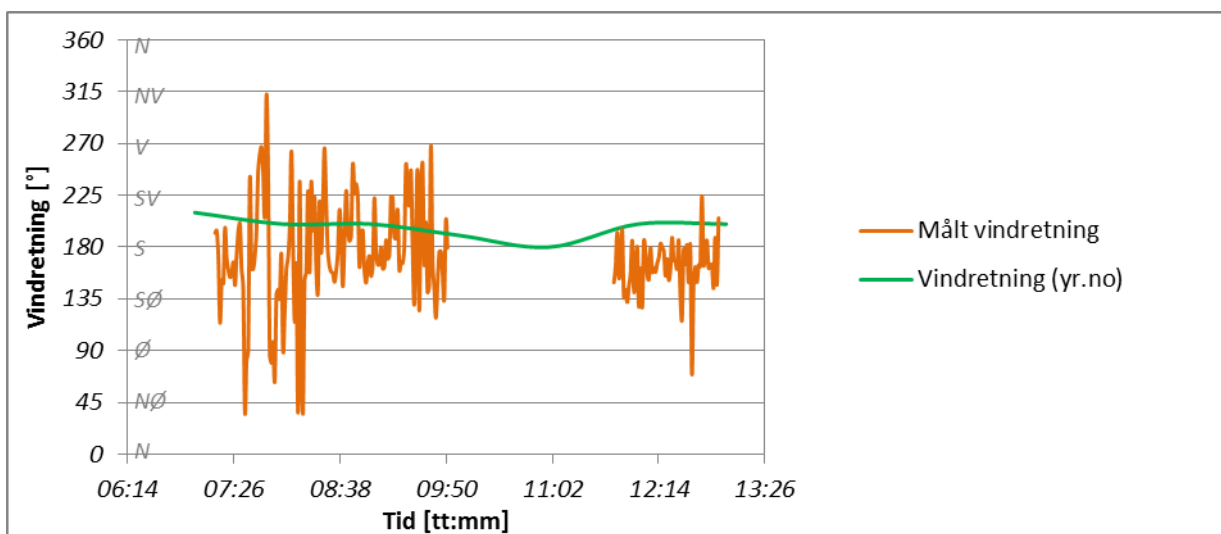
**Figur 52: Vindhastighet for Charlottenlund ungdomsskole på dag 1.**



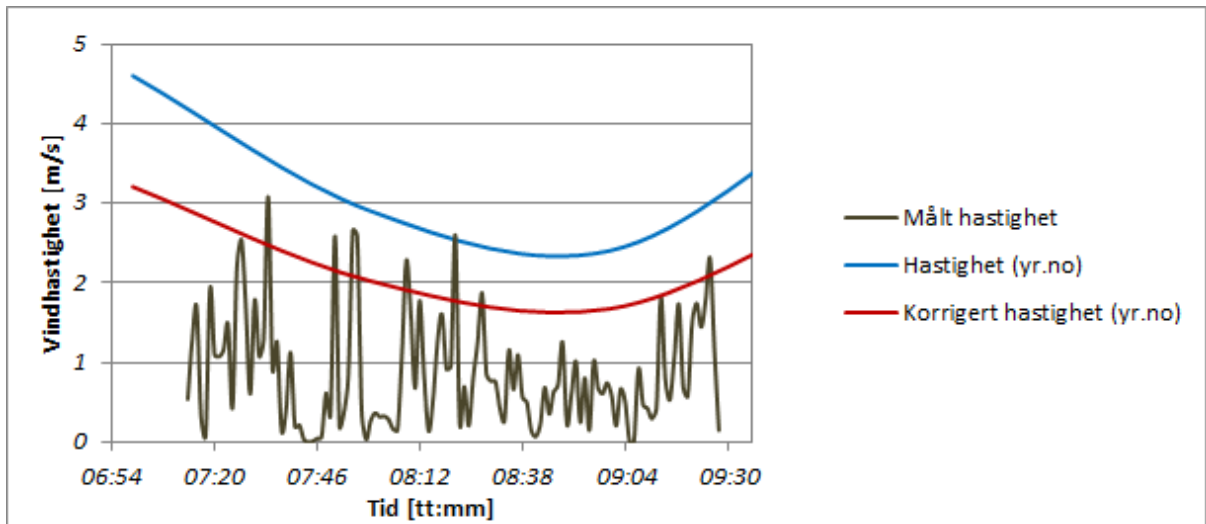
Figur 53: Vindretning for Charlottenlund ungdomsskole på dag 1.



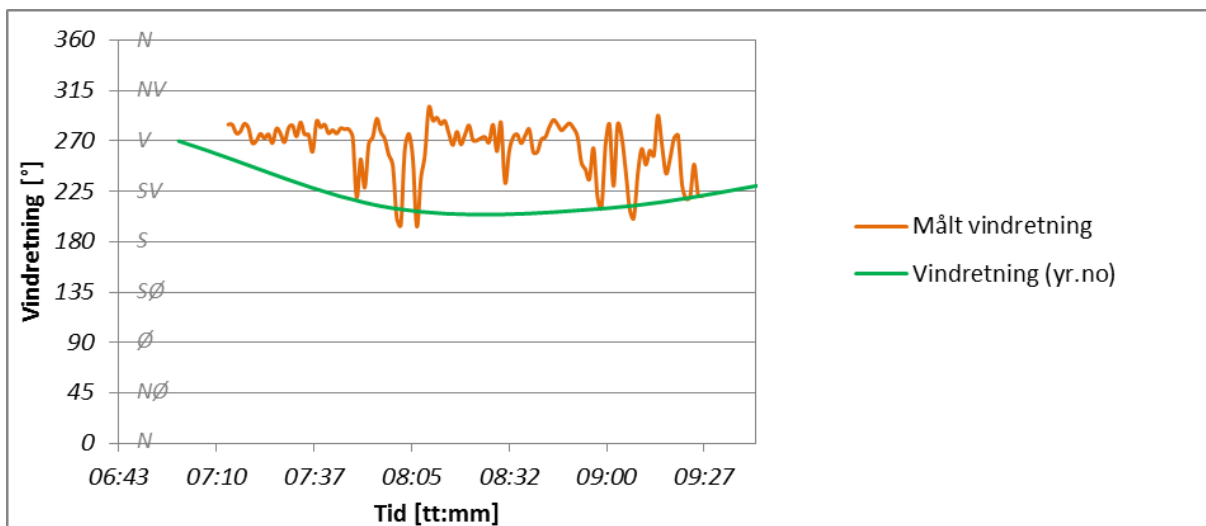
Figur 54: Vindhastighet for Charlottenlund ungdomsskole på dag 2.



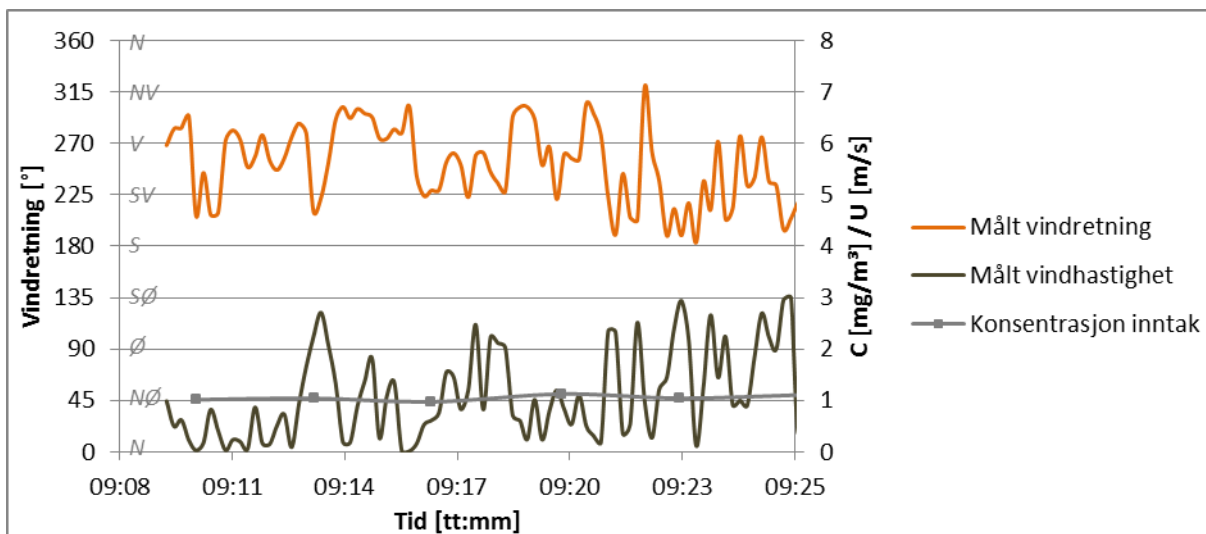
Figur 55: Vindretning for Charlottenlund ungdomsskole på dag 2.



Figur 56: Vindhastighet for Charlottenlund ungdomsskole på dag 3.



Figur 57: Vindretning for Charlottenlund ungdomsskole på dag 3.



Figur 58: Vindforhold og konsentrasjon i luftinntak på dag 3 for store luftmengder.

### Hastighetsrater

Hastighetsrater for de kartlagte tilfellene på Charlottenlund ungdomsskole er vist i tabell 45. Her er hastighet over avkast beregnet som luftmengder over areal, uten å ta hensyn til hastighetsprofilen.

**Tabell 45: Hastighetsrater for Charlottenlund ungdomsskole.**

Dag	$U$ [m/s]	Små luftmengder		Store luftmengder	
		$V$ [m/s]	$M$ [–]	$V$ [m/s]	$M$ [–]
1	4,1	5,9	1,4	7,4	1,8
2	2,5	6,4	2,6	8,4	3,4
3	2,3	5,9	2,6	8,4	3,7

### Røykempull

Det var ikke muligheter for å teste en røykempull på tak av teknisk rom. Det ble derfor plassert en ampull på taket ved fasaden mot nord og ble brukt mellom kl. 0741 og kl. 0744 på dag 3. Strømningsforholdet er vist i figur 59.



**Figur 59: Bilder av strømming fra røykempull på Charlottenlund ungdomsskole.**



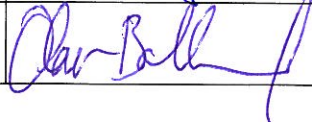
Vedlegg 6. Risikovurdering

# Risikovurderingsrapport

## Luftinntak og avkast

Prosjekttittel	Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter
Apparatur	Luftinntak og avkast
Enhet	NTNU
Apparaturansvarlig	Hans Martin Mathisen
Prosjektleder	Hans Martin Mathisen
HMS-koordinator	Morten Grønli
HMS-ansvarlig (linjeleder)	Olav Bolland
Plassering	Varmeteknisk lab og ulike bygninger i Trondheim
Romnummer	C163, teknisk rom og tak på ulike bygninger
Risikovurdering utført av	Marie Berge Holmen i samarbeid med Erik Langørgen

### Godkjenning:

	Navn	Dato	Signatur
Prosjektleder	Hans Martin Mathisen	4/3 - 2013	
HMS koordinator	Morten Grønli	28/2-2013	
HMS ansvarlig (linjeleder)	Olav Bolland	4/3-2013	

## INNHOLDSFORTEGNELSE

1	INNLEDNING .....	1
2	ORGANISERING.....	1
3	RISIKOSTYRING AV PROSJEKTET .....	1
4	TEGNINGER, FOTO, BESKRIVELSER AV FORSØKSOPPESETT.....	1
5	EVAKUERING FRA FORSØKSOPPESETNINGEN.....	2
6	VARSLING.....	2
6.1	Før forsøkskjøring.....	2
6.2	Ved uønskede hendelser .....	2
7	VURDERING AV TEKNISK SIKKERHET .....	3
7.1	Fareidentifikasjon, HAZOP.....	3
7.2	Brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff og gass .....	3
7.3	Trykkpåkjent utstyr .....	3
7.4	Påvirkning av ytre miljø (utslipp til luft/vann, støy, temperatur, rystelser, lukt) .....	4
7.5	Stråling.....	4
7.6	Bruk og behandling av kjemikalier .....	4
7.7	El sikkerhet (behov for å avvike fra gjeldende forskrifter og normer).....	4
8	VURDERING AV OPERASJONELL SIKKERHET.....	4
8.1	Prosedyre HAZOP .....	4
8.2	Drifts og nødstopps prosedyre.....	4
8.3	Opplæring av operatører.....	4
8.4	Tekniske modifikasjoner.....	5
8.5	Personlig verneutstyr .....	5
8.6	Generelt.....	5
8.7	Sikkerhetsutrustning .....	5
8.8	Spesielle tiltak.....	5
9	TALLFESTING AV RESTRISIKO – RISIKOMATRISSE .....	5
10	KONKLUSJON .....	5
11	LOVER FORSKRIFTER OG PÅLEGG SOM GJELDER.....	6
12	DOKUMENTASJON.....	6
13	VEILEDNING TIL RAPPORTMAL.....	7

## 1 INNLEDNING

Kandidaten skal utføre målinger av omluft mellom luftinntak og avkast med sporgassutstyr for et testoppsett i varmeteknisk lab og deretter for tre ulike bygninger i Trondheim; NTNU Verkstedteknisk, KLP Miljøbygget og Charlottenlund ungdomsskole.

Riggen vil plasseres ved test- ventilasjonsanlegget i varmeteknisk lab og i tekniske rom i bygningene. I tillegg vil enkle målinger utføres på tak av alle bygningene.

## 2 ORGANISERING

Rolle	NTNU
Prosjektleder	Hans Martin Mathisen
Apparaturansvarlig	Hans Martin Mathisen
HMS koordinator	Morten Grønli
HMS ansvarlig (linjeleder):	Olav Bolland

## 3 RISIKOSTYRING AV PROSJEKTET

Hovedaktiviteter risikostyring	Nødvendige tiltak, dokumentasjon	Dato
Prosjekt initiering	Prosjekt initiering mal	14.01.13
Veiledningsmøte	Skjema for Veiledningsmøte med pre-risikovurdering	11.02.12
Innledende risikovurdering	Fareidentifikasjon – HAZID Skjema grovanalyse	12.02.12
Vurdering av teknisk sikkerhet	Prosess-HAZOP Tekniske dokumentasjoner	12.02.12
Vurdering av operasjonell sikkerhet	Prosedyre-HAZOP Opplæringsplan for operatører	12.02.12
Sluttvurdering, kvalitetssikring	Uavhengig kontroll Utstedelse av apparaturkort Utstedelse av forsøk pågår kort	19.02.13

## 4 TEGNINGER, FOTO, BESKRIVELSER AV FORSØKSOPPSETT

**Vedlegg:** *Prosess og Instrumenterings Diagram (PID) med komponentliste*

Forsøket utføres i to bolker:

- 1) Forsøk på tak: En røykappull plassert på tak (i sikker beholder) benyttes for å observere strømningsmønsteret. Røykappullen tennes på, deretter trekker operatør seg noe unna og observerer. Det monteres en vindmåler med trådløs forbindelse til pc for å logge vindinformasjon mens forsøkene i teknisk rom pågår. Vindmåleren plasseres i åpent område på tak.
- 2) Forsøk i teknisk rom/ventilasjonsanlegg: Det benyttes sporgassutstyr (lystgass) til å måle graden av omluft mellom luftinntak og avkast. Gassbeholderen med ventiler, rotameter og slange plasseres ved siden av avkastkanalen. Gassen injiseres gjennom et hull i kanalen hvor det benyttes nippel og ventil for å unngå lekkasjer. Lengre bort i



kanalen benyttes to hull for måling av konsentrasjon via nippel. Sporgassutstyret kobles til tilluftskanalen hvor gasskonsentrasjonen måles. Dette er koblet opp mot en pc hvor data lagres. I tillegg benyttes et pitotrør for måling av hastighet i avkast- og inntakskanal. Gassbeholderen åpnes av operatør og blir stående maksimalt en time til tilstrekkelig med målepunkter er innsamlet. Deretter vil gassflasken stenges og utstyret slås av. Forsøket gjentas med andre luftmengder.

## 5 EVAKUERING FRA FORSØKSOPPSETNINGEN

Evakuering skjer på signal fra alarmklokker eller lokale gassalarmstasjon med egen lokal varsling med lyd og lys utenfor aktuelle rom, se 6.2

Evakuering fra rigg området foregår igjennom merkede nødutganger til møteplass, (hjørnet gamle kjemi/kjelhuset eller parkeringsplass 1a-b.)

**Aksjon på rigg ved evakuering:** For tester på tak skal røykappullen slukkes med vann før området forlates (se vedlagt datablad). For målinger på ventilasjonsanlegg skal sporgass stenges av og riggen forlates slik den er stilt opp.

## 6 VARSLING

### 6.1 Før forsøkskjøring

Varsler i henhold til feltskjema og leverer dette til instituttkontoret. Forsøkene registreres i aktivitetskalender for lab.

Varsling per e-post, til [iept-experiments@ivt.ntnu.no](mailto:iept-experiments@ivt.ntnu.no)

**I e-posten skal det stå::**

- Navn på forsøksleder
- Navn på forsøksrigg
- Tid for start: (dato og klokkeslett)
- Tid for stop: (dato og klokkeslett)

### 6.2 Ved uønskede hendelser

#### **BRANN**

Ved brann en ikke selv er i stand til å slukke med rimelige lokalt tilgjengelige slukkemidler, skal nærmeste brannalarm utløses og arealet evakueres raskest mulig. En skal så være tilgjengelig for brannvesen/bygningsvaktmester for å påvise brannsted.

Om mulig varsles så:

NTNU	SINTEF
Morten Grønli, Mob: 918 97 515	Harald Mæhlum, Mob: 930 14 986
Olav Bolland: Mob: 918 97 209	Anne Karin T. Hemmingsen Mob: 930 19 669
NTNU – SINTEF Beredskapstelefon	800 80 388

#### **GASSALARM**

Ved gassalarm skal gassflasker stenges umiddelbart og området ventileres. Klarer man ikke innen rimelig tid å få ned nivået på gasskonsentrasjonen så utløses brannalarm og laben evakueres. Dedikert personell og eller brannvesen sjekker så lekkasjested for å fastslå om det er mulig å tette lekkasje og luften ut området på en forsvarlig måte.

Varslingsrekkefølge som i overstående punkt.

### PERSONSKADE

- Førstehjelpsutstyr i Brann/førstehjelpsstasjoner,
- Rop på hjelp,
- Start livreddende førstehjelp
- **Ring 113** hvis det er eller det er tvil om det er alvorlig skade.

### ANDRE UØNSKEDE HENDELSER (AVVIK)

#### NTNU:

Rapportering av uønskede hendelser, Innsida, avviksmeldinger  
[https://innsida.ntnu.no/lenkesamling\\_vis.php?katid=1398](https://innsida.ntnu.no/lenkesamling_vis.php?katid=1398)

## 7 VURDERING AV TEKNISK SIKKERHET

### 7.1 Fareidentifikasjon, HAZOP

Forsøksoppsetningen deles inn i følgende noder:

Node 1	Rigg i teknisk rom/ ventilasjonsanlegg
Node 2	Tester på tak med røykappuller og vindmåler

#### Vedlegg: A Hazop\_mal

**Vurdering:** Sikkerhet er ivaretatt

I teknisk rom hvor forsøket utføres kan det muligens oppstå forhøyede konsentrasjoner ved lekkasjer fra gassbeholderen. Kun et fåtall personer har tilgang til dette området (noe flere i lab). Det benyttes nippel og ventil for injisering av gass, slik at tilførsel enkelt kan steges ved lekkasje. Faren for lekkasje er også redusert ved at nippel er benyttet i målepunkter i avkastkanalen. Dette er imidlertid ikke benyttet for målepunkter til pitotrør. Sikkerhet er ivaretatt ved at mengdene lystgass er så små at det vurderes som lite risikofyllt (ref: Hans Martin Mathisen).

I ventilasjonsanlegget antas konsentrasjonen ved høye gassutslipp å være maksimalt 10 % av utslippskonsentrasjonen, siden denne luften går via luftinntaket. Faren for at brukere av bygget vil bli eksponert for store konsentrasjoner er derfor liten. Konsentrasjon forventes å ligge godt innenfor administrativ norm.

### 7.2 Brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff og gass

Inneholder forsøkene brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff

Nei	
-----	--

**Vurdering:** Potassium chlorate i røykappullene er eksplosivt dersom det blandes med brennbar materiale. Ampullene kan forverre branner som allerede er i gang. Lystgass er ikke brennbar, men kan underholde en brann uten tilstedeværelse av luft og kan dermed forverre branner. Lystgassen er under trykk og skal ikke utsettes for temperaturer over 45 grader.

### 7.3 Trykkpåkjent utstyr

Inneholder forsøksoppsetningen trykkpåkjent utstyr:

NEI	
-----	--

**Vurdering:** Gassflasker med åpen slange fra Yara.

#### 7.4 Påvirkning av ytre miljø (utslipp til luft/vann, støy, temperatur, rystelser, lukt)

	JA
--	----

**Vurdering:** Eksperimentene vil generere utslipp av sporgass og gass fra røykampuller. Røykampuller avgir 55m<sup>3</sup> over 3-4 min. Byggets brukere varsles om faren for at røyk kan opptre innendørs dersom røyken havner i lufinntak. Lystgass (dinitrogenoksid) er en klimagass som ikke bør slippes ut i store mengder. Anbefalt grense fra administrativ norm er 75 ppm over 15 minutter i et arbeidsmiljø. Forsøkene vil ikke kreve utslipp over denne grensen. Grenseverdien til karbondioksid over 8 timer på 5 00 ppm vil også overholdes.

#### 7.5 Stråling

NEI	
-----	--

#### 7.6 Bruk og behandling av kjemikalier

	JA, Bruken risikovurderes
--	---------------------------

**Vedlegg:** datablad røykampuller og lystgass

**Vurdering:** Røykampuller består hovedsakelig av ammonium chloride og potassium chlorate. Oppbevares bort fra mat og barn på et tørt sted. Brukte røykampuller er ikke klassifisert som farlig avfall, mens ubrukte eller ødelagte røykampuller er farlig avfall. Lystgass i godkjent beholder fra Yara. Se datablad for mer informasjon.

#### 7.7 El sikkerhet (behov for å avvike fra gjeldende forskrifter og normer)

NEI	
-----	--

## 8 VURDERING AV OPERASJONELL SIKKERHET

Sikrer at etablerte prosedyrer dekker alle identifiserte risikoforhold som må håndteres gjennom operasjonelle barrierer og at operatører og teknisk utførende har tilstrekkelig kompetanse.

### 8.1 Prosedyre HAZOP

Metoden er en undersøkelse av operasjonsprosedyrer, og identifiserer årsaker og farekilder for operasjonelle problemer.

**Vurdering:** Enkel prosedyre. Misforståelser vil ikke føre til farlige situasjoner. Skjema er derfor ikke fylt ut.

### 8.2 Drifts og nødstopps prosedyre

**Vedlegg:** G Forsøksprosedyre

**Nødstopps prosedyre:**

Hendelser som aktiverer en nødstopps er brann og lekkasjer fra sporgassutstyret. Sporgasstilførsel stoppes. Ved forsøk på tak skal røykampuller slukkes med vann.

### 8.3 Opplæring av operatører

Dokument som viser opplæringsplan for operatører er utarbeidet for forsøkene.

**Vedlegg:** H Opplæringsplan for operatører

## 8.4 Tekniske modifikasjoner

- Tekniske modifikasjoner som kan gjøres av Operatør:  
Alle modifikasjoner kan utføres av operatør.
- *Dersom andre gasser benyttes i forsøkene må ny risikovurdering utføres.*

## 8.5 Personlig verneutstyr

- *Vernebriller benyttes ved bruk av røykampuller på tak*

## 8.6 Generelt

- *Traverskran og truck kjøring skal ikke foregå i nærheten under eksperimentet.*
- *Gassflasker skal plasseres i godkjent stativ med avstengningsventil lett tilgjengelig.*
- *Vann og trykklufttilførsel i slanger skal stenges/kobles fra ved nærmeste fastpunkt når riggen ikke er i bruk.*

## 8.7 Sikkerhetsutrustning

- *Ikke nødvendig.*

## 8.8 Spesielle tiltak

- Ved arbeid i høyden skal det gjøres en vurdering av risiko for fall på stedet. Det er allerede utført befaringer for alle bygningene hvor forsøk skal utføres. For forsøk på tak av varmeteknisk lab er avstand fra forsøksrigg til takkant så stor (over 15 meter) at spesielle tiltak ikke anses som nødvendig. For de andre bygningene er avstanden i noen tilfeller kort. Det anses ikke som nødvendig å benytte sikkerhetsselel el., men sikkerhet må vurderes for hver befaring/ hvert forsøk som utføres. Dette vurderingen gjøres ut ifra faktorer som værforhold, glatte flater, risiko for å snuble i utstyr eller konstruksjoner på tak osv. Det må også gjøres en vurdering av hvilke tiltak som kan utføres for å minimere risiko for fall.

## 9 TALLFESTING AV RESTRISIKO – RISIKOMATRISJE

Risikomatrissen vil gi en visualisering og en samlet oversikt over aktivitetens risikoforhold slik at ledelse og brukere får et mest mulig komplett bilde av risikoforhold.

IDnr	Aktivitet-hendelse	Frekv-Sans	Kons	RV
1	<i>Uhell ved reise til/fra bygninger hvor målinger utføres</i>	1	E	E1
2	<i>Fare for skade fra kniv, drill eller annet utstyr for installasjon av utstyr</i>	3	C	C3
3	<i>Fare for å snuble i utstyret</i>	3	B	B3
4	<i>Avsperring utenom arbeidstid: personer som ikke er operatører kan komme inn i riggområde</i>	3	C	C3

**Vurdering restrisiko:** Restirisiko er akseptabel.

## 10 KONKLUSJON

Riggen er bygget til god laboratorium praksis (GLP).  
Apparaturkortet får en gyldighet på 6 måneder  
Forsøk pågår kort får en gyldighet på 6 måneder

## 11 LOVER FORSKRIFTER OG PÅLEGG SOM GJELDER

Se <http://www.arbeidstilsynet.no/regelverk/index.html>

- Lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr (1929)
- Arbeidsmiljøloven
- Forskrift om systematisk helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid (HMS Internkontrollforskrift)
- Forskrift om sikkerhet ved arbeid og drift av elektriske anlegg (FSE 2006)
- Forskrift om elektriske forsyningsanlegg (FEF 2006)
- Forskrift om utstyr og sikkerhetssystem til bruk i eksplosjonsfarlig område NEK 420
- Forskrift om håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff samt utstyr og anlegg som benyttes ved håndteringen
- Forskrift om Håndtering av eksplosjonsfarlig stoff
- Forskrift om bruk av arbeidsutstyr.
- Forskrift om Arbeidsplasser og arbeidslokaler
- Forskrift om Bruk av personlig verneutstyr på arbeidsplassen
- Forskrift om Helse og sikkerhet i eksplosjonsfarlige atmosfærer
- Forskrift om Høytrykksspyling
- Forskrift om Maskiner
- Forskrift om Sikkerhetsskilting og signalgivning på arbeidsplassen
- Forskrift om Stillaser, stiger og arbeid på tak m.m.
- Forskrift om Sveising, termisk skjæring, termisk sprøyting, kullbuemeisling, lodding og sliping (varmt arbeid)
- Forskrift om Tekniske innretninger
- Forskrift om Tungt og ensformig arbeid
- Forskrift om Vern mot eksponering for kjemikalier på arbeidsplassen (Kjemikalieforskriften)
- Forskrift om Vern mot kunstig optisk stråling på arbeidsplassen
- Forskrift om Vern mot mekaniske vibrasjoner
- Forskrift om Vern mot støy på arbeidsplassen

### Veiledninger fra arbeidstilsynet

se: <http://www.arbeidstilsynet.no/regelverk/veiledninger.html>

## 12 DOKUMENTASJON

- Tegninger, foto, beskrivelser av forsøksoppsetningen
- Hazop\_mal
- Sertifikat for trykkpåkjent utstyr
- Håndtering avfall i NTNU
- Sikker bruk av LASERE, retningslinje
- HAZOP\_MAL\_Prosedyre
- Forsøksprosedyre
- Opplæringsplan for operatører
- Skjema for sikker jobb analyse, (SJA)
- Apparatorkortet
- Forsøk pågår kort

## 13 VEILEDNING TIL RAPPORTMAL

### Kapittel 7 Vurdering av teknisk sikkerhet

Sikre at design av apparatur er optimalisert i forhold til teknisk sikkerhet.

Identifisere risikoforhold knyttet til valgt design, og eventuelt å initiere re-design for å sikre at størst mulig andel av risiko elimineres gjennom teknisk sikkerhet.

Punktene skal beskrive hva forsøksoppsetningen faktisk er i stand til å tåle og aksept for utslipp.

#### 7.1 Fareidentifikasjon, HAZOP

Forsøksoppsetningen deles inn i noder: (eks Motorenhet, pumpeenhet, kjøleenhet.)

Ved hjelp av ledeord identifiseres årsak, konsekvens og sikkerhetstiltak. Konkluderes det med at tiltak er nødvendig anbefales disse på bakgrunn av dette. Tiltakene lukkes når de er utført og Hazop slutføres.

(eks "No flow", årsak: rør er deformert, konsekvens: pumpe går varm, sikkerhetsforanstaltning: måling av flow med kobling opp mot nødstoppe eller hvis konsekvensen ikke er kritisk benyttes manuell overvåkning og punktet legges inn i den operasjonelle prosedyren.)

#### 7.2 Brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff.

I henhold til Forskrift om håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff samt utstyr og anlegg som benyttes ved håndteringen

**Brannfarlig stoff:** Fast, flytende eller gassformig stoff, stoffblanding, samt stoff som forekommer i kombinasjoner av slike tilstander, som i kraft av sitt flammepunkt, kontakt med andre stoffer, trykk, temperatur eller andre kjemiske egenskaper representerer en fare for brann.

**Reaksjonsfarlig stoff:** Fast, flytende, eller gassformig stoff, stoffblanding, samt stoff som forekommer i kombinasjoner av slike tilstander, som ved kontakt med vann, ved sitt trykk, temperatur eller andre kjemiske forhold, representerer en fare for farlig reaksjon, eksplosjon eller utslipp av farlig gass, damp, støv eller tåke.

**Trykksatt stoff:** Annet fast, flytende eller gassformig stoff eller stoffblanding enn brann- eller reaksjonsfarlig stoff, som er under trykk, og som derved kan representere en fare ved ukontrollert utslipp.

Nærmere kriterier for klassifisering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff er fastsatt i vedlegg 1 i veiledningen til forskriften "Brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff"

<http://www.dsb.no/Global/Publikasjoner/2009/Veiledning/Generell%20veiledning.pdf>

[http://www.dsb.no/Global/Publikasjoner/2010/Tema/Temaveiledning\\_bruk\\_av\\_farlig\\_stoff\\_Del\\_1.pdf](http://www.dsb.no/Global/Publikasjoner/2010/Tema/Temaveiledning_bruk_av_farlig_stoff_Del_1.pdf)

Rigg og areal skal gjennomgås med hensyn på vurdering av Ex sone

- Sone 0: Alltid eksplosiv atmosfære, for eksempel inne i tanker med gass, brennbar væske.
- Sone 1: Primær sone, tidvis eksplosiv atmosfære for eksempel et fyllerapparat

- Sone 2: Sekundært utslippssted, kan få eksplosiv atmosfære ved uhell, for eksempel ved flenser, ventiler og koblingspunkt

## 7.4 Påvirkning av ytre miljø

Med forurensning forstås: tilførsel av fast stoff, væske eller gass til luft, vann eller i grunnen støy og rystelser påvirkning av temperaturen som er eller kan være til skade eller ulempe for miljøet.

Regelverk: <http://www.lovdata.no/all/hl-19810313-006.html#6>

NTNU retningslinjer for avfall se: <http://www.ntnu.no/hms/retningslinjer/HMSR18B.pdf>

## 7.5 Stråling

Stråling defineres som

<b>Ioniserende stråling:</b> Elektromagnetisk stråling (i strålevernssammenheng med bølgelengde <100 nm) eller hurtige atomære partikler (f.eks alfa- og beta-partikler) som har evne til å ionisere atomer eller molekyler
<b>Ikke-ioniserende stråling:</b> Elektromagnetisk stråling (bølgelengde >100 nm), og ultralyd <sup>1</sup> , som har liten eller ingen evne til å ionisere.
<b>Strålekilder:</b> Alle ioniserende og sterke ikke-ioniserende strålekilder.
<b>Ioniserende strålekilder:</b> Kilder som avgir ioniserende stråling, f.eks alle typer radioaktive kilder, røntgenapparater, elektronmikroskop
<b>Sterke ikke-ioniserende strålekilder:</b> Kilder som avgir sterk ikke-ioniserende stråling som kan skade helse og/eller ytre miljø, f.eks laser klasse 3B og 4, MR <sub>2</sub> -systemer, UVC <sub>3</sub> -kilder, kraftige IR-kilder <sub>4</sub>
<sup>1</sup> Ultralyd er akustisk stråling ("lyd") over det hørbare frekvensområdet (>20 kHz). I strålevernforskriften er ultralyd omtalt sammen med elektromagnetisk ikke-ioniserende stråling. <sup>2</sup> MR (eg. NMR) - kjernemagnetisk resonans, metode som nyttes til å «avbilde» indre strukturer i ulike materialer. <sup>3</sup> UVC er elektromagnetisk stråling i bølgelengdeområdet 100-280 nm. <sup>4</sup> IR er elektromagnetisk stråling i bølgelengdeområdet 700 nm – 1 mm.

For hver laser skal det finnes en informasjonsperm(HMSRV3404B) som skal inneholde:

- Generell informasjon
- Navn på instrumentansvarlig og stedfortreder, og lokal strålevernskoordinator
- Sentrale data om apparaturen
- Instrumentspesifikk dokumentasjon
- Referanser til (evt kopier av) datablader, strålevernbestemmelser, o.l.
- Vurderinger av risikomomenter
- Instruks for brukere
- Instruks for praktisk bruk; oppstart, drift, avstenging, sikkerhetsforholdsregler, loggføring, avlåsing, evt. bruk av strålingsmåler, osv.
- Nødprosedyrer

Se ellers retningslinjen til NTNU for laser: <http://www.ntnu.no/hms/retningslinjer/HMSR34B.pdf>

## 7.6 Bruk og behandling av kjemikalier.

Her forstås kjemikalier som grunnstoff som kan utgjøre en fare for arbeidstakers sikkerhet og helse.

Se ellers: <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20010430-0443.html>

Sikkerhetsdatablar skal være i forøkenes HMS perm og kjemikaliene registrert i Stoffkartoteket.

## Kapittel 8 Vurdering av operasjonell sikkerhet

Sikrer at etablerte prosedyrer dekker alle identifiserte risikoforhold som må håndteres gjennom operasjonelle barrierer og at operatører og teknisk utførende har tilstrekkelig kompetanse.

### 8.1 Prosedyre Hazop

Prosedyre-HAZOP gjennomføres som en systematisk gjennomgang av den aktuelle prosedyren ved hjelp av fastlagt HAZOP-metodikk og definerte ledeord. Prosedyren brytes ned i enkeltstående arbeidsoperasjoner (noder) og analyseres ved hjelp av ledeordene for å avdekke mulige avvik, uklarheter eller kilder til mangelfull gjennomføring og feil.

### 8.2 Drifts og nødstop prosedyrer

Utarbeides for alle forsøksoppsetninger.

*Driftsprosedyren skal stegvis beskrive gjennomføringen av et forsøk, inndelt i oppstart, under drift og avslutning. Prosedyren skal beskrive forutsetninger og tilstand for start, driftsparametere med hvor store avvik som tillates før forsøket avbrytes og hvilken tilstand riggen skal forlates.*

*Nødstopprosedyre beskriver hvordan en nødstop skal skje, (utført av uinnvidde), hva som skjer, (strøm/gass tilførsel) og hvilke hendelser som skal aktivere nødstop, (brannalarm, lekkasje).*

## Kapittel 9 Risikomatrix Tallfesting av restrisiko

For å synliggjøre samlet risiko, jevnfør skjema for risikovurdering, plottes hver enkelt aktivitets verdi for sannsynlighet og konsekvens inn i risikomatriksen. Bruk aktivitetens IDnr. Eksempel: Hvis aktivitet med IDnr. 1 har fått en risikoverdi D3 (sannsynlighet 3 x konsekvens D) settes aktivitetens IDnr i risikomatriksens felt for 3D. Slik settes alle aktivitetenes risikoverdier (IDnr) inn i risikomatriksen.

I risikomatriksen er ulike grader av risiko merket med rød, gul eller grønn. Når en aktivitets risiko havner på rød (= uakseptabel risiko), skal risikoreducerende tiltak gjennomføres. Ny vurdering gjennomføres etter at tiltak er iverksatt for å se om risikoverdien er kommet ned på akseptabelt nivå.

<b>KONSEKVENNS</b>	<b>Svært alvorlig</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>
	<b>Alvorlig</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>
	<b>Moderat</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
	<b>Liten</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>
	<b>Svært liten</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>	<b>A5</b>
		<b>Svært liten</b>	<b>Liten</b>	<b>Middels</b>	<b>Stor</b>	<b>Svært Stor</b>
		<b>SANSYNLIGHET</b>				

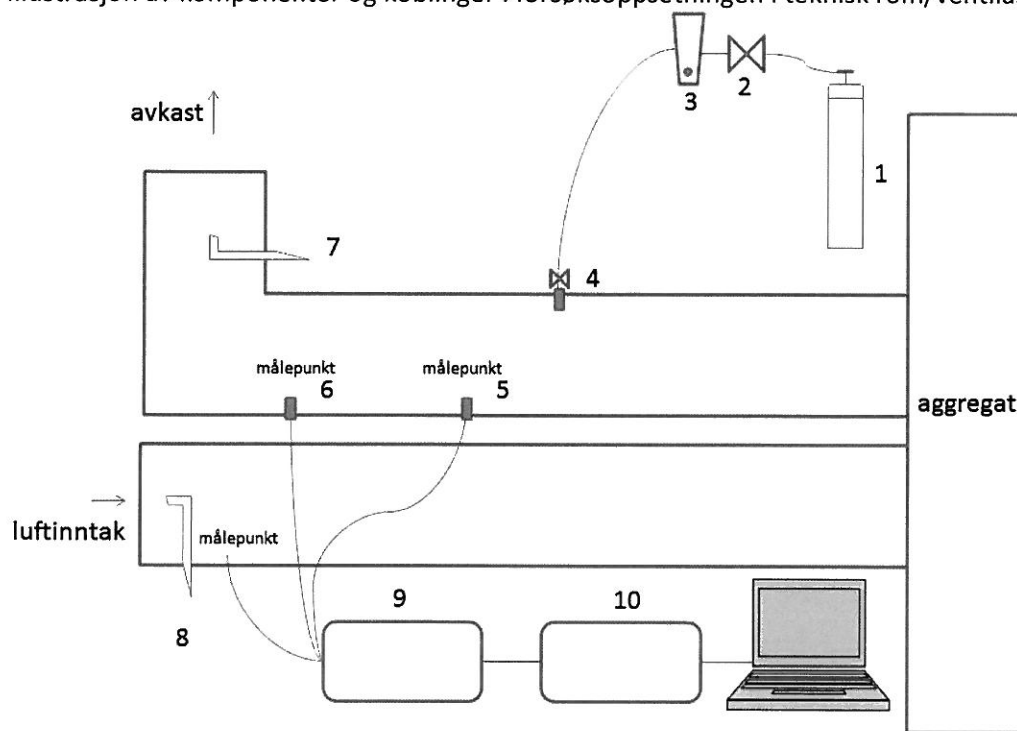


Prinsipp over akseptkriterium. Forklaring av fargene som er brukt i risikomatrisen.

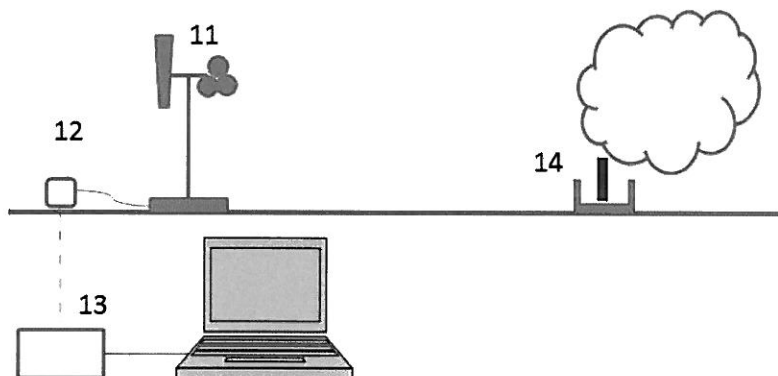
Farge	Beskrivelse
Rød	Uakseptabel risiko. Tiltak skal gjennomføres for å redusere risikoen.
Gul	Vurderingsområde. Tiltak skal vurderes.
Grønn	Akseptabel risiko. Tiltak kan vurderes ut fra andre hensyn.

## Vedlegg: Prosess og Instrumenterings Diagram (PID)

Illustrasjon av komponenter og koblinger i forsøksoppsetningen i teknisk rom/ventilasjonsanlegg



Illustrasjon av komponenter og koblinger i forsøksoppsetningen på tak



### Komponentliste med spesifikasjoner

- |  |  |
|--|--|
| 1) Gassbeholder med lystgass/SF6   | 10) Brüel & Kjær (innova): Multi-gas monitor Type 1302 |
| 2) Reguleringsventil   | 11) Vindmåler for vindretning og – hastighet           |
| 3) Rotameter   | 12) Trådløs oversendingsenhet                          |
| 4) Nippel + ventil til slange for injisering av gass                               | 13) Trådløs klimastasjon                               |
| 5) Nippel til slange for måling av gass  | 14) Røykampuller Brandax VS med oppbevaringsboks       |
| 6) Nippel til slange for måling av gass  |  |
| 7) Pitotrør i avkastkanal  |  |
| 8) Pitotrør i inntakskanal   |  |
| 9) Sporgassutstyr: Brüel & Kjær (innova): Multipoint sampler and endoser Type 1303 |  |

# Vedlegg til Risikovurderingsrapport

## Luftinntak og avkast

<b>Prosjekttittel</b>	Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter
<b>Apparatur</b>	Luftinntak og avkast
<b>Enhet</b>	NTNU
<b>Apparaturansvarlig</b>	Hans Martin Mathisen
<b>Prosjektleder</b>	Hans Martin Mathisen
<b>HMS-koordinator</b>	Morten Grønli
<b>HMS-ansvarlig (linjeleder)</b>	Olav Bolland
<b>Plassering</b>	Varmeteknisk lab og ulike bygninger i Trondheim
<b>Romnummer</b>	C163, teknisk rom og tak på ulike bygninger
<b>Risikovurdering utført av</b>	Marie Berge Holmen i samarbeid med Erik Langørgen

## INNHALDSFORTEGNELSE

VEDLEGG A HAZOP MAL.....	1
VEDLEGG B PRØVESERTIFIKAT FOR LOKAL TRYKKTESTING.....	1
VEDLEGG F: HAZOP MAL PROSEDYRE .....	1
VEDLEGG G: FORSØKSPROSEDYRE .....	1
VEDLEGG H: OPPLÆRINGSPLAN FOR OPPERATØRER .....	2
VEDLEGG I: SKJEMA FOR SIKKER JOBB ANALYSE .....	3
APPARATURKORT / UNITCARD.....	5
FORSØK PÅGÅR /EXPERIMENT IN PROGRESS .....	6

## VEDLEGG A: HAZOP MAL

Project: Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter		Page					
Node: 1 rigg i teknisk rom/ ventilasjonsanlegg							
Ref#	Guideword	Causes	Consequences	Safeguards	Recommendations	Action	Date/Sign
1	No flow	Feil med ventil	Liten kontroll over utslippsmengder	Kontrollere ventil. Stenge av forsøket midlertidig.			
2	Reverse flow	Ikke relevant					
3	More flow	Feil med ventil eller lekkasje	Konsentrasjon høyere enn anbefalt, akutte helseeffekter	Åpen ventil kun i korte perioder. Benytt ekstra stengeventil ved injiseringspunkt.			
4	Less flow	Feil med ventil	Liten kontroll over utslippsmengder	Kontrollere ventil. Stenge av forsøket midlertidig.			
	More level	Se ref 3					
	Less level	Se ref 4					
	More pressure	Ikke relevant					
	Less pressure	Ikke relevant					
	More temperature	Ikke relevant					
	Less temperature	Ikke relevant					
	More viscosity	Ikke relevant					
	Less viscosity	Ikke relevant					
	Composition Change	Ikke relevant					
	Contamination	Se ref 3					
	Relief	Ikke relevant					
	Instrumentation	Dårlig oppkobling	Lekkasje av gass, høy	Skru av utstyr			

Project: Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter		Page					
Node: 1 rigg i teknisk rom/ ventilasjonsanlegg							
Reff#	Guideword	Causes	Consequences	Safeguards	Recommendations	Action	Date/Sign
			konsentrasjon med helseeffekt	øyeblikkelig, forlat rommet			
	Sampling	Ikke relevant					
	Corrosion/erosion	Ikke relevant					
	Service failure	Slangen hopper av	Høye konsentrasjoner	Stenge av flaske. Forlate rommet.			
	Abnormal operation	Se ref 1-4					
	Maintenance	Ikke relevant					
	Ignition	Ikke relevant					
	Spare equipment	Ikke relevant					
	Safety	Ikke relevant					

Project: Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter					Page		
Node: 2 Tester på tak med røykcampuller og vindmåler							
Ref#	Guideword	Causes	Consequences	Safeguards	Recommendations	Action	Date/Sign
1	No flow	Feil med røykcampull, produserer ikke røyk	Mulig ustabil tenning	Slukke med vann ved unormalt forløp			
2	Reverse flow	Ikke relevant					
3	More flow	Feil med røykcampull, produserer for mye røyk	Store røykmengder, kan utløse brannalarm	Slukke med vann ved unormalt forløp			
4	Less flow	Feil med røykcampull, produserer lite røyk	Mulig ustabil tenning	Slukke med vann ved unormalt forløp			
	More level	Se ref 3					
	Less level	Se ref 4					
	More pressure	Ikke relevant					
	Less pressure	Ikke relevant					
	More temperature	Ike relevant					
	Less temperature	Ikke relevant					
	More viscosity	Ikke relevant					
	Less viscosity	Ikke relevant					
	Composition Change	Ikke relevant					
	Contamination	Ikke relevant					
	Relief	Ikke relevant					
	Instrumentation	Ikke relevant					
	Sampling	Ikke relevant					
	Corrosion/erosion	Ikke relevant					
	Service failure	Ikke relevant					
	Abnormal	Ikke relevant					

Project: Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter					Page		
Node: 2 Tester på tak med røykappuller og vindmåler							
Ref#	Guideword	Causes	Consequences	Safeguards	Recommendations	Action	Date/Sign
	operation						
	Maintenance	Ikke relevant					
	Ignition	Flammer i nærheten	Brann utvikler seg fortere	God kontroll av området før påtenning av røykappull, ingen kilde til brann i nærheten			
	Spare equipment	Ikke relevant					
	Safety	Ikke relevant					

## VEDLEGG B: PRØVESERTIFIKAT FOR LOKAL TRYKKTESTING

Trykk testen skal utføres i følge NS-EN 13445 del 5 (Inspeksjon og prøving).  
Se også prosedyre for trykktesting gjeldende for VATL lab

Trykkpåkjent utstyr:	
Benyttes i rigg:	
Design trykk for utstyr (bara):	
Maksimum tillatt trykk (bara): (i.e. burst pressure om kjent)	
Maksimum driftstrykk i denne rigg:	

**Prøvetrykket skal fastlegges i følge standarden og med hensyn til maksimum tillatt trykk.**

Prøvetrykk (bara):	
X maksimum driftstrykk: I følge standard	
Test medium:	
Temperatur (°C)	
Start tid:	Trykk (bara):
Slutt tid:	Trykk (bara):
Maksimum driftstrykk i denne rigg:	

Eventuelle repetisjoner fra atm. trykk til maksimum prøvetrykk:.....

Test trykket, dato for testing og maksimum tillatt driftstrykk skal markers på  
(skilt eller innslått)

\_\_\_\_\_  
Sted og dato

\_\_\_\_\_  
Signatur



## VEDLEGG F: HAZOP MAL PROSEDYRE

Project: Node: 1							Page
Reff#	Guideword	Causes	Consequences	Safeguards	Recommendations	Action	Date/Sign
	Uklar	Prosedyre er laget for ambisiøs eller preget av forvirring					
	Trinn på feil plass	Prosedyren vil lede til at handlinger blir gjennomført i feil mønster/rekkefølge					
	Feil handling	Prosedyrens handling er feil spesifisert					
	Uriktig informasjon	Informasjon som er gitt i forkant av handling er feil spesifisert					
	Trinn utelatt	Manglende trinn, eller trinn krever for mye av operatør					
	Trinn mislykket	Trinn har stor sannsynlighet for å mislykkes					
	Påvirkning og effekter fra andre	Prosedyrens prestasjoner vil trolig bli påvirket av andre kilder					

## VEDLEGG G: FORSØKSPROSEDYRE

<b>Prosjekt</b> Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter	<b>Dato/Signatur</b>
<b>Apparatur</b> Luftinntak og avkast	
<b>Prosjektleder</b> Hans Martin Mathisen	<i>H.M. Mathisen</i>
<b>Operatør</b> Marie Berge Holmen	11.03.13 <i>Marie Berge Holmen</i>

	<b>Conditions for the experiment:</b>	<b>Completed</b>
	Experiments should be run in normal working hours, 08:00-16:00 during winter time and 08.00-15.00 during summer time. Experiments outside normal working hours shall be approved.	
	An early warning is given according to the lab rules, and accepted by authorized personnel.	
	Be sure that everyone taking part of the experiment is wearing the necessary protecting equipment and is aware of the shutdown procedure and escape routes.	
	<b>Preparations</b>	<b>Carried out</b>
	Evaluate safety for experiment on the roof	
	Post the "Experiment in progress" sign.	
	Make all the equipment ready (including water on the roof in case of fire)	
	<b>During the experiment</b>	-
	Add tracer gas	
	Monitor concentration	
	<b>End of experiment</b>	-
	Stop tracer gas	
	Remove all obstructions/barriers/signs around the experiment	
	Tidy up and return all tools and equipment	
	Tidy and cleanup work areas	
	Return equipment and systems back to their normal operation settings	
	<b>To reflect on before the next experiment and experience useful for others</b>	-
	Was the experiment completed as planned and on scheduled in professional terms?	
	Was the competence which was needed for security and completion of the experiment available to you?	
	Do you have any information/ knowledge from the experiment that you should document and share with fellow colleagues?	

## VEDLEGG H: OPPLÆRINGSPLAN FOR OPERATØRER

<b>Prosjekt</b> Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter	<b>Dato/Signatur</b>
<b>Apparatur</b> Luftinntak og avkast	
<b>Prosjektleder</b> Hans Martin Mathisen	9/3-2013 <i>H.M. Mathisen</i>

Kjennskap til EPT LAB generelt	
Lab - adgang - rutiner/regler - arbeidstid	
Gjennomføre lab- kurs og gassbeholder-kurs	
Kjenner til evakueringsprosedyrer	
Aktivitetsskalender	
Innmelding av forsøk til: <a href="mailto:iept-experiments@ivt.ntnu.no">iept-experiments@ivt.ntnu.no</a>	
Kjennskap til forsøkene	
Prosedyrer for forsøkene	
Lese datablad for røykappuller og sporgass	
Nødstopps prosedyre	
Nærmeste brann/førstehjelpsstasjon	

Jeg erklærer herved at jeg har gjennomgått og forstått HMS-regelverket, har fått hensiktsmessig opplæring for å kjøre dette eksperimentet og er klar over mitt personlige ansvar ved å arbeide i EPT laboratorier.

### Operatør

Dato 11.03.13

Signert *H.M. Mathisen*

## VEDLEGG I: SKJEMA FOR SIKKER JOBB ANALYSE

<b>SJA tittel:</b>	
Dato:	Sted:
Kryss av for utfylt sjekkliste:	

<b>Deltakere:</b>		
SJA-ansvarlig:		

Arbeidsbeskrivelse: (Hva og hvordan?)
Risiko forbundet med arbeidet:
Beskyttelse/sikring: (tiltaksplan, se neste side)
Konklusjon/kommentar:

Anbefaling/godkjenning:	Dato/Signatur:	Anbefaling/godkjenning:	Dato/Signatur:
SJA-ansvarlig:		HMS koordinator	
Ansvarlig for utføring:		Annen (stilling):	

HMS aspekt	Ja	Nei	NA	Kommentar / tiltak	Ansv.
<b>Dokumentasjon, erfaring, kompetanse</b>					
Kjent arbeidsoperasjon?					
Kjennskap til erfaringer/uønskede hendelser fra tilsvarende operasjoner?					
Nødvendig personell?					
<b>Kommunikasjon og koordinering</b>					
Mulig konflikt med andre operasjoner?					
Håndtering av en evt. hendelse (alarm, evakuering)?					
Behov for ekstra vakt?					
<b>Arbeidsstedet</b>					
Uvante arbeidsstillinger?					
Arbeid i tanker, kummer el.lignende?					
Arbeid i grøfter eller sjakter?					
Rent og ryddig?					
Verneutstyr ut over det personlige?					
Vær, vind, sikt, belysning, ventilasjon?					
Bruk av stillaser/lift/seler/stropper?					
Arbeid i høyden?					
Ioniserende stråling?					
Rømningsveier OK?					
<b>Kjemiske farer</b>					
Bruk av helseskadelige/giftige/etsende kjemikalier?					
Bruk av brannfarlige eller eksplosjonsfarlige kjemikalier?					
Er broken risikovurdert?					
Biologisk materiale?					
Støv/asbest/isolasjonsmateriale?					
<b>Mekaniske farer</b>					
Stabilitet/styrke/spenning?					
Klem/kutt/slag?					
Støy/trykk/temperatur?					
Behandling av avfall?					
Behov for spesialverktøy?					
<b>Elektriske farer</b>					
Strøm/spenning/over 1000V?					
Støt/krypstrøm?					
Tap av strømtilførsel?					
<b>Området</b>					
Behov for befarings?					
Merking/skilting/avsperring?					
Miljømessige konsekvenser?					
<b>Sentrale fysiske sikkerhetssystemer</b>					
Arbeid på sikkerhetssystemer?					
Frakobling av sikkerhetssystemer?					
<b>Annet</b>					

## APPARATURKORT / UNITCARD

**Dette kortet SKAL henges godt synlig på apparaturen!**  
*This card MUST be posted on a visible place on the unit!*

<b>Apparatur (Unit)</b> Luftinntak og avkast	
<b>Prosjektleder (Project Leader)</b> Hans Martin Mathisen	<b>Telefon mobil/privat (Phone no. mobile/private)</b> +47 950 59 175
<b>Apparaturansvarlig (Unit Responsible)</b> Hans Martin Mathisen	<b>Telefon mobil/privat (Phone no. mobile/private)</b> +47 950 59 175
<b>Sikkerhetsrisikoer (Safety hazards)</b> Sporgass: Forhøyede konsentrasjoner av lystgass. Røykempull: Kan forverre branner som allerede er i gang.	
<b>Sikkerhetsregler (Safety rules)</b> Bruk vernebriller	
<b>Nødstopprosedyre (Emergency shutdown)</b> Sporgass: Steng tilførsel av lystgass. Forlat området. Røykempull: Slukk røykempull med vann.	

**Her finner du (Here you will find):**

<b>Prosedyrer (Procedures)</b>	Ved siden av tracer gassdetektor og PC
<b>Bruksanvisning (Users manual)</b>	Ved siden av tracer gassdetektor og PC

**Nærmeste (Nearest)**

<b>Brannslukningsapparat (fire extinguisher)</b>	Ved inngangen til VVSLab
<b>Førstehjelpsskap (first aid cabinet)</b>	Ved inngangen til VVSLab

**NTNU**  
**Institutt for energi og prosessteknikk**

**Dato**

\_\_\_\_\_

**Signert**

\_\_\_\_\_

## FORSØK PÅGÅR / EXPERIMENT IN PROGRESS

**Dette kortet SKAL henges opp før forsøk kan starte!**  
***This card MUST be posted on the unit before the experiment startup!***

<b>Apparatur (Unit)</b> Luftinntak og avkast	
<b>Prosjektleder (Project Leader)</b> Hans Martin Mathisen	<b>Telefon mobil/privat (Phone no. mobile/private)</b> +47 950 59 175
<b>Apparaturansvarlig (Unit Responsible)</b> Hans Martin Mathisen	<b>Telefon mobil/privat (Phone no. mobile/private)</b> +47 950 59 175
<b>Godkjente operatører (Approved Operators)</b> Marie Berg Holmen	<b>Telefon mobil/privat (Phone no. mobile/private)</b> +47 995 84 909
<b>Prosjekt (Project)</b> Behovsstyrt ventilasjon og luftkvalitet ved bruk av jethetter	
<b>Forsøks tid / Experimental time (start - stop)</b>	
<b>Kort beskrivelse av forsøket og relaterte farer (Short description of the experiment and related hazards)</b> <p><b>Sporgass:</b>          Det benyttes sporgassutstyr (lystgass) til å måle graden av omluft mellom luftinntak og avkast. Gassbeholderen med ventiler, rotameter og slange er plassert ved siden av avkastkanalen hvor det lages et hull og gassen injiseres. Konsentrasjonen måles i tilluftskanalen. Det kan ved feil oppstå høye konsentrasjoner av lystgass eller karbondioksid i området rundt forsøket, og lavere konsentrasjoner i tilluften fra testanlegget.</p> <p><b>Røykappull:</b>          Røykappuller benyttes til å observere strømningsmønster på tak. Store røykmengder vil oppstå under forsøk. En vindmåler måler og logger data over tid.</p>	

**NTNU**  
**Institutt for energi og prosessteknikk**

**Dato**

---

**Signert**

---

# SAFETY DATA SHEET

In accordance with 453/2010 and 1272/2008

(All references to EU regulations and directives are abbreviated into only the numeric term)

Date of compilation 2012-05-24



## SECTION 1: IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/MIXTURE AND OF THE COMPANY/UNDERTAKING

### 1.1. Product identifier

**Trade name** BRANDAX VS

### 1.2. Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

**Identified uses** Smoke for leakage tests and air flow studies

**Uses that are advised against**

### 1.3. Details of the supplier of the safety data sheet

**Company** BJÖRNAX AB  
STRÅSSA FÖRETAGSBY  
SE-71177 STRÅSSA

**Telephone** +46 581 43150

**E-Mail** info@bjornax.se

### 1.4. Emergency telephone number

In case of emergency contact toxicological information, emergency tel 112 (within Europe) or 911 (for USA and Canada). For other countries, use the built-in emergency number in your cell phone

For non-emergency poison information, see <http://www.who.int/ipcs/poisons/centre/directory/euro/en/>

## SECTION 2: HAZARDS IDENTIFICATION

### 2.1. Classification of the substance or mixture

**Classification in accordance with 1272/2008**

**Irritates eyes (Category 2)**

**Toxic to aquatic life with long lasting effects (Category Cron 2)**

**Classification in accordance with 1999/45/EG**

Harmful by inhalation and if swallowed. Irritating to eyes. Toxic to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment.

### 2.2. Label elements

**Label information in accordance with 1272/2008**

**Hazard pictograms**



**Signal words** Warning

**Hazard statements**

H319 Causes serious eye irritation

H411 Toxic to aquatic life with long lasting effects

**Precautionary statements**

P210 Keep away from heat, sparks, open flames, or hot surfaces . - No smoking

P273 Avoid release to the environment

P280 Wear eye protection

**Label information in accordance with 1999/45/EG**

C.f. section 16.



### 2.3. Other hazards

The product produces smoke which can cause irritation upon contact with the eyes or inhalation under conditions of long periods of exposure or incorrect use. In case of uncertainty about how the product should be used, please contact the manufacturer or the company from which the product was originally purchased.

## SECTION 3: COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

This product is composed of a mixture of several solid substances.

### 3.2. Mixtures

Note that the table shows known hazards of the ingredients in an absolutely pure form. These hazards are reduced or eliminated when mixed or diluted, c.f. Section 16d.

Constituent	Classification	Concentration
<b>AMMONIUM CHLORIDE</b>		
CAS No 12125-02-9	<i>No phys haz</i> , Acute Tox 4oral, Eye Irrit 2; H302, H319 Xn; R22 R36	36%
EC No 235-186-4		
Index No 017-014-00-8		
<b>POTASSIUM CHLORATE</b>		
CAS No 3811-04-9	Ox Sol 1, Acute Tox 4dust, Acute Tox 4oral, Aquatic Chronic 2; H271, H332, H302, H411 Xn O N; R9 R20/22 R51/53	30%
EC No 223-289-7		
Index No 017-004-00-3		

Occurrence of any impurity, stabilising additive, or individual ingredients other than the main ingredient is indicated by the chemical name and the purity level.

This product also contains substances that do not require labelling

## SECTION 4: FIRST AID MEASURES

### 4.1. Description of first aid measures

#### Generally

No special measures are considered to be necessary: if symptoms do occur however, call a doctor/physician.

#### Upon breathing in

Inhalation of chemicals from the product in normal use is not appropriate. For generated smoke: In the case of overexposure to generated smoke, move the affected person to fresh air. If symptoms persist, consult a doctor.

#### Upon contact with the eyes

Eye contact with chemicals from the product in normal use is not appropriate. For generated smoke: If symptoms occur, Flush with lukewarm water with the eye or eyes wide open. If symptoms persist, consult a doctor. In the case of a broken or tampered product, the procedure for the constituent chemicals is as follows: Flush immediately with lukewarm water for 15 - 20 min with the eye or eyes wide open. If symptoms persist, consult a doctor.

#### Upon skin contact

Skin contact with chemicals from the product in normal use is not appropriate. In case of broken or tampered products the procedure for the constituent chemicals is as follows: Wash the skin with soap and water.

#### Upon ingestion

First rinse the mouth thoroughly with a lot of water and SPIT OUT the water. Then drink at least 1/2 liter of water and call a doctor/physician. Do NOT induce vomiting.

### 4.2. Most important symptoms and effects, both acute and delayed

Information on symptoms are ambiguous or missing for this product.

## SECTION 5: FIRE-FIGHTING MEASURES

### 5.0 General measures in case of fire or imminent fire

This product can make a fire worse and should therefore be removed from the fire or imminent fire.

### 5.1. Extinguishing media

#### Recommended extinguishing agents

Extinguish with water.

#### Unsuitable extinguishing agents

Must not be extinguished with foam, powder of carbon dioxide.

## **5.2. Special hazards arising from the substance or mixture**

### **Dangerous combustion gases**

In case of fire, substances hazardous to health, or substances harmful in other respects, may be dispersed.

### **Particular risks upon fire extinguishing**

## **5.3. Advice for fire-fighters**

In case of fire use a respirator mask.

## **5.4. Other information**

### **Fire properties of the product**

Combustible solid.

### **Particular risks in case of fire**

# SECTION 6: ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

## **6.1. Personal precautions, protective equipment and emergency procedures**

Avoid discharge into sewers.

## **6.2. Environmental precautions**

## **6.3. Methods and material for containment and cleaning up**

Collect.

Residues left behind after cleaning shall be treated as hazardous waste. For further information, contact the local authority sanitisation works. Present this safety data sheet.

## **6.4. Reference to other sections**

For choice of gloves, c.f. Section 8.

# SECTION 7: HANDLING AND STORAGE

## **7.1. Precautions for safe handling**

### **7.1.1.a Recommendations specified to allow safe handling of the substance or mixture**

### **7.1.2. Advice on general occupational hygiene**

This product should be stored well out of reach of young children and kept safely apart from products intended for consumption.

When using, place the product on an incombustible base and check that the product has gone out completely before it is discarded.

## **7.2. Conditions for safe storage, including any incompatibilities**

### **7.2.d1 Ventilation requirements**

Handle in premises with modern ventilation standards, store in a dry place.

### **7.2.d2 Specific designs for storage rooms or vessels**

Must not be stored in the vicinity of combustible material.

### **7.2.d4 Packaging compatibilities**

Keep away from moisture.

Store only in the original package.

# SECTION 8: EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

## **8.1. Control parameters**

### **8.1.1. National limit values, United Kingdom**

All ingredients (cf. Section 3) lack occupational exposure limit values.

## **8.2. Exposure controls**

### **8.2.1. Appropriate engineering controls**

In terms of minimizing risks, attention must be paid to the health hazards (c.f. Sections 2, 3 and 10) of this product or any of its ingredients according to EU directives 89/391 and 98/24 and national occupational legislation.

### **8.2.2. Individual protection measures, such as personal protective equipment**

#### **8.2.2.a Eye/face protection.**

Eye protection should be worn if there is any danger of direct exposure or splashing.

#### **8.2.2.b1 Hand protection.**

Protective gloves are normally not needed due to the properties of this product, but may be necessary for other reasons, e.g. mechanical risks, temperature conditions or microbiological risks.

### 8.2.2.b2 Other skin protection.

Tvätta utsatt hud med tvål och vatten.

### 8.2.2.c Respiratory protection.

Dust filter I Ib (P2) may be required.

### 8.2.3. Environmental exposure controls

Not indicated

## SECTION 9: PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

### 9.1. Information on basic physical and chemical properties

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| a) Appearance                                    | Form: solid article<br>Colour: white |
| b) Odour   | No smell or uncharacteristic smell   |
| d) pH  | Not applicable                       |
| g) Flash point                                   | Not applicable                       |
| j) (Upper/lower flammability or explosive limits | Ignition temperature > 200 °C        |
| s) Explosive properties                          | Not applicable                       |

## SECTION 10: STABILITY AND REACTIVITY

### Stability

The product as such is stable; Note its reactivity with other substances however.

## SECTION 11: TOXICOLOGICAL INFORMATION

### 11.1.2.1a Acute toxicity

Legend to abbreviations in the table:  $w_i$  = Maximal mass fraction of the substance in the mixture;  $ATE_{exp}$  = Experimentally obtained acute toxicity range estimate;  $ATE_{pe}$  = Converted acute toxicity point estimate;  $ATE_{mixt} = 1/SUM(w_i/ATE_i)$ ;  $ATE_i$  = ATE for this ingredient.

Exposure route and unit: Oral (mg/kg bodyweight).

Ingredient	$w_i$	$ATE_{exp}$	$ATE_{pe}$	$ATE_i/w_i$
AMMONIUM CHLORIDE	0.36	1650	-	4583
POTASSIUM CHLORATE	0.3	1870	-	6233
			$ATE_{mixt}$	2641

Exposure route and unit: Dermal (mg/kg bodyweight).

Ingredient	$w_i$	$ATE_{exp}$	$ATE_{pe}$	$ATE_i/w_i$
AMMONIUM CHLORIDE	0.36		Not indicated	
POTASSIUM CHLORATE	0.3	>2000	-	>6667
			$ATE_{mixt}$	>6667

Exposure route and unit: Gases (ppmV).

Not applicable.

Exposure route and unit: Vapours (mg/l).

Not applicable.

Exposure route and unit: Dust/mist (mg/l).

Ingredient	$w_i$	$ATE_{exp}$	$ATE_{pe}$	$ATE_i/w_i$
AMMONIUM CHLORIDE	0.36		Not indicated	
POTASSIUM CHLORATE	0.3	-	2	5
			$ATE_{mixt}$	5

### 11.1.2.1b Irritation

The irritating properties of this mixture (c.f. Section 2) have been judged in accordance with the rules in 1272/2008 Annex I 3.2.3 and 3.3.3.

#### **11.1.2.1c Corrosivity**

The corrosive properties of this mixture (c.f. Section 2) have been judged in accordance with the rules in 1272/2008 Annex I 3.2.3 and 3.3.3.

#### **11.1.2.1d Sensitisation**

The sensitisation properties of this mixture (c.f. Section 2) have been judged in accordance with the rules in 1272/2008 Annex I 3.4.3, whereby possible impurities in the ingredients have been taken into account.

#### **11.1.2.1e Repeated dose toxicity**

The specific target organ toxicity - repeated exposure of this mixture (c.f. Section 2) has been judged in accordance with the rules in 1272/2008 Annex I 3.9.3, whereby possible impurities in the ingredients have been taken into account.

#### **11.1.2.1f Carcinogenicity**

The carcinogenic properties of this mixture (c.f. Section 2) have been judged in accordance with the rules in 1272/2008 Annex I 3.6.3.

#### **11.1.2.1g Mutagenicity**

The mutagenic properties of this mixture (c.f. Section 2) have been judged in accordance with the rules in 1272/2008 Annex I 3.5.3.

#### **11.1.2.1h Toxicity for reproduction**

The reproductive toxicity of this mixture (c.f. Section 2) has been judged in accordance with the rules in 1272/2008 Annex I 3.7.3.

#### **11.1.7. Information on likely routes of exposure**

Exposure must be assessed in accordance with the downstream user's chemical safety assessment according to 1907/2006 Article 37.

## SECTION 12: ECOLOGICAL INFORMATION

### **Ecotoxicity**

#### **General information**

For environmental impact, see also Section 2.

#### **Global affection herbs**

Contains substance that is toxic to herbs. Prevent discharge to soil, water and air.

### **Mobility**

#### **Other harmful effects**

#### **Effect on the local environment**

Not indicated

## SECTION 13: DISPOSAL CONSIDERATIONS

### **Waste handling for the product**

#### **General guidelines for waste handling**

The product after use is not classed as hazardous waste. Unused or broken products are classed as hazardous waste. Cf. also national waste regulations.

#### **Classification according to 2006/12**

Type of waste (LoW Code): 16 03 03 Inorganic wastes containing dangerous substances.

#### **Recycling of the product**

Not indicated

### **Transportation of waste**

Not indicated

## SECTION 14: TRANSPORT INFORMATION

This product is only supposed to be transported by road or railway and just the transport regulations ADR/RID thus apply. If other means of transport are to be used, contact the publisher of this safety data sheet.

### **Not classified as dangerous goods**

#### **14.7. Transport in bulk according to Annex II of MARPOL73/78 and the IBC Code**

Not applicable

#### **14.8 Other transport information**

Transport category: ; .

## SECTION 15: REGULATORY INFORMATION

### 15.1. Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture

Not applicable.

### 15.2. Chemical safety assessment

Assessment and chemical safety report in accordance with 1907/2006 Annex I has not yet been performed.

## SECTION 16: OTHER INFORMATION

### 16a. Indication of where changes have been made to the previous version of the safety data sheet

#### Revisions of this document

This is the first version.

### 16b. Legend to abbreviations and acronyms used in the safety data sheet

#### Full texts for Hazard Class and Category Code mentioned in section 3

<i>No phys haz</i>	Non-assigned physical hazard
<i>Acute Tox 4oral</i>	Acute toxicity (Category 4 oral)
<i>Eye Irrit 2</i>	Irritates eyes (Category 2)
<i>Ox Sol 1</i>	Oxidising solids (Verified Category 1)
<i>Acute Tox 4dust</i>	Acute toxicity (Category 4 dust)
<i>Aquatic Chronic 2</i>	Toxic to aquatic life with long lasting effects (Category Cron 2)

#### Comprehensive definition of the hazards mentioned in Section 2

##### Eye Irrit 2

If, when applied to the eye of an animal, a substance produces at least in 2 of 3 tested animals, a positive response of:

- corneal opacity  $\geq 1$  and/or
- iritis  $\geq 1$ , and/or
- conjunctival redness  $\geq 2$  and/or
- conjunctival oedema (chemosis)  $\geq 2$

calculated as the mean scores following grading at 24, 48 and 72 hours after installation of the test material, and which fully reverses within an observation period of 21 days

##### Aquatic Chronic 2

Chronic (long-term) aquatic hazard:

96 hr LC50 (for fish) 1-10 mg/l and/or

48 hr EC50 (for crustacea) 1-10 mg/l and/or

72 or 96 hr ErC50 (for algae or other aquatic plants) 1-10 mg/l and the substance is not rapidly biodegradable and/or the experimentally determined BCF  $\geq 500$  (or, if absent, the log Kow  $\geq 4$ ), unless the chronic toxicity NOECs are  $> 1$  mg/l

#### Explanations of the abbreviations in Section 14

ADR European Agreement concerning the International Transport of Dangerous Goods by Road

RID Regulations concerning the International Transport of Dangerous Goods by Rail

Transport category: ; .

### 16c. Key literature references and sources for data

#### Sources for data

Primary data for the calculation of the hazards has preferentially been taken from the official European classification list, 1272/2008 Annex I, as updated to 2012-06-01.

Where such data was lacking, on the second hand the documentation on which this official classification is based was used, e.g. IUCLID (International Uniform Chemical Information Database). On the third hand, information was used from reputable international chemical suppliers, and on the fourth hand from other available information, e.g. safety data sheets from other suppliers or information from non-profit associations, whereby the reliability of the source was judged by an expert. If, in spite of this, reliable information was not found, the hazards were judged by expert opinions based on the known properties of similar substances, and according to the principles in 1907/2006 and 1272/2008.

#### Full texts for Regulations mentioned in this Safety Data Sheet

453/2010	COMMISSION REGULATION (EU) No 453/2010 of 20 May 2010 amending Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)
1272/2008	REGULATION (EC) No 1272/2008 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006
1999/45/EG	DIRECTIVE 1999/45/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 31 May 1999 concerning the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States

- relating to the classification, packaging and labelling of dangerous preparations
- 89/391 COUNCIL DIRECTIVE (89/391/EEC of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work
- 98/24 COUNCIL DIRECTIVE 98/24/EC of 7 April 1998 on the protection of the health and safety of workers from the risks related to chemical agents at work (fourteenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC)
- 1907/2006 REGULATION (EC) No 1907/2006 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC Article 37 COMMISSION REGULATION (EC) No 552/2009 of 22 June 2009 amending Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards Annex XVII
- 2006/12 DIRECTIVE 2006/12/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 5 April 2006 on waste

**16d. Methods of evaluating information referred to in 1272/2008 Article 9 which was used for the purpose of classification**

The calculation of the hazards of this mixture has been performed as an evaluation by applying a weight of evidence determination using expert judgement in accordance with 1272/2008 Annex I, weighing all available information having a bearing on the determination of the hazards of the mixture, and in accordance with 1907/2006 Annex XI.

**16e. List of relevant R phrases, hazard statements, safety phrases and/or precautionary statements**

**Full text for risk phrases mentioned in section 3**

- R22 Harmful if swallowed  
 R36 Irritating to eyes  
 R9 Explosive when mixed with combustible material  
 R20/22 Harmful by inhalation and if swallowed  
 R51/53 Toxic to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment

**Full texts for hazard statements mentioned in section 3**

- H302 Harmful if swallowed  
 H319 Causes serious eye irritation  
 H271 May cause fire or explosion; strong oxidizer  
 H332 Harmful if inhaled  
 H411 Toxic to aquatic life with long lasting effects

**16f. Advice on any training appropriate for workers to ensure protection of human health and the environment**

**Other relevant information**

**Label information in accordance with 1999/45/EG**

Hazard symbol



Harmful



Dangerous for the environment

**R-phrases**

- R20/22 Harmful by inhalation and if swallowed  
 R36 Irritating to eyes  
 R51/53 Toxic to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment

**S-phrases**

- S22 Do not breathe dust  
 S25 Avoid contact with eyes  
 S26 In case of contact with eyes, rinse immediately with plenty of water and seek medical advice  
 S29 Do not empty into drains  
 S37 Wear suitable gloves  
 S46 If swallowed, seek medical advice immediately and show this container or label



YARAPRAXAIR

# SIKKERHETS DATABLAD

Side : 1 / 9

Utgave nr : 1

Dato : 3 / 2 / 2013

Erstatter : 0 / 0 / 0

## Dinitrogenoksid (Lystgass)

YPX093A



2.2 : Ikke brennbare, ikke giftige gasser



5.1 : Oksiderende stoffer

**Fare**



### SEKSJON 1. Identifikasjon av stoffet/blandingen og selskapet / foretaket

#### 1.1. Produktidentifikator

Handelsnavn : Dinitrogenoksid (Lystgass)  
Sikkerhetsdatablad nr : YPX093A . (Erstatter EIGA093A, 24.02.2010.)  
Kjemisk navn : Dinitrogenoksid  
CAS nr :10024-97-2  
EC nr :233-032-0  
EC Index :---  
Registreringsnummer. : Registreringstidsfristen er ikke utløpt.  
Kjemisk formel : N2O

#### 1.2. Relevant identifiserte bruksområder for stoffet eller blandingen og bruk det frarådes mot

Relevante identifiserte bruksområder : Industrielt og professionelt. Foreta en risikovurdering før bruk.  
Drivgass. Test gass / Kalibreringsgass. Laboratoriebruk. Kjemisk reaksjon / Syntese.  
Medisinsk bruk  
Til produksjon av elektronikk/fotoelektriske komponenter.  
Kontakt leverandør for informasjon om bruksområder.  
Bruk som frarådes : Ikke pust inn produktet med overlegg.

#### 1.3. Nærmere opplysninger om leverandøren av sikkerhetsdatabladet

Bedriftsidentifikasjon : Yara Praxair AS  
Postboks 23 Haugenstua,  
N-0915 Oslo, NORWAY  
Tel. +47 04277  
E-mail: norge@yarapraxair.com

#### 1.4. Telefonnummer for nødtilfelle

Nødtelefon : 22 59 13 00 [24 t - Giftinformasjonssentralen]  
48 00 50 00 [24 t - Beredskapstelefon Yara Praxair]

### SEKSJON 2. Fareidentifikasjon

#### 2.1. Klassifisering av stoffet eller blandingen

##### Fareklasse og kategori Forordning EC 1272/2008 (CLP)

• Fysiske farer : Oksiderende gasser - Kategori 1 - Fare - (CLP : Ox. Gas 1) - H270  
Gasser under trykk - Liquefied Gas - Advarsel - (CLP : Press. Gas) - H280

##### Klassifisering i henhold til EC 67/548 eller EC 1999/45

: O; R8

Ikke inkludert i Annex VI.

#### Yara Praxair AS

Postboks 23 Haugenstua, N-0915 Oslo, NORWAY  
Tel. +47 04277  
E-mail: norge@yarapraxair.com



YARAPRAXAIR

# SIKKERHETS DATABLAD

Side : 2 / 9

Utgave nr : 1

Dato : 3 / 2 / 2013

Erstatter : 0 / 0 / 0

## Dinitrogenoksid (Lystgass)

YPX093A

### SEKSJON 2. Fareidentifikasjon / ...

#### 2.2. Merkingselementer

Merking i henhold til Forordning EC 1272/2008 (CLP)

• Farepiktogrammer



• Kode for farepiktogrammer

: GHS03 - GHS04

• Varselsord

: Fare

• Faresetninger

: H270 - Kan forårsake eller forsterke brann; oksiderende.  
H280 - Inneholder gass under trykk; kan eksplodere ved oppvarming.

• Sikkerhetssetninger

- Forebygging

: P244 - Reduksjonsventiler skal holdes fri for fett og olje.  
P220 - Må ikke brukes/oppbevares i nærheten av tøy /.../brennbare materialer.

- Tiltak

: P370+P376 - Ved brann: Stopp lekkasje dersom dette kan gjøres på en sikker måte.

- Lagring

: P403 - Oppbevares på et godt ventilert sted.

#### 2.3. Andre farer

: Kvelende ved høye konsentrasjoner.  
Kontakt med væsken kan forårsake forbrenning/frostskader.

### SEKSJON 3. Sammensetning / opplysning om bestanddeler

#### 3.1. Stoff / 3.2. Blanding

Stoff.

Bestanddel-Navn	Innhold	CAS nr EC nr EC Index	Klassifisering(DSD)	Klassifisering(CLP)
Dinitrogenoksid	: 100 %	10024-97-2 233-032-0 * 2	O, R8	Ox. Gas 1 (H270) Press. Gas Liquefied (H280)

Inneholder ingen komponenter eller forurensninger som påvirker klassifiseringen av produktet.

\* 1: Listet i Annex IV / V REACH, fritatt for registrering.

\* 2: Registreringstidsfristen er ikke utløpt.

\* 3: Registrering ikke påkrevd. Importert eller produsert mengde <1 tonn/år.

Komplett tekst av R-setninger se kapittel 16. Komplett tekst av H-erklæringer se kapittel 16.

### SEKSJON 4. Førstehjelpstiltak

#### 4.1. Beskrivelse av førstehjelpstiltak

- Innånding : Flytt den skadede ut i frisk luft. Benytt pusteutstyr med egen luftbeholder. Hold pasienten varm og i ro. Tilkall lege. Benytt kunstig åndedrett hvis pusten opphører.
- Hudkontakt : Ved væskespill - spyl med vann i minst 15 minutter.  
Ved frostskafer skyl med vann i minst 15 minutter. Anvend sterilt kompress. Søk medisinsk hjelp.
- Øyekontakt : Spyl øynene øyeblikkelig grundig med vann i minst 15 minutter.
- Svelging : Inntak gjennom munnen er ikke ansett for å være en potensiell eksponeringsvei.

#### 4.2. Viktigste symptomer og virkninger, både akutte og forsinkede

: Høye konsentrasjoner kan forårsake kvelning. Symptomene kan omfatte lammelse/ bevisstløshet. Kvelning kan oppstå uten forvarsel.  
Kan forårsake narkotisk virkning ved lave konsentrasjoner. Symptomene kan omfatte

#### Yara Praxair AS

Postboks 23 Haugenstua, N-0915 Oslo, NORWAY

Tel. +47 04277

E-mail: norge@yarapraxair.com





YARAPRAXAIR

## SIKKERHETSDATABLAD

Side : 3 / 9

Utgave nr : 1

Dato : 3 / 2 / 2013

Erstatter : 0 / 0 / 0

**Dinitrogenoksid (Lystgass)**

**YPX093A**

### SEKSJON 4. Førstehjelpstiltak /...

svimmelhet, hodepine, kvalme og nedsatt koordineringsevne .

#### 4.3. Indikasjon på om øyeblikkelig legehjelp eller spesiell behandling er nødvendig

: Ingen.

### SEKSJON 5. Brannslukkingstiltak

#### 5.1. Brannslukningsmidler

- Egnede slukningsmidler : Dispergert vann eller vanntåke.
- Uegneede brannslukningsmidler : Ikke bruk vannslange med konsentrert vannstråle til slukking.

#### 5.2. Spesielle farer som stoffet eller blandingen kan medføre

- Spesifikke faremomenter : Ved påvirkning av brann kan flaskene revne/eksplosere. Underholder forbrenning.
- Farlige forbrenningsprodukter : Ved brann kan følgende giftige og/ eller korrosive damper bli dannet ved termisk spalting : Nitrogenoksid/nitrogendioksid.

#### 5.3. Anvisninger for brannmannskaper

- Spesifikke forholdsregler : Hvis mulig, stopp utstrømming av produktet. Koordiner slukkearbeid i forhold til brann i omgivelsene. Eksponering mot brann eller strålevarme kan føre til at beholderen revner. Kjøl ned beholdere med vann fra sikker posisjon. Unngå at forurenset brannslukningsvann renner ned i kloakk og avløpssystemer. Bruk dispergert vann/vanntåke for å dempe røygassen om mulig.
- Spesielt beskyttelsesutstyr for brannfolk : Benytt gasstett kjemikaliedress og pusteluftutstyr med egen luftflaske. Standard NS-EN 137 - Åndedrettsvern - Selvforsynt pusteutstyr med åpent kretsløp og luft under trykk. NS-EN 943-2: Vernetøy mot flytende og gassformige kjemikalier, innbefattet flytende aerosoler og faste partikler - Del 2: Funksjonskrav for gasstett (type 1) vernetøy for redningsstyrker.

### SEKSJON 6. Tiltak ved utilsiktede utslipp

#### 6.1. Personlige forholdsregler, verneutstyr og nødprosedyrer

- : Forsøk å stoppe utslippet. Overvåk konsentrasjonen i utslippet produkt. Bær pusteutstyr med egen luftflaske ved entring av området hvis det ikke er bevist at det er trygt. Evakuer området. Sikre tilstrekkelig luftventilasjon. Fjern tennkilder. Unngå at det kommer ned i kloakksystemet, kjellere og groper, eller andre steder hvor en oppkonsentrering kan være farlig.

#### 6.2. Miljømessige forholdsregler

- : Forsøk å stoppe utslippet.

#### 6.3. Metoder og materialer for oppsamling og opprensing

- : Sørg for at det luftes godt.

#### 6.4. Referanse til andre seksjoner

- : Se også seksjon 8 og 13.

### Yara Praxair AS

Postboks 23 Haugenstua, N-0915 Oslo, NORWAY

Tel. +47 04277

E-mail: norge@yarapraxair.com



YARAPRAXAIR

## SIKKERHETS DATABLAD

Side : 4 / 9

Utgave nr : 1

Dato : 3 / 2 / 2013

Erstatter : 0 / 0 / 0

**Dinitrogenoksid (Lystgass)**

**YPX093A**

### SEKSJON 7. Håndtering og lagring

#### 7.1. Forholdsregler for sikker håndtering

- Sikker bruk av produktet** : Kun personer som har erfaring og som har fått relevant opplæring bør håndtere komprimerte gasser.  
Stoffet må håndteres i forhold til gjennomarbeidede hygiene- og sikkerhetsprosedyrer.  
Benytt bare skikkelig spesifisert utstyr som passer for dette stoffet, dets trykk og temperatur.  
Kontakt din gassleverandør hvis det er tvil.  
Bruk ikke olje eller fett.  
Ikke røyk ved håndtering av dette stoffet.  
Hold utstyret fritt for olje og fett.  
Sjekk at hele gassanlegget er kontrollert med hensyn på lekkasjer eller at det er underlagt periodisk kontroll.  
Unngå tilbakestrøm av vann, syrer og baser.  
Vurder trykkavlastingsutstyr i forbindelse med gassinstallasjoner.
- Sikker håndtering av gassflasken** : Se leverandørens instruksjoner for håndtering av beholdere.  
Åpne ventilen sakte for å unngå trykksjokk.  
Tillat ikke tilbakeslag inn i beholderen.  
Beskytt gassflasker mot fysisk skade. Flasker skal ikke slepes, veltes eller utsettes for slag eller støt.  
Bruk egnet lralle for å transportere gassflasker også over korte avstander.  
Behold ventilhetten på plass inntil gassflasken er forsvarlig sikret mot å velte. Deretter tas flasken i bruk.  
Hvis det oppstår problemer med betjening av flaskeventil skal flasken settes til side og leverandør kontaktes.  
Forsøk aldri å modifisere eller reparere beholderens ventiler eller sikkerhetsavblåsningsutstyr.  
Skadede ventiler rapporteres umiddelbart til gassleverandør.  
Hold ventiltilkoblingen ren og fri for urenheter, gjelder særlig olje og vann.  
Når blindmutter følger med beholderen skal denne monteres på ventilen umiddelbart etter frakobling fra forbruksutstyr.  
Steng beholderens ventil etter bruk og når den er tom ,selv om beholderen fortsatt er tilknyttet forbruksutstyr.  
Forsøk aldri å overføre gass fra en beholder til en annen.  
Bruk aldri åpen flamme eller elektrisk oppvarming for å øke trykket i en gassbeholder.  
Etiketter og merking som gassleverandøren har påsatt gassflasken for å identifisere innholdet må ikke fjernes.

#### 7.2. Betingelser for sikker oppbevaring, herunder eventuell inkompatibilitet

- : Oppbevar beholderen i et godt ventilert rom og med en temperatur på under 50°C.  
Oppbevares adskilt fra brennbare gasser og andre brennbare stoffer. Beholdere lagres stående forsvarlig sikret mot å velte. Lagrede beholdere bør sjekkes periodisk med hensyn på lekkasjer og generell tilstand. Ventilhetter og blindmuttere bør være montert. Beholdere skal lagres på områder der det ikke er brannfare. Varmekilder og tennkilder må unngås.  
Vurder relevante lover, forskrifter og lokale regelverk i forbindelse med lagring av beholdere.  
Beholdere bør ikke lagres under forhold som kan medføre korrosjon. Oppbevares unna brennbar material.

#### 7.3. Spesielle bruksområder

- : Ingen.

### Yara Praxair AS

Postboks 23 Haugenstua, N-0915 Oslo, NORWAY

Tel. +47 04277

E-mail: norge@yarapraxair.com



YARA PRAXAIR

## SIKKERHETS DATABLAD

Side : 5 / 9

Utgave nr : 1

Dato : 3 / 2 / 2013

Erstatter : 0 / 0 / 0

### Dinitrogenoksid (Lystgass)

YPX093A

#### SEKSJON 8. Eksponeringskontroll / Personlig beskyttelse

##### 8.1. Kontrollparametre

###### Administrative normer

Dinitrogenoksid : Grenseverdi (NO)- 8 timer-[ppm] : 50  
: Grenseverdi (NO)-8 timer-[mg/m<sup>3</sup>] : 90

###### DNEL: Avledet nulleffektsnivå. (Arbeidstaker)

: Ingen data tilgjengelig.

###### PNEC: Beregnet nulleffektskonsentrasjon.

: Ingen data tilgjengelig.

##### 8.2. Eksponeringskontroll

8.2.1. Hensiktsmessige tekniske tiltak : Rørsystemer og utstyr bør regelmessig sjekkes for lekkasje. Hold konsentrasjonen godt under administrativ norm for forurensning i arbeidsatmosfære. Gassdetektorer bør brukes når oksyderende gasser kan bli sluppet til friluft. Sørg for tilstrekkelig generell og lokal avgass ventilering. Vurder å bruke arbeidstillatelsessystem, for eksempel i forbindelse med vedlikeholdsarbeid.

8.2.2. Personlig verneutstyr : Personlig verneutstyr som tilfredstiller EN / ISO standarder bør velges. Risikoanalyse bør gjennomføres og dokumenteres for hver arbeidsplass for å vurdere involvert risiko og for å velge passende personlig verneutstyr. Følgende anbefalinger bør vurderes.

• Øye-/ansiktsvern : Bruk vernebriller med sidebeskyttelse eller kjemikaliebrillerved overføring av væske mellom beholdere og ved åpning av væskefylte koblinger. Bruk vernebriller med sidebeskyttelse. Standard NS-EN 166 - Øyevern - Spesifikasjoner.

###### • Hudvern

###### - Håndvern

: Bruk arbeidshansker ved håndtering av gassbeholdere. Standard NS-EN 388 - Vernehansker mot mekanisk påførte skader.

###### - Annet

: Bruk vernefottøy ved håndtering av emballasje. Standard NS-EN ISO 20345 - Personlig verneutstyr - Vernesko. Vurder bruk av flammesikkert arbeidstøy. Standard NS-EN ISO 14116 - Vernetøy.

###### • Andedrettsvern

: Ikke nødvendig.

###### • Termiske farer

: Ikke nødvendig.

###### 8.2.3. Kontroll med miljømessig eksponering

: Ta hensyn til lokale retningslinjer i forhold til utslipp til atmosfære. Se metoder i seksjon 13 for håndtering av avgass.

#### SEKSJON 9. Fysiske og kjemiske egenskaper

##### 9.1. Opplysninger om grunnleggende fysiske og kjemiske egenskaper

###### Utseende

Fysisk tilstand ved 20°C / 101.3kPa : Gass.

Farge : Fargeløst.

Lukt : Søtaktig.

Dårlige varslingsegenskaper ved høy konsentrasjon.

Luktgrense : Luktgrensen er subjektiv og utilstrekkelig for å varsle om overeksponering.

pH-verdi : Ikke anvendelig.

Molekylvekt [g/mol] : 44

Smeltepunkt [°C] : -90.81

Kokepunkt [°C] : -88.5

Kritisk temperatur [°C] : 36.4

#### Yara Praxair AS

Postboks 23 Haugenstua, N-0915 Oslo, NORWAY

Tel. +47 04277

E-mail: norge@yarapraxair.com



YARAPRAXAIR

## SIKKERHETS DATABLAD

Side : 6 / 9

Utgave nr : 1

Dato : 3 / 2 / 2013

Erstatter : 0 / 0 / 0

### Dinitrogenoksid (Lystgass)

YPX093A

#### SEKSJON 9. Fysiske og kjemiske egenskaper /...

Flammepunkt [°C]	: Ikke relevant for gasser og gassblandinger.
Fordampningshastighet (eter=1)	: Ikke relevant for gasser og gassblandinger.
Brennbarhetsområde	: Ikke brannfarlig.
Damptrykk [20°C]	: 50.8 bar
Relativ tetthet, gass (luft=1)	: 1.5
Relativ tetthet, væske (vann=1)	: 1.2
Løselighet i vann [mg/l]	: 2.2
Fordelingskoeffisient n-octanol/vann [log Kow]	: Ikke relevant for uorganiske gasser.
Selvantennelsestemperatur [°C]	: Ikke anvendelig.
Viskositet ved 20°C [mPa.s]	: Ikke anvendelig.
Eksplosive egenskaper	: Ikke anvendelig.
Oksiderende egenskaper	: Oksiderende stoff.
- Koeffisient, oksygenekvivalent (Ci)	: 0.6

#### 9.2. Andre opplysninger

Andre data	: Gass/damp er tyngre enn luft. Kan samles i lukkede områder, spesielt ved eller under bakkenivå.
------------	---

#### SEKSJON 10. Stabilitet og reaktivitet

##### 10.1. Reaktivitet

: Ingen fare for reaktivitet ut over det som er beskrevet i punktene nedenfor.

##### 10.2. Kjemisk stabilitet

: Dinitrogenoksidspaltingen er irreversibel og eksoterm, noe som fører til en betydelig trykkøkning.  
Stabil under normale forhold. Ved temperaturer på over 575 °C og ved atmosfærisk trykk, spaltes dinitrogenoksid til nitrogen og oksygen. Ved tilstedeværelse av katalysatorer (f.eks. halogenprodukter, kvikksølv, nikkel, platina) øker dekomponeringshastigheten, og dekomponering kan skje ved enda lavere temperaturer. Trykksatt dinitrogenoksid kan dessuten spaltes ved temperaturer fra og med 300 °C.

##### 10.3. Risiko for farlige reaksjoner

: Oksiderer voldsomt organisk materiale.

##### 10.4. Forhold som skal unngås

: Varme.

##### 10.5. Materialer som skal unngås

: Kan reagere voldsomt med brennbare stoffer.  
Kan reagere voldsomt med reduserende stoffer.  
Hold utstyret fritt for olje og fett.  
For øvrig informasjon vedrørende kompatibilitet se ISO 11114.

##### 10.6. Farlige nedbrytningsprodukter

: Farlige nedbrytningsprodukter vil ikke forekomme ved normal lagring og normal bruk.

#### Yara Praxair AS

Postboks 23 Haugenstua, N-0915 Oslo, NORWAY

Tel. +47 04277

E-mail: norge@yarapraxair.com



**YARAPRAXAIR**

## SIKKERHETS DATABLAD

Side : 7 / 9

Utgave nr : 1

Dato : 3 / 2 / 2013

Erstatter : 0 / 0 / 0

### Dinitrogenoksid (Lystgass)

**YPX093A**

#### SEKSJON 11. Toksikologiske opplysninger

##### 11.1. Opplysninger om toksikologiske virkninger

Akutt toksisitet	: Dette produktet har ingen kjent giftvirkning.
Irritasjon/etseskader på hud	: Ingen kjente effekter fra dette produkt.
Alvorlig øyeskade/irritasjon	: Ingen kjente effekter fra dette produkt.
Luftveis- eller hudsensibilisering	: Ingen kjente effekter fra dette produkt.
Kreftfremkallende effekt	: Ingen kjente effekter fra dette produkt.
Arvestoffskadelig egenskap	: Ingen kjente effekter fra dette produkt.
Reproduktiv giftighet	: Ingen kjente effekter fra dette produkt.
Enkel STOT eksponering	: Ingen kjente effekter fra dette produkt.
Gjentatt STOT eksponering	: Ingen kjente effekter fra dette produkt.
Aspirasjonsfare	: Ikke relevant for gasser og gassblandinger.
Annet	: Gassen kan være giftig ved at det fremkaller kvelning ved å fortrenge oksygen fra luften.

#### SEKSJON 12. Økologiske opplysninger

##### 12.1. Toksisitet

: Ingen data tilgjengelig.

##### 12.2. Persistens og nedbrytbarhet

: Ikke relevant for uorganiske gasser.

##### 12.3. Bioakkumulasjonspotensial

: Ingen data tilgjengelig.

##### 12.4. Mobilitet i jord

: På grunn av høy flyktighet er det lite sannsynlig at produktet skal forårsake jord- eller vannforurensning.

##### 12.5. Resultater av PBT- og vPvB-vurdering

: Ikke klassifisert som persistent, svært persistent, bioakkumulerende eller toksisk.

##### 12.6. Andre skadevirkninger

Effekt på ozonlaget	: Ingen.
Global oppvarmningsfaktor [CO <sub>2</sub> =1]	: 298
Effekt på global oppvarming.	: Utslipp i store mengder kan bidra til drivhuseffekten.

#### SEKSJON 13. Instruksjoner ved disponering

##### 13.1. Metoder for avfallsbehandling

: Store utslipp til atmosfæren bør unngås.  
Må ikke slippes ut der det fare for at en akkumulering kan bli farlig.  
Se EIGA dokument Doc.30/10 "Disposal of Gases, downloadable at <http://www.eiga.org> for mer veiledning i forhold til avhending.  
Vær sikker på at utslippsgrenser gitt i lokale regelverk eller tillatelser ikke overskrides.  
: 16 05 04: Gasser i trykkbeholdere (inkludert haloner) som inneholder farlige stoffer.

Liste over farlig avfall koder (fra  
Kommissjonsvedtak 2001/118/EF)

##### 13.2. Annen informasjon

: Ingen.

#### Yara Praxair AS

Postboks 23 Haugenstua, N-0915 Oslo, NORWAY

Tel. +47 04277

E-mail: [norge@yarapraxair.com](mailto:norge@yarapraxair.com)



YARAPRAXAIR

## SIKKERHETS DATABLAD

Side : 8 / 9

Utgave nr : 1

Dato : 3 / 2 / 2013

Erstatter : 0 / 0 / 0

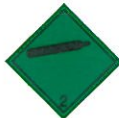
### Dinitrogenoksid (Lystgass)

YPX093A

#### SEKSJON 14. Transportopplysninger

UN-nr. : 1070

Fareseddel ADR, IMDG, IATA



: 5.1 : Oksiderende stoffer  
2.2 : Ikke brennbare, ikke giftige gasser

#### Landtransport (ADR/RID)

Farenummer : 25

Varenavn og beskrivelse : DINITROGENOKSID

Klasse(r) : 2

Klassifiseringskode : 2 O

Pakningsinstruks(er) : P200

Tunnelrestriksjon : C/E : Passasje forbudt i tunneler av kategori C, D og E når transportert i tank; Passasje forbudt i tunneler av kategori E når transportert i annet enn tank.

Miljøfarer : Ingen.

#### Sjøtransport (IMDG)

Proper shipping name : NITROUS OXIDE

Class : 2.2

Emergency Schedule (EmS) - Fire : F-C

Emergency Schedule (EmS) - Spillage : S-W

Packing instruction : P200

IMDG-Marine pollutant : No

#### Air transport (ICAO-TI / IATA-DGR)

Proper shipping name (IATA) : NITROUS OXIDE

Class : 2.2

Passenger and Cargo Aircraft : Allowed.

Packing instruction - Passenger and Cargo Aircraft : 200

Cargo Aircraft only : Allowed.

Packing instruction - Cargo Aircraft only : 200

#### Spesielle forsiktighetstiltak for bruker

: Unngå transport på kjøretøyer der lasterommet ikke er skilt fra førerhuset.  
Sikre at sjåføren er klar over den potensielle faren ved lasten og vet hva som må gjøres ved et uhell eller i et nødstilfelle.  
Før transport av produktbeholdere :  
- Påse at beholderne er godt sikret.  
- Flaskeventilen er stengt og at den ikke lekker.  
Påse at ventilens blindplugg/tetningsplugg (hvis det er nødvendig) er korrekt montert.  
Påse at ventilbeskyttelsen (når det medfølger) er korrekt påsatt.  
- Tilstrekkelig ventilasjon.

Transport in bulk according to Annex II of MARPOL 73/78 and the IBC Code : Ikke anvendelig.

#### Yara Praxair AS

Postboks 23 Haugenstua, N-0915 Oslo, NORWAY

Tel. +47 04277

E-mail: norge@yarapraxair.com



**YARAPRAXAIR**

## SIKKERHETS DATABLAD

Side : 9 / 9

Utgave nr : 1

Dato : 3 / 2 / 2013

Erstatter : 0 / 0 / 0

**Dinitrogenoksid (Lystgass)**

**YPX093A**

### SEKSJON 15. Regelverksmessige opplysninger

#### 15.1. Sikkerhets-, helse og miljøbestemmelser/lovegivning som gjelder spesielt for stoffet eller blandingen

##### EU-lovgivning

Restriksjoner : Ingen.  
Seveso regulation 96/82/EC : Dekket.

##### Nasjonal lovgivning

Nasjonal lovgiving : Se til at alle nasjonale/lokale bestemmelser blir fulgt opp.

#### 15.2. Kjemikaliesikkerhetsvurdering

: Dette produkt er enten unntatt fra REACH, omsettes under minimum volum for krav om ""Rapport om kjemikaliesikkerhet"" eller har ikke vært objekt for en ""vurdering av kjemikaliesikkerhet"" ennå.

### SEKSJON 16. Andre opplysninger

Indikasjon på endringer : Reviderte sikkerhetsdatablad i overensstemmelse med EU-kommisjonens regelverk No 453/2010.

Råd ang. opplæring : Faren for kvelning blir ofte undervurdert og må understrekes ved opplæring av operatører.

Liste med full tekst av R-setninger i seksjon 3. : R08 : Brannfarlig ved kontakt med brennbare stoffer.

Liste med full tekst av H-setninger i seksjon 3. : H270 - Kan forårsake eller forsterke brann; oksiderende.  
H280 - Inneholder gass under trykk; kan eksplodere ved oppvarming.

Ytterligere opplysninger : Dette sikkerhetsdatabladet er utarbeidet i samsvar med anvendelige EU-direktiver, og gjelder for alle land som har fortolket direktivene i sine nasjonale lover.

ANSVARFRASKRIVELSE : Detaljer i dette dokumentet er vurdert til å være korrekt ved utgivetidspunktet. Det tas ikke ansvar for evt. skade eller uhell som kan oppstå som følge av bruk av dette dokumentet. Før dette produktet tas i bruk i en ny prosess eller eksperiment, må en grundig studie av materialkompatibilitet og sikkerhet være utført.

Dokumentslutt

#### Yara Praxair AS

Postboks 23 Haugenstua, N-0915 Oslo, NORWAY

Tel. +47 04277

E-mail: norge@yarapraxair.com