



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

Tormod Aurlien

Vindpåvirkning i luftinfiltrasjonsberegning

Wind impact in air infiltration calculation

Nina Johanne Brænden

Byggeteknikk og arkitektur

Fakultet for realfag og teknologi

1 Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Instituttet for matematiske realfag og teknologi (REALTEK), og markerer avslutningen på det 5-årige masterstudiet Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven ble skrevet våren 2019.

Jeg har alltid vært glad i å bruke matematikk som metode for å studere og finne svar på problemer. Gjennom arbeidet med denne oppgaven har jeg fått brukt matematikk i en praktisk sammenheng. Bygningsfysikk er noe jeg har fått økt interesse for etter å ha tilegnet meg mer kunnskap gjennom studiet. Hvordan fysiske lover er med på å utforme bygg er noe jeg synes er spennende. Gjennom teori, egne målinger og studering av forskriftskrav har jeg satt meg inn i om vind er en faktor som burde tas med i prosjektering, kontroll og infiltrasjonsberegning av bygg.

Jeg ønsker spesielt å takke min hovedveileder, professor og sivilingeniør Tormod Aurlien. Din smittende entusiasme og kunnskap rundt fagfeltet lufttetthet har bidratt til god motivasjon og hjelp gjennom forskningen. Jeg vil også takke Stergiani Charisi for hjelp til anskaffelse og bruk av måleutstyr.

Tusen takk til min samboer Simen Seiersten og svigerfar Nils Seiersten, for kritiske spørsmål som har bidratt til å løfte denne oppgaven. Takk til min tante Elin Brenden og kusine Ida Brenden, for korrekturlesing. Til slutt vil jeg takke mine medstudenter for de morsomme stundene vi har hatt sammen i alle disse årene og nå gjennom fullføringen av masteroppgaven.

Ås, mai 2019

Nina Johanne Brænden

2 Sammendrag

Infiltrasjon av kald luft gjennom utettheter i bygningskroppen er et viktig bidrag i energiforbruket i bygninger. Forskriftene stiller krav til lufttetthet og energibehov i bygg, og har med årene blitt strengere. I møte med forskriftskravene er det interessant å etablere en bedre forståelse av fenomenet luftinfiltrasjon og hvordan det blir målt.

Den dominerende drivkraften for luftinfiltrasjon er trykkforskjeller over bygningskroppen som skapes av vindtrykk og oppdriftskrefter. Allikevel blir lufttetthet i dag målt med en kunstig trykksettingsmetode der effektene av vindtrykk og oppdriftskrefter blir eliminert. Metoden resulterer i et lekkasjetall som definerer hvor lufttett et bygg er, og lekkasjetallet brukes videre i energiberegning.

Fokuset i denne oppgaven har derfor vært å finne ut om vindpåkjenninger burde tas med i infiltrasjonsberegning av bygg, og hvordan vindpåkjenningene bør implementeres i beregningen. Det har blitt utført målinger på et modulbygg i Ås hvor målingene har dannet grunnlag for å studere og beregne infiltrasjon. Målingene har blitt brukt til å utarbeide to infiltrasjonsmodeller som tar hensyn til vindpåkjenninger.

I første rekke ble det utført tetthetsmålinger som dannet grunnlaget for å beregne infiltrasjon i infiltrasjonsmodellene. Det ble målt trykkdifferanse over modulbyggets fasader som sammen med tetthetsmålingene resulterte i infiltrasjonsmodell I. Værdata i form av vindhastighet og retning fra nærmeste værstasjonen ble innhentet, og sammen med tetthetsmålingene resulterte i infiltrasjonsmodell II.

Parallelt med måling av trykkdifferanse over fasadene og innhenting av værdata ble det utført sporgassmålinger med CO₂ som ga reell infiltrasjon. Sporgassmålingene ble sammenliknet med infiltrasjonsmodellene for å undersøke hvor godt beregnet infiltrasjon i infiltrasjonsmodell I og II stemte med reell infiltrasjon.

Resultatene fra sporgassmåling, infiltrasjonsmodell I og II viste økning i infiltrasjon ved økende vind fra nord og sør. Økende vind fra øst og vest viste også økning i infiltrasjon, men i mindre grad. Infiltrasjonsmodell I, som baseres på målt trykkdifferanse, viste seg å stemme ganske godt med sporgassmålingene. Det viste seg at infiltrasjonsmodell II, som baserer seg på vinddata, stemte i mindre grad med sporgassmålingene enn infiltrasjonsmodell I.

3 Abstract

Infiltration of cold air through leaks in the building envelope is an important part of a building's consumption of energy. Air infiltration and energy requirements in buildings are regulated by a set of requirements, and these have become stricter over the last years. In light of these regulatory requirements, it is important to establish a better understanding of air infiltration and how this is measured.

Air infiltration is driven by variations in pressure across the building envelope, and is created by wind pressure and buoyancy forces. Air infiltration is measured with an artificial pressure-setting method in which the effects of wind pressure and buoyancy forces are eliminated. The method produces a leakage number that characterizes the air permeability of the building, and the leakage number is further used in calculation of energy.

The focus of this thesis has been to establish whether climate data should be included in the calculation of air infiltration in buildings, and how it should be implemented. As a part of the project, measurements have been carried out in a modular building in Ås. I have used the results of these measurements as a basis for my study, and calculations of air infiltration.

The results of the measurements have been used to create two air infiltration models. To ascertain the module's airflow characteristics, the fan-pressurization method has been used. Differences in pressure across the module's facades were measured and together with the airflow characteristics resulted in infiltration model I. Climate data from a nearby weather station was obtained, and together with the module's airflow characteristics resulted in infiltration model II. Simultaneously, as pressure difference was measured and weather data was registered, measurements with tracer gas were carried out and resulted in real infiltration. The tracer gas measurements were compared to the infiltration models to determine how well calculated infiltration matched with real infiltration.

The result of the tracer gas measurement, as well as infiltration model I and II, revealed an increase in air infiltration that corresponds with increased southern and northern wind. Increasing wind from east and west gave a less significant increase in infiltration. Infiltration model I, which is based on pressure differences, proved to be in accord with the tracer gas measurements. It turned out that infiltration model II, which is based on wind data, did not match as well with the tracer gas measurements as infiltration model I.

4 Innholdsfortegnelse

1	Forord	I
2	Sammendrag.....	III
3	Abstract.....	V
4	Innholdsfortegnelse.....	VII
4.1	Figurliste	X
4.2	Tabelliste.....	XII
4.3	Begrepsavklaring	XIII
4.4	Symbolliste	XIV
5	Innledning.....	1
5.1	Bakgrunn.....	1
5.2	Problemstilling.....	1
5.3	Avgrensning.....	2
5.4	Disposisjon.....	3
6	Teori.....	5
6.1	Hva er lufttetthet?	5
6.1.1	<i>Gjennomblåsning og anblåsning.....</i>	<i>5</i>
6.1.2	<i>Drivkrefter</i>	<i>6</i>
6.1.3	<i>Konsekvenser av luftlekkasjer</i>	<i>10</i>
6.2	Luftlekkasjemåling	11
6.2.1	<i>Krav til lekkasjetall</i>	<i>11</i>
6.2.2	<i>Hvorfor måle luftlekkasjer?.....</i>	<i>11</i>
6.2.3	<i>Måling av luftlekkasjer: Differansetrykkmetoden</i>	<i>11</i>
6.3	Luftlekkasjebidrag i energiberegning av bygninger	14
6.3.1	<i>Krav til samlet energibehov</i>	<i>14</i>
6.3.2	<i>Beregning av varmetapstall for infiltrasjon</i>	<i>15</i>
6.4	Sporgassmåling og CO ₂	16
7	Metode.....	19
7.1	WEEE modul	20
7.2	Måleutstyr og programmer	23
7.2.1	<i>Blowerdoor 4.1</i>	<i>23</i>
7.2.2	<i>TECTITE</i>	<i>23</i>
7.2.3	<i>Sensirion.....</i>	<i>24</i>
7.2.4	<i>LabVIEW 2010</i>	<i>24</i>

7.2.5	<i>Rotronic CP11</i>	25
7.2.6	<i>Rotronic SW2.1</i>	25
7.2.7	<i>Vifte</i>	25
7.3	Gjennomføring av målinger	26
7.3.1	<i>Tetthetsmåling</i>	28
7.3.2	<i>Trykkdifferanse over fasadene</i>	29
7.3.3	<i>Sporgassmåling med CO₂</i>	30
7.3.4	<i>Værstasjon</i>	30
7.4	Bearbeiding av måledata.....	31
7.4.1	<i>Sporgassmåling med CO₂</i>	31
7.4.2	<i>Tetthetsmåling</i>	32
7.4.3	<i>Infiltrasjonsmodell I "trykkdrevet"</i>	34
7.4.3.1	<i>Trykkdifferanse over fasadene</i>	34
7.4.4	<i>Infiltrasjonsmodell II "vinddrevet"</i>	36
7.4.4.1	<i>Vinddata</i>	36
7.5	Metodens egnethet	39
8	Resultater	41
8.1	Sporgassmåling med CO ₂	41
8.2	Infiltrasjonsmodell I "trykkdrevet"	42
8.3	Infiltrasjonsmodell II "vinddrevet"	43
8.4	Sporgassmåling og infiltrasjonsmodeller.....	44
9	Diskusjon	45
9.1	Sporgassmåling med CO ₂	45
9.2	Infiltrasjonsmodell	49
9.2.1	<i>Infiltrasjonsmodell I "trykkdrevet"</i>	49
9.2.2	<i>Infiltrasjonsmodell II "vinddrevet"</i>	52
9.3	Sporgassmåling og infiltrasjonsmodeller.....	53
9.4	Infiltrasjonsberegning etter NS 3031	55
10	Konklusjon	57
10.1	Veien videre	57
11	Referanser	59
12	Vedlegg	i
12.1	Vedlegg 1: Tetthetsmåling alle hull lukket, før utbedring.....	i
12.2	Vedlegg 2: Tetthetsmåling alle hull lukket, etter utbedring	iii
12.3	Vedlegg 3: Tetthetsmåling hull A åpent	v

12.4	Vedlegg 4: Tetthetsmåling hull B åpent	vii
12.5	Vedlegg 5: Tetthetsmåling hull C åpent	ix
12.6	Vedlegg 6: Utregning av C-, og n-verdier	xi
12.7	Vedlegg 7: Oppbygging av infiltrasjonsmodell I	xiii
12.8	Vedlegg 8: Oppbygging av infiltrasjonsmodell II	xiv
12.9	Vedlegg 9: Forsøksdag 5.3.19 Periode 1(1)	xvi
12.10	Vedlegg 10: Forsøksdag 7.3.19 Periode 1(1)	xvii
12.11	Vedlegg 11: Forsøksdag 8.3.19 Periode 1(1)	xviii
12.12	Vedlegg 12: Forsøksdag 11.3.19 Periode 1(1)	xix
12.13	Vedlegg 13: Forsøksdag 12.3.19 Periode 1(2)	xx
12.14	Vedlegg 14: Forsøksdag 12.3.19 Periode 2(2)	xxi
12.15	Vedlegg 15: Forsøksdag 13.3.19 Periode 1(1)	xxii
12.16	Vedlegg 16: Forsøksdag 15.3.19 Periode 1(1)	xxiii
12.17	Vedlegg 17: Forsøksdag 18.3.19 Periode 1(2)	xxiv
12.18	Vedlegg 18: Forsøksdag 18.3.19 Periode 2(2)	xxv
12.19	Vedlegg 19: Forsøksdag 20.3.19 Periode 1(1)	xxvi
12.20	Vedlegg 20: Forsøksdag 21.3.19 Periode 1(1)	xxvii
12.21	Vedlegg 21: Forsøksdag 22.3.19 Periode 1(3)	xxviii
12.22	Vedlegg 22: Forsøksdag 22.3.19 Periode 2(3)	xxix
12.23	Vedlegg 23: Forsøksdag 22.3.19 Periode 3(3)	xxx
12.24	Vedlegg 24: Forsøksdag 23.3.19 Periode 1(1)	xxx i
12.25	Vedlegg 25: Forsøksdag 25.3.19 Periode 1(1)	xxx ii
12.26	Vedlegg 26: Resultater fra sporgassmålinger, infiltrasjonsmodell I og II	xxx iii

4.1 Figurliste

Figur 6.1.1 Anblåsning og gjennomblåsning (Holøs & Aurlien, 2014)	5
Figur 6.1.2 Overtrykk og undertrykk som følge av vind (Quirouette & Arch, 2014)	7
Figur 6.1.3 Soneinndeling vertikale vegger (Meløysund & Strandholmen, 2003).....	7
Figur 6.1.4 Vindprofiler for ulike terrengkategorier (Gaetani, 2013).....	8
Figur 6.1.5 Trykkforskjeller over klimaskjerm på grunn av vind, termisk oppdrift og mekanisk avtrekk (Blom & Uvsløkk, 2012)	9
Figur 6.2.1 Måleprinsipp for luftlekkasjetall (Holøs & Aurlien, 2014).....	12
Figur 6.2.2 Beregning av C og n ved kurvetilpasning (Holøs & Aurlien, 2014).....	13
Figur 6.5.1 Oppgavens metode	19
Figur 7.1.1 Skjermdump av plassering av modulene på Søråsjordet fra Norgeskart	20
Figur 7.1.2 Modul A og B sett fra sør-sørvest (Foto: Nina Johanne Brænden).....	21
Figur 7.1.3 Plantegning modul A.....	21
Figur 7.1.4 Snitt modul A	22
Figur 7.1.5 Hull A, B og C (Foto: Nina Johanne Brænden)	22
Figur 7.2.1 Blowerdoor 4.1 (BlowerDoor GmbH, 2018)	23
Figur 7.2.2 Trykkslanger under oppkobling til måleapparatet Sensirion (Foto: Nina Johanne Brænden).....	24
Figur 7.2.3 Skjermdump fra programmet LabVIEW 2010.....	24
Figur 7.2.4 CP11 (Rotronic, 2018)	25
Figur 7.2.5 Skjermdump fra programmet Rotronic SW2.1	25
Figur 7.3.1 Oppsett av måleutstyr for sporgassmåling og trykkdifferansemåling.....	26
Figur 7.3.2 Trykkslanger plassert under ventilåpning inne og ute (Foto: Nina Johanne Brænden).....	29
Figur 7.4.1 Sporgassmåling metode.....	31
Figur 7.4.2 Tetthetsmåling metode	32

Figur 7.4.3 Infiltrasjonsmodell I metode	34
Figur 7.4.4 Infiltrasjonsmodell II metode	36
Figur 7.4.5 Vindkomponenter i x- og y-retning.....	38
Figur 8.1.1 Infiltrasjonstall fra sporgassmåling ved ulik vindhastighet og retning	41
Figur 8.2.1 Infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell I ved ulik vindhastighet og retning.....	42
Figur 8.3.1 Infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell II ved ulik vindhastighet og retning	43
Figur 8.4.1 Infiltrasjonstall fra sporgassmåling sammenliknet med infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell I og II	44
Figur 9.1.1 Solceller plassert foran modul A og B (Foto: Nina Johanne Brænden).....	46
Figur 9.1.2 Eksempel på sporgassmålingenes sårbarhet ved måleperiodens slutt.....	47
Figur 9.1.3 Skissert lavtliggende CO ₂ -gass	48
Figur 9.1.4 Eksempel på avtakende CO ₂ -konsentrasjon for CO ₂ -logger 1 og 2.....	48
Figur 9.2.1 Skissert vind fra øst.....	50
Figur 9.2.2 Skissert vind fra sør.....	51
Figur 9.2.3 Skissert vind fra sør og nord	51
Figur 9.3.1 Grafisk skissert infiltrasjonsmodell som gir reell infiltrasjon.....	54
Figur 9.4.1 Infiltrasjonstall beregnet etter NS 3031 sammenliknet med infiltrasjonstall fra sporgassmåling.....	55

4.2 Tabelliste

Tabell 4.4.1 Oversikt over brukte symboler i formelverk	XIV
Tabell 6.1.1 Formfaktor for soner (Meløysund & Strandholmen, 2003).....	7
Tabell 6.1.2 Terrengruhetskategorier og tilhørende parametre (Meløysund & Strandholmen, 2003)	8
Tabell 6.3.1 Energirammer (Klinski, 2016a)	14
Tabell 6.3.2 Veiledende verdier for terrengskjermingskoeffisientene e og f (Standard, 2007)16	
Tabell 7.3.1 Oversikt over test- og forsøksdager	27
Tabell 7.3.2 Oversikt over tetthetsmålingene og hensikt.....	28
Tabell 7.3.3 Oversikt over plassering av trykkdifferansesensorer.....	29
Tabell 7.4.1 Vindretning i grader og himmelretning	36

4.3 Begrepsavklaring

DiBK	Direktoratet for byggkvalitet, er blant annet den sentrale myndighet for det bygningstekniske regelverket
TEK 17	Byggeteknisk forskrift fra 2017 utarbeidet av Direktoratet for byggkvalitet
NS	Norsk Standard, standarder fastsatt og utgitt av Standard Norge
NS 3031	Beregning av bygningers energiytelse, metode og data
NMBU	Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet
REALTEK	Instituttet for matematiske realfag og teknologi ved NMBU
TF	Teknologisk fakultet, tilholdssted for REALTEK-studenter på NMBU
BRA	Bruksareal, arealet innenfor ytterkonstruksjonen
K	Kelvin, enhet for temperatur
Pa	Pascal, enhet for trykk
Tetthetsmåling	Måling av et byggs lufttetthet med differansetrykkmetoden
Luftlekkasjetall	Mål på et byggs lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell over klimaskjermen
Infiltrasjonstall	Mål på et byggs uønsket luftinfiltrasjon
Luftveksling	Hvor mange ganger en sones oppvarmede luftvolum skiftes ut i timen
Luftstrøm	Hvor mange kubikkmeter luft som beveger seg gjennom en åpning per time
Termografering	Metode for å avlese temperatur på en overflate som gjøres med et kamera som måler infrarød stråling
Klimaskjerm	Bygningers ytterkonstruksjon
Sperresjikt	Sjikt som hindrer luft i å strømme gjennom ytterkonstruksjonen
Skjermingsgrad	Faktor som sier noe om hvor godt et bygg ligger skjermet for vinden
Varmegjenvinner	Uteluft blir forvarmet med gjenvunnet varme fra brukt inneluft i ventilasjonsanlegg
Regresjon	Kurvetilpasning av eksisterende data ved grafisk fremstilling
Trendlinje	Tilpasning av målepunkter med linje ved grafisk fremstilling
Sporgassmåling	Beregning av luftskifte i en sone ved registrering av sporgassens konsentrasjon over tid

4.4 Symbolliste

Tabell 4.4.1 Oversikt over brukte symboler i formelverk

Symbol	Enhet	Forklaring
Lufttetthet		
n_{50}	/h	Luftlekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell
n_{inf}	/h	Infiltrasjonstall ved driftssituasjon
\dot{V}_{50}	m^3/h	Luftstrøm ved 50 Pa trykkforskjell over klimaskjermen
\dot{V}	m^3/h	Luftstrøm
V	m^3	Oppvarmet volum
Δp	Pa	Trykkforskjell
ρ	kg/m^3	Luftens densitet (ca.1,2)
C	m^3/hPa	Luftstrømkoeffisient
n		LuftstrømekspONENT: $n=0,5$ åpent hull, $n=1,0$ porøst hull
Vindhastighetsberegning med vindprofil – ”the logarithmic law”		
v_1	m/s	Vindhastighet der den skal bestemmes
v_2	m/s	Vindhastighet der den måles
h_1	m	Høyde over bakkenivå der v_1 skal bestemmes
h_2	m	Høyde over bakkenivå der v_2 måles
z_0	m	Ruhetslengde
C_{pe}		Utvendig formfaktor
Energiberegning		
E	kWh/m^2	Totalt netto energibehov
E_{inf}	kWh/m^2	Netto energibehov på grunn av infiltrasjon
H''	W/m^2K	Varmetapstall
H	W/m^2	Total varmetapskoeffisient
H_{inf}	W/m^2	Varmetapskoeffisient for infiltrasjon
μ	Wh/m^3K	Luftens varmekapasitet pr. volum (=0,33)
$\Delta\theta$	K	Differansen i inne- og utetemperatur
t	h	Tid i timer
\dot{V}_1	m^3	Tilluftsmengde i ventilasjonsanlegg
\dot{V}_2	m^3	Avtrekksluftmengde i ventilasjonsanlegg
e		Terrenngskjermingskoeffisient
f		Terrenngskjermingskoeffisient
Sporgassmåling		
$C(t)$	ppm	CO ₂ -konsentrasjon ved målt tidspunkt
$C(0)$	ppm	CO ₂ -konsentrasjon ved målestart
C_0	ppm	CO ₂ -konsentrasjon i uteluften
C_N	ppm	Normalisert CO ₂ -konsentrasjon
$\ln(C_N)$		Den naturlige logaritmen til C_N

5 Innledning

5.1 Bakgrunn

Dagens samfunn har et økende fokus på å bygge klimavennlig og å redusere energiforbruket. Luftlekkasjer kan stå for en betydelig andel av energitap i bygninger (Hole & Aurlien, 2013) og viktigheten av å redusere luftinfiltrasjon er derfor en forutsetning for å bygge energibesparende bygninger med godt inneklima (Chan et al., 2012). Som en følge av dette har byggeteknisk forskrift stilt strengere krav til lufttetthet i bygninger (DiBK, 2018).

Byggeforskriften fra 2017 stiller direkte krav til lufttetthet gjennom et lekkasjetall som måles i ferdigstilt bygg (DiBK, 2017a). Det stilles også krav til energiforbruk som blant annet beregnes ut i fra lekkasjetallet (DiBK, 2017a). Lekkasjetallet har dermed mye å si når lufttetthet skal dokumenteres og energibehovet for infiltrasjon prosjekteres.

Måling av luftlekkasjetallet gjøres ved at bygningen trykkes med en trykkforskjell på 50 pascal over klimaskjermen (Holøs & Aurlien, 2014). Det registreres hvor mye luft som strømmer inn når bygget trykkes med en vifte. Luftlekkasjetallet beregnes på bakgrunn av luftstrømmen som passerer klimaskjermen og byggets totale oppvarmet volum (Holøs & Aurlien, 2014). Lekkasjetallet og energibehovet er dermed basert på en kunstig trykksettingsmetode som neglisjerer vind og oppdriftskrefter.

Med varierende vindforhold i Norge (Byrkjedal & Åkervik, 2009) er det derfor interessant å undersøke om dagens metode for å beregne infiltrasjon er tilfredsstillende, eller om det er behov for å fornye beregningsmetoden.

5.2 Problemstilling

Bakgrunnen for denne oppgaven har vært å undersøke om implementering av vindpåkjenninger kan bidra til mer reell beregning av infiltrasjon. Problemstillingen er som følger:

Er det mulig å utarbeide en matematisk modell som tar hensyn til vindpåkjenninger i infiltrasjonsberegning ved hjelp av målinger med sporgass på et lite modulbygg?

5.3 Avgrensning

I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i teori om luftlekkasjer, og det har blitt studert hvordan teorien samsvarer med målinger utført på et lite modulbygg. Oppgaven sier derfor ikke noe om hvordan sporgassmålinger og infiltrasjonsmodeller oppfører seg i full-skala bygg.

Modulbygget har store lekkasjer og størrelsen på lekkasjene kan være sammenliknbare med lekkasjer i full-skala bygg. Lekkasjetallet er et forholdstall som sier noe om forholdet mellom lekkasjenes størrelse og innvendig volum. Lekkasjetallet kunne dermed blitt beregnet etter volumet i et full-skala bygg, men med samme lekkasjestørrelse som i modulbygget. Denne skaleringen av lekkasjetall har ikke blitt gjennomført i denne oppgaven. Resultatene er derfor ikke direkte sammenliknbare med luftlekkasjer i oppførte bygg. Ytre validitet inngår dermed ikke i prosjektet på grunn av at det er usikkert hvordan resultatene fra denne oppgaven kan overføres til andre bygg med andre omgivelser.

Lekkasjene som er studert er lekkasjer gjennom én sone, og vindens påvirkning på interne luftlekkasjer er dermed ikke studert. Avtrekksanlegget i modulbygget har blitt slått av og det er derfor ikke sett på hvordan vinden påvirker ventilasjonsanlegget. Infiltrasjonsmodellene utarbeidet i denne oppgaven tar derfor utgangspunkt i naturlig ventilasjon. Disse forenklingene er gjort på grunn av tidligere forsøk i modulbygget som ikke har ledet til en klar årsakssammenheng mellom vind og infiltrasjon. Før å øke sannsynligheten for å se en årsakssammenheng er derfor modellene utarbeidet med så enkle premisser som mulig.

Virkingen av vindkast og vindkastenes varighet er ikke studert i denne oppgaven. Vinddata tilgjengelig fra forsøksfeltet som registrerer vindhastighet og vindretning hvert tiende minutt er blitt brukt, og modellene baserer seg derfor på ti-minutters gjennomsnitt.

5.4 Disposisjon

Disposisjonen gir en oversikt over hovedpunktene i oppgaven. Den har som mål å fremheve hvordan de ulike delene av oppgaven henger sammen og viser arbeidsprosessen frem til besvart problemstilling. Oppgavens innhold i kronologisk rekkefølge:

Teori

Teorikapitlet inneholder relevant teori som skal bidra til å besvare problemstillingen. Hva luftinfiltrasjon er, hva det fører til og hvordan det måles er teori om infiltrasjon som vil bli forklart. Lover og forskriftskrav relevante for infiltrasjon blir også gjennomgått og til slutt vil teori om sporgass bli presentert.

Metode

I dette kapitlet beskrives hvordan målingene ble gjennomført og bearbeidet, og hvordan metoden egner seg for å besvare problemstillingen. Utstyr som er brukt, programvare og måleusikkerhet blir også presentert. Til slutt blir infiltrasjonsmodellenes oppbygning forklart.

Resultater

Her blir resultatene fra sporgassmålingene og infiltrasjonsmodellene presentert med grafer.

Diskusjon

Dette kapitlet drøfter funnene fra resultatkapitlet opp mot teorikapitlet, og diskuterer funnene i lys av problemstillingen.

Konklusjon

Til slutt skal problemstillingen besvares, og en konklusjon blir gitt. I tillegg redegjøres det for hvilket arbeid som kan videreføre tematikken i denne oppgaven.

6 Teori

6.1 Hva er lufttetthet?

Lufttetthet sier noe om hvor mye luft som lekker inn og ut av et bygg gjennom utettheter i klimaskjermen. Jo flere luftlekkasjer et bygg har, jo mindre lufttett er bygget. Luftinfiltrasjon er også en annen benevnelse for luftlekkasjer og defineres som en ukontrollerbar luftstrøm gjennom bygningskroppen (Chan et al., 2012).

Luften som lekker inn i et bygg fører til en uønsket endring i byggets energibalanse, fuktsikring, komfort, luftkvalitet, brannsikring og lydisolasjon (Holøs & Aurlien, 2014). Spredning av lukt og innsig av radon er også konsekvenser av luftlekkasjer. For å unngå luftlekkasjer gjennom bygningens klimaskjerm skal det tettes med minst ett kontinuerlig sperresjikt (Holøs & Aurlien, 2014). Dette sperresjiktet skal sikre god lufttetthet gjennom materialer, bygningssammenføyninger og gjennomføringer (Blom & Uvsløkk, 2012).

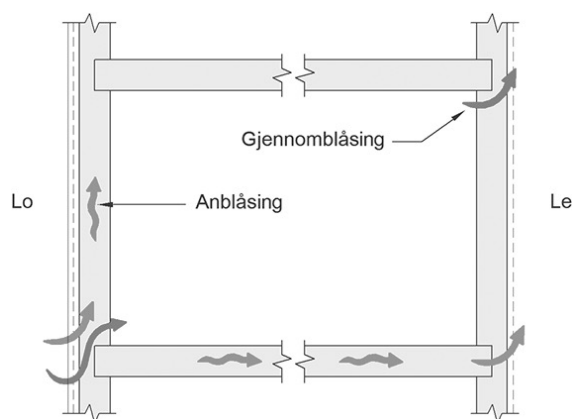
SINTEF Byggforsk mener det helst er ønskelig med to lufttette sjikt, både på kald og varm side av isolasjonen. Vindspærren monteres på kald side, og dampspærren på varm.

Vindspærren og dampspærren skal sammen gi god sikring mot luftlekkasjer gjennom klimaskjermen (Blom & Uvsløkk, 2012).

6.1.1 Gjennomblåsning og anblåsning

Luftlekkasjer oppstår på to måter; gjennomblåsning og anblåsning (Holøs & Aurlien, 2014).

Ved gjennomblåsning strømmer luft inn og ut av bygget gjennom klimaskjermen. Dette kalles også infiltrasjon og eksfiltrasjon. Gjennomblåsning oppstår på grunn av ulike temperaturer og trykkforskjeller over bygningen (Holøs & Aurlien, 2014).



Figur 6.1.1 Anblåsning og gjennomblåsning (Holøs & Aurlien, 2014)

Ved anblåsning trekkes luft inn i utettheter i vindspærren, inn i isolasjonen og ut i andre utettheter langs vindspærren. Drivkreftene bak luftstrømmene er varierende vindtrykk langs vindspærren (Holøs & Aurlien, 2014). Isolasjonen isolerer best ved stillestående luft og ved anblåsning settes luften i isolasjonen i bevegelse. Isolasjonsevnen reduseres dermed kraftig og fører til økt varmetap. Denne typen luftlekkasje er vanskelig å måle, og blir derfor ikke hensyntatt ved luftlekkasjemålinger. Et bygg kan dermed ha gode luftlekkasjemålinger, men fortsatt ha betydelig varmetap (Holøs & Aurlien, 2014).

6.1.2 Drivkrefter

Luftlekkasjer drives av forskjeller i lufttrykket inne og ute (Holøs & Aurlien, 2014).

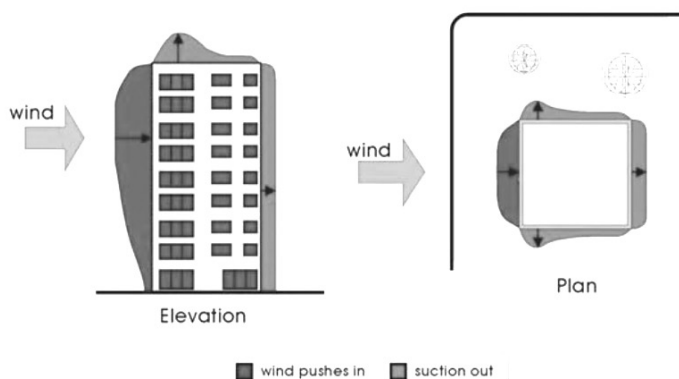
Forskjellene i lufttrykk gjør at luften alltid vil bevege seg mot lavere trykk for å oppnå likevekt. Trykkforskjellene over de ulike bygningsdelene skapes hovedsakelig av tre former for drivkrefter; vind, temperaturforskjeller og ventilasjonsanlegg (Holøs & Aurlien, 2014).

Når vinden treffer en fasade vil vinden bremses opp og skape overtrykk. På motsatt side av bygget vil vinden bevege seg fra bygget og det skapes et undertrykk (Quirouette & Arch, 2014). Der det er overtrykk vil luft presses inn gjennom utettheter i klimaskjermen, og der det er undertrykk vil luft suges ut. Vindtrykket avhenger av vindens hastighet, luftdensiteten og byggets form (Younes et al., 2011). Vinden skaper en trykkforskjell mellom le og lo side, og denne trykkforskjellen kan beskrives ved (Edwardsen & Ramstad, 2014):

$$\Delta p = \frac{1}{2} * \rho * v^2 [Pa]$$

Hvor v er vindhastighet [m/s], ρ er luftens densitet [ca. 1,2 kg/m³] og Δp er trykkforskjell mellom le og lo side [Pa].

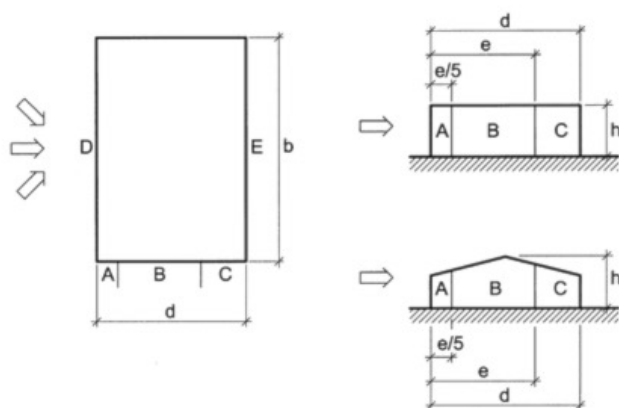
Trykkforholdene som skapes avhenger også av byggets høyde, form og hvordan det ligger i terrenget (Holøs & Aurlien, 2014).



Figur 6.1.2 Overtrykk og undertrykk som følge av vind (Quirouette & Arch, 2014)

Som figur 6.1.2 illustrerer vil vinden skape ulike trykk over bygningskroppen avhengig av hvilken retning vinden blåser fra og bygningskroppens fasong (Quirouette & Arch, 2014). Formfaktor benyttes når det skal beregnes vindtrykk i forbindelse med vindlast på bygninger (Meløysund & Strandholmen, 2003). Formfaktoren beregnes etter Eurokode 1 Del 1-4. Alle byggets flater som utsettes for vind deles inn i ulike soner med tilhørende formfaktor. Formfaktoren gir en reduksjon eller økning i vindtrykk avhengig av flatens areal og forholdet mellom byggets høyde og dybde (Norsk Standard, 2009).

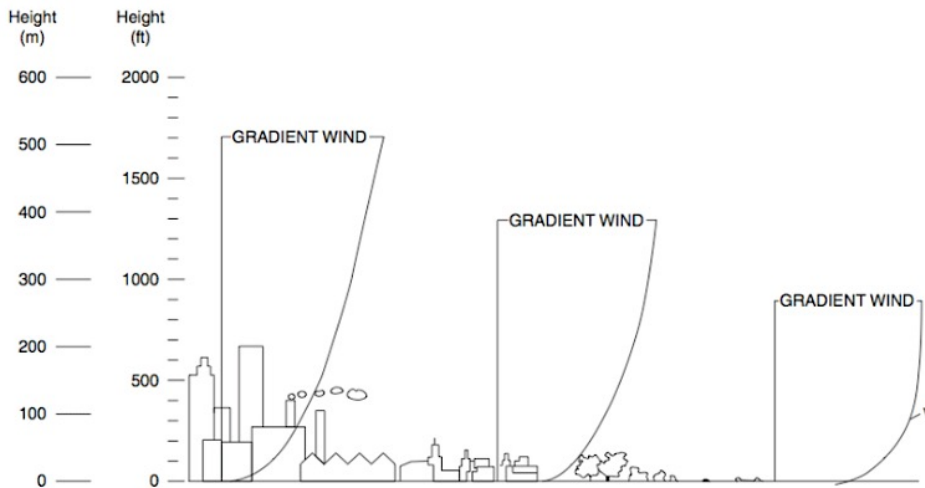
Tabell 6.1.1 Formfaktor for soner (Meløysund & Strandholmen, 2003)



Sone	Faktor	h/d ¹⁾		
		5	1	≤ 0,25
A	C _{pe,10}	-1,2	-1,2	-1,2
	C _{pe,1}	-1,4	-1,4	-1,4
B	C _{pe,10}	-0,8	-0,8	-0,8
	C _{pe,1}	-1,1	-1,1	-1,1
C	C _{pe,10}	-0,5	-0,5	-0,5
	C _{pe,1}	-0,5	-0,5	-0,5
D	C _{pe,10}	0,8	0,8	0,7
	C _{pe,1}	1,0	1,0	1,0
E	C _{pe,10}	-0,7	-0,5	-0,5
	C _{pe,1}	-0,7	-0,5	-0,3

Figur 6.1.3 Soneinndeling vertikale vegger (Meløysund & Strandholmen, 2003)

Vindens hastighet øker med høyden over bakken (Sivle, 2018). Nære bakken vil vinden bremses opp av hindringer som for eksempel bygninger og trær (Gaetani, 2013). Størrelsen og formen på hindringene vil påvirke hvor stor friksjon som skapes. Vinden taper mer energi når friksjonen er stor og fører til lavere vindhastigheter (Gaetani, 2013). Vinden kan derfor komme opp i større hastigheter ved åpne områder enn i tettbygde byer:



Figur 6.1.4 Vindprofiler for ulike terrengkategorier (Gaetani, 2013)

Hver terrengkategori har en definert ruhetslengde (z_0) som påvirker vindprofilens form over bakkenivå (Meløysund & Strandholmen, 2003).

Tabell 6.1.2 Terrengruhetskategorier og tilhørende parametre (Meløysund & Strandholmen, 2003)

Terrengruhetskategorier	k_T	z_0 (m)	z_{min} (m)
0 Åpent, opprørt hav	0,16	0,003	2
I Kystnær, opprørt sjø. Åpne vidder og strandsoner uten trær eller busker	0,17	0,01	2
II Landbruksområde, område med spredte små bygninger eller trær	0,19	0,05	4
III Sammenhengende småhusbebyggelse, industriområder eller skogsområder	0,22	0,3	8
IV Byområder der minst 15 % av arealet er dekket med bygninger, og deres gjennomsnittlige høyde overskrider 15 m. Granskogområder	0,24	1	16

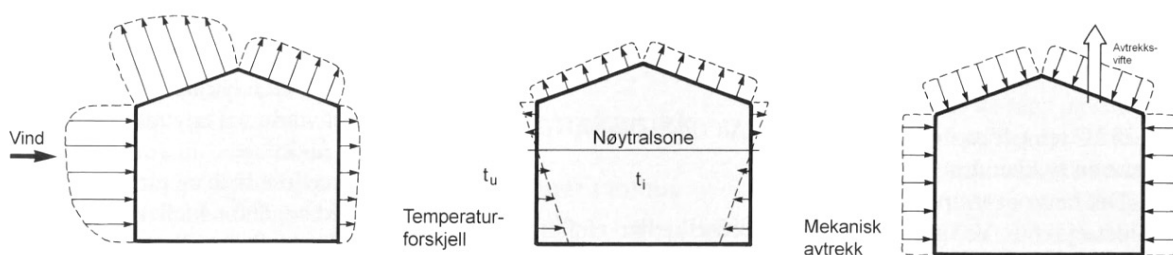
Det finnes flere måter å beregne sammenhengen mellom vindhastighet og høyde over bakken (Touma, 1977). En sammenheng som ofte brukes er "the logarithmic law" (European Standard, 2006).

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\ln(h_1/z_0)}{\ln(h_2/z_0)}$$

Der v_1 er vindhastigheten der den skal bestemmes [m/s], v_2 er målt vindhastighet [m/s], h_1 er høyden der vindhastigheten skal bestemmes [m], h_2 er høyden der vindhastigheten er målt [m] og z_0 er ruhetslengden (European Standard, 2006). Vindhastighet og retning måles internasjonalt i 10 meters høyde over bakken (Sivle, 2018).

Temperaturforskjeller er et annet fenomen som skaper forskjeller i lufttrykket (Holøs & Aurlien, 2014). Kald luft er tyngre enn varm luft samtidig som lufttrykket avtar i høyden fordi luftlaget minker. Kombinasjonen av dette gjør at når det er kaldere ute enn inne, vil det bli et overtrykk i øvre del og undertrykk i nedre del av bygget. Denne effekten kalles termisk oppdrift (Younes et al., 2011). Sonen der undertrykk går over til overtrykk kalles nøytral sone. Denne sonen vil være midt i byggets totale høyde når det ikke blåser og utetthetene er fordelt jevnt over høyden (Blom & Uvsløkk, 2012).

Ventilasjonsanlegg påvirker også trykkforholdene i et bygg. Mekanisk avtrekk suger luft ut av bygget med hjelp av vifter og skaper undertrykk i hele bygget. Balanserte ventilasjonsanlegg vil som regel trekke ut like mye luft som den tilfører bygget og vil derfor ikke påvirke trykkforholdene (Blom & Uvsløkk, 2012).



Figur 6.1.5 Trykkforskjeller over klimaskjerm på grunn av vind, termisk oppdrift og mekanisk avtrekk (Blom & Uvsløkk, 2012)

Figur 6.1.5 illustrerer de tre dominerende drivkreftene for varierende lufttrykk i bygninger. For å få et bilde av byggets totale lufttrykk, må de tre tilfellene kombineres og nøytralsonens plassering bestemmes.

6.1.3 Konsekvenser av luftlekkasjer

Luftlekkasjer øker byggets behov for oppvarming eller nedkjøling. Luftlekkasjene gir dermed bygget et større energibehov enn nødvendig. Det er flere grunner til at energibehovet endres (Blom & Uvsløkk, 2012):

- Større luftmengder lekker inn i bygget som må varmes opp eller kjøles ned.
- Luften som lekker inn/ut av bygget strømmer forbi varmegjenvinneren, og dermed blir mindre varme gjenvunnet.
- Isolasjonsevnen blir svekket på grunn av lekkasjeluft som setter luften i isolasjonsmaterialet i bevegelse.

Varmetapet varierer med værforholdene. Kald luft bidrar til større varmetap, og ved varierende vær er det vanskelig å effektivt tilføre varme. Utette bygg vil ha større energibehov enn lufttette bygg, og effekten øker i takt med kaldere temperaturer og høyere vindhastigheter (Edvardsen & Ramstad, 2014). Luftlekkasjer bidrar også til trekkproblematikk, og ofte vil man kompensere redusert komfort med en økning i romtemperatur (Holøs & Aurlien, 2014).

Luft som lekker gjennom utettheter kan gi luftbevegelser som vil føles som trekk.

Luftbevegelesene avkjøler kroppen og gir redusert komfort (Blom & Uvsløkk, 2012).

Luftlekkasjer kan føre til fuktskader i ytterkonstruksjonen. Når varm inneluft lekker ut gjennom konstruksjonen, vil luften bli avkjølt. Kald luft har mindre kapasitet til å holde på fuktigheten, og vil derfor kondensere når den møter kaldere sjikt (Edvardsen & Ramstad, 2014). Luften som kondenserer inne i konstruksjonen vil kunne føre til fuktskader (Holøs & Aurlien, 2014).

Brann kan lettere og fortere spres til andre enheter ved større luftlekkasjer (Blom & Uvsløkk, 2012). Luft vil kunne bevege seg gjennom utettheter, og dermed vil også brann kunne forplante seg via utettheter. Luftlekkasjene vil også kunne tilføre mer oksygen til brannen, og dermed eskalere brannen (Holøs & Aurlien, 2014).

Lukt fra tilstøtende enheter som matlukt, røyklukt etc., kan bli et problem ved utette skillekonstruksjoner (Blom & Uvsløkk, 2012). I tillegg kan eksempelvis mugglukt eller soppsporer trekkes inn i oppholdsrom, og eksos fra tilstøtende garasjeanlegg (Holøs & Aurlien, 2014). God lufttetthet gir også god lydisolasjon både mot utvendig støy og støy internt i bygget (Blom & Uvsløkk, 2012).

Utettheter i konstruksjonen mot grunn vil føre til at den radioaktive gassen radon siver inn i bygget. I dårlig ventilerte boliger kan konsentrasjonen av radon være høyere inne enn ute (Bjørnstad et al., 2018). God lufttetthet vil kunne forebygge radoninnsig (Holøs & Aurlien, 2014).

6.2 Luftlekkasjemåling

6.2.1 Krav til lekkasjetall

Byggeteknisk forskrift (TEK17) utarbeidet av Direktoratet for byggkvalitet (DiBK), stiller krav til lekkasjetall for nyoppførte bygg (Relander, 2014). Lekkasjetallet, definert som n_{50} , skal ikke overstige 0,6 luftvekslinger pr. time for småhus og boligblokker ved 50 Pa trykkforskjell over klimaskjermen (DiBK, 2017a). Lekkasjetallet inngår i forutsetningene for å kunne beregne, dokumentere og tilfredsstille krav til bygningers energibehov (Hole & Aurlien, 2013).

Krav om 0,6 luftvekslinger per time kan fravikes hvis energitapet omfordes. Et minimumskrav må overholdes, og for småhus og boligblokker skal n_{50} ikke overstige 1,5 luftvekslinger pr. time (DiBK, 2017b).

6.2.2 Hvorfor måle luftlekkasjer?

Luftlekkasjer må måles for å (Holøs & Aurlien, 2014):

- Dokumentere krav til lekkasjetall i TEK17.
- Beregne bygningers energibehov iht. NS 3031: Beregning av bygningers energiytelse, metode og data.

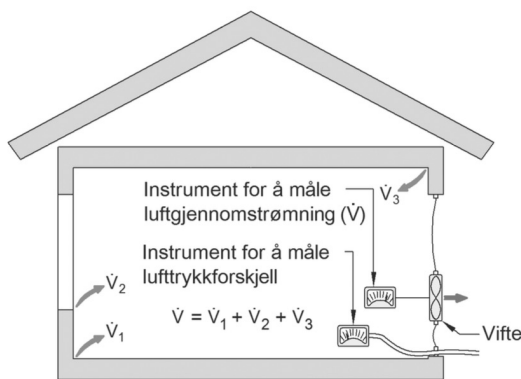
Luftlekkasjene kan måles for å (Holøs & Aurlien, 2014):

- Finne ut om luftlekkasjene påvirker komfort og ventilasjonsanleggets drift.
- Undersøke om det lekker luft mellom boenheter.
- Oppdage fuktskader.

6.2.3 Måling av luftlekkasjer: Differansetrykkmetoden

For å dokumentere krav til luftlekkasjetall er det utarbeidet en standard for måling av bygningers luftlekkasje: NS-EN ISO 9972:2015 (Holøs & Aurlien, 2014). Denne standarden tar for seg måling av luftlekkasjer ved differansetrykkmetoden. Differansetrykkmetoden måler et byggs lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell over klimaskjermen (Relander, 2014).

Måleprinsippet går ut på å montere en vifte i klimaskjermen, vanligvis ytterdøren (Blom & Uvsløkk, 2012). Viften vil blåse luft inn/ut gjennom klimaskjermen slik at det oppnås forhåndsdefinerte trykkforskjeller over klimaskjermen (Relander, 2014). Standarden påpeker at det må måles minst fem trykkforskjeller fordelt jevnt fra laveste til høyeste trykkforskjell. Laveste trykkforskjell skal være minimum 10 Pa og høyeste trykkforskjell skal være minimum 50 Pa (International Standard, 2015). Standarden sier at det er anbefalt med registrerte trykkforskjeller opp til 100 Pa for best resultat. Viften registrerer de luftmengdene som må blåses gjennom for å opprettholde de forhåndsdefinerte trykkforskjellene (Holøs & Aurlien, 2014). Som figur 6.2.1 viser må den registrerte luftmengden som blåses gjennom



viften tilsvare den mengden luft som lekker inn eller ut gjennom utettheter i klimaskjermen (Edwardsen & Ramstad, 2014). Det er dermed sammenhengen mellom oppnådd trykkforskjeller og mengde luft som karakteriserer et byggs lufttetthet (Holøs & Aurlien, 2014).

Figur 6.2.1 Måleprinsipp for luftlekkasjetall (Holøs & Aurlien, 2014)

Ut i fra denne målingen vil lekkasjetallet n_{50} bestemmes (Holøs & Aurlien, 2014). Helst vil målingene utføres både ved undertrykk og overtrykk, for så å bestemme n_{50} fra den midlere verdien (Blom & Uvsløkk, 2012).

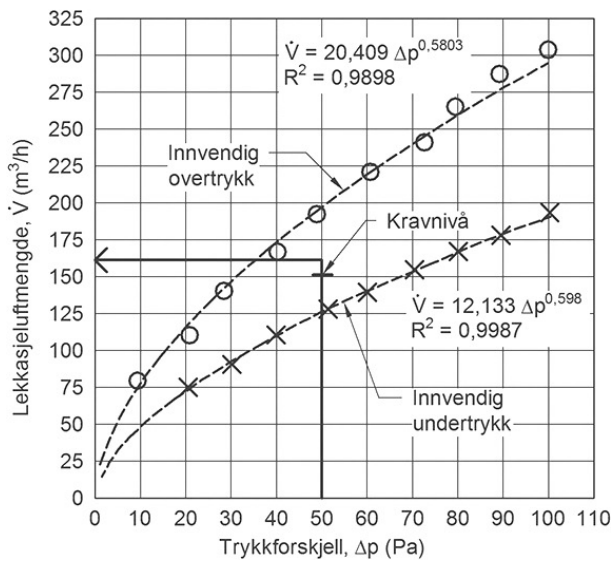
Luftlekkasjemengden (\dot{V}) er den registrerte luftmengden som må blåses gjennom måleviften for å opprettholde en gitt trykkforskjell, og angis i kubikk pr. time. Lekkasjeluftmengden er definert som en luftstrøm og bestemmes ved ulike trykkforskjell (International Standard, 2015):

$$\dot{V} = C * \Delta p^n [m^3/h]$$

Hvor \dot{V} er luftstrøm [m^3/h], Δp er trykkforskjell over klimaskjermen [Pa], C betegner hvor mye luft som lekker inn/ut gjennom klimaskjermen [$m^3/Pa \cdot h$] og n sier noe om hva slags lekkasjer som dominerer.

Viften som er plassert i klimaskjermen har en gitt åpning der C-, og n-verdien er kjent. Ved å bruke sammenhengen mellom luftstrøm og trykkforskjell kan luftstrømmen ved ulike trykkforskjeller beregnes.

Når trykkforskjellen og luftstrømmen registreres med måleapparatet vil det som figur 6.2.2 viser være mulig å finne koeffisientene C og n ved kurvetilpasning (Holøs & Aurlien, 2014).



Figur 6.2.2 Beregning av C og n ved kurvetilpasning (Holøs & Aurlien, 2014)

Når koeffisientene C og n er beregnet ved hjelp av kurvetilpasning, og målingene skal utføres ved 50 Pa, kan luftlekkasjemengden beregnes (International Standard, 2015):

$$\dot{V}_{50} = C * 50^n [m^3/h]$$

Hvor \dot{V}_{50} er luftlekkasjemengde ved 50 Pa trykkforskjell [m^3/h].

Luftlekkasjemengden (\dot{V}_{50}) sier noe om hvor stort volum som lekker inn/ut gjennom klimaskjermen, men ikke i forhold til byggets størrelse (Holøs & Aurlien, 2014). For å kunne sammenlikne ulike bygg, er det derfor vesentlig med en normalisert verdi. Den normaliserte verdien er lekkasjetallet n_{50} , som beregnes slik (International Standard, 2015):

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} [1/h]$$

Hvor n_{50} er lekkasjetallet [$1/h$], V er innvendig volum [m^3] (Holøs & Aurlien, 2014).

Innvendig volum skal beregnes etter NS 3940 og er luftvolum over oppvarmet BRA (Klinski, 2016b). Klinski påpeker at volumet skal måles mellom overkant av gulv og underkant av etasjeskiller/takkonstruksjon.

Analyse av målekurven som lekkasjetallet har blitt beregnet ut i fra, kan si mye om målingene. Som figur 6.2.2 viser ligger kurven for overtrykk høyere enn kurven for undertrykk. Er differansen stor kan det tyde på stor "ventileffekt" (Holøs & Aurlien, 2014). Skjøter i klimaskjermen suges inntil ved undertrykkmåling og presses utover ved

overtrykksmåling, og tetteeffekten kan dermed være ganske forskjellig. Holøs og Aurlien mener at avvik fra kurven kan tyde på ustabile måleforhold, der vind som oftest er årsak.

6.3 Lufflekkasjebidrag i energiberegning av bygninger

6.3.1 Krav til samlet energibehov

TEK17 stiller krav til totalt netto energibehov for ulike bygninger (DiBK, 2017a). Dette kravet skal sikre et forsvarlig energiforbruk. Totalt netto energibehov skal derfor kontrollregnes i henhold til NS 3031 og det skal dokumenteres at energibehovet ikke overskrider energirammene. Beregningene gjøres ut i fra standardverdier for driftsbetingelser og klima, og speiler derfor ikke alltid bygningens forventet energiforbruk (Klinski, 2016a).

Tabell 6.3.1 Energirammer (Klinski, 2016a)

Bygningskategori	Totalt netto energibehov kWh/m ²
Småhus ²⁾ , fritidsbolig over 150 m ² oppvarmet BRA	100 + 1 600 / oppvarmet BRA
Boligblokk	95
Barnehage	135
Kontorbygning	115
Skolebygning	110
Universitet/høgskole	125
Sykehus	225 (265) ³⁾
Sykehjem	195 (230) ³⁾
Hotellbygning	170
Idrettsbygning	145
Forretningsbygning	180
Kulturbygning	130
Lett industri / verksteder	140 (160) ³⁾

For å tilfredsstille kravet skal varmetapstallet, H'' , regnes ut etter NS 3031 (Edvardsen & Ramstad, 2014):

$$H'' = \frac{H}{A_{fl}} [W/m^2K]$$

Hvor H er varmetransportkoeffisienten [W/K], A_{fl} er oppvarmet areal av BRA [m²].

Varmetansportkoeffisienten, H , beregnes som (Edvardsen & Ramstad, 2014):

$$H = H_D + H_U + H_g + H_v + H_{inf} [W/K]$$

Hvor H_D er direkte varmetransmisjonstap til det fri gjennom bygningselementer, H_U er varmetransmisjonstap til uoppvarmede soner i bygget, H_g er varmetap mot grunnen, H_v er ventilasjonsvarmetap, H_{inf} er infiltrasjonsvarmetap (Edwardsen & Ramstad, 2014).

Ut i fra varmetapstallet kan totalt netto energibehov beregnes (Edwardsen & Ramstad, 2014):

$$E = H'' * \Delta\theta * \frac{t}{1000} [kWh/m^2\text{år}]$$

Ut i fra varmetapskoeffisienten for infiltrasjon kan netto energibehov for infiltrasjon beregnes (Edwardsen & Ramstad, 2014):

$$E_{inf} = H_{inf} * \Delta\theta * \frac{t}{1000} [kWh/m^2\text{år}]$$

Hvor $\Delta\theta$ er forskjellen i inne- og utetemperatur [K] og t er tiden i timer pr. år [h].

Beregningen tar utgangspunkt i klimadata fra Oslo som er gitt i NS 3031, Tillegg M (Klinski, 2016b).

6.3.2 Beregning av varmetapstall for infiltrasjon

H_{inf} , infiltrasjonsvarmetapet, regnes ut etter (Norsk Standard, 2007):

$$H_{inf} = \mu * n_{inf} * V [W/K]$$

Hvor μ er luftens varmekapasitet per volum [Wh/m^3K], n_{inf} er infiltrasjonstallet [/h], V er oppvarmet volum [m^3].

Infiltrasjonstallet, n_{inf} , regnes ut etter formel i NS 3031 (Norsk Standard, 2007):

$$n_{inf} = \frac{n_{50} * e}{1 + \frac{f}{e} * \left(\frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{V * n_{50}}\right)^2} [/h]$$

Hvor e og f er terrengskjermingskoeffisienter, n_{50} er lekkasjetall [/h], V er oppvarmet luftvolum [m^3], \dot{V}_1 er tilluftsmengde i det mekaniske ventilasjonsanlegget [m^3/h] og \dot{V}_2 er avtrekksmengde i det mekaniske ventilasjonsanlegget [m^3/h].

Tabell 6.3.2 Veiledende verdier for terrengskjermingskoeffisientene e og f (Standard, 2007)

Skjermingsklasse	Koeffisient e	
	Mer enn en utsatt fasade	En utsatt fasade
Ingen skjerming	0,10	0,03
Moderat skjerming	0,07	0,02
Høy skjerming	0,04	0,01
	Koeffisient f	
Alle	15	20

Terrengskjermingskoeffisientene er standardverdier for vindforhold rundt bygningen gitt i NS 3031, Tillegg A (Klinski, 2016b).

6.4 Sporgassmåling og CO₂

Fremgangsmåte for sporgassmåling er beskrevet i den internasjonale standarden E741-00 for måling av luftskifte med sporgass (ASTM International, 2006). Sporgassmåling går ut på å injisere en sporgass inn i en sone og måle hvordan konsentrasjonen av gassen endres over tid. Endringen i konsentrasjon vil gi en indikasjon på hvor lufttett bygningen er. I følge standarden E741-00 kan tre teknikker brukes:

- 1) Avtakende konsentrasjon: For å bestemme luftskifte injiseres en viss mengde gass, og luftskiftet bestemmes ut i fra konsentrasjonens avtagende kurve.
- 2) Konstant injisering: For å bestemme luftstrømmen blir en konstant mengde gass tilført.
- 3) Konstant konsentrasjon: For å bestemme luftstrømmen blir gass tilført slik at konsentrasjonen holder seg konstant.

Hver teknikk krever spesifikke metoder for injisering av gass og innhenting av data (ASTM International, 2006). Gass som kan brukes er blant annet hydrogen, helium, karbonmonoksid, karbondioksid, etan, metan (ASTM International, 2006). I denne oppgaven vil det bli benyttet karbondioksid (CO₂) som sporgass, fordi det er enkelt å få tak i, rimelig og uskadelig i mindre mengder. Metoden *avtakende konsentrasjon* vil bli benyttet for å beregne luftskifte, fordi NMBU ikke har utstyr som kan tilføre en konstant injisering eller konstant konsentrasjon i modulbygget.

Ved å injisere en viss mengde CO₂-gass inn i en sone og måle den avtagende konsentrasjonen av CO₂ over tid, vil luftskiftet kunne estimeres. Det antas at mengden luft som forsvinner tilsvarer mengden luft som kommer inn i sonen. Konsentrasjonen av CO₂ må derfor korrigeres for uteluftens CO₂-konsentrasjon. For å korrigere for uteluften beregnes en normalisert konsentrasjonsverdi, C_N (Kraniotis, 2014, s. 25):

$$C_N = \frac{C(t) - C_0}{C(0) - C_0} [ppm]$$

Hvor C(t) er CO₂-konsentrasjon ved målt tidspunkt, C₀ er uteluftens CO₂-konsentrasjon og C(0) er CO₂-konsentrasjon ved målestart.

I følge standarden er det viktig at sporgassen fordeles uniformt i sonen den injiseres i for å beregne et nøyaktig luftskifte. Luftskifte kan beregnes med en regresjonsmetode som går ut på å plote logaritmen til C_N mot tiden t. Med utgangspunkt i at et konstant luftskifte finner sted, er sammenhengen mellom konsentrasjon og tid (ASTM International, 2006):

$$\ln C_N = -At + \ln C_N(0)$$

Hvor A tilsvarer luftskiftet n_{inf}.

I denne oppgaven benyttes CO₂ som sporgass. Karbondioksid (CO₂) er en kjemisk forbindelse som dannes i forbrenningsprosesser i organismer og menneskeskapte forbrenningsprosesser (Haraldsen & Pedersen, 2018). I gassform er CO₂ luktfri, usynlig og ubrennbar. Luften inneholder i gjennomsnitt 400 ppm (parts pr million), som vil si at det finnes 4 CO₂-molekyler per 10 000 molekyler i luften (Haraldsen & Pedersen, 2018). Karbondioksidgass er tyngre enn luft, og det vil derfor samle seg på bunn der gassen finnes (Haraldsen & Pedersen, 2018). Ved vanlige forhold er ikke gassen helseskadelig, unntatt i helt ekstreme arbeidssituasjoner. Det er ikke før konsentrasjonen er oppe i 10 000 ppm at det har vært observert effekter hos forsøksdyr og mennesker (Attramadal et al., 2015). CO₂ frigjøres i utåndingen og studier har vist at CO₂ konsentrasjonen kan relateres til intensiteten av kroppslukt (Attramadal et al., 2015). Folkehelseinstituttet har derfor anbefalt en faglig norm for karbondioksid på maksimum 1 000 ppm (Attramadal et al., 2015).

7 Metode

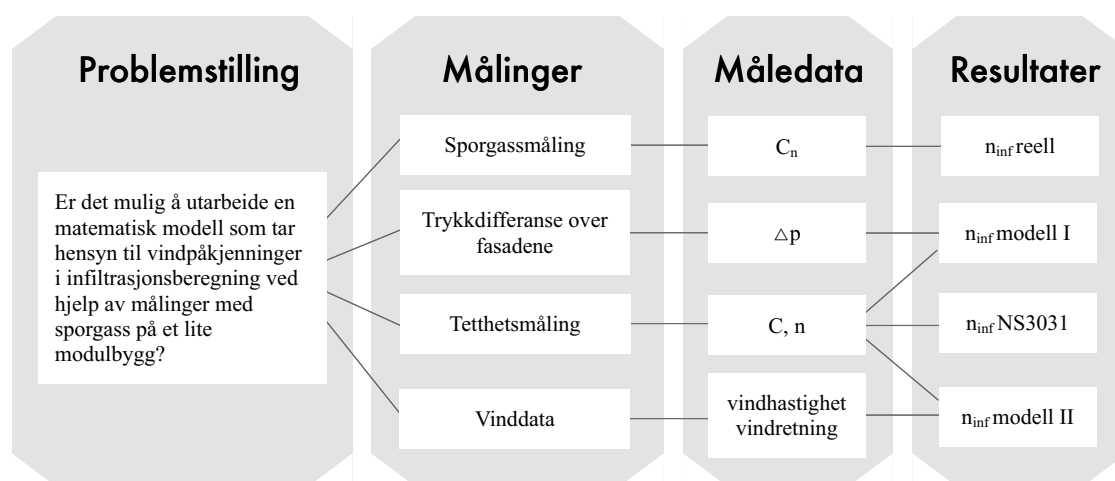
Dette kapittelet beskriver hvordan det er gått frem for å besvare problemstillingen. Hvilket utstyr som er brukt, hvordan målingene er utført og innhenting av måledata er beskrevet. I tillegg er det beskrevet hvordan måledata er brukt for å utvikle infiltrasjonsmodellene.

Innsamling av data kan foregå på to ulike måter: kvalitative metoder og kvantitative metoder. Kvalitativ metode kjennetegnes ved at dataene blir innhentet i form av meninger og opplevelser, som for eksempel intervjuer (Dalland, 2017). Kvantitativ metode kjennetegnes ved målbare data som kan tallfestes, og danner grunnlaget for å kunne utføre regneoperasjoner. I all hovedsak kan man si at kvalitativ metode er tolkning, og kvantitativ metode er telling (Dalland, 2017). I denne oppgaven er det benyttet kvantitativ metode for å besvare problemstillingen.

Problemstillingen i denne oppgaven har vært å lage en matematisk modell som beregner infiltrasjon i et modulbygg. For å kunne si noe om hvor godt *beregnet infiltrasjon* stemmer med virkelige forhold er det utført målinger av *reell infiltrasjon*.

Reell infiltrasjon har blitt målt ved hjelp av sporgass. Samtidig som sporgassmålingene pågikk ble det målt trykkdifferanse over fasadene og vinddata fra samme periode ble studert. Trykkdifferansemålingene har dannet grunnlag for infiltrasjonsmodell I og vinddata har dannet grunnlaget for infiltrasjonsmodell II. Det er også utført tetthetsmåling av modulbygget for å beregne modulbyggets luftstrømningsegenskaper og infiltrasjon iht. NS 3031.

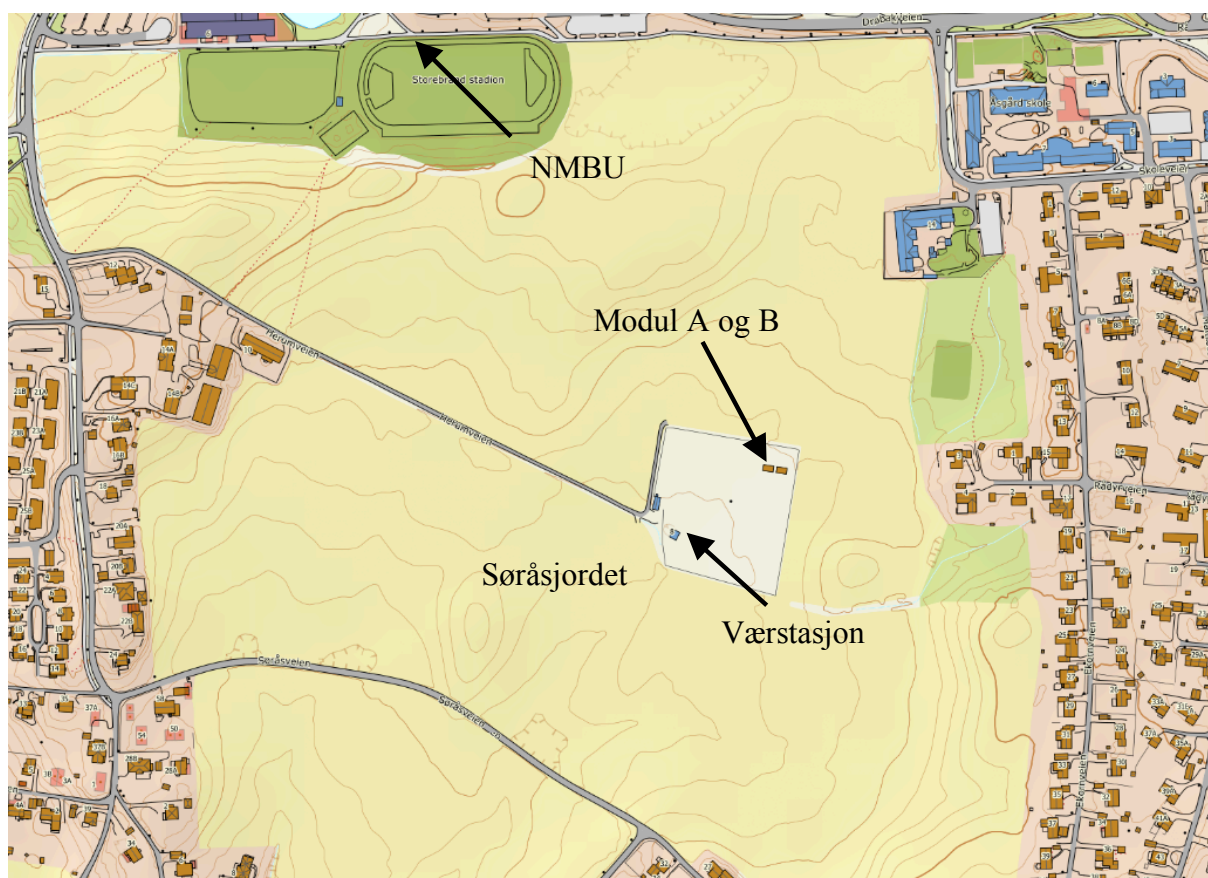
Figuren nedenfor viser hvilke målinger som er gjennomført, hvilken informasjon målingene gir og hva det har resultert i.



Figur 6.5.1 Oppgavens metode

7.1 WEEE modul

På Søråsjordet i Ås er det plassert ut to modulbygg av massivtre. Modulene er WEEE-moduler fra tidligere Moelven Massivtre AS. Modulene står på et felt som tilhører bioklimatiske studier (BIOKLIM) ved NMBU. Feltet består av meteorologiske instrumenter og moduler som studenter og ansatte ved universitetet utfører tester på. Modulene har en fin plassering for studering av vindpåvirkning; de ligger i et åpent og flatt område og værstasjon gir værdata i umiddelbar nærhet. Modulene kalles A og B, og i dette studiet er det kun utført målinger på modul A.

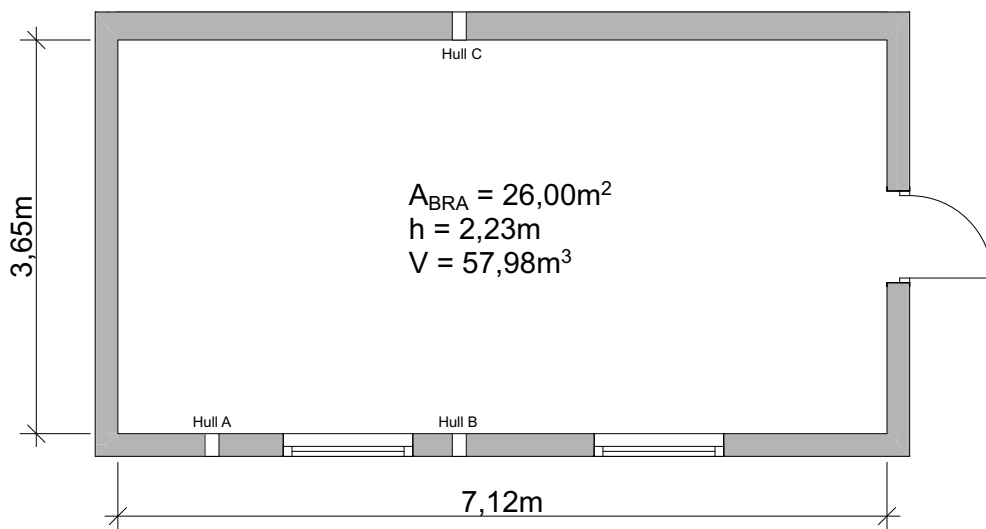


Figur 7.1.1 Skjermdump av plassering av modulene på Søråsjordet fra Norgeskart

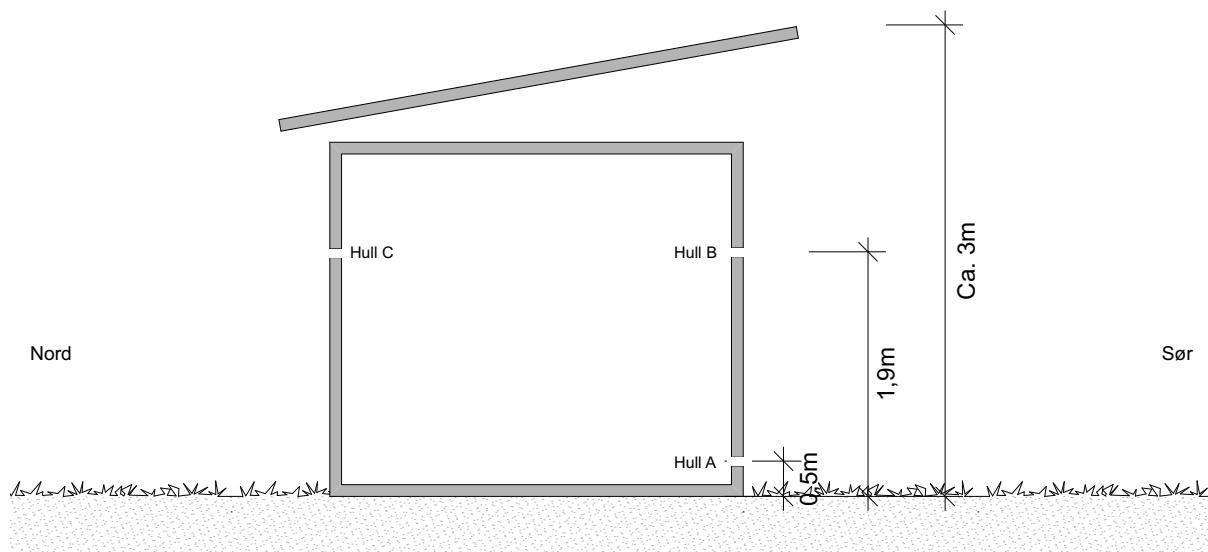


Figur 7.1.2 Modul A og B sett fra sør-sørvest (Foto: Nina Johanne Brænden)

Modulen ligger på tvers av dominerende vindretning som i Ås er sør-nord/nord-sør. Fra innsiden og ut er veggene bygget opp av 100 mm massivtre, vindsperre, 100 mm isolasjon på sørsiden (150 mm på nordsiden) og et nytt lag med vindsperre. Gulvet er fra innsiden og ut bygget opp av 100 mm bjelkelag med tregulv, dampsperre og 200 mm trykkfast isolasjon. Taket er bygget opp av 100 mm massivtre, vindsperre, 200 mm isolasjon og vindsperre. Over modulens tak er det en åpen takkonstruksjon.



Figur 7.1.3 Plantegning modul A



Figur 7.1.4 Snitt modul A

Modul A har tre store lekkasjepunkter, som videre vil bli benevnt som hull A, B og C (se figur 7.1.3 og 7.1.4). Disse lekkasjene er laget for å ha kontrollerbare og dominerende lekkasjer som infiltrasjon kan måles og beregnes ut i fra. I utgangspunktet bestod modulen av hull A, som er et rundt åpent hull bestående av et glatt aluminiumsrør med diameter på 130 mm. For å kunne regne med flere lekkasjer, ble det boret til to ekstra hull (B og C). Disse hullene har en diameter på 100 mm og består av aluminiumsrør med ru overflate og tallerkenventil montert innvendig.

Sørfasaden består dermed av to tilsiktede lekkasjer, og nordfasaden av én. Større lekkasjer på sørsiden enn nordsiden gjorde det også mulig å sammenlikne infiltrasjonen med vind fra nord og sør. Gjennom forsøkene var tallerkenventilene rotert til maksimal åpning både i hull B og C.



Figur 7.1.5 Hull A, B og C (Foto: Nina Johanne Brænden)

7.2 Måleutstyr og programmer

7.2.1 Blowerdoor 4.1

Minneapolis Blowerdoor er et system som blir brukt til å måle lufttettheten til bygg i henhold til kapittel 6.2.3. Systemet består av en aluminiumsramme som monteres sammen med en lufttett duk. Duken og rammen plasseres som oftest i ytterdøren, og strammes til for å gjøre åpningen helt tett (BlowerDoor GmbH, 2018). En vifte monteres i dukens åpning. Med viften medfølger det ringer i forskjellige størrelser som festes på viften for å kunne regulere



åpningsstørrelsen og dermed luftstrømmen gjennom viften. Viftesystemet kobles til DG-700-apparatet som registrerer trykkforskjellen over viften og trykkforskjellen mellom ute og inne (BlowerDoor GmbH, 2018). DG-700 kobles videre til en PC med programmet TECTITE. Alle tilsiktede åpninger i klimaskjermen som ventiler, spjeld, vinduer etc. lukkes eller tapes igjen før trykktestingen starter (International Standard, 2015). For å ha kontroll på lekkasjepunktene er det ønskelig å kjøre en test først. Systemet kan settes på "cruise" med en gitt trykkforskjell, og man kan gå rundt og kjenne om det lekker luft med håndflaten eller lokalisere lekkasjene med et termograferingskamera (BlowerDoor GmbH, 2018).

Figur 7.2.1 Blowerdoor 4.1 (BlowerDoor GmbH, 2018)

7.2.2 TECTITE

TECTITE er programmet som registrerer tetthetsmålingene med Blowerdoor-systemet og beregner luftstrømmer ved forhåndsdefinerte trykkforskjeller. Programmet krever at inne- og utetemperaturer, vindforhold og terrengforhold legges inn. Før og etter testen registreres baseline, hvor programmet måler trykkforskjellen inne og ute mens viften er tildekket (BlowerDoor GmbH, 2018). Disse startparameterne er nødvendig for å kunne korrigere og oppnå eksakte målinger. Standarden NS-EN 13829 krever at det registreres fem målepunkter rundt 50 Pa. Programmet har forhåndsinnstilt ti målepunkter fra 25-70Pa, men brukeren kan endre dette. Brukeren kan også velge om testen vil utføres med overtrykk eller undertrykk. Når målingene er gjennomført har programmet registrert trykkforskjeller og beregnet lekkasjetallet n_{50} og koeffisientene C og n.

7.2.3 Sensirion

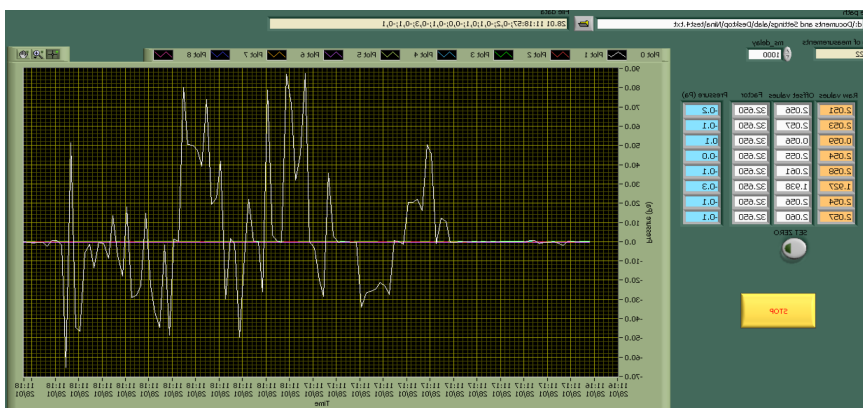
Sensirion er en trykksensor som måler trykkforskjellen, Δp , over fasadene. Sensirion har åtte sensorer som måler trykkforskjell hvor hver sensor er koblet til to trykkslanger. Slangene monteres på hver side av fasaden, og gjennom slangene måler sensoren trykkforskjellen. Et apparat kan derfor måle åtte forskjellige trykkforskjeller (NMBUs apparat har to defekte sensorer, og kan kun logge seks trykkforskjeller). Sensirion kobles via PC til programmet LabVIEW 2010.



Figur 7.2.2 Trykkslanger under oppkobling til måleapparatet Sensirion (Foto: Nina Johanne Brænden)

7.2.4 LabVIEW 2010

LabVIEW er et grafisk program som visualiserer måledata. Programmet tar inn måledata fra hvilken som helst leverandør og tilpasser enkelt brukergrensesnitt. I denne oppgaven tar LabVIEW inn måledata fra Sensirion, og viser sammenhengen mellom trykkforskjell over fasadene og tid. Programmet har mulighet for å ta inn åtte trykkdifferansemålinger.



Figur 7.2.3 Skjermdump fra programmet LabVIEW 2010

Som figur 7.2.3 viser blir målingene grafisk fremstilt. Trykkforskjellen vises på y-aksen og tiden på x-aksen. Det er mulig å legge inn i hvilket intervall målingene skal tas.

7.2.5 Rotronic CP11

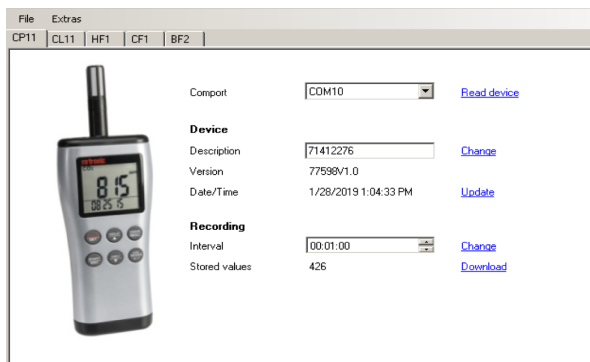


CP11 er et håndholdt instrument som måler og registrerer CO₂-konsentrasjon, luftfuktighet og temperatur (Rotronic, 2018). Instrumentet sender ut lysglimt, og CO₂-konsentrasjonen bestemmes ut i fra hvor mye lys som absorberes. Tid og dato må legges inn, slik at måledataene stemmer overens med måletidspunktet. Måledataene overføres til PC og programmet Rotronic SW2.1.

Figur 7.2.4 CP11 (Rotronic, 2018)

7.2.6 Rotronic SW2.1

Rotronic SW2.1 er et program som henter inn måledata fra CP11 (Rotronic, 2018). Programmet henter inn måleapparatets navn, måledataene, dato og klokkeslett.



Figur 7.2.5 Skjermdump fra programmet Rotronic SW2.1

7.2.7 Vifte

For å sikre god fordeling av CO₂ og dermed lik konsentrasjon i hele modulen er det brukt en enkel bordvifte for å blande luften godt. Viften er plassert slik at den ikke skal påvirke luftstrømmene ved lekkasjeåpningene eller trykkslangene. Viften har den samme plasseringen og effekten gjennom alle forsøkene, og roterer ikke automatisk.

7.3 Gjennomføring av målinger

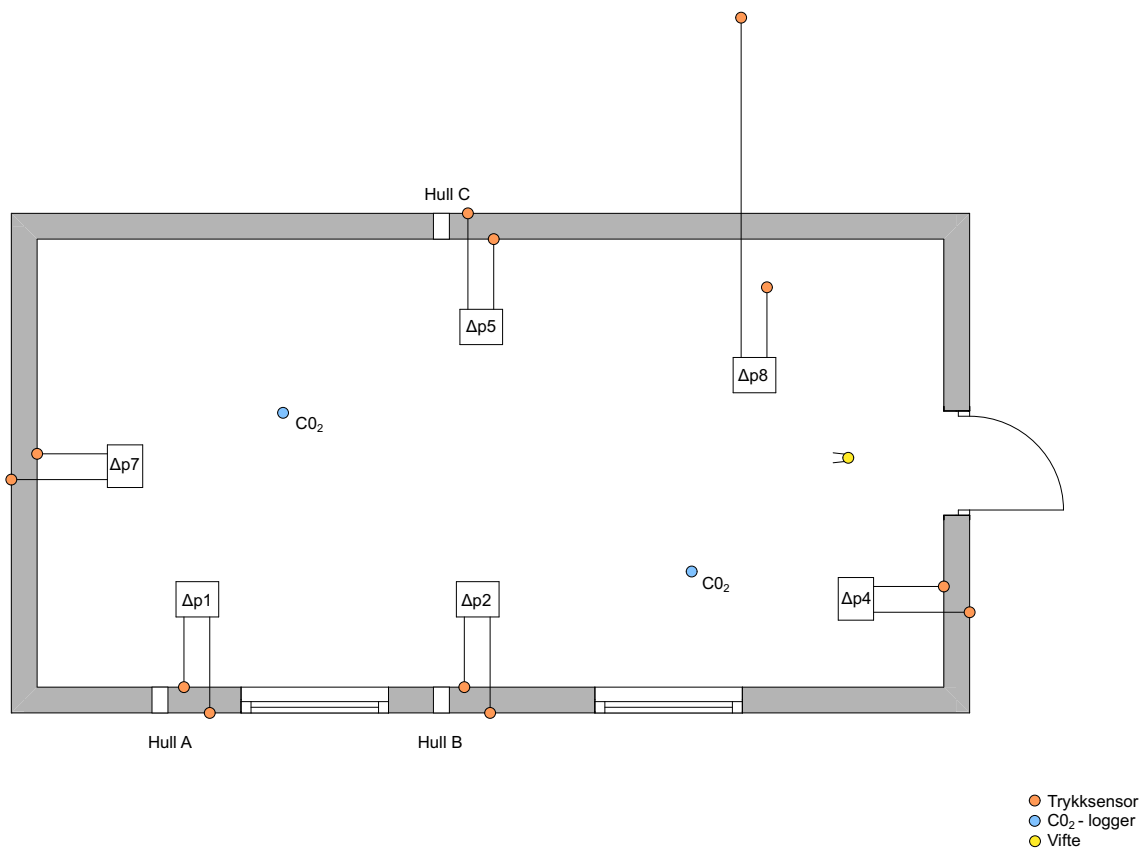
Det ble gjennomført tre kvantitative målinger på modulbygget:

- Tetthetsmåling med differansetrykkmetoden
- Måling av trykkdifferanse over fasadene
- Sporgassmåling

I tillegg ble vinddata registrert ved værstasjonen på feltet innhentet fra BIOKLIM.

Tetthetsmåling var den første målingen som ble gjennomført, og ble gjennomført for å finne strømningsverdiene og luftlekkasjetallet til modulbygget. Tetthetsmålingene ble utført i løpet av en dag, mens trykkdifferanse over fasadene og sporgassmåling ble utført gjentatte ganger i løpet av mars måned. Til slutt ble vinddata fra måleperiodene hentet inn fra BIOKLIM. Målingene og vinddata kunne dermed sammenliknes og infiltrasjonsmodellene kunne utarbeides.

Figuren nedenfor gir en oversikt over hvor måleapparatene for sporgassmåling og trykkdifferanse over fasadene var plassert ut i modulen:



Figur 7.3.1 Oppsett av måleutstyr for sporgassmåling og trykkdifferansemåling

I forkant av de gjennomførte målingene ble det gjennomført testforsøk for å bli kjent med utstyret og metodene, og dermed minske bruker-feilkilder. Måleintervallet ble først satt til hvert sekund, men resulterte i alt for stor datamengde. Siden værstasjonen registrerer vinddata hvert 10. minutt, ble måleintervallet satt til hvert 60. sekund. Etter testforsøkene kunne forsøkene settes i gang.

Tabell 7.3.1 Oversikt over test- og forsøksdager

Testforsøk	Type måling	Dato	Sted
1	Tetthetsmåling m. Tormod	15/1-19	TF garasjen fløy 5
2	CO ₂ -konsentrasjon i masterrom	18/1-19	TF Fløy 5
3-5	Tetthetsmålinger	5/2, 7/2	Modul A
6-7	Sporgass + trykkdifferanse	13/2, 26/2, 27/2	Modul A
Forsøk			
1-5	Tetthetsmålinger	12/2	Modul A
6-22	Sporgass + trykkdifferanse	5/3-25/3	Modul A

7.3.1 Tetthetsmåling

Tetthetsmåling beskrevet i kapittel 6.2.3 ble gjennomført for å finne modulens strømningsverdier (C , n) og lekkasjetall (n_{50}). Testene ble gjennomført i løpet av en dag.

Utstyr brukt i tetthetsmålingene:

- 1) Blowerdoor 4.1 sett
- 2) Lufttett byggetape
- 3) Temperaturmåler
- 4) PC med programmet TECTITE
- 5) Termograferingskamera

Dato for gjennomføring: 12/2.

Først ble modulen tetthetsmålt med hullene A, B og C lukket for å finne modulens lekkasjetall før modulens tetthet ble utbedret. Modulen ble etter dette satt i undertrykk for å lokalisere lekkasjer med termograferingskamera. Modulen ble utbedret innvendig med tetting med tape rundt vinduene, og langs overgangen mellom gulv og vegg der termograferingskameraet viste lekkasjer. Etter forbedringen var utført ble modulen tetthetsmålt for å se om lekkasjetallet avtok. Som vedlegg 1 og 2 viser, avtok lekkasjetallet fra 4,65/h til 3,17/h. Forbedringen ble gjort for å kunne måle strømningsverdiene mer eksakt og i større grad utelukke andre lekkasjer. Etter tetthetsmåling ved endt utbedring ble modulen tetthetsmålt tre ganger, en gang for hvert hull. Dette gjorde det mulig å beregne strømningssegenskapene til hvert hull. Tetthetsmålingene er gjennomført med både undertrykk og overtrykk.

Tabell 7.3.2 Oversikt over tetthetsmålingene og hensikt

Tetthetsmåling	Tettinger	Begrunnelse
1	Alle hull tett	Finne lekkasjetall før utbedring
2	Alle hull tett	Finne lekkasjetall etter utbedring
3	Hull A åpent	Beregne C -, og n verdiene til hull A
4	Hull B åpent	Beregne C -, og n verdiene til hull B
5	Hull C åpent	Beregne C -, og n verdiene til hull C

Tetthetsmålingene med Blowerdoor er vedlagt i vedlegg 1-5 og utregning av hullenes C -, og n -verdier i vedlegg 6.

7.3.2 Trykkdifferanse over fasadene

Trykkdifferanse over fasadene ble målt med trykkslanger tilkoblet apparatet Sensirion.

Utstyr brukt i målingene:

- Sensirion
- PC med programmet LabVIEW
- Trykkslanger
- Svamper
- Tape

Periode for gjennomføring: 5/3-25/3

Trykkslanger ble koblet til måleapparatet og festet på veggene inne og ute med tape. Slangene ble ført ut gjennom noen små åpninger i fasadene som tidligere har blitt brukt til heisefeste. Disse åpningene ble tapet igjen etterpå. Det ble montert svamper på slangeåpningene ute for å måle det statiske trykket. I følge Tormod Aurlien skulle dette utelukke det dynamiske trykket. Måleapparatet registrerte trykkforskjell hvert 60. sekund. Tabell 7.3.3 og figur 7.3.4 gir en oversikt over plassering av trykkdifferansesensorene.

Tabell 7.3.3 Oversikt over plassering av trykkdifferansesensorer

Trykkmåler	Fasade	Hull
Δp_1	Sør	A
Δp_2	Sør	B
Δp_4	Øst	-
Δp_5	Nord	C
Δp_7	Vest	-
Δp_8	Grunntrykk	-



Figur 7.3.2 Trykkslanger plassert under ventilåpning inne og ute (Foto: Nina Johanne Brænden)

7.3.3 Sporgassmåling med CO₂

Sporgassmåling beskrevet i kapittel 6.4 ble gjennomført for å finne modulens infiltrasjonstall, n_{inf} , ved ulike vindhastigheter og retninger. I denne oppgaven er CO₂ valgt som sporgass, fordi det er enkelt å få tak i, rimelig og uskadelig i mindre mengder.

Utstyr brukt i målingene:

- Brannsløkkingsapparat med CO₂-gass
- 2 stk. CO₂-loggere (CP11)
- PC med programmet Rotronic
- Vifte

Periode for gjennomføring: 5/3-25/3

CO₂-konsentrasjonen i uteluften ble registrert før målingen startet. Gassen ble så sprayet inn i modul A til en konsentrasjon på ca. 4-6000 ppm. Konsentrasjonen på 4-6000 ppm ble valgt ut etter erfaringsoverføring fra Stergiani Charisi, som har brukt sporgass i sin doktorgrad. Etter innsprøytingen fortsatte CO₂-konsentrasjonen å stige til ca. 5-7000 ppm. To CP11 målere registrerte CO₂-konsentrasjonen i modulen, og ble plassert ut som vist på figur 7.3.1 i en høyde på ca. 80 cm over gulvet. Registreringene ble gjort hvert 60. sekund. En vifte ble plassert ut i modulen for å sørge for at gassen ble godt blandet inn i volumet. Etter innsprøytingen pågikk målingene til neste måling skulle utføres, ca. 12 eller 24 timer etter innsprøyting. En måleperiode er fra når CO₂-gassen når maksimal verdi etter den er sprayet inn til konsentrasjonen inne i modulen når uteluftens konsentrasjonsverdi. Måleperiodene varierte fra et par timer til seks timer.

7.3.4 Værstasjon

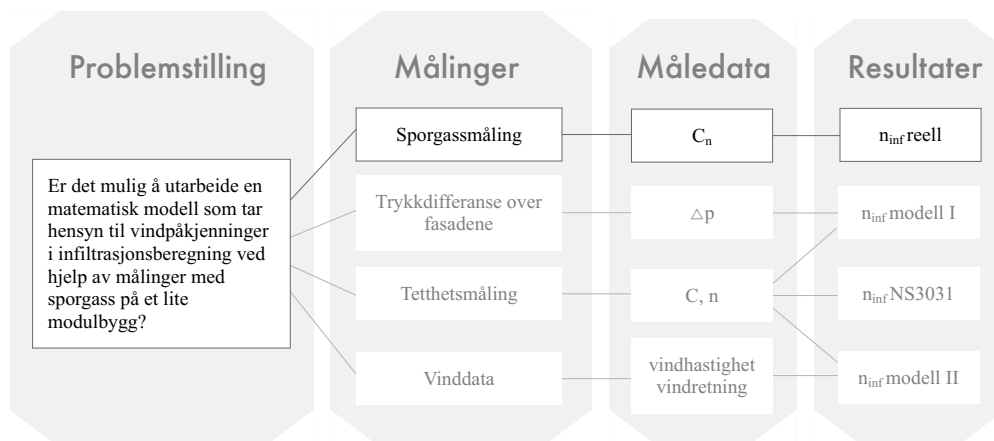
Værstasjonen som ligger like ved modulen ble benyttet for å hente ut vinddata fra dagene målingene ble utført. Signe Kroken, avdelingsingeniør på BIOKLIM ved NMBU, var behjelpelig med å anskaffe vinddata. Værstasjonen registrerer vindhastighet, vindretning og lufttemperatur hvert tiende minutt.

Rapporten "Byggrelaterte lokalklimadata for Ås" viser at den dominerende vindretningen i Ås er sør, men vind fra nord forekommer også ofte. I løpet av tiårsperioden 2000-2009 viser døgnmiddelverdiene at vindhastigheten er mindre eller lik 4 m/s 88 % av dagene, og mindre eller lik 6 m/s 99 % av dagene. Verdiene for vindhastighet er midlede verdier over 10 minutter, og er målt 10 meter over bakken (Grimenes & Thue-Hansen, 2010).

7.4 Bearbeiding av måledata

I dette kapittelet er det forklart hvordan måledataene har blitt brukt for å beregne infiltrasjon. Måledata fra tetthetsmåling, trykkdifferanse over fasadene og vinddata ble brukt for å beregne infiltrasjon i infiltrasjonsmodell I og II. Måledata fra sporgassmålingene ble brukt for å beregne reell infiltrasjon. Et regneark i Excel ble opprettet for hver måleperiode for å samle data fra de fire måle metodene.

7.4.1 Sporgassmåling med CO₂



Figur 7.4.1 Sporgassmåling metode

Måledata fra sporgassmålingene ga grunnlag for å beregne reell infiltrasjon ved å se på hvordan CO₂-konsentrasjonen avtok over tid. En normalisert konsentrasjonsverdi som tar hensyn til inne- og uteluftens CO₂-konsentrasjon ble først beregnet (Kraniotis, 2014):

$$C_N = \frac{C(t) - C_0}{C(0) - C_0} [ppm]$$

For å kunne beregne infiltrasjonstallet med den normaliserte konsentrasjonsverdien ble den naturlige logaritmen til C_N først beregnet. Infiltrasjonstallet ble så beregnet på bakgrunn av forskjellen i konsentrasjon mellom måling i og $i+1$ og ga dermed et infiltrasjonstall for hvert minutt:

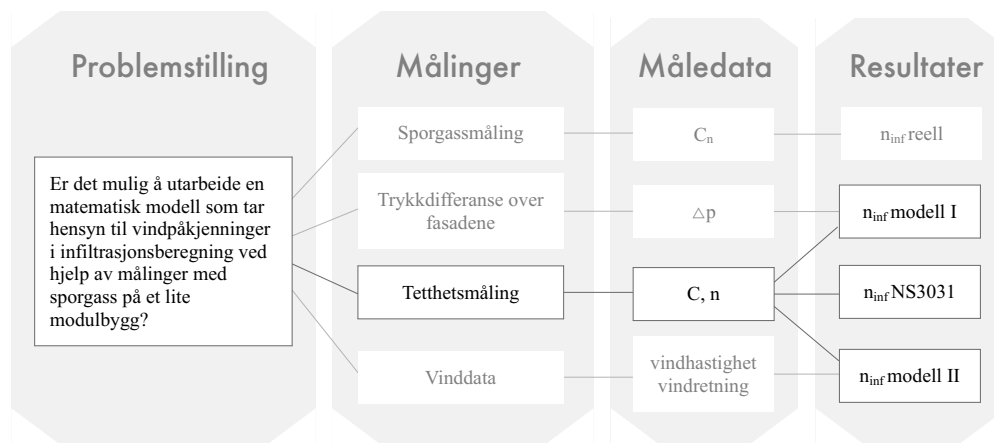
$$n_{inf,i} = \frac{\ln(Cn)_{i+1} - \ln(Cn)_i}{t_{i+1} - t_i} [1/h]$$

Sporgassmålingene er registrert hvert 60. sekund. For å kunne sammenlikne n_{inf} fra sporgassmålingene med vinddata ble det for hvert tiende minutt tatt gjennomsnittet av de ti foregående målingene.

Tidsintervallet for når CO₂-konsentrasjonen var på topp (5-7000 ppm), og til den hadde nådd uteluftens konsentrasjon, varierte for hver måling på grunn av varierende vindforhold. Infiltrasjonstallene er derfor beregnet fra målepunktet der CO₂-konsentrasjonen i modulen var på maksimum til konsentrasjonen nådde uteluftens konsentrasjonsverdi. Dermed har hver måleperiode forskjellig tidsintervall. Noen dager varierte vinden innenfor samme måleperiode, og flere resultater ble derfor hentet ut fra samme periode for å gi større utslag på resultatene.

To CO₂-loggere var plassert ute i modulen. Dette resulterte i to infiltrasjonstall for hver måling. Endelig infiltrasjonstall for hver måleperiode ble bestemt ved å ta gjennomsnittet.

7.4.2 Tetthetsmåling



Figur 7.4.2 Tetthetsmåling metode

Som figuren viser ga måledata fra tetthetsmåling grunnlag for å beregne strømmingsegenskapene til modulen (C,- og n-verdier). C,- og n-verdiene beskriver hvordan luften strømmer inn og ut gjennom modulens lekkasjer, og danner dermed grunnlag for å beregne infiltrasjon (n_{inf}) i infiltrasjonsmodellene. C,- og n-verdiene gjorde det også mulig å beregne modulens infiltrasjonstall etter NS 3031. C,- og n-verdiene ble beregnet slik:

For hver tetthetsmåling registrerte TECTITE trykkdifferanse og luftstrømmer. Ved å ta differansen mellom luftstrømmene ved alle hull lukket og hver og et hull åpent, vil man kunne finne ut hvor stor mengde luft som strømmer gjennom hull A, B og C. Luftstrømmen som er registrert når alle hull er lukket vil kunne si noe om hvor store de resterende lekkasjene er. Ved å plote de registrerte luftstrømmene mot målt trykkdifferanse og trekke en trendlinje gjennom punktene, vil egenskapene til trendlinjen gi strømningsverdiene C og n for hvert hull og resterende lekkasjer (se vedlegg 6). Trendlinjen er beskrevet av funksjonen $y =$

Ax^B , der A gir verdien C og B gir verdien n. Luftstrømmene er hentet fra tetthetsmålingene (vedlegg 1-5), og strømningssegenskapene er regnet ut i vedlegg 6. Resterende lekkasjer antas å fordeles likt over fasadene, og hver fasades C-verdi regnes derfor ut i fra lengden på fasaden i forhold til total fasadelengde:

$$C_{sør} = C_{nord} = C_{rest} * \frac{l_{sør/nord}}{l_{totalt}}$$

$$C_{øst} = C_{vest} = C_{rest} * \frac{l_{øst/vest}}{l_{totalt}}$$

Fasadenes n-verdi antas å være lik den resterende n-verdien til hele bygget:

$$n_{sør} = n_{nord} = n_{øst} = n_{vest} = n_{rest}$$

Se vedlegg 7 for oversikt over alle C-, og n-verdiene for modulen.

Siden de registrerte luftstrømmene ikke er målt ved lik trykkforskjell ved hver måling, måtte dette korrigeres. Dette er gjort ved å regne ut luftstrømmene på bakgrunn av målt C og n fra tetthetsmålingene og like trykkforskjeller (25, 30, 35 osv.). Tetthetsmålingene er gjennomført med undertrykk og overtrykk og ga dermed to C-, og n-verdier. Differansen mellom C-, og n-verdiene for undertrykk og overtrykk var betydelig, og det ble derfor valgt å ikke ta gjennomsnittet.

Som nevnt kunne også tetthetsmålingene brukes til å beregne modulens tetthet. Modulens tetthet blir derfor beregnet på bakgrunn av beregnede C-, og n-verdier (vedlegg 6) fra tetthetsmålingene:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{50} &= \sum \dot{V} = \dot{V}_{hull A} + \dot{V}_{hull B} + \dot{V}_{hull c} + \dot{V}_{rest} \text{ [m}^3\text{]} \\ &= 36,218 * 50^{0,4972} + 27,586 * 50^{0,4506} + 26,136 * 50^{0,4457} + 6,021 * 50^{0,7706} \\ &= 686,25 \text{ m}^3\text{/h} \end{aligned}$$

Lekkasjetallet kunne beregnes (European Standard, 2006):

$$\begin{aligned} n_{50} &= \frac{\dot{V}_{50}}{V} \text{ [1/h]} \\ &= \frac{686,25 \text{ m}^3\text{/h}}{58 \text{ m}^3} = 11,83 \text{ /h} \end{aligned}$$

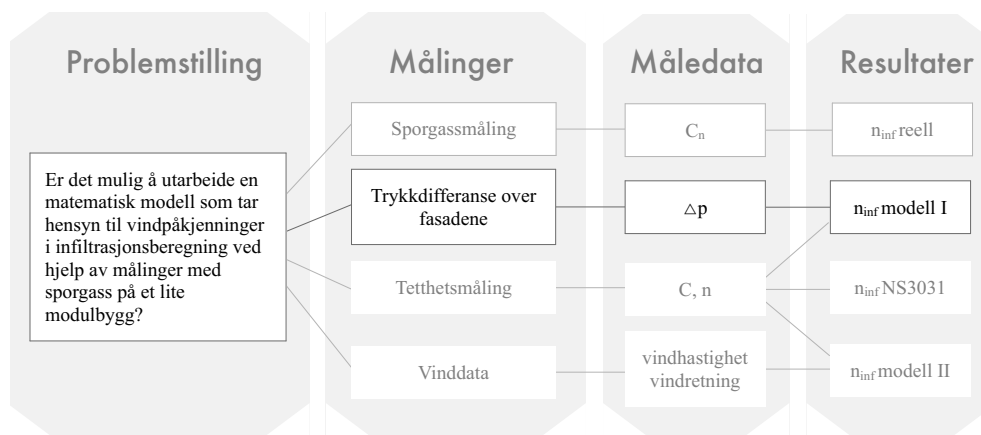
Lekkasjetallet brukes videre i infiltrasjonsberegning etter NS 3031 (Norsk Standard, 2007):

$$n_{inf} = \frac{n_{50} * e}{1 + \frac{f}{e} * \left(\frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{V * n_{50}}\right)^2} [1/h]$$

Modulen ligger lite skjermet og med mer enn én vindutsatt fasade. Dette gir $e = 0,1$ og $f = 15$ fra tabell 6.3.2. Det er ingen avtrekksventilasjon ($\dot{V}_1 - \dot{V}_2 = 0$).

Dette gir et infiltrasjonstall på: $n_{inf} = n_{50} * 0,1 = 11,83/h * 0,1 = 1,18/h$

7.4.3 Infiltrasjonsmodell I "trykkdrevet"



Figur 7.4.3 Infiltrasjonsmodell I metode

Som figuren viser vil *målingene* trykkdifferanse over fasadene gi *måledata* i form av registrert trykkdifferanse, Δp , over fasadene. Måledataen Δp har videre blitt brukt for å utarbeide infiltrasjonsmodell I (n_{inf}). Som figuren viser er også strømningsegenskapene C ,- og n beregnet fra tetthetsmålingene vesentlige i infiltrasjonsmodell I. Infiltrasjonsmodell I er dermed et *resultat* fra tetthetsmåling og registrert trykkdifferanse over fasadene.

7.4.3.1 Trykkdifferanse over fasadene

For å utarbeide infiltrasjonsmodell I er det tatt utgangspunkt i eksisterende formelverk for beregning av luftstrøm og infiltrasjonstall. Luftstrømmen gjennom lekkasjene og fasadene regnes ut ved å bruke den målte trykkdifferansen Δp og strømningsegenskapene C og n (European Standard, 2006):

$$\dot{V} = C * \Delta p^n [m^3/h]$$

Tetthetsmåling med differansetrykkmetoden baseres på trykksetting med 50 Pa trykkforskjell over klimaskjermen, og med denne metoden vil 50 Pa settes inn i formelen. Ved

brukssituasjon er ikke en trykkdifferanse på 50 Pa over klimaskjermen reelt. For å beregne luftstrøm inn i modulen ved normale forhold, tar infiltrasjonsmodell I inn målte trykkdifferanser i formelen. De målte trykkdifferansene er valg å implementeres i infiltrasjonsmodell I på denne måten:

Fortegnet til Δp bestemmer om luft strømmer inn eller ut av modulen. Når Δp er positiv er luftstrømmen også definert som positiv. Ved positive trykkdifferanser ble C_u , og n_u -verdiene for undertrykk brukt, og ved negative trykkdifferanser ble C_o , og n_o -verdiene for overtrykk brukt. Dette resulterte i at luftstrømmen for hvert hull/hver fasade ble beregnet slik:

$$\dot{V} = \text{hvis } (\Delta p > 0; C_u * \Delta p^{n_u}; -1 * C_o * \Delta p^{n_o}) [m^3/h]$$

Som betyr at hvis Δp er positiv skal luftstrømmen beregnes med C_u , og n_u -verdier for undertrykk (C_u , n_u) og hvis Δp er negativ skal luftstrømmen beregnes med C_o , og n_o -verdier for overtrykk (C_o , n_o). Luftstrømmene ble beregnet gjennom hull A, B, C og fasade nord, sør, øst, vest.

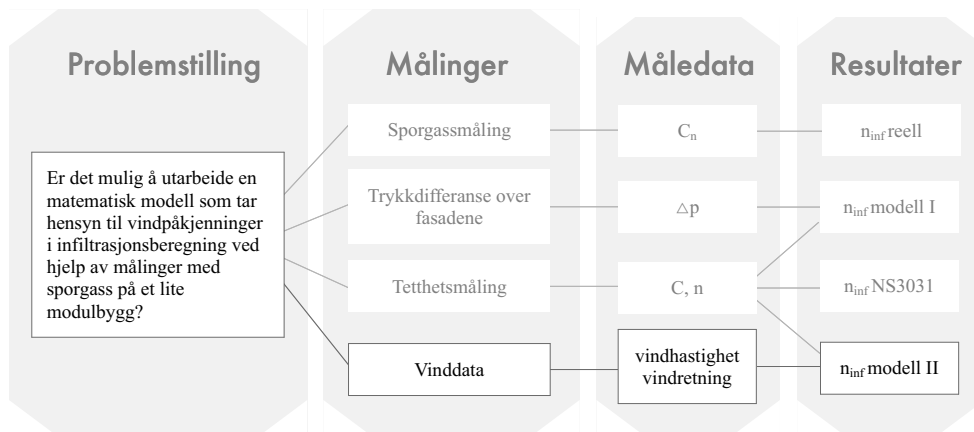
I teorien skal like mye luft gå inn som ut i modulen ($\dot{V}_{inn} = \dot{V}_{ut}$) og dermed spiller det ingen rolle om infiltrasjonstallet beregnes med luftstrøm inn eller ut. De positive luftstrømmene (\dot{V}_{inn}) ble valgt ut for å summeres. Den totale luftstrømmen inn i modulen ble videre brukt til å beregne infiltrasjonstallet n_{inf} (European Standard, 2006):

$$n_{inf} = \frac{\dot{V}_{inn}}{V} [m^3/h]$$

Trykkdifferansemålingene er utført hvert 60. sekund og for å kunne sammenliknes med vinddata ble det for hvert tiende minutt tatt gjennomsnittet av de ti foregående målingene.

Se vedlegg 7 for utfyllende matematisk beskrivelse av infiltrasjonsmodell I.

7.4.4 Infiltrasjonsmodell II "vinddrevet"



Figur 7.4.4 Infiltrasjonsmodell II metode

Som figuren viser vil *målingene* vinddata fra værstasjonen gi *måledata* i form av registrerte vindhastigheter og retninger. Måledataene vindhastighet og retning har videre blitt brukt for å utarbeide infiltrasjonsmodell II (n_{inf}). Som figuren viser er også strømningssegenskapene C ,- og n beregnet fra tetthetsmålingene vesentlige i infiltrasjonsmodell II. Infiltrasjonsmodell II er dermed et *resultat* av tetthetsmåling og registrert vindhastighet og retning ved værstasjonen.

7.4.4.1 Vinddata

For å utarbeide infiltrasjonsmodell II ble vindhastighet og retning tatt i bruk sammen med modulens strømningssegenskaper beregnet fra tetthetsmålingene. Vindretningen er oppgitt i grader og oversatt til himmelretning for å gi et klarere bilde på hvor det blåser fra.

Tabell 7.4.1 Vindretning i grader og himmelretning

Grader	Vind fra
0/360	Nord
90	Øst
180	Sør
270	Vest

Som forklart i kapittel 6.1.2 er vindens hastighet registrert i 10 meters høyde over bakken. Vindhastigheten rundt modulen vil være lavere enn vindhastigheten registrert av værstasjonen på grunn av omgivelsenes terrengruhet. Vinddata ble derfor oversatt fra 10 meter til modulens faktiske høyde over bakkenivå med "the logarithmic law" (International Standard, 2015):

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\ln(h_1/z_0)}{\ln(h_2/z_0)}$$

Det ble dermed regnet ut en lokal vindhastighet som treffer hver fasade og hvert hull (v_1) avhengig av den registrerte vindhastigheten (v_2) på måletidspunktet. h_2 ble satt til 10m. h_1 ble satt til hullenes høyde over bakken eller fasadenes midlere høyde over bakken (verdier hentet fra modulens snitt, figur 7.1.4). Ruhetslengden (z_0) ble satt til 0,05 på grunn av at modulens omgivelser antas å være i terrengkategori II (tabell 6.1.2).

For å utarbeide infiltrasjonsmodell II er det tatt utgangspunkt i eksisterende formelverk for beregning av luftstrøm og infiltrasjonstall. Luftstrømmen gjennom lekkasjene og fasadene regnes ut ved å bruke den utregnede trykkdifferansen Δp og strømningsegenskapene C og n (European Standard, 2006):

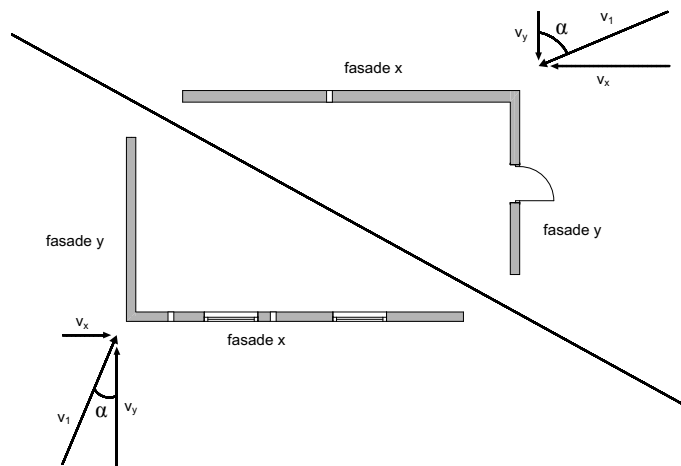
$$\dot{V} = C * \Delta p^n [m^3/h]$$

I motsetning til infiltrasjonsmodell I hvor Δp er målte trykkdifferanser over fasadene, er Δp utregnet fra den lokale vindhastigheten ved modulens fasader og hull (Edwardsen & Ramstad, 2014):

$$\Delta p = \frac{1}{2} * \rho * v^2 [Pa]$$

De registrerte vindhastighetene og retningene ble valg å implementeres i infiltrasjonsmodell I på denne måten:

Infiltrasjonsmodell I baseres på luftstrøm *inn* i modulen og dermed ble det bestemt at infiltrasjonsmodell II også skulle beregnes med luftstrøm inn. Vindretningen registrert av værstasjonen forteller hvilke fasader vinden skaper overtrykk ved. Ved disse fasadene ble luftstrøm inn i modulen beregnet. For å finne vindens hastighet ved hver fasade og hvert hull ble vindkomponentene i x- og y-retning beregnet:



Figur 7.4.5 Vindkomponenter i x- og y-retning

$$v_x = v_1 * \sin(\alpha) \text{ [m/s]}$$

$$v_y = v_1 * \cos(\alpha) \text{ [m/s]}$$

Trykkdifferansen over fasadene og hullene ble beregnet på bakgrunn av lokale vindhastighetskomponenter:

$$\Delta p_x = C_{pe} * \frac{1}{2} \rho v_x^2 - p_i \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_y = C_{pe} * \frac{1}{2} \rho v_y^2 - p_i \text{ [Pa]}$$

Ved beregning av vindtrykk på konstruksjoner brukes utvendig formfaktor (C_{pe}) som tar hensyn til byggets form (Norsk Standard, 2009) Det er valgt å implementere formfaktor i infiltrasjonsmodell II, slik som i konstruksjonsberegning. C_{pe} ble bestemt fra tabell 6.1.1 og sone D (der vinden skaper overtrykk). Denne sonen er større enn 10m^2 og dermed kan $C_{pe,10}$ fra tabell 6.1.1 brukes (Norsk Standard, 2009). p_i ble målt med Δp_8 (nulltrykk, figur 7.4.1 og tabell 7.4.3) under hele forsøksperioden og ga minimal trykk ($0 - +/-1,5 \text{ Pa}$). p_i har derfor blitt satt til 0 ved beregning av trykkdifferanse over fasadene og hullene.

Luftstrøm gjennom fasadene ble beregnet:

$$\dot{V}_{inn,fasade\ x} = C_{x,u} (\Delta p_y)^{n_{x,u}} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\dot{V}_{inn,fasade\ y} = C_{y,u} (\Delta p_x)^{n_{y,u}} \text{ [m}^3\text{]}$$

Hvor C og n er strømningsegenskapene beregnet fra tetthetsmålingene og Δp er den beregnede trykkdifferansen over fasaden.

Luftstrøm gjennom fasadene hvor vinden skaper overtrykk ble summert:

$$\dot{V}_{inn} = \dot{V}_{inn,fasade\ x} + \dot{V}_{inn,fasade\ y} [m^3]$$

Til slutt kunne infiltrasjonen beregnes (European Standard, 2006):

$$n_{inf} = \frac{\dot{V}_{inn}}{V} [m^3/h]$$

Se vedlegg 8 for utfyllende matematisk beskrivelse av infiltrasjonsmodell II.

7.5 Metodens egnethet

I en kvantitativ analyse er det viktig å sikre god validitet og reliabilitet (Dahlum, 2018a). God validitet kjennetegnes ved at det kan trekkes gyldige slutninger om formålet som er undersøkt (Dahlum, 2018b). Validitet deles inn i indre validitet og ytre validitet (Pripp, 2018). Indre validitet er i hvilken grad resultatet er gyldig for det undersøkte fenomenet og ytre validitet er i hvilken grad resultatet kan overføres til andre situasjoner (Pripp, 2018).

I denne oppgaven er det god indre validitet. Det er utført målinger på et modulbygg som er utsatt for reelle vindsituasjoner og resultatene fra målingene vil dermed være gyldige for modulen. Den ytre validiteten til denne oppgaven er ikke like høy, som nevnt i avgrensningen. Vind er et fenomen som påvirkes av flere faktorer som nevnt i kapittel 6.1.2, og vil oppføre seg annerledes avhengig av omgivelsene. I utgangspunktet er formfaktor og "the logarithmic law" faktorer som tilpasser vinden til omgivelsene og vil dermed gjøre resultatene overførbare til andre situasjoner. Metodens ytre validitet avhenger derfor av hvor godt faktorene beregner reell vind lokalt, noe som denne oppgaven ikke svarer på.

For å sikre god reliabilitet i denne oppgaven er det viktig å ha kontroll over og være klar over måleusikkerhetene. Reliabilitet er et mål på troverdigheten til undersøkelsen, altså om gjentagelse av forsøket vil føre til samme resultat (Pripp, 2018). Måleusikkerheten i denne oppgaven omfatter bruk av måleutstyr, måleutstyret i seg selv og målemetode. For å redusere måleusikkerheten er det utført noen enkle tiltak som vil øke oppgavens reliabilitet.

- Ved tetthetsmåling var Tormod Aurlien til stede for å hjelpe til med riktig montering og bruk av utstyr. Han kunne også forsikre om at resultatene fra tetthetsmålingene hadde rimelige verdier.
- Tetthetsmålingene ble utført på dager det var lite vind.
- Stergiani Charisi sørget for opplæring i CP11 og hvordan Sensirion skulle kobles med trykkslanger. Hun ga også opplæring i hvordan tilhørende program skulle brukes.

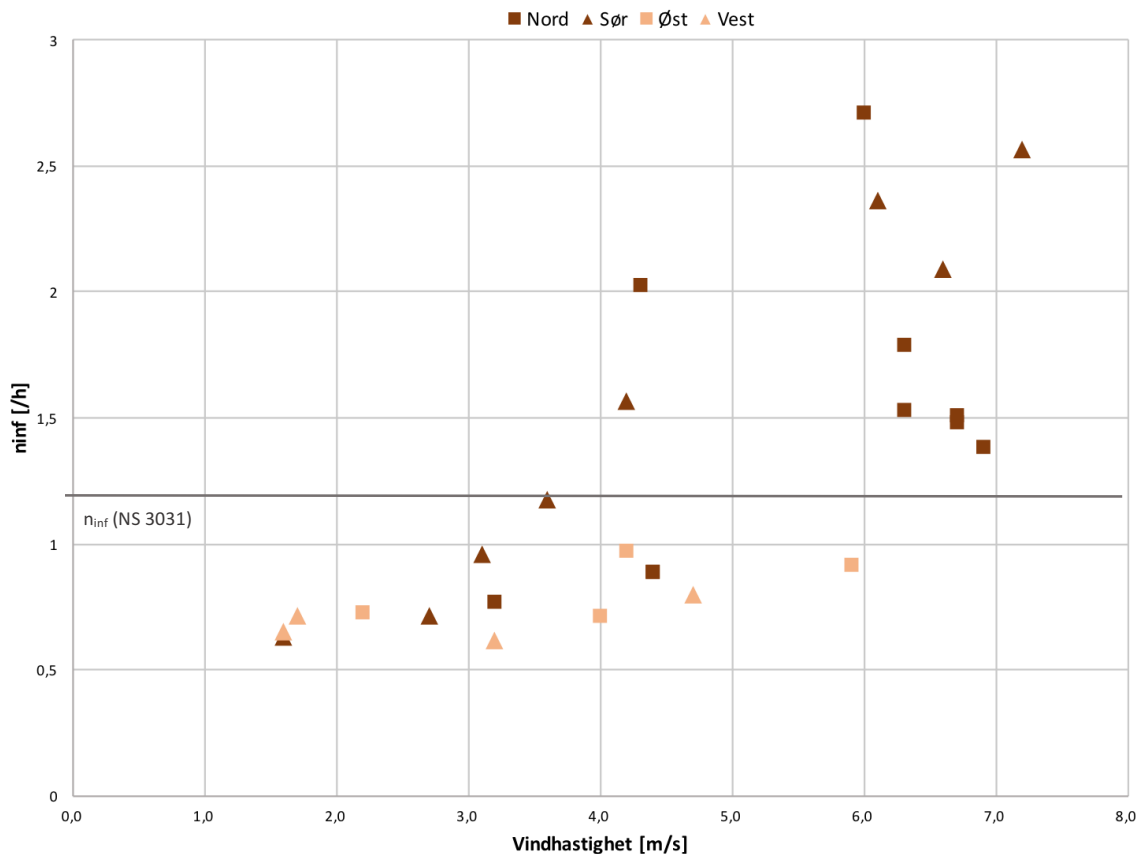
- Før forsøkene ble satt i gang ble det utført forsøkstester med tetthetsmåling, sporgassmåling og trykkdifferansemåling. Testene kunne avdekke om målingene burde vært utført annerledes og om resulterende verdier lå innenfor et ventet område.
- To CP11-apparater ble brukt for å sjekke om de viste samme verdi før forsøksstart. Apparatene ble tatt med ut og pustet på for å se om CO₂-konsentrasjonen endret seg. Etter forsøksstart ble måleresultatene fra begge CP11-apparatene sammenliknet for å undersøke om konsentrasjonen avtok i samme periode.
- Etter endt trykkdifferansemåling over fasadene ble resultatene sammenliknet med vindretning og hastighet, for å undersøke om trykkforholdene sammenfalt med styrke og retning på vinden.

8 Resultater

I dette kapitlet legges det frem fire resultater. Resultatene er innhentet gjennom målingene sporgassmåling, tetthetsmåling, trykkdifferanse over fasadene og vinddata. Målingene har blitt bearbeidet og resultert i infiltrasjonstall fra sporgassmåling, infiltrasjonsmodell I og infiltrasjonsmodell II. Til slutt er infiltrasjonstall fra sporgassmålingene sammenliknet med infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell I og II. Verdiene presentert i grafene er hentet fra vedlegg 26. Vedlegg 26 er resultatet av gjennomsnittsverdier hentet fra måleperiodene presentert i vedlegg 9-25.

8.1 Sporgassmåling med CO₂

Grafen nedenfor viser infiltrasjonstall fra sporgassmålingene ved ulike vindhastigheter og retning. Infiltrasjonstall fra sporgassmålingene gir *reell infiltrasjon*.

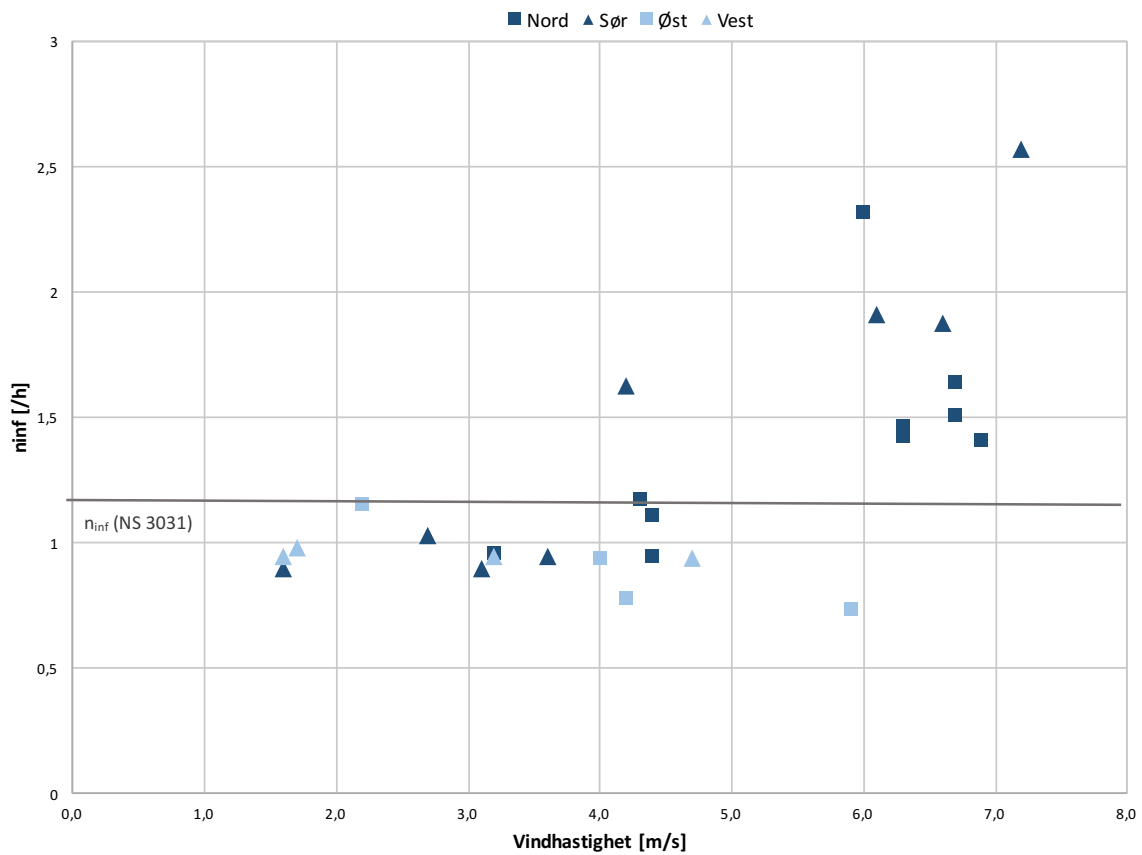


Figur 8.1.1 Infiltrasjonstall fra sporgassmåling ved ulike vindhastighet og retning

8.2 Infiltrasjonsmodell I "trykkdrevet"

Grafen nedenfor viser beregnet infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell I ved ulike vindhastigheter og retning. Infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell I gir *beregnet infiltrasjon*, basert på målt trykkdifferanse over modulens fasader:

$$n_{inf} = \frac{C\Delta p^n}{V}$$

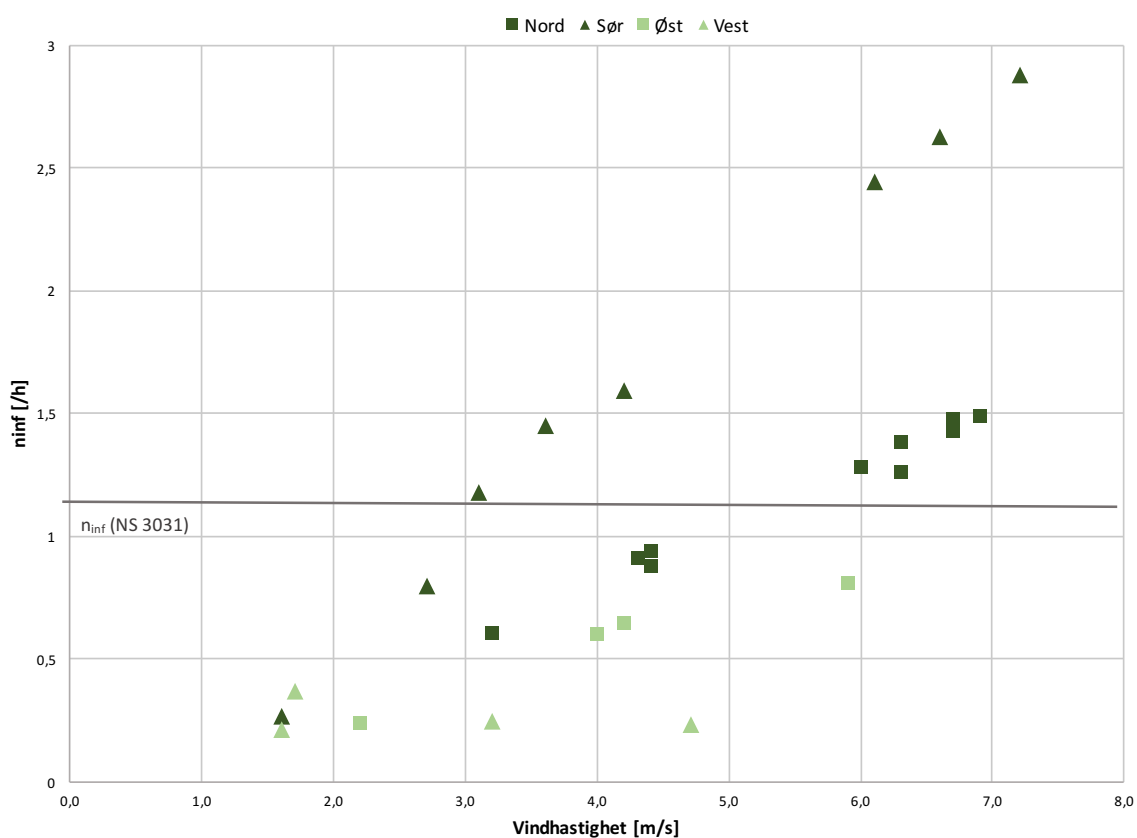


Figur 8.2.1 Infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell I ved ulike vindhastigheter og retning

8.3 Infiltrasjonsmodell II "vinddrevet"

Grafen nedenfor viser beregnet infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell II ved ulike vindhastigheter og retning. Infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell II gir *beregnet infiltrasjon*, basert på registrert vindhastighet og retning:

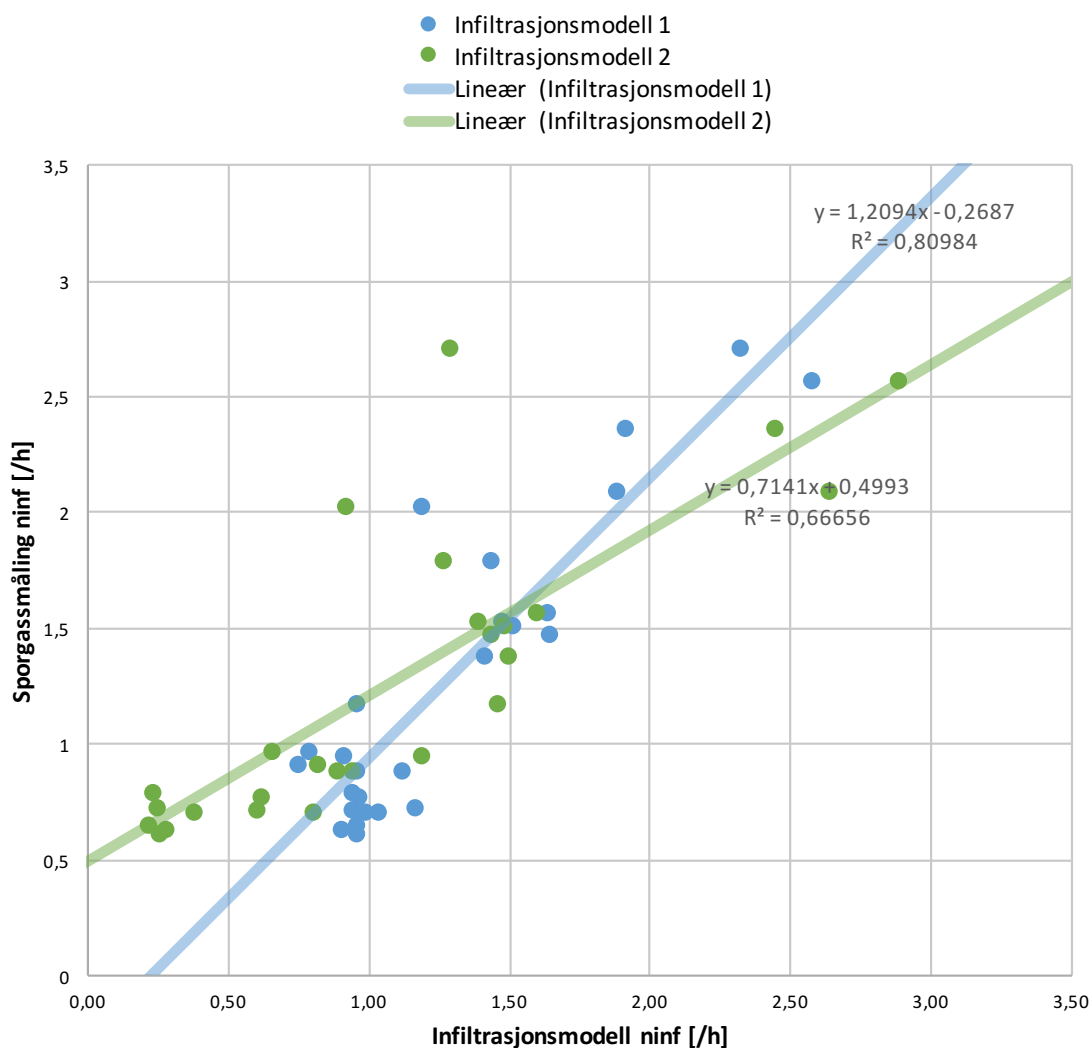
$$n_{inf} = \frac{C(\frac{1}{2}\rho v^2)^n}{V}$$



Figur 8.3.1 Infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell II ved ulike vindhastigheter og retning

8.4 Sporgassmåling og infiltrasjonsmodeller

Grafen nedenfor viser infiltrasjonstall fra sporgassmålingene (reell infiltrasjon) sammenliknet med infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell I og II (beregnet infiltrasjon). Den blå lineære linjen er linjen gjennom punktene for infiltrasjonsmodell I og den grønne lineære linjen er linjen gjennom punktene for infiltrasjonsmodell II.



Figur 8.4.1 Infiltrasjonstall fra sporgassmåling sammenliknet med infiltrasjonstall fra infiltrasjonsmodell I og II

9 Diskusjon

Det er i denne oppgaven valgt å analysere og diskutere resultatene samtidig, for å gjøre prosessen mer tydelig, oversiktlig og forståelig. Målingenes utførelse er også knyttet opp mot resultatene og er derfor valgt å diskuteres samtidig med analyse av resultatene.

9.1 Sporgassmåling med CO₂

Resultat fra sporgassmåling som vist i figur 8.1.1 viser økende infiltrasjon ved økende vindhastigheter fra nord og sør. Vind fra sør fører til større infiltrasjon enn vind fra nord. Fasade sør og nord består av modulens dominerende lekkasjer, og det er derfor forventet at disse vindretningene gir størst infiltrasjon. Fasade øst og vest har små lekkasjer og gir dermed mindre økning i infiltrasjon ved vind fra øst eller vest. Dette stemmer bra med sammenhengen mellom luftstrøm, størrelse på lekkasjer og trykkdifferanse som skapes av vinden beskrevet i teorikapittel 6.2.3 (European Standard, 2006). Resultatet fra sporgassmålingene underbygger også dermed at infiltrasjonen øker ved økende vindhastigheter.

Grovt sett ser det ut til at målepunktene for nord, sør, øst og vest ser ut til å følge hver sin kurve. Naturlig nok har målepunktene en viss spredning, noe som kan forventes ved måling i reelle situasjoner. Spredningen kan også skyldes flere faktorer som blir diskutert nedenfor.

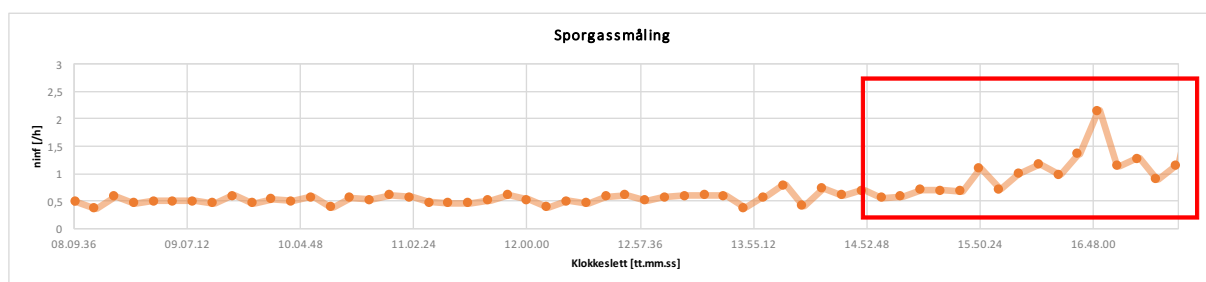
Modulens plassering ute på et flatt og åpent område gjør at modulen ligger vindutsatt og lite skjermet av omkringliggende bebyggelse og vegetasjon. Modulen ligger likevel side om side med modul B og det er plassert ut store solceller sør-sørøst for modulen. Plasseringen av modul B og solcellene kan ha hatt innvirkning på resultatene. Modul B vil virke skjermende ved østlig vind, og ved vind fra sør eller nord vil avstanden mellom modulene gjøre at vinden får større fart enn ellers. Solcellene kan ha fungert som en vinge som endrer vindens hastighet og retning. Den geometriske formen på modulens tak kan også skape andre bevegelsesmønstre for vinden enn først antatt.



Figur 9.1.1 Solceller plassert foran modul A og B (Foto: Nina Johanne Brænden)

Denne oppgaven forutsetter at sporgassmålingene gir reell infiltrasjon, og sporgassmålingene er ikke valgt å undersøkes nærmere enn det som står beskrevet i sporgass-standarden nevnt i kapittel 6.4. Dermed kan utføringen av sporgassmålingen og behandling av måledata diskuteres.

Som nevnt i kapittel 6.4 skulle målt CO_2 -konsentrasjon korrigeres for uteluftens konsentrasjon og konsentrasjon ved målestart, og resultere i en normalisert verdi. Når måledata ble behandlet viste det seg at den normaliserte konsentrasjonsverdien er veldig sårbar for uteluftens CO_2 -konsentrasjon. I følge kapittel 6.4 skal uteluftens CO_2 -konsentrasjon ligge i gjennomsnitt på 400 ppm. Gjennomsnittsverdien for uteluftens CO_2 -konsentrasjon stemte bra med observerte verdier, men varierte nok til at det ga utslag på slutten av hver måleperiode når konsentrasjonen i modulen nærmet seg uteluftens konsentrasjon. Det viste seg i ettertid at måling av uteluftens CO_2 -konsentrasjon gjennom måleperiodene burde blitt gjort. Måling av uteluftens konsentrasjon kunne gitt mer nøyaktige beregninger av den normaliserte konsentrasjonsverdien, og dermed beregnet luftskifte. For å håndtere dette har måledata en god stund før måleperiodens slutt blitt sett bort i fra. Denne sårbarheten kommer frem i grafene for sporgassmåling i vedlegg 9-25. CO_2 -konsentrasjonen i uteluften (C_0) før målestart kunne ikke brukes ved beregning av den normaliserte konsentrasjonsverdien og ble heller satt til laveste registrerte konsentrasjon ved måleslutt. Dette er ikke slik kapittel 6.4 beskriver verdien C_0 .

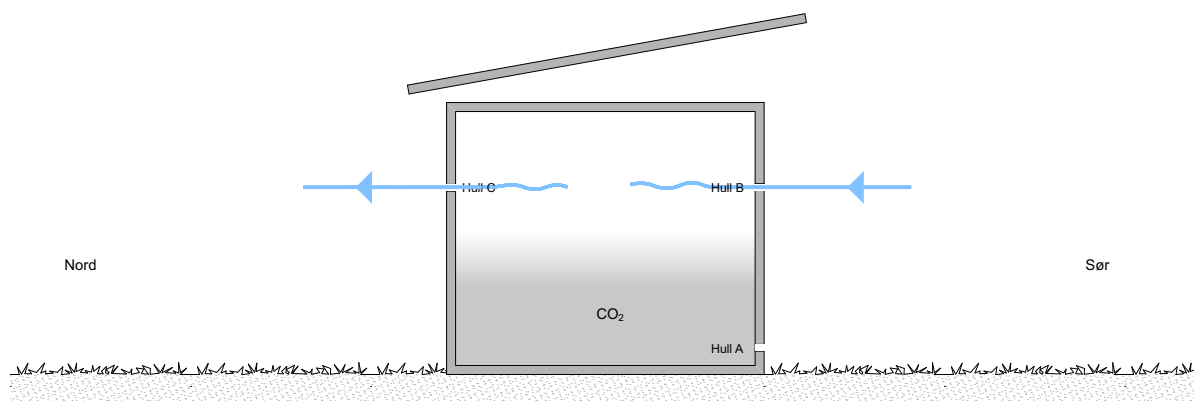


Figur 9.1.2 Eksempel på sporgassmålingenes sårbarhet ved måleperiodens slutt

Sårbarheten vist i figur 9.1.2 ved måleperiodens slutt gjorde at måleperioden måtte kortes ned. Det viste seg at også at CO₂ burde blitt sprayet inn i modulen til en konsentrasjon høyere enn 4-6000 ppm for å kunne måle over lengre perioder. I tillegg ville høyere startkonsentrasjon gitt lengre periode hvor målt konsentrasjon i mindre grad ble påvirket av uteluftens varierende konsentrasjonsverdi.

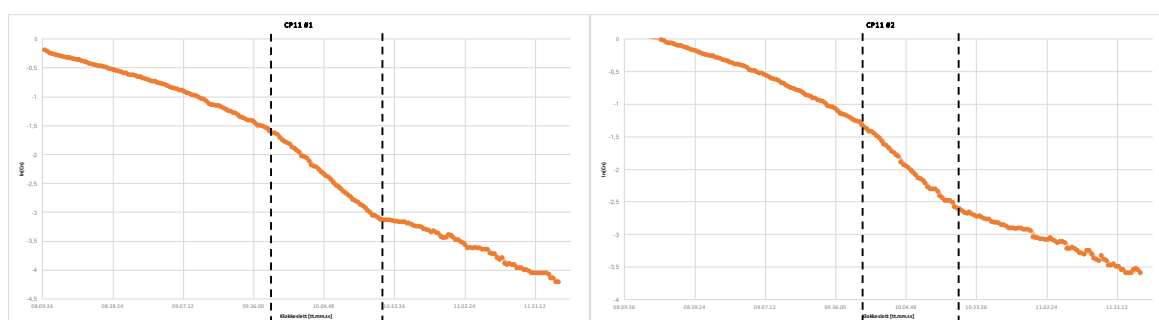
I måleperiodene hvor vindstyrke og retning varierte ble det hentet ut flere måleresultater fra samme måleperiode. Det ble gjort for å ikke neglisjere virkningen av høyere vindhastigheter innenfor samme periode. Måleresultatene som ble hentet ut fra kortere perioder kan ha redusert reliabiliteten.

Som nevnt i kapittel 7.3.3 ble det plassert ut to CO₂-loggere med lik plassering i modulens høyde. CO₂ målingene tar derfor ikke hensyn til at CO₂-gass kan ha fordelt seg ulikt over høyden. Viften som ble plassert ut, skulle sørge for at CO₂ fordelte seg uniformt i modulens volum som beskrevet i kapittel 6.4. Som nevnt i kapittel 6.4 er CO₂ tyngre enn luft og vil legge seg lavt i modulen. Hvis gassen har lagt seg i lavere deler av modulen, og ikke blitt blandet godt nok inn, kan dette ha gitt utslag på resultatene. Siden hull B og C er plassert høyt i modulen, vil luft kunne lekke inn i det ene hullet og ut det andre uten at den lavereliggende gassen blir påvirket av luftstrømmene. Plassering av en CO₂-logger høyere i modulen ville kunne bekrefte eller avkrefte om CO₂ ble blandet godt nok inn i volumet.



Figur 9.1.3 Skissert lavtliggende CO₂-gass

CO₂-loggerne viste at CO₂-konsentrasjonen i planet ikke var lik. Den ene loggeren nådde ikke like høy konsentrasjon som den andre ved innsprøyting. Det som derimot kan observeres er at konsentrasjonsverdien til begge loggerne avtok med samme rate innenfor samme periode. Dermed ble utregnet infiltrasjonstall nokså lik for begge loggerne.



Figur 9.1.4 Eksempel på avtakende CO₂-konsentrasjon for CO₂-logger 1 og 2

Beregning av infiltrasjonstall for sporgass ble utført i Excel. Som beskrevet i kapittel 6.4 kan infiltrasjonstallet beregnes med lineær regresjon. Det viste seg at beregning av stigningstall (infiltrasjonstall) med tid som x-verdi ikke fungerte like bra i Excel. Stigningstallet ble derfor regnet ut manuelt mellom hvert målepunkt. Det vil si at for hvert minutt ble det regnet ut et infiltrasjonstall og for hver tiende verdi ble det tatt et gjennomsnitt for de ti foregående verdiene. Om denne metoden gir det samme resultatet som lineær regresjon, er ikke utprøvd.

9.2 Infiltrasjonsmodeller

Før resultatene fra infiltrasjonsmodell I og II analyseres er det vesentlig å diskutere det begge modellene bygger på: tetthetsmåling med differansetrykkmetoden. Modulen ble tetthetsmålt gjentatte ganger for å kunne regne ut faktorene som definerer strømmingsegenskapene til modulen: C-, og n-verdiene.

Før tetthetsmålingene ble satt i gang, ble det gjort utbedringer på modulens tetthet. Det var ikke mulig å utelukke alle resterende lekkasjer i modulen, og C_{rest} måtte derfor beregnes. Det ble antatt at resterende lekkasjer fordelte seg jevnt med fasadene som beskrevet i kapittel 7.4.2, og innvirkningen av hvor disse lekkasjene faktisk er plassert tar ikke infiltrasjonsmodellene høyde for. Ved å gjøre denne antagelsen ble det sett bort i fra lekkasjer i modulens tak og gulv. Måleviften ble montert i døråpningen som beskrevet i kapittel 6.2.3 og tetthetsmålingen fanger derfor heller ikke opp lekkasjene som finnes rundt døren. Det antas at dørens lekkasje har en betydelig størrelse. Lekkasjene som modellene ikke har kontroll på fører til at modellenes reliabilitet blir svekket.

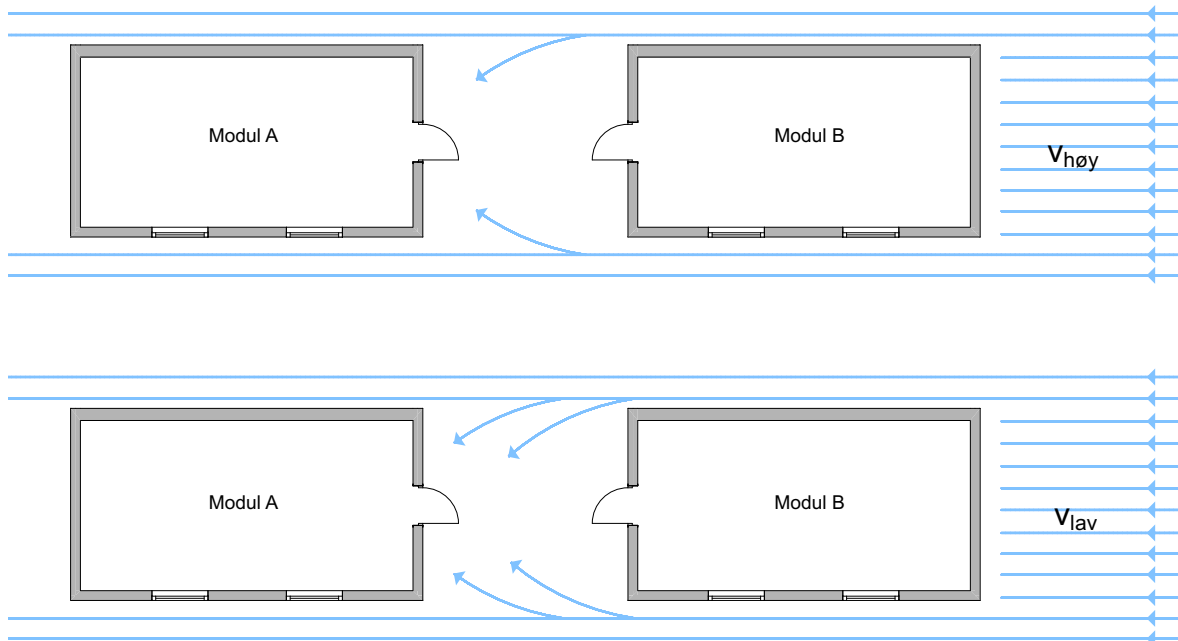
Før utbedring av modulens tetthet med tape ble det gjennomført en tetthetsmåling, som vist i vedlegg 1. Kurvene for overtrykk og undertrykk i denne målingen viste seg å være nære hverandre. Etter innvendig utbedring ble det tatt en ny tetthetsmåling, vist i vedlegg 2. Tetthetsmålingen viste at modulens tetthet ble forbedret ved at lekkasjetallet avtok. Kurvene for overtrykk og undertrykk i denne tetthetsmålingen ligger lengre unna hverandre enn tetthetsmåling før utbedring, noe som kan forklares med at utbedringen kun skjedde innvendig. Denne observasjonen styrker teorien om "ventileffekten" beskrevet i kapittel 6.2.3. Ventileffekten i modulen ble større etter utbedring innvendig, og for å få maksimal effekt av forbedringen burde modulens tetthet også blitt forbedret utvendig. Dette underbygger SINTEF Byggforsk's anbefaling om to lufttette sjikt for best sikring mot luftlekkasjer og best effekt av isolering.

Tapen som ble brukt for å utbedre modulens tetthet kan ha løsnet gjennom måleperioden, og ført til større luftstrømmer inn i modulen enn utregnet fra tetthetsmålingene.

9.2.1 Infiltrasjonsmodell I "trykkdrevet"

Resultat fra infiltrasjonsmodell I vist i figur 8.2.1 viser at økende vind fra sør og nord gir økende infiltrasjon. Vind fra vest ser ut til å påvirke infiltrasjonen i mindre grad. Disse resultatene stemmer godt overens med trendene i sporgassmålingene. Det kan virke som

økende vind fra øst gir synkende infiltrasjon i denne modellen. Dette kan forklares med at økende vind fra øst gjør at vinden passerer med så høy hastighet at den ikke rekker å bevege seg mellom modulene. Ved lavere vindhastigheter vil vinden i større grad bevege seg mellom modulene og skape større trykk. Det skapes dermed mindre vindtrykk på østfasaden ved større vindhastigheter fra øst.

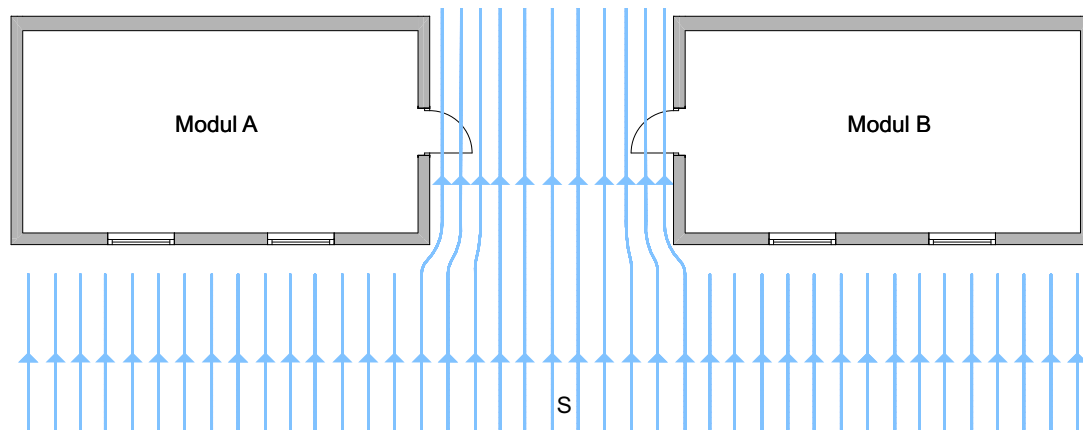


Figur 9.2.1 Skissert vind fra øst

Infiltrasjonsmodell I er beregnet ut i fra målte trykkdifferanser over fasadene som beskrevet i kapittel 7.4.3.1. Hull A er en stor og åpen lekkasje og kan derfor ha utliknet trykkforholdene i modulen uavhengig av hvilken retning vinden blåser fra. Det åpne hullet kan ha påvirket resultatene ved å redusere trykkdifferansene over fasadene. I etterkant er det klart at hull A burde vært forminsket eller tettet helt.

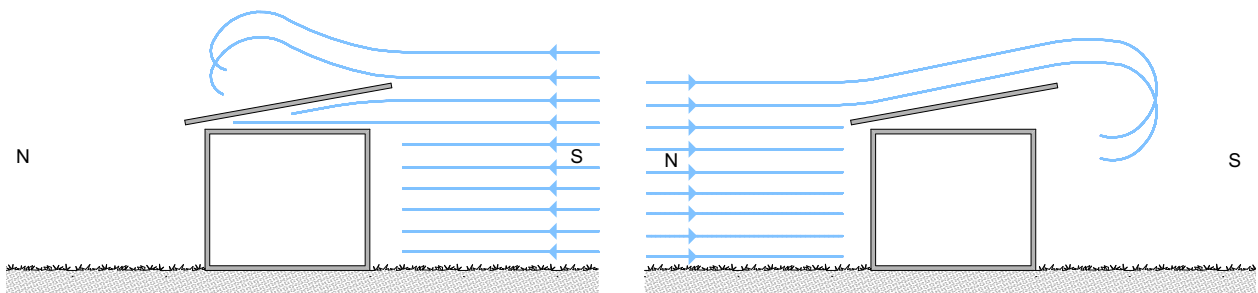
Når infiltrasjonsmodell I ble utviklet, ble det observert at trykkforholdene over fasadene ikke ga like store beregnede luftstrømmer inn som ut ($\dot{V}_{inn} \neq \dot{V}_{ut}$). Årsaken kan være at beregning og antagelser rundt størrelse og plassering av modulens luftlekkasjer ikke stemmer med virkelige forhold. Det ble derfor tatt utgangspunkt i positive trykkdifferanser og infiltrasjonen ble regnet ut i fra luft som strømmer inn i modulen. Hvis det hadde blitt observert like store beregnede luftstrømmer inn og ut ville dette ha styrket påliteligheten til modellen. Ved å kun regne på luftstrøm inn i modulen var det kun strømningsverdiene for undertrykk som ble tatt i bruk. Det har derfor blitt sett bort i fra at luft strømmer inn og ut gjennom lekkasjene ulikt. Dette er en svakhet ved infiltrasjonsmodell I.

Det at trykkdifferansene over fasadene og dermed luftstrømmene inn og ut ikke ble helt som forventet kan ha flere årsaker. Som nevnt er plasseringen av modul B i forhold til modul A vesentlig. Det skapes større trykkforhold på østfasaden fordi avstanden mellom modulene lager en trakt som øker vindens hastighet ved å redusere vindens strømningsvei. På østfasaden er det en dør med én stor lekkasje som ikke tas hensyn til ved tetthetsmåling. Dørens lekkasje og store trykkforskjeller over østfasaden kan føre til ukontrollerbare luftstrømmer som ikke fanges opp av modellen.



Figur 9.2.2 Skissert vind fra sør

Som kapittel 6.1.2 beskriver, vil vindretning og bygningskroppens fasong påvirke trykkforholdene som skapes rundt en bygning. Utformingen av taket til modul A antas derfor å ha stor innvirkning på faktiske vindforhold rundt modulen. Når det blåser fra sør, vil vinden bevege seg inn under taket og skape økt trykk. Økt trykk mot modulens tak vil føre til større mengder luft lekker horisontalt. Lekkasje på modulens tak tas ikke høyde for i infiltrasjonsmodell I. Når det blåser fra nord, vil takets utforming gi trykkforhold på sørsiden som ikke alltid er som forventet. Takets form vil føre vinden opp og vinden danner virvler på sørsiden ved vind fra nord.



Figur 9.2.3 Skissert vind fra sør og nord

Den målte trykkdifferansen over fasadene ble målt en gang i minuttet. Trykkforholdene mellom hvert målepunkt og dermed vindkast kan ha hatt innvirkning på den reelle infiltrasjonen.

9.2.2 Infiltrasjonsmodell II "vinddrevet"

Det kommer tydelig frem i figur 8.3.1 at vind fra sør og nord gir økning i infiltrasjon ved høyere vindhastigheter. Vind fra øst og vest gir lavere økning i infiltrasjonstall. Dette resultatet stemmer bra med trendene i både sporgassmåling og infiltrasjonsmodell I. Spredningen av målepunktene i modell II er lav og punktene ligger dermed nærmere sin egen kurve. Dette styrker modellens pålitelighet. Vind fra sør ser ut til å gi større infiltrasjon i forhold til de andre vindretningene. Dette bekreftes også ved sammenlikning med sporgass og infiltrasjonsmodell I. Det ser ut som infiltrasjonsmodell II gir høyere infiltrasjon ved vind fra sør enn sporgassmålingene og infiltrasjonsmodell I.

Infiltrasjonsmodell II er basert på vindmålinger 50 meter unna modulen. De vindhastighetene og retningene som registreres der trenger ikke være de som faktisk oppstår rundt modulen. Infiltrasjon når det blåser fra øst bekrefter dette. Økningen i infiltrasjon skulle ikke vært like stor fordi modul B vil skjerme for østlig vind. Solcellene, som forklart tidligere, vil også endre vindens hastighet og retning.

For å beregne vindforholdene som oppstår rundt modulen er det tatt utgangspunkt i måledata fra værstasjonen, formfaktor for modulens fasader og "the logarithmic law". Formfaktor brukes ved beregning av vindtrykk ved konstruksjonsberegning og er en faktor som kunne vært naturlig å også implementere i energiberegning. Formfaktor og "the logarithmic law" gir en bedre tilnærming til faktiske vindforhold rundt modulen, men påvirkningen av solcellenes plassering og modul B er vanskelig å beregne. Formfaktor for hull A er også vanskelig å beregne på grunn av dens nære plassering mot kanten av modulen. Det er antatt at alle fasadene og hullene der det skapes overtrykk har lik formfaktor, noe som kanskje ikke er en god nok tilnærming. Vinden som oppstår rundt modulen kan også være vanskelig å beregne på grunn av takets utforming som vist i figur 9.3.2. Vindsimuleringer kunne gi en enda bedre tilnærming til reelle vindpåkjenninger enn lokal vinddata i modellen.

Som i infiltrasjonsmodell I er det kun tatt utgangspunkt i luftstrøm inn, og infiltrasjonen har blitt beregnet ut i fra der vinden skaper overtrykk mot modulen. Som vedlegg 8 viser er vindretningen beskrivende for hvilke fasader vinden treffer og dermed hvor luft strømmer inn. Vinden danner komponenter i x- og y-retning som gjør at to fasader er vindutsatt samtidig.

Modulen antas å ligge på tvers av retning sør-nord, men i realiteten ligger den litt mer på tvers av retning nord-nordøst og sør-sørvest. Dette er ikke hensyntatt i modellen ved beregning av vindretning fordi det antas å ha liten innvirkning på resultatene.

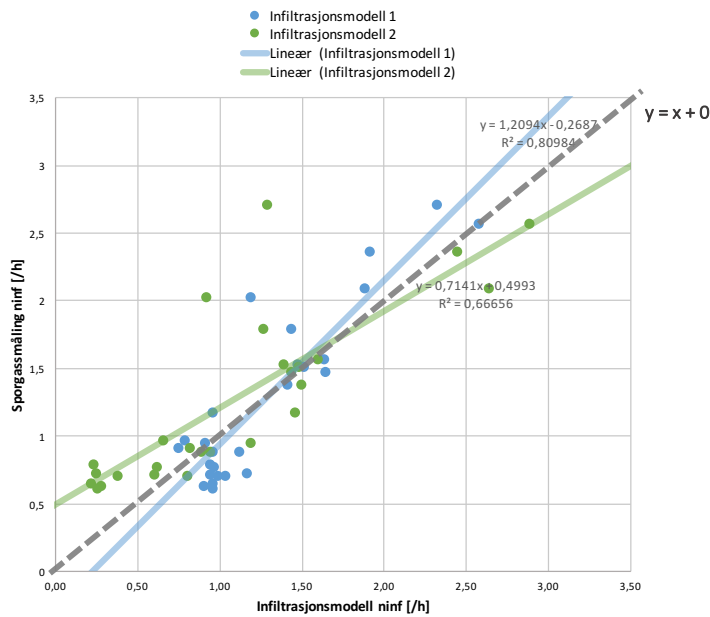
I kapittel 6.1.2 nevnes det at temperaturforskjeller også er en drivkraft for luftinfiltrasjon. Infiltrasjonsmodell I som baseres på målte trykkdifferanser, tar hensyn til virkningen av temperaturforskjeller, uten at størrelsen på innvirkningen er målbar. Infiltrasjonsmodell II tar ikke hensyn til innvirkningen av temperaturforskjeller. Modulbygget er et lavt bygg der det antas at virkningen av temperaturforskjeller og oppdriftskrefter er lav, og innvirkningen er dermed ikke undersøkt nærmere.

Det viste seg at å beregne lufttrykk inne (p_i) var for avansert uten å ta i bruk programmeringsmetoder. Trykkdifferansemålingene over fasadene (Δp_8) viste at trykket inne i modulen varierte fra 0 Pa til +/- 1,5 Pa. Trykket inne viste seg dermed å ha liten innvirkning på trykkforskjellen over fasadene. Innvendig trykk ble derfor satt til 0 Pa ved beregning av trykkforskjeller. Lavt innvendig trykk kan underbygge innvirkningen av hull A.

Vinddataene i infiltrasjonsmodell II er i likhet med trykkdifferansemålingene i infiltrasjonsmodell I målt en gang i minuttet. Ved hver tiende måling er det tatt gjennomsnittet av de ti foregående målingene. Dette gjør at virkningen av vindkast ikke blir hensyntatt.

9.3 Sporgassmåling og infiltrasjonsmodeller

Resultatet presentert i figur 8.4.1 viser i hvilken grad de utarbeidede infiltrasjonsmodellene samsvarer med reell infiltrasjon i modulen. Den rette linjen $y = Ax + B$ gjennom målepunktene i hver modell er en god pekepinn. En perfekt modell som gir reell infiltrasjon ville vært beskrevet av en linje med 1 som stigningstall og 0 som konstantledd ($y = x + 0$):



Figur 9.3.1 Grafisk skissert infiltrasjonsmodell som gir reell infiltrasjon

Som figur 9.3.1 viser, samsvarer både infiltrasjonsmodell I og II ganske godt med sporgassmålingene. Infiltrasjonsmodell I har 1,2 som stigningstall og -0,3 som konstantledd ($y = 1,2x - 0,3$), og infiltrasjonsmodell II har 0,7 som stigningstall og 0,5 som konstantledd ($y = 0,7x + 0,5$). Infiltrasjonsmodell I er derfor nærmere reell infiltrasjon og mer presis enn infiltrasjonsmodell II. Figur 9.3.1 viser at ved lave vindhastigheter vil modell I stemme bra med reell infiltrasjon og modell II mindre bra. Ved lave vindhastigheter ligger modell I høyere enn reell infiltrasjon, og modell II ligger lavere. Ved høye vindhastigheter vil modell I gi lavere infiltrasjon enn reell infiltrasjon og modell II gir høyere infiltrasjon. Ved midlere vindhastigheter vil både modell I og II stemme bra med reell infiltrasjon.

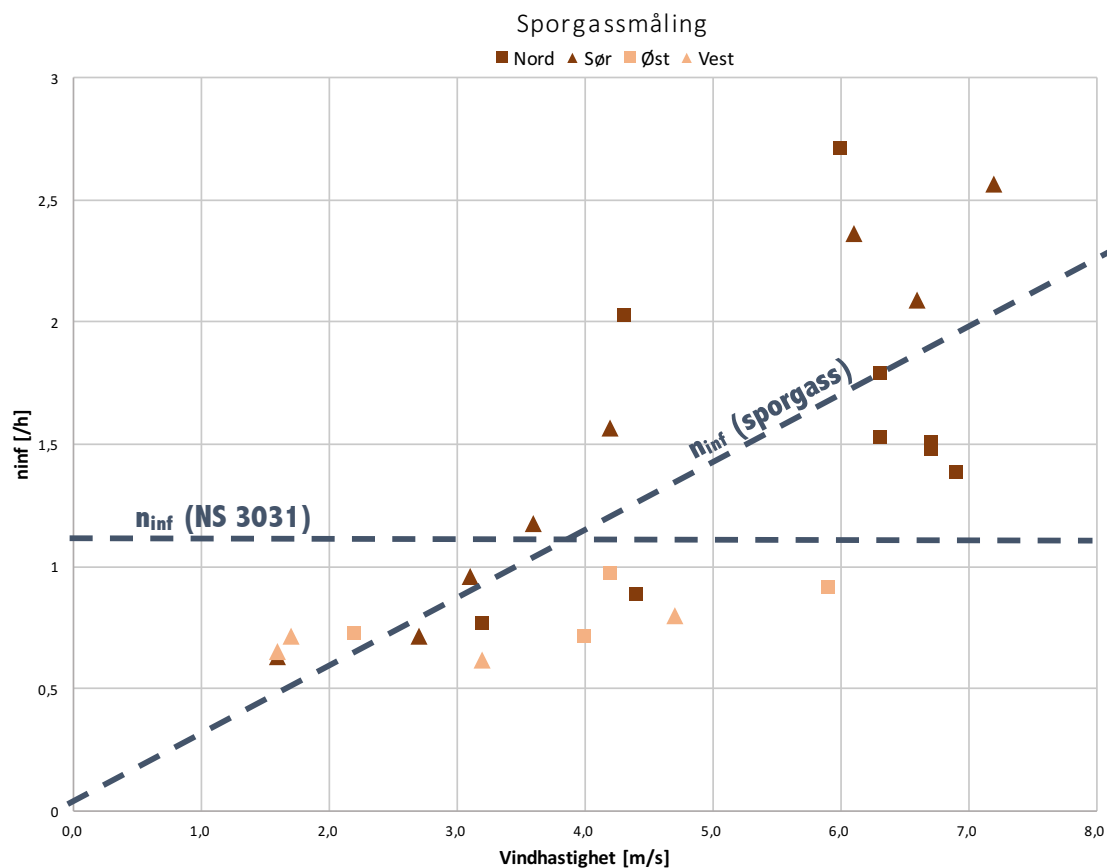
Det at modell I er en litt bedre tilnærming kan forklares med at infiltrasjonsmodell I baseres på trykkforhold målt *på* modulen, mens infiltrasjonsmodell II baseres på målt vindforhold *ved* modulen. Infiltrasjonsmodell II danner i utgangspunktet et godt grunnlag for infiltrasjonsberegning fordi den baseres på lokal vinddata som er lett tilgjengelig, og formfaktor og vindhastighetsprofil gjør den tilpassningsdyktig i andre omgivelser.

Som figur 9.3.1 viser er det stor spredning blant målepunktene for infiltrasjonsmodell I og II. Spredningen reflekteres i R^2 -verdien for de lineære linjene gjennom målepunktene. R^2 -verdiene er lave som skyldes kombinasjonen av alle usikkerhetsfaktorene diskutert.

Modellene utarbeidet i denne oppgaven beregner infiltrasjon avhengig av vindpåkjenninger i motsetning til infiltrasjonsberegning etter NS 3031. Modellene har sine svakheter, men sporgassmålingene viser at beregningene er en bedre tilnærming til reell infiltrasjon enn beregning etter Norsk Standard. Modellene bygger på få, eksisterende formelverk om lufttetthet og gir dermed forholdsvis enkle beregningsmodeller. Det er ikke sikkert at mer kompliserte beregningsmetoder ville gitt en bedre tilnærming til reell infiltrasjon, og simulering ville uansett gitt den beste tilnærmingen.

9.4 Infiltrasjonsberegning etter NS 3031

Det er interessant å sammenlikne beregning av infiltrasjonstall etter NS 3031 med målt infiltrasjon fra sporgassmålingene, og studere hva det vil si for prosjektert energibehov. Beregning av infiltrasjon etter NS 3031 beskrevet i kapittel 6.3.2 baserer seg på lekkasjetallet n_{50} . Lekkasjetallet for modulbygget er utregnet i kapittel 7.4.2, og har en verdi på 11,8/h. Ved å gjøre om lekkasjetallet til infiltrasjonstallet etter NS 3031 beskrevet i kapittel 6.3.2, har modulbygget et infiltrasjonstall på 1,18/h.



Figur 9.4.1 Infiltrasjonstall beregnet etter NS 3031 sammenliknet med infiltrasjonstall fra sporgassmåling

Som figur 9.4.1 viser vil n_{inf} fra sporgassmåling ligge over n_{inf} beregnet etter NS 3031 ved vindhastigheter over 3-4m/s og vindretning nord/sør. Når vinden blåser fra øst og vest eller vindhastigheter under 3-4m/s fra nord og sør, vil n_{inf} beregnet etter NS 3031 gi større infiltrasjon enn reell infiltrasjon.

Som nevnt i kapittel 6.3 vil n_{inf} ha innvirkning på prosjektert energibehov. Ut i fra resultatfigur 8.1.1 og vedlegg 26 vil det eksempelvis være tilfeller der vinden blåser fra sør i 7,2m/s oppstå et energibehov på $(2,57/1,18)*100 = 220\%$ av prosjektert energibehov. I perioder der vinden blåser med en hastighet på 2,7m/s fra sør vil energibehovet være $(0,71/1,18)*100 = 64\%$ av prosjektert energibehov iht. Norsk Standard.

Tetthetsmåling med differansetrykkmetoden som nevnt i kapittel 6.2.3 baseres kun på sammenhengen mellom luftstrømmer inn/ut og oppnådd trykkforskjell over klimaskjermen, uavhengig av lokalt vær og plassering i omgivelsene. Beregning av infiltrasjonstallet etter NS 3031 tar høyde for hvilke omgivelser bygget ligger i, men ikke i hvilke værforhold.

Sporgassmålingene vist i figur 9.4.1 viser at infiltrasjonstallet øker ved økende vindhastigheter og støtter teorien om at dominerende årsak til luftlekkasjer er vind. Dette underbygger at vind er en faktor som burde vært implementert i infiltrasjonsberegning. Som nevnt i kapittel 6.1.1 er virkningen av anblåsning også en annen svakhet ved tetthetsmåling, og fører til at tetthetsmåling gir et ufullstendig bilde av virkningen av luftlekkasjer.

10 Konklusjon

Målet med denne oppgaven har vært å svare på følgende problemstilling:

Er det mulig å utarbeide en matematisk modell som tar hensyn til vindpåkjenninger i infiltrasjonsberegning ved hjelp av målinger med sporgass på et lite modulbygg?

Basert på teori og målinger på et lite modulbygg er det mulig å lage en infiltrasjonsmodell som danner grunnlag for mer reell infiltrasjonsberegning av bygg. For å besvare problemstillingen er det utarbeidet to infiltrasjonsmodeller. Begge modellene tar hensyn til vindpåkjenninger, og begge estimerer infiltrasjon bedre enn dagens metode med trykksetting på 50 pascal og bruk av terrengskjermingskoeffisienter.

Trykkdifferansemålinger over fasadene gir en infiltrasjonsmodell som stemmer ganske godt med reell infiltrasjon, men modellen baserer seg på målt trykkdifferanse ved ferdigstilt bygg og egner seg ikke når infiltrasjonen skal prosjekteres.

Vinddata fra nærliggende vindstasjon viste seg å gi en modell med enda større statistisk spredning enn infiltrasjonsmodell I. Infiltrasjonsmodell II hadde egnet seg bra for prosjektering av infiltrasjon hvis den hadde stemt enda bedre med reell infiltrasjon, fordi den baseres på lokal vinddata. Modellen danner uansett et bedre utgangspunkt for infiltrasjonsberegning enn hva standarden gjør i dag, men problemet ligger i å beregne faktiske vindforhold som oppstår lokalt rundt bygget. Behandling av vinddata med formfaktor og vindprofil ser ikke ut til å gi en god nok tilpasning til faktiske forhold i infiltrasjonsmodell II.

Resultatene viser at infiltrasjonsmodell I og II gir bedre korrelasjon mellom infiltrasjon og vindforhold rundt modulbygget enn beregnet infiltrasjon etter NS 3031. Dette gir grunnlag for å tro at kravet til lekkasjetall på 0,6/h kunne vært snillere ved lite vindutsatte områder og strengere ved vindutsatte områder.

10.1 Veien videre

Arbeid med denne oppgaven har vært innenfor en begrenset tidsperiode, og det har derfor dukket opp flere punkter underveis som det hadde vært interessant og sett nærmere på.

Når data fra sporgassmålingene ble behandlet, ble det oppdaget at CO₂-konsentrasjonen i uteluften spilte en stor rolle ved måleperiodens slutt. Det hadde derfor vært interessant og

utført målingene med samme utgangspunkt, men å logge CO₂-konsentrasjonen i uteluften samtidig som logging pågår inne i modulen. Det hadde også vært interessant å tette hull A og se om trykkdifferansemålingene over fasadene hadde resultert i større trykkdifferanser.

Det hadde også vært interessant å teste infiltrasjonsmodell II utarbeidet i denne oppgaven i ulike bygg i ulike omgivelser. Bygg fra Nord-Norge til Sør-Norge, liggende lite eller mye vindutsatt, i tettbebygde strøk eller i åpne områder kunne blitt infiltrasjonsberegnet i infiltrasjonsmodell II. Infiltrasjonsberegningen kunne blitt sammenliknet med sporgassmålinger. Dette arbeidet kunne sikret god ytre validitet i infiltrasjonsmodell II.

Som nevnt kunne vindsimuleringer styrket infiltrasjonsmodell II ved å beregne mer eksakte vindforhold rundt modulen. Det kunne vært undersøkt nærmere om vindsimuleringer burde vært implementert i 3D-BIM, og om infiltrasjonsberegning kunne vært en del av 3D-BIM. Infiltrasjonsberegning i 3D-BIM kunne dannet grunnlag for både energi- og komfortkalkulasjon.

Det hadde også vært interessant å utforske kombinasjonen av sporgassmåling og tetthetsmåling i full-skala bygg. Sporgassmålingene og tetthetsmålinger fra ulike bygg kunne blitt sammenliknet, og det kunne blitt undersøkt om sporgassmåling kan brukes sammen med tetthetsmåling for mer utfyllende resultater. Det er også interessant om sporgassmåling kan brukes til å avgjøre nytte-kost spørsmål i eldre boliger og om måling med sporgass kan brukes for å påvirke hvilke tiltak som settes i gang ved rehabilitering.

Videre arbeid i modulen kunne vært å utforske naturlig ventilasjon ved å installere et iris-spjeld i hull B eller C. Ved hjelp av sensorteknikk kan spjeldet måle luftstrøm inn og åpnes eller lukkes avhengig av vindforhold og hvor mye friskluft modulen skal tilføres ved en hver tid. Det kunne vært undersøkt hvilke vindhastigheter som skal til for å dekke ventilasjonsbehovet i et bygg ventilert med naturlig ventilasjon.

11 Referanser

- ASTM International. (2006). *E741-00: Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution*.
- Attramadal, T., Schwarze, P. & Becher, R. (2015). *Anbefalte faglige normer for inneklima*: Norsk folkehelseinstitutt.
- Bjørnstad, T., Kofstad, P. K. & Alstad, J. (2018). *Radon*: Store Norske Leksikon.
- Blom, P. & Uvsløkk, B. (2012). *Bygg tett!*: Sintef Byggforsk.
- BlowerDoor GmbH. (2018). *BlowerDoor Standard*: The Energy Conservatory, BlowerDoor GmbH. Tilgjengelig fra:
https://www.blowerdoor.com/fileadmin/BlowerDoorEN/Dokumente/Handbuecher/Reference_guide_BlowerDoor_Standard_DG-1000_2018-07.pdf (lest 2/2-19).
- Byrkjedal, Ø. & Åkervik, E. (2009). *Vindkart for Norge*: NVE.
- Chan, W. R., Joh, J. & Sherman, M. (2012). Analysis of air leakage measurements of US houses. *Energy and Buildings*, 66.
- Dahlum, S. (2018a). *Kvantitativ analyse*: Store Norske Leksikon.
- Dahlum, S. (2018b). *Validitet*: Store Norske Leksikon.
- Dalland, O. (2017). *Metode og oppgaveskriving*.
- DiBK. (2017a). *Krav til energieffektivitet §14-2*: Direktoratet for byggkvalitet.
- DiBK. (2017b). *Minimumskrav til energieffektivitet §14-3*: Direktoratet for byggkvalitet.
- DiBK. (2018). *Dette er de nye energikravene i byggt teknisk forskrift*: Direktoratet for byggkvalitet.
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. (2014). *Håndbok 5 Trehus*: SINTEF Byggforsk.
- European Standard. (2006). *Ventilation for buildings - Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration*. Annex A.
- Gaetani, I. (2013). *Energy saving potential of night natural ventilation in the urban environment: the effect of wind shielding and solar shading*. Eindhoven University of Technology.
- Grimenes, A. & Thue-Hansen, V. (2010). *Byggrelaterte lokalklimadata for Ås*. Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Haraldsen, H. & Pedersen, B. (2018). *Karbondioksid*: Store Norske Leksikon.

- Hole, I. & Aurlien, T. (2013). *520.401 Lufttetting av bygninger. Fremgangsmåte for å oppnå lavt lekkasjetall*. Byggforskserien: SINTEF Byggforsk.
- Holøs, S. & Aurlien, T. (2014). *474.624 Luftlekkasjemåling av bygninger. Hensikt og vurdering*. Byggforskserien: SINTEF Byggforsk.
- International Standard. (2015). *Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method*. 3 utg.: International Organization for Standardization.
- Klinski, M. (2016a). *473.101 Energikrav til bygninger. Oversikt*. Byggforskserien: SINTEF Byggforsk.
- Klinski, M. (2016b). *473.102 Energikrav til bygninger. Energirammer*. Byggforskserien: SINTEF Byggforsk.
- Kraniotis, D. (2014). *Dynamic characteristics of wind-driven air infiltration in buildings. The impact of wind gusts under unsteady wind conditions*: Norwegian University of Life Science.
- Meløysund, V. & Strandholmen, B. (2003). *471.043 Vindlaster på bygninger*. Byggforskserien: SINTEF Byggforsk.
- Norsk Standard. (2007). *NS 3031: Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data*.
- Norsk Standard. (2009). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-4: Allmenne laster Vindlaster*.
- Pripp, A. H. (2018). Validitet. *Den norske legeforening*, 13. doi: 10.4045/tidsskr.18.0398.
- Quirouette, R. & Arch, B. (2014). Air pressure and the building envelope.
- Relander, T. O. (2014). *474.621 Fremgangsmåte ved luftlekkasjemåling av bygninger*. Byggforskserien: SINTEF Byggforsk.
- Rotronic. (2018). *CP11 - Hanheld instrument for CO2, humidity and temperature*. Tilgjengelig fra: <https://www.rotronic.com/en/cp11.html> (lest 20/1-19).
- Sivle, A. (2018). *Vind*: Store Norske Leksikon.
- Touma, J. (1977). Dependence of the Wind Profile Power Law on Stability for Various Locations. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 27 (9): 863-866.
- Younes, C., Shdid, A. C. & Bitsuamlak, G. (2011). Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics*, 35 (3): 267-302.

12 Vedlegg

12.1 Vedlegg 1: Tetthetsmåling alle hull lukket, før utbedring

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 5/2-19
Test File: ModulATest1

Technician: Nina Johanne Brænden

Customer:

Building Address: Modul A
Søråsjordet
Ås, 1435

	<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>	<u>Average</u>
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m ³ /h)	241 (+/- 0.2 %)	298 (+/- 0.6 %)	269
n50: Air Changes per Hour (1/h)	4.16	5.13	4.65
w50: m ³ /(h*m ² Floor Area)	9.28	11.44	10.36
q50:			
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm ²)	79.6 (+/- 1.4 %)	82.1 (+/- 3.6 %)	80.9
LBL ELA @ 4 Pa (cm ²)	38.4 (+/- 2.1 %)	35.8 (+/- 5.5 %)	37.1
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	12.3 (+/- 3.3 %)	10.0 (+/- 8.5 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	12.5 (+/- 3.3 %)	10.0 (+/- 8.5 %)	
Exponent (n)	0.757 (+/- 0.008)	0.868 (+/- 0.021)	
Correlation Coefficient	0.99952	0.99757	

Test Standard: EN 13829

Regulation complied with:

Type of Test Method:

Equipment: Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door

Inside Temperature: 21 °C

Volume: 58 m³

Outside Temperature: -1 °C

Surface Area:

Barometric Pressure: 101325 Pa

Floor Area: 26 m²

Wind Class: 0 Calm

Uncertainty of

Building Wind Exposure: Highly Exposed Building

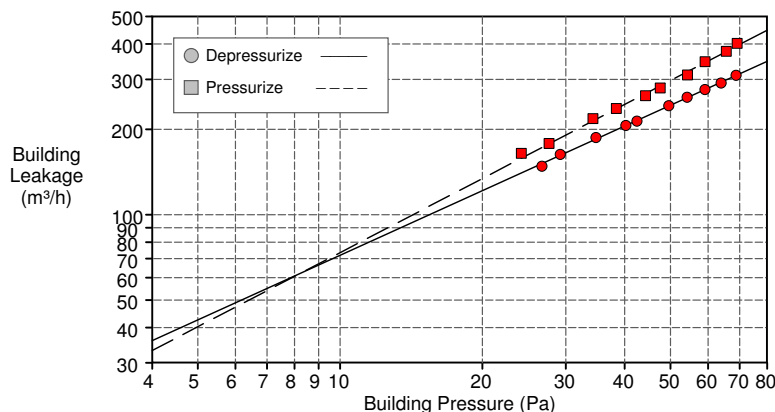
Building Dimensions: %

Type of Heating:

Year of Construction:

Type of Air Conditioning:

Type of Ventilation: None



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 5/2-19 Test File: ModulATest1

Comments

Modul A
Trykktest av modulen før utbedring

Data Points: Depressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-0.7	n/a				
-69.7	244.2	329	310	1.0	Ring C
-64.9	216.4	309	291	0.3	Ring C
-60.1	195.1	293	276	0.9	Ring C
-55.2	172.7	275	260	1.1	Ring C
-50.5	151.4	257	243	1.1	Ring C
-43.4	118.6	227	214	0.2	Ring C
-41.2	111.0	219	207	1.0	Ring C
-35.7	91.8	198	187	2.1	Ring C
-30.2	70.2	173	163	1.5	Ring C
-27.7	58.3	157	148	-1.3	Ring C
-1.2	n/a				

Test 1 Baseline (Pa): p01- = -0.8 p01+ = 0.2 p02- = -1.3 p02+ = 0.2

Data Points: Pressurization:

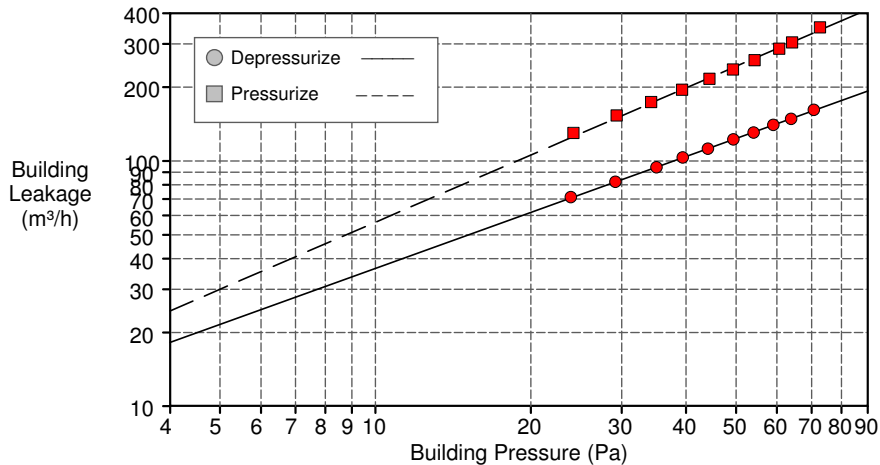
Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-1.9	n/a				
67.8	334.1	386	402	1.3	Ring C
64.2	293.6	362	376	-0.8	Ring C
57.7	250.2	333	347	-0.1	Ring C
52.8	202.5	299	311	-3.5	Ring C
46.1	165.1	269	280	-2.7	Ring C
42.8	146.0	252	263	-2.9	Ring C
36.9	119.5	227	237	-1.0	Ring C
32.8	101.9	209	218	0.5	Ring C
26.2	69.0	171	178	-1.3	Ring C
22.7	59.0	158	164	2.1	Ring C
-1.0	n/a				

Test 1 Baseline (Pa): p01- = -1.9 p01+ = 0.0 p02- = -1.0 p02+ = 0.0

12.2 Vedlegg 2: Tetthetsmåling alle hull lukket, etter utbedring

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 12/2-19		Technician: Nina Johanne Brænden	
Test File: ModulATest4			
Customer:		Building Address: Modul A Søråsjordet Ås, 1435	
<hr/>			
	<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>	<u>Average</u>
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m ³ /h)	124 (+/- 0.1 %)	243 (+/- 0.6 %)	184
n50: Air Changes per Hour (1/h)	2.13	4.20	3.17
w50: m ³ /(h*m ² Floor Area)	4.76	9.37	7.06
q50:			
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm ²)	40.7 (+/- 0.8 %)	62.9 (+/- 3.5 %)	51.8
LBL ELA @ 4 Pa (cm ²)	19.6 (+/- 1.2 %)	26.4 (+/- 5.4 %)	23.0
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	6.2 (+/- 1.8 %)	6.9 (+/- 8.2 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	6.4 (+/- 1.8 %)	6.9 (+/- 8.2 %)	
Exponent (n)	0.759 (+/- 0.005)	0.909 (+/- 0.021)	
Correlation Coefficient	0.99985	0.99796	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:			
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		
<hr/>			
Inside Temperature:	18 °C	Volume:	58 m ³
Outside Temperature:	-6 °C	Surface Area:	
Barometric Pressure:	101325 Pa	Floor Area:	26 m ²
Wind Class:	0 Calm	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Highly Exposed Building	Building Dimensions:	%
Type of Heating:		Year of Construction:	
Type of Air Conditioning:			
Type of Ventilation:	None		



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 12/2-19 Test File: ModulATest4

Comments

Modul A
 Test etter utbedring av lekkasjer og to nye hull. Alle hull lukket.

Data Points: Depressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-0.2	n/a				
-71.2	70.4	173	162	0.6	Ring C
-64.4	59.7	159	149	-0.3	Ring C
-59.5	53.3	150	140	-0.0	Ring C
-54.6	46.5	140	131	-0.5	Ring C
-49.9	41.1	131	123	0.0	Ring C
-44.6	34.6	120	112	-0.2	Ring C
-39.9	29.5	111	103	0.1	Ring C
-35.6	24.7	101	94	-0.2	Ring C
-29.7	19.0	88	82	0.1	Ring C
-24.4	37.5	76	71	0.8	Ring D
-0.8	n/a				
Test 1 Baseline (Pa):	p01- = -0.2	p01+ = 0.0	p02- = -0.8	p02+ = 0.0	

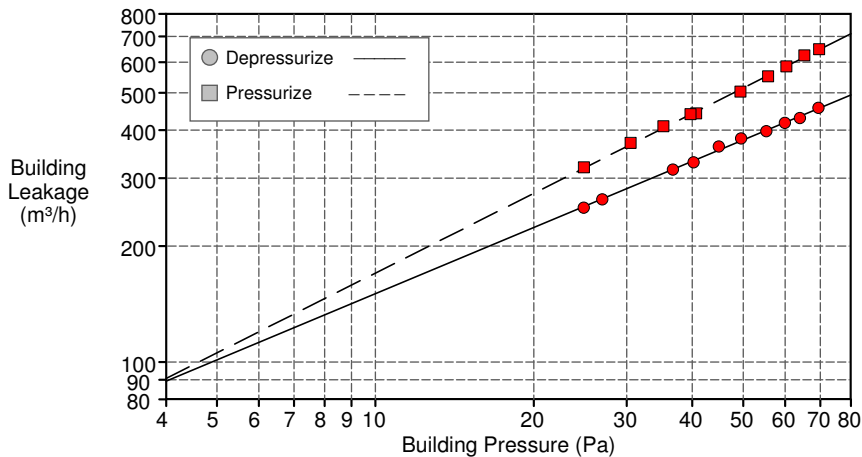
Data Points: Pressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-0.8	n/a				
72.1	255.3	336	350	2.0	Ring C
63.6	194.7	292	304	-0.8	Ring C
60.0	173.4	276	287	-1.5	Ring C
53.8	140.7	247	258	-2.4	Ring C
48.7	119.0	227	236	-2.2	Ring C
43.8	100.4	208	216	-1.5	Ring C
38.7	82.2	188	195	-0.8	Ring C
33.7	65.8	167	174	0.2	Ring C
28.8	51.4	147	153	1.4	Ring C
23.6	37.5	125	130	2.5	Ring C
-0.3	n/a				
Test 1 Baseline (Pa):	p01- = -0.8	p01+ = 0.0	p02- = -0.3	p02+ = 0.0	

12.3 Vedlegg 3: Tetthetsmåling hull A åpent

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 12/2-17		Technician: Nina Johanne Brænden	
Test File: ModulATest7			
Customer:		Building Address: Modul A Søråsjordet Ås, 1435	
		<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>
Test Results at 50 Pascals:			<u>Average</u>
V50: Airflow (m³/h)		377 (+/- 0.4 %)	446
n50: Air Changes per Hour (1/h)		6.51	7.69
w50: m³/(h*m² Floor Area)		14.52	17.15
q50:			
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm²)		168.2 (+/- 2.0 %)	179.1
LBL ELA @ 4 Pa (cm²)		96.2 (+/- 3.2 %)	96.9
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)		39.1 (+/- 4.9 %)	35.0 (+/- 3.9 %)
Air Leakage Coefficient (CL)		40.5 (+/- 4.9 %)	35.0 (+/- 3.9 %)
Exponent (n)		0.570 (+/- 0.012)	0.687 (+/- 0.010)
Correlation Coefficient		0.99810	0.99917
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:			
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		
Inside Temperature:	22 °C	Volume:	58 m³
Outside Temperature:	-4 °C	Surface Area:	
Barometric Pressure:	101325 Pa	Floor Area:	26 m²
Wind Class:	0 Calm	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Highly Exposed Building	Building Dimensions:	%
Type of Heating:		Year of Construction:	
Type of Air Conditioning:			
Type of Ventilation:	None		



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 12/2-17 Test File: ModulATest7

Comments

Modul A
Test etter utbedring av lekkasjer og to nye hull. Hull A åpent.

Data Points: Depressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m³/h)	Temperature Adjusted Flow (m³/h)	% Error	Fan Configuration
-0.4	n/a				
-69.9	35.6	482	457	0.4	Ring B
-64.5	31.4	452	430	-1.2	Ring B
-60.4	29.6	440	417	-0.3	Ring B
-55.7	26.8	418	397	-0.6	Ring B
-49.9	24.6	401	381	1.4	Ring B
-45.4	22.3	382	363	2.2	Ring B
-40.6	272.1	348	330	-1.0	Ring C
-37.2	250.4	333	316	-0.1	Ring C
-27.4	177.0	278	264	-0.4	Ring C
-25.3	160.7	265	252	-0.7	Ring C
-0.4	n/a				
Test 1 Baseline (Pa):	p01- = -0.4	p01+ = 0.0	p02- = -0.5	p02+ = 0.8	

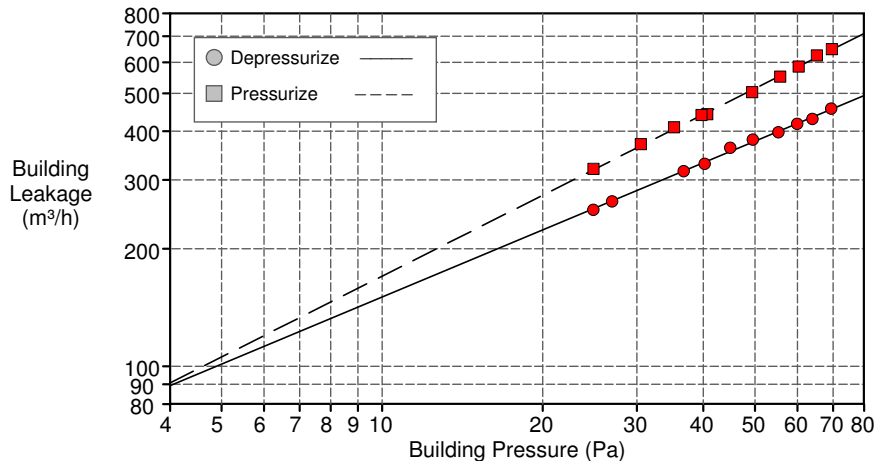
Data Points: Pressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m³/h)	Temperature Adjusted Flow (m³/h)	% Error	Fan Configuration
-0.4	n/a				
69.3	58.7	618	648	0.1	Ring B
65.0	54.6	596	625	0.9	Ring B
60.1	47.7	557	584	-0.4	Ring B
55.4	42.4	526	551	-0.8	Ring B
49.1	35.3	480	503	-1.5	Ring B
40.4	27.1	421	441	-1.4	Ring B
39.4	26.9	419	440	-0.1	Ring B
34.9	23.2	390	409	0.7	Ring B
30.2	280.6	353	370	0.7	Ring C
24.6	211.2	305	320	0.0	Ring C
-0.2	n/a				
Test 1 Baseline (Pa):	p01- = -0.4	p01+ = 0.0	p02- = -0.2	p02+ = 0.0	

12.4 Vedlegg 4: Tetthetsmåling hull B åpent

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 12/2-17		Technician: Nina Johanne Brænden	
Test File: ModulATest7			
Customer:		Building Address: Modul A Søråsjordet Ås, 1435	
<hr/>			
	<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>	<u>Average</u>
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m ³ /h)	377 (+/- 0.4 %)	515 (+/- 0.3 %)	446
n50: Air Changes per Hour (1/h)	6.51	8.87	7.69
w50: m ³ /(h*m ² Floor Area)	14.52	19.79	17.15
q50:			
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm ²)	168.2 (+/- 2.0 %)	190.0 (+/- 1.6 %)	179.1
LBL ELA @ 4 Pa (cm ²)	96.2 (+/- 3.2 %)	97.6 (+/- 2.5 %)	96.9
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	39.1 (+/- 4.9 %)	35.0 (+/- 3.9 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	40.5 (+/- 4.9 %)	35.0 (+/- 3.9 %)	
Exponent (n)	0.570 (+/- 0.012)	0.687 (+/- 0.010)	
Correlation Coefficient	0.99810	0.99917	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:			
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		
<hr/>			
Inside Temperature:	22 °C	Volume:	58 m ³
Outside Temperature:	-4 °C	Surface Area:	
Barometric Pressure:	101325 Pa	Floor Area:	26 m ²
Wind Class:	0 Calm	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Highly Exposed Building	Building Dimensions:	%
Type of Heating:		Year of Construction:	
Type of Air Conditioning:			
Type of Ventilation:	None		



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 12/2-19 Test File: ModulATest5

Comments

Modul A
Test etter utbedring av lekkasjer og to nye hull. Hull B åpent.

Data Points: Depressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-1.5	n/a				
-72.0	299.9	366	347	-0.0	Ring C
-66.1	270.9	347	329	-0.1	Ring C
-61.3	249.0	332	315	-0.0	Ring C
-55.8	226.0	316	300	0.5	Ring C
-51.7	204.1	300	284	-0.1	Ring C
-46.1	180.4	281	267	0.3	Ring C
-42.0	158.8	263	250	-0.7	Ring C
-36.1	134.3	242	229	-0.1	Ring C
-31.0	113.3	221	210	0.4	Ring C
-26.0	91.4	198	188	-0.1	Ring C
-1.8	n/a				

Test 1 Baseline (Pa): p01- = -1.5 p01+ = 0.0 p02- = -1.8 p02+ = 0.0

Data Points: Pressurization:

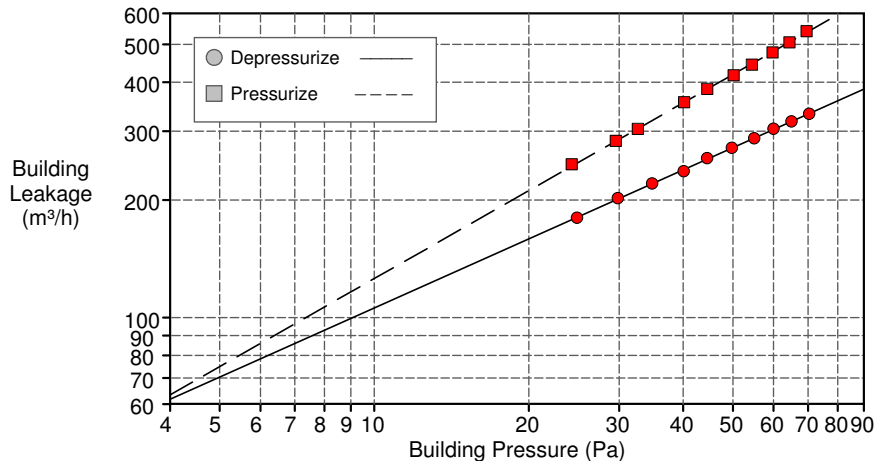
Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-2.0	n/a				
68.0	41.3	518	543	0.2	Ring B
62.6	36.3	486	510	-0.2	Ring B
57.2	31.7	455	477	-0.3	Ring B
53.2	28.1	428	449	-1.1	Ring B
47.8	24.2	398	417	-0.8	Ring B
42.2	20.3	364	382	-0.7	Ring B
38.2	258.6	339	355	-0.8	Ring C
33.0	210.8	305	319	-0.9	Ring C
27.8	167.5	271	284	-0.5	Ring C
22.8	131.5	239	251	0.6	Ring C
-1.4	n/a				

Test 1 Baseline (Pa): p01- = -2.0 p01+ = 0.0 p02- = -1.4 p02+ = 0.0

12.5 Vedlegg 5: Tetthetsmåling hull C åpent

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 12/2-19		Technician: Nina Johanne Brænden	
Test File: ModulATest6			
Customer:		Building Address: Modul A Søråsjordet Ås, 1435	
	<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>	<u>Average</u>
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m ³ /h)	269 (+/- 0.1 %)	418 (+/- 0.2 %)	343
n50: Air Changes per Hour (1/h)	4.63	7.21	5.92
w50: m ³ /(h*m ² Floor Area)	10.33	16.09	13.21
q50:			
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm ²)	116.5 (+/- 0.8 %)	140.4 (+/- 1.1 %)	128.4
LBL ELA @ 4 Pa (cm ²)	65.6 (+/- 1.3 %)	68.3 (+/- 1.7 %)	66.9
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	26.0 (+/- 1.9 %)	22.6 (+/- 2.6 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	27.0 (+/- 1.9 %)	22.5 (+/- 2.6 %)	
Exponent (n)	0.587 (+/- 0.005)	0.747 (+/- 0.007)	
Correlation Coefficient	0.99972	0.99969	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:			
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		
Inside Temperature:	22 °C	Volume:	58 m ³
Outside Temperature:	-5 °C	Surface Area:	
Barometric Pressure:	101325 Pa	Floor Area:	26 m ²
Wind Class:	0 Calm	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Highly Exposed Building	Building Dimensions:	%
Type of Heating:		Year of Construction:	
Type of Air Conditioning:			
Type of Ventilation:	None		



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 12/2-19 Test File: ModulATest6

Comments

Modul A
Test etter utbedring av lekkasjer og to nye hull. Hull C åpent.

Data Points: Depressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m³/h)	Temperature Adjusted Flow (m³/h)	% Error	Fan Configuration
-1.7	n/a				
-71.9	277.7	351	332	1.3	Ring C
-66.6	254.3	336	318	1.4	Ring C
-61.6	234.2	322	304	1.8	Ring C
-56.6	209.8	304	288	1.2	Ring C
-51.3	188.5	288	272	1.6	Ring C
-46.1	167.2	270	256	1.9	Ring C
-41.7	143.9	250	237	0.4	Ring C
-36.4	125.4	233	221	1.6	Ring C
-31.4	105.8	214	202	1.9	Ring C
-26.4	84.7	190	180	1.1	Ring C
-1.5	n/a				

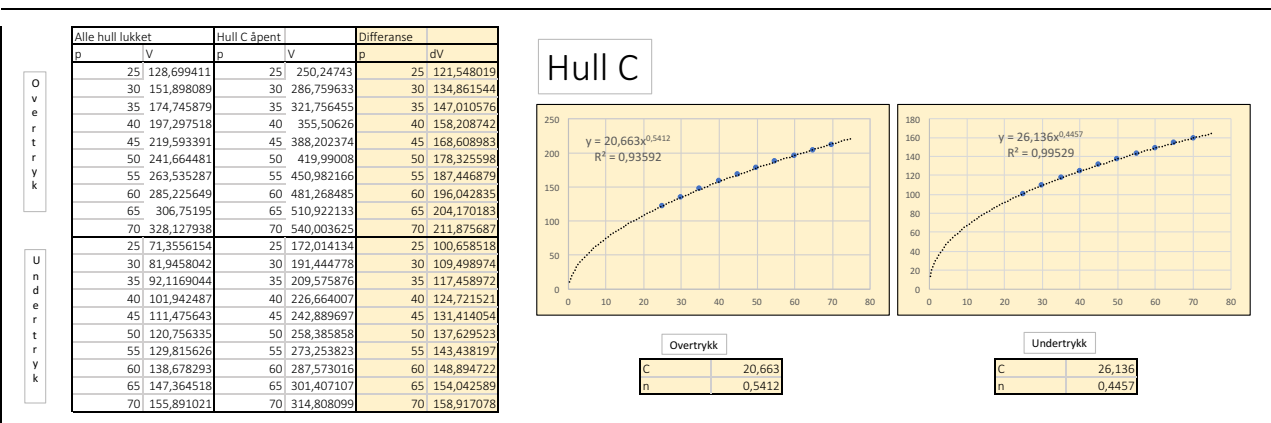
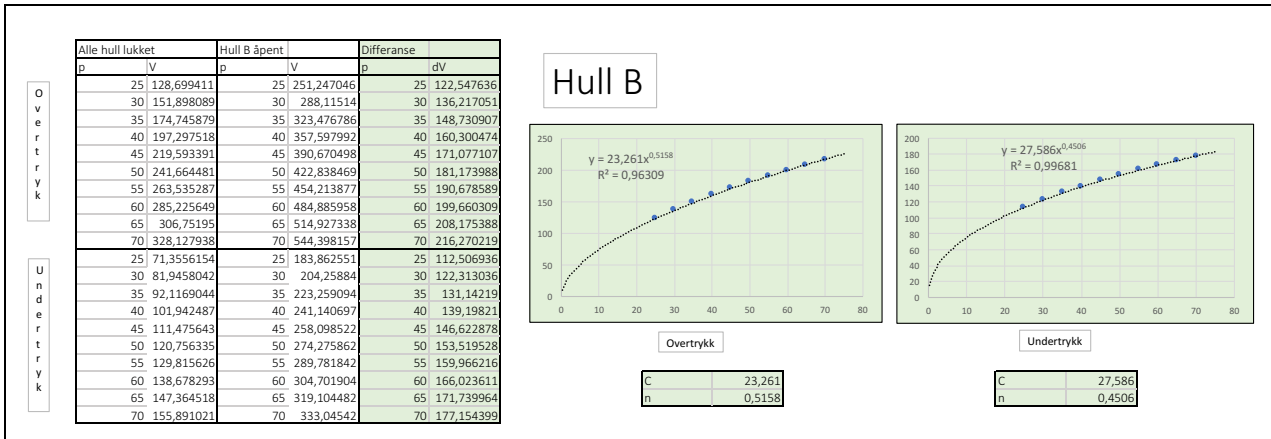
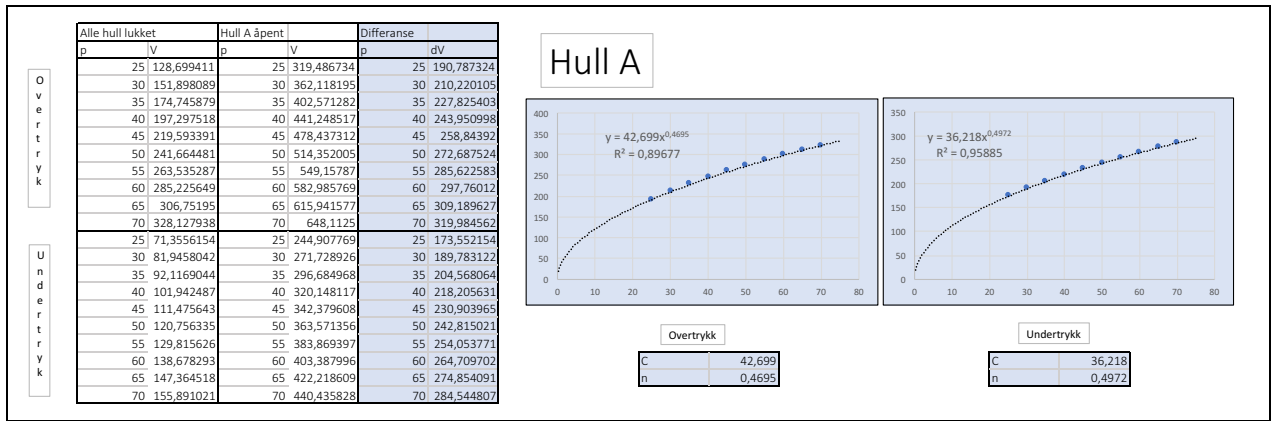
Test 1 Baseline (Pa): p01- = -1.7 p01+ = 0.0 p02- = -1.5 p02+ = 0.0

Data Points: Pressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m³/h)	Temperature Adjusted Flow (m³/h)	% Error	Fan Configuration
-1.7	n/a				
68.0	40.6	514	540	0.7	Ring B
62.8	35.5	481	505	-0.2	Ring B
58.1	31.5	453	476	-0.4	Ring B
52.8	27.2	422	443	-0.7	Ring B
48.6	24.0	396	416	-0.9	Ring B
43.0	20.5	366	385	0.0	Ring B
38.6	257.9	338	355	-0.2	Ring C
31.1	190.3	289	304	-0.4	Ring C
28.0	165.9	269	283	-0.1	Ring C
22.7	127.1	235	247	0.9	Ring C
-1.5	n/a				

Test 1 Baseline (Pa): p01- = -1.7 p01+ = 0.0 p02- = -1.5 p02+ = 0.0

12.6 Vedlegg 6: Utregning av C-, og n-verdier

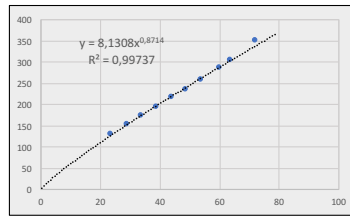


Alle hull lukket	
p	V
23,6	130
28,8	153
33,7	174
38,7	195
43,8	216
48,7	236
53,8	258
60	287
63,6	304
72,1	350
24,4	71
29,7	82
35,6	94
39,9	103
44,6	112
49,9	123
54,6	131
59,5	140
64,4	149
71,2	162

O
v
e
r
t
r
y
k

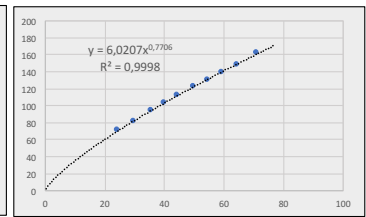
U
n
d
e
r
t
r
y
k

Rest



Overtrykk

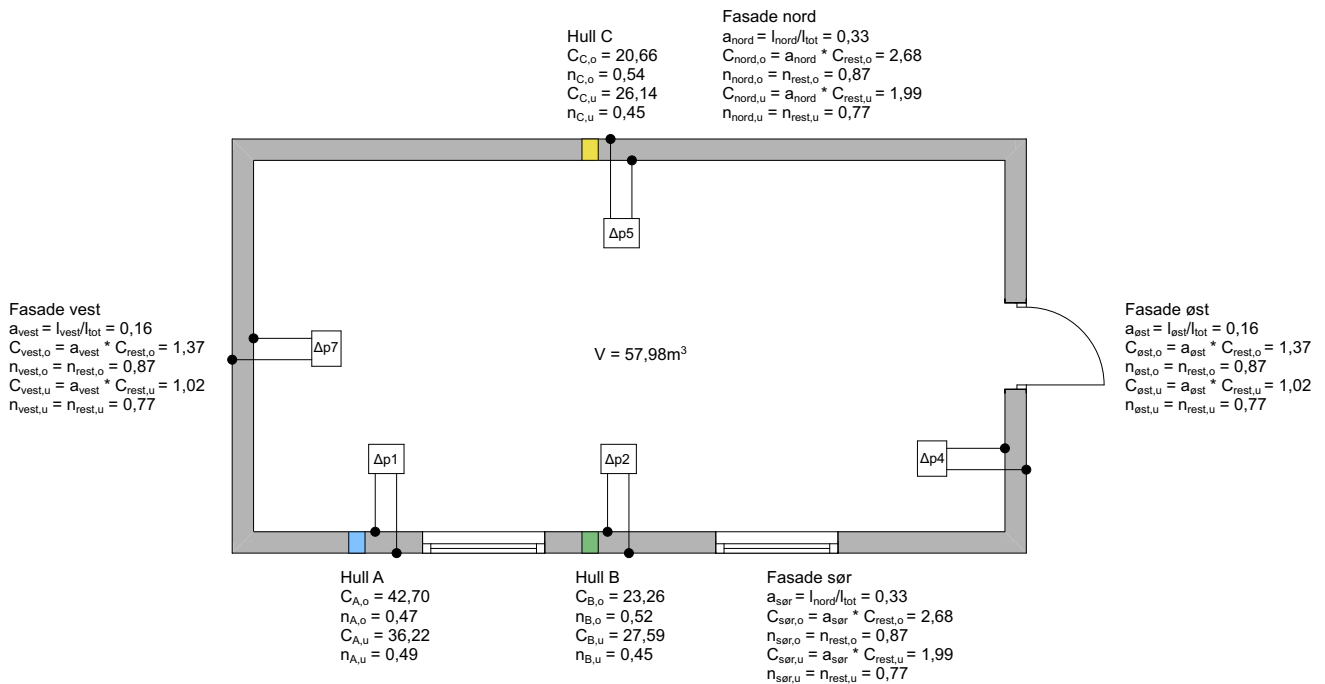
C	8,1308
n	0,8714



Undertrykk

C	6,0207
n	0,7706

12.7 Vedlegg 7: Oppbygging av infiltrasjonsmodell I



Utregning av luftstrøm (\dot{V}) (kap. 6.1.2 og 6.2.3)

$$\text{Hvis } \Delta p1 > 0: \dot{V}_A = C_{A,u} * \text{abs}(\Delta p1)^{n_{A,u}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p1 < 0: \dot{V}_A = -1 * C_{A,o} * \text{abs}(\Delta p1)^{n_{A,o}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p5 > 0: \dot{V}_C = C_{C,u} * \text{abs}(\Delta p5)^{n_{C,u}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p5 < 0: \dot{V}_C = -1 * C_{C,o} * \text{abs}(\Delta p5)^{n_{C,o}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p5 > 0: \dot{V}_{nord} = C_{nord,u} * \text{abs}(\Delta p5)^{n_{nord,u}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p5 < 0: \dot{V}_{nord} = -1 * C_{nord,o} * \text{abs}(\Delta p5)^{n_{nord,o}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p2 > 0: \dot{V}_{sør} = C_{sør,u} * \text{abs}(\Delta p2)^{n_{sør,u}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p2 < 0: \dot{V}_{sør} = -1 * C_{sør,o} * \text{abs}(\Delta p2)^{n_{sør,o}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p2 > 0: \dot{V}_B = C_{B,u} * \text{abs}(\Delta p2)^{n_{B,u}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p2 < 0: \dot{V}_B = -1 * C_{B,o} * \text{abs}(\Delta p2)^{n_{B,o}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p4 > 0: \dot{V}_{\emptyset st} = C_{\emptyset st,u} * \text{abs}(\Delta p4)^{n_{\emptyset st,u}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p4 < 0: \dot{V}_{\emptyset st} = -1 * C_{\emptyset st,o} * \text{abs}(\Delta p4)^{n_{\emptyset st,o}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p7 > 0: \dot{V}_{vest} = C_{vest,u} * \text{abs}(\Delta p7)^{n_{vest,u}}$$

$$\text{Hvis } \Delta p7 < 0: \dot{V}_{vest} = -1 * C_{vest,o} * \text{abs}(\Delta p7)^{n_{vest,o}}$$

Utregning av luftstrøm inn i modulen

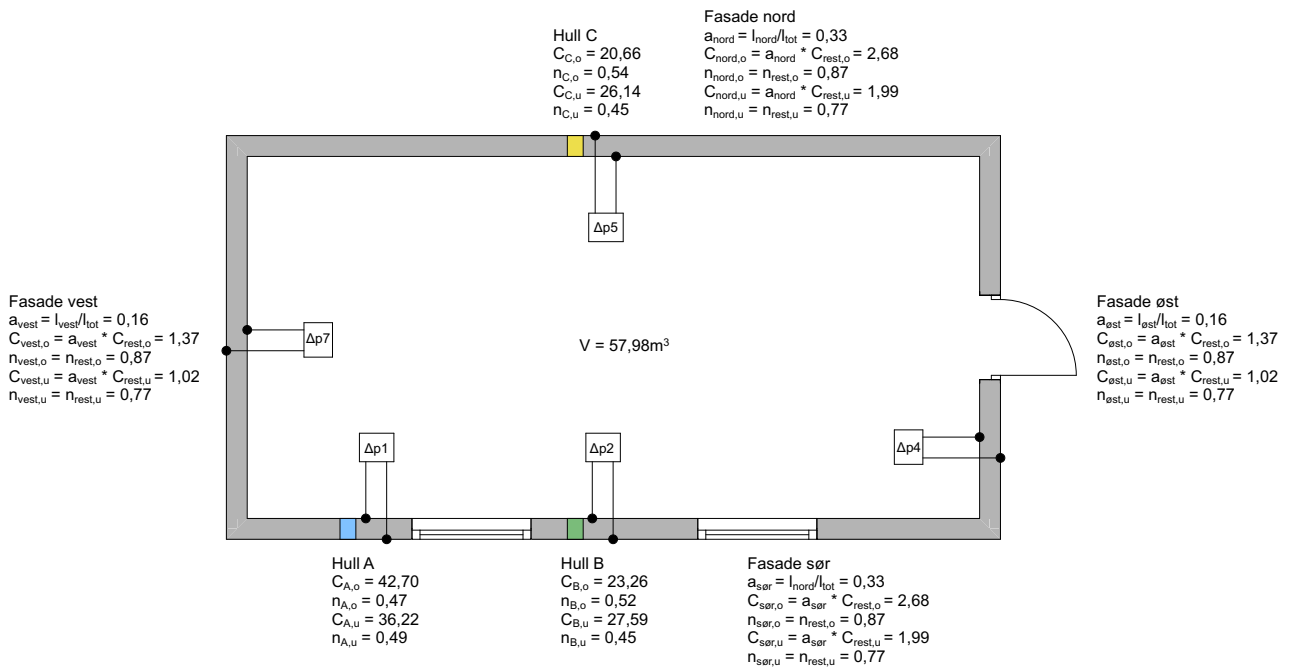
Summer hvis $\dot{V}_A: \dot{V}_{sør} > 0$:

$$\dot{V}_{inn} = \dot{V}_A: \dot{V}_{sør}$$

Utregning av infiltrasjonstall (kap. 6.2.3)

$$n_{inf} = \frac{\dot{V}_{inn}}{V}$$

12.8 Vedlegg 8: Oppbygging av infiltrasjonsmodell II



Utregning av vindhastighet ved lekkasjene (kap. 6.1.2):

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\ln(h_1/z_0)}{\ln(h_2/z_0)}$$

$$h_1 = h_{\text{Hull A}} = 0,4 \text{ m}$$

$$h_1 = h_{\text{Hull B}} = h_{\text{Hull C}} = h_{\text{alle fasader}} = 1,9 \text{ m}$$

$$h_2 = 10 \text{ m}$$

v_1 = vindhastighet ved lekkasjene

v_2 = målt vindhastighet ved værstasjonen

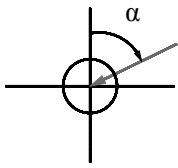
$$z_0 = 0,05 \text{ (tabell 6.1.2)}$$

Formfaktor (kap. 6.1.2)

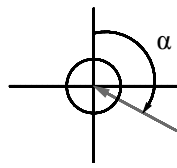
$$C_{pe,10} = 0,8 \text{ (tabell 6.1.1)}$$

Trykkforskjell over fasadene

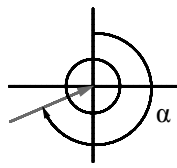
Vind fra 0-90°



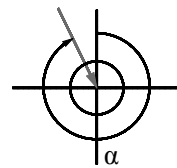
Vind fra 90-180°



Vind fra 180-270°



Vind fra 270-360°



Vind fra 0-90 grader:

$$v_x = v_1 * \sin(\alpha)$$

$$v_y = v_1 * \cos(\alpha)$$

Vind fra 180-270 grader:

$$v_x = v_1 * \sin(\alpha-180)$$

$$v_y = v_1 * \cos(\alpha-180)$$

Vind fra 90-180 grader:

$$v_x = v_1 * \cos(\alpha-90)$$

$$v_y = v_1 * \sin(\alpha-90)$$

Vind fra 270-0 grader:

$$v_x = v_1 * \cos(\alpha-270)$$

$$v_y = v_1 * \sin(\alpha-270)$$

$$\Delta p_x = C_{pe} * \frac{1}{2} \rho v_x^2 - p_i$$

$$\Delta p_y = C_{pe} * \frac{1}{2} \rho v_y^2 - p_i$$

Utrekning av luftstrøm inn

Vind fra 0-90 grader:

$$\dot{V}_{inn} = (C_{nord,u} (\Delta p_y)^{n_{nord,u}} + C_{C,u} (\Delta p_y)^{n_{C,u}}) + C_{\emptyset st,u} (\Delta p_x)^{n_{\emptyset st,u}}$$

Vind fra 90-180 grader:

$$\dot{V}_{inn} = C_{\emptyset st,u} (\Delta p_x)^{n_{\emptyset st,u}} + C_{s\emptyset r,u} (\Delta p_y)^{n_{s\emptyset r,u}} + C_{A,u} (\Delta p_y)^{n_{A,u}} + C_{B,u} (\Delta p_y)^{n_{B,u}}$$

Vind fra 180-270 grader:

$$\dot{V}_{inn} = C_{s\emptyset r,u} (\Delta p_y)^{n_{s\emptyset r,u}} + C_{A,u} (\Delta p_y)^{n_{A,u}} + C_{B,u} (\Delta p_y)^{n_{B,u}} + C_{vest,u} (\Delta p_x)^{n_{vest,u}}$$

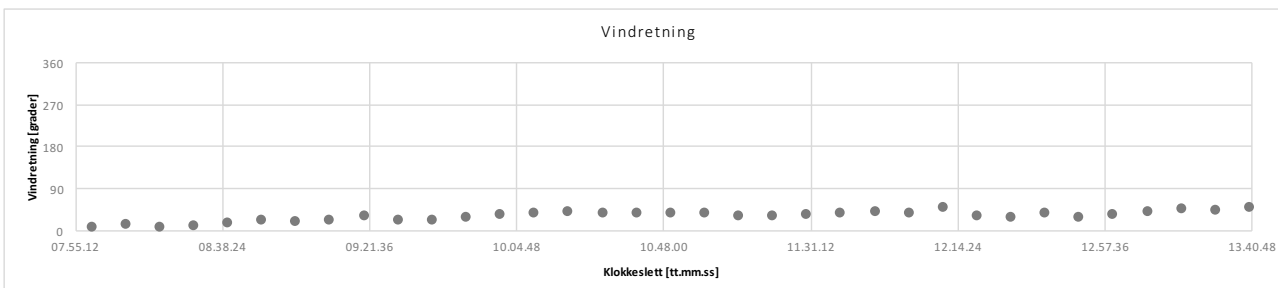
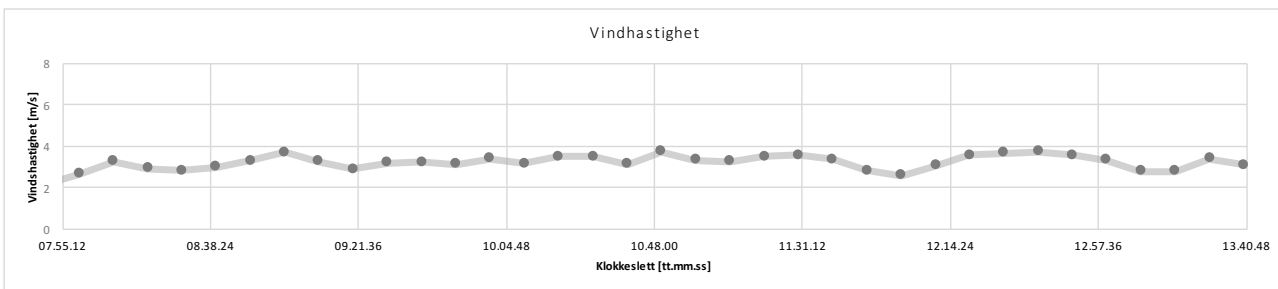
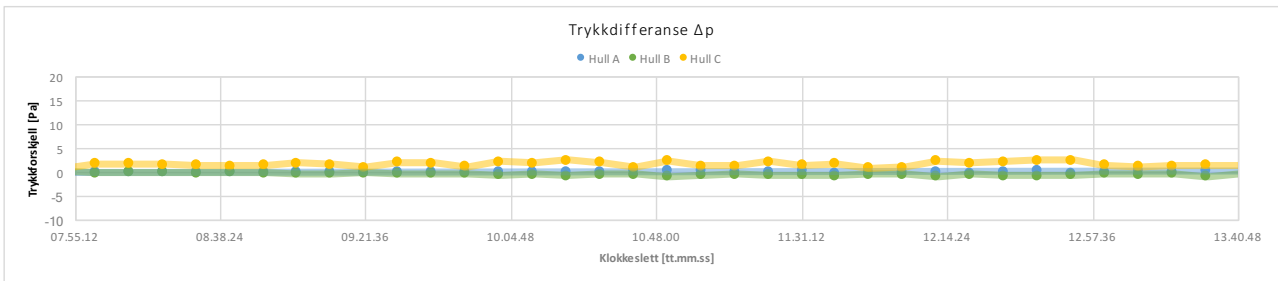
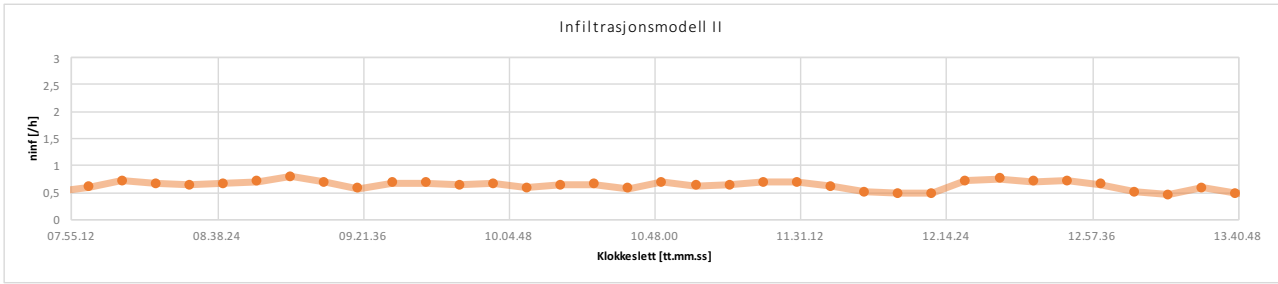
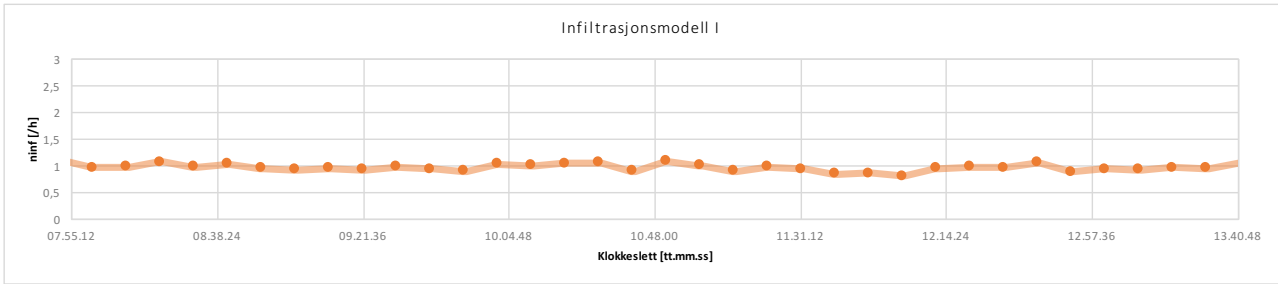
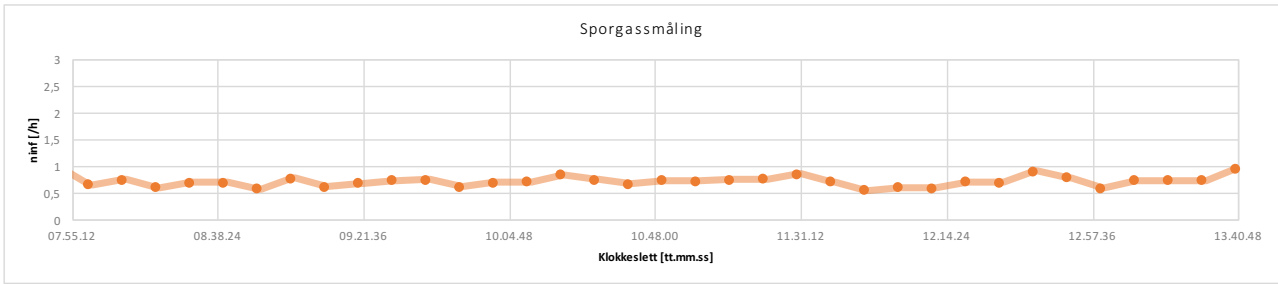
Vind fra 270-360 grader:

$$\dot{V}_{inn} = C_{vest,u} (\Delta p_x)^{n_{vest,u}} + (C_{nord,u} (\Delta p_y)^{n_{nord,u}} + C_{C,u} (\Delta p_y)^{n_{C,u}})$$

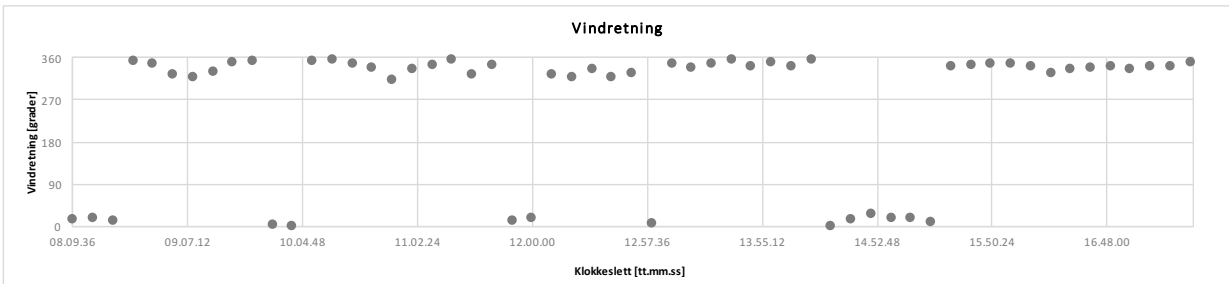
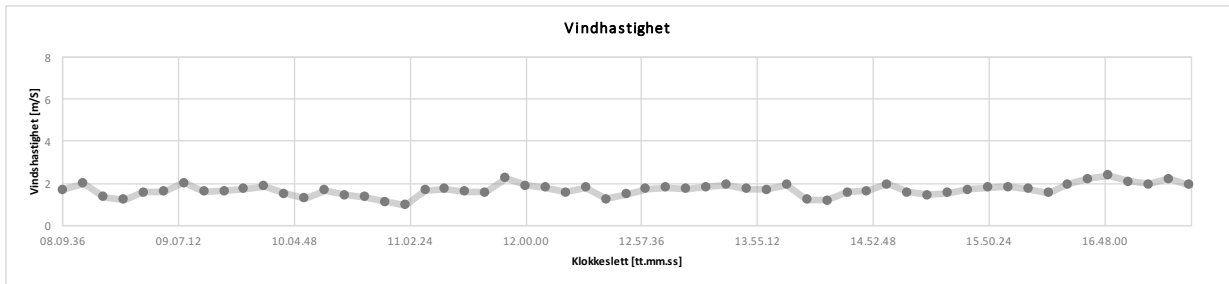
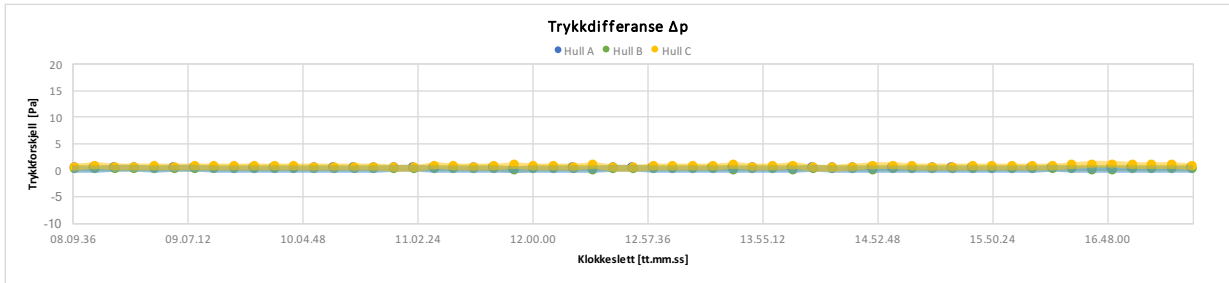
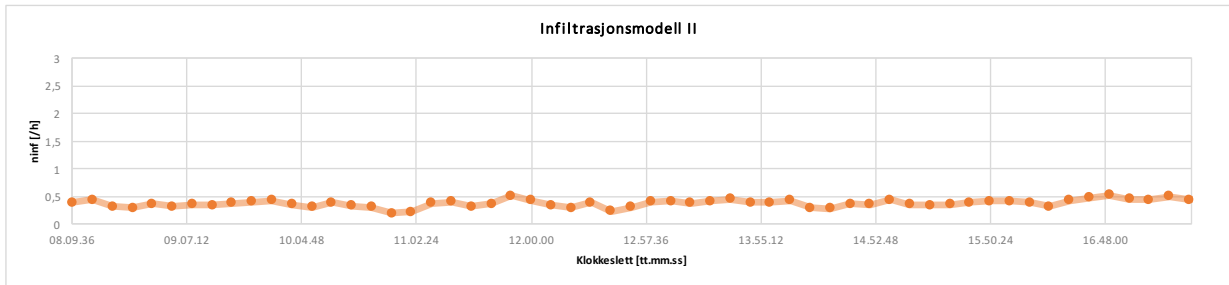
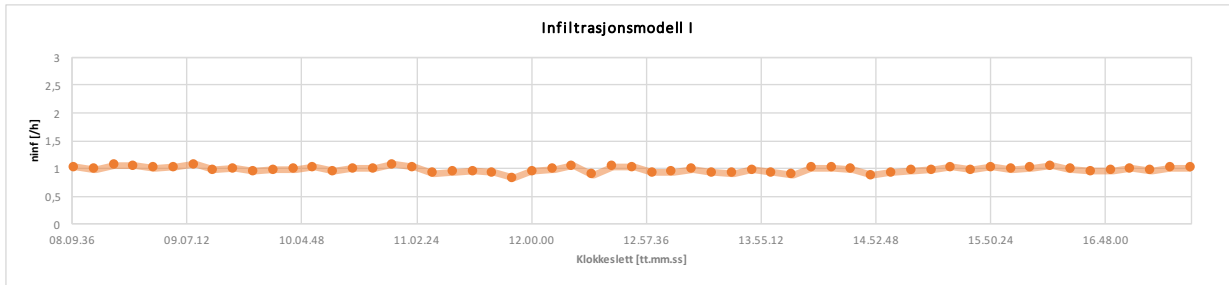
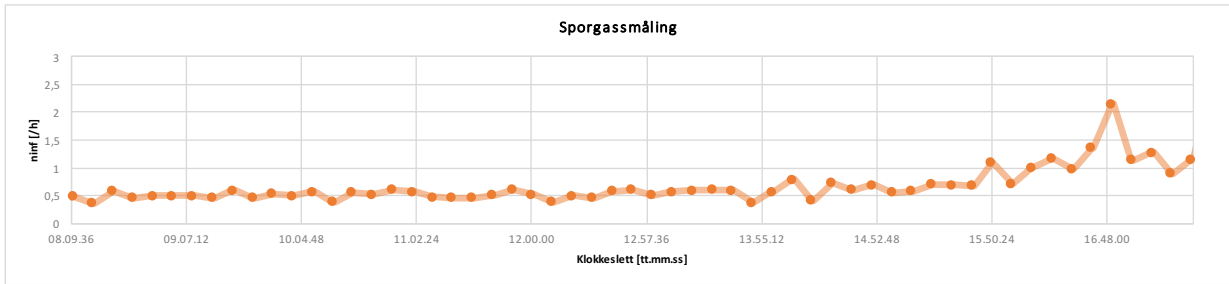
Utrekning av infiltrasjon (kap 6.2.3)

$$n_{inf} = \frac{\dot{V}_{inn}}{V}$$

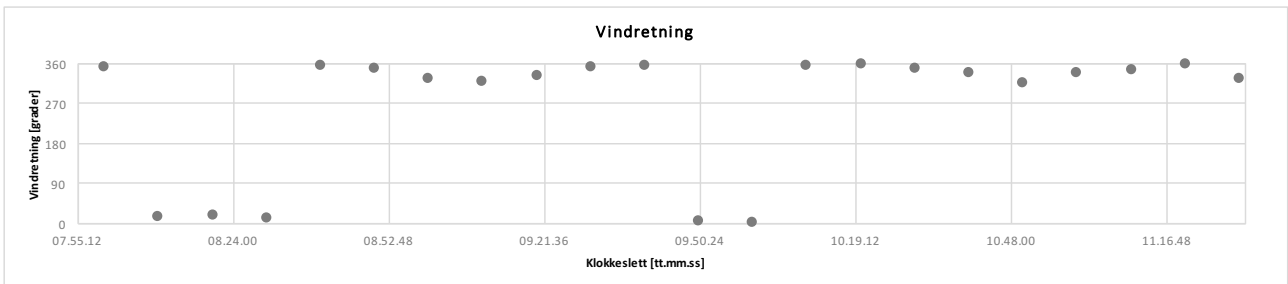
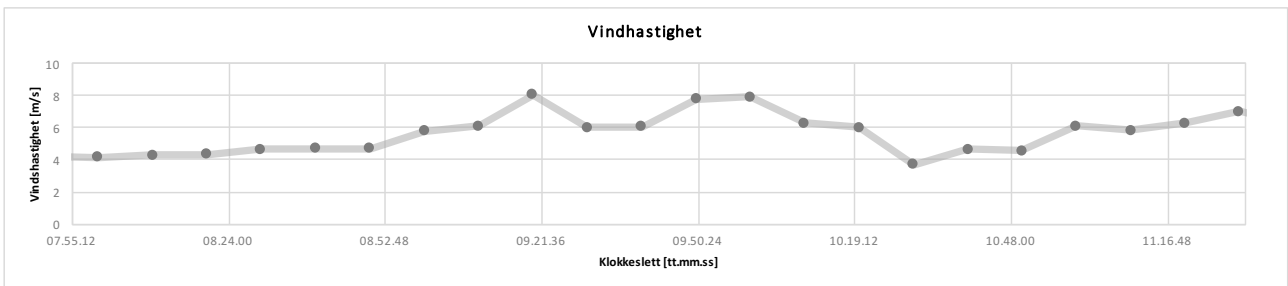
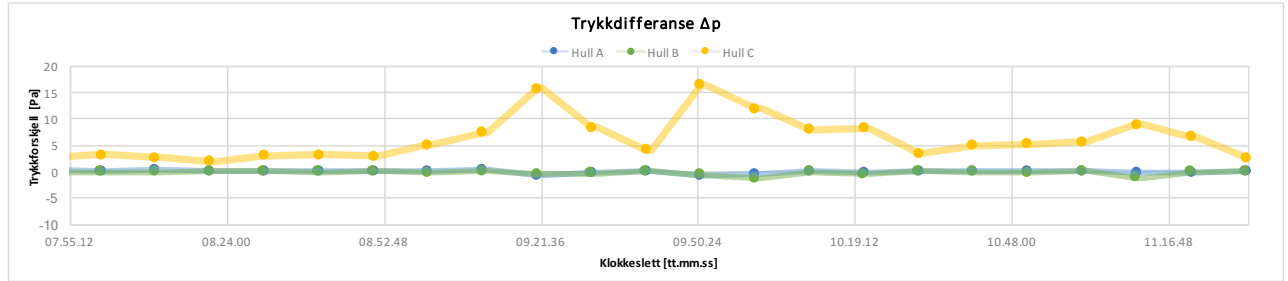
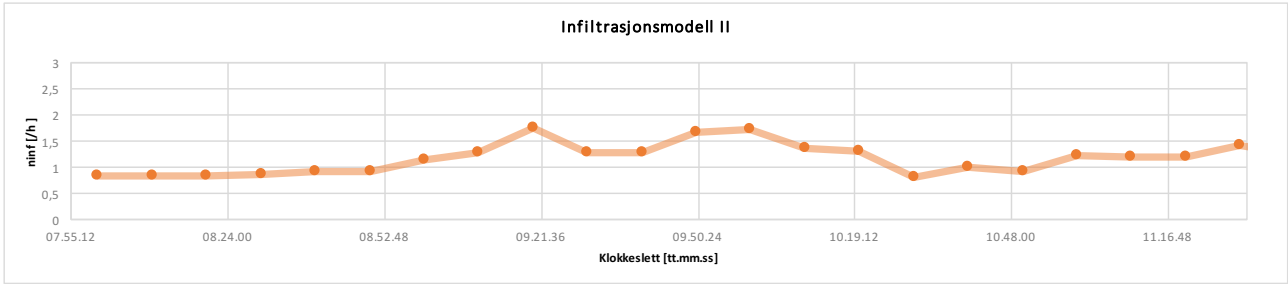
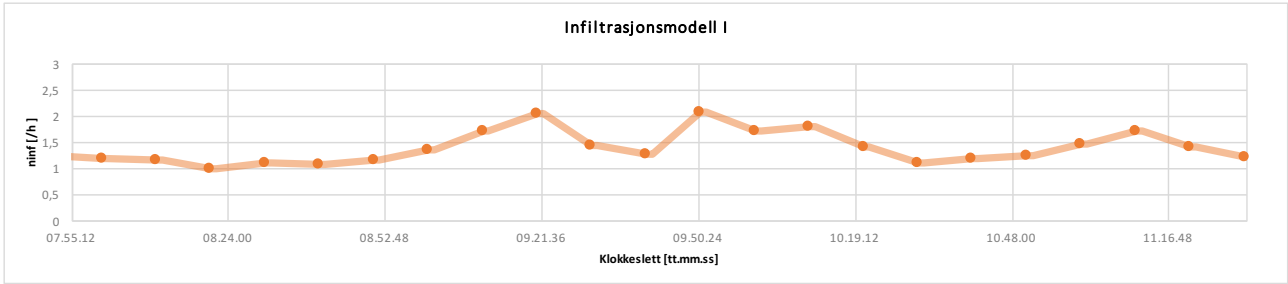
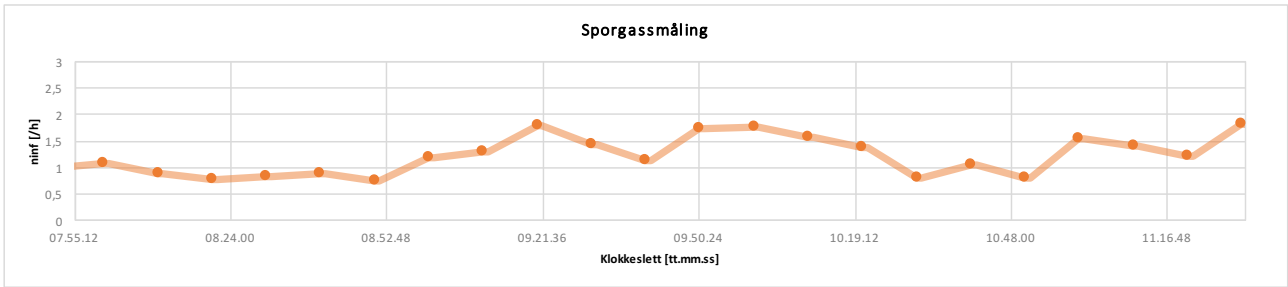
12.9 Vedlegg 9: Forsøksdag 5.3.19 Periode 1(1)



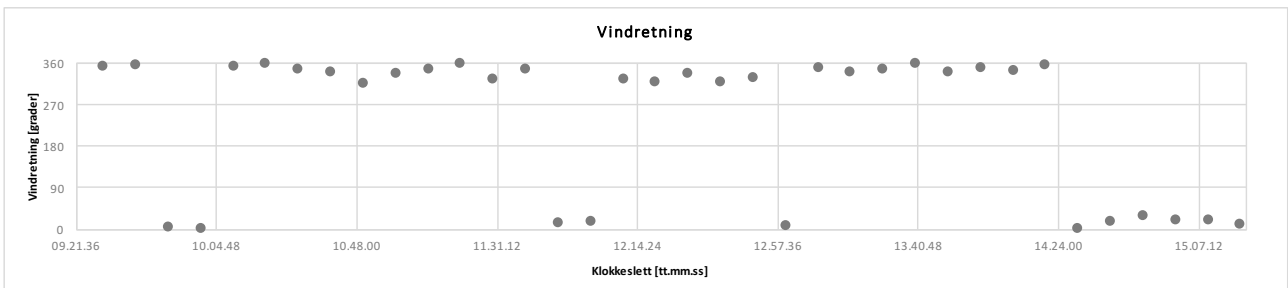
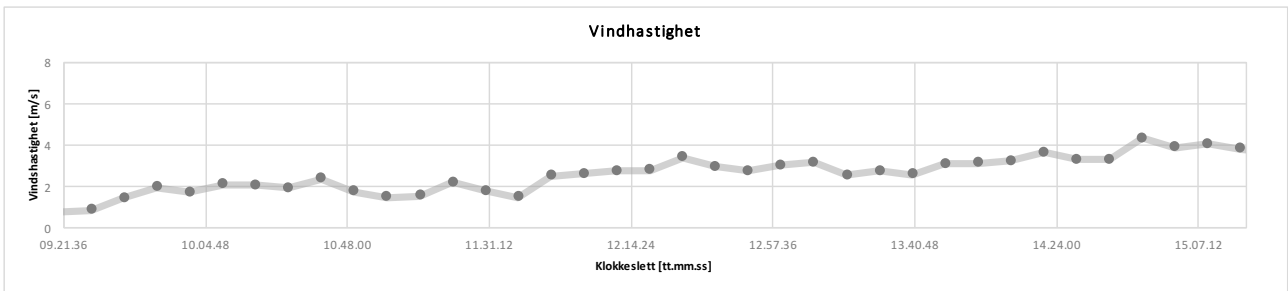
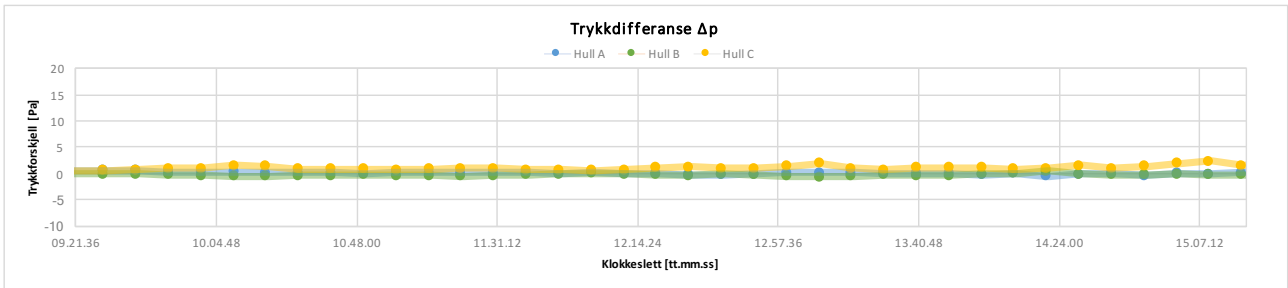
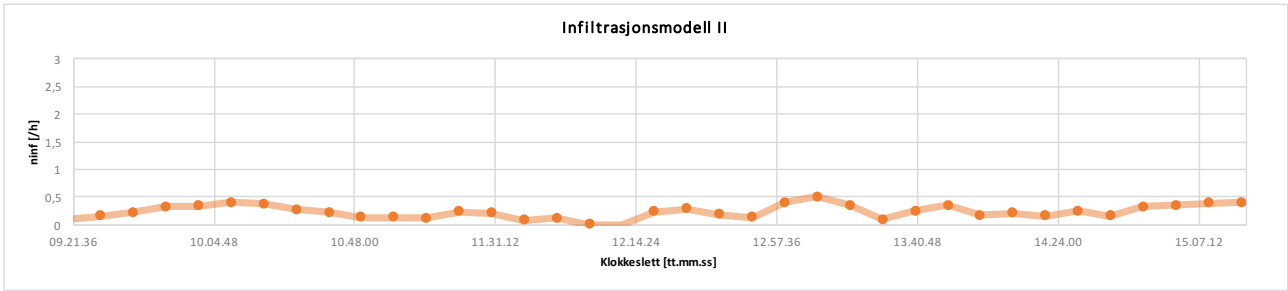
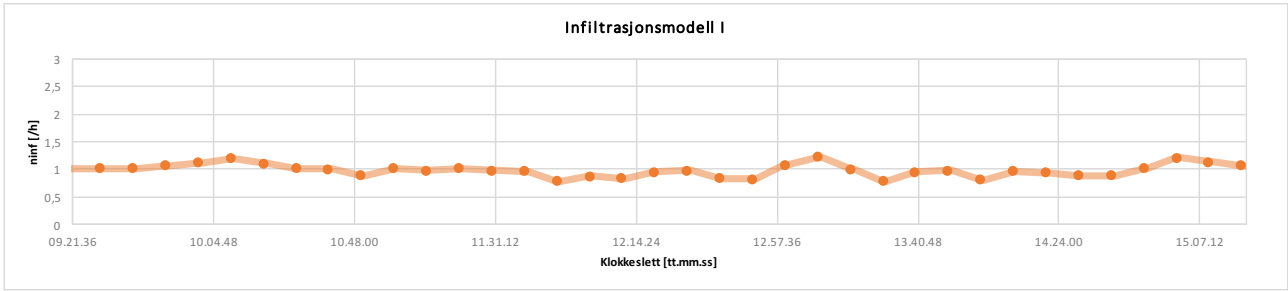
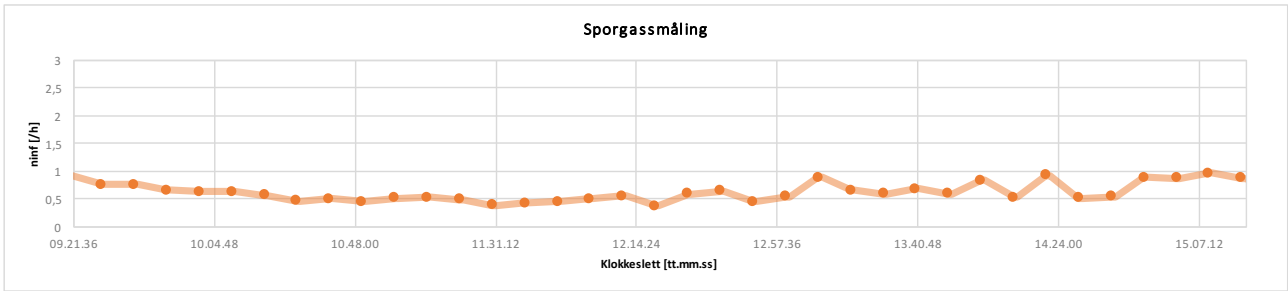
12.10 Vedlegg 10: Forsøksdag 7.3.19 Periode 1(1)



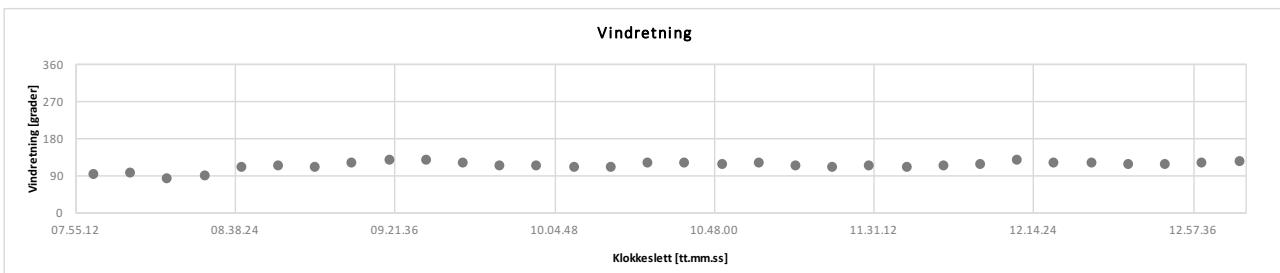
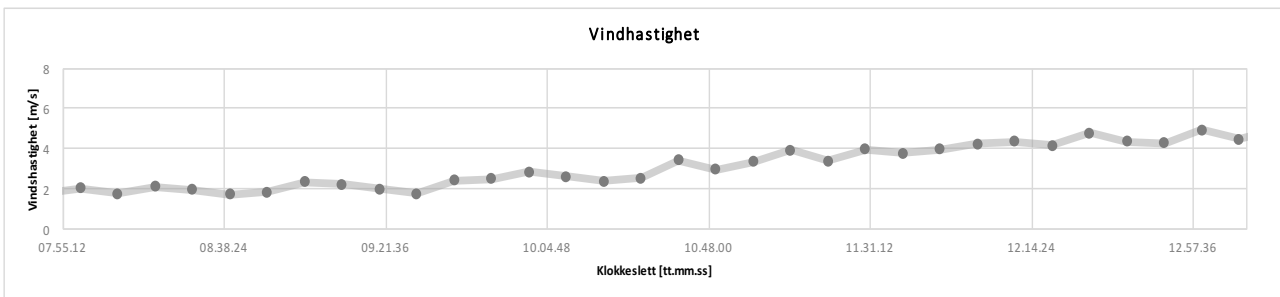
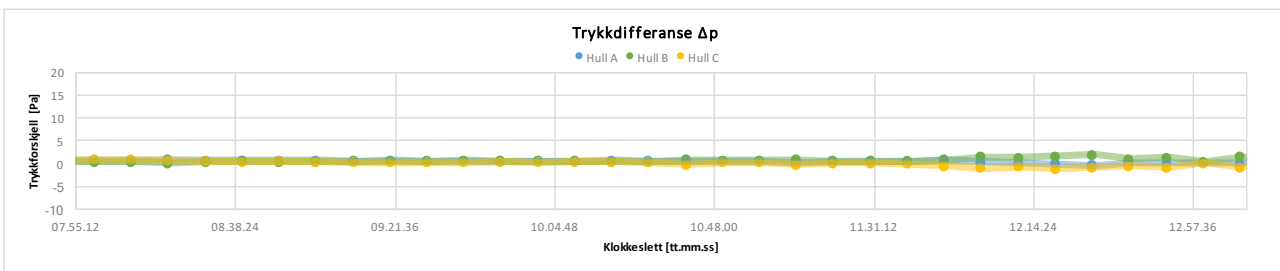
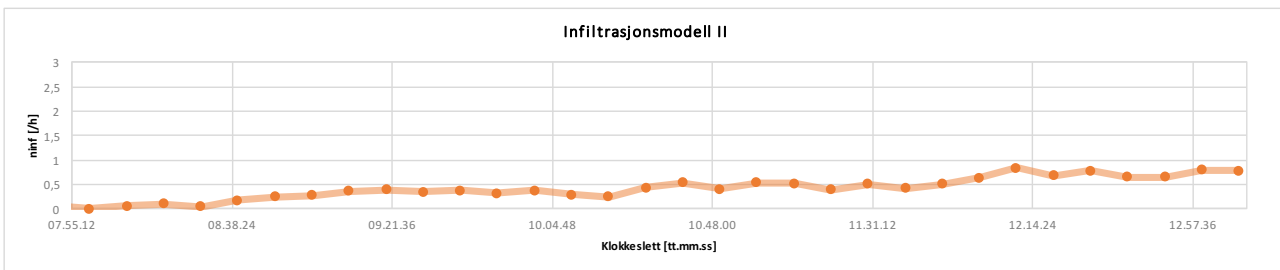
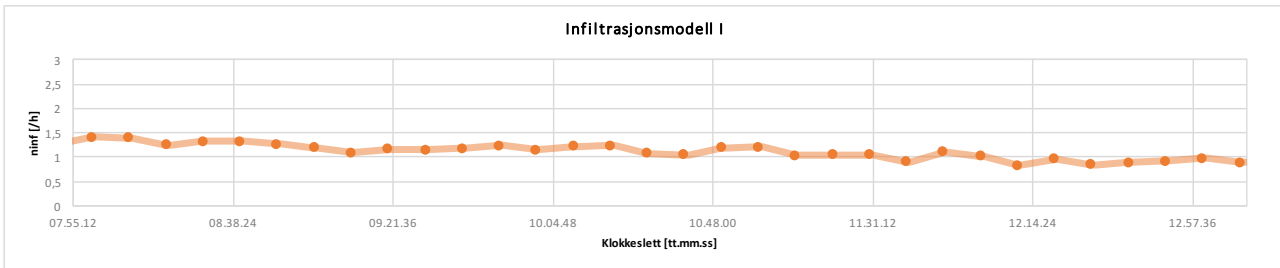
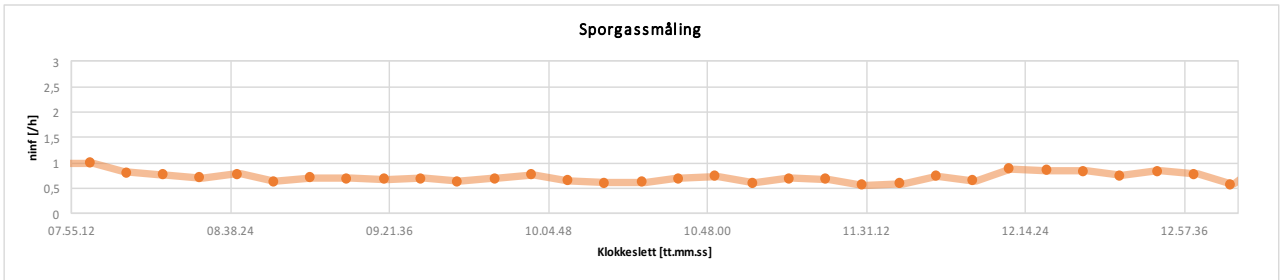
12.11 Vedlegg 11: Forsøksdag 8.3.19 Periode 1(1)



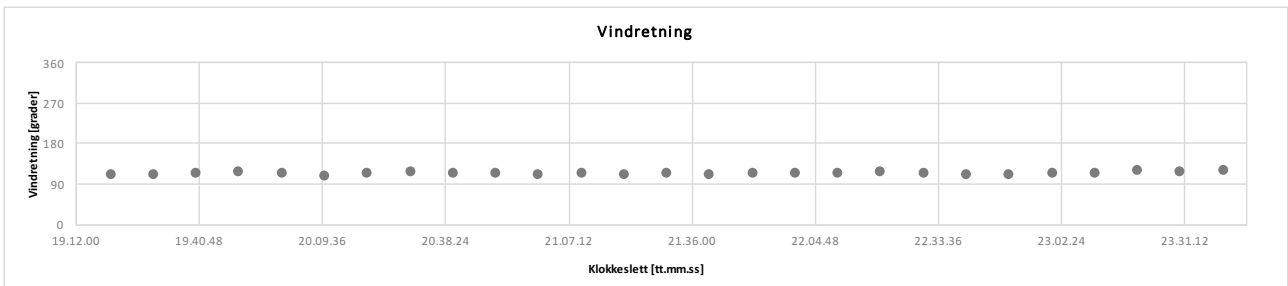
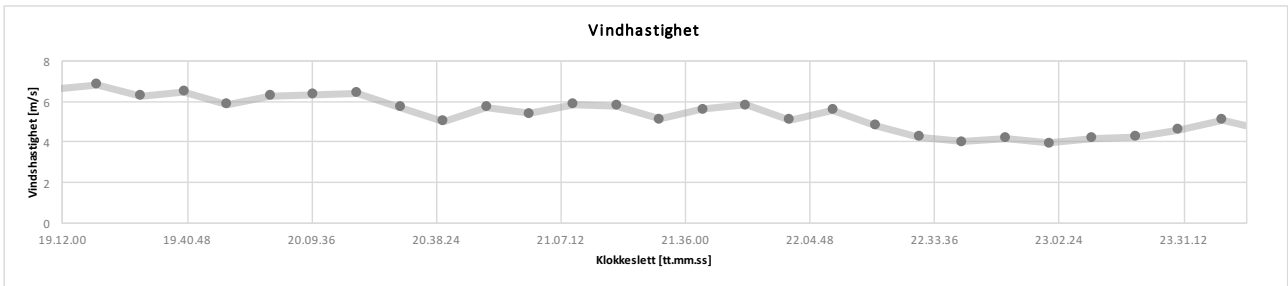
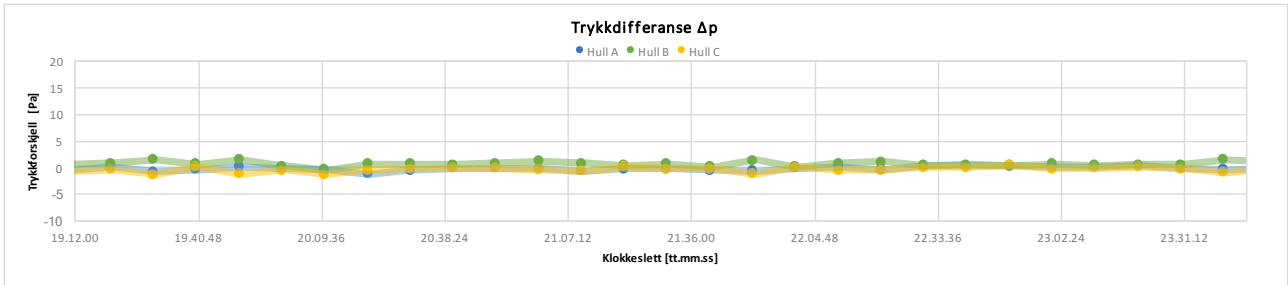
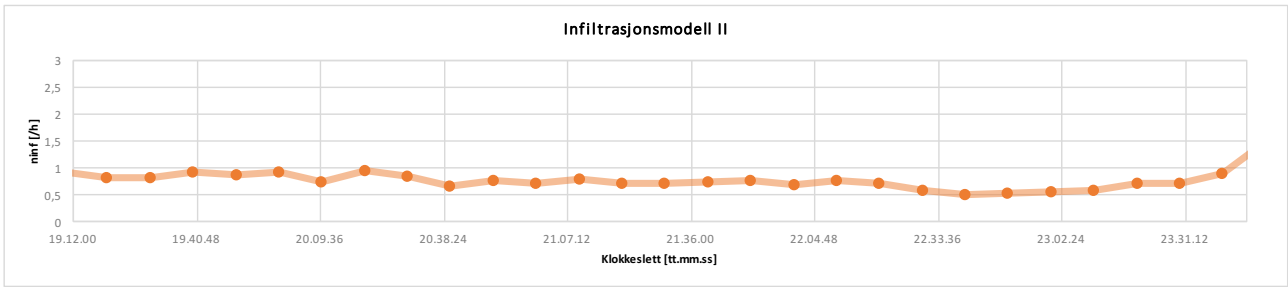
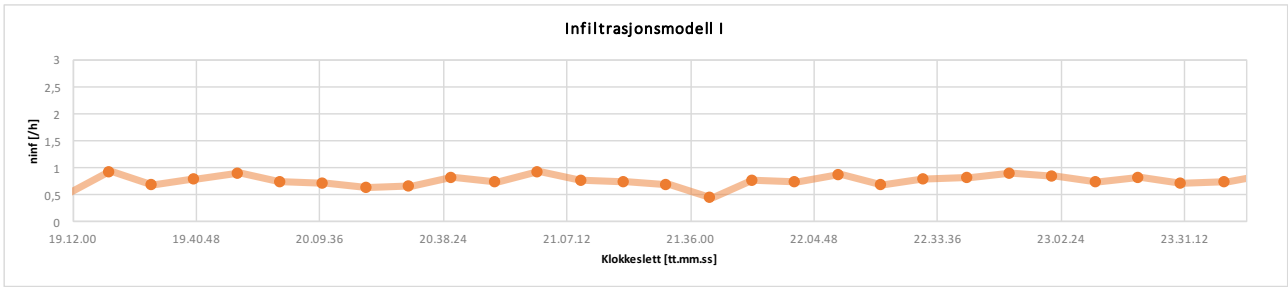
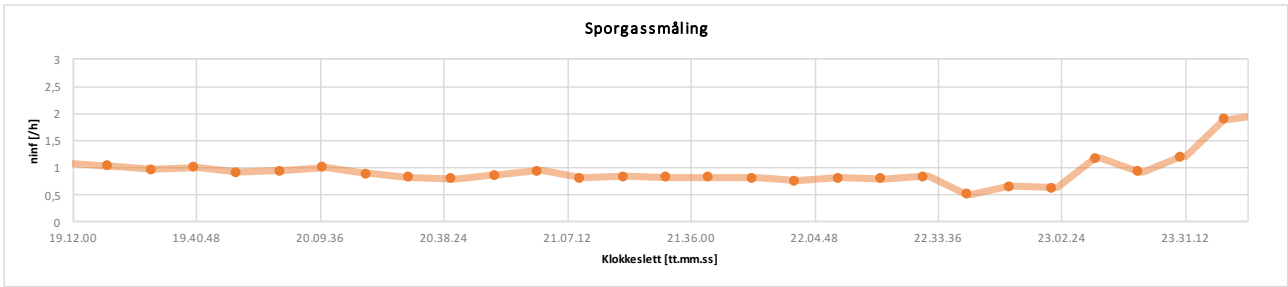
12.12 Vedlegg 12: Forsøksdag 11.3.19 Periode 1(1)



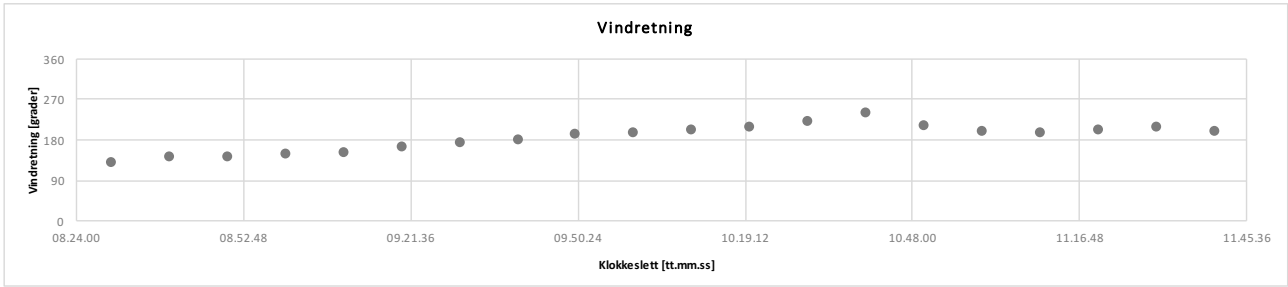
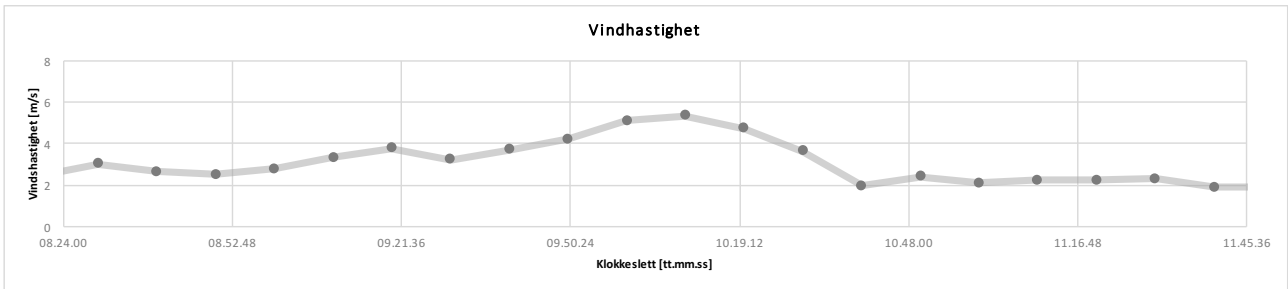
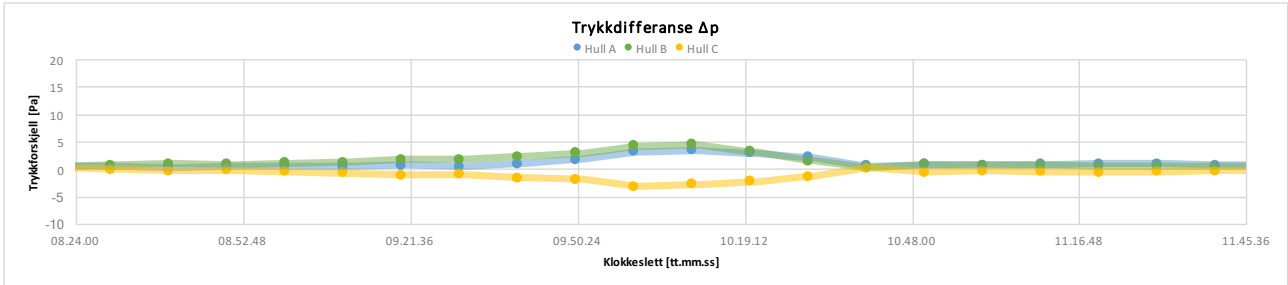
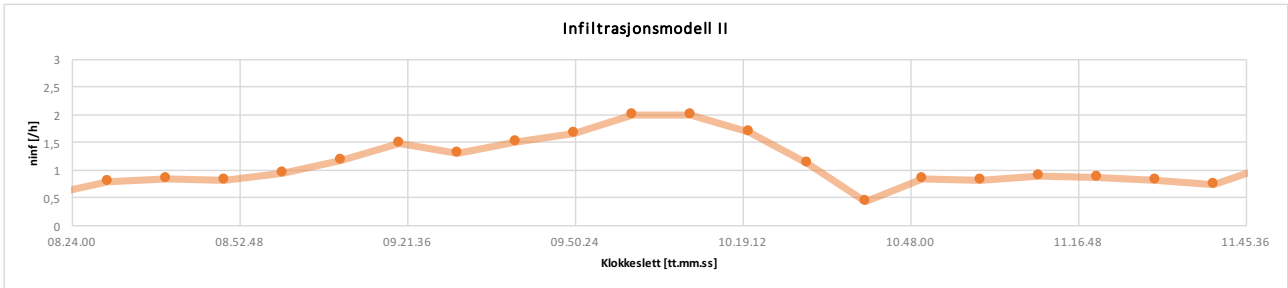
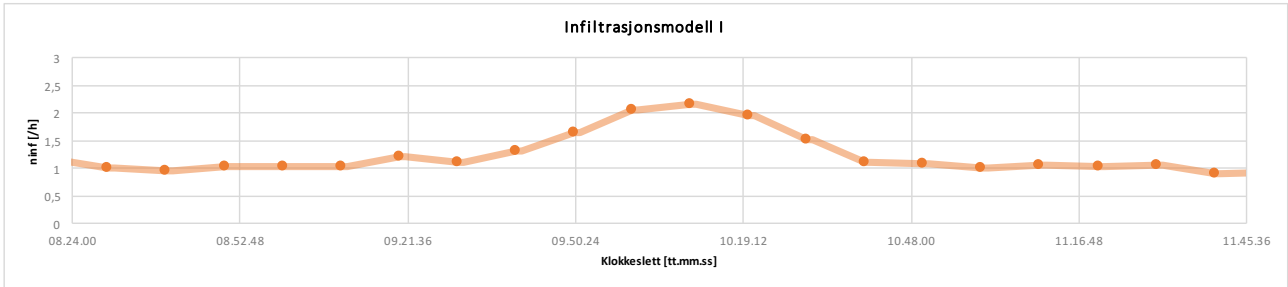
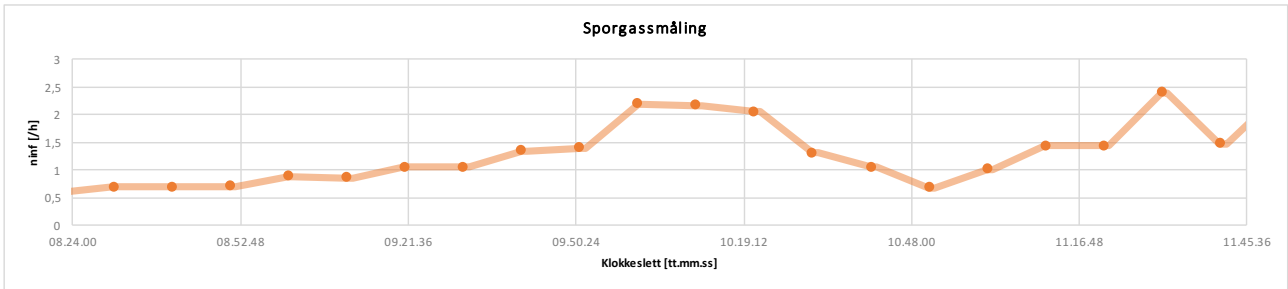
12.13 Vedlegg 13: Forsøksdag 12.3.19 Periode 1(2)



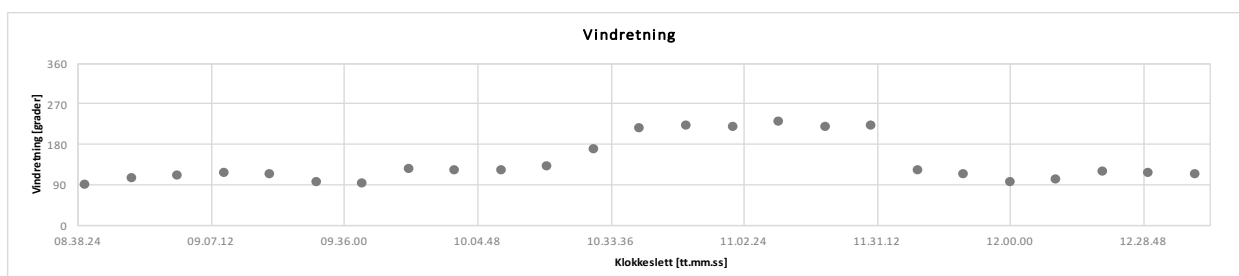
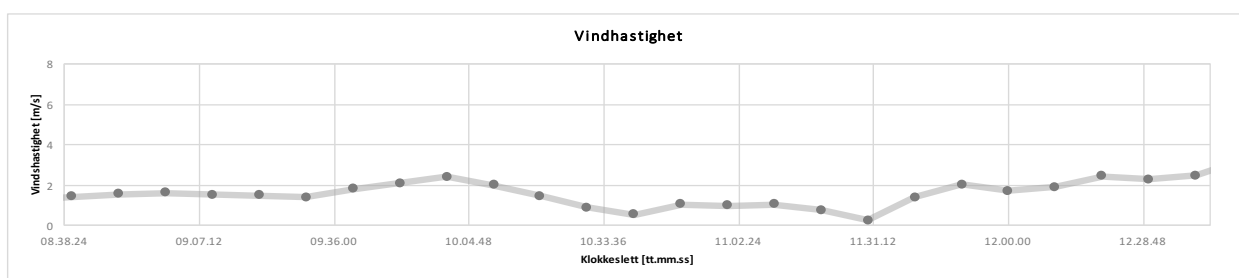
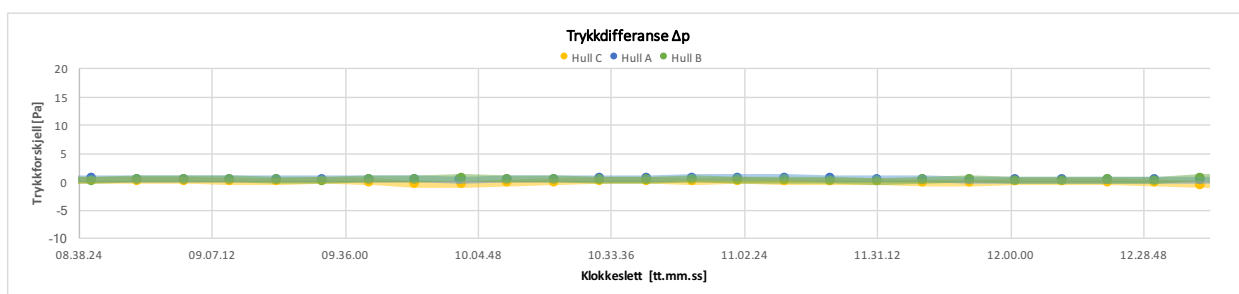
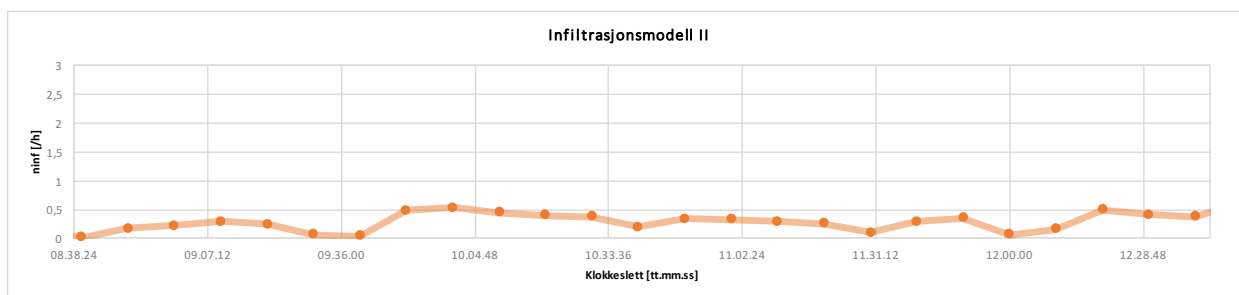
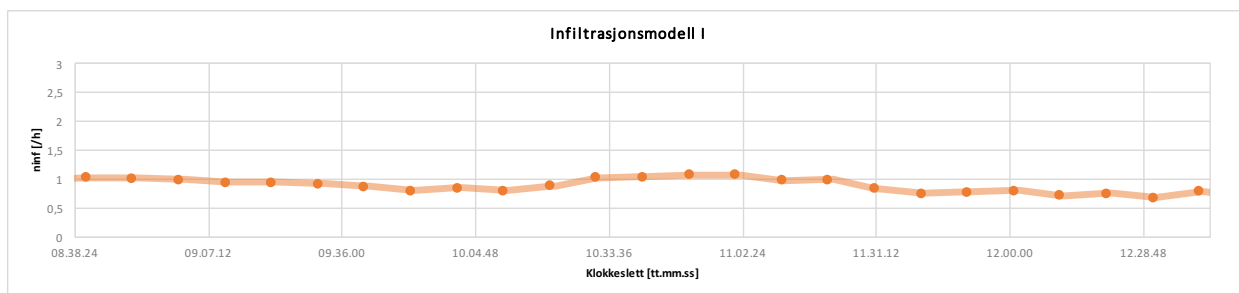
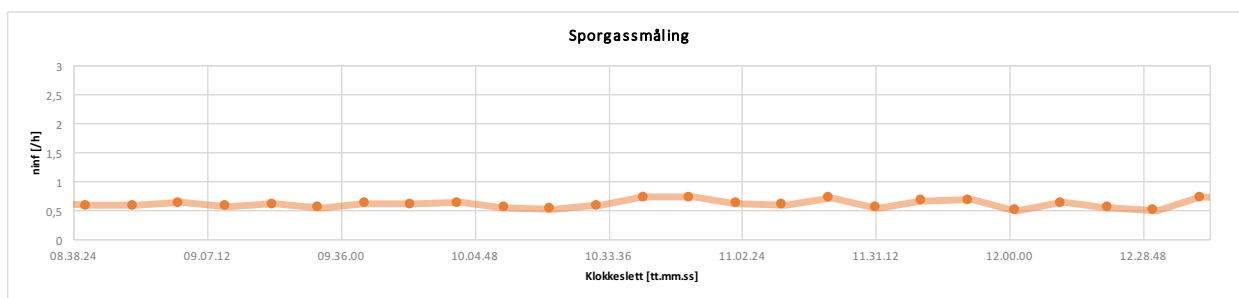
12.14 Vedlegg 14: Forsøksdag 12.3.19 Periode 2(2)



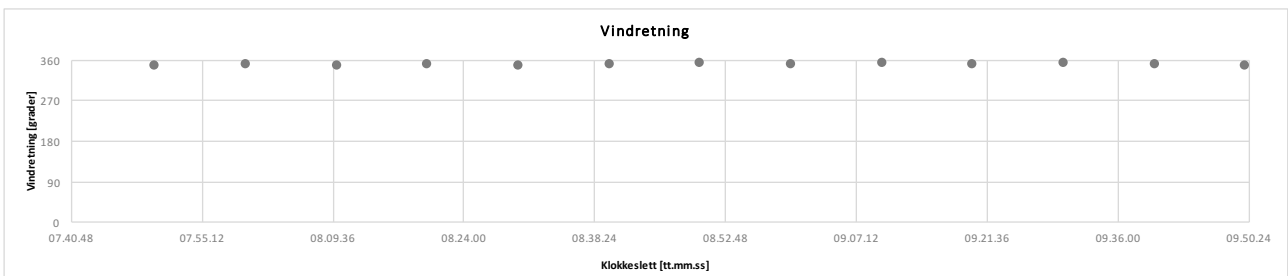
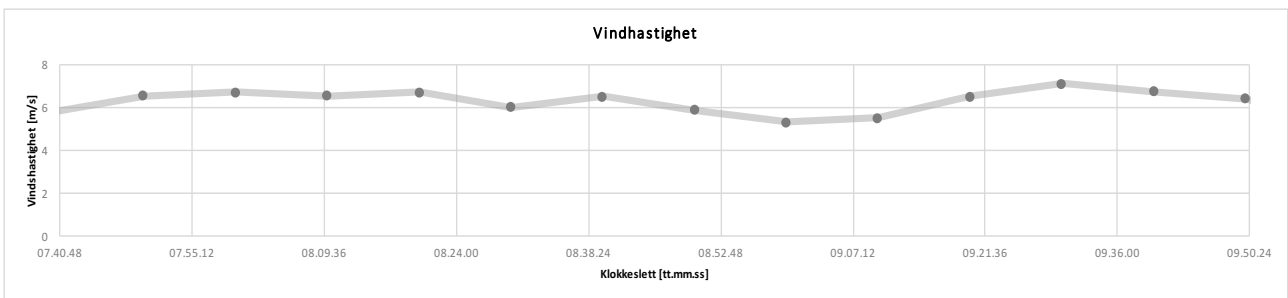
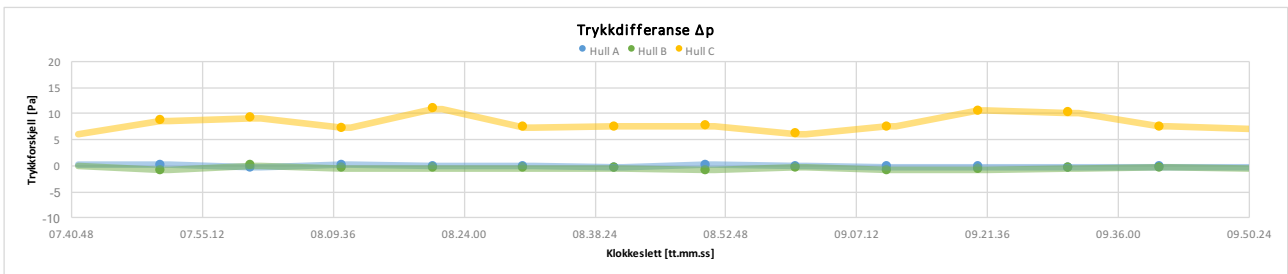
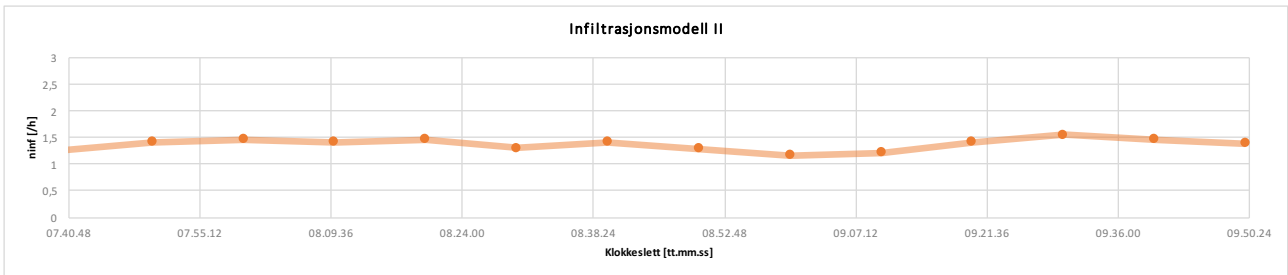
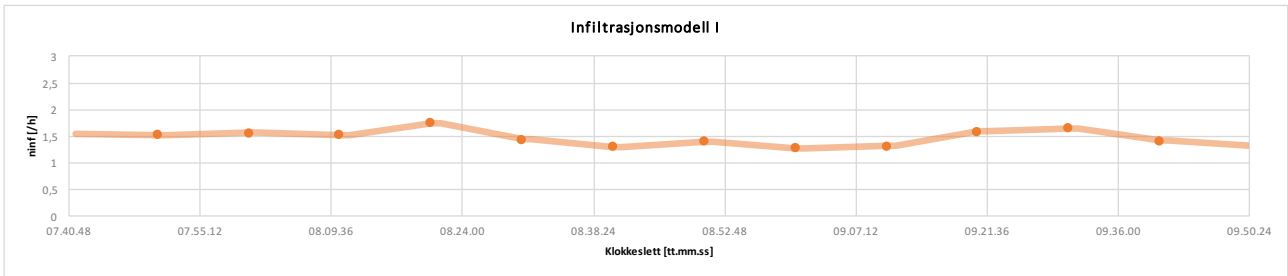
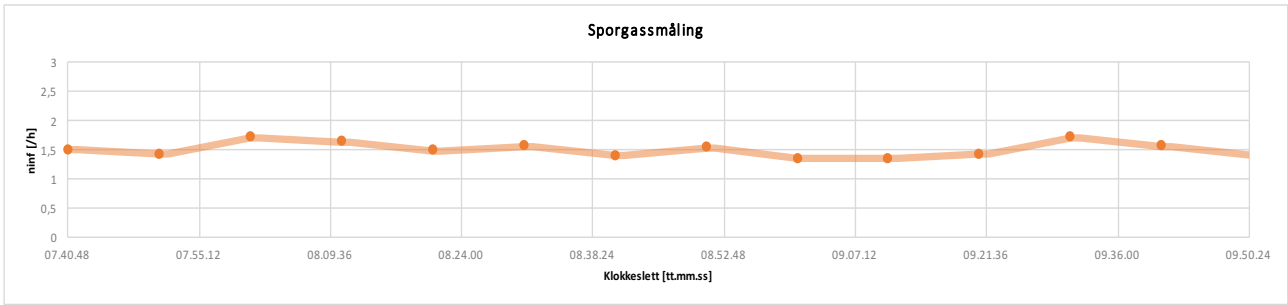
12.15 Vedlegg 15: Forsøksdag 13.3.19 Periode 1(1)



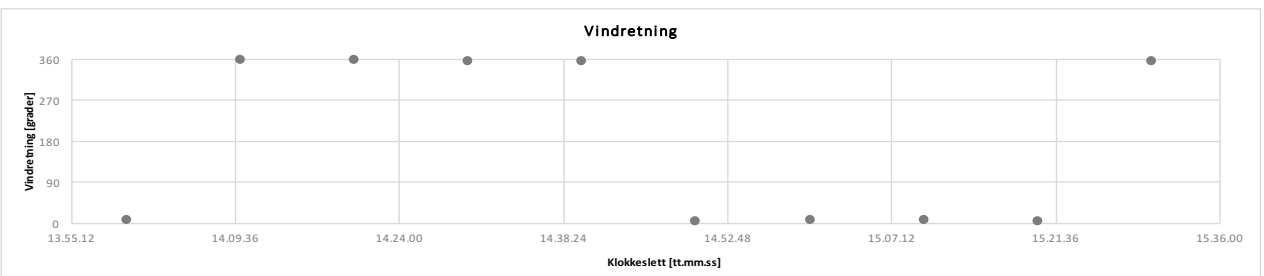
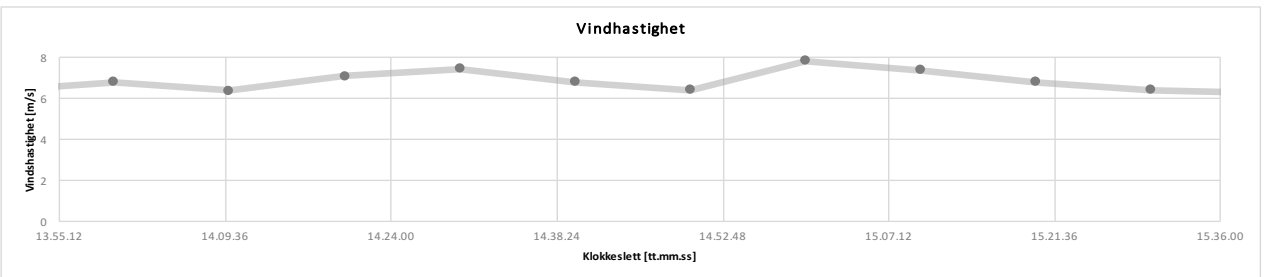
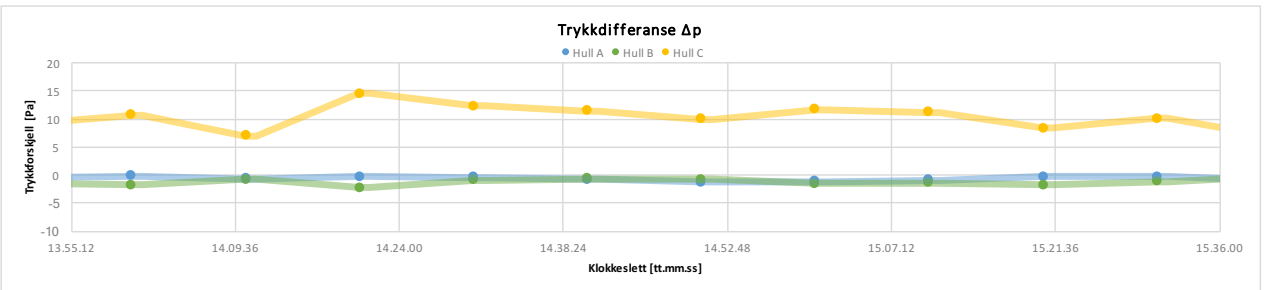
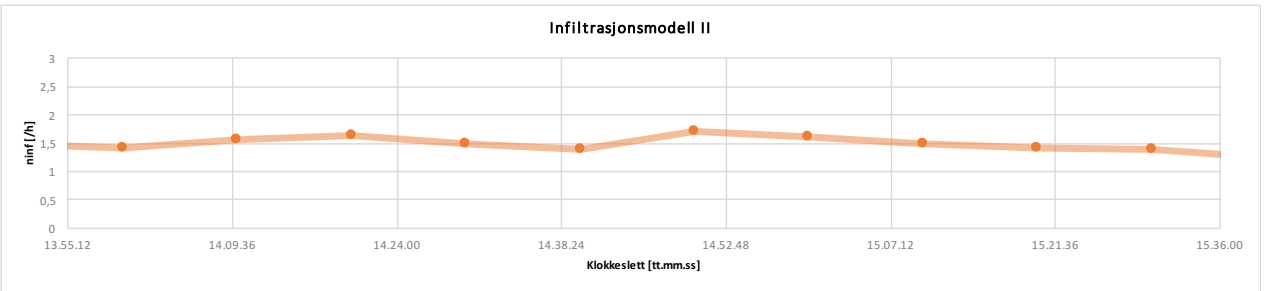
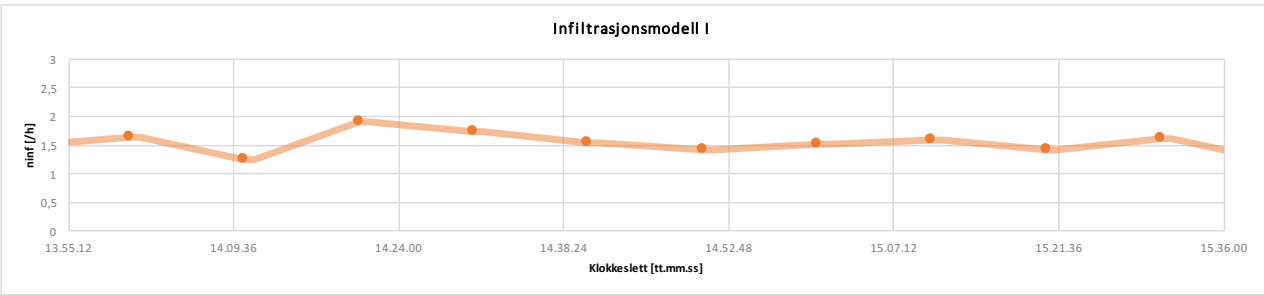
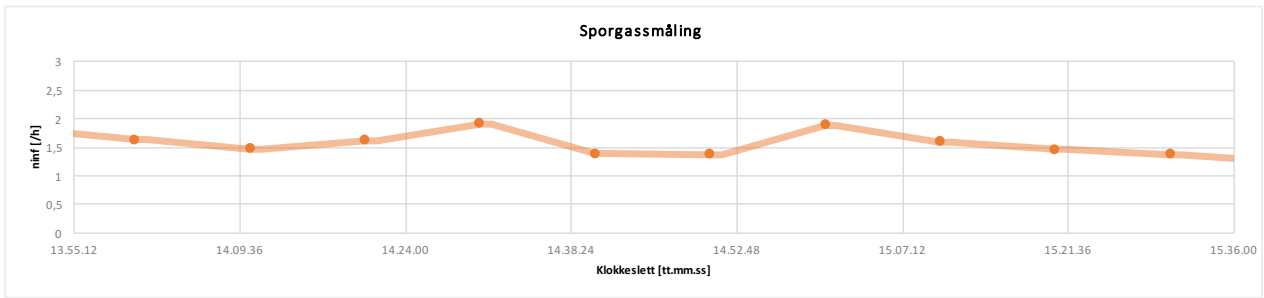
12.16 Vedlegg 16: Forsøksdag 15.3.19 Periode 1(1)



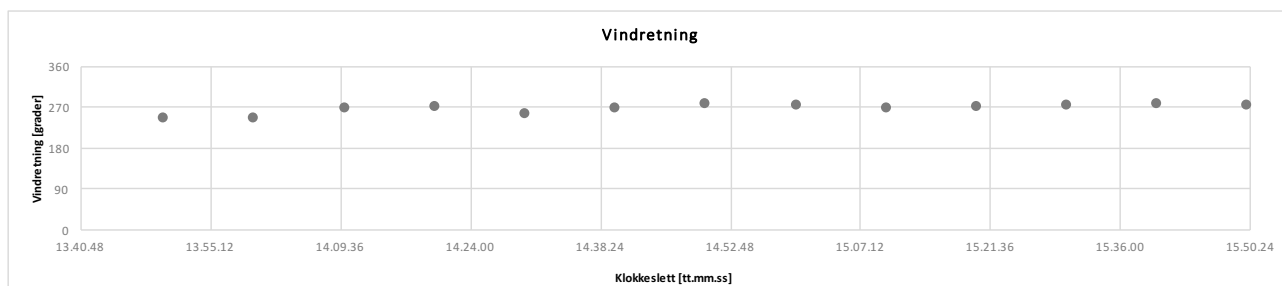
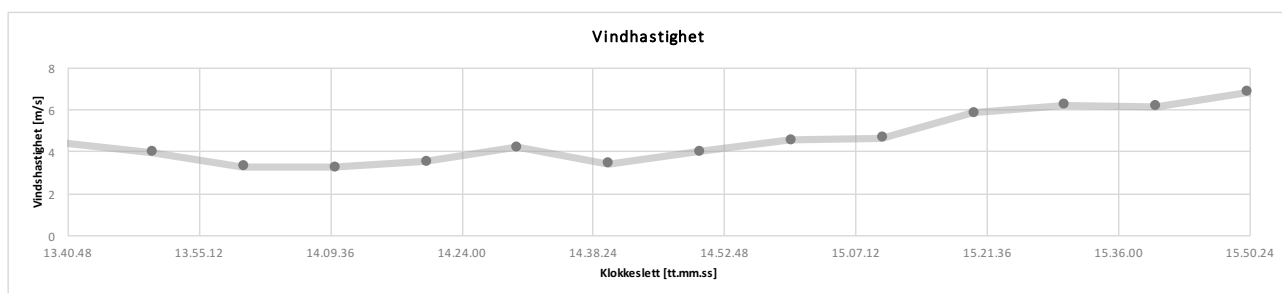
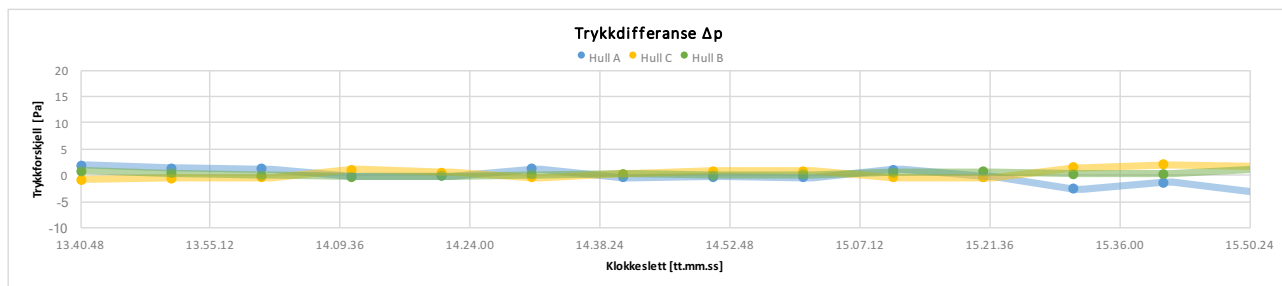
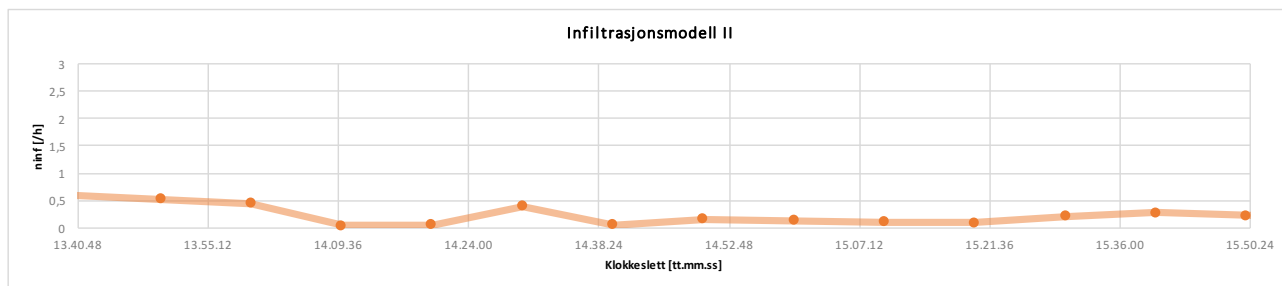
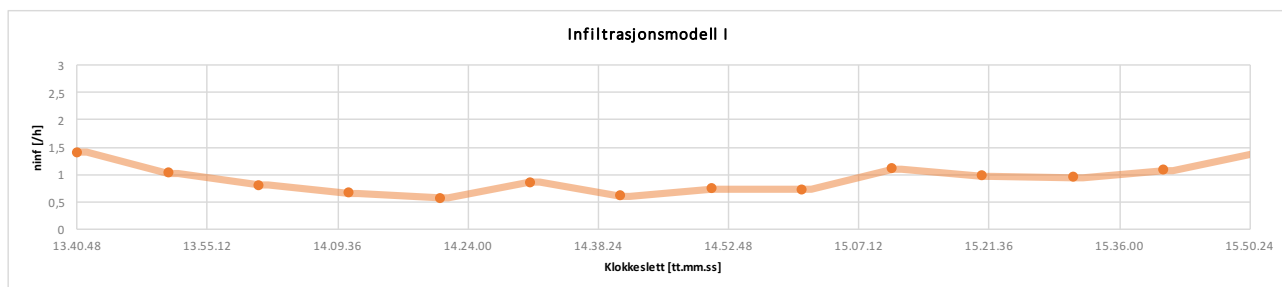
12.17 Vedlegg 17: Forsøksdag 18.3.19 Periode 1(2)



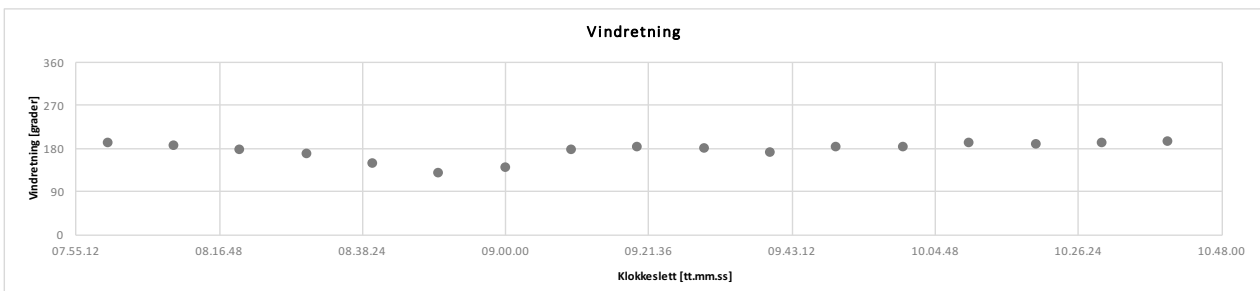
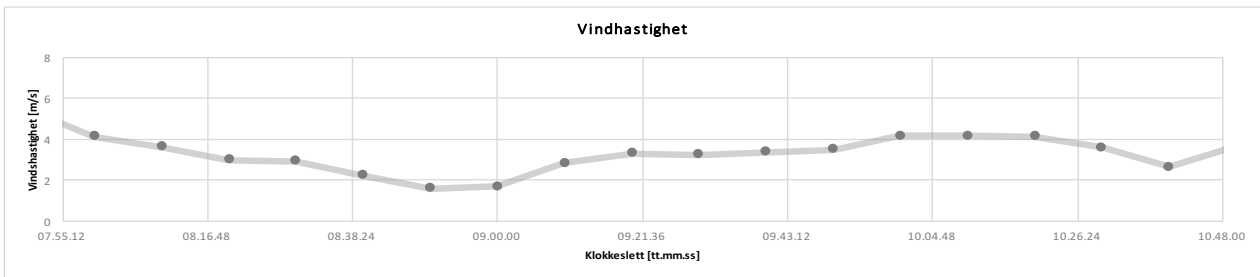
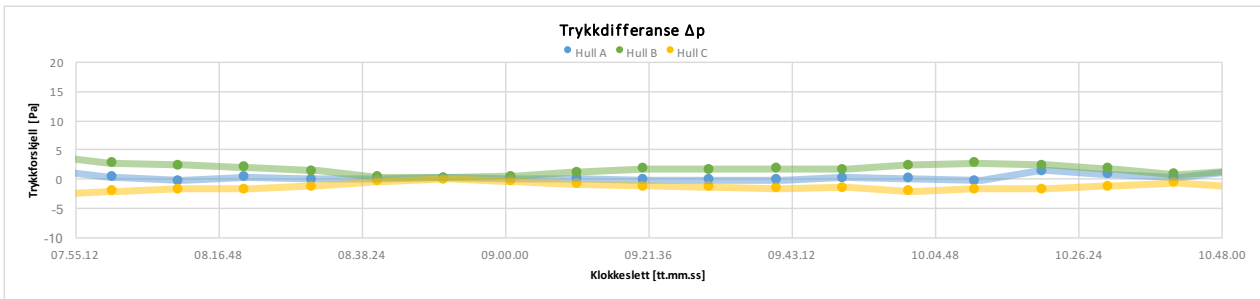
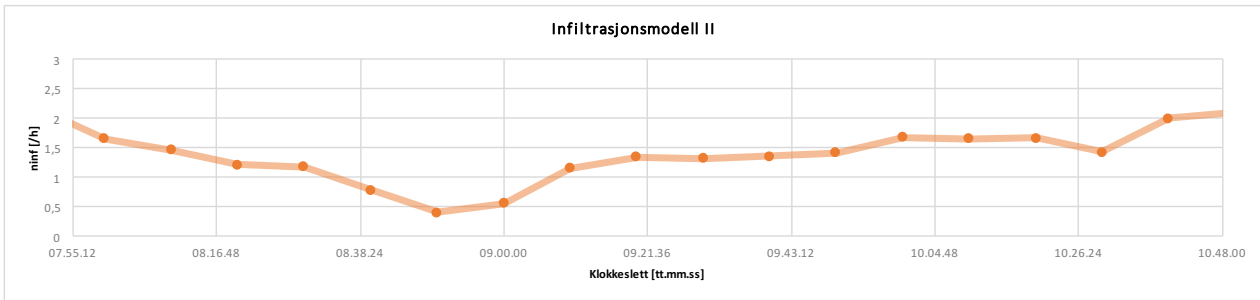
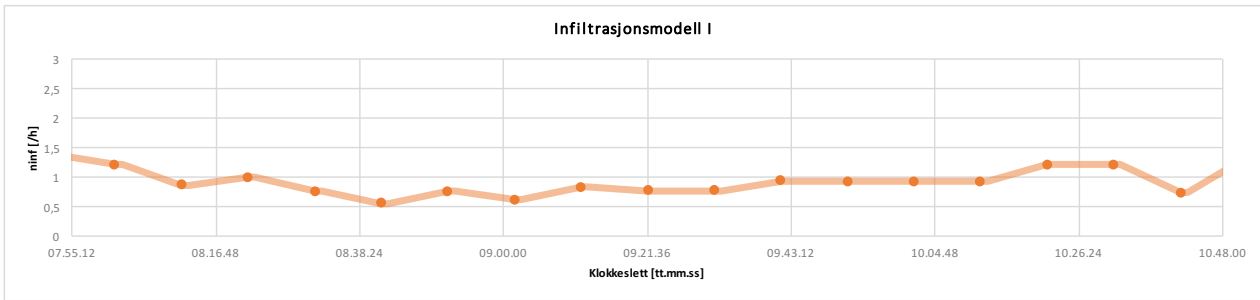
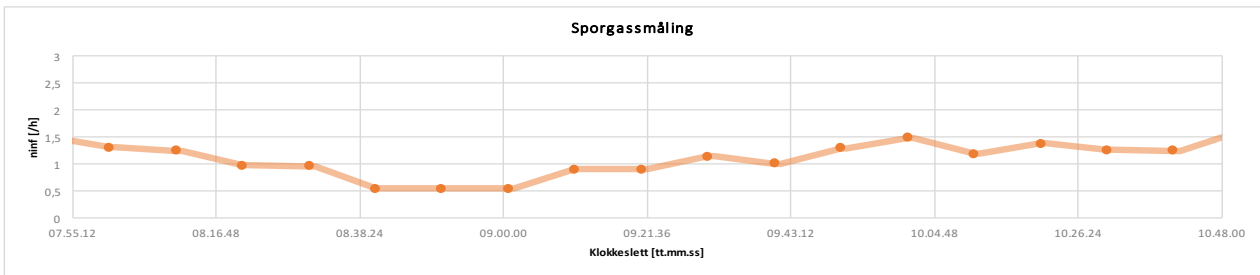
12.18 Vedlegg 18: Forsøksdag 18.3.19 Periode 2(2)



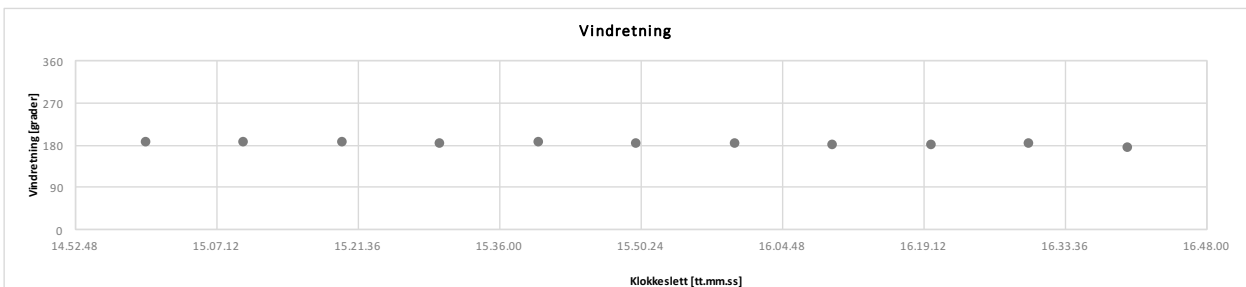
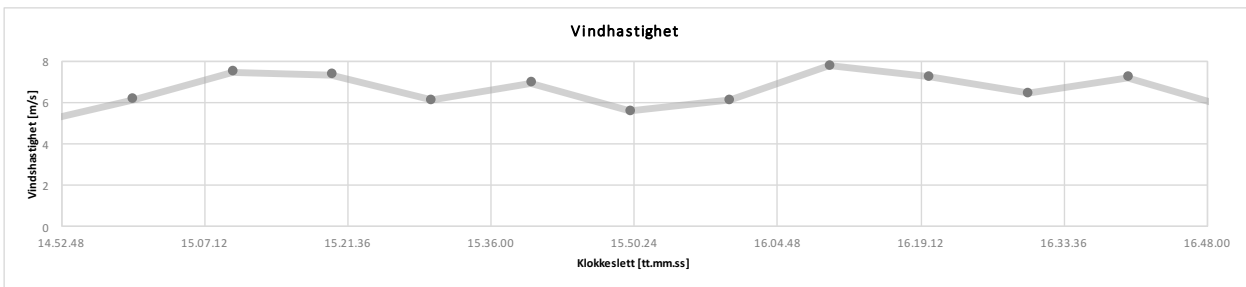
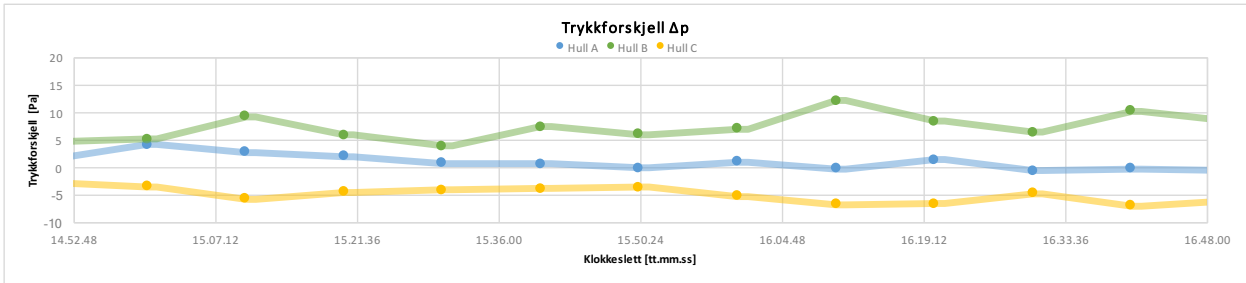
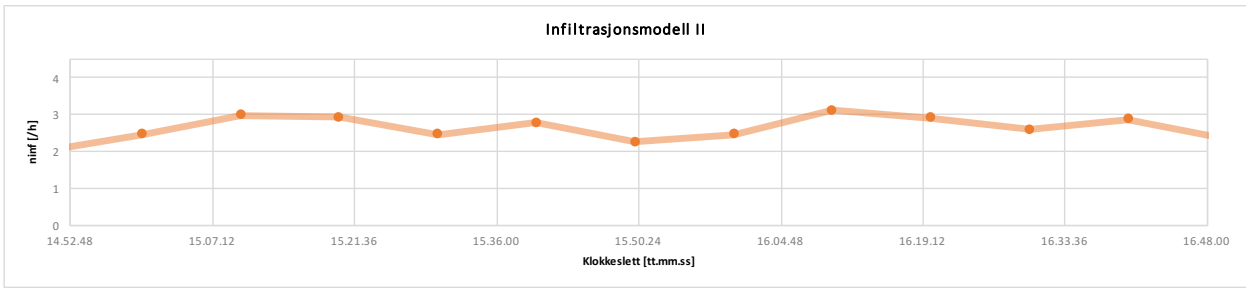
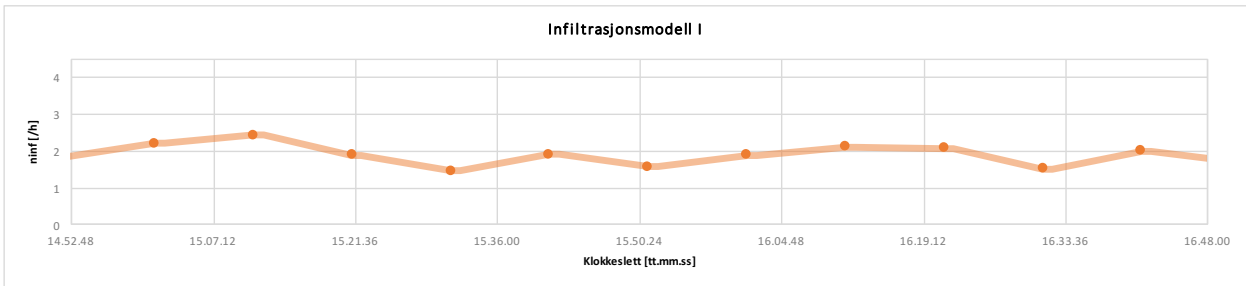
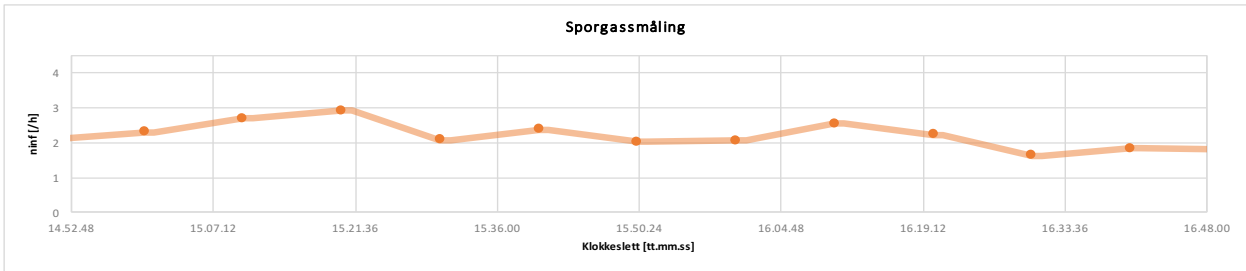
12.19 Vedlegg 19: Forsøksdag 20.3.19 Periode 1(1)



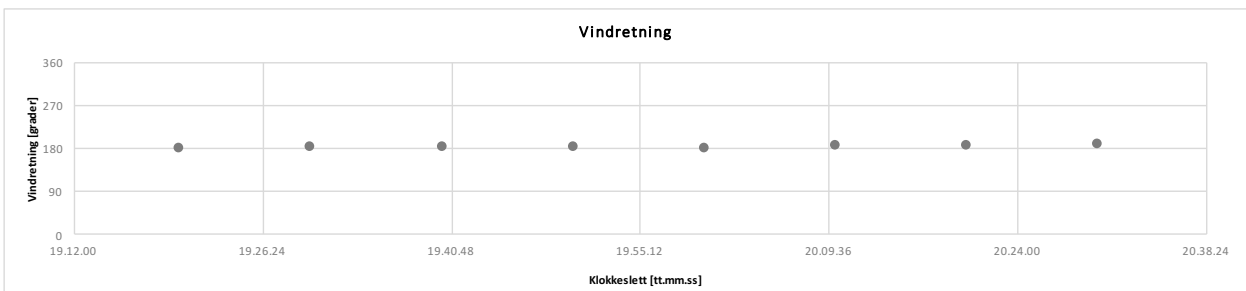
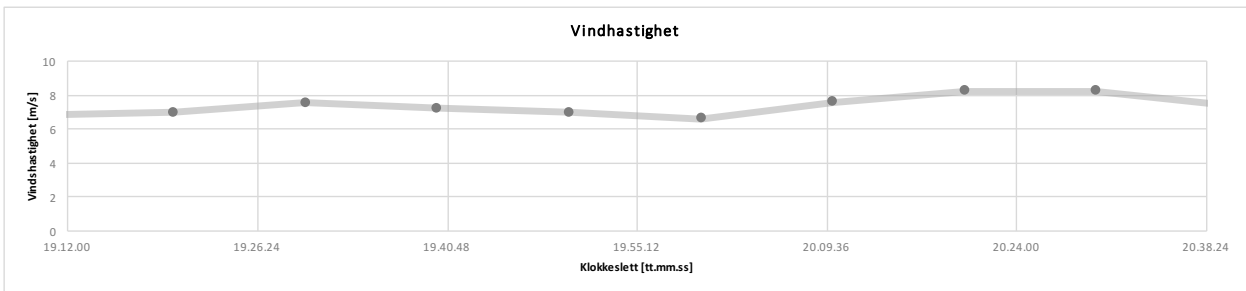
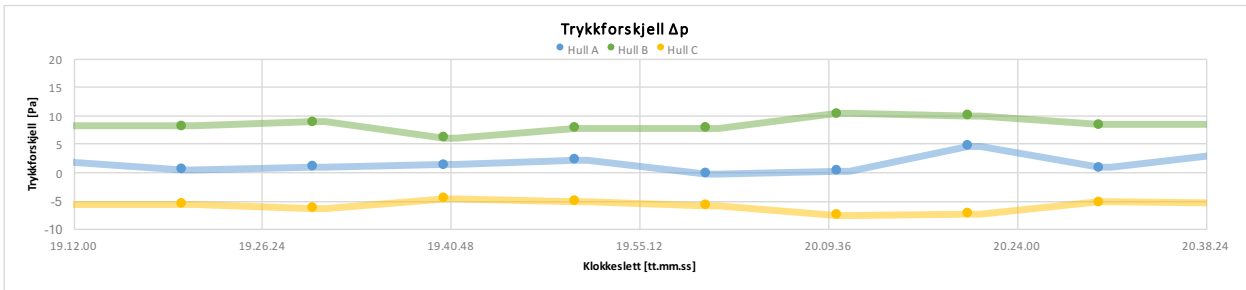
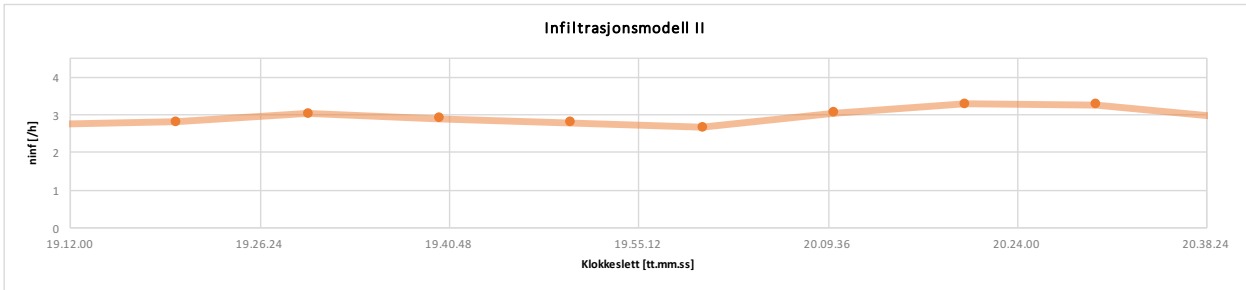
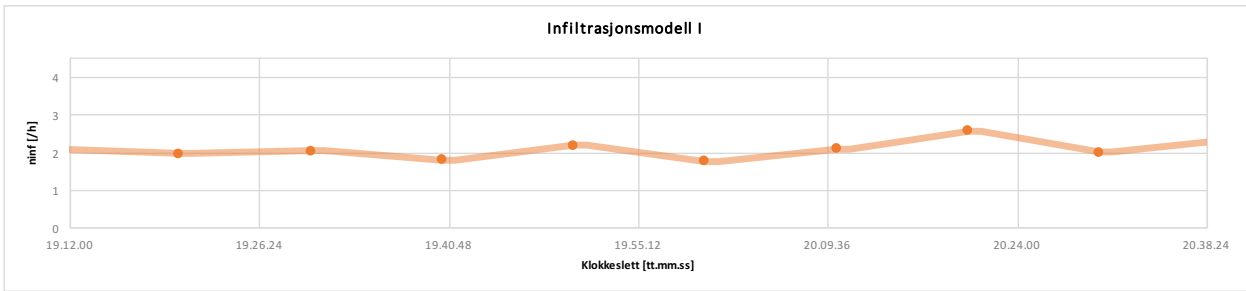
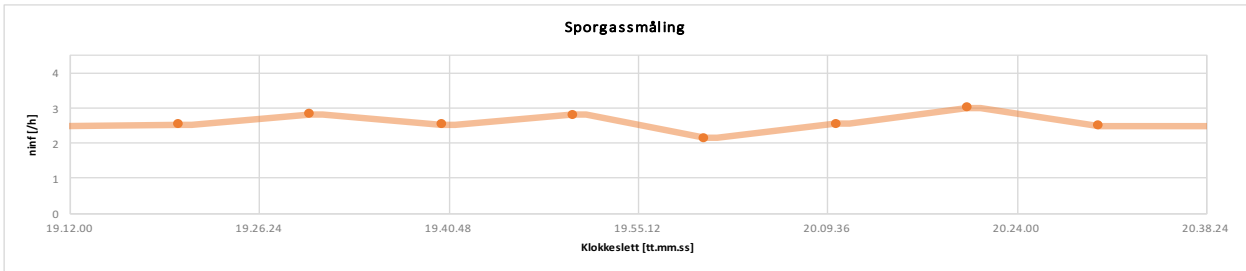
12.20 Vedlegg 20: Forsøksdag 21.3.19 Periode 1(1)



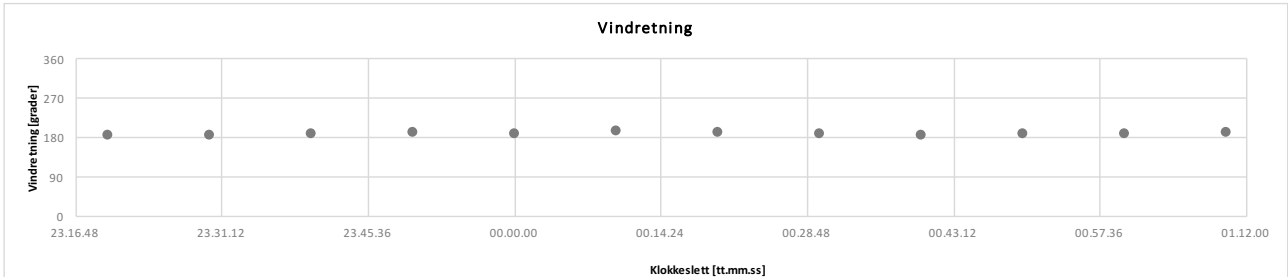
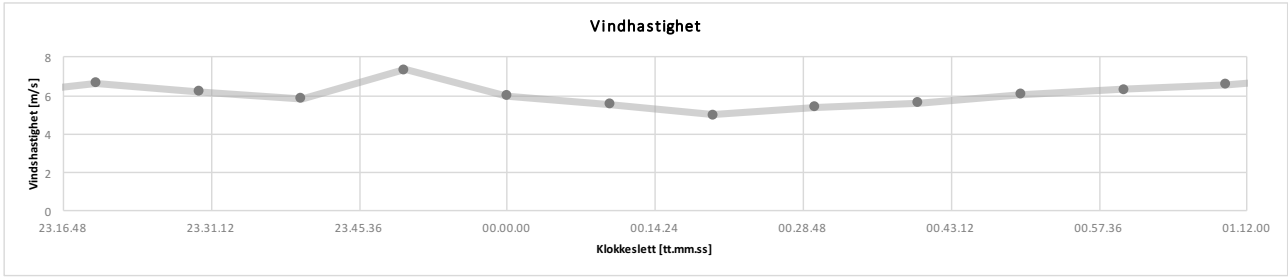
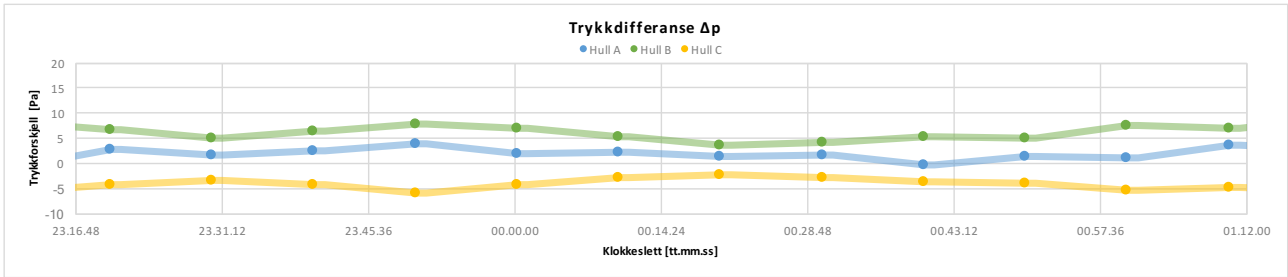
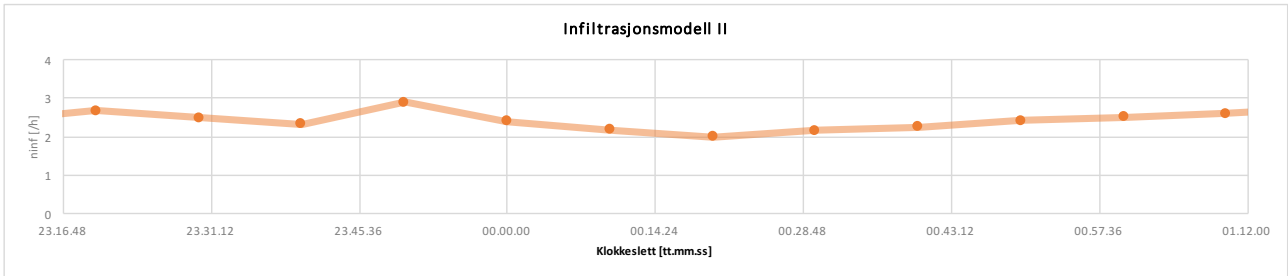
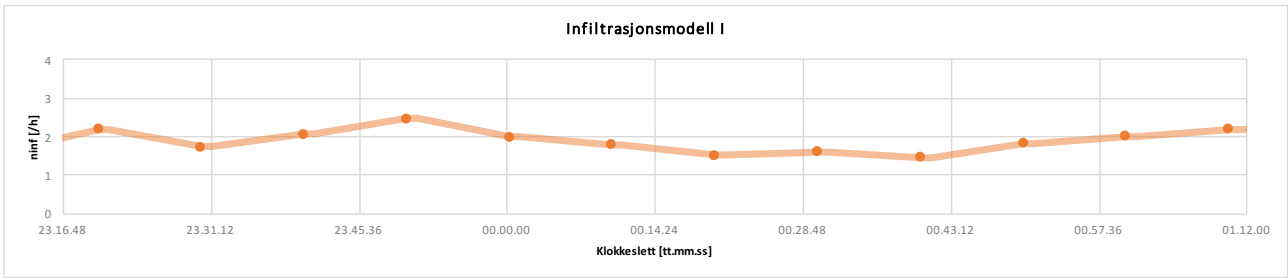
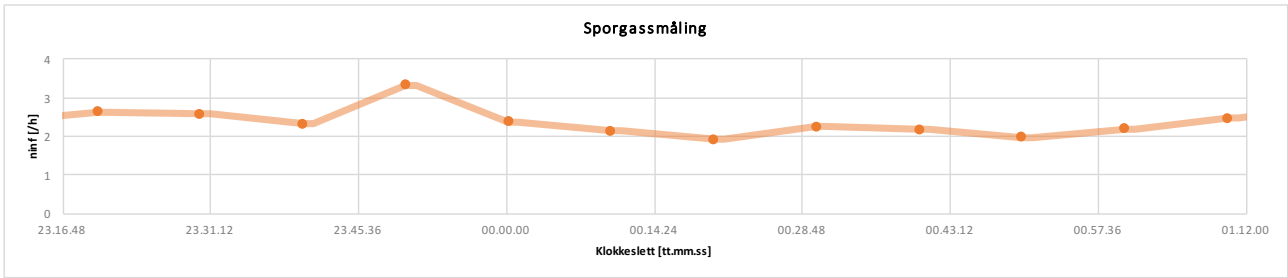
12.21 Vedlegg 21: Forsøksdag 22.3.19 Periode 1(3)



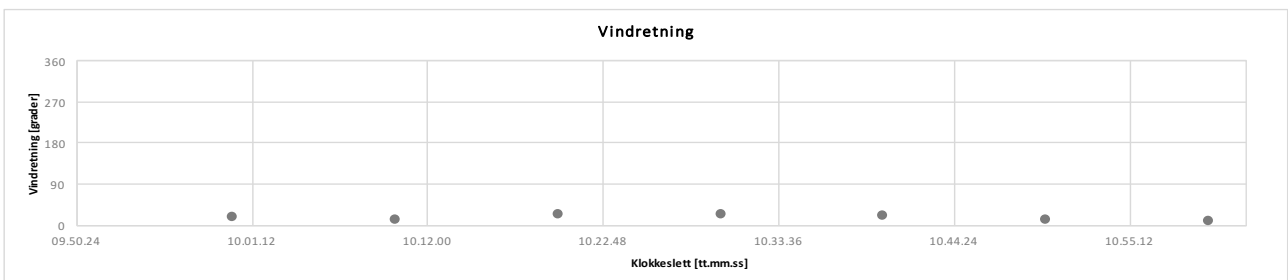
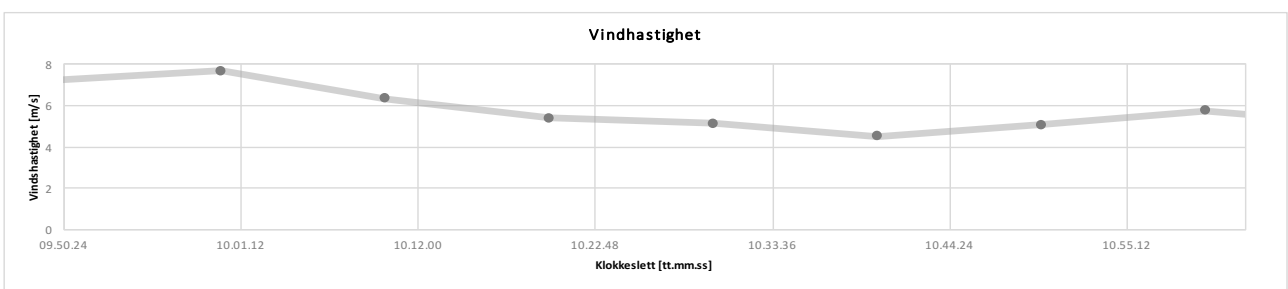
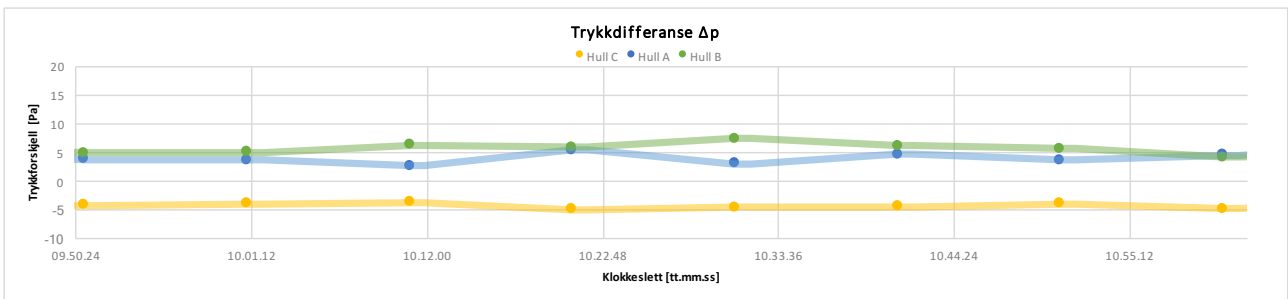
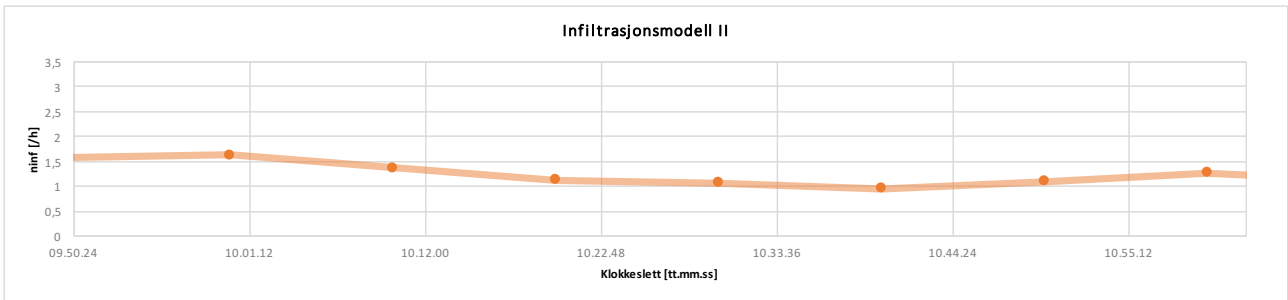
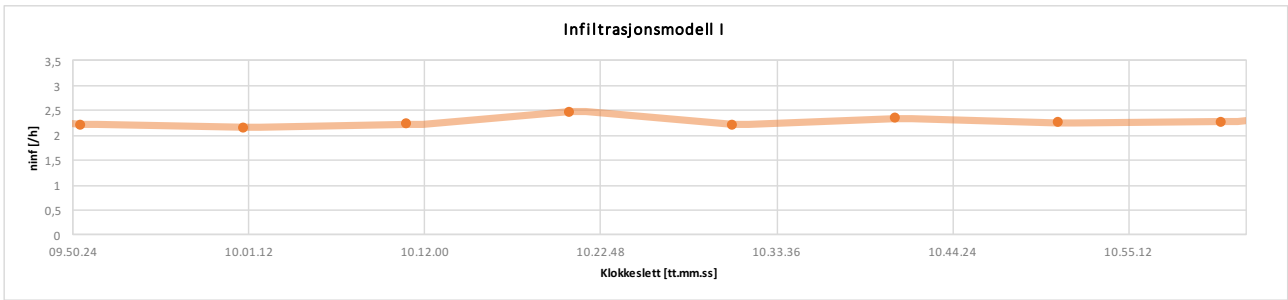
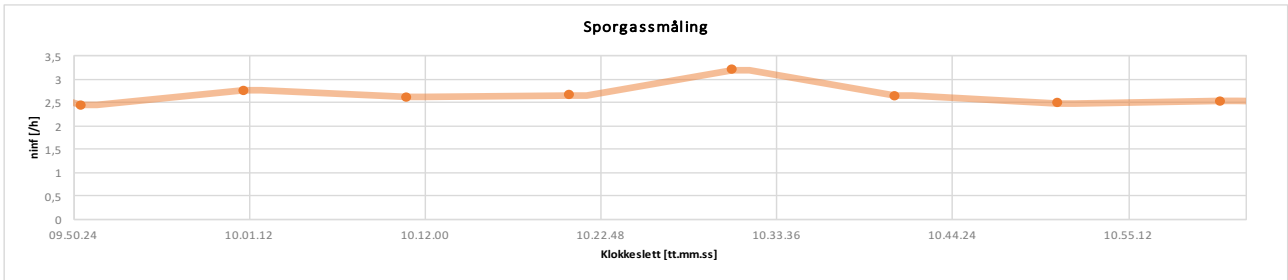
12.22 Vedlegg 22: Forsøksdag 22.3.19 Periode 2(3)



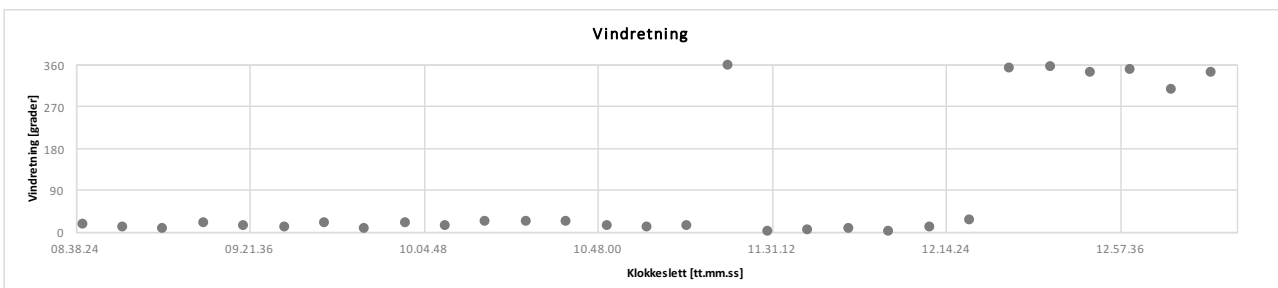
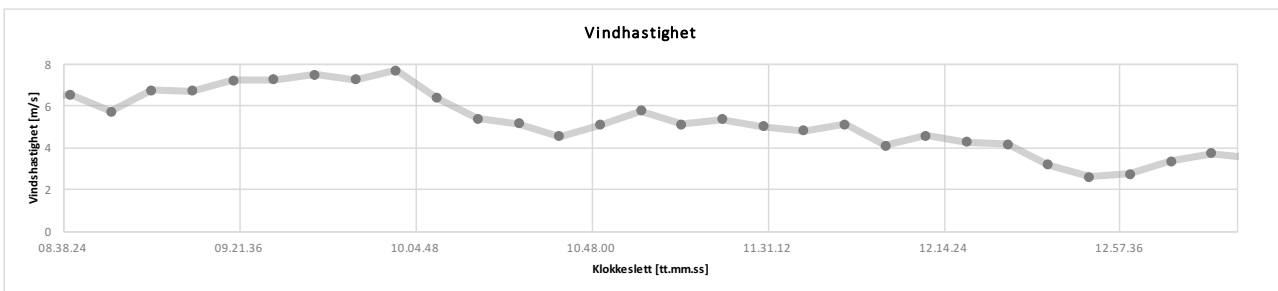
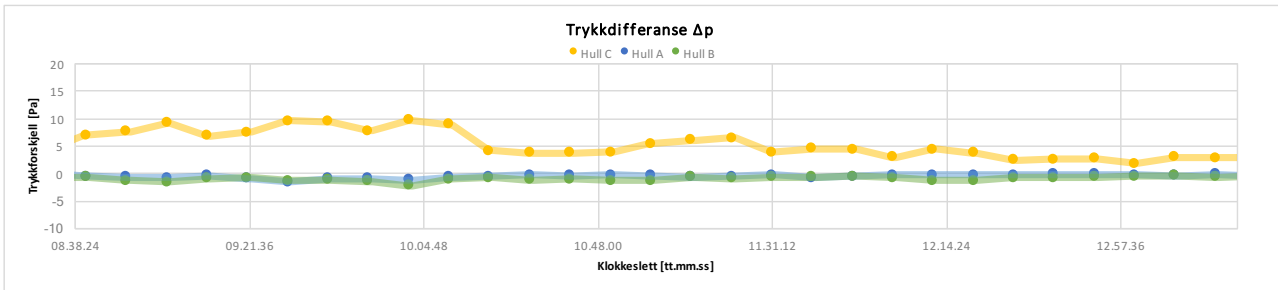
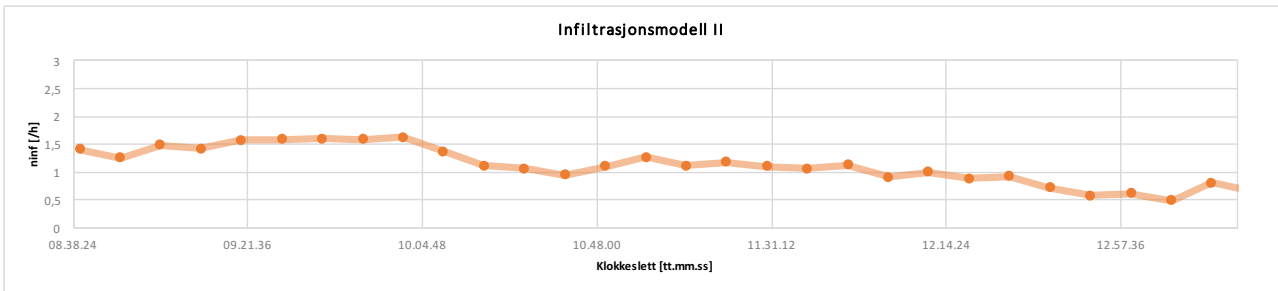
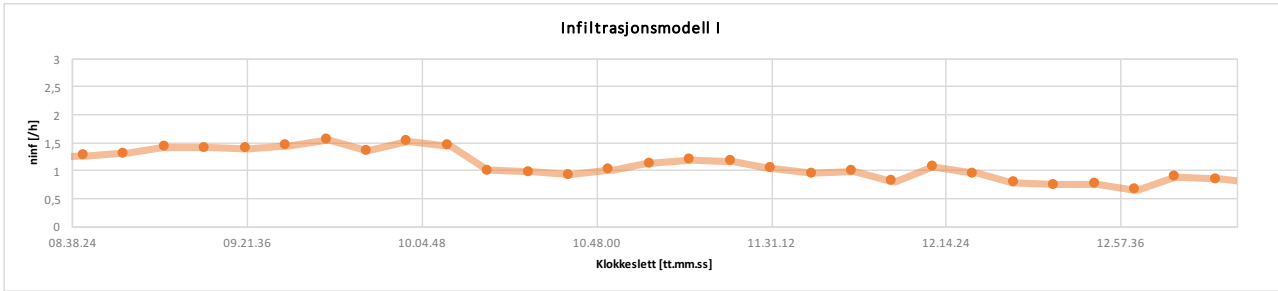
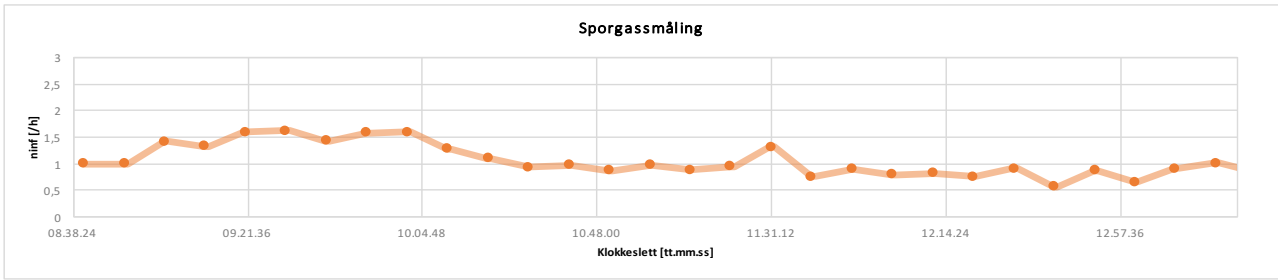
12.23 Vedlegg 23: Forsøksdag 22.3.19 Periode 3(3)



12.24 Vedlegg 24: Forsøksdag 23.3.19 Periode 1(1)



12.25 Vedlegg 25: Forsøksdag 25.3.19 Periode 1(1)



12.26 Vedlegg 26: Resultater fra sporgassmålinger, infiltrasjonsmodell I og II

Dato	Tidsintervall	ninf (sporgass) [/h]	ninf (modell1) [/h]	ninf (modell2) [/h]	vindhastighet [m/s]	vindretning [grader]
5. mars 2019	07:50 - 14:00	0,77	0,96	0,61	3,2	30,9 N
8. mars 2019	07:50 - 09:00	0,89	1,12	0,88	4,4	329,6 N
8. mars 2019	09:00 - 10:20	1,48	1,64	1,43	6,7	343,6 N
8. mars 2019	10:20 - 10:50	2,03	1,18	0,91	4,3	338,9 N
8. mars 2019	10:50 - 11:40	1,79	1,43	1,26	6,3	331,8 N
18. mars 2019	07:40 - 09:50	1,53	1,47	1,38	6,3	351,3 N
18. mars 2019	13:55 - 15:50	1,51	1,51	1,48	6,7	1,7 N
23. mars 2019	08:10 - 12:50	2,71	2,32	1,28	6,0	16,0 N
25. mars 2019	08:40 - 10:10	1,39	1,41	1,49	6,9	13,4 N
25. mars 2019	10:10 - 13:30	0,89	0,95	0,94	4,4	354,3 N
13. mars 2019	08:10 - 09:10	0,71	1,03	0,80	2,7	134,3 S
13. mars 2019	09:10 - 10:30	1,57	1,63	1,59	4,2	190,0 S
15. mars 2019	08:10 - 12:50	0,63	0,90	0,27	1,6	131,4 S
21. mars 2019	07:50 - 09:10	0,96	0,90	1,18	3,1	166,1 S
21. mars 2019	09:10 - 10:30	1,18	0,95	1,45	3,6	182,9 S
22. mars 2019	14:50 - 17:10	2,09	1,88	2,63	6,6	182,4 S
22. mars 2019	19:00 - 20:50	2,57	2,57	2,88	7,2	186,5 S
22. mars 2019	21:10 - 01:20	2,36	1,91	2,44	6,1	188,5 S
12. mars 2019	07:50 - 10:40	0,73	1,16	0,24	2,2	106,4 Ø
12. mars 2019	10:40 - 13:10	0,72	0,94	0,60	4,0	115,3 Ø
12. mars 2019	19:00 - 22:10	0,92	0,74	0,81	5,9	112,6 Ø
12. mars 2019	22:10 - 23:00	0,97	0,78	0,65	4,2	113,0 Ø
20. mars 2019	13:40 - 16:00	0,80	0,94	0,23	4,7	266,2 V
7. mars 2019	07:30 - 17:40	0,71	0,98	0,37	1,7	267,2 V
11. mars 2019	09:10 - 11:40	0,65	0,95	0,21	1,6	282,9 V
11. mars 2019	11:40 - 15:30	0,62	0,95	0,25	3,2	287,5 V



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway