



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp
Realfag og teknologi

Feltmålt varmefluks gjennom krysslimt tre

Field-measured Heat Flux through Cross Laminated
Timber

Guro Oksavik Mestad
Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Avslutningen på mange års utdanning går mot slutten. Masteroppgaven har alltid ligget som et mål der fremme og fremkalt blandede følelser av frykt, forventning og spenning. Følelser som ble innfridd. Det har vært en spennende prosess som har resultert i denne oppgaven som avslutter mastergraden innen byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) våren 2019.

Prosessten startet ganske brått i starten av januar, da jeg raskt omstilte meg fra en annen oppgave til å involvere meg i et forskningsprosjekt i samarbeid med Norsk Treteknisk Institutt. Ideen ble foreslått av veileder Tormod Aurlien, som hadde fått forespørsel fra Norsk Treteknisk Institutt om noen ville bistå dem med en masteroppgave.

I løpet av mitt nest siste år på NMBU tok jeg en rekke fag som omhandlet tre, både som materiale, konstruksjonsmessig og bygningsfysisk. Gjennom dette året, særlig i faget «Treteknologi II» (TRE300), fattet jeg interesse for tre som byggemateriale, og bestemte meg raskt for at KLT (massivtre) skulle være tema for masteroppgaven min. Når muligheten til å skrive en oppgave i samarbeid med Norsk Treteknisk Institutt bød seg, ønsket jeg å gripe anledningen til å bli bedre kjent med både bedriften, og å lære mer om tre.

Jeg ønsker å takke alle ved Norsk Treteknisk institutt for at jeg har blitt tatt godt imot. Særlig vil jeg takke Javad Darvishi for god veiledning, støtte og motivasjon i arbeidet med masteroppgaven. Jeg vil også takke Marcus Olsson for god innføring i måledataene og gode diskusjoner rundt resultatene. Takk også til Borg Havn og Storm Elektro for håndtering av målingene og hjelp til endring av måleoppsett.

Tusen takk til veileder Tormod Aurlien som introduserte meg for oppgaven og har vært til god hjelp og støtte gjennom prosessen. Til slutt vil jeg takke Mats Lindqvist og Olav Mestad for korrekturlesing av oppgaven.

Sammendrag

Tre er et hygroskopisk materiale og utveksler dermed fukt i takt med omgivelsene. Tre har også relativt høy varmekapasitet som gjør at det kan lagre varme. Materialer med en sammensatt virkning av disse to fenomenene kalles hygrotermiske materialer. Treets hygrotermiske egenskaper gjør at tre avgir varme når det adsorberer fuktighet, og krever varme fra omgivelsene når fuktigheten frigis. Forskning av både Osanyintola og Simonson (2006) og Kraniotis og Nore (2017) viser at denne egenskapen kan bidra til å redusere energibehovet i en bolig, dersom forholdene legges til rette for det.

Denne oppgaven har til hensikt å undersøke hvordan U-verdi beregnet etter NS-EN ISO 6946 samsvarer med feltmålt U-verdi av en 250mm tykk KLT-vegg, hvor det er forsøkt å ta hensyn til hygrotermiske effekter. Dette er en del av et større forskningsprosjekt hvor målet er å se på muligheten til å få endret TEK slik at fremtidige U-verdikrav tar hensyn til treets hygrotermiske egenskaper. En del av oppgaven er også å vurdere om målemetoden er egnet for å dokumentere hvor stor den hygrotermiske effekten er. Målingene er gjort på et lager- og kontorbygg i Fredrikstad ved hjelp av varmeflukssensorer. Siden disse har andre egenskaper enn treet, er det gjort målinger på begge sider av veggen for å inkludere den hygrotermiske effekten på begge sider. Målingene er utført både på en nordvendt og sørvendt vegg.

Målingene viser at varmeflukssensorene er svært sensitive for solstråling. På bakgrunn av blant annet dette, er denne oppgaven i hovedsak konsentrert rundt målinger fra vinterhalvåret på nordsiden av veggen. Resultatet viser at den feltmålte U-verdien er litt lavere enn den tradisjonelt beregnede U-verdien. Forskjellen kan delvis forklares av hygrotermisk effekt og delvis av at den reelle varmeovergangsmotstanden er lavere enn den standardiserte varmeovergangsmotstanden som er brukt i beregningene. Trolig skyldes det også en del måleusikkerheter i feltmålingene. Likevel er den målte U-verdien på $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ langt fra TEK-kravet. Det dokumenteres en hygrotermisk effekt i resultatene, men den er svært liten. Den utgjør bare mellom $0,01$ og $0,02 \text{ W/m}^2\text{K}$ avhengig av beregningsmetode. Både forutsetningene ved bygget og måleutstyret gjør at målemetoden er begrenset med tanke på å skulle dokumentere hvor mye den hygrotermiske effekten utgjør på U-verdien.

Abstract

Wood is a hygroscopic material and therefore exchanges moisture with the environment. Wood also has a relatively high heat capacity which allows it to store heat. Materials with a composite effect of these two phenomena are called hygrothermal materials. The wood's hygrothermal characteristics cause wood to emit heat when it absorbs moisture, and requires ambient heat when moisture is released. Research by both Osanyintola and Simonson (2006) and Kraniotis and Nore (2017) show that this characteristic can help to reduce the energy needed in a home, if conditions facilitate this.

This thesis is intended to study how the U-value calculated according to NS-EN ISO 6946 corresponds to the field-measured U-value of a 250mm thick CLT wall, where it has been attempted to include hygrothermal effects. This is part of a larger research project where the main task is to look at the possibility of having TEK changed, so that future guidelines of U-value take into account the tree's hygrothermal characteristics. A part of this thesis is also to assess whether this method is suitable for documenting how large the hygrothermal effect is. The measurements have been made on a warehouse and office building in Fredrikstad using heat flux sensors. Since these have different characteristics from tree, measurements have been made on both sides of the wall to include the hygrothermal effect on both sides. The measurements were done on both a north-facing and south-facing wall.

The measurements show that the heat flux sensors are very sensitive to solar radiation. This in mind, among other things, this thesis is mainly concentrated around measurements from the winter season on the north side of the wall. The result shows that the field-measured U-value is slightly lower than the traditionally calculated U-value. The difference can be partly explained by the hygrothermal effect, and partly by the fact that the real heat transfer resistance is lower than the standardized heat transfer resistance used in the calculations. There are also some uncertainties on whether the field measurements are reliable or not. Nevertheless, the measured U-value of $0.37 \text{ W / m}^2\text{K}$ is far off the TEK requirement. A hygrothermal effect is documented in the results, but it is very small. It only constitutes between 0.01 and $0.02 \text{ W / m}^2\text{K}$ depending on the calculation method. Both the prerequisites for the building and the measuring equipment makes the measurement method is limited in order to document how much the hygrothermal effect constitutes on the U-value.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Innholdsfortegnelse	VII
Figurliste.....	IX
Tabelliste	XIII
Figurer i Vedlegg	XV
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Formål.....	2
1.3 Problemstilling.....	2
1.4 Muligheter og begrensninger	2
2 Teori	5
2.1 Generelt om tre	5
2.1.1 Tre som byggemateriale	5
2.1.2 Treets oppbygning.....	6
2.1.3 KL-tre	7
2.2 Fukt.....	9
2.2.1 Fukt i materialer	9
2.2.2 Hygrotermisk masse	11
2.2.3 Variasjoner i luftfuktighet	12
2.3 Varme	13
2.3.1 Latent varme.....	13
2.3.2 Varmetransport.....	14
2.4 Varmemotstand og varmegjennomgang	15
2.5 Programmeringsverktøyet Python	17
3 Metode.....	19
3.1 ISO 9869 - Metodegjennomgang med beskrivelse av måleutstyr	19
3.1.1 Måleutstyr og kalibrering	19
3.1.2 Retningslinjer for installasjon av måleutstyr.....	21
3.1.3 Beregning av varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient	22
3.2 Beskrivelse av måleoppsettet.....	23
3.3 Avvik fra ISO 9869	26
3.4 Presentasjon av inndata fra Borg Havn	28
3.5 Endringer i måleoppsett	30
3.6 Klimadata.....	31

3.7	Tidsserieanalyse og viktige statistiske begreper.....	32
3.8	Analyse i Python.....	35
3.8.1	Hvorfor bruke Python.....	35
3.8.2	Benyttede kodebiblioteker.....	35
3.8.3	Arbeidsprosessen.....	36
4	Resultat.....	39
4.1	Håndberegning av U-verdi beregnet etter NS-EN ISO 6946	39
4.2	Presentasjon av klimadata	40
4.3	Presentasjon av data for hele året	41
4.4	Varmefluks for utvalgt periode.....	42
4.5	U-verdi for utvalgt periode	44
4.6	Akkumulert U-verdi, beregnet i henhold til gjennomsnittsmetoden i ISO 9869.....	45
5	Diskusjon.....	47
5.1	Datautvalg.....	47
5.1.1	Valg av måleperiode.....	47
5.1.2	Valg av måleoppsett	49
5.1.3	Behandling av dataene	51
5.2	Sammenligning av tradisjonell U-verdiberegning og feltmålt U-verdi.....	52
5.3	Beregning av reell U-verdi og hygrotermisk effekt.....	54
5.4	Påvirkning av hygrotermisk effekt på varmegjennomgangsmotstanden.....	56
5.5	Vurdering av målemetoden	59
5.5.1	Påvirkning fra vær og vind.....	59
5.5.2	Betydningen av termisk treghet.....	63
5.5.3	Alternative målemetoder	65
5.5.4	Feilkilder	66
6	Konklusjon	69
6.1	Videre arbeid	70
7	Referanser.....	73
	Vedlegg	XVII
	Vedlegg A Bilder av måleoppsettene.....	XVII
	Vedlegg B Kolonnenavn.....	XX
	Vedlegg C Værdata.....	XXIII
	Vedlegg D Værdata sammenlignet med temperatur, fluks og U-verdi.....	XXVI
	Vedlegg E Rådata for utvalgt periode	XXX
	Vedlegg F Ekstremverdier sommer vs. vinter.....	XXXIII
	Vedlegg G Kontroller.....	XXXIII
	Vedlegg H Pythonskript.....	XXXVI

Figurliste

Figur 2-1 Materialretningene til tre. Verdiene angir maksimal krymping fra vått til tørt virke (SINTEF Byggforsk, 2015).....	6
Figur 2-2 Skjematisk oppbygging av fiberstrukturen i trevirke (SINTEF Byggforsk, 2015)....	7
Figur 2-3 Oppbyggingen av et krysslågt, limt KLT-element (Edwardsen & Ramstad, 2015)..	8
Figur 2-4 Vannmolekyler adsorptivt bundet til fast stoff (Geving & Thue, 2002).....	10
Figur 2-5 Kapillærkondensasjon i en pore og menisker (Geving & Thue, 2002).....	10
Figur 2-6 Fuktopptak i porøse materialer i bygninger. Til venstre vises en sorpsjonskurve som er utvidet i det kapillære området. Til høyde vises en poremodell for hvordan vannet bindes inne i materialet (SINTEF Byggforsk, 2018b).....	11
Figur 2-7 Eksempler på månedsnormaler for vanndampinnhold (I) og RF (II) i uteluften over året for Oslo, Lillehammer og Bergen (SINTEF Byggforsk, 2018b).	13
Figur 2-8 Varmeovergang ved overflater (SINTEF Byggforsk, 2018a)	16
Figur 3-1 HFP01 varmeslukssensor. Motsatt side har blått deksel (Hukseflux Thermal Sensors B. V., 2016).....	19
Figur 3-2 Det generelle arbeidsprinsippet for varmekullingssensoren. 1 og 2: de to legeringsmetallene i et termoelement, 3: sensorplaten, 4 og 5: varm og kald side på sensoren, 6: varmekull (Hukseflux Thermal Sensors B. V., 2016).....	20
Figur 3-3 Fasade mot nord og glassfasade mot vest på kontordel i KLT hvor de fleste av målingene ble gjennomført. Til høyre i bildet er deler av lagerbygget. Bildet er tatt før montering av måleutstyr.....	23
Figur 3-4 Plassering av måleoppsettene. I bakgrunnen vises plantegningen for 1. etasje av hele bygget. De uthevede røde boksene viser en mer detaljert plassering merket A til C.....	24
Figur 3-5 Snitt av måleoppsettet med plassering av plastfolie og varmekullssensorer.	25
Figur 3-6 Ferdig montert måleoppsett ved plassering A. Bildet til venstre viser montering på innsiden og bildet til høyre viser montering på utsiden. Sensorene på innsiden sitter i en høyde slik at de måler mellom og under sensorene på utsiden. Foto: Marcus Olsson, mars 2018....	26
Figur 3-7 Vindusfasade mot vest. Innsiden av måleoppsett A er merket med rød ring. Foto: Guro Oksavik Mestad, mars 2019	27
Figur 3-8 Temperatursensorer som er i kontakt med veggen. Til venstre ved måleoppsett A og til høyre ved måleoppsett B, begge på utsiden. Foto: Marcus Olsson, mars 2018	28
Figur 3-9: Illustrasjon av plassbytte på varmekullssensorer	30
Figur 3-10 Måleoppsett A etter endinger. Foto: Storm Elektro, mars 2019	31

Figur 3-11 Definisjon av fargekodet vindretning.....	31
Figur 3-12 Plasseringen til værstasjonene Rygge og Strømtangen er merket med blå punkt og markert avstand til Borg Havn som er markert med rødt punkt. Kartet er hentet fra og redigert i norgeskart.no.	32
Figur 3-13 BoksploTT	33
Figur 4-1 Temperaturtrender for måleoppsett A (Nordvegg). Rød og blå linje representerer innetemperaturer, oransje og turkis linje representerer utetemperaturer og svart og grå linje representerer ΔT for henholdsvis tre- og plastoverflate.	40
Figur 4-2 Relativ luftfuktighet ved måleoppsett A (Nordvegg).....	40
Figur 4-3 Trend i varmekraft for måleoppsett A (nord). Rød og blå linje representerer varmekraftsverdiene målt fra innsiden, mens oransje og turkis linje representerer varmekraftsverdier målt fra utsiden målt mot henholdsvis tre og plastfilm.....	41
Figur 4-4 Trend i U-verdi ved måleoppsett A (nord). Blå og rød graf viser henholdsvis til sensorene som måler mot tre og plastfilm. Heltrukken linje viser U-verdier målt fra innsiden av vegg og stiplet linje viser U-verdier målt fra utsiden.	41
Figur 4-5 Trend i varmekraft og ΔT for måleoppsett A (Nordvegg).....	43
Figur 4-6 Døgnvariasjoner i varmekraft og ΔT for måleoppsett A (Nordvegg).....	43
Figur 4-7 Trend i U-verdi ved måleoppsett A (Nordvegg). De horisontale linjene viser gjennomsnittsverdier for perioden.	44
Figur 4-8 Døgnvariasjoner i U-verdi ved måleoppsett A (Nordvegg).	44
Figur 4-9 Akkumulert U-verdi for måleoppsett A (nordvegg) over hele året. De asymptotiske U-verdiene er gitt i Tabell 4-6.....	45
Figur 4-10 Akkumulert U-verdi for måleoppsett A (nordvegg) over den utvalgte perioden. De asymptotiske U-verdiene er gitt i Tabell 4-6.....	45
Figur 5-1 Viser fordelingen av ΔT og varmekraft for måleoppsett A (nordvegg) målt over både plastfolie og treoverflate. Sommerfordelingen inkluderer månedene juni, juli og august (2018), mens vinterfordelingen inkluderer desember (2018), januar og februar (2019).	47
Figur 5-2 BoksploTT av ΔT for måleoppsett A (1006) og B (1010), målt over både plastfolie og treoverflate for desember (2018) og januar (2019). De svarte prikkene representerer data. Områder hvor det er helt svart betyr stor datatetthet.....	49
Figur 5-3 BoksploTT av varmekraft for måleoppsett A (1006) og B (1010), målt både inne og ute på plast- og treoverflate for desember (2018) og januar (2019).....	50
Figur 5-4 Sammenligning av ulike intervaller av moving average for U-verdier ved måleoppsett A (nord).....	52

Figur 5-5 Sammenligning av akkumulert U-verdi for den utvalgte perioden og hele året sammen med håndberegnet U-verdi.....	53
Figur 5-6 Hygrotermisk effekt på utsiden og innsiden plottet sammen med relativ luftfuktighet (RH) ute og inne.....	57
Figur 5-7 Temperatur og varmekraft ved måleoppsett A sammenlignet med grad av skydekke for desember (2018). Værdata er hentet fra meteorologiske institutt fra værstasjon Rygge, Østfold.....	59
Figur 5-8 Temperatur og varmekraft ved måleoppsett A sammenlignet med grad av skydekke for januar (2019). Værdata er hentet fra meteorologiske institutt fra værstasjon Rygge, Østfold.....	60
Figur 5-9 Innsiden av måleoppsett A. Den øverste sensoren måler mot tre og den nederste mot plastfilm på utsiden.	61
Figur 5-10 U-verdi sammenlignet med vindhastighet og -retning for måleoppsett A (nord) for desember 2018. Forklaring av vindretningene er gitt i Kap. 3.6.....	62
Figur 5-11 Standardavvik for U-verdiene målt ved måleoppsett A.	65

Tabelliste

Tabell 2-1 Relevante egenskaper til KLT-elementer (SINTEF Byggforsk, 2018b).	8
Tabell 2-2 Varmeovergangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946 (SINTEF Byggforsk, 2018a).	16
Tabell 2-3 Minimumskrav til energieffektivitet for alle bygninger, unntatt boligbygning og fritidsbolig med laftede yttervegger (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).	17
Tabell 3-1 Sensitiviteten til de ulike varmeflukssensorene ved måleoppsett A (1006) og B (1010).	20
Tabell 3-2 Himmелretning og oppbygning av veggen det måles på ved plassering A-C.....	24
Tabell 3-3 Kolonnenavn i analyse med tilhørende forklaring og navn i grafer/figurer.	28
Tabell 4-1 Forklaring av forkortelser benyttet i korrelasjonstabellene	42
Tabell 4-2 Korrelasjonskoeffisienter for trendene i varmefluks og ΔT . Forkortelsene er forklart i Tabell 4-1.	43
Tabell 4-3 Korrelasjonskoeffisienter for døgnvariasjonene i varmefluks og ΔT . Forkortelsene er forklart i Tabell 4-1	43
Tabell 4-4 Korrelasjonskoeffisienter for trendene i U-verdi. Forkortelsene er forklart i Tabell 4-1.....	44
Tabell 4-5 Korrelasjonskoeffisienter for døgnvariasjonene i U-verdi. Forkortelsene er forklart i Tabell 4-1	44
Tabell 4-6 Presentasjon av gjennomsnittlig U-verdi og akkumulert U-verdi ved slutten av utvalgt periode og ved slutten av året. Differansen mellom U-verdi målt mot plastfilm og tre er også beregnet. Det indikerer den gjennomsnittlige hygrottermiske effekten for perioden. U-verdi er gitt i W/m^2K	46
Tabell 5-1 U-verdi og hygrottermisk effekt beregnet etter tilnærming 1.....	55
Tabell 5-2 U-verdi og hygrottermisk effekt beregnet etter tilnærming 2.....	56

Figurer i Vedlegg

Vedlegg A-1 Utsiden av måleoppsett A (nordvendt).....	XVII
Vedlegg A-2 Innsiden av måleoppsett A	XVII
Vedlegg A-3 Utsiden av måleoppsett B (sørvendt)	XVIII
Vedlegg A-4 Innsiden av måleoppsett B.....	XVIII
Vedlegg A-5 Innsiden av måleoppsett C.....	XIX
Vedlegg A-6 Fasaden til bygget, tydelig påvirket av regn rundt vinduene.....	XIX
Vedlegg C-1 Skydekkeobservasjoner. Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Rygge, Østfold.	XXIII
Vedlegg C-2 Vindhastighet og -retning. Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.	XXIV
Vedlegg C-3 Nedbørsmengde. Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.....	XXV
Vedlegg D-1 Temperatur og varmekraft ved måleoppsett B sammenlignet med grad av skydekke for desember (2018). Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Rygge, Østfold.....	XXVI
Vedlegg D-2 Temperatur og varmekraft ved måleoppsett B sammenlignet med grad av skydekke for januar (2019). Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Rygge, Østfold.	XXVII
Vedlegg D-3 U-verdi ved måleoppsett B sammenlignet med vindhastighet og -retning, desember (2018). Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.	XXVIII
Vedlegg D-4 U-verdi ved måleoppsett B sammenlignet med vindhastighet og -retning, januar (2019). Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.	XXVIII
Vedlegg D-5 U-verdi ved måleoppsett B sammenlignet med nedbørsmengde, desember (2018). Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.	XXIX
Vedlegg D-6 U-verdi ved måleoppsett B sammenlignet med nedbørsmengde, januar (2019). Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.....	XXIX
Vedlegg E-1 Rådata av temperaturer ved måleoppsett A for utvalgt periode.....	XXX
Vedlegg E-2 Rådata av relativ luftfuktighet ved måleoppsett A for utvalgt periode.....	XXX
Vedlegg E-3 Rådata av varmekraft ved måleoppsett A for utvalgt periode.....	XXX
Vedlegg E-4 Rådata av U-verdi ved måleoppsett A for utvalgt periode.....	XXXI
Vedlegg E-5 Rådata av temperaturer ved måleoppsett B for utvalgt periode.....	XXXI

Vedlegg E-6 Rådata av luftfuktighet ved måleoppsett B for utvalgt periode.	XXXI
Vedlegg E-7 Rådata av varmeksluks ved måleoppsett B for utvalgt periode.	XXXII
Vedlegg E-8 Rådata av U-verdi ved måleoppsett B for utvalgt periode.	XXXII
Vedlegg F-1 Boksploft av varmeksluks for sommermånedene (juni, juli og august) og vintermånedene (desember, januar, februar)	XXXIII
Vedlegg G-1 Kontroll av varmeksluks fra rådatafilene.	XXXIV
Vedlegg G-2 Kontroll av beregnet varmeksluks.	XXXIV
Vedlegg G-3 Varmeksluks ved måleoppsett A før og etter plassbytte av varmeksluksensorene.	XXXV
Vedlegg G-4 Varmeksluks ved måleoppsett B. Det ble ikke gjennomført plassbytte av varmeksluksensorene her.	XXXV

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Fokus på miljø og bygging i KLT (massivtre) har eksplodert de siste årene. Å bygge i KLT bidrar miljømessig til å forlenge CO₂-syklusen slik at mer CO₂ fjernes fra atmosfæren og krever mindre energi i bearbeidingsprosessen enn andre byggematerialer. Tre i innemiljøet kan bidra til å redusere stressnivået. Det har også en dokumentert evne til å dempe temperatur- og fuktendringer slik at det kan ha en energisparende effekt dersom det utnyttes riktig (Nyrud & Bringslimark, 2012).

Samspeillet mellom treets varmekapasitet og fuktkapasitet kalles hygrottermisk effekt. Nyere forskning, blant annet av Kraniotis og Nore (2017), viser ved hjelp av hygrottermisk simuleringstøytøy at denne effekten potensielt kan bidra til å spare oppvarmingsenergi og redusere varmetapet gjennom et bygningselement av hygroskopisk materiale. Annen relevant forskning som bør nevnes er Osanyintola og Simonson (2006) som har undersøkt fuktbufningskapasiteten til hygroskopiske bygningmaterialer og effekten det kan ha på energiforbruk. Hameurys doktorgrad (2006) er også interessant i denne sammenhengen da den tar for seg blant annet fukt- og varmelagringskapasiteten til tunge trekonstruksjoner.

Borg Havn IKS er et moderne interkommunalt havneselskap som er opptatt av å ta vare på miljøet og være i forkant innen nye energiløsninger i havneområdet. De har oppført et lager- og kontorbygg i Fredrikstad, tegnet av BAS arkitekter. Bygget stod ferdig i 2016, og brukes i dag av transportselskapet Nor-Lines. To av veggene i kontordelen består av 250mm rent KLT. Veggene oppfyller ikke kravet til U-verdi gitt i TEK10, men det har i henhold til plan- og bygningsloven §19-2 blitt gitt midlertidig dispensasjon. Norsk Treteknisk Institutt har, i samarbeid med iTRE AS og Borg havn, gjort U-verdimålinger på KLT-veggene. Dette er en del av et større forskningsprosjekt for å utrede den reelle effektive U-verdien til veggene med tanke på å inkludere hygrottermisk effekt. Det overordnede målet i forskningsprosjektet er å se på muligheten for å få endret TEK slik at fremtidige U-verdikrav tar hensyn til de hygrottermiske egenskapene til KLT

Beslutningene med tanke på målemetode, oppsett og plassering for feltmålingene, ble tatt før denne oppgaven ble påbegynt. Påvirkningsmulighetene har derfor vært små, noe som har gjort at arbeidet i denne oppgaven har måttet tilpasse seg valgene som allerede var tatt på best

mulig måte. I Kap.5.5.3 blir det kort diskutert alternative målemetoder og endringer på det opprinnelige måleoppsettet som kanskje kunne forbedret resultatet.

1.2 Formål

Formålet med denne oppgaven er å bistå i analyse av data fra feltmålingene ved Borg Havn som en uavhengig part, for å evaluere resultatene og trekke egne slutninger. Datamengdene er så store at det har vært utfordringer knyttet til å bruke Microsoft Excel til behandling og analyse av data. Arbeidet med fremstilling av resultatet til denne oppgaven har derfor foregått i Python. Det har også vært utfordringer knyttet til feilkilder med tanke på å gjøre målinger på utsiden av bygget, særlig med tanke på vær. Et av fokusområdene i oppgaven vil derfor være å evaluere gyldigheten til målemetoden.

1.3 Problemstilling

På bakgrunn av det overordnede målet i forskningsprosjektet som denne oppgaven er et bidrag til, ønskes det å besvare følgende spørsmål:

- Hvordan er sammenhengen mellom tradisjonell U-verdiberegning og feltmålt U-verdi hvor man prøver å ta hensyn til hygrotermiske effekter?
- Er det mulig å dokumentere hvor stor påvirkning den hygrotermiske effekten har på varmeisoleringsegenskapene til KLT elementer?
- Hvordan er denne målemetoden egnet for å dokumentere hvor stor den hygrotermiske effekten er?

1.4 Muligheter og begrensninger

Med de datamengdene som er logget ved Borg Havn, er det veldig store muligheter for hva som kan undersøkes og analyseres. 12 varmekullsensorer og 6 par med temperatursensorer som logger data en gang i minuttet, og er plassert både på innsiden og utsiden av tre ulike vegger med ulike betingelser, gir mange ulike resultater, og mulighet for sammenligninger. Det finnes også store mengder data på energibruken i bygget som kan benyttes til sammenligninger med energikrav i forskriftene. Simuleringsprogrammer kan nyttes til for eksempel å gjøre energiberegninger eller sammenligne energibesparelsen for de ulike resultatene.

Det finnes også en rekke begrensninger som må tas hensyn til. For det første er dette en avsluttende masteroppgave som er avgrenset både i tid og omfang. Det vil derfor være

nødvendig å ta valg underveis for å avgrense oppgaven. I tillegg finnes det en rekke begrensninger knyttet til utstyret som benyttes. Varmefluksmålerne er lite utprøvd til å gjøre målinger på utsiden av bygg, og mye indikerer at målingene blir påvirket av vær og andre ytre forhold. Dette vil derfor sette begrensinger for hvilke data oppgaven konsentrerer seg om for å få et mest mulig riktig resultat.

2 Teori

2.1 Generelt om tre

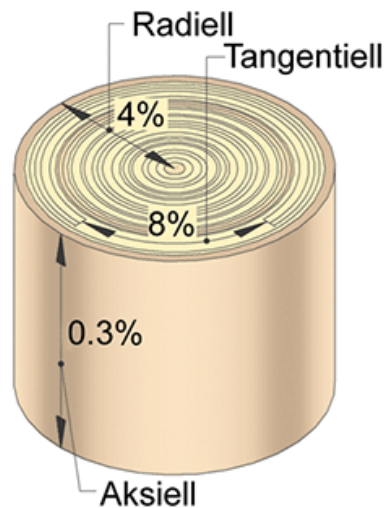
2.1.1 Tre som byggemateriale

Tre er et levende og fornybart naturmateriale som også er bærekraftig ved riktig anvendelse. I tillegg har det mange gode egenskaper som byggemateriale. Hovedårsakene til at tre historisk sett har vært det viktigste konstruksjonsmaterialet i Norge, er lokal tilgang på råstoffet og enkel produksjon. I tillegg har tre en pen overflate, det er lett å bearbeide og sammenføre, og det har stor styrke i forhold til vekt. Ikke minst er det lettere å unngå problemer med kuldebroer i trekonstruksjoner på grunn av treets relativt gode varmeisolerende egenskaper (Edwardsen & Ramstad, 2015).

Miljømessig er tre overlegent i forhold til andre byggematerialer. Treets vekst er en naturlig del av karbonsyklusen. Når tre vokser, blir CO₂ omdannet til biomasse gjennom fotosyntesen. Etter endt levetid vil CO₂ gå tilbake til karbonsyklusen. Ved at man bygger trekonstruksjoner, lagres CO₂ i bygningene samtidig som man gir rom for tilvekst av nye trær som binder mer CO₂. Til sammen vil dette forlenge karbonsyklusen og bidra til at CO₂ fjernes fra atmosfæren. I tillegg til dette kreves lite energi til produksjon og transport av trematerialene i forhold til andre materialer (Svanæs, 2004).

En av utfordringene med tre er at det påvirkes av blant annet fukt. Variasjoner i fuktighet kan bidra til variasjoner i treets dimensjoner og styrkeegenskaper. For høy fuktpåvirkning kan føre til muggvekst og etter hvert råde som bryter ned materialet. Fukt kan likevel ha positive bygningfysiske egenskaper knyttet til at det er et hygroskopisk materiale. Dette omtales nærmere i Kap.2.2. (Edwardsen & Ramstad, 2015).

Tre er et inhomogent og anisotrop materiale. Det betyr at treet har ulike egenskaper i ulike retninger. Som en tilnærming kan tre betraktes som et ortotropisk materiale med tre materialretninger. Det skilles mellom lengde-, radiell- og tangentiell retning, som vist på Figur 2-1 (Kollmann & Côté Jr., 1968).

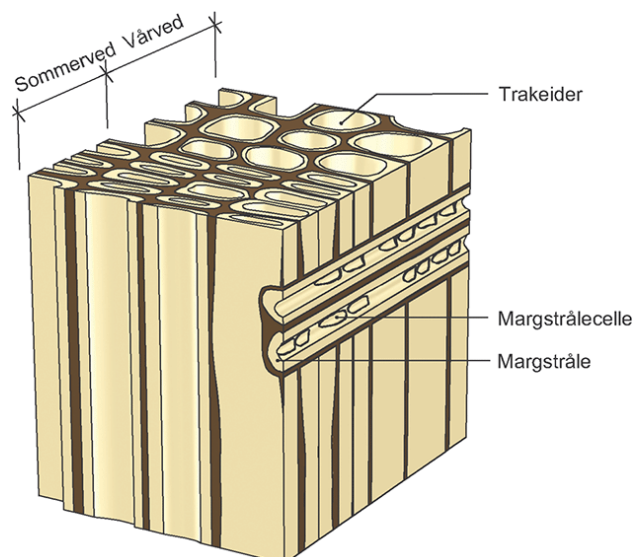


Figur 2-1 Materialretningene til tre. Verdiene angir maksimal krymping fra vått til tørt virke (SINTEF Byggforsk, 2015).

2.1.2 Treets oppbygning

Man skiller mellom to hovedgrupper trær; bartrær og løvtrær. Ifølge Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO, 2017) er 65% av det produktive skogarealet i Norge bartredominert. Av den bartredominerte skogen består om lag 2/3 av gran. Gran er dominerende til konstruksjonsformål, og de fleste KLT-produsenter benytter gran i produksjon av KLT-elementer, med muligheter for bytte ut ytterste lag med en annen tresort (Aarstad, Glasø, & Bunkholt, 2008). All videre teori om tre vil derfor være knyttet til grantré.

Som andre typer bartre er gran bygget opp av langstrakte celler til en fiberstruktur. Cellene parallelt med treets lengderetning kalles trakeider og utgjør den største delen av vedmassen. Trakeidene er døde celler og kan sammenlignes med en bunt sugerør med rektangulær form som vist på Figur 2-2. I lengderetningen finnes også levede celler, kalt parenkymceller. Disse er kortere, produserer harpiks og ligger i hovedsak rundt harpikskanelene. Noen celler går på tvers av trestammen, altså i radiell retning. Disse kalles margstrålerceller, er vist på Figur 2-2 og består av tverrgående parenkymceller og trakeidale celler. Mellom cellene finnes porer som muliggjør væsketransport og transport av næringsstoffer. Det deles inn i tre ulike typer porer avhengig av hvilke celler de danner forbindelse til. Mellom trakeidene er det linseporer, mellom parenkymceller finnes enkle porer, og forbindelsen mellom en parenkymcelle og en trakeide kalles halvlinsepore (Edwardsen & Ramstad, 2015; Kilde, 2011; Kollmann & Côté Jr., 1968).

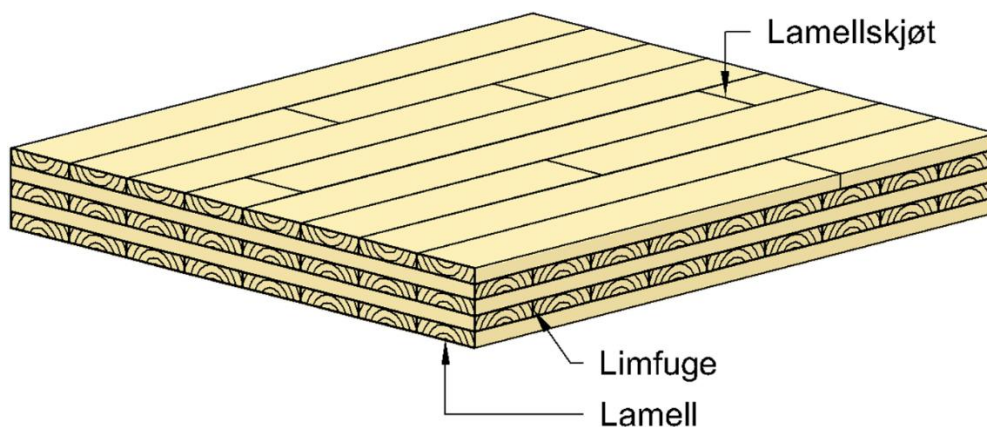


Figur 2-2 Skjematisk oppbygging av fiberstrukturen i trevirke (SINTEF Byggforsk, 2015).

Cellene som dannes om våren har tynne cellevegger og dermed stort cellehulrom. Fargen på veden som dannes om våren er derfor lys og bidrar til transport av væske fra røttene. Om sommeren dannes celler med tykkere cellevegger fordi veksthastigheten går ned. Fargen på denne veden er mørkere, og er størst bidragsyter til trevirkets styrke. Celleveggen består for det meste av cellulose og lignin, og det er dette som gir styrke til treverket. Fargeforskjellen mellom vårved og sommerved vises som årringer i trestammens tverrsnitt (Edwardsen & Ramstad, 2015; Kollmann & Côté Jr., 1968). Det skilles mellom yteved som transporterer vann og næringsstoffer oppover i treet, og kjerneved som består av døde celler. Kjerneveden inneholder mindre fuktighet, og er mer holdbar enn yteveden. I mange treslag har kjerneveden en mørkere farge, men hos gran er det lite synlig forskjell mellom kjerneved og yteved (Hameury, 2006; Skaug, u.å.).

2.1.3 KL-tre

Krysslimt tre (KLT) kjennetegnes som trevirke (planker eller lameller) som sammenføres til elementer. Det produseres en rekke variasjoner av KLT-elementene, men det vanligste for bruk i bygninger er elementer av krysslagte lameller som er limt sammen med 90 graders vinkel mellom lagene. Antall lag varierer mellom 3 og 9, avhengig av bruksområde (Aarstad, Glasø, & Bunkholt, 2008; Van De Kulien, Ceccotti, Zhouyan, & Minjuan, 2011; Evans, u.å.). Oppbygningen av et KLT-element er vist i Figur 2-3. Elementene kan også sammenføres med spiker, skruer, stålstag eller tredybler.



Figur 2-3 Oppbygningen av et krysslagt, limt KLT-element (Edwardsen & Ramstad, 2015).

Krysslagingen gir dimensjonal stabilitet, styrke og stivhet til elementene. Det at lagene ligger i to ulike retninger gjør at elementene får bæreevne i begge retningene, økt skjærkapasitet i elementplanet, og begrenset krymping og svelling i planet ved fuktvariasjoner (Van De Kulien, Ceccotti, Zhouyan, & Minjuan, 2011; Evans, u.å.). KLT-elementene kan lages med innlagte hulrom. Dette gjøres blant annet for å øke varmegjennomgangsmotstanden. Fullstendige bæringssystemer i bygninger kan bygges opp av elementer i KLT, og det kan også lett kombineres med andre materialer og bygningssystemer. Yttervegger av KLT må dekkes med utvendig kledning og i de fleste tilfeller med ekstra varmeisolasjon (Aarstad, Glasø, & Bunkholt, 2008; Evans, u.å.; Edwardsen & Ramstad, 2015).

Den gode stabiliteten i KLT-elementene gjør at det nå kan bygges trehus som blokker i flere etasjer enn hva som var mulig med tradisjonell trehusbygging (Aarstad, Glasø, & Bunkholt, 2008). KLT-elementene prefabrikeres og finnes i lengder opp mot 16-20 meter og bredde opp til 3 meter. Lamellene kan være med eller uten innbyrdes kantliming avhengig av ønskede egenskaper. Limtypen som brukes avhenger av bruksområde, og er som regel vannfaste eller fuktbestandige lim (Edwardsen & Ramstad, 2015). Tabell 2-1 viser noen relevante egenskaper til KLT-elementer.

Tabell 2-1 Relevante egenskaper til KLT-elementer (SINTEF Byggforsk, 2018b).

Egenskap	Symbol	Verdi
Varmekonduktivitet	λ	0,12 W/mK
Spesifikk varmekapasitet	c	1600 J/kg·K
Vanndampmotstandsfaktor	μ	Tørre forhold: 50 Fuktige forhold: 20
Midlere densitet	ρ	400 kg/m ³

2.2 Fukt

2.2.1 Fukt i materialer

Materialers fuktbindings- og fukttransportegenskaper er sterkt avhengig av materialets poresystem. Det gjelder både porenes form, størrelse og fordeling i materialet. Det er materialstrukturen som definerer poresystemet. Tre og de fleste andre byggematerialer har en porestruktur med kontinuerlige porer og kontinuerlig fast stoff. Materialer som kan binde fukt i poresystemet kalles hygroskopiske materialer og det er porøsiteten, med en verdi på mellom 0 og 1, som bestemmer hvor mye vann et materiale kan inneholde. (Geving & Thue, 2002).

Tre anses å være et porøst materiale med hygroskopiske egenskaper. Det betyr at det tar opp og avgir fuktighet i takt med omgivelsene. Trevirke inneholder to former for fukt. Inne i hulrommene i cellene finnes fritt vann, og i celleveggene finnes bundet vann. Ved tørking er det alltid det frie vannet som fordampes først. Først når alt det frie vannet har fordampet, begynner celleveggene å tørke. Dette kalles fibermetningspunktet og ligger på rundt 30% for gran (Edvardsen & Ramstad, 2015). Videre vil generell fuktmechanisme i materialer beskrives, men det vil være representativt for fuktbufningsprosessen i trematerialer.

Vann kan være kjemisk eller fysikalsk bundet i et materiale. Normalt inkluderer man ikke kjemisk bundet vann når man snakker om fukt i materialer fordi de kjemiske bindingene er så sterke at vannet ikke kan fordampe. Fysikalsk bundet vann kan deles i tre hovedgrupper: osmotisk binding, adsorptiv binding og kapillærkondensasjon. Det er vanskelig å skille mellom osmotisk og adsorptiv binding. Osmotisk binding skyldes at det er salter til stede. Siden det ofte er snakk om svært små mengder bli det vanligvis sett bort fra denne typen fysikalsk binding (Geving & Thue, 2002).

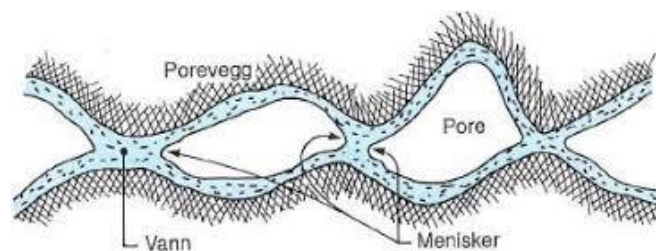
Adsorptiv binding skyldes adhesjonskrefter mellom vann- eller dampmolekylene og molekylene på overflaten til det faste stoffet. Vannmolekyler har en dipol struktur som gjør at de lettere fanges opp av overflaten på det faste stoffet, og det holdes fastere enn andre molekyler. Figur 2-4 viser Vannmolekyler som er adsorptivt bundet på overflaten til et materiale. Det kan adsorberes opp til 30 molekyllag på de fleste byggematerialer. Det første laget med vannmolekyler som fester seg til poreveggen holdes med størst krefter, og så minker kreftene utover. For å frigjøre vannmolekylene fra poreveggene må det stor energitilførsel til. Den samme energimengden avgis som varme når molekylene bindes til materialet. Denne varmen er større jo sterkere bindingene er, og kalles sorpsjonsvarme.

Stigende relativ fuktighet og synkende temperatur gir økt tykkelse på den adsorberte hinnen (Geving & Thue, 2002).



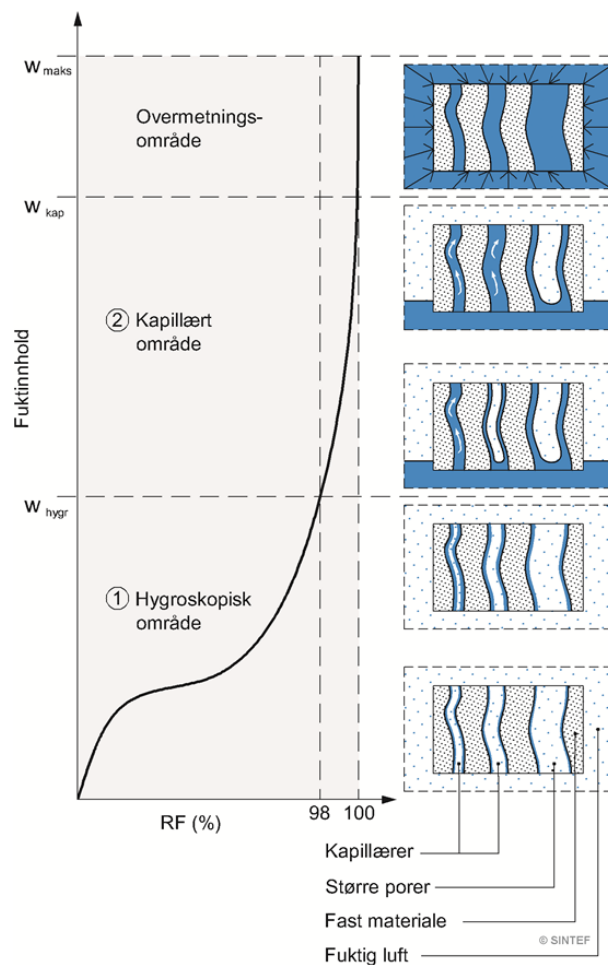
Figur 2-4 Vannmolekyler adsorptivt bundet til fast stoff (Geving & Thue, 2002).

Kapillærkondensasjon er et fenomen som forekommer når tykkelsen på det adsorberte molekyllaget inne i en pore blir så stor at det kryper sammen med molekyllaget på andre siden av poren, som vist på Figur 2-5. Det dannes da en konkav væskeoverflate på grunn av adhesjonskreftene. Denne overflaten kalles menisk. Ved lav relativ luftfuktighet vil ikke kapillærkondensasjon være særlig framtreddende på grunn av tynne molekyllag på poreveggene. Kapillærkondensasjon vil først begynne å gi større utslag når relativ luftfuktighet er oppe i 80-90%. Kapillærsuging skjer på samme måte som kapillærkondensasjon, men ved kontakt med fritt vann i stedet for vanndamp i luften (Geving & Thue, 2002).



Figur 2-5 Kapillærkondensasjon i en pore og menisker (Geving & Thue, 2002).

Fukttinnholdet i et materiale kan deles inn i hygroskopisk område, kapillært område og overmetningsområde, som vist på Figur 2-6. Det hygroskopiske området går helt opp til 95-98% relativ luftfuktighet. Vanninnholdet i materialet øker med økende relativ luftfuktighet. I starten er vannet lagret som et lag med vannmolekyler på poreveggen, etter hvert lagres flere lag med molekyler. Mot slutten av det hygroskopiske området lagres også vann ved intern kapillærkondensasjon, og de minste porene fylles med vann (Straube, 2006). I det kapillære området er porevannsystemet kontinuerlig og væskestrømning via kapillærsuging bidrar til økt vanninnhold sammen med adsorpsjon i de større porene. Dersom materialet er i kontakt med fritt vann over lengere tid, vil vanninnholdet øke til kapillær metning. For å øke vanninnholdet ytterligere til full vannmetning må det ytre krefter til, og man er inne i overmetningsområdet (Geving & Thue, 2002).



Figur 2-6 Fuktopptak i porøse materialer i bygninger. Til venstre vises en sorpsjonskurve som er utvidet i det kapillære området. Til høyre vises en poremodell for hvordan vannet bindes inne i materialet (SINTEF Byggforsk, 2018b).

2.2.2 Hygrotermisk masse

Hygrotermisk masse er et relativt nytt begrep som brukes om den sammensatte virkningen av fuktkapasitet og varmekapasitet (Asphaug, et al., 2015). Fuktkapasiteten til et materiale handler om hvordan det endrer fuktinnhold i takt med endring av relativ fuktighet i omgivelsene. Som beskrevet tidligere kalles materialer med denne egenskapen hygroskopiske materialer (masse) (Geving & Thue, 2002). Varmekapasiteten til et materiale defineres som forholdet mellom den varmen som tilføres et materiale og temperaturstigningen som følge av den tilførte varmen (Perdersen, 2018). Dette kan knyttes til begrepet termisk masse som er den massen som kan brukes til å lagre varme for kjøle- og oppvarmingsformål (Haase & Andresen, 2007). Selve navnet hygrotermisk masse er sammensatt av begrepene hygroskopisk masse og termisk masse.

Både fuktkapasitet og varmekapasitet er avhengig av fuktinnhold og temperatur. I en bygning er det hele tiden et samspill mellom temperatur og fuktinnhold i luften og materiale som

luften er i kontakt med. Dersom forholdene i luften er konstante, vil det innstille seg en likevekt mellom luften og materialene i rommet. Den hygrotermiske massen vil i en slik sammenheng ikke ha betydning. Dersom en eller flere av forholdene i luften derimot varierer, vil energi utveksles mellom luften og materialene. Når temperaturen endrer seg kan man få termisk bufring. Det vil si at når temperaturen stiger, går noe av varmen inn i materialene. Når temperaturen synker igjen, avgis varmen tilbake til omgivelsene. På samme måte vil det oppstå fuktbufring når fuktinnholdet endrer seg (Asphaug, et al., 2015).

2.2.3 Variasjoner i luftfuktighet

Fuktinnholdet i luften varierer og avhenger sterkt av temperaturen. Ved enhver temperatur finnes det en øvre grense for hvor mye vanndamp luften kan inneholde. Når fuktinnholdet i luften når denne grensen, betegnes luften som mettet. Ved metningspunktet kan luften holde på mer vanndamp ved høye temperaturer enn ved lave temperaturer. Dersom luften er mettet og temperaturen synker, vil overskuddet av vanndamp felles ut som kondens eller vanndråper i luften. Temperaturen ved metningspunktet kalles luftens duggpunktstemperatur (Edvardsen & Ramstad, 2015).

Relativ luftfuktighet (RH) er et begrep som betegner fuktinnholdet i luften i forhold til metningsinnholdet ved den aktuelle temperaturen (Formel 2.1). Relativ luftfuktighet må derfor alltid oppgis sammen med temperaturen. Ved metning er Relativ luftfuktighet 100%.

$$RH = \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100\% \quad (\text{Formel 2.1})$$

Hvor:

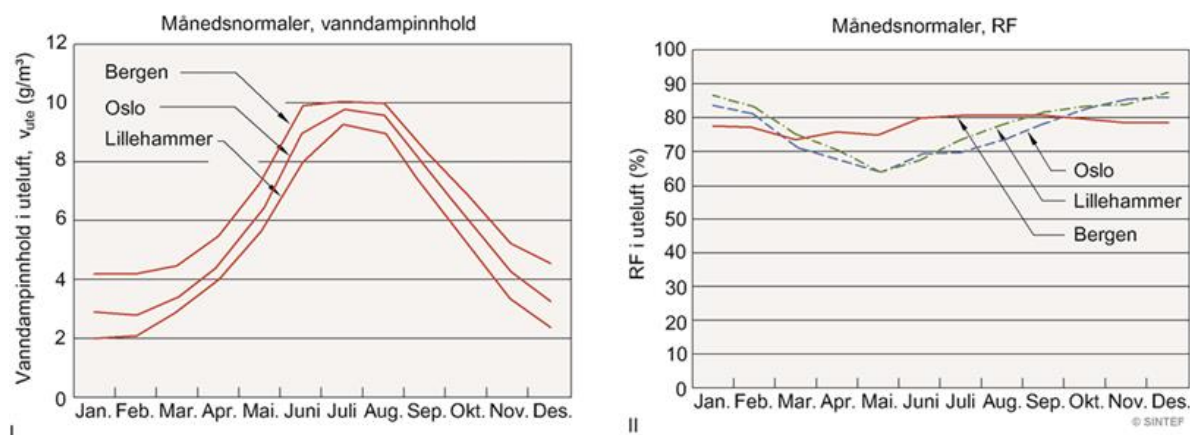
$v = \text{vanndampinnhold } [g/m^3]$

$v_{sat} = \text{metningsinnhold ved aktuell temperatur } [g/m^3]$

Relativ luftfuktighet i uteluften varierer med hvor i landet man befinner seg. De gjennomsnittlige verdiene for relativ luftfuktighet svinger også med årstidene (se Figur 2-7). Vanligvis er relativ luftfuktighet lavest om våren og høyest om høsten og vinteren. Variasjonene kan også være store på døgn- og timesbasis avhengig av været. Ved tåke og regnvær vil relativ luftfuktighet i uteluften være opp mot 100%, og vanligvis er den høyest om natten. Ser man på vanndampinnholdet i lufta, er trenden motsatt av for relativ luftfuktighet (se Figur 2-7). Luften har lavest vanndampinnhold om vinteren selv om relativ

luftfuktighet ofte er høyest på grunn av lave temperaturer som gjør at luften ikke kan holde på så mye fuktighet (Edvardsen & Ramstad, 2015).

Vanndampinnholdet i inneluften bestemmes av flere faktorer: *Tilstanden til ventilasjonsluften*. Som oftest er dette uteluften, og vanndampinnholdet i inneluften påvirkes derfor av vanndampinnholdet i uteluften. *Luftskiftet*, altså hvor mye ventilasjonsluft som tilføres rommet. *Innendørs fukttillskudd*, for eksempel fordamping fra planter, dyr, mennesker, tørking av klær, matlaging og dusjing (Edvardsen & Ramstad, 2015).



Figur 2-7 Eksempler på månedsnormaler for vanndampinnhold (I) og RF (II) i uteluften over året for Oslo, Lillehammer og Bergen (SINTEF Byggforsk, 2018b).

2.3 Varme

2.3.1 Latent varme

Et stoff kan gjennomgå en faseovergang ved en viss temperatur. Ved denne temperaturen vil ikke tilførsel av mer varme (energi) øke temperaturen ytterligere. Den kinetiske energien til molekylene vil altså ikke øke da den har nådd et maksimum. Varmen vil i stedet bidra til å øke den potensielle energien til stoffet, noe som innebærer å påvirke kreftene mellom molekylene slik at molekylstrukturen kan endres. Den varmemengden som skal til for at stoffet skal gjennomgå en faseovergang, kalles latent varme og relateres ofte til masse (J/kg) (Sorteberg, u.å.; Geving & Thue, 2002).

De vanligste faseovergangene er mellom fast stoff og væske, og væske og gass. Det skiller mellom latent varme ved fordamping og latent varme ved smelting. Skillet skyldes at det skal mer energi til for at et stoff skal gå fra væske til gass, enn fra fast stoff til væske. Når faseovergangen går motsatt vei, frigis det energi tilsvarende den latente varmen til stoffet. Når trematerialer tar til seg fukt fra luften, som beskrevet i Kap.2.2.1, gjennomgår vannet en faseendring fra dampform til væskeform. Dette frigir fordampningsvarme til omgivelsene.

Når treet igjen tørker ut, krever prosessen varme for at vannmolekylene skal løsrive seg og gå over i dampform.

2.3.2 Varmetransport

Ved temperaturforskjell mellom to sider av et materiale, vil det forgå en varmetransport i retning mot den siden hvor temperaturen er lavest. Varmetransporten i bygningsskonstruksjoner skjer hovedsakelig som en kombinasjon av varmeledning, konveksjon og stråling (Edvardsen & Ramstad, 2015).

Ved varmeledning skjer varmetransporten gjennom molekylbevegelser. Varmere molekyler har mer bevegelsesenergi enn kaldere molekyler. Når molekyler støter sammen, overføres energi fra de varme til de kaldere molekylene. I et materiale er varmetransporten proporsjonal med temperaturforskjellen over materialet. Varmetransporten gjennom materialet er avhengig av materialets varmeledningsevne, som igjen bestemmes av molekyltettheten. Materialer med høy molekyltetthet og densitet vil ha høyere varmeledningsevne, og derfor transportere varme godt. Denne egenskapen utnyttes i isolasjonsmaterialer (Edvardsen & Ramstad, 2015). Tre er som sagt også et porøst materiale, og sammenlignet med andre byggematerialer i bærekonstruksjoner, har tre meget lav varmeledningsevne. Varmeledningsevnen varierer med densiteten til treet, og stiger proporsjonalt med trefuktigheten (Sagen, u.å.).

Konveksjon kan også betegnes som strømning. Selv om luft har dårlig varmeledningsevne, kan varmen transporteres gjennom konveksjon. Dette skjer i hulrom hvor det er ulik temperatur på tilstøtende flater. Luften som er nærmest den varme flaten varmes opp, blir lettere og stiger oppover. Motsatt skjer for luften nærmest den kalde flaten som bli avkjølt og dermed synker. På denne måten oppstår et kretsløp som transporterer varme fra den varme til den kalde siden (Edvardsen & Ramstad, 2015).

Varmestråling kan skje både gjennom de fleste gasser, luft, noen typer væsker og gjennomsiktige faste stoffer som for eksempel glass og plast. Alle materialoverflater sender ut (emitterer) varmestråling og mottar (absorberer) samtidig stråling fra motstående flater. Netto varmetransport går fra varm til kald overflate siden varme flater sender ut mer varmestråling enn kalde flater. Strålingsintensiteten (E), altså varmestrålingens størrelse avhenger av overflatetemperaturen (T) og emisjonsfaktoren (ϵ) til materialet.

$$E = 5,68 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad [W/m^2] \quad (\text{Formel 2.2})$$

Emisjonsfaktoren beskriver hvor mye stråling en flate sender ut i forhold til det som er teoretisk mulig (Edwardsen & Ramstad, 2015).

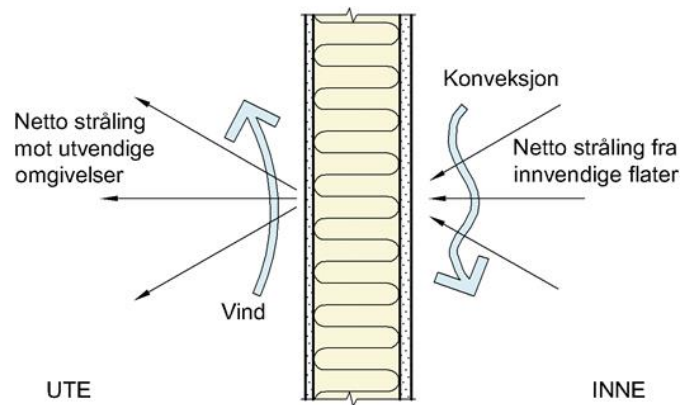
2.4 Varmemotstand og varmegjennomgang

Varmekonduktivitet, λ [W/mK] er et begrep som brukes for den totale varmetransporten gjennom et materiale både ved varmeledning, konveksjon og stråling. Ifølge Edwardsen og Ramstad (2015, s.391) defineres varmekonduktivitet som: "*den varmestrømmen som går gjennom et tverrsnitt på 1 m² av et homogent materiale med tykkelse på 1 m, og temperaturforskjellen er 1K (1°C).*" Materialets struktur, temperatur, densitet og fuktinnhold påvirker materialets varmekonduktivitet (Edwardsen & Ramstad, 2015).

Varmemotstanden, R til et materiale angir hvor godt et materiale isolerer mot varmegjennomgang. Varmemotstanden er avhengig av varmekonduktiviteten og tykkelsen til materialet (d) (Formel 2.3). Dersom konstruksjonen er sammensatt av flere materialsjikt, beregnes den totale varmemotstanden ved å summere varmemotstanden til hvert enkelt sjikt (Edwardsen & Ramstad, 2015).

$$R = \frac{d}{\lambda} = \frac{T_{si} - T_{se}}{q} \quad [m^2K/W] \quad (\text{Formel 2.3})$$

Varmeovergangsmotstand er varmemotstanden mellom omgivelsene og overflaten til en bygningsdel. Den tar hensyn til varmemotstanden gitt av luftsjiktet inntil overflatene på hver side av konstruksjonen. I hovedsak er det lufthastigheten ved overflaten og materiales strålingsegenskaper (avhengig av emisivitet og overflatetemperatur) som bestemmer varmeovergangsmotstanden (se Figur 2-8). På grunn av vind og stråling mot omgivelsene er varmeovergangsmotstanden på utsiden liten i forhold til på innsiden av en konstruksjon (Edwardsen & Ramstad, 2015; SINTEF Byggforsk, 2018a).



Figur 2-8 Varmerovergang ved overflater (SINTEF Byggforsk, 2018a)

Ved tradisjonell U-verdiberegning brukes standardiserte verdier av varmeovergangsmotstanden, gitt i Tabell 2-2. Verdiene tilsvarer årlige gjennomsnittsverdier for varmeovergangsmotstand for vanlige materialoverflater (SINTEF Byggforsk, 2018a).

Tabell 2-2 Varmerovergangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946 (SINTEF Byggforsk, 2018a).

Overflate	Varmerovergangsmotstand (m ² K/W) Varmestrømsretning		
	Oppover	Horisontalt	Nedover
Innvendig (R _{si})	0,10	0,13	0,17
Utvendig (R _{se})	0,04	0,04	0,04
Utvendig, inkludert ventilert kledning	0,10	0,13	0,17

Den samlede **varmegjennomgangen** gjennom en konstruksjon er den inverse av konstruksjonens totale varmemotstand (Formel 2.4). Varmegjennomgangskoeffisienten U, blir omtalt som U-verdi, og er et standardisert mål på hvor lett en bygningsdel slipper gjennom varme. U-verdien angir hvor mye varme som strømmer gjennom et areal på 1 m² av bygningsdelen per tidsenhet og per grad temperaturforskjell mellom omgivelsene på hver side, og skal oppgis med to gjeldende sifre (Edvardsen & Ramstad, 2015; SINTEF Byggforsk, 2018a).

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{q}{T_i - T_e} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (\text{Formel 2.4})$$

Tabell 2-3 viser minimumskrav til U-verdi for ulike bygningsdeler. Denne oppgaven behandler yttervegger, og kravet om U-verdi på mindre enn 0,22 W/m²K vil være gjeldende.

Tabell 2-3 Minimumskrav til energieffektivitet for alle bygninger, unntatt boligbygning og fritidsbolig med laftede yttervegger (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).

U-verdi yttervegg [W/(m ² K)]	U-verdi tak [W/(m ² K)]	U-verdi gulv på grunn og mot det fri [W/(m ² K)]	U-verdi vindu og dør inkludert karm/ramme [W/(m ² K)]	Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell (luftveksling per time)
≤ 0,22	≤ 0,18	≤ 0,18	≤ 1,2	≤ 1,5

U-verdien er definert som varmefluksen gjennom et materiale dividert på temperaturforskjellen mellom omgivelsene på hver side av materialet under stabile forhold. Siden stabile forhold aldri forekommer i praksis, vil både temperaturforskjellen og varmefluksen variere. Ideelt sett vil de variere i takt, men i virkeligheten er det ikke slik (International Standard, 2014). På grunn av fenomener som hygrottermisk masse, vil U-verdien derfor oppføre seg dynamisk, særlig i bygg med store mengder hygrottermisk masse.

2.5 Programmeringsverktøyet Python

Python er et programmeringsspråk, og et tilsvarende sett med programvareverktøy og kodebiblioteker. Det ble utviklet tidlig på 1990-tallet av Guido van Rossum fra Nederland. Automatisering, dataintegring og dataanalyse er noen typiske bruksområder for Python. Språket ble utformet til å være enkelt å lære og lese. Sammenlignet med programmer skrevet i andre programmeringsspråk, fremstår Python som ryddig og pent, med få unødvendige symboler og engelske navn i stedet for kryptiske syntakser. Språket kjennetegnes ved at det brukes innrykk for å definere kodeblokker, og at alle verdier er objekter. Det betyr at variabler i Python alltid peker til et objekt, og at en variabel kun kan endres ved at man lar de peke på et annet objekt (Dvergsdal, 2017; Donaldson, 2009).

I utgangspunktet er Python bare tekstbasert, men det finnes en rekke rammeverk og kodebiblioteker som gjør at det kan lages grafiske brukergrensesnitt. Spyder er et eksempel på en kraftig vitenskapelig programvare som er skrevet i Python, for Python, og som er benyttet til analyser i denne oppgaven. Den er designet av forskere, ingeniører og dataanalytikere, og tilbyr en unik kombinasjon av avansert redigering, analyse, feilsøking og profilering av et omfattende utviklingsverktøy (The Spyder Website Contributors, 2018).

Den enkleste måten å installere Spyder, er å installere «the Anaconda Python distribution». Den inneholder alt man trenger for å komme i gang og Spyder er inkludert som standard

programvare (The Spyder Website Contributors, 2018). Anaconda brukes av over 11 millioner mennesker verden over, og sies å være den enkleste måten for å utføre Python datavitenskap. Blant annet kan man analysere store datamengder og visualisere resultatene ved hjelp av ulike kodebiblioteker (Anaconda, 2019).

3 Metode

3.1 ISO 9869 - Metodegjennomgang med beskrivelse av måleutstyr

En metode for å måle varmegjennomgang gjennom en vegg, er ved bruk av varmeflukssensorer, og er beskrevet i den internasjonale standarden ISO 9869. Egenskapene som kan måles med denne metoden er:

- Varmemotstand (R) og varmekonduktivitet (λ) fra overflate til overflate
- Total varmemotstand (R_T) og varmegjennomgangskoeffisient (U).

Ved Borg Havn er det varmegjennomgangskoeffisienten som er målt. Videre beskrives metoden for å måle varmegjennomgang, med fokus på måling av U-verdi.

3.1.1 Måleutstyr og kalibrering

Måleutstyr som kreves for å gjennomføre metoden er en varmeflukssensor og temperatursensorer. Varmeflukssensoren må ha lav varmemotstand og høy sensitivitet. Den burde velges ut fra typen element som skal måles og differansen mellom inne- og utetemperaturen.

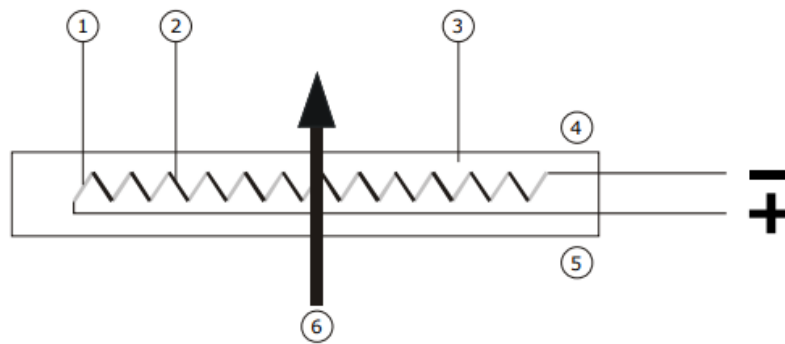
Varmeflukssensoren som er valgt til dette prosjektet produseres av Hukseflux Thermal Sensors B. V. i Nederland. Produkttypen som er benyttet heter HFP01 og er vist på Figur 3-1. Den er laget av en sammensetning av keramikk og plast, noe som gjør at den totale termiske motstanden holdes lav. Sensoren skal være stabil og robust både for langtidsbruk på et sted, eller repeterende installasjon på ulike steder (Hukseflux Thermal Sensors B. V., 2016).



Figur 3-1 HFP01 varmeslukssensor. Motsatt side har blått deksel (Hukseflux Thermal Sensors B. V., 2016).

HFP01-sensoren er en termisk platesensor. Den består av flere termoelementer koblet i serie, hvor hvert termoelement består av to metallegeringer. Det generelle arbeidsprinsippet for varmeflukssensoren er vist i Figur 3-2. Sensoren fungerer slik at den måler

temperaturforskjellen over keramikk-plastikk platen. Termoelementene genererer en spenning som er proporsjonal med denne temperaturforskjellen. Spenningen er veldig liten, men forsterkes av at termoelementene kobles i serie. Arbeidet skjer passivt, det krever altså ikke strøm. Et voltmeter som måler med millivolts nøyaktighet brukes for å måle voltsignalet (spenningen).



Figur 3-2 Det generelle arbeidsprinsippet for varmeflukssensoren. 1 og 2: de to legeringsmetallene i et termoelement, 3: sensorplaten, 4 og 5: varm og kald side på sensoren, 6: varmefluks (Hukseflux Thermal Sensors B. V., 2016).

For å omgjøre det målte voltsignalet (U) til varmefluks (q), må det divideres på sensitiviteten (S), se Formel 3.1. Sensitiviteten er en konstant som er unik for hver enkelt sensor. Den bestemmes ved kalibrering på fabrikken og oppgis i produktsertifikatet som følger med hver sensor (Hukseflux Thermal Sensors B. V., 2016). Sensitiviteten til sensorene som er brukt ved Borg Havn er gitt i Tabell 3-1.

$$q = \frac{U}{S} \quad [W/m^2] \quad (\text{Formel 3.1})$$

Tabell 3-1 Sensitiviteten til de ulike varmeflukssensorene ved måleoppsett A (1006) og B (1010).

SENSOR	SENSITIVITET [$\mu V / (W/m^2)$]
INSIDE_1006_WOOD	61,03
INSIDE_1006_FILM	60,51
OUTSIDE_1006_WOOD	62,61
OUTSIDE_1006_FILM	62,56
INSIDE_1010_WOOD	59,69
INSIDE_1010_FILM	62,61
OUTSIDE_1010_WOOD	61,50
OUTSIDE_1010_FILM	64,10

Temperatursensorene som brukes bestemmes ut fra hvilke egenskaper som skal måles. Dersom varmemotstanden eller varmekonduktiviteten skal måles, må det brukes temperatursensorer som kan måle overflatetemperaturer. Dersom total varmemotstand eller U-verdi skal måles, som er tilfelle her, må temperatursensorene være egnet til å måle lufttemperatur. Før målingene startet, ble temperatursensorene kalibrert for hele temperaturintervallet de skulle måle i. Temperatursensorene ble også kalibrert i par for at temperaturdifferansen mellom innsiden og utsiden skulle bli så nøyaktig som mulig.

Ifølge ISO 9869 skal både varmeflukssensorene og temperatursensorene kalibreres med en nøyaktighet på $\pm 2\%$.

3.1.2 Retningslinjer for installasjon av måleutstyr

Målesensorene skal plasseres slik at de er representative for hele elementet de måler. For å finne egnede plasseringer, er det anbefalt å først gjøre termografiske undersøkelser.

Varmeflukssensorene skal ikke installeres i nærheten av kuldebroer, sprekker eller lignende feilkilder som kan påvirke resultatet. Sensorene skal heller ikke være i direkte kontakt med varme- eller kjøleapparater eller i trekken fra en vifte. Utsiden av elementet bør beskyttes fra regn, snø og direkte sollys.

Varmeflukssensorene skal monteres direkte på overflaten av elementet, på den siden med mest stabile temperaturer. Det kan brukes et tynt lag med termisk kontaktlim for å oppnå dette. Ved måling av varmemotstand eller varmekonduktivitet skal overflatetemperatursensorer monteres under eller ved siden av varmeflukssensoren på innsiden og på utsiden av veggen. Ved måling av total varmemotstand eller U-verdi skal temperatursensorene monteres slik at de måler temperaturen som er brukt i definisjonen av U-verdi.

I definisjonen skal den miljømessige (omgivende) temperaturen, T_{env} brukes til beregning av U-verdi fra målinger. Utfordringen med dette er at denne temperaturen ikke kan måles direkte. Det er derfor flere temperaturer som er brukt i bestemmelse av U-verdi:

- Lufttemperatur (air temperature)
- Resulterende- eller komforttemperatur (resultant or comfort temperature), som er et gjennomsnitt av gjennomsnittlig strålingstemperatur og lufttemperatur
- Miljømessig temperatur (environmental temperature), som er den nærmeste til T_{env} .

På utsiden av veggen er lufttemperaturen ofte et bra mål så lenge det er overskyet. Ved klarvær kan derimot solstråling forårsake store feil i målingene og utvendige overflater bør derfor skjermes.

Dersom temperaturen rundt varmeflukssensoren er stabil, skal testen vare i minimum 72 timer. Ellers bør den vare i minst 7 døgn. Det er anbefalt at målingene tas opp med faste tidsintervall, der hver måling er representert ved gjennomsnittsverdien til flere målinger ved et kortere intervall. Opptaksintervallene avhenger av metoden som brukes til analyse. For gjennomsnittsmetoden brukes typisk 0,5 time til 1 time, men kan være mindre for dynamisk metode.

3.1.3 Beregning av varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient

Under helt stabile forhold kan U-verdien til veggen måles ved å gjøre en måling av varmestrømmen gjennom veggen i tillegg til lufttemperaturen på hver side av veggen. Dette kan gjøres i et laboratorium, men i feltet er det vanskelig å oppnå forhold som er stabile nok til en enkelt måling. Det finnes to måter å løse dette problemet på. Enten kan man anta at gjennomsnittsverdiene av varmestrømmen og temperaturen over en tilstrekkelig lang tidsperiode gir et godt estimat. Til dette kreves det at de termiske egenskapene til materialene og varmeovergangskoeffisientene er konstante over de målte temperaturvariasjonene, og at endringen i varmemengden som er lagret i elementet er neglisjerbar i forhold til mengden varme som går gjennom elementet. Eller så kan man bruke dynamisk teori for å ta hensyn til variasjonene i varmestrøm og temperaturer i dataanalysen.

I henhold til gjennomsnittsmetoden som er benyttet i denne oppgaven, beregnes et estimat av varmemotstand og varmegjennomgang etter Formel 3.2 og Formel 3.3.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (\text{Formel 3.2})$$

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (\text{Formel 3.2})$$

Dersom dette estimatet beregnes etter hver måling, vil det konvergere til en asymptotisk verdi. Denne verdien vil være tilnærmet lik den reelle verdien dersom følgende betingelser er innfridd:

- Elementets varmeinnehold er det samme ved målingens start og slutt.

- Varmefluksmåleren er ikke eksponert for direkte sollys.
- Den termiske konduktiviteten til elementet er konstant gjennom målingene.

I resultat og diskusjon blir denne verdien omtalt som akkumulert U-verdi da den består av den kumulative summen av varmekraft dividert på den kumulative summen av ΔT .

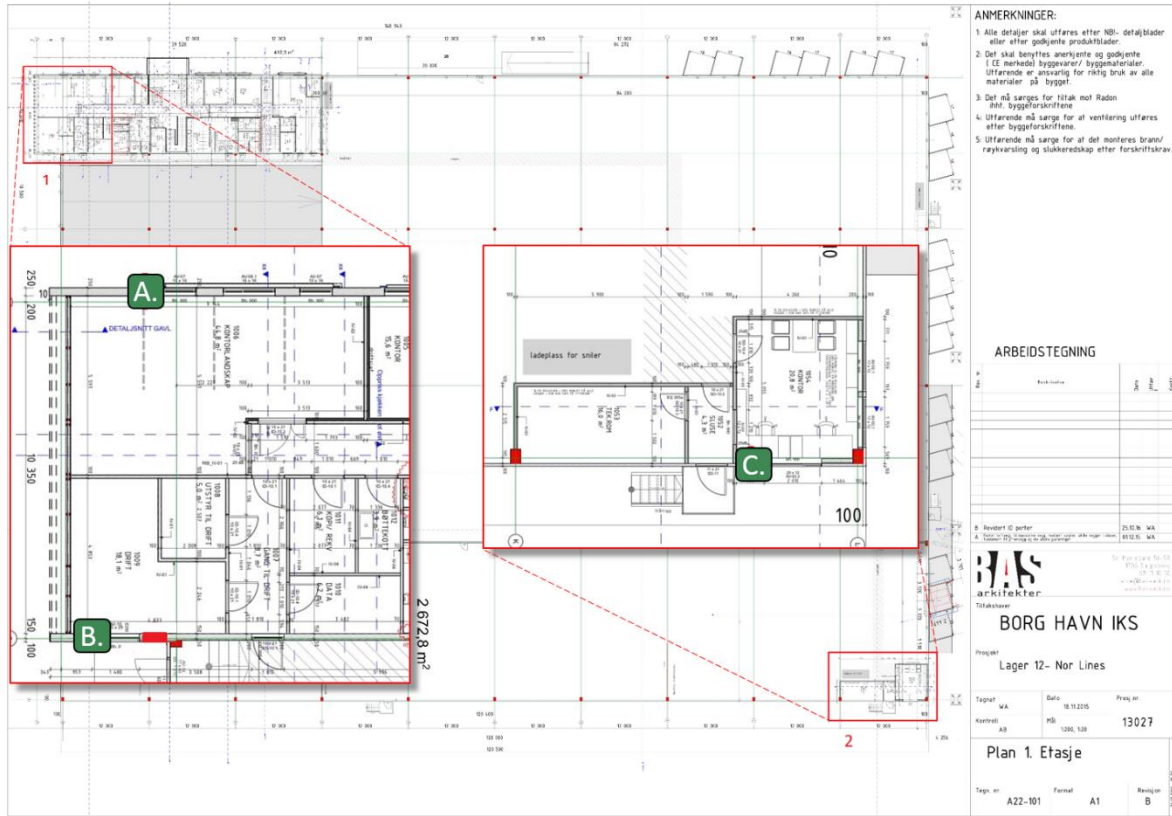
Testingen skal ikke avsluttes før testen har vart i minst 72 timer. Dersom R- eller U-verdien avviker mer enn $\pm 5\%$ fra verdien som er oppnådd 24 timer tidligere, skal testen fortsette helt til dette kravet er innfridd. Dersom endringen i varme lagret i veggen er mer enn 5% av varmen som passerer gjennom veggen i løpet av testperioden, skal det benyttes en annen metode. Denne er beskrevet i Kap.7.2 eller Annex B i ISO 9869.

3.2 Beskrivelse av måleoppsettet

Målingene er gjort på kontorlokalene til lagerbygningen. Plasseringen av de to kontorlokalene er vist i Figur 3-4. I den største kontordelen, består ytterveggkonstruksjonen kun av 250 mm tykke KLT-elementer uten dampspærre, isolasjon eller kledning. I tillegg til den nordvendte fasaden, finnes det en kort sørvendt fasade av KLT. Fasaden mot vest er dekket av vinduer, som vist på Figur 3-3, med regulerbar solskjerming. I motsatt hjørne av bygningen finnes et mindre kontorlokale med vegger bygget opp av KLT-elementer med isolasjon og gips på innsiden. Disse veggene er laget for å tilfredsstille kravet i TEK 17 med U-verdi på $22 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Tabell 2-3). Det er gjort målinger på tre ulike vegger på bygget. Figur 3-4 viser plasseringen av de tre måleoppsettene på plantegningen til bygget. Tabell 3-2 viser himmelretningen og oppbygningen til veggen det måles på.



Figur 3-3 Fasade mot nord og glassfasade mot vest på kontordel i KLT hvor de fleste av målingene ble gjennomført. Til høyre i bildet er deler av lagerbygget. Bildet er tatt før montering av måleutstyr.

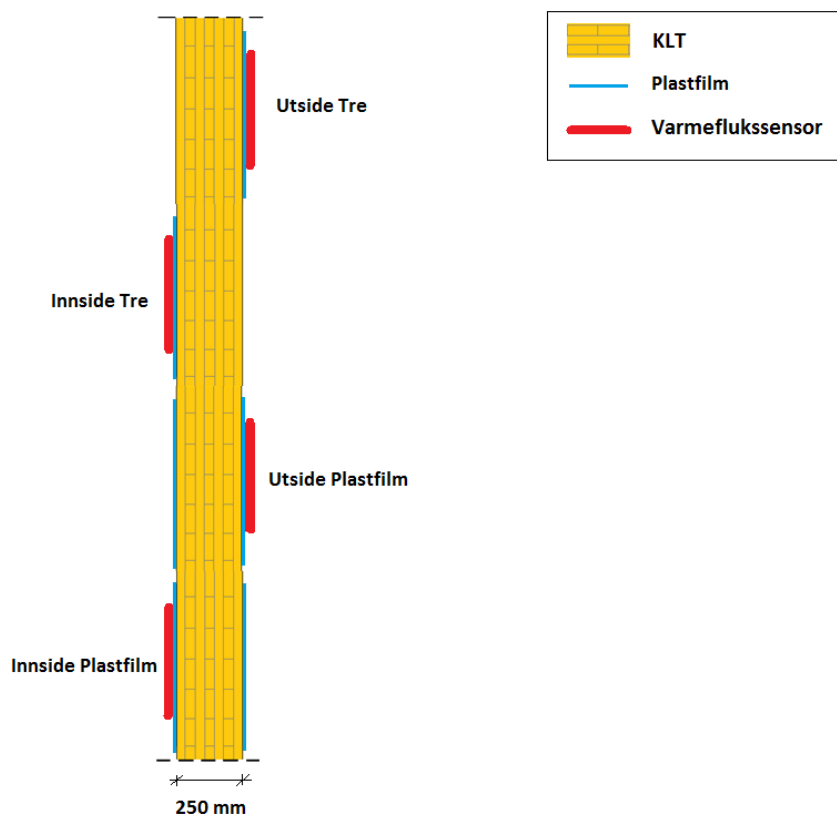


Figur 3-4 Plassering av måleoppsettene. I bakgrunnen vises plantegningen for 1. etasje av hele bygget. De uthevede røde boksene viser en mer detaljert plassering merket A til C.

Tabell 3-2 Himmelretning og oppbygning av veggen det måles på ved plassering A-C.

	A	B	C
HIMMELRETNING	Nord	Sør	Sør
OPPBYGNING (UTE – INNE)			
	250 mm KLT	250 mm KLT	KLT Isolasjon Gipsplate
ROMNUMMER (HENVISNING I ANALYSER)	1006	1010	1054

Hvert måleoppsett består av fire varmeflukssensorer (to inne og to ute) og to par temperatursensorer. Til sammen gir det 12 varmeflukssensorer og 6 par temperatursensorer. Siden målesensoren ikke er laget av tre, vil den ikke kunne måle den hygrottermiske effekten på den siden av veggen hvor sensoren sitter. Det er derfor tenkt at en av sensorene på utsiden skal måle den hygrottermiske effekten på innsiden, og at en av sensorene på innsiden skal måle den hygrottermiske effekten på utsiden. De to andre sensorene skal gi en referanseverdi som ikke skal inkludere hygrottermisk effekt. For å oppnå dette er veggen på motsatt side dekket av en plastfilm slik at treet ikke kan utveksle fukt med omgivelsene. Også veggen bak alle målesensorene ble dekket med plastfilm for å sikre hygrottermisk effekt bare på den ene siden. Figur 3-5 viser et snitt av måleoppsettet for å få en bedre forståelse av plassering av varmeflukssensorer og plastfilm.

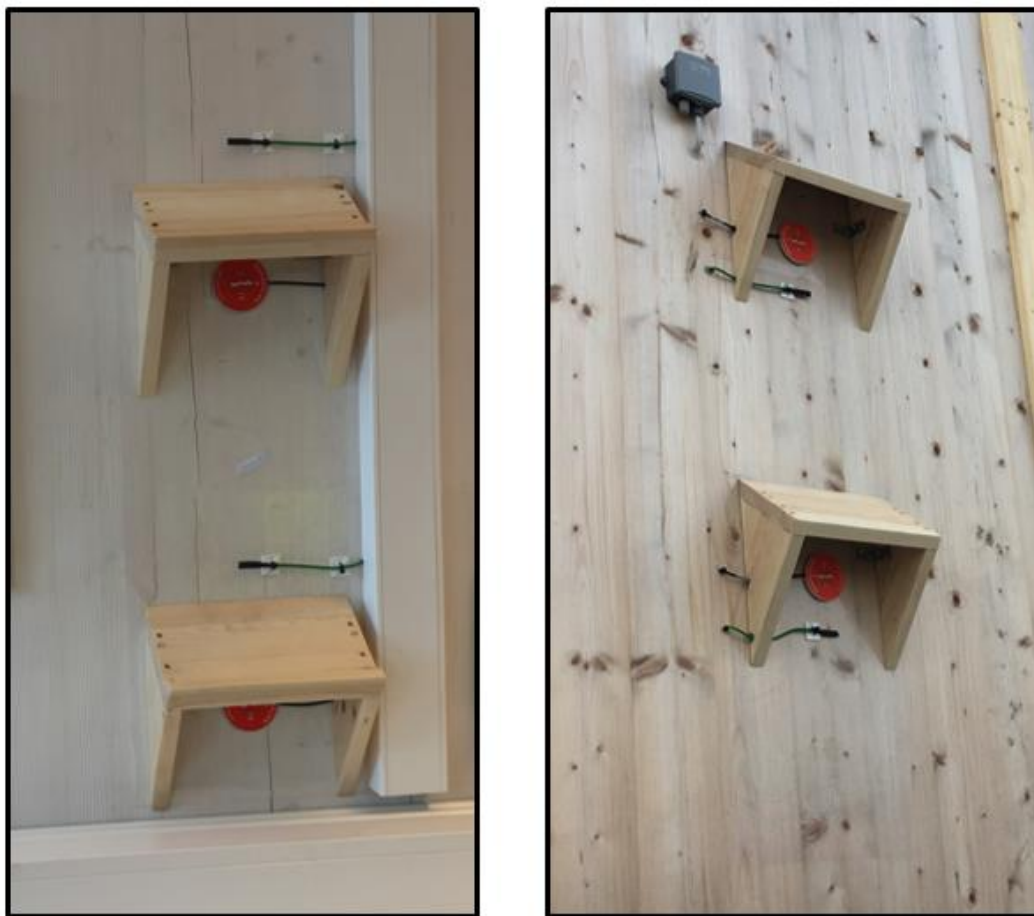


Figur 3-5 Snitt av måleoppsettet med plassering av plastfolie og varmeflukssensorer.

Temperatursensorene er plassert i nærheten av varmeflukssensorene. På innsiden sitter de over varmeflukssensorene, og på utsiden sitter de under varmeflukssensorene. Temperatursensorene måler i par, hvor ett par er plassert utenfor plastdekket overflate og det andre paret er plassert utenfor treoverflaten. Plasseringen til temperatursensorene ved

måleoppsett A vises på Figur 3-6. Ytterligere bilder av de tre måleoppsettene finnes i Vedlegg A.

Det er laget et lite overbygg, som vist i Figur 3-6, over hver varmeflukssensor for å skjerme den mot vær og vind. Spesielt med tanke på sol. For å unngå mikroklima inne under overbygget og ivareta mest mulig riktige forhold var det viktig at designet ble så lite og åpent som mulig. Selv om ikke alle målepunktene, for eksempel innendørs, er like utsatt for vær, ble det likevel laget overbygg for at forutsetningene skulle være så like som mulig.



*Figur 3-6 Ferdig montert måleoppsett ved plassering A. Bildet til venstre viser montering på innsiden og bildet til høyre viser montering på utsiden. Sensorene på innsiden sitter i en høyde slik at de måler mellom og under sensorene på utsiden.
Foto: Marcus Olsson, mars 2018.*

3.3 Avvik fra ISO 9869

På grunn av begrensninger knyttet blant annet til kabellengder og størrelse på veggene, var det vanskelig å oppfylle alle kravene i ISO 9869. Videre følger en beskrivelse av avvik fra kravene ved måleoppsettene, og derfor potensielle feilkilder i resultatet.

Som beskrevet er det valgt å sette halvparten av varmeflukssensorene på utsiden av veggen. Det strider mot anbefalingen fra ISO 9869 om at varmeflukssensorene skal plasseres på den

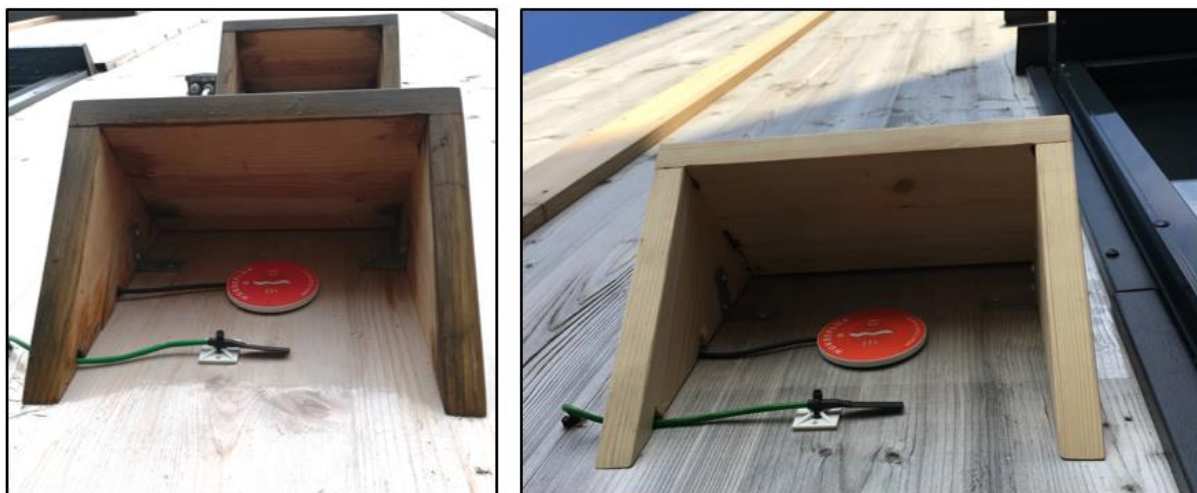
siden med mest stabil temperatur. Som vist på Figur 3-6 og spesielt godt i Vedlegg A-2, er den nederste sensoren ved måleoppsett A plassert over en sprekke. Heldigvis er ikke sprekken gjennomgående, men den må tas med i evalueringen av feilkilder. Siden KLT-veggen på sørsiden er veldig smal, er måleoppsett B plassert tett på vinduer, altså nærme kuldebroer, på begge sider av sensoren. Dette er vist på bildet av innvendig sensorer ved måleoppsett B i Vedlegg A-4.

Standarden anbefaler at utsiden av veggen, altså motsatt side av der sensoren sitter, beskyttes mot regn, snø og solstråling. Ved måleoppsett A er utsiden skjermet fra solstråling ved at veggen vender nordover. Det er imidlertid ikke satt opp skjerming fra regn og snø på overflatene det måles mot. På innsiden er det ikke nedbør, men veggen kan være påvirket av solstråling gjennom vinduene i vestfasaden, som vist på Figur 3-7. Ved måleoppsett B og C er utsiden av veggen utsatt for både solstråling, regn og snø. Innsiden er derimot skjermet mot alt.



*Figur 3-7 Vindusfasade mot vest. Innsiden av måleoppsett A er merket med rød ring.
Foto: Guro Oksavik Mestad, mars 2019*

Det er valgt å bruke differansen mellom lufttemperaturene i beregning av U-verdier. Lufttemperaturen vil variere med avstand fra veggen og høyde over gulvet og det ble ikke gitt retningslinjer for plassering i standarden. Det ble valgt å plassere temperatursensorene relativt tett til veggen med en avstand på omtrent 1-2 cm. Temperatursensorene som måler «Temperatur Utside Plastfilm» ved måleoppsett A og «Temperatur Utside Tre» ved måleoppsett B avviker fra dette, og er i kontakt med veggen slik at det er fare for at overflatetemperaturen måles i stedet for omgivelsestemperaturen (se Figur 3-8).



Figur 3-8 Temperatursensorer som er i kontakt med vegg. Til venstre ved måleoppsett A og til høyre ved måleoppsett B, begge på utsiden. Foto: Marcus Olsson, mars 2018

HFP01 varmefluksplatene fra Hukseflux Thermal Sensors er kalibrert med en nøyaktighet på $\pm 3\%$. Det samme gjelder temperatursensorene. Det er høyere enn anbefalingen i ISO 9869 på $\pm 2\%$. Det må også tas i betraktning at kalibreringen skjer på fabrikken, og ikke ved måledestinasjonen. Dette gjør usikkerheten enda større, og kan potensielt påvirke resultatene.

3.4 Presentasjon av inndata fra Borg Havn

Det blir logget store mengder data fra kontorbyggene ved Borg Havn. Vedlegg B viser en oversiktstabell over alle data som logges. Tabellen viser både kolonnenavnene fra rådatafilene (csv-filer), nye kolonnenavn brukt i analysene og forklaring til hver enkelt kolonne. Til sammen er det 65 kolonner i hver rådatafil, hvor rundt 30 er benyttet i denne oppgaven. De dataene som er relevante for denne oppgaven er uthevet med grønt i Vedlegg B, og forenklet fremstilt i Tabell 3-3 med tilhørende navn i grafene/figurene. I analysenavnene henvises det til romnummer i stedet for måleoppsett eller himmelretning. Hvilket romnummer som hører til hvilket måleoppsett er forklart i Tabell 3-2.

Tabell 3-3 Kolonnenavn i analyse med tilhørende forklaring og navn i grafer/figurer.

Nye navn ved analyse	Forklaring	Navn i graf/figur
T_Air_1006	Temp. rom 1006 (nord)	-
RH_Air_1006	Relativ luftfuktighet, rom 1006	RH Inne
T_Air_1010	Temp. rom 1010 (sør)	-
RH_Air_1010	Relativ luftfuktighet, rom 1010	-
T_Air_1006out	Utetemp.	-
RH_Air_1006out	Relativ luftfuktighet, ute	RH Ute
T_Inside_1006_Wood	Temp. inne, åpen. Rom 1006	Temperatur Inside Tre

T_Inside_1006_Film	Temp. inne, lukket. Rom 1006	Temperatur Inside Plastfilm
T_Outside_1006_Wood	Temp. ute, åpen. Rom 1006	Temperatur Utside Tre
T_Outside_1006_Film	Temp. ute, lukket. Rom 1006	Temperatur Utside Plastfilm
T_Inside_1010_Wood	Temp. inne, åpen. Rom 1010	Temperatur Inside Tre
T_Inside_1010_Film	Temp. inne, lukket. Rom 1010	Temperatur Inside Plastfilm
T_Outside_1010_Wood	Temp. ute, åpen. Rom 1010	Temperatur Utside Tre
T_Outside_1010_Film	Temp. ute, lukket. Rom 1010	Temperatur Utside Plastfilm
Flux_Inside_1006_Wood	Varmeflux inne, åpen. Rom 1006 [W/m ²]	Fluks Inside Tre
Flux_Inside_1006_Film	Varmeflux inne, lukket. Rom 1006 [W/m ²]	Fluks Inside Plastfilm
Flux_Outside_1006_Wood	Varmeflux ute, åpen. Rom 1006 [W/m ²]	Fluks Utside Tre
Flux_Outside_1006_Film	Varmeflux ute, lukket. Rom 1006 [W/m ²]	Fluks Utside Plastfilm
Flux_Inside_1010_Wood	Varmeflux inne, åpen. Rom 1010 [W/m ²]	Fluks Inside Tre
Flux_Inside_1010_Film	Varmeflux inne, lukket. Rom 1010 [W/m ²]	Fluks Inside Plastfilm
Flux_Outside_1010_Wood	Varmeflux ute, åpen. Rom 1010 [W/m ²]	Fluks Utside Tre
Flux_Outside_1010_Film	Varmeflux ute, lukket. Rom 1010 [W/m ²]	Fluks Utside Plastfilm
Volt_Inside_1006_Wood	Volt inne åpen. Rom 1006 [mV]	-
Volt_Inside_1006_Film	Volt inne lukket. Rom 1006 [mV]	-
Volt_Outside_1006_Wood	Volt ute åpen. Rom 1006 [mV]	-
Volt_Outside_1006_Film	Volt ute lukket. Rom 1006 [mV]	-
Volt_Inside_1010_Wood	Volt inne åpen. Rom 1010 [mV]	-
Volt_Inside_1010_Film	Volt inne lukket. Rom 1010 [mV]	-
Volt_Outside_1010_Wood	Volt ute åpen. Rom 1010 [mV]	-
Volt_Outside_1010_Film	Volt ute lukket. Rom 1010 [mV]	-

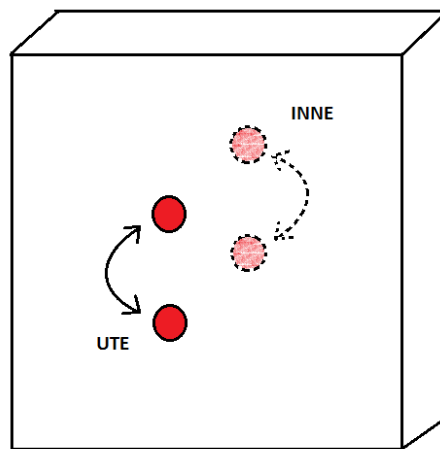
For hver kolonne logges det data hvert minutt. Hver csv-fil inneholder data fra ett døgn med datalogging, noe som gir 1440 rader med data per fil. Måleperioden startet 26.mars 2018. I første omgang skulle det måles over en periode på ett år. Måleperioden har i ettertid blitt forlenget med to år, frem til 2021. Denne oppgaven vil konsentrere seg om utvalgte perioder i

løpet av det første året med målinger. Det betyr at det er over 365 csv-filer med 1440 rader data tilgjengelig, noe som gir veldig store datamengder som skal analyseres. Analysene er gjennomført i Python og, er nærmere beskrevet i Kap. 3.8.

3.5 Endringer i måleoppsett

Mot slutten av måleperioden på ett år ble det vurdert ulike endringer for å verifisere målingene. Potensielle utfordringer som ble tatt opp var påliteligheten til sensorene, påvirkning av direkte sollys, mikroklima inne i overbyggene og plassering av temperatursensorene. I første omgang ble det gjort endringer på nordsiden (Måleoppsett A), da det gjennom tidligere måledata hadde vist seg å gi mest pålitelige data. Endringene ble utført 25. mars 2019.

Den største endringen var plassbytte av varmeflukssensorene, både på innsiden og utsiden, slik at den sensoren som før målte varmegjennomgang til tre, nå måler til plast og omvendt. Byttet er illustrert på Figur 3-9. Hensikten med å bytte plass på sensorene var å utelukke muligheten for at forskjellen i U-verdi målt mot tre og film skyldes målefeil i sensorene.



Figur 3-9: Illustrasjon av plassbytte på varmeflukssensorer

En annen endring som ble gjort var å flytte temperatursensorene, både på innsiden og utsiden, lenger ut fra veggen. Bakgrunnen for dette var at temperatursensorene i det opprinnelige oppsettet i noen tilfeller, som beskrevet tidligere, lå så nærme veggen at det mistenkes at det kan være overflatetemperatur som er målt. Temperatursensorene ble også skjermet mot stråling siden tidligere målinger viste at de så ut til å være påvirket av dette. Til skjerming ble det brukt muffinsformer i aluminium fra Biltema. De ble forsterket med en plastplate i bunnen for mer stabilitet mot vær. Den nye plasseringen og skjermingen av temperatursensorene på utsiden av veggen er vist på Figur 3-10.

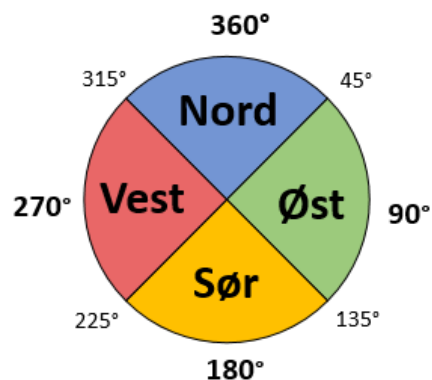


Figur 3-10 Måleoppsett A etter endinger.
Foto: Storm Elektro, mars 2019

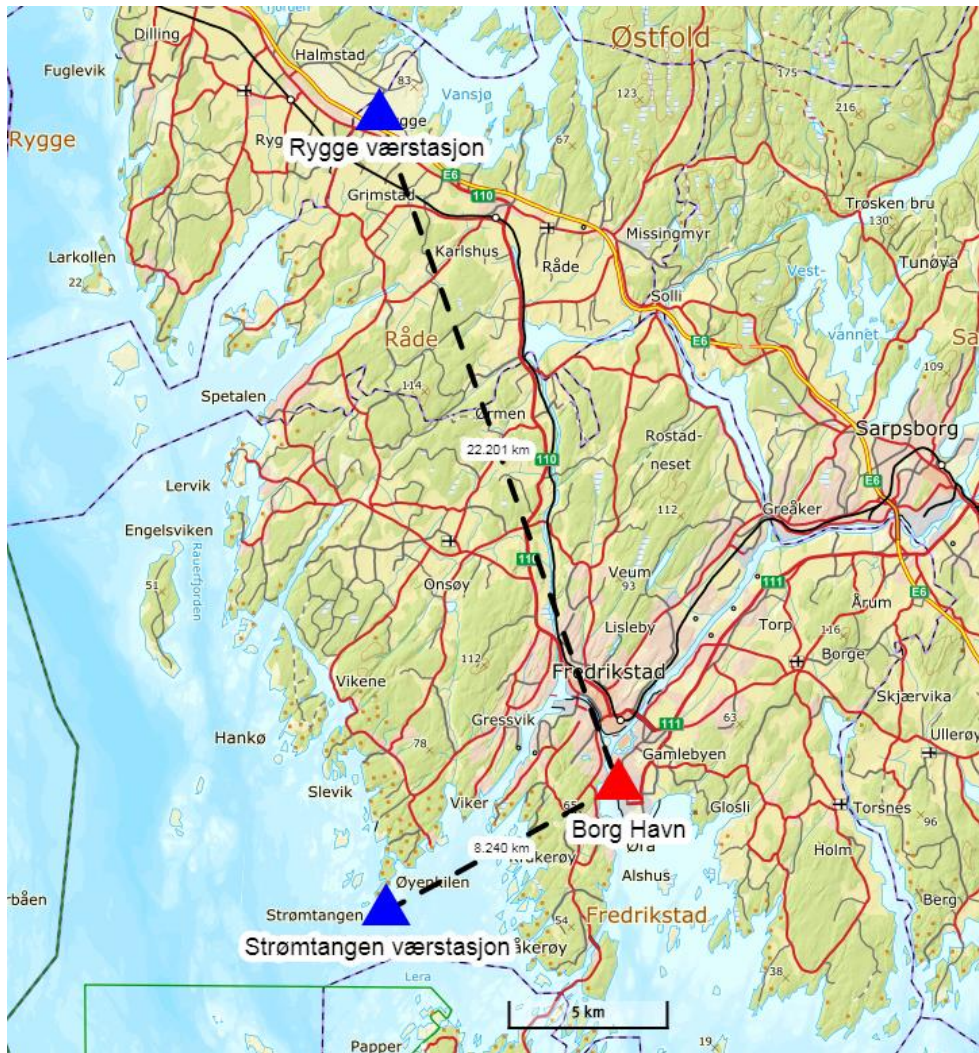
3.6 Klimadata

Klimadata benyttet i oppgaven er hentet fra meteorologiske institutt via nedlastningstjenesten eKlima.met.no. Nærmeste værstasjon til bygget ved Borg Havn er Strømtangen fyr. Data for vind og nedbør er hentet herfra. Skydekkeobservasjoner er noe sjeldnere og derfor hentet fra værstasjonen i Rygge som var den nærmeste værstasjonen med denne typen observasjoner. Plasseringen til begge værstasjonene med avstand til borg Havn er vist i Figur 3-12.

Vindobservasjoner er gjort fire ganger i døgnet, kl. 01.00, 07.00, 13.00 og 19.00. Det er registrert vindstyrke målt i m/s, 10 meter over bakkenivå. I tillegg er vindretning registrert i grader. Gradene representerer retninger hvor vinden kommer fra. Eksempelvis representerer 90° vind fra øst og 360° vind fra nord. I presentasjon av vinddata, er vinden fargekodet etter retning. Figur 3-11 viser hvilke gradsintervaller som faller innenfor de ulike fargene.



Figur 3-11 Definisjon av fargekodet vindretning



Figur 3-12 Plasseringen til værstasjonene Rygge og Strømtangen er merket med blå punkt og markert avstand til Borg Havn som er markert med rødt punkt. Kartet er hentet fra og redigert i norgeskart.no.

Nedbør er registrert i mm pr. døgn mens skydekkeobservasjoner er registrert i åttedeler. Åttedelene beskriver hvor stor del av himmelen som er dekket av skyer, hvor 0 er helt skyfritt og 8 er fullstendig overskyet. Skydekkeobservasjonene er også gjort fire ganger i døgnet, kl. 01.00, 07.00, 13.00 og 19.00. Ved noen anledninger mangler det observasjoner av skydekke på grunn av tåke, snøfokk eller lignende årsaker. I presentasjon av dataene er manglende observasjoner markert med løys røde søyler og graderte observasjoner markert med blå søyler.

3.7 Tidsserieanalyse og viktige statistiske begreper

Dataene fra Borg Havn er tidsseriedata med samplingintervall på 1 minutt. Dataene er stokastiske, noe som betyr at fremtiden bare delvis er bestemt på bakgrunn av tidligere verdier. Eksakte forutsigelser er umulige, og må erstattes av ideen om at fremtidige verdier

har en sannsynlighetsfordeling som er betinget av kunnskap om tidligere verdier (Chatfield, 2004).

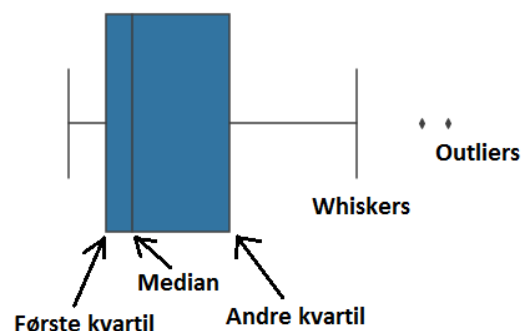
Første steg i en tidsserieanalyse er å plote observasjonene mot tiden for å kunne beskrive dataene. Tidsplottet vil kunne vise sesongvariasjoner, andre sykliske variasjoner, trender og eventuelle ekstremverdier, såkalte outliers. Sesongvariasjoner viser hvordan data varierer avhengig av årstid. Noen tidsseriedata har andre sykliske variasjoner som gjentas innenfor gitte perioder, for eksempel døgnvariasjoner i temperatur. En trend er en langtidsforandring i gjennomsnittsnivå. Dette kan i noen tilfeller forveksles med lange sykliske variasjoner dersom man har kortere tidsserier (Chatfield, 2004).

Steg nummer to vil være å forklare dataene. Det handler om å få en dypere forståelse av tidsseriedataene ved å for eksempel bruke variasjonene i en tidsserie til å forklare variasjonene i en annen (Chatfield, 2004).

Det tredje steget i en tidsserieanalyse handler om å forutse fremtidige verdier basert på den observerte tidsserien, mens det siste steget handler om å gjøre analyser for å forbedre kontrollen over fysiske eller økonomiske systemer (Chatfield, 2004).

I oppgaven er det benyttet verktøyer som fordelingskurver og boksploTT for å begrunne datautvalget. I en fordelingskurve er fordelingen av dataene fremstilt som et grafisk bilde. Langs den vannrette akse vises det du ønsker å finne fordelingen av. For eksempel ønskes det i denne oppgaven blant annet å undersøke fordelingen av målte ΔT -verdier. Den lodrette akse viser antallet målinger som har den aktuelle temperaturen. Ved store mengder data er ofte antallet gitt som et relativt antall, altså en frekvens (Aven, 2017).

Et boksploTT illustrerer median, kvartiler og ekstremverdier for et datasett som vist på Figur 3-13. Den horisontale linjen inne i firkanten markerer medianen. Den nederste linjen i firkanten representerer første kvartil (25% prosentil) og den øverste linjen representerer tredje kvartil (75% prosentil). Det vil si at de midtre 50% av alle dataene ligger innenfor denne boksen, og spennet mellom disse kalles det interkvartile området (IQR). Halene som går ut fra boksen kalles whiskers. De representerer høyeste og laveste verdi i området definert av $1,5 \cdot \text{IQR}$. Alle verdier utenfor den



Figur 3-13 BoksploTT

maksimale verdien for whiskerne kalles outliers og er ekstremverdier i forhold til resten av dataene.

For å glatte ut kurvene og fjerne støy, er det benyttet moving average. Moving average kan på norsk kalles et glidende gjennomsnitt. Det er en metode for å glatte ut fluktuasjoner i kurver ved å bruke gjennomsnittsverdier innenfor gitte intervaller. Det finnes flere ulike måter å vekte moving average. I denne oppgaven er det valgt å bruke enkel moving average hvor alle ledd er vektet likt og sentrert på midten. Den glattede verdien $Sm(x_t)$ med intervallet q , er da gitt av Formel 3.3, hentet fra Chatfield (2004) s.17.

$$Sm(x_t) = \frac{1}{2q + 1} \sum_{r=-q}^{+q} x_{t+r} \quad (\text{Formel 3.3})$$

I Python finnes en funksjon `pandas.dataframe.rolling()` som utfører moving average med ulike input avhengig av hvor stort intervall man ønsker, hvilken vekting man vil ha, og om den nye verdien skal være sentrert eller ikke.

Korrelasjon er et mål på hvor stor statistisk sammenheng det er mellom to målbare størrelser. Korrelasjonskoeffisienten angir styrken av korrelasjonen og er et tall mellom -1 og 1. Positive tall betyr at det er en positiv korrelasjon, mens negative tall betyr at korrelasjonen er negativ. Sammenhengen mellom variablene er sterkere jo nærmere 1 eller -1 korrelasjonskoeffisienten er. Korrelasjonskoeffisient på rundt 0 betyr at dataene er fullstendig uavhengige. I det ligger at kunnskap om den ene størrelsen ikke forteller oss noe om den andre (Frøslie, 2018).

I tidsseriedata finnes to komponenter: variasjoner og trender. Ofte er det nyttig å undersøke korrelasjonene i variasjoner og trender hver for seg. For å fjerne variasjonene kan moving average benyttes. Da finner man sammenhengen i hvordan gjennomsnittsnivået til dataene endrer seg. Selv om det er sammenheng i trend, betyr ikke det at dataene varierer likt. Det er derfor viktig å fjerne trenden før man ser på sammenhengen i variasjoner, slik at ikke sammenhengen i trenden trekker korrelasjonskoeffisienten opp eller ned. En metode for å fjerne trenden, er å ta utgangspunkt i det originale datasettet og trekke fra trenden som er beregnet ved hjelp av moving average. I Python kan dette gjøres enklere ved å bruke første ordens differensiering (`pandas.diff()`) (Brownie-Anderson, 2018).

3.8 Analyse i Python

3.8.1 Hvorfor bruke Python

Grunnlaget for denne oppgaven er som tidligere beskrevet måledata fra et kontorbygg ved Borg Havn i Fredrikstad. Datafilene med rådata inneholder 65 kolonner (se Tabell 3-3) med data som er logget en gang i minuttet. Hver datafil inneholder data for ett døgn, noe som gir 1 440 rader med data og til sammen 93 600 unike data. Måleperioden er på over ett år, noe som potensielt gir 525 600 rader med data eller til sammen 34 164 000 unike data.

Ansatte ved Norsk Treteknisk Institutt har tidligere prøvd å håndtere denne mengden data i Microsoft Excel. Tilbakemeldinger var at programmet stadig «hang seg opp» og at fremstilling av grafer og andre operasjoner tok veldig lang tid. Fordelen med Python er at det er kraftig med mange innebygde kodebiblioteker som enkelt og raskt kan gjøre operasjoner på store mengder data. Python er altså svært tidsbesparende, samtidig som språket er enkelt å lære, med enkle og oversiktlige syntakser i forhold til mange andre programmeringsspråk. Python er også så utbredt at det finnes utallige hjelpesider og hjelpetjenester slik at man alltid kan finne svar på det man lurer på. Sist men ikke minst så er Python gratis og tilgjengelig for alle.

3.8.2 Benyttede kodebiblioteker

Python har som sagt en rekke ulike kodebibliotek som kan importeres og brukes til ulike formål. Videre vil kodebibliotekene som er benyttet i denne oppgaven beskrives kort.

Biblioteket «**NumPy**» (forkortelse for Numerical python) gir deg en array-datastruktur (kan sammenlignes med matriser) som har flere fordeler i forhold til den innbygde listefunksjonen til Python. Den er for eksempel mer kompakt, praktisk og effektiv, særlig når datasettene blir større (VanderPlas, 2017).

Biblioteket «**pandas**» er bygget på NumPy og gir en effektiv implementering av DataFrame. DataFrame er i hovedsak flerdimensjonale array med tilhørende rad- og kolonneetiketter, lignende en tabell (VanderPlas, 2017). I arbeidet med dataene til denne oppgaven, ble Pandas benyttet til å lese inn filene og legge dataene i store DataFrames. Bruk av Pandas gjorde det enkelt å skifte navn på kolonner, gjøre operasjoner på kolonner, legge til nye kolonner og gjøre utvalg av rader og kolonner basert på ulike betingelser. På denne måten var det raskt og effektivt å for eksempel beregne ΔT og U-verdi eller lage nye DataFrames med gjennomsnittsverdier basert på mange tusen rader data.

Biblioteket «**Matplotlib**» er også bygget på NumPy og er et visualiseringsverktøy med flere plattformer. Dette biblioteket har store muligheter med tanke på å lage detaljerte plott, histogram, bardiagram, scatterplott og andre todimensjonale datafremstillinger bare ved noen få kodelinjer. Biblioteket er laget for å skape figurer som er egnet for publisering (McKinney, 2017). Den offisielle siden matplotlib.org (The Matplotlib development team, 2019) ble brukt som hjelp med eksempler og oversikt over alle kommandoer til ulike formål.

«**Seaborn**» er et datavisualiseringsbibliotek basert på Matplotlib. Det brukes til statistiske beregninger og fremstillinger, og tilbyr fornuftige valg for plottestil og fargeinnstillinger (Waskom, 2018; VanderPlas, 2017). Seaborn ble i denne oppgaven hovedsakelig brukt til fremstilling av boksplokk, fordelingskurver (kde-plott) og beregning av korrelasjoner. Andre grafiske fremstillinger ble gjort ved hjelp av Matplotlib for å ha større påvirkning i forhold til det visuelle.

3.8.3 Arbeidsprosessen

Rådatafilene levert av Storm Elektro var filtype CSV (semikolondelt). Innholdet i filen var derimot kommadelt, ikke semikolondelt. For å lettere kunne importere til Python, ble alle filene endret til filtype CSV UTF-8 (kommadelt). Som nevnt ble dataene lagret i en fil per døgn. De ble lagret med navn på formen «`Logfile_dp_åååå_mm_dd`» hvor datoen var det eneste som ble endret fra fil til fil. På denne måten ble det enkelt å skulle lese mange filer etter hverandre i Python ved hjelp av for- og if-løkker.

Pytonskriptene som er benyttet for å gjøre beregninger eller fremstille grafer og figurer til resultat og diskusjon, er vedlagt i Vedlegg H. I tilfeller hvor kodene er tilnærmet like for å fremstille grafer, er det valgt å presentere eksempel i stedet for alle kodene. Pytonskriptet «`functions`» inneholder egendefinerte funksjoner for operasjoner eller beregninger som er gjort på dataene. I de andre skriptene er det henvist til dette scriptet for å utføre disse operasjonene uten å måtte skrive hele koden flere ganger.

Det første som måtte gjøres på datasettet var å endre kolonnenavn. Kolonnenavnene i CSV-filene var lite beskrivende og vanskelig å håndtere. Vedlegg B viser de opprinnelige kolonnenavnene i CSV-filene, nye navn ved analyse og en forklaring på hva kolonneverdiene beskriver. Den egendefinerte funksjonen «`column_names`» i scriptet «`functions`» i Vedlegg H, viser hvordan kolonnenavnene ble endret.

Videre startet arbeidet med å bli kjent med dataene og mulighetene for presentasjon av disse. I starten var det nok å konsentrere seg om data for en dag og opp mot en måned. I løpet av denne prosessen ble blant annet varmefluksverdiene kontrollert. De viste seg å ikke være riktige, og måtte beregnes på nytt ved hjelp av voltsignalene fra datafilene og sensitiviteten i Tabell 3-1. Kontroll av varmefluksen ligger i Vedlegg G. Varmeflukssensorene måler varmefluksen inn mot veggen. På grunn av at noen av sensorene var plassert på utsiden av veggen, var det nødvendig å multiplisere disse med -1 for å få varmefluks i riktig retning.

Videre ble det laget funksjoner for å beregne ΔT og U-verdier etter metoden forklart i Kap 3.1.3. Disse funksjonene ligger også vedlagt i pytonskriptet «functions» i under navnene «beregne_fluks», «delta_T» og «u_verdi».

Plott av temperaturer, varmefluks og U-verdier med ulike gjennomsnittintervaller ble laget i egne skript for den utvalgte perioden og for hele året for å holde mest mulig orden og oversikt. Også sammenligning med værdata, boksplokk og fordelingskurver, korrelasjoner og akkumulert U-verdi ble laget i egne skript. I starten av hvert skript ble de egendefinerte funksjonene brukt for å lese inn de dataene som var ønsket, og utføre flere operasjoner på få linjer. Utdrag fra alle kodene ligger vedlagt i Vedlegg H.

4 Resultat

I dette kapittelet vil det bli presentert resultater fra feltmålingene. Det vil bli lagt vekt på å fremstille resultater som har innvirkning på U-verdien og som kan være med på å forklare trender og variasjoner i dataene. Først vil relevant klimadata bli presentert for å få et bilde av hvordan det kan ha påvirket målingene. Deretter vil varmekraft og U-verdier for en utvalgt periode presenteres sammen med korrelasjonsverdier.

Den utvalgte perioden er valgt basert på klimadata, og presentasjonen av måledata for hele året. Den vil fungere som grunnlag for diskusjon rundt og konklusjon av den reelle U-verdien til KLT, og betydningen av hygrottermisk effekt. Den valgte perioden er desember 2018 og januar 2019. Begrunnelse for valget er diskutert i Kap.5.1.1.

Alle grafene som er presentert i dette kapittelet er glattet med moving average. Intervallet er satt til å være en uke i tilfellene hvor trenden i dataene betraktes, og et døgn i tilfellene hvor det er interessant å se på døgnvariasjoner. Alle resultater presentert i dette kapittelet er fra måleoppsett A, altså på nordsiden av kontorbygget. Begrunnelse for datautvalg er gitt i Kap.5.1.

4.1 Håndberegning av U-verdi beregnet etter NS-EN ISO 6946

Til sammenligning er U-verdien til konstruksjonen beregnet i henhold til NS-EN ISO 6946. Fremgangsmåten for beregningen er beskrevet i byggforskserien, byggedetaljer 471.008 (SINTEF Byggforsk, 2018a)

$$R_{sjikt} = \frac{d_{sjikt}}{\lambda_{KLT}} = \frac{0,25m}{0,12 W/mK} = 2,08 m^2K/W$$

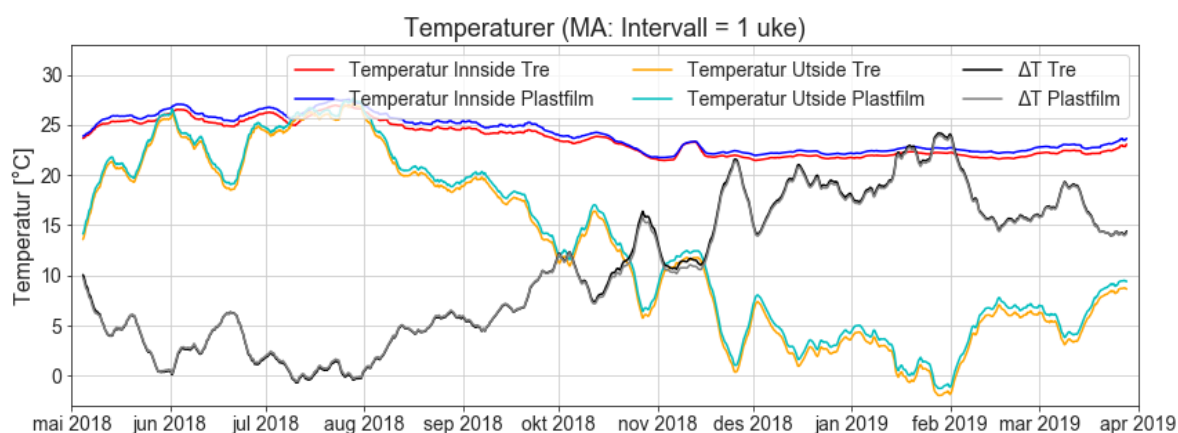
$$R_{tot} = R_{si} + R_{sjikt} + R_{se} = (0,13 + 2,08 + 0,04) m^2K/W = 2,25 m^2K/W$$

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{2,25 m^2K/W} = \mathbf{0,44 W/m^2K}$$

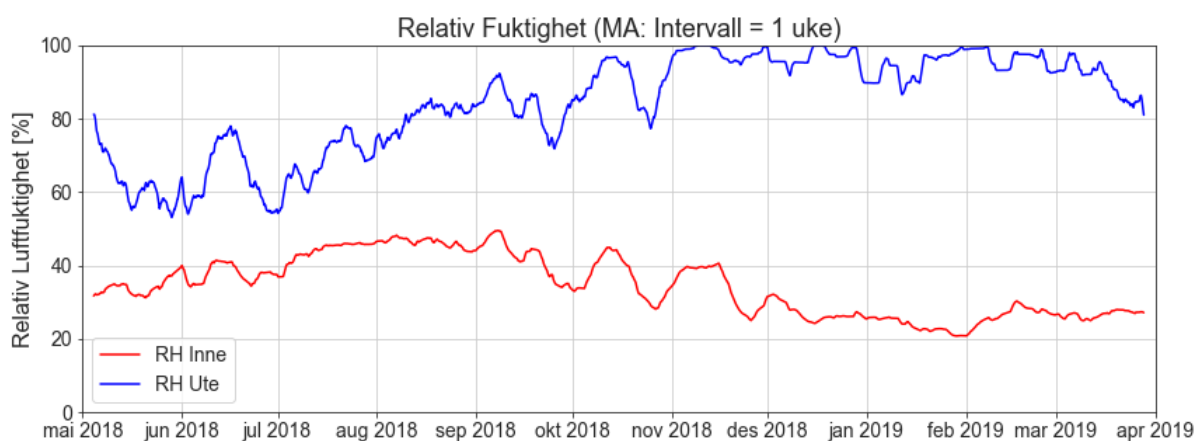
Den tradisjonelt beregnede U-verdien til KLT-veggen er **0,44 W/m²K**, og vil fungere som en sammenligningsverdi for feltmålingene.

4.2 Presentasjon av klimadata

Figur 4-1 og Figur 4-2 viser to ulike klimaparametere målt ved kontorbygningen over en periode på nesten et år.



Figur 4-1 Temperaturtrender for måleoppsett A (Nordvegg). Rød og blå linje representerer innetemperaturen, oransje og turkis linje representerer utetemperaturen og svart og grå linje representerer ΔT for henholdsvis tre- og plastoverflate.



Figur 4-2 Relativ luftfuktighet ved måleoppsett A (Nordvegg)

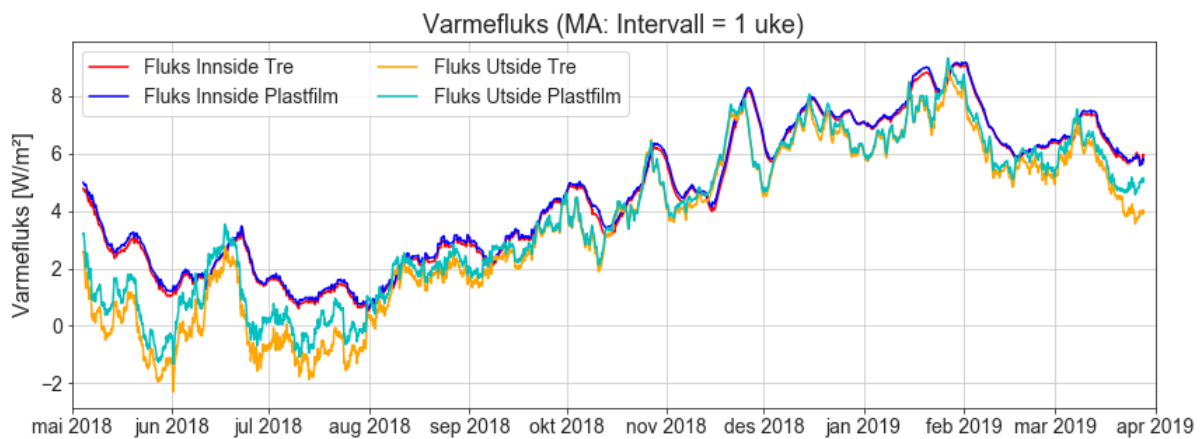
Figur 4-1 viser at innetemperaturen er relativt stabil over hele året. Utetemperaturen varierer naturlig nok mer. Sommeren 2018 var uvanlig lang og varm, og det gjenspeiles i de høye gjennomsnittstemperaturene på sommeren. I løpet av høsten går gjennomsnittstemperaturen gradvis nedover, og ligger på mellom 0 og 5°C på vinteren. Temperaturene gjenspeiler et typisk mildt kystklima. Figuren viser også en graf for ΔT . Siden innetemperaturen holder seg relativt stabil, er denne grafen omtrent en speilvendning av utetemperaturen.

Figur 4-2 viser at relativ luftfuktighet ute er lavere på sommeren og høyere på vinteren, mens inne er den høyere på sommeren og lavere på vinteren. Det er viktig å huske på at vanddampinnholdet i uteluften følger motsatt trend av RF i uteluften, noe som gjenspeiles i kurven for RF i inneluften.

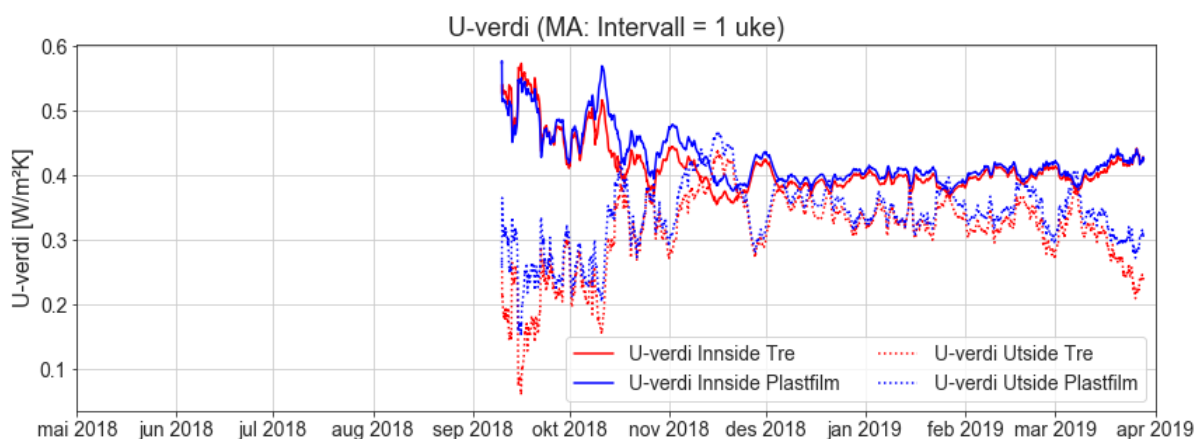
Flere klimadata finnes i Vedlegg C. Der finnes skydekkeobservasjoner for november 2018 til mars 2019 og vindhastigheter og nedbørsmengde for oktober 2018 til mars 2019. Dataene er presentert månedsvise i søylediagrammer for et mer visuelt inntrykk. Dette er datagrunnlag som er med på å bestemme hvilken periode som skal undersøkes nærmere og vil være grunnlag for noe av diskusjonen i Kap.5.1.

4.3 Presentasjon av data for hele året

I dette delkapittelet fremstilles trenden i målt varmekraft og de beregnede U-verdiene for hele året. I Vedlegg E er rådata presentert for å gi et bilde av hvordan dataene ser ut ubehandlet. Rådataene viser store variasjoner og mye støy, og understreker behovet for å måtte bli behandlet med for eksempel moving average.



Figur 4-3 Trend i varmekraft for måleoppsett A (nord). Rød og blå linje representerer varmekraftverdiene målt fra innsiden, mens oransje og turkis linje representerer varmekraftverdier målt fra utsiden målt mot henholdsvis tre og plastfilm.



Figur 4-4 Trend i U-verdi ved måleoppsett A (nord). Blå og rød graf viser henholdsvis til sensorene som måler mot tre og plastfilm. Heltrukket linje viser U-verdier målt fra innsiden av veggen og stiplet linje viser U-verdier målt fra utsiden.

Figur 4-3 viser at varmekraften er lav på sommeren og høy på vinteren. Det kan se ut til at kurvene følger samme trenden som kurven for ΔT . Varmefluksen målt av sensorene på utsiden ser ut til å variere mer enn varmekraften målt fra innsiden, og ligger for det meste litt lavere.

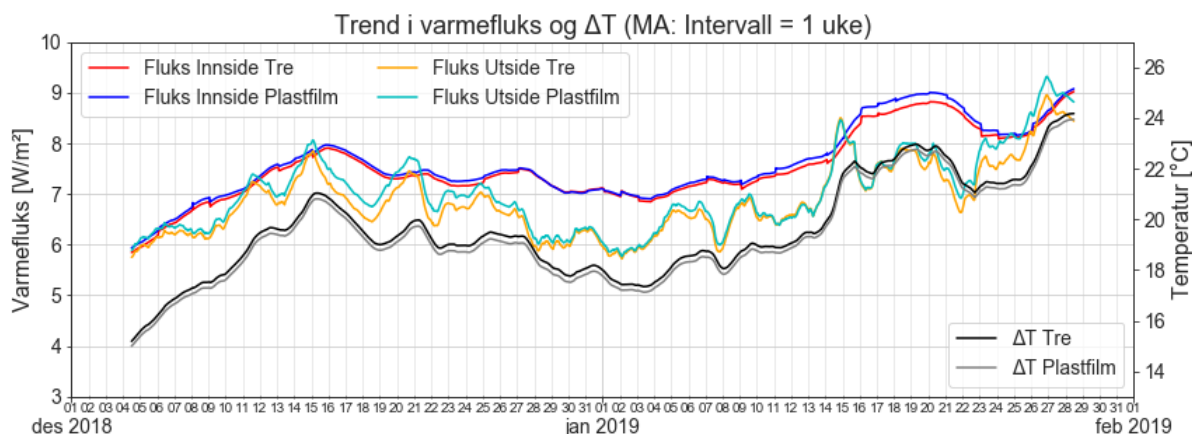
I Figur 4-4 mangler store deler av grafen på sommerhalvåret. Som vist av Figur 4-1 ligger gjennomsnittlig ΔT rundt 0°C på denne tiden. I beregningen av U-verdi blir varmekraft dividert med ΔT (Formel 3.2). Den vil derfor ikke være definert i de tilfellene hvor $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$, og en midling av ikke definerte verdier, er ikke mulig.

4.4 Varmefluks for utvalgt periode

I tillegg til trenden i varmekraft, er også døgnvariasjonene presentert for å studere hvordan varmekraften varierer på innsiden i forhold til på utsiden. I tilknytning til grafene er korrelasjonskoeffisientene til kurvene presentert i tabeller. Det samme gjelder for U-verdiene som er presentert i neste delkapittel. Forkortelsene som er benyttet i korrelasjonstabellene er forklart i Tabell 4-1. I korrelasjonstabellen for døgnvariasjonene er trenden fjernet for å gi et mer riktig bilde av variasjonene.

Tabell 4-1 Forklaring av forkortelser benyttet i korrelasjonstabellene

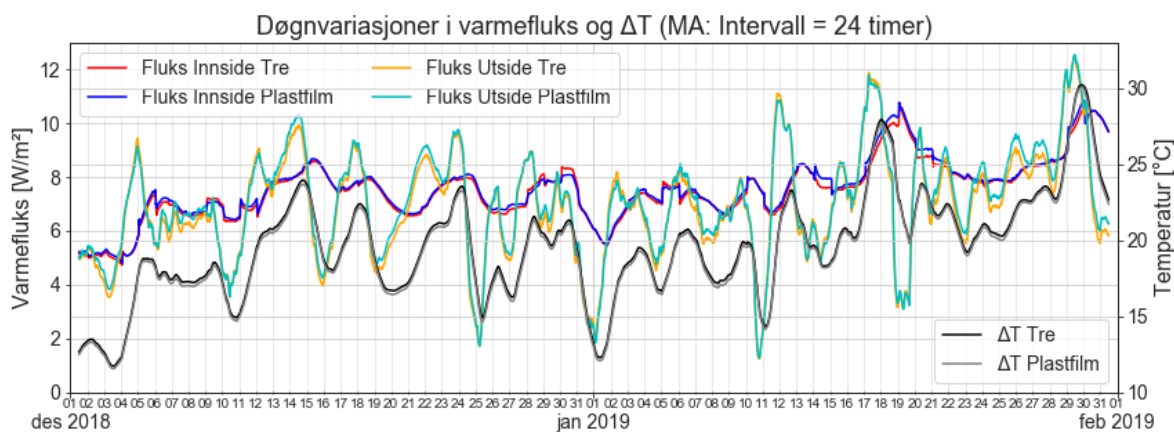
FORKORTEELSE	FORKLARING
$\Delta T T$	ΔT Tre
$\Delta T P$	ΔT Plastfilm
FIT	Fluks Innside Tre
FIP	Fluks Innside Plastfilm
FUT	Fluks Utside Tre
FUP	Fluks Utside Plastfilm
UIT	U-verdi Innside Tre
UIP	U-verdi Innside Plastfilm
UUT	U-verdi Utside Tre
UUP	U-verdi Utside Plastfilm



Figur 4-5 Trend i varmekraft og ΔT for måleoppsett A (Nordvegg)

Tabell 4-2 Korrelasjonskoeffisienter for trendene i varmekraft og ΔT . Forkortelsene er forklart i Tabell 4-1.

	$\Delta T T$	$\Delta T P$	FIT	FIP	FUT	FUP
$\Delta T T$	1	1.000	0.976	0.974	0.896	0.888
$\Delta T P$	1.000	1	0.976	0.975	0.896	0.888
FIT	0.976	0.976	1	0.998	0.789	0.779
FIP	0.974	0.975	0.998	1	0.791	0.777
FUT	0.896	0.896	0.789	0.791	1	0.990
FUP	0.888	0.888	0.779	0.777	0.990	1

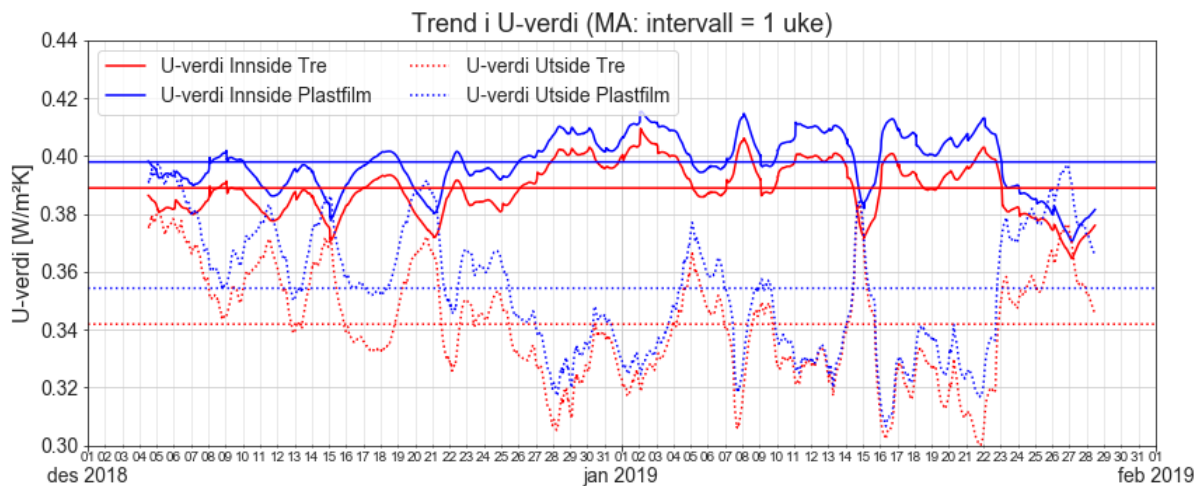


Figur 4-6 Døgnvariasjoner i varmekraft og ΔT for måleoppsett A (Nordvegg)

Tabell 4-3 Korrelasjonskoeffisienter for døgnvariasjonene i varmekraft og ΔT . Forkortelsene er forklart i Tabell 4-1

	$\Delta T T$	$\Delta T P$	FIT	FIP	FUT	FUP
$\Delta T T$	1	0.999	0.280	0.246	0.572	0.582
$\Delta T P$	0.999	1	0.272	0.248	0.574	0.585
FIT	0.280	0.272	1	0.699	-0.073	-0.065
FIP	0.246	0.248	0.699	1	-0.071	-0.064
FUT	0.572	0.574	-0.073	-0.071	1	0.991
FUP	0.582	0.585	-0.065	-0.064	0.991	1

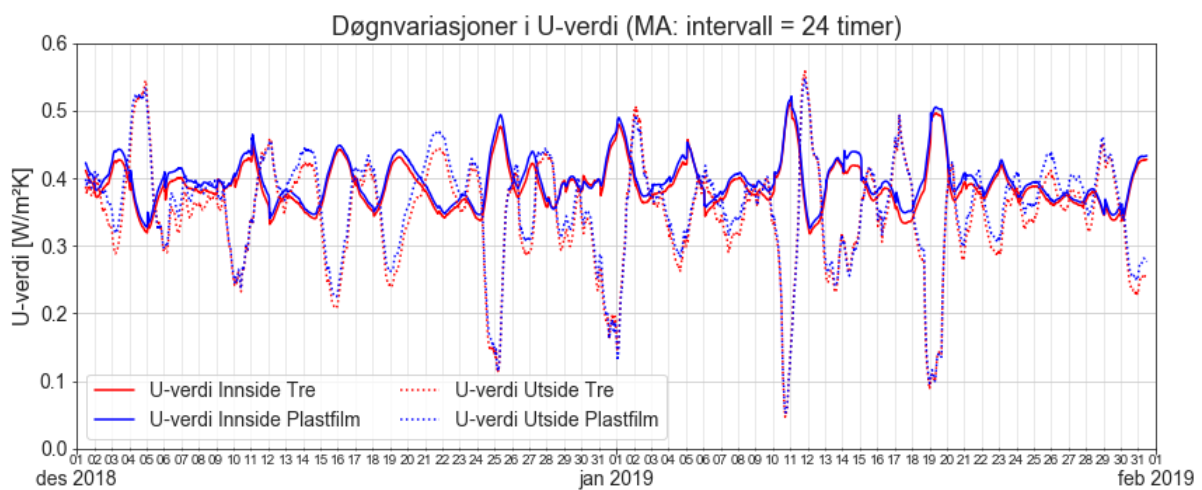
4.5 U-verdi for utvalgt periode



Figur 4-7 Trend i U-verdi ved måleoppsett A (Nordvegg). De horisontale linjene viser gjennomsnittsverdier for perioden.

Tabell 4-4 Korrelasjonskoeffisienter for trendene i U-verdi. Forkortelsene er forklart i Tabell 4-1.

	UIT	UIP	UUT	UUP
UIT	1	0.982	-0.785	-0.839
UIP	0.982	1	-0.779	-0.846
UUT	-0.785	-0.779	1	0.968
UUP	-0.839	-0.846	0.968	1

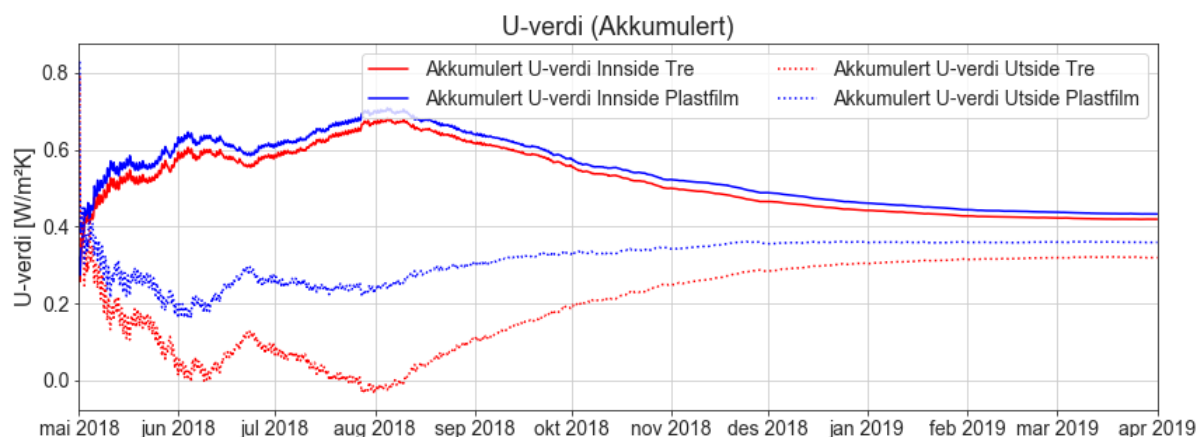


Figur 4-8 Døgnvariasjoner i U-verdi ved måleoppsett A (Nordvegg).

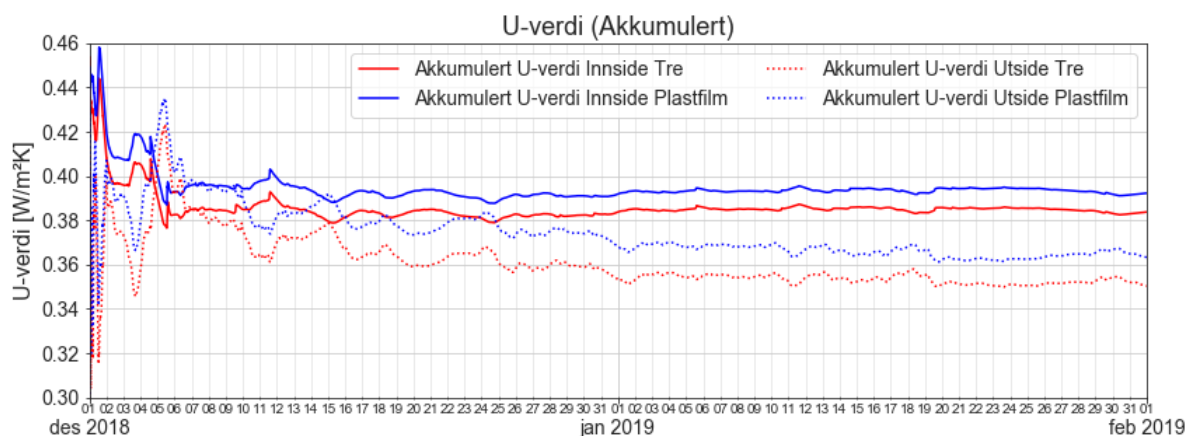
Tabell 4-5 Korrelasjonskoeffisienter for døgnvariasjonene i U-verdi. Forkortelsene er forklart i Tabell 4-1

	UIT	UIP	UUT	UUP
UIT	1	0.746	-0.375	-0.369
UIP	0.746	1	-0.376	-0.372
UUT	-0.375	-0.376	1	0.988
UUP	-0.369	-0.372	0.988	1

4.6 Akkumulert U-verdi, beregnet i henhold til gjennomsnittsmetoden i ISO 9869



Figur 4-9 Akkumulert U-verdi for måleoppsett A (nordvegg) over hele året. De asymptotiske U-verdiene er gitt i Tabell 4-6.



Figur 4-10 Akkumulert U-verdi for måleoppsett A (nordvegg) over den utvalgte perioden. De asymptotiske U-verdiene er gitt i Tabell 4-6

Kurvene for akkumulert U-verdi, vist i Figur 4-9 og Figur 4-10 for henholdsvis hele året og for den utvalgte perioden. Den akkumulerte U-verdien for hele året tenderer mot å gå fra hverandre i starten og gjennom hele sommeren. Mot slutten av sommeren snur kurvene og går mot hverandre helt til de stabiliserer seg og går mot en asymptotisk verdi. Kurven for den utvalgte perioden stabiliserer seg derimot raskere mot en asymptotisk verdi. Det tar bare en uke før U-verdien er relativt stabil, og etter to uker er U-verdien tilnærmet konstant resten av perioden.

Verdiene for akkumulert U-verdi ved slutten av den utvalgte perioden, og ved slutten av året er presentert i Tabell 4-6 sammen med gjennomsnittlig verdi for den utvalgte perioden. Differansene mellom U-verdiene er så små at det er valgt å presentere verdiene med tre gjeldende siffer i stedet for to.

Tabell 4-6 Presentasjon av gjennomsnittlig U-verdi og akkumulert U-verdi ved slutten av utvalgt periode og ved slutten av året. Differansen mellom U-verdi målt mot plastfilm og tre er også beregnet. Det indikerer den gjennomsnittlige hygroteermiske effekten for perioden. U-verdi er gitt i W/m^2K .

Beskrivelse	Utvalgt periode		Hele året
	Gjennomsnittlig U-verdi	Akkumulert U-verdi	Akkumulert U-verdi
U-verdi Inne Plastfilm —————	0.398	0.392	0.433
U-verdi Inne Tre —————	0.389	0.384	0.419
Differanse (plastfilm – tre) inne	0.009	0.008	0.014
U-verdi Ute Plastfilm	0.354	0.363	0.360
U-verdi Ute Tre	0.342	0.350	0.320
Differanse (plastfilm – tre) ute	0.012	0.013	0.040

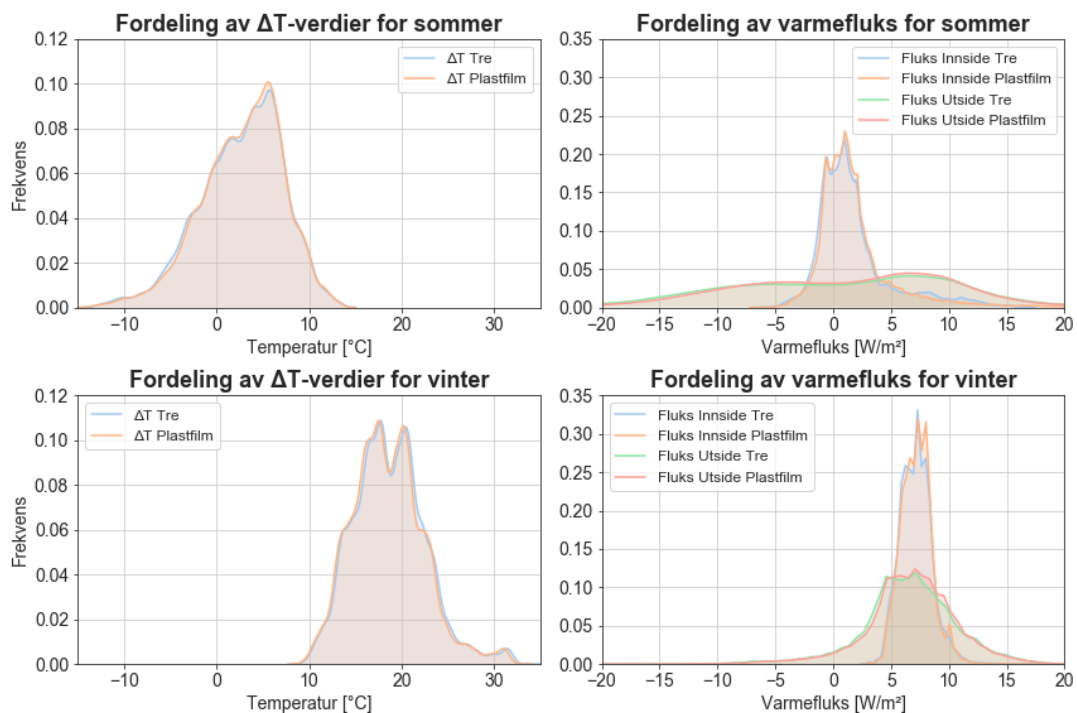
5 Diskusjon

I dette kapittelet vil datautvalget begrunnes, og resultatene bli diskutert opp mot teori og forventinger for å besvare problemstillingen. Siden tidsserien det opereres med bare går over et år, er det valgt å omtale sesongvariasjonene som trend i datasettet. Når det gjelder variasjoner vil det hovedsakelig bli sett på døgnvariasjoner, men i noen tilfeller også timesvariasjoner.

5.1 Datautvalg

De store datamengdene, beskrevet i Kap.3.4, gir mange muligheter, men også behov for å sette begrensninger for hvor mye som kan undersøkes i dybden. På grunn av at dette er feltmålinger, vil det være store rom for feilkilder, og dataene må derfor håndteres kritisk. Det er ønskelig å fokusere på de dataene som er mest troverdige og best beskriver den reelle U-verdien til KLT-veggen. Videre følger derfor argumentasjon og begrunnelser for datautvalget. Utvalget er hovedsakelig knyttet til valg av måleperiode og hvilke måleoppsett som skal betraktes. Anbefalinger fra Huksefluks sin brukermanual og ISO 9869 er lagt til grunne sammen med fordelingskurver, boksplokk som viser ekstremverdier og tidsserieplott av temperaturer og varmeflukt.

5.1.1 Valg av måleperiode



Figur 5-1 Viser fordelingen av ΔT og varmeflukt for måleoppsett A (nordvegg) målt over både plastfolie og treoverflate. Sommerfordelingen inkluderer månedene juni, juli og august (2018), mens vinterfordelingen inkluderer desember (2018), januar og februar (2019).

Fordelingskurvene i Figur 5-1 viser at ΔT -verdiene på sommeren er konsentrert mellom -10 og 10°C. En av ulempene med dette er at liten ΔT gjør usikkerheten i U-verdiberegningen stor. Tidligere forskning hevder at temperaturdifferansen bør være over 10°C for å redusere feilprosenten i resultatene til under 10% (Biddulph, et al., 2014). Fordelingen for vinteren i Figur 5-1 viser at hovedvekten av ΔT -verdiene ligger mellom 10 og 30°C, altså innenfor anbefalt verdi. U-verdiberegningene vil derfor trolig være mer nøyaktige for vintermånedene.

En naturlig konsekvens av at ΔT er høyere på vinterhalvåret er at også varmekraften er høyere. Fordelingskurvene viser at fordelingen av varmekraft har flyttet seg fra å ligge rundt 0 W/m² på sommeren til å ligge rundt 7 W/m² på vinteren. Fordelingen er også mer konsentrert på vinteren i forhold til sommeren, og fordelingskurven for innsiden og utsiden har likere form, noe som indikerer at målingene er mer like. I en ideell situasjon under stabile forhold, skal varmekraften under like betingelser være den samme målt fra innsiden og utsiden. Grafen som viser varmekraft for hele året, i Figur 4-3, viser at varmekraftskurvene ligger nærmere hverandre på vinteren enn på sommeren. Dette indikerer det at det er færre feilkilder på vinteren enn på sommeren.

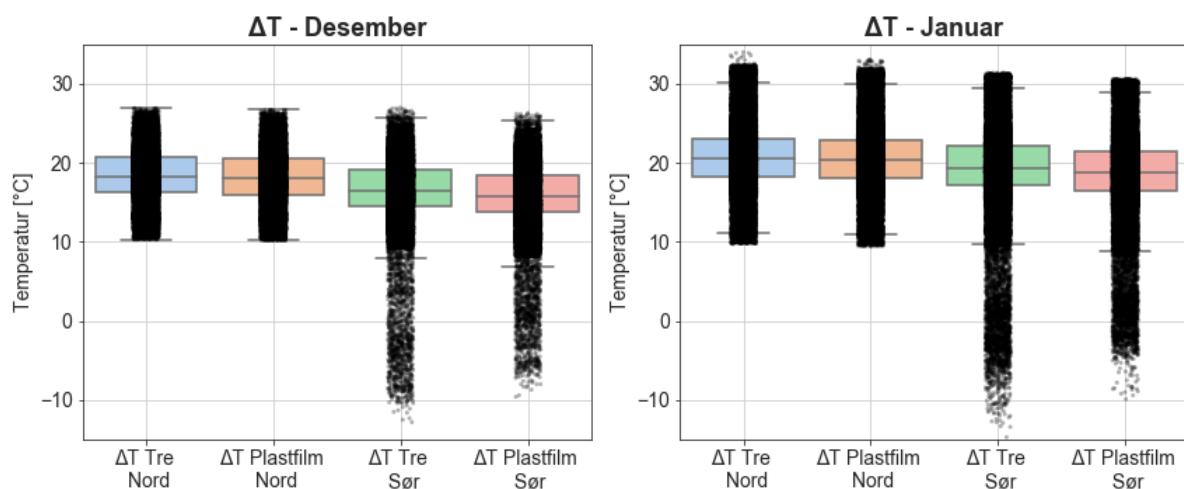
Et annet argument for å benytte måledata fra vinterhalvåret i analysen, er at varmetapet gjennom bygningskroppen er størst under fyringssesongen. Det er derfor i denne perioden mest kritisk at U-verdien tilfredsstiller kravene. Beregninger gjort på målinger i denne perioden, øker sannsynligheten for at resultatet er troverdig i den mest kritiske perioden, og dermed kan være dimensjonerende.

Med bakgrunn i fordelingskurvene for ΔT og varmekraft er det blitt argumentert for at målenøyaktigheten er størst på vinterhalvåret. For å avgrense en periode på vinterhalvåret som grunnlag for diskusjon og konklusjon, ble det sett nærmere på værdata i Vedlegg C og klimadata presentert i Figur 4-1 og Figur 4-2. Lav utetemperatur og høy grad av skydekke ble vektet tyngst i valget av periode. Det ble til slutt valgt å gå videre med en periode på to måneder, desember 2018 og januar 2019. Desember har ifølge skydekkeobservasjoner i Vedlegg C-1 lengere perioder med fullstendig overskyet vær, noe som er ønskelig for å unngå problemer knyttet til direkte solstråling. Januar var den kaldeste måneden, men hadde ikke like stor grad av skydekke som desember. Denne måneden var likevel et naturlig valg for å få målinger over en kontinuerlig periode på to måneder.

5.1.2 Valg av måleoppsett

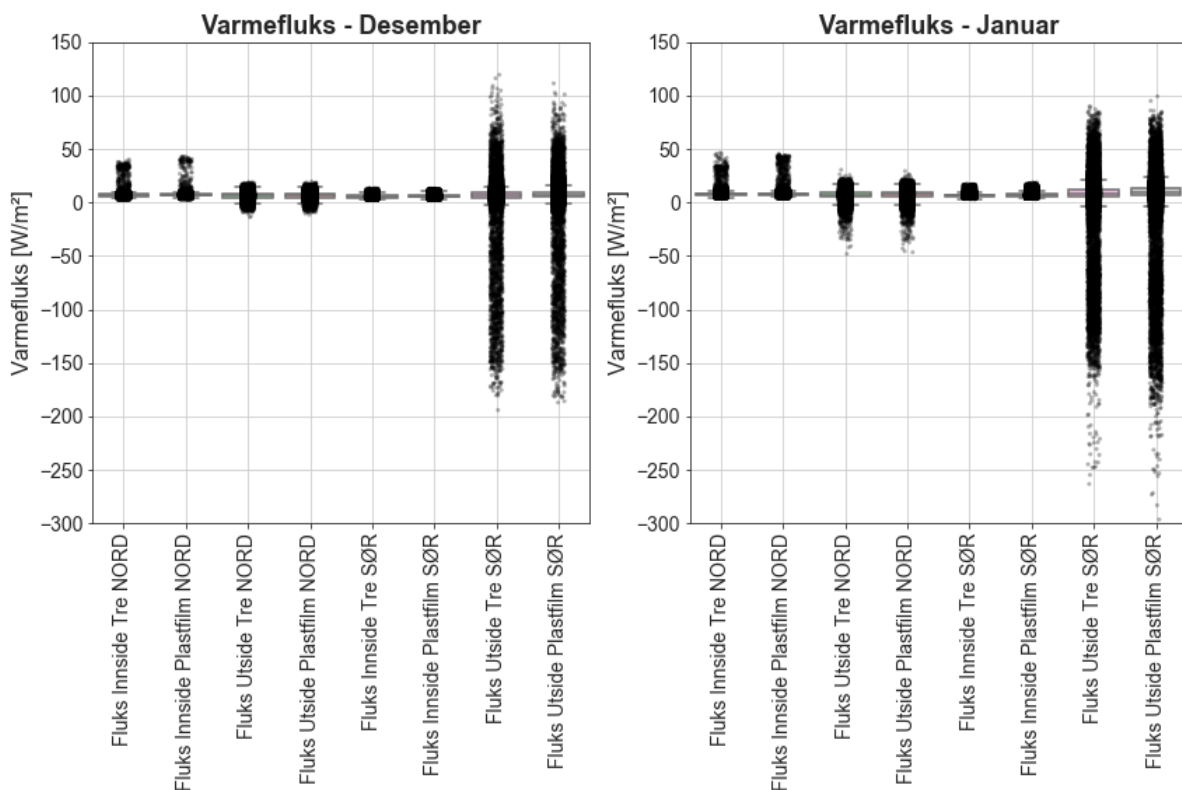
Til nå har det blitt argumentert for å rette fokus mot målingene gjort i desember og januar. Videre vil det diskuteres hvilke måleoppsett som skal danne grunnlag for resultatet. Som beskrevet i Kap.3.2 finnes det tre måleoppsett (A, B og C) som måler på tre ulike vegger. Ideelt sett ønskes det å bruke data fra alle tre måleoppsettene for å kunne sammenligne verdier målt etter ulike betingelser, men på grunn av påliteligheten til dataene og tidsbegrensning var det nødvendig å gjøre et utvalg.

Det er stilt spørsmål om måleutstyret som er benyttet til måling av varmekraft fungerer like godt på utsiden av veggen som på innsiden. Det er også usikkerheter rundt hvordan måleutstyret reagerer på vær og vind. Hukseflux som er leverandør av måleutstyret, anbefaler i sin brukermanual ((Hukseflux Thermal Sensors B. V., 2016) at målinger gjøres på innsiden av en nordvendt vegg. I ISO 9869 står det at målesensorene skal plasseres på den siden av veggen hvor temperaturen er mest stabil, og at måleutstyret skal skjermes fra regn og direkte stråling. Disse anbefalingene følges ikke ved noen av måleoppsettene siden det er nødvendig å måle varmekraften fra begge sider av veggen. De to måleoppsettene som vender sørover antas å være ekstra utsatt for stråling, og virker derfor ifølge anbefalingene å være mest utsatt for feilkilder. For å få et bilde av hvordan resultatene i den utvalgte perioden ser ut med tanke på ekstremverdier og eventuelle feilmålinger, er rådataene for ΔT og varmekraft for måleoppsett A og B fremstilt i boksplokk i Figur 5-2 og Figur 5-3. Boksplokkene gir et bilde av fordelingen av dataene og eventuelle ekstremverdier (de sorte prikkene som ligger utenfor whiskergrensene markert med korte horisontale streker antas å være ekstremverdier).



Figur 5-2 Boksplokk av ΔT for måleoppsett A (1006) og B (1010), målt over både plastfolie og treoverflate for desember (2018) og januar (2019). De svarte prikkene representerer data. Områder hvor det er helt svart betyr stor datatetthet.

Figur 5-2 viser at det er store mengder ekstremverdier for ΔT registrert ved måleoppsett B. Særlig ligger det mange ekstremverdier under den nedre whiskergrensen, helt ned under 0°C . Det er lite sannsynlig at det er varmere ute enn inne i desember og januar, og kommer trolig av at temperatursensoren er blitt påvirket av solstråling. Dette blir diskutert nærmere i Kap.5.5.1. For måleoppsett A ligger alle målingene for ΔT i desember innenfor grensen for høyeste og laveste observasjon. I januar finnes noen ekstremverdier, men plottet viser at målingene ikke strekker seg langt utenfor grensene, og at de er relativt likt fordelt utenfor høyeste og laveste whiskergrense. Tatt i betraktning at temperaturer kan variere mye i løpet av døgnet og fra dag til dag i løpet av en måned, ser fordelingen for måleoppsett A fornuftig ut og mye bedre enn fordelingen til måleoppsett B.



Figur 5-3 Boksplokk av varmekraft for måleoppsett A (1006) og B (1010), målt både inne og ute på plast- og treoverflate for desember (2018) og januar (2019).

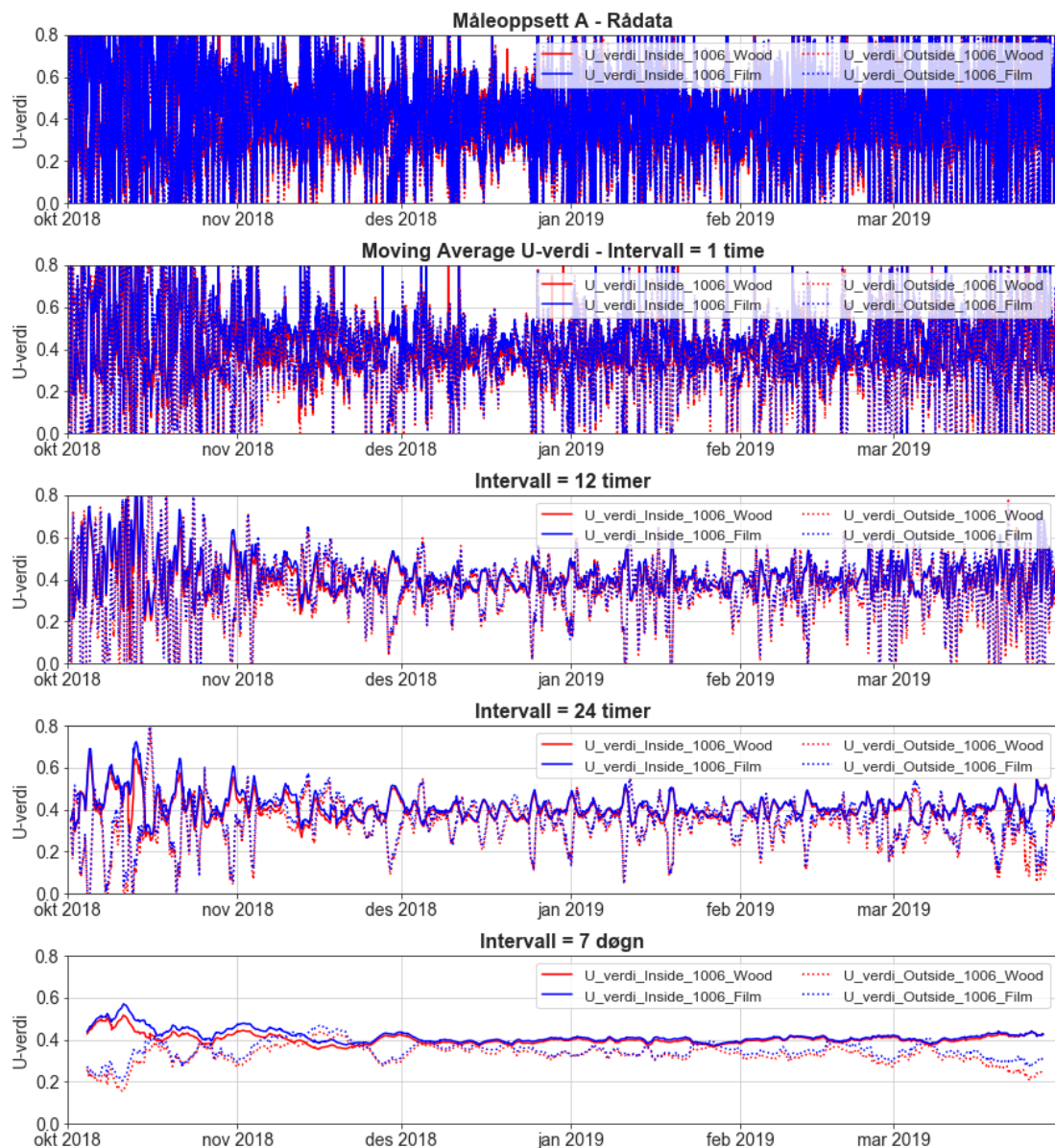
Boksplokkene i Figur 5-3 viser store mengder ekstremverdier for varmekraftmålingene ved måleoppsett B, men bare på utsiden. Målingene på innsiden av måleoppsett B ser ut til å være relativt gode med tanke på å unngå ekstremverdier. Grunnen til dette kan være at sensorene er montert på innsiden av en sydvendt vegg, og dermed godt skjermet for direkte sollys. Ved måleoppsett A ser variasjonene ut til å være mye mindre på utsiden, mens de er litt større på innsiden sammenlignet med måleoppsett B. Totalt sett, ser det likevel ut til at måleoppsett A er minst utsatt for feilmålinger. Likevel er det mange data som ligger utenfor øvre og nedre

whiskergrense. Det er derfor fortsatt viktig å være kritisk til resultatene basert på disse målingene.

På bakgrunn av boksplokkene som er beskrevet over og anbefalinger fra Huksefluks og den internasjonale standarden ISO 9868 om å plassere huksefluksensorene på innsiden av en nordvendt vegg, er det valgt å rette fokus mot målingene fra måleoppsett A, og bruke mindre tid på målingene fra de andre oppsettene. Valget forsterkes av rådataplottene i Vedlegg E, som viser tydelig større ekstremverdier og mer støy ved måleoppsett B, både for temperaturmålingene og varmefluksen.

5.1.3 Behandling av dataene

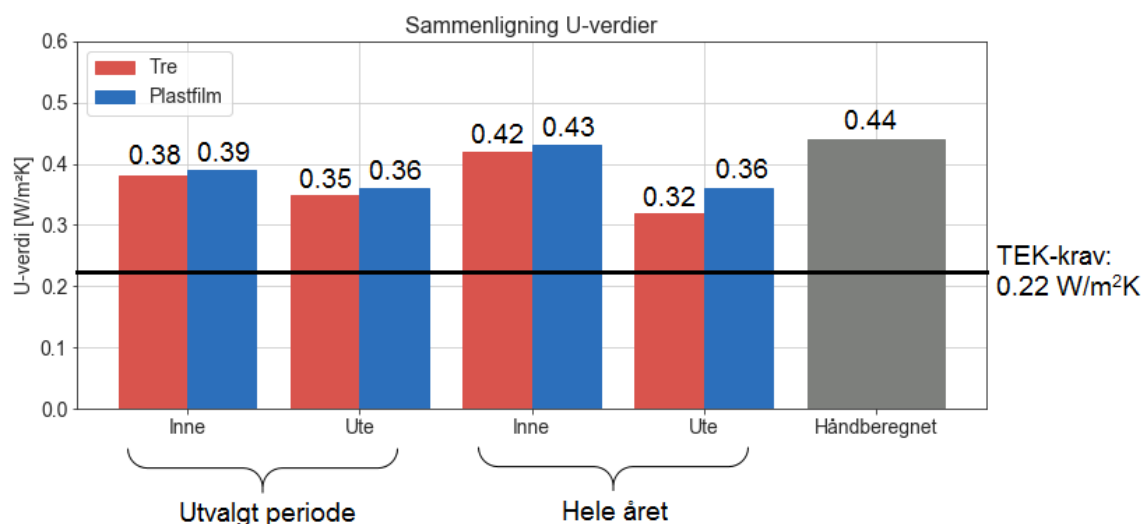
Ved plotting av rådataene oppstår ekstremt mye «støy» i grafene på grunn av ytre påvirkningsfaktorer, målefeil og lite samplingsintervall. For å glatte ut kurvene og tydeliggjøre trender og variasjoner, er det benyttet moving average. Metoden er forklart i Kap.3.7, men valg av gjennomsnittsintervaller er begrunnet her. Figur 5-4 viser hvordan støyet i U-verdimålingene dempes fra rådata til ulike intervaller av moving average. Det er valgt å bruke to ulike intervaller i denne oppgaven. For å se på trendene i dataene, er det brukt intervall på 7 dager. Figur 5-4 viser at et intervall på 7 dager fjerner døgnvariasjonene og gjør dataene mer ryddige og oversiktlig. I noen kortere tidsrom, er variasjonen i løpet av døgnet interessant. I disse tilfellene er det brukt intervall på 24 timer for å dempe støyet fra minuttverdiene. Figur 5-4 viser at støyet er dempet, og at grafen likevel ivaretar variasjonene i løpet av døgnet med toppene til riktig tid i forhold til hvordan de varierer i rådataene.



Figur 5-4 Sammenligning av ulike intervaller av moving average for U-verdier ved måleoppsett A (nord).

5.2 Sammenligning av tradisjonell U-verdiberegning og feltmålt U-verdi

Tabell 4-6 i resultatkapittelet viser gjennomsnittlige og akkumulerte U-verdier for den utvalgte perioden, og for hele året. De akkumulerte U-verdiene er visualisert i Figur 5-5, sammen med den håndberegnete U-verdien til veggen, for lettere å kunne sammenligne dem.



Figur 5-5 Sammenligning av akkumulert U-verdi for den utvalgte perioden og hele året sammen med håndberegnet U-verdi.

Ifølge håndberegning etter NS-EN ISO 6946, skal U-verdien til veggen være 0,44 W/m²K. Feltnålingene indikerer, som vist i Figur 5-5, at U-verdien for den utvalgte perioden ligger mellom 0,35 og 0,38 W/m²K. Den målte U-verdien er altså lavere enn den tradisjonelt beregnede U-verdien. Resultatet viser at også målingene mot plastfilm på mellom 0,36 og 0,39 W/m²K ligger litt under den beregnede verdien. Det betyr at den hygrotermiske effekten ikke alene kan forklare at den reelle U-verdien er lavere enn den tradisjonelt beregnede U-verdien.

Det kan tenkes at målingene mot plastfilm kan bli litt påvirket av hygrotermisk effekt siden området som er dekket er relativt lite, og at det kan bidra til at denne verdien er lavere enn den håndberegnete U-verdien. En annen faktor som kan påvirke dette, er varmeovergangsmotstanden. Den standardiserte verdien av varmeovergangsmotstand på utsiden av et bygg er satt til å være 0,04. Men varmeovergangsmotstanden er ikke en konstant. Den varierer med vind, temperatur og materialets strålingsegenskaper, og er en dimensjonerende verdi. Derfor vil den trolig være lavere enn den reelle varmeovergangsmotstanden til veggen, og den håndberegnete U-verdien vil i mange tilfeller være høyere enn den reelle U-verdien. Sammenhengen mellom vind og varmeovergangsmotstand vil bli nærmere omtalt i Kap.5.5.1.

Den feltnålte U-verdien er altså ikke så langt fra den håndberegnete U-verdien, noe som kan tyde på at målemetoden fungerer på nordveggen. Den hygrotermiske effekten ser derimot ikke ut til å være av særlig betydning. Det kan tyde på at målemetoden ikke er ideell for å avdekke

hygrotermisk effekt. Ønsket om å påvise en U-verdi ned mot TEK-kravet, viser seg altså å ikke være innfridd da den målte U-verdien er mye større enn kravet markert i Figur 5-5.

Videre vil forskjellene i de feltmålte verdiene kort diskuteres. Figur 5-5 viser at de akkumulerte verdiene for hele året er høyere målt fra innsiden og like eller lavere målt fra utsiden i forhold til verdiene for den utvalgte perioden. Det er altså større differanse mellom U-verdiene målt på innsiden og utsiden dersom man inkluderer målinger for hele året fremfor å bruke målinger fra vinteren. Det er også tydelig at forskjellen i U-verdimålingene mellom den utvalgte perioden og hele året er størst på innsiden. Dette kommer trolig av at ekstremverdiene for varmekulsmålingene på innsiden er mer skjevfordelte enn varmekulsmålingene på utsiden. Dette er vist i et boksplokk av varmekul for sommer og vinter i Vedlegg F. Ved å inkludere sommerperioden, øker mengden ekstremverdier, og gjennomsnittsverdien vil bli forskjøvet. Siden skjevfordelingen er større på innsiden enn utsiden og de divideres på den samme ΔT -verdien, er det naturlig at forskjellen i U-verdi er større på innsiden. Den store skjevfordelingen på innsiden kommer trolig av at varmekulssensorene kan være påvirket av solstråling. Dette vil bli nærmere undersøkt i Kap.5.4.1.

Andre forskjeller som er verdt å nevne, er forskjellen mellom målingene på innsiden og utsiden for den samme perioden. Ideelt sett skal de være tilnærmet like, og Figur 4-4 viser at de er mye nærmere hverandre i den utvalgte perioden i forhold til resten av året. Solstråling kan muligens forklare litt av denne forskjellen. I perioder med sol, er det varmere i luften ute, noe som gjør at varmekulsen målt fra utsiden blir lavere. Det samme burde vert tilfelle på innsiden, men dersom varmekulssensoren blir utsatt for direkte solstråling, blir den lurt til å tro at varmekulsen utover er veldig høy. I Kap.5.4.1 blir dette bekreftet ved sammenligning av varmekul og skydekkeobservasjoner. Til sammen kan dette føre til at U-verdien målt på innsiden kan bli litt høyere enn U-verdien målt på utsiden. En annen faktor som kan påvirke dette er igjen varmeovergangsmotstanden. På grunn av større varmeovergangsmotstand på innsiden, vil dermed U-verdien målt fra utsiden kunne bli litt større enn U-verdien målt fra innsiden.

5.3 Beregning av reell U-verdi og hygrotermisk effekt

Som beskrevet i Kap.3.2, er feltmålingene lagt opp på den måten at måling fra innsiden har til hensikt å fange opp hygrotermisk effekt på utsiden, og måling fra utsiden har til hensikt å fange opp hygrotermisk effekt på innsiden. Sammen med en referansemåling på hver side, gir

dette fire ulike U-verdier for hvert måleoppsett. Det er en forutsetning at fukttransport gjennom 250mm KLT er tilnærmet neglisjerbar slik at fukt som tas opp av treet på utsiden også går tilbake til luften på utsiden, og på samme måte på innsiden av veggen.

Hvordan de fire U-verdiene skal kombineres for å finne total hygrotermisk effekt og målt U-verdi til veggen, er lite utprøvd, og det finnes ingen fasit. Det har vært usikkerhet både fra min og veileders side hvordan dette fungerer. I tillegg til å se på verdiene hver for seg, ble det til slutt valgt to tilnærminger for hvordan reell U-verdi og total hygrotermisk effekt skulle beregnes.

Tilnærming 1: Reell U-verdi betraktes som gjennomsnitt av målingene mot tre (Formel 5.1). Hygrotermisk effekt beregnes som differansen mellom gjennomsnittlig av målinger mot plastfilm (referansemåling) og gjennomsnitt av målinger mot tre (reell U-verdi). Resultatene for denne tilnærmingen er presentert i Tabell 5-1.

$$U_{reell,1} = \frac{U_{tre,inne} + U_{tre,ute}}{2} \quad (\text{Formel 5.1})$$

$$U_{ref} = \frac{U_{plastfilm,inne} + U_{plastfilm,ute}}{2} \quad (\text{Formel 5.2})$$

Tabell 5-1 U-verdi og hygrotermisk effekt beregnet etter tilnærming 1.

Tilnærming 1	U-verdi for utvalgt periode [W/m ² K]
Referansemåling (mot plastfilm)	0.378
Reell U-verdi (mot tre)	0.367
Hygrotermisk effekt (Differanse)	0.011

Tilnærming 2: Tenker at dersom forutsetningen om at fukttransporten gjennom veggen er neglisjerbar, så vil den hygrotermiske effekten på begge sider av veggen gi et positivt bidrag til U-verdien. Reell U-verdi beregnes da som gjennomsnitt av referansemålingene (Formel 5.2) minus den totale hygrotermiske effekten og beregnes etter Formel 4.1. Resultatet for denne tilnærmingen er presentert i Tabell 5-2.

$$U_{reell,2} = U_{ref} - \Delta U_{inne} - \Delta U_{ute} \quad (\text{Formel 4.1})$$

Hvor:

$$\Delta U = U_{plastfilm} - U_{tre} \quad (\text{Forskjell som har til hensikt å vise hygrotermisk effekt})$$

Tabell 5-2 U-verdi og hygrottermisk effekt beregnet etter tilnærming 2.

Tilnærming 2	U-verdi for utvalgt periode [W/m ² K]
Referansemåling	0.378
Reell U-verdi	0.357
Hygrottermisk effekt	0.021

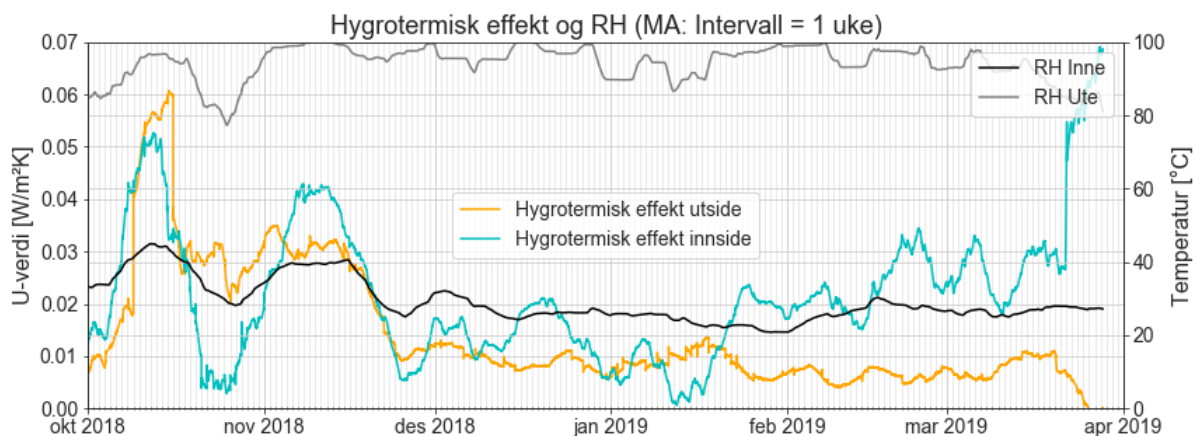
Den første tilnærmingen vil bare inkludere et gjennomsnitt av den hygrottermiske effekten på hver side. Den andre tilnærmingen vil inkludere fullt bidrag fra hygrottermisk effekt på hver side. I realiteten er det mange faktorer og forhold som påvirker resultatene, og målemetoden er som sagt lite utprøvd til dette formålet. Trolig vil den første tilnærmingen være konservativ, mens den andre tilnærmingen er svært optimistisk. Det antas at de riktige verdiene ligger en plass mellom resultatene fra de to tilnærmingene. For å vite sikkert hvordan dette fenomenet oppfører seg, kreves mer kunnskap og forskning. Det velges videre å se på den hygrottermiske effekten på hver side av veggen, heller enn den totale effekten. I konklusjonen velges det å benytte den mest konservative resultatet, men det er nyttig å vite at potensialet trolig er større.

5.4 Påvirkning av hygrottermisk effekt på varmegjennomgangsmotstanden

Figur 4-4 og Figur 4-7 viser at kurven for U-verdi målt mot tre ligger under kurven for U-verdi målt mot plastfilm, både på innsiden og utsiden. Denne forskjellen har til hensikt å dokumentere bidraget den hygrottermiske effekten har til U-verdien. Den gjennomsnittlige forskjellen for perioden er beregnet i Tabell 4-6, og viser seg å være svært liten. For å få et bedre bilde av differansen mellom kurvene er den plottet i Figur 5-6, sammen med relativ luftfuktighet for samme periode. Formel 5.1 og 5.2 viser hvordan den hygrottermiske effekten i Figur 5-6 er beregnet.

$$\text{Hygrottermisk effekt utside} = U_{\text{inne,film}} - U_{\text{inne,tre}} \quad (\text{Formel 5.1})$$

$$\text{Hygrottermisk effekt innside} = U_{\text{ute,film}} - U_{\text{ute,tre}} \quad (\text{Formel 5.2})$$



Figur 5-6 Hygrotermisk effekt på utsiden og innsiden plottet sammen med relativ luftfuktighet (RH) ute og inne.

Den turkise kurven viser den målte hygrotermiske effekten på innsiden. Den ser ut til å følge samme trend som relativ luftfuktighet på innsiden, med unntak av slutten av mars hvor den hygrotermiske effekten på innsiden ser ut til å øke mye selv om relativ luftfuktighet ikke øker. Trenden viser altså større hygrotermisk effekt på innsiden på høst og vår enn vinteren, noe som trolig henger sammen med at innvendig relativ luftfuktighet er høyere på sommerhalvåret enn på vinterhalvåret.

Selv om luftfuktigheten har mye å si for den hygrotermiske effekten, er det også mange andre faktorer som spiller inn. Blant annet trengs en ekstern varmekilde, som for eksempel sollys for å tørke ut treverket slik at det igjen kan ta opp fuktighet. Sammenligning med skydekke fra desember og januar (Vedlegg C-1) viser at når det er høy grad av skydekke, som for eksempel i midten av desember, er den hygrotermiske effekten større enn i midten av januar hvor det er mye sol. Forholdene knyttet til relativ luftfuktighet og temperatur i rommet er tilnærmet like. En forklaring på dette kan være at siden rommet det måles i har glassfasade mot vest, vil strålingsenergi fra solen være med på å tilføre nok energi til at treverket i perioder som for eksempel midten av januar tørker ut. Den hygrotermiske effekten vil i denne perioden være lav fordi prosessen krever energi. I perioder med overskyet vær kan treet ta opp fuktighet, og dermed avgi varme, og den hygrotermiske effekten øker.

Den hygrotermiske effekten på utsiden ser ut til å være størst på høsten for så å bli mindre og mindre utover våren. Dette henger ikke helt sammen med relativ luftfuktighet i uteluften som er høyere på vinteren enn på sommeren. En naturlig forklaring på dette er at KLT-veggen i løpet av sommeren har tørket ut i det varme været. På høsten øker relativ fuktighet i uteluften som en naturlig effekt av at temperaturene synker. Treet vil i denne perioden kunne ta opp fuktighet, og den hygrotermiske effekten vil være relativt stor. Siden veggen det måles på er

nordvendt, vil ikke den utsettes for direkte solstråling. Når temperaturene i tillegg blir lavere og lavere, skaper det utfordringer med tanke på å kvitte seg med fuktighet når treet begynner å bli mettet. Det avgis mindre og mindre varme jo flere lag med adsorberte vannmolekyler på materialet, og den hygrotermiske effekten kan dermed stagnere. Når våren kommer, temperaturene stiger og relativ luftfuktighet synker, vil treet starte å tørke ut. Denne prosessen krever energi, og den hygrotermiske effekten blir mindre. I Figur 5-6 kan man se at den hygrotermiske effekten på våren har tendenser til å bli negativ.

På sommeren er det ønskelig med motsatt effekt av på vinteren. Ved at trevirket tar opp fuktighet i den fuktige sommernatten og tørker ut på varme sommerdager kan det være med på å redusere kjølebehovet. Resultater fra forskning på energieffekten av fuktbufningskapasiteten til hygroskopiske bygningsmaterialer av Osanyintola og Simonson (2006) viser at det er mulig å redusere kjøleenergien med opptil 30% ved bruk av hygroskopiske materialer og kontrollert mekanisk ventilasjon.

Basert på feltmålingene er det vanskelig å si noe sikkert om den hygrotermiske effekten på sommeren, på grunn av store usikkerheter knyttet til U-verdiberegningene som resultat av lave temperaturdifferanser og mange ekstremverdier. Det kan forventes at effekten på innsiden er større på sommeren enn på vinteren, ettersom relativ luftfuktighet vanligvis er høyere på sommeren og tilgang på varme er større. Ut fra grafen for akkumulert U-verdi for hele året i Figur 4-9 kan det se ut til å stemme. Det er likevel vanskelig å si noe sikkert basert på denne grafen på grunn av de alle rede nevnte store mengdene med ekstremverdier i sommerperioden, som fører til at grafen viser U-verdier ned mot 0.

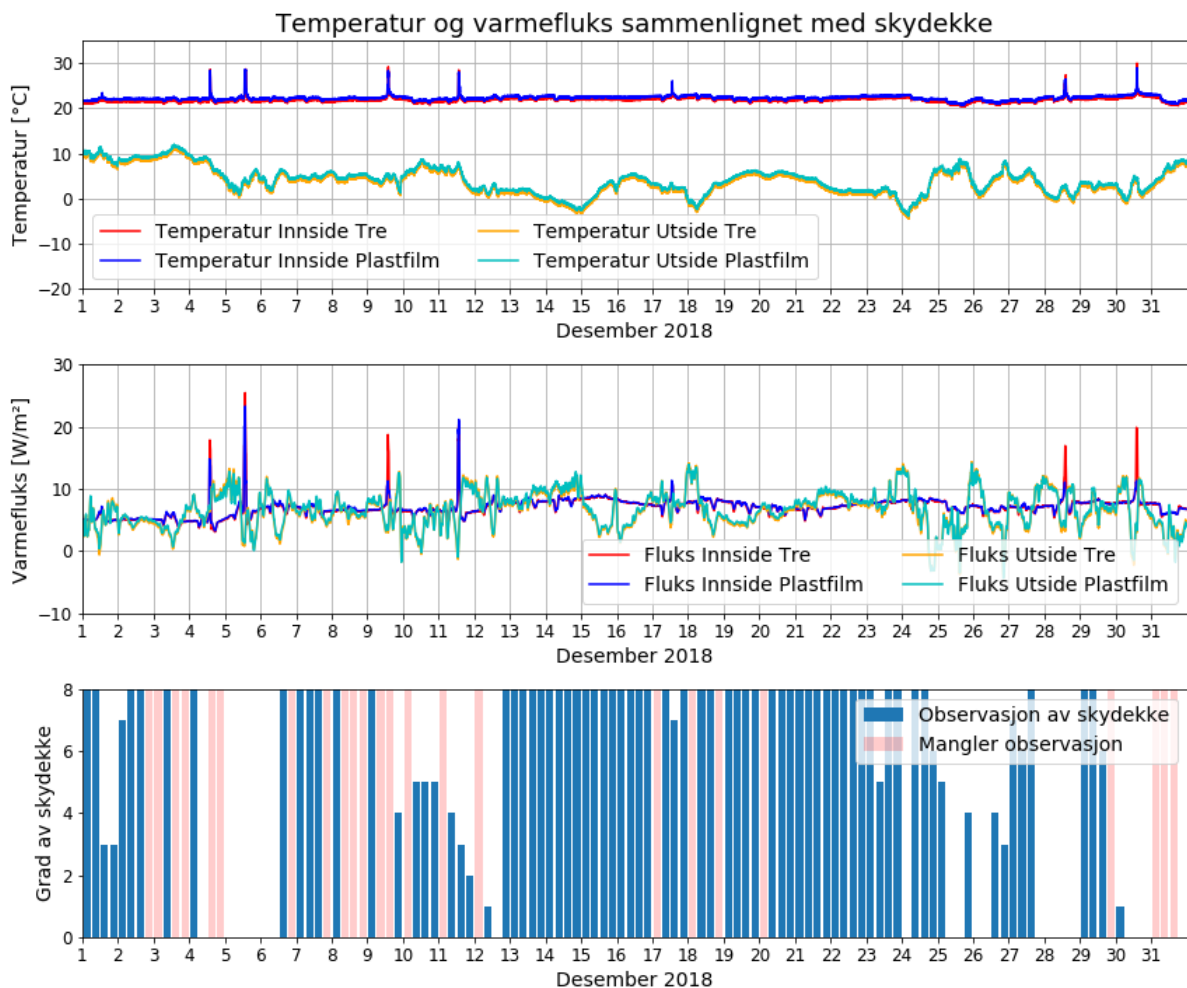
Det er altså vist at feltmålingene indikerer en hygrotermisk effekt, men at den er veldig liten. Det er grunn til å sette spørsmål ved målemetoden, og om den er egnet til å fange opp de hygrotermiske egenskapene til treet, noe som diskuteres i Kap.5.5. Men det er også grunn til å undersøke betingelsene rundt bygget de måles på. Vanlige fukttilskudd som oppvask, dusj, klestørking og matlaging er fraværende i kontorbygg. De har også vanligvis god ventilasjon og stort luftskifte. På grunn av dette vil variasjonen i relativ luftfuktighet trolig være mindre enn i for eksempel boligbygg, og bidraget fra hygrotermisk effekt blir mindre enn det kunne vært. En annen faktor som kan påvirke den hygrotermiske effekten er at klimaet i Fredrikstad vanligvis er stabilt, mildt og med lite nedbør. Kanskje ville den hygrotermiske effekten vært større i et område med mer skiftende klima. Selv om dette er tilfelle, vil det være vanskelig å

skulle inkludere så lokale forskjeller i et dimensjonerende minstekrav i en forskrift, som det overordnede målet var.

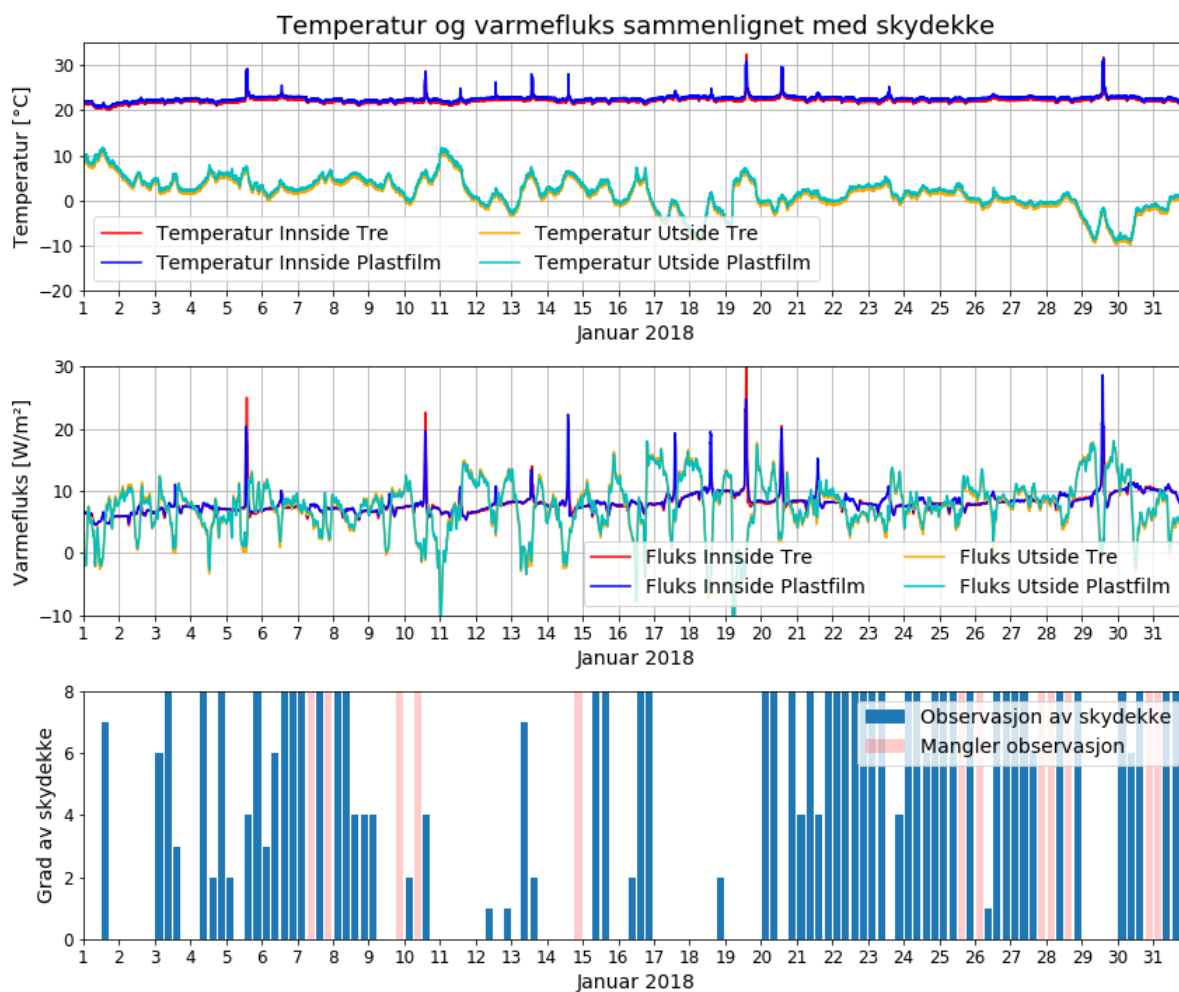
5.5 Vurdering av målemetoden

5.5.1 Påvirkning fra vær og vind

Nærmeste værstasjon som gjør skydekkeobservasjoner er, som tidligere beskrevet, Rygge i Østfold. Selv om værstasjonen er et stykke unna Borg Havn, terrenget er flatt og de lokale værvariasjonene er små. Det vil derfor gi en god indikasjon på om det er fullstendig overskyet eller lettere skydekke i området. For å se på solpåvirkning, er det valgt å se på timesvariasjoner da solen kan være fremme i små perioder av gangen. Figur 5-7 og Figur 5-8 viser varmefluks og temperaturer for desember og januar sammenlignet med skydekkeobservasjoner.



Figur 5-7 Temperatur og varmefluks ved måleoppsett A sammenlignet med grad av skydekke for desember (2018).
Værdata er hentet fra meteorologiske institutt fra værstasjon Rygge, Østfold.



Figur 5-8 Temperatur og varmekraft ved måleoppsett A sammenlignet med grad av skydekke for januar (2019).
 Værdata er hentet fra meteorologiske institutt fra værstasjon Rygge, Østfold.

Figur 5-7 og Figur 5-8 viser at det er sammenheng mellom skydekkeobservasjonene og temperatur- og varmekraftmålingene på innsiden av måleoppsett A. Ekstremverdiene som gir de spisse toppene i grafene ser ut til å oppstå på dager med lite eller ingen skydekke. Målepunktene på innsiden ligger sørvendt med glassfasade på vestveggen (se Figur 3-3 og Figur 3-7). Det er derfor mulig at målesensorene blir påvirket av direkte solstråling når solen kommer lavt nok til å skinne inn gjennom vinduene. Noen dager, særlig i januar er det ikke topper på innsiden av måleoppsett A selv om det ser ut til å være klarvær. Ser man derimot på målingene på utsiden av måleoppsett B, som finnes i Vedlegg D-1 og Vedlegg D-2, kan man se topper tilnærmet hver dag det ikke er fullstendig overskyet. Toppene er også tydelig større enn ved måleoppsett A, noe som styrker mistanken i Kap.5.1.2 om at målingene ved måleoppsett B er sterkt påvirket av solstråling. Siden vinduene i glassfasaden har regulerbar solskjerming, er det tenkelig at sensorene på innsiden av måleoppsett A noen dager kan ha blitt skjermet.

Målepunktene på utsiden ligger omtrent nordvendt. Det betyr at de mest sannsynlig ikke blir påvirket av direkte sollys. Verken temperatursensorene eller varmekulssensorene ser ut til å være særlig påvirket av om det er overskyet vær eller ikke. Eneste som kan observeres, er at varmekulsen varierer mer når det er klarvær, særlig i januar. En forklaring på dette er at stråling reflekteres fra vannet eller bygninger i nærheten slik at det påvirker sensorene. En annen forklaring er at temperaturforskjellene mellom dag og natt er større i perioder med klarvær, noe som kan lese av temperaturgrafene i Figur 5-7 og Figur 5-8, og som kan påvirke fluksmålingene. Trolig skyldes de store variasjonene en blanding av begge forklaringene.

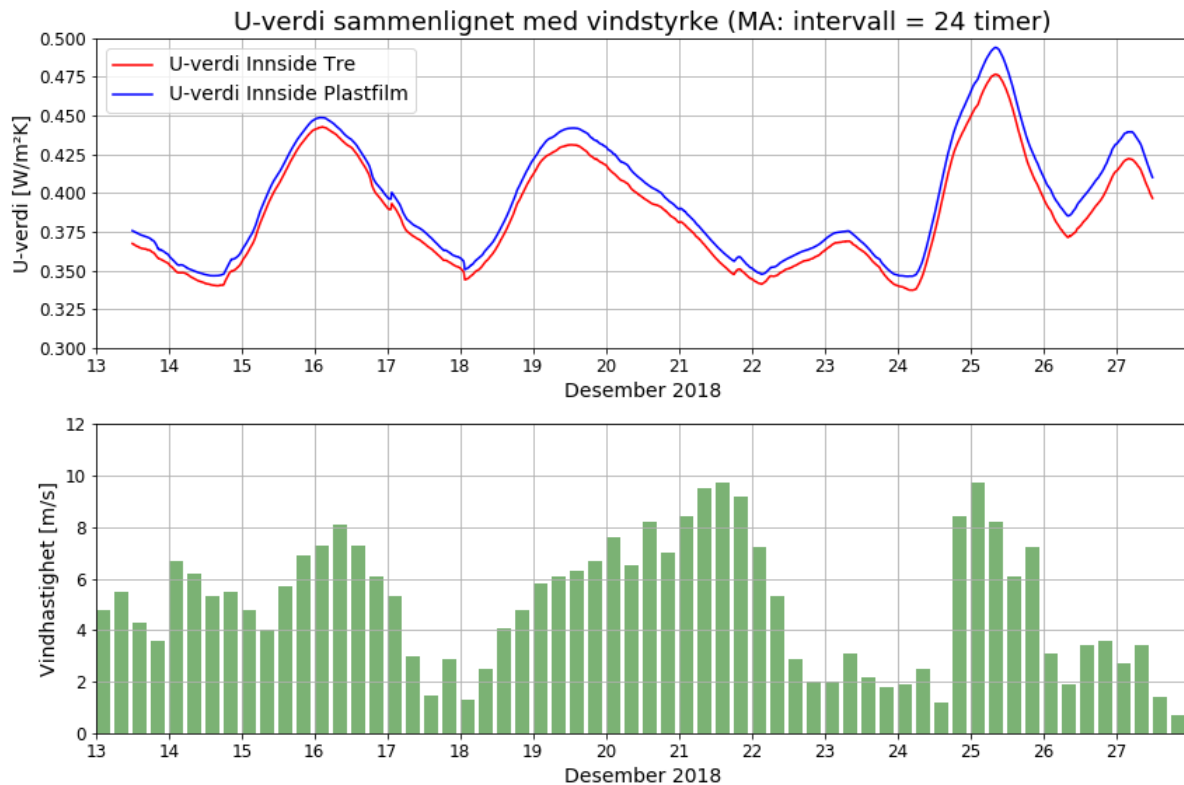
Generelt viser grafene at kurven for varmekulsn målt mot plastfilm (blå kurve) ligger litt over kurven for varmekulsn målt mot tre (rød kurve). De dagene sensorene er påvirket av sollys, er det derimot motsatt i mange tilfeller. Da ligger de røde toppene høyest. I måleoppsettet er det denne varmekulssensoren som sitter høyest på veggen. En teori er at den øverste sensoren blir mer påvirket av sollys enn de som sitter lenger nede på veggen. Varmekulssensorene er i utgangspunktet beskyttet med et overbygg, men de er plassert i ulik høyde. Når solen kommer lavt nok til å skinne inn gjennom vinduene, helt bort til måleoppsettet, vil sensoren som sitter høyest oppe bli truffet av solen først og lengst. Bildet av innsiden til måleoppsett A i Figur 5-9 er tatt rett frem omtrent på høyde med øverste sensor. Her kan man tydelig se at nederste sensor er mer skjermet dersom kamera hadde vært strålingskilde. Dersom man ser for seg at det i stedet er solen som treffer fra denne høyden, kan det tenkes at den øverste sensoren påvirkes mer av solstråling enn den nederste. En konsekvens av dette kan være at den gjennomsnittlige varmekulsen målt fra innsiden, mot tre, blir unaturlig høy. Korrelasjonskoeffisientene i Tabell 4-3, bekrefter at det er noe som påvirker en sensor mer enn den andre. Korrelasjonen mellom varmekulsen målt fra innsiden mot tre og mot plastfilm er veldig mye dårligere enn korrelasjonen mellom de andre sensorene som måler tilnærmet det samme.



Figur 5-9 Innsiden av måleoppsett A. Den øverste sensoren måler mot tre og den nederste mot plastfilm på utsiden.

Vind kan påvirke den reelle U-verdien som en effekt av at den påvirker den ytre varmeovergangsmotstanden. I Kap.2.4 er begrepet varmeovergangsmotstand forklart. Ved lite vind er varmeovergangsmotstanden stor og det kan forventes å måle en lavere U-verdi enn når det er mye vind og varmeovergangsmotstanden er liten. Varmekulssensorene måler ikke

varmeovergangsmotstanden på den siden de er montert. Det er derfor mest interessant å se på U-verdien målt fra innsiden for å vurdere om det finnes en sammenheng mellom målt U-verdi og vindstyrke. Figur 5-10 viser et utdrag av en overskyet periode i desember 2018, hvor U-verdien er sammenlignet med vindhastighet. Sammenligning av hele den utvalgte perioden ligger i Vedlegg C.



Figur 5-10 U-verdi sammenlignet med vindhastighet og -retning for måleoppsett A (nord) for desember 2018. Forklaring av vindretningene er gitt i Kap.3.6.

Det ser ifølge Figur 5-10 ut til at økende vindhastighet gir økende U-verdi og motsatt. Dette er i tråd med forventningene, men det må tas i betraktning at vinden er målt ved Strømtangen fyr, som var nærmeste værstasjon til Borg Havn. Vinden er altså ikke målt i umiddelbar nærhet til måleoppsettet, og det kan derfor være små lokale forskjeller i vindstyrke. Under et besøk til bygget, fortalte de ansatte at bygget ligger lite skjermet for vær. De mente derfor at målingene ved Strømtangen fyr skulle være en god indikasjon på vindforholdene ved Borg Havn.

Når det gjelder påvirkning fra nedbør i den utvalgte perioden, ble det forsøkt å finne en sammenheng, men det viste seg å være vanskelig. Etter store mengder nedbør vil veggen bli våt. Treet avgir som kjent varme når det tar opp fuktighet. Når treet etterpå tørker ut, krever det varme for at vannet skal overføres som damp ut i luften. I tiden etter kraftig regnvær er det

derfor forventet at U-verdi målt fra innsiden skal være høyere, fordi det kreves varme for å tørke ut veggen på utsiden. I Vedlegg C-3 finnes sammenligning av nedbørsmengde og U-verdi for den utvalgte perioden.

5.5.2 Betydningen av termisk treghet

Som grundigere beskrevet i Kap.3.1.1, måles varmekraften ved at temperaturredningen over keramikkensoren genererer en spenning som omgjøres til varmekraft i en beregning som inkluderer sensitiviteten til hver enkelt sensor. Sensorene som sitter på innsiden av veggen er omgitt av stabil innendørs romtemperatur på ene siden, og overflatetemperaturen til innsiden av veggen på andre siden. På utsiden av veggen er sensorene omgitt av utendørs temperatur med store døgnvariasjoner og overflatetemperaturen på utsiden av veggen.

Figur 4-6 viser at varmekraften målt fra innsiden varierer mye mindre enn varmekraften målt fra utsiden. På grunn av treets gode varmeisoleringssevne vil døgnvariasjonene i utetemperaturen dempes innover i veggen. Temperaturendringen som registreres på innsiden av veggen vil derfor komme litt etter endringen på utsiden, og med mindre variasjoner. Dette resulterer i at varmekraften målt fra innsiden også varierer lite.

Selv om variasjonene dempes innover i veggen, vil trenden være den samme. Trenden i varmekraft og ΔT er vist i Figur 4-5 og korrelasjonskoeffisientene i Tabell 4-2 bekrefter at det er stor sammenheng mellom trenden i varmekraft målt fra innsiden og ΔT med verdier på 0,98 og 0,98 for henholdsvis tre og plastfilm. Dersom trenden fjernes og bare døgnvariasjonene betraktes, vil derimot korrelasjonen mellom varmekraft målt på innsiden og ΔT være svært lav, med verdier på 0,28 og 0,25. Dette henger sammen med at temperaturendringen registreres senere på innsiden av veggen enn på utsiden. Endringen i varmekraft målt fra innsiden vil dermed skje tregere enn endringen i ΔT , og grafen forskyves slik at de ikke varierer i takt.

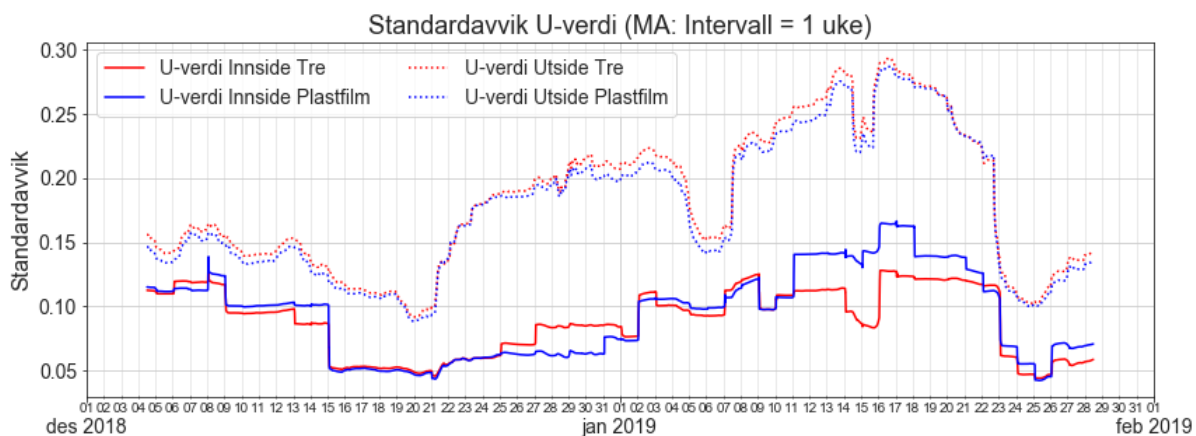
Det har blitt påpekt at varmekraften målt fra utsiden av veggen har store døgnvariasjoner. Sensoren er her plassert i et miljø som er mye mindre stabilt enn på innsiden. På grunn av at tre har relativt høy varmekapasitet og varmelagringssevne, vil temperaturen på veggen variere mindre og tregere enn lufttemperaturen. Noe som kanskje har enda mer å si for denne forsinkede temperaturendringen, er varmekapasiteten til selve keramikkensoren. Den er trolig større enn for tre, og det vil derfor ta litt tid før temperaturendringen på utsiden registreres på andre siden av sensoren. De store døgnvariasjonene i utetemperaturen fører

dermed til store variasjoner i temperaturdifferansen over flukssensoren, og som et resultat av dette vil varmekraften variere mer på utsiden enn på innsiden hvor forholdene er stabile.

Selv om variasjonene er store, er det stor sammenheng også mellom trenden i varmekraft målt fra utsiden og ΔT med korrelasjonskoeffisienter på 0,90 og 0,89. Korrelasjonen er trolig litt lavere enn for innsiden fordi varmekraften på utsiden varierer mye mer, og grafen ser ikke ut til å være helt glattet av moving average. Siden varmekraftmåleren på utsiden er i direkte kontakt med temperatursvingningene på utsiden, burde døgnvariasjonene i varmekraft målt fra utsiden være likere variasjonene i ΔT enn hva som var tilfelle for varmekraft målt fra innsiden. Korrelasjonskoeffisientene i Tabell 4-3 viser bare 0,57 og 0,59. Det finnes altså en sammenheng, men den er mye mindre enn sammenhengen i trend. Trolig kommer det av at dataene fortsatt kan være påvirket av støy når intervallet på midlingen bare går over et døgn. Korrelasjonen er likevel mye større enn for varmekraft målt fra innsiden, slik forventningene var.

I en ideell situasjon under stabile forhold, skal varmekraften ved de samme betingelsene være den samme målt fra innsiden og utsiden. Generelt har vi sett at varmekraften målt fra utsiden ligger litt under varmekraften målt på innsiden, særlig om sommeren. Korrelasjonen mellom trenden i varmekraft målt fra utsiden og innsiden, med verdier på 0,79 og 0,78, er relativt god, tatt i betraktning at variasjonene i varmekraft målt fra utsiden ikke er helt fjernet av moving average. Ser man derimot på korrelasjonen mellom variasjonene når trenden er fjernet, finnes det tilnærmet ingen sammenheng. Verdiene viser -0,07 og -0,06, altså tilnærmet null. Dette henger trolig sammen med den beskrevne termiske tregheten i systemet, som gjør at varmekraften målt fra innsiden varierer mindre og endrer seg tregere enn varmekraften målt fra utsiden. Både Figur 4-3 og Figur 4-6 viser tydelig at toppene for varmekraft målt fra utsiden kommer før toppene for varmekraft målt på innsiden.

Som en direkte effekt av at variasjonene i varmekraft målt fra utsiden er større enn variasjonene i varmekraft målt fra innsiden, vil U-verdien målt fra utsiden også variere mest, siden de divideres på den samme temperaturforskjellen. Dette kan observeres både i Figur 4-7 og Figur 4-8. En enda tydeligere bekreftelse på at variasjonene er mindre på innsiden, er standardavviket plottet i Figur 5-11. Standardavviket sier noe om variansen til dataene, og det er tydelig at U-verdiene målt fra innsiden varierer mindre enn U-verdiene målt fra utsiden. Det er også tydelig at standardavviket er større i januar enn i desember, noe som kan ha sammenheng med mer solstråling i januar enn desember.



Figur 5-11 Standardavvik for U-verdiene målt ved måleoppsett A.

Det er ikke bare variansen i U-verdiene som er forskjellig fra innsiden til utsiden. Kurvene ser ut til å gå motsatt vei av hverandre både når det kommer til trend i Figur 4-7, og døgnvariasjonene i Figur 4-8. For trenden bekreftes dette av den høye negative korrelasjonen vist i Tabell 4-4 med verdier på -0,79 og -0,85. Korrelasjonen i døgnvariasjoner er mindre med verdier på -0,38 og -0,37. Den mest naturlige forklaringen på den motsatte trenden er termisk treghet. Det ble tidligere vist at det ikke er noen sammenheng mellom grafen for varmekraft målt fra innsiden og utsiden, verken positiv eller negativ. Derimot er det en viss sammenheng mellom varmekraft målt fra utsiden og ΔT . Forholdet mellom disse, altså U-verdien målt fra utsiden, vil følge omtrent de samme variasjonene. Ved å sammenligne de to kurvene for varmekraft og U-verdi målt fra utsiden, kan man tydelig se dette (Figur 4-6 og Figur 4-8).

Varmekraft målt fra innsiden varierer som sagt mye mindre og korrelerer ikke med ΔT . Når ΔT øker, vil derfor U-verdi målt fra innsiden bli mindre, siden varmekraften (som varierer lite) divideres på en økende verdi. Motsatt blir U-verdien målt fra innsiden større når temperaturendringen synker.

Et viktig poeng er at U-verdikurvene ser ut til å være stasjonære. De har altså ingen positiv eller negativ trend dersom man ser på hele forløpet. Det gjør at gjennomsnittsverdien av målingene skal kunne gi et godt estimat av U-verdien som måles.

5.5.3 Alternative målemetoder

Måling av hvor stor den hygrotermiske effekten er, er lite utprøvd, og målemetoden som ble benyttet i dette prosjektet er ikke nødvendigvis den best egnede. Det vil derfor kort bli vurdert endringer på måleoppsettet og andre målemetoder, som kunne vært gjort for å oppnå bedre

resultat. Feltnmålinger kan være både ressurskrevende og utfordrende. Betingelsene rundt målingene er ofte vanskelige å kontrollere, og det vil være mange ytre påvirkningsfaktorer som virker forskjellig på målingene. Dette kan gi store utfordringer. Men dersom metoden er egnet, vil feltnmålinger gi den beste indikasjon på hvordan virkeligheten fungerer.

Et alternativ til å måle U-verdien direkte, vil være å måle varmemotstanden, R . I henhold til ISO 9869, gjøres dette ved å måle overflatetemperatur i stedet for omgivelsestemperatur. På denne måten unngår man utfordringer knyttet til hvor langt ut fra veggen temperaturen skal måles, i hvilken høyde og om temperatursensorene burde skjermes for stråling eller ikke. Det er da viktig at temperatursensorene som brukes er egnet til å måle overflatetemperatur, og at de har tilsvarende emissivitet som veggen. Denne metoden tar ikke hensyn til varmeovergangsmotstand, men det er mulig å legge på standardiserte verdier av varmeovergangsmotstand i ettertid for å beregne U-verdi. På denne måten vil varmeovergangsmotstanden kanskje bli litt høyere enn den reelle, men den vil være konstant. Dersom det er den hygrottermiske effekten som skal beregnes, vil ikke dette ha noen betydning da det er differansen i U-verdi som er interessant. For å unngå problemer med solstråling direkte på varmeflukssensorene, burde det også vurderes å lage en luftig skjerming av for eksempel tynne aluminiumsplater. Det er da viktig å ikke skjerme den delen av veggen som sensorene på innsiden måler til, ettersom det ønskes mest mulig reelle forhold for fuktutveksling.

En annen målemetode som er mye brukt i forbindelse med U-verdimålinger er guarded «hot box». Denne metoden utføres i henhold til NS-EN ISO 8990. Metoden er i utgangspunktet egnet for å måle stasjonære varmegjennomgangsegenskaper til et materiale ved å måle tilført varme og ha kontroll med temperaturer. Metoden vil i utgangspunktet ikke kunne måle hygrottermisk effekt siden forholdene holdes konstant. Med dette som en referanse, kan man også gjøre målinger hvor man setter inn fukt- og varme-/strålekilde på den kalde siden for å simulere sol og nedbør. På den varme siden burde det være mulighet for å regulere luftfuktigheten og temperaturen. På denne måten kan man skape kontrollerte ute- og innneklima som kan fremkalle hygrottermisk effekt samtidig som man har kontroll med varmetapet.

5.5.4 Feilkilder

Feilkildene knyttet til vær og vind er diskutert alle rede i Kap.5.5.1. Det ble her besluttet at sol var en stor kilde til feilmålinger og ekstremverdier. Vind så også ut til å påvirke resultatene,

trolig i form av å skape varierende varmeovergangsmotstand. Derimot var det vanskelig å finne noen indikasjoner på at regn påvirket målingene. I Kap.3.3 ble avvik fra målemetoden i ISO 9869 beskrevet. Kort oppsummert var dette plassering av varmeflukssensorer på utsiden av veggen, dårlig skjerming av sensorer, usikkerheter rundt plassering av temperatursensorer, plassering for nære vindu og varmeflukssensor plassert over en sprekk. Dette er alle faktorer som kan påvirke måleresultatet.

Resultatene kan også påvirkes av hvordan tverrsnittet til veggen ser ut akkurat der det måles. Mye kvist kan føre til at veggen leder bedre varme i akkurat det punktet og dermed gi en høyere U-verdi enn hva som er reelt for hele veggkonstruksjonen. Motsatt gjelder det hvis tverrsnittet er helt fritt for kvist. Andre feilkilder kobles til blant annet usikkerheter rundt kalibreringen av utstyret. Varmeflukssensorene er kalibrert i fabrikken før de ble sendt, og var derfor kalibrert under andre forhold enn ved måledestinasjonen.

Varigheten av testen er også et usikkerhetsmoment. I dette prosjektet har sensorene målt over mye lengere tid enn hva som er vanlig under en U-verdimåling. Det er derfor usikkerheter rundt hvordan utstyret holder seg over lang tid. For å få kontroll med dette, er planen at utstyret skal kalibreres når måleperioden er ferdig.

25. mars ble det, som beskrevet i Kap.3.5, gjort endringer på måleoppsett A. Hensikten var å kontrollere om det var individuelle feil med målesensorene som gjorde at det ble målt en liten hygrottermisk effekt. Vedlegg G-3 viser et plott av varmefluksen i tiden før og etter byttet ble gjort. Grafen viser at det ikke har skjedd noen forandring for sensorene som måler fra utsiden. Målingene fra sensorene som sitter på innsiden ser derimot ut til å ha byttet plass. Dersom dette er riktig, kan det se ut som at den hygrottermiske effekten som ble indikert av målingene bare var en tilfeldighet på grunn av utstyrsfeil. Det vil likevel ikke bli lagt alt for stor vekt på disse resultatene, siden hele perioden etter sensorbyttet var preget av klarvær, mye sol og relativt høye temperaturer. Varmefluksen for måleoppsett B i Vedlegg G-4, hvor sensorene ikke har byttet plass, viser at målingene her har samme tendens som ved måleoppsett A. Det er også sett av Figur 5-6 at den hygrottermiske effekten på utsiden så ut til å være veldig liten og tendere mot å bli negativ på våren. På grunn av dette kan altså byttet være tilfeldig akkurat i samme tidsrom som sensorene byttet plass.

6 Konklusjon

Med forbehold om at måleutstyret fungerer som det skal, anslås den feltmålte U-verdien til veggen å være $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$, basert på målinger fra desember 2018 og januar 2019. Dette er litt mindre enn den tradisjonelt beregnede U-verdien på $0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$. I tillegg til at feltmålingene er påvirket av hygrotermisk effekt, som i teorien vil kunne gi et positivt bidrag til U-verdien, kan noe av forskjellen enkelt forklares ved at reell varmeovergangsmotstand ofte er lavere enn den standardiserte verdien som brukes i tradisjonelle håndberegninger. Basert på dette, kan det sies å være god sammenheng mellom tradisjonell U-verdiberegning og feltmålt U-verdi. I realiteten ser det også ut til å være en del feilkilder, med hovedvekt på solstråling som påvirker resultatet og gir grunn til å være kritisk i bruk av den feltmålte U-verdien.

Resultatene indikerer en positiv hygrotermisk effekt, men den er svært liten. Særlig i den utvalgte perioden er den hygrotermiske effekten liten, og utgjør bare i gjennomsnitt mellom $0,01$ og $0,02 \text{ W/m}^2\text{K}$. Effekten er tydelig større på høsten, og inkluderes målinger for hele året, er den målte gjennomsnittlige hygrotermiske effekt $0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$ på innsiden av veggen. Et av spørsmålene i problemstillingen var om det er mulig å dokumentere hvor stor påvirkning den hygrotermiske effekten har på varmeisoleringssevnen til KLT-elementene. I og med at hygrotermisk effekt er avhengig av variasjoner i fuktighet og varme, som påvirkes av blant annet fukttilskuddet i bygget, ventilasjonssystem, retningsorienteringen til veggen, årstider og klimaet hvor bygget står, varierer den mye i løpet av døgnet og året. Dette gjør at det er vanskelig å bestemme akkurat hvor stor påvirkning den hygrotermiske effekten har på varmeisoleringssegenskapene til KLT, og gir grunn til å betvile at denne størrelsen burde tas hensyn til i forskriftens minstekrav til varmegjennomgangskoeffisient. Samtidig er den hygrotermiske effekten målt i dette prosjektet så liten at den vil ha lite å si på U-verdien i forhold til det som kreves for å komme ned til TEK-kravet på $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tidligere forskning viser at egenskapene til treet kan være med på å redusere energibehovet i en bolig. Selv om dette kan være tilfelle også her, er TEK-kravet til U-verdi er et minstekrav, som ikke handler om energiberegning. Det vil derfor være vanskelig å skulle inkludere en verdi som avhenger av så mange faktorer.

Det er avdekket flere svakheter med målemetoden, med tanke på å måle hygrotermisk effekt. For det første er det dokumentert at sensorene blir påvirket av solstråling i så stor grad at det gir ekstremverdier som kan betraktes som feilmålinger. Samtidig er prosessen med

fuktutveksling i treverket, som er med på å skape den hygrotermiske effekten, avhengig av blant annet solstråling. Det vil derfor ikke være hensiktsmessig å måle i perioder med bare overskyet vær.

For det andre er målesensorene laget av et keramisk materiale, med totalt forskjellige egenskaper enn tre og mye høyere varmekapasitet. Dette skaper utfordringer med tanke på å måtte måle U-verdien fra begge sider av veggen for å fange opp den hygrotermiske effekten på både innsiden og utsiden. Det er også utfordringer knyttet til termisk treghet som gir store variasjoner i varmekraften målt fra utsiden, og forsinkelse av varmekraften målt fra innsiden.

En tredje faktor som kan påvirke den hygrotermiske effekten, er ujevn påvirkning av solstråling på grunn av sensorplassering. Sensor som måler varmekraft mot tre fra innsiden sitter høyere på veggen enn sensor som måler mot plastfilm. Det er observert at den øverste sensoren er mindre skjermet fra solstråling, og at dette kan føre til unaturlig høy varmekraft målt mot tre. Potensielt er altså den målte differansen mellom U-verdi målt mot plastfilm og tre mindre enn den reelle differansen, og den hygrotermiske effekten kan i realiteten være høyere enn den målte hygrotermiske effekten.

Instrumenteringen i dette prosjektet har forsøkt å fremstille så mange gode data som metoden tillater. Dette har resultert i at sammenhengen mellom feltmålt U-verdi og tradisjonelt beregnet U-verdi ser ut til å være god. På bakgrunn av svakhetene som er avdekket og andre målesikkerheter, med tanke på kalibrering og montering av utstyr, vil det likevel konkluderes med at denne målemetoden ikke er ideell for å avdekke hygrotermisk effekt på varmegjennomgangskoeffisienten.

En side av saken som ikke er betraktet i denne oppgaven, er holdbarheten til ubeskyttet KLT-vegg i norsk klima. Trolig vil dette være et problem, særlig ved vindusinnsetting (se Vedlegg A-6). På grunn av dette, er sannsynligheten stor for at veggen likevel må kles inn, og det er lite ekstra arbeid å legge inn et tynt lag med isolasjon.

6.1 Videre arbeid

I løpet av arbeidet med denne oppgaven, har det dukket opp flere spørsmål som ikke er besvart her på grunn av behovet for å sette begrensninger. Blant annet ble det sett behov for å finne en beregningsmetode som inkluderer de hygrotermiske egenskapene til tre på en komplett og entydig måte.

Denne oppgaven har konsentrert seg om målinger på nordfasaden til bygget. Det ville vert interessant å sammenligne med den hygrotermiske effekten på sørfasaden. Hypotetisk sett vil bidraget fra hygrotermisk effekt være større her, siden det er større tilgang på solenergi som kan tørke ut treet slik at det i andre perioder kan ta opp mer fuktighet. For å få til dette, kreves endringer av måleoppsett og måleutstyr slik at det ikke påvirkes av ytre klimatiske forhold, som for eksempel solstråling. Anbefalinger fra huksefluks sier at sensorene som brukes i dag, ikke bør utsettes for stråling. Noe av grunnen til det er at materialet til varmeksensoren reagerer helt annerledes enn treoverflaten på denne typen stråling.

Det ville også være interessant å styre ventilasjonen mer etter fuktinnhold i luften enn av minimumsverdier for luftskifte og CO₂, som er anbefalt av SN/TS 3031 og NS-EN 15251. På denne måten kan variasjonene i relativ luftfuktighet innendørs ble større, og man kunne undersøkt hvilke forhold som er mest mulig fordelaktige med tanke på å utnytte hygrotermisk effekt. Men først og fremst er det, som denne oppgaven presiserer, et behov for en annen målemetode for å kunne måle hvor mye den hygrotermiske effekten kan utgjøre på U-verdien.

7 Referanser

- Aarstad, J., Glasø, G., & Bunkholt, A. (2008). *Massivtre (FOKUS på tre nr. 20)*. Hentet fra <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-20.pdf>
- Anaconda. (2019). *Anaconda Distribution*. Hentet fra <https://www.anaconda.com/distribution/>
- Asphaug, S. K., Time, B., Thue, J. V., Geving, S., Gustavsen, A., Mathisen, H. M., & Uvsløkk, S. (2015). *Kunnskapsstatus - Fuktbufring i materialer og påvirkning på energibehov (ZEB Project report 22)*. Hentet fra https://www.sintefbok.no/book/index/1047/kunnskapsstatus_fuktbufring_i_materialer_og_paavirkning_paa_energibehov
- Aven, T. (2017). Fordelingskurve. *Store norske leksikon*. Hentet april 6, 2019 fra <https://snl.no/fordelingskurve>
- Biddulph, P., Gori, V., Elwell, C. A., Scott, C., Rye, C., Lowe, R., & Oreszczyn, T. (2014). *Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements*. (Energy and Buildings 78). Elsevier B.V. Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814003041>
- Brownie-Anderson, H. (2018). *Time series analysis tutorial with Python*. Hentet april 2019 fra DataCamp: <https://www.datacamp.com/community/tutorials/time-series-analysis-tutorial>
- Chatfield, C. (2004). *The analysis of time series: an introduction* (6. utg.). Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2017). *Byggteknisk forskrift (TEK17)*. Hentet fra <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-3/>
- Donaldson, T. (2009). *Visual QuickStart Guide, Python* (2. utg.). Berkeley: Peachpit Press.
- Dvergsdal, H. (2017). Python - programmeringsspråk. *Store norske leksikon*. Hentet april 3, 2019 fra https://snl.no/Python_-_programmeringsspr%C3%A5k
- Edvardsen, K. I., & Ramstad, T. Ø. (2015). *Håndbok 5 Trehus*. Oslo: SINTEF akademisk forlag.

- Evans, L. (u.å.). Cross Laminated Timber. *Continuing Education*. Hentet April 12, 2018 fra <http://www.awc.org/pdf/education/mat/ReThinkMag-MAT240A-CLT-131022.pdf>
- Frøslie, K. F. (2018). Korrelasjon. *Store norske leksikon*. Hentet april 6, 2019 fra <https://snl.no/korrelasjon>
- Geving, S., & Thue, J. V. (2002). *Håndbok 50 - Fukt i bygninger*. Oslo: Norges Byggforskinstitutt.
- Haase, M., & Andresen, I. (2007). *Thermal mass concepts - State of the art (SBF BK A07030)*. Hentet fra https://www.sintef.no/globalassets/sintef-byggforsk/coin/sintef-reports/sbf-bk-a07030_thermal-mass-activation.pdf
- Hameury, S. (2006). *The Hygrothermal Inertia of Massive Timber Constructions*. (Doktoravhandling). Stockholm: Universitetservice US AB.
- Hukseflux Thermal Sensors B. V. (2016). *User manual HFP01 & HFP03 (v1721)*. Hentet fra www.hukseflux.com
- International Standard. (2014). *Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method (ISO 9869-1)*. Sveits: ISO copyright office.
- Kilde, V. (2011). *Gran (FOKUS på tre, nr.28)*. Hentet fra <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/28-Gran.pdf>
- Kollmann, F. F., & Côté Jr., W. A. (1968). *Principles of Wood Science and Technology*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kraniotis, D., & Nore, K. (2017). *Latent Heat Phenomena in Buildings and Potential Integration into Energy Balance*. Hentet april 9, 2019 fra Science Direct: https://www.researchgate.net/publication/316049533_Latent_Heat_Phenomena_in_Buildings_and_Potential_Integration_into_Energy_Balance
- McKinney, W. (2017). *Python for Data Analysis (2. utg.)*. O'Reilly Media.
- NIBIO. (2017). *Bærekraftig skogbruk i Norge*. Hentet februar 15, 2019 fra <http://www.skogbruk.nibio.no/skogareal>

- Nyrud, A. Q., & Bringslimark, T. (2012). *Opplevelse av trematerialer i innemiljø (FOKUS på tre nr. 54)*. Hentet fra <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-54.pdf>
- Osanyintola, O. F., & Simonson, C. J. (2006). *Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact*. (Energy and Buildings 38). Hentet fra <https://www.sciencedirect.com/>
- Perdersen, B. (2018, juni 18). Varmekapasitet. *Store norske leksikon*. Hentet april 24, 2019 fra <https://snl.no/varmekapasitet>
- Sagen, A. (u.å.). *Tre som byggemateriale*. Hentet fra Norske Takstolprodusenters Forening: <http://www.takstol.com/bok/trekonstruksjoner/trekonstruksjoner-kap15-h.pdf>
- SINTEF Byggforsk. (2015). *Trevirke. Treslag og materialeegenskaper*. (571.523).
- SINTEF Byggforsk. (2018a). *Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946*. (471.008).
- SINTEF Byggforsk. (2018b). *Fukt i bygninger. Teorigrunnlag* (421.132). OSLO: SINTEF.
- Skaug, E. (u.å.). *Trevirkets oppbygning og egenskaper (FOKUS på tre nr. 40)*. Hentet februar 15, 2019 fra <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/40-Trevirkets-oppbygging-og-egenskaper.pdf>
- Sorteberg, A. (u.å.). *Kapittel 2: Energi, varme og temperatur*. Hentet mars 29, 2019 fra https://folk.uib.no/ngfhd/GEOF100/NOTATER-METEOROLOGI/GEOF100_Kap02.pdf
- Standard Norge. (2014). *Inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk (NS-EN 15251)*. Norge: Standard Norge.
- Standard Norge. (2016). *Bygningers energiytelse. Beregning av energibehov og energiforsyning (SN/TS 3031)*. Norge: Standard Norge.
- Straube, J. (2006). *BSD-138: Moisture and Materials*. Hentet fra Building Science Corporation: <https://www.buildingscience.com/documents/digests/bsd-138-moisture-and-materials>

- Svanæs, J. (2004). *Tre og miljø (FOKUS på tre nr.8)*. Hentet Februar 15, 2019 fra <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/8-Tre-og-miljo.pdf>
- The Matplotlib development team. (2019). Hentet mars 28, 2019 fra Matplotlib: <https://matplotlib.org/#>
- The Spyder Website Contributors. (2018). *Spyder - The Scientific Python Development Environment*. Hentet fra <https://www.spyder-ide.org/>
- Van De Kulien, J., Ceccotti, A., Zhouyan, X., & Minjuan, H. (2011). *Very Tall Wooden Buildings with Cross Laminated Timber*. Hentet fra Science Direct: https://ac.els-cdn.com/S1877705811012811/1-s2.0-S1877705811012811-main.pdf?_tid=c9805fad-9e42-494f-baf5-8528aef2d270&acdnat=1523450236_01861bb1eb5bbfddc0cded1057ada0d0
- VanderPlas, J. (2017). *Python Data Science Handbook*. Sebastopol: O'Reilly Media.
- Waskom, M. (2018). *seaborn: statistical data visualization*. Hentet mars 28, 2019 fra Seaborn: <https://seaborn.pydata.org/#>

Vedlegg

Vedlegg A Bilder av måleoppsettene



Vedlegg A-1 Utsiden av måleoppsett A (nordvendt)



Vedlegg A-2 Innsiden av måleoppsett A



Vedlegg A-3 Utsiden av måleoppsett B (sørvendt)



Vedlegg A-4 Innsiden av måleoppsett B



Vedlegg A-5 Innsiden av måleoppsett C



Vedlegg A-6 Fasaden til bygget, tydelig påvirket av regn rundt vinduene.

Vedlegg B Kolonnenavn

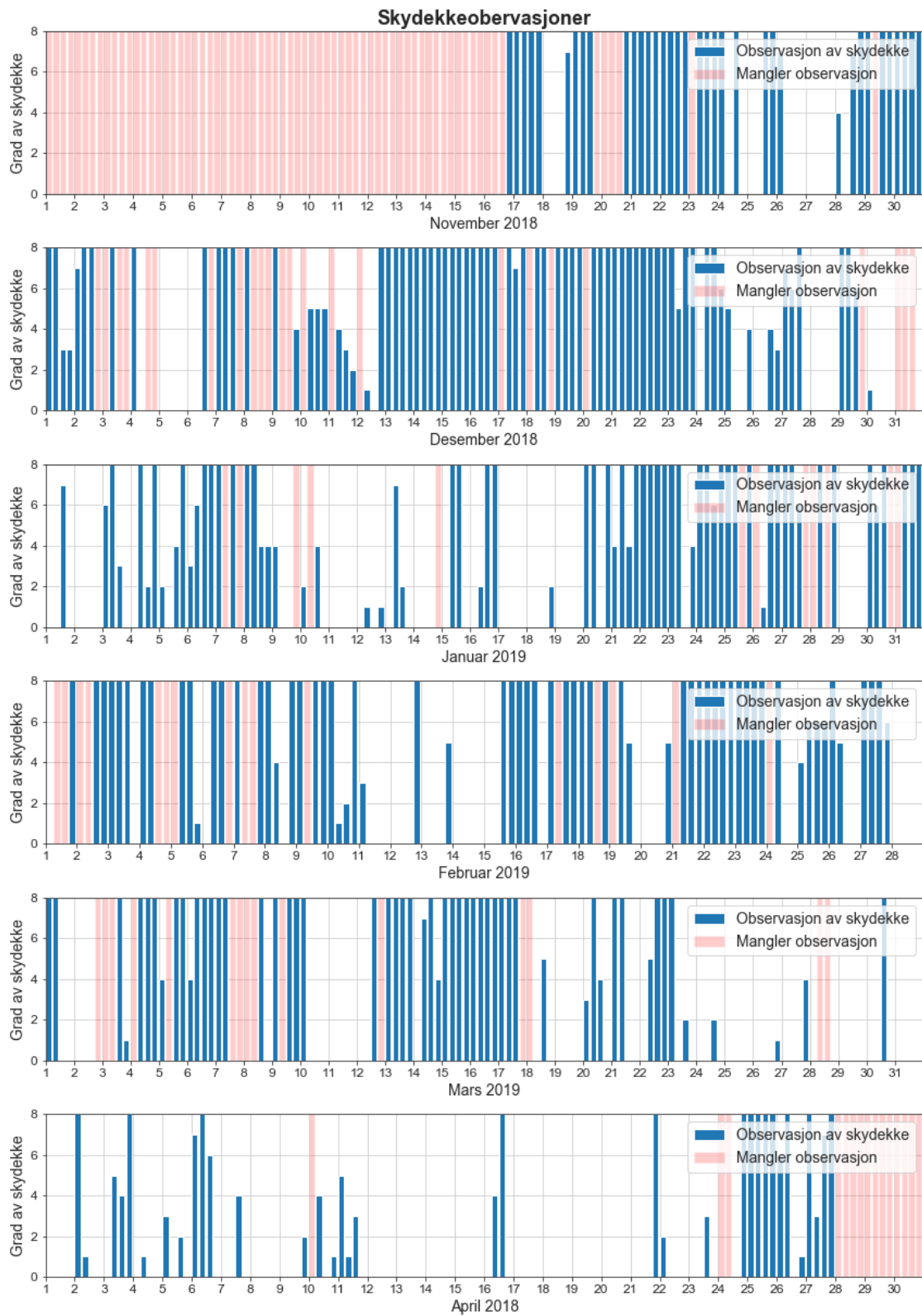
Kolonnenavn i csv-filene og ved analyse med tilhørende forklaring. Relevante data for denne oppgaven er merket med grønt.

Navn i csv-filene	Nye navn ved analyse	Forklaring
NL_563_01_RH61[°C]	T_Air_1006	Temp. rom 1006
NL_563_01_RH61[%]	RH_Air_1006	Relativ luftfuktighet, rom 1006
NL_563_01_RH61[°C]_1	T_Air_1010	Temp. rom 1010
NL_563_01_RH61[%]_2	RH_Air_1010	Relativ luftfuktighet, rom 1010
NL_563_01_RH90[°C]	T_Air_1006out	Utetemp.
NL_563_01_RH90[%]	RH_Air_1006out	Relativ luftfuktighet, ute
NL_563_01_RT61[°C]	T_Inside_1006_Wood	Temp. inne, åpen. Rom 1006
NL_563_01_RT61[°C]_3	T_Inside_1006_Film	Temp. inne, lukket. Rom 1006
NL_563_01_RT91[°C]	T_Outside_1006_Wood	Temp. ute, åpen. Rom 1006
NL_563_01_RT91[°C]_4	T_Outside_1006_Film	Temp. ute, lukket. Rom 1006
NL_563_01_RT61[°C]_5	T_Inside_1010_Wood	Temp. inne, åpen. Rom 1010
NL_563_01_RT61[°C]_6	T_Inside_1010_Film	Temp. inne, lukket. Rom 1010
NL_563_01_RT91[°C]_7	T_Outside_1010_Wood	Temp. ute, åpen. Rom 1010
NL_563_01_RT91[°C]_8	T_Outside_1010_Film	Temp. ute, lukket. Rom 1010
NL_563_01_RR61	Flux_Inside_1006_Wood	Varmeflux inne, åpen. Rom 1006 [W/m ²]
	Flux_Inside_1006_Film	Varmeflux inne, lukket. Rom 1006 [W/m ²]
NL_563_01_RR91	Flux_Outside_1006_Wood	Varmeflux ute, åpen. Rom 1006 [W/m ²]
NL_563_01_RR91_10	Flux_Outside_1006_Film	Varmeflux ute, lukket. Rom 1006 [W/m ²]
NL_563_01_RR61_11	Flux_Inside_1010_Wood	Varmeflux inne, åpen. Rom 1010 [W/m ²]
NL_563_01_RR61_12	Flux_Inside_1010_Film	Varmeflux inne, lukket. Rom 1010 [W/m ²]
NL_563_01_RR91_13	Flux_Outside_1010_Wood	Varmeflux ute, åpen. Rom 1010 [W/m ²]
NL_563_01_RR91_14	Flux_Outside_1010_Film	Varmeflux ute, lukket. Rom 1010 [W/m ²]

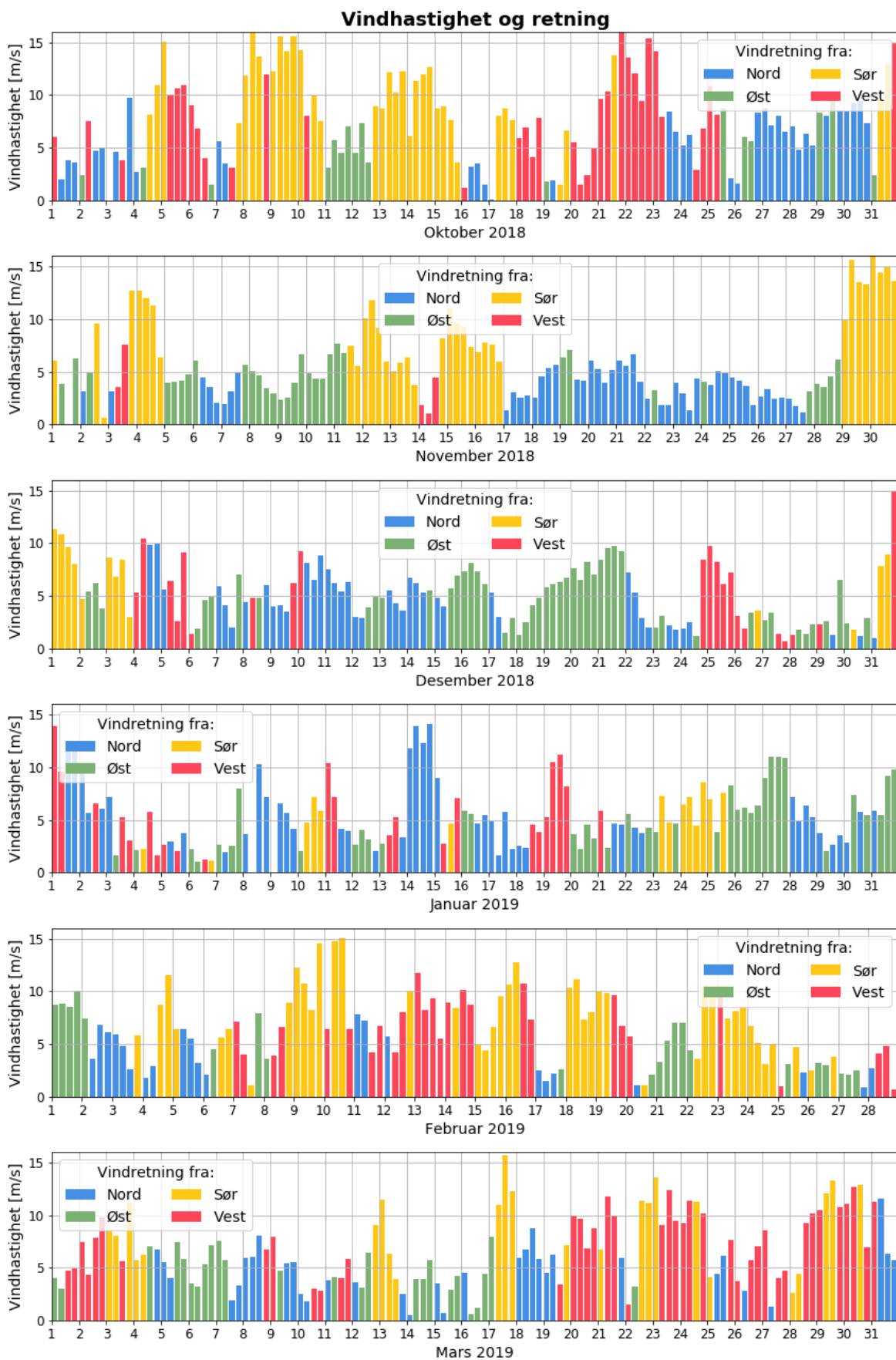
NL_360_01_Term	Thermal_energy_360_01_Ventilation	Termisk energi 360.01: Ventilasjon, oppvarming
NL_360_01_Term_15	Thermal_power_360_01_Ventilation	Termisk energi 360.01: Ventilasjon, oppvarming
NL_Radiator_Te	Thermal_energy_Radiators_Heating	Termisk energi Radiatorer
NL_433_01_Cons[kWh]	Electricity_433_01_F1LightOutlets	Elektrisk energi 433.01: Etasje 1, belysning, stikkontakter
NL_433_01_Effe	Electric_power_433_01_F1LightOutlets	Elektrisk energi 433.01: Etasje 1, belysning, stikkontakter
NL_433_09_Cons[kWh]	Electricity_433_09_F2LightOutletsKitchen	Elektrisk energi 433.09: Etasje 2, Kjøkken, belysning, stikkontakter, oppvask, mikroovn
NL_433_09_Effe[kW]	Electric_power_433_09_F2LightOutletsKitchen	Elektrisk energi 433.09: Etasje 2, Kjøkken, belysning, stikkontakter, oppvask, mikroovn
NL_434_01_Q15_[kWh]	Electricity_434_01_Q15_Ventilation	Elektrisk energi 434.01-Q15: Ventilasjon
NL_434_01_Q15_[kW]	Electric_power_434_01_Q15_Ventilation	Elektrisk energi 434.01-Q15: Ventilasjon
NL_434_01_Q01_[kWh]	Electricity_434_01_Q01_Ventilation	Elektrisk energi 434.01-Q01: Ventilasjon, kjøling?
NL_434_01_Q01_[kW]	Electric_power_434_01_Q01_Ventilation	Elektrisk energi 434.01-Q01: Ventilasjon, kjøling?
NL_563_01_RHLa[°C]	T_Air_Warehouse1	Temp. Lager 1
NL_563_01_RHLa[%]	RH_Air_Warehouse1	Relativ luftfuktighet, Lager 1
NL_563_01_RHLa[ppm]	CO2_Air_Warehouse1	CO2 Lager 1
RH61054_T_PV[°C]	T_Air_1054	Temp. rom 1054
RH61054_RH_PV[%]	RH_Air_1054	Relativ luftfuktighet, rom 1054
RHLager2_T_PV[°C]	T_Air_Warehouse2	Temp. Lager 2
RHLager2_RH_PV[%]	RH_Air_Warehouse2	Relativ luftfuktighet, Lager 2
RHLager2_CO2_P[ppm]	CO2_Air_Warehouse2	CO2 Lager 2
RHLager3_T_PV[°C]	T_Air_Warehouse3	Temp. Lager 3
RHLager3_RH_PV[%]	RH_Air_Warehouse3	Relativ luftfuktighet, Lager 3

RHLager3_CO2_P[ppm]	CO2_Air_Warehouse3	CO2 Lager 3
RR61054_1_flux	Flux_Inside_1054_Wood	Varmeflux inne, åpen. Rom 1054 [W/m ²]
RR61054_2_flux	Flux_Inside_1054_Film	Varmeflux inne, lukket. Rom 1054 [W/m ²]
RR91054_1_flux	Flux_Outside_1054_Gypsum	Varmeflux ute, åpen. Rom 1054 [W/m ²]
RR91054_2_flux	Flux_Outside_1054_Film	Varmeflux ute, lukket. Rom 1054 [W/m ²]
RT61054_1_PV	T_Inside_1054_Wood	Temp rom 1054, åpen
RT61054_2_PV	T_Inside_1054_Film	Temp rom 1054 lukket
RT91054_1_PV	T_Outside_1054_Gypsum	Temp. ute, åpen. Rom 1054
RT91054_2_PV	T_Outside_1054_Film	Temp. ute lukket. Rom 1054
RR61054_1_PV	Volt_Inside_1054_Wood	Volt inne, åpen. Rom 1054
RR61054_2_PV	Volt_Inside_1054_Film	Volt inne lukket. Rom 1054
RR91054_1_PV	Volt_Outside_1054_Gypsum	Volt ute, åpen. Rom 1054
RR91054_2_PV	Volt_Outside_1054_Film	Volt ute lukket. Rom 1054
NL_Radiator_Te_16	Thermal- power_Radiators_Heating	Termisk effekt Radiatorer
RR61006_1_PV	Volt_Inside_1006_Wood	Volt inne åpen. Rom 1006 [mV]
RR61006_2_PV	Volt_Inside_1006_Film	Volt inne lukket. Rom 1006 [mV]
RR91006_1_PV	Volt_Outside_1006_Wood	Volt ute åpen. Rom 1006 [mV]
RR91006_2_PV	Volt_Outside_1006_Film	Volt ute lukket. Rom 1006 [mV]
RR61010_1_PV	Volt_Inside_1010_Wood	Volt inne åpen. Rom 1010 [mV]
RR61010_2_PV	Volt_Inside_1010_Film	Volt inne lukket. Rom 1010 [mV]
RR91010_1_PV	Volt_Outside_1010_Wood	Volt ute åpen. Rom 1010 [mV]
RR91010_2_PV	Volt_Outside_1010_Film	Volt ute lukket. Rom 1010 [mV]

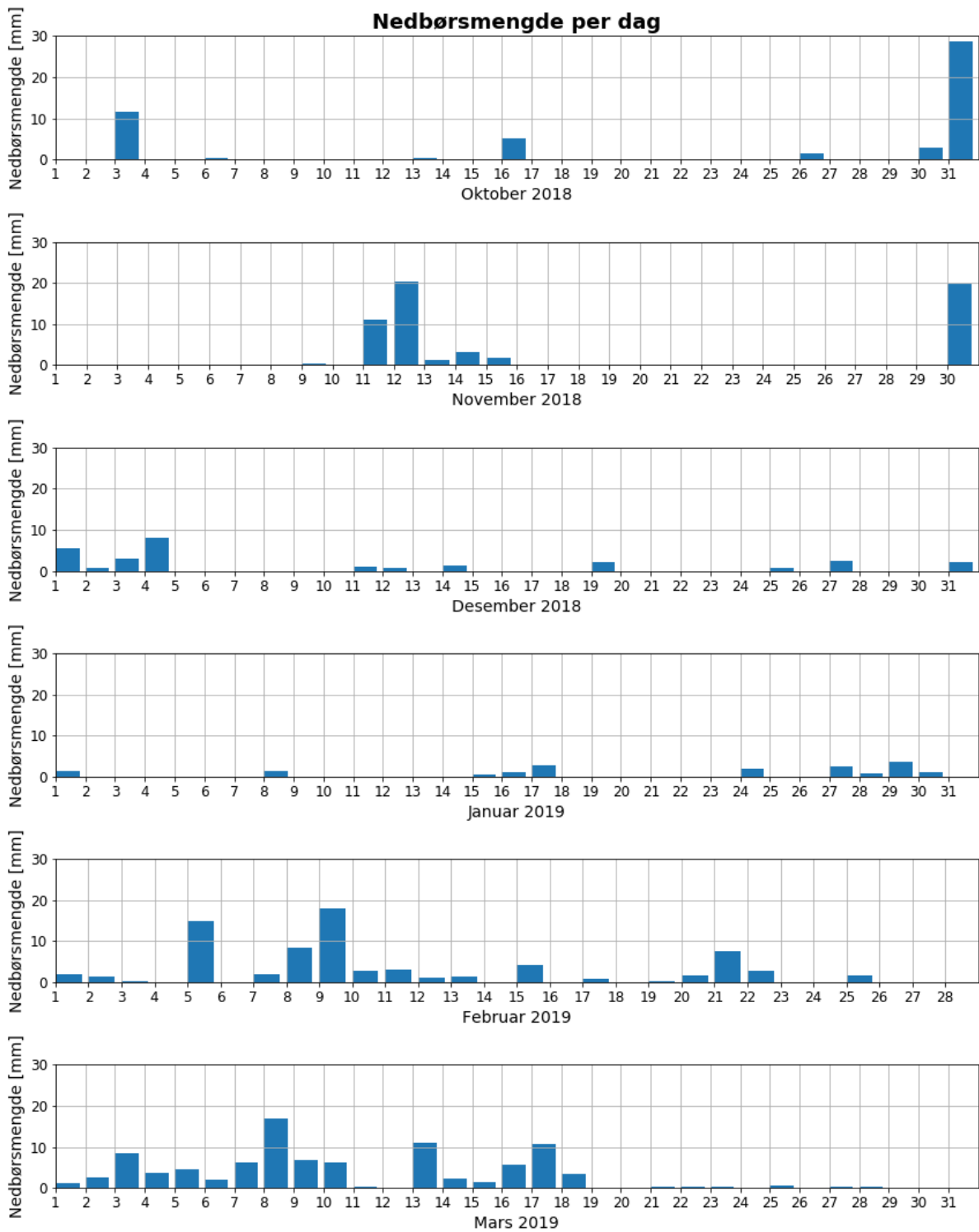
Har bare valgt å ta med værdata fra vinterhalvåret da det ikke var aktuelt å se på sommerhalvåret.



Vedlegg C-1 Skydekkeobservasjoner.
Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Rygge, Østfold.

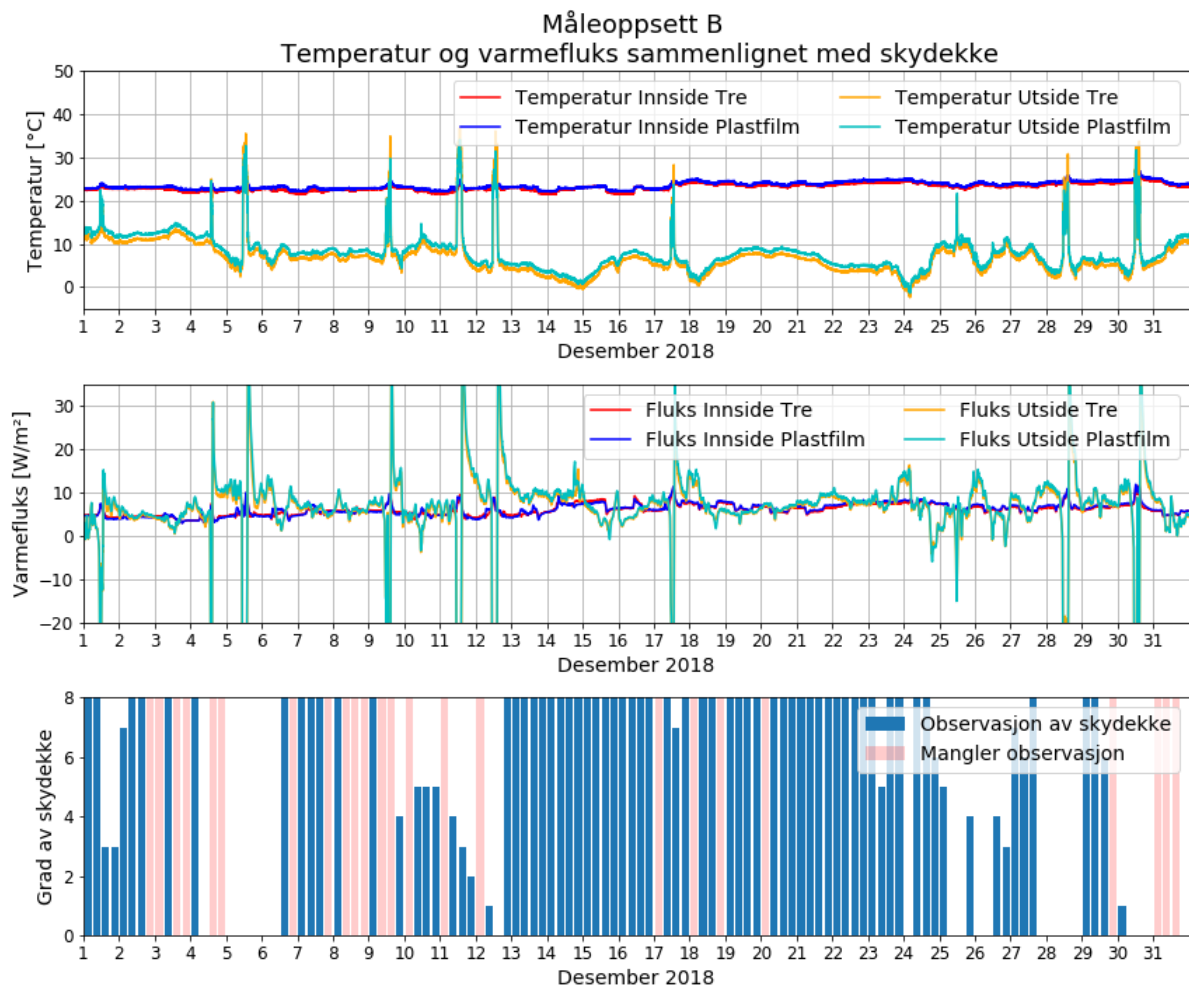


*Vedlegg C-2 Vindhastighet og -retning.
 Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.*



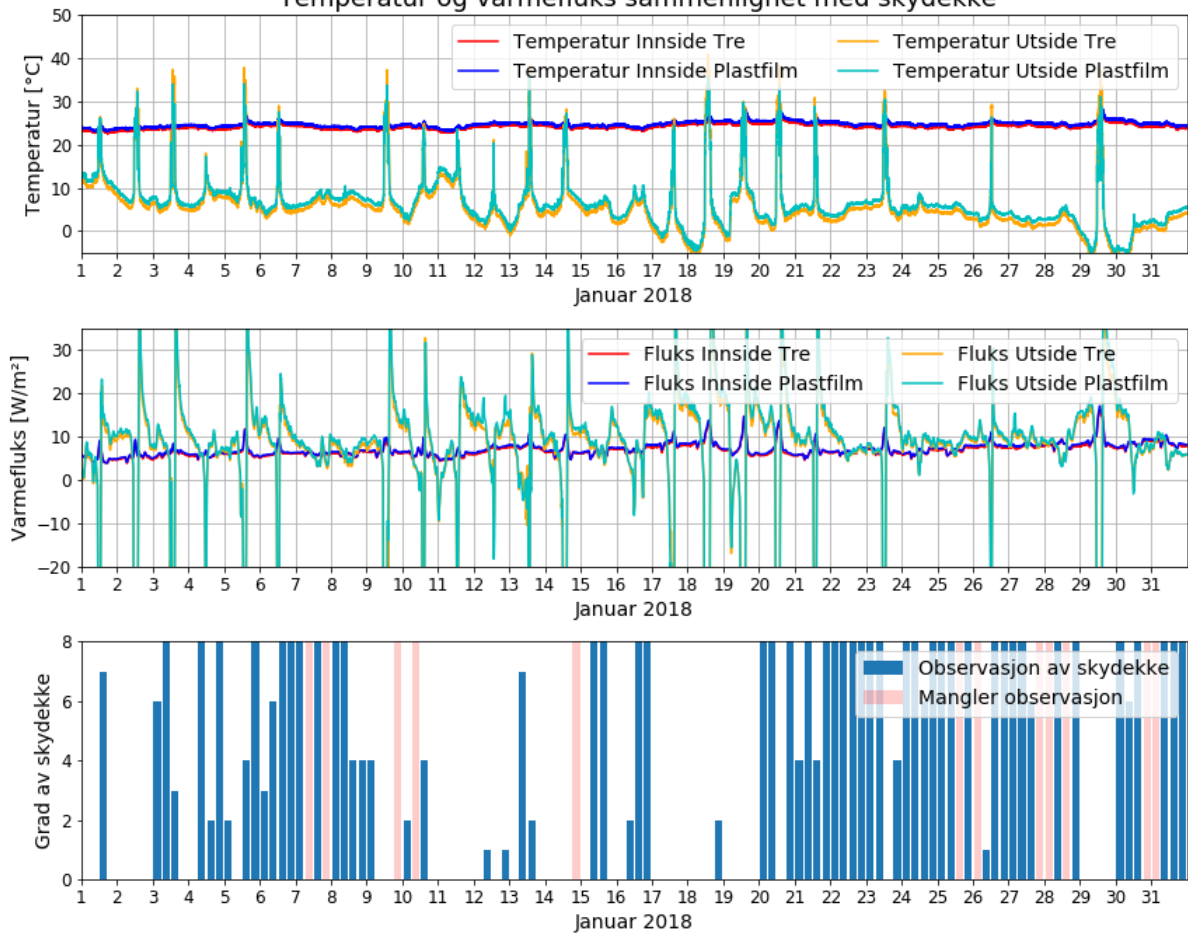
*Vedlegg C-3 Nedbørsmengde.
Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.*

Vedlegg D Værdata sammenlignet med temperatur, fluks og U-verdi



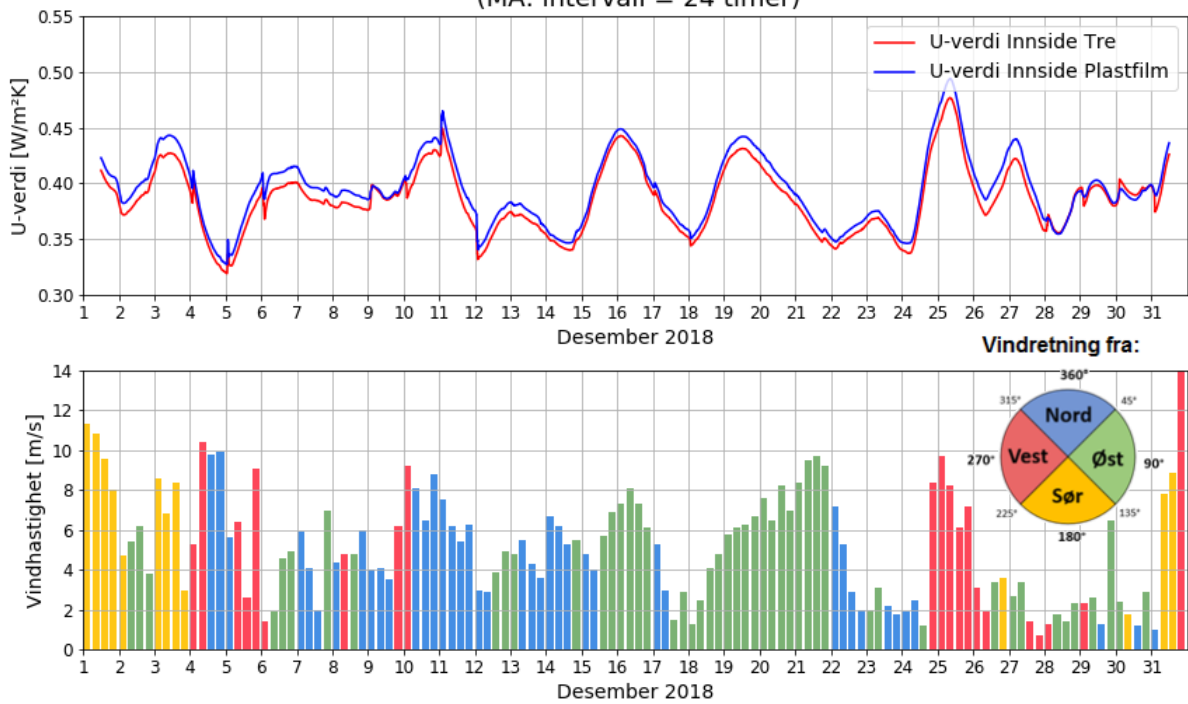
Vedlegg D-1 Temperatur og varmekraft ved måleoppsett B sammenlignet med grad av skydekke for desember (2018). Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Rygge, Østfold.

Måleoppsett B Temperatur og varmefluks sammenlignet med skydekke



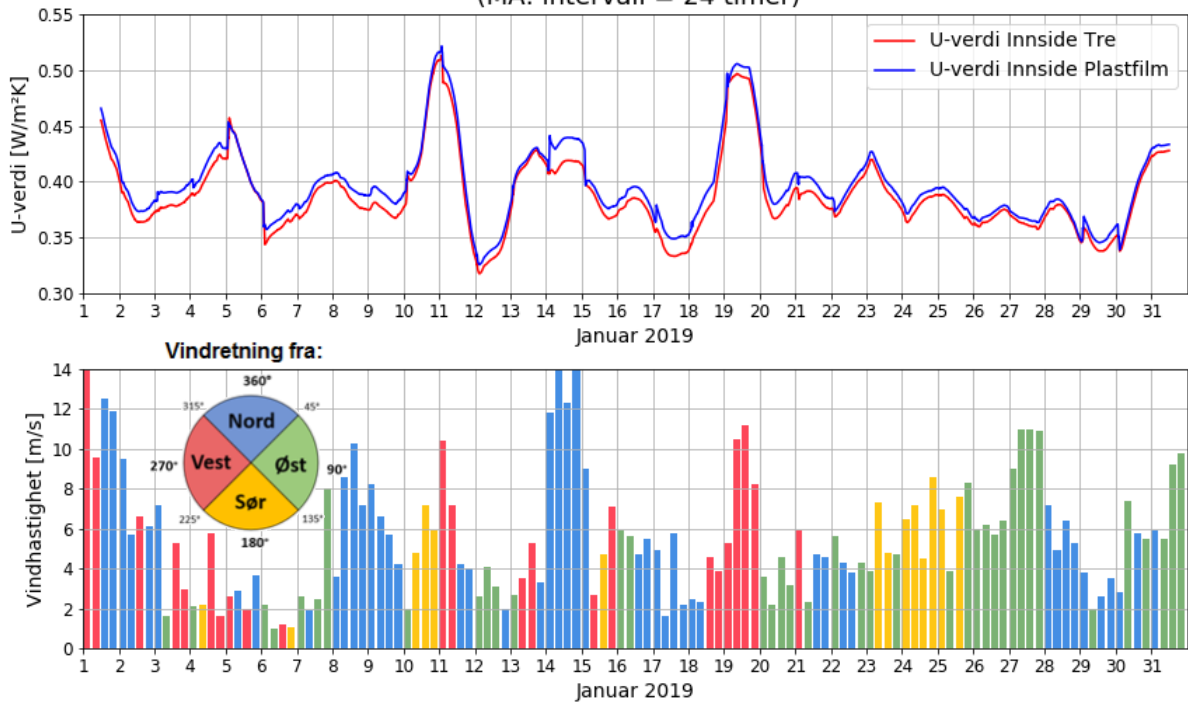
Vedlegg D-2 Temperatur og varmefluks ved måleoppsett B sammenlignet med grad av skydekke for januar (2019).
Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Rygge, Østfold.

Måleoppsett A
U-verdi sammenlignet med vindstyrke og -retning
(MA: intervall = 24 timer)

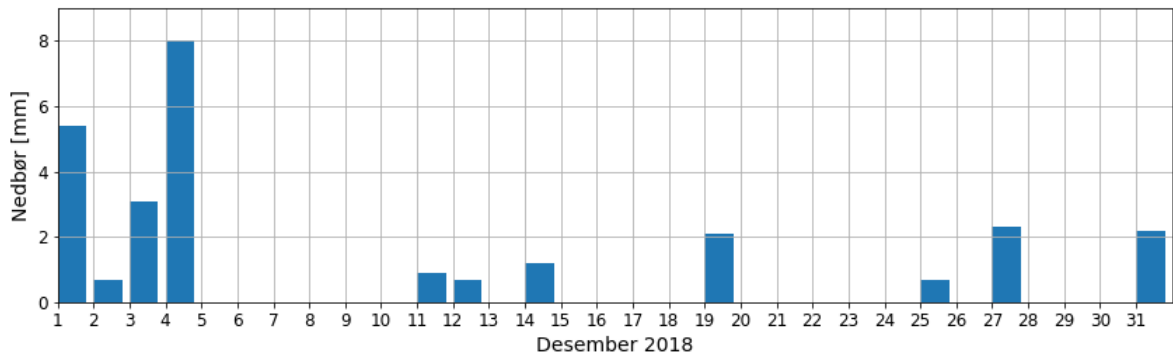
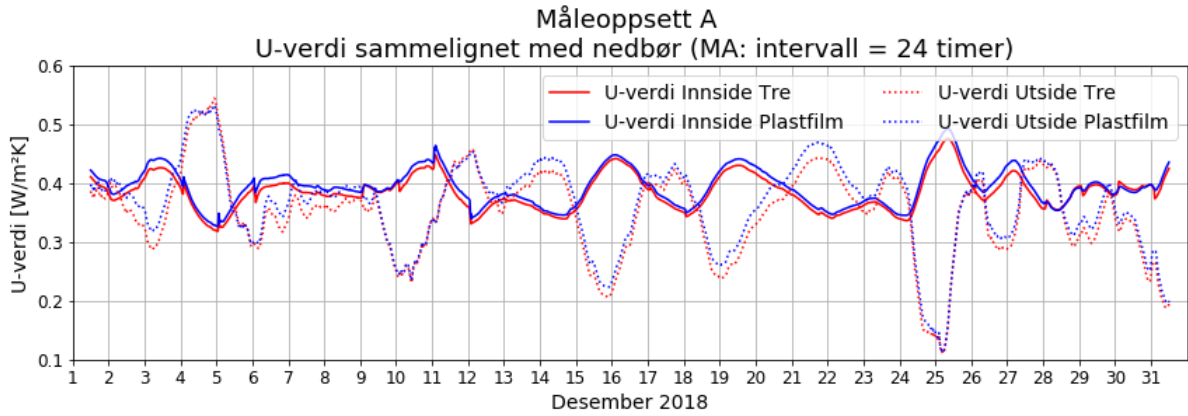


Vedlegg D-3 U-verdi ved måleoppsett B sammenlignet med vindhastighet og -retning, desember (2018).
Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.

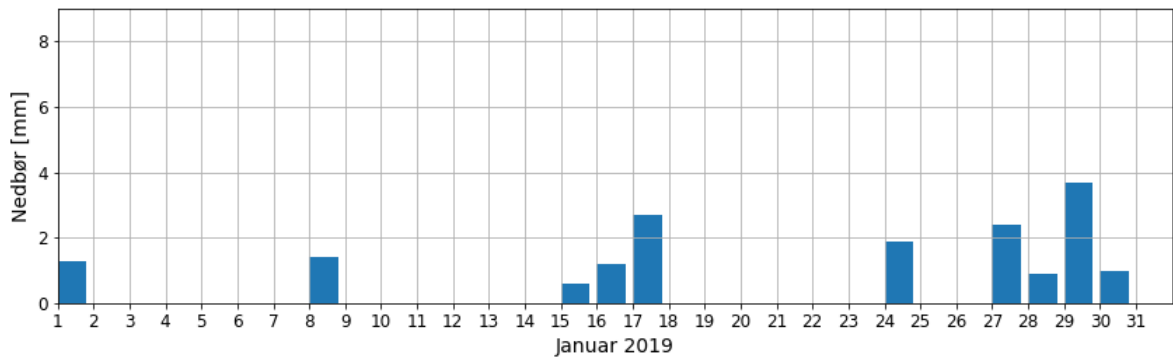
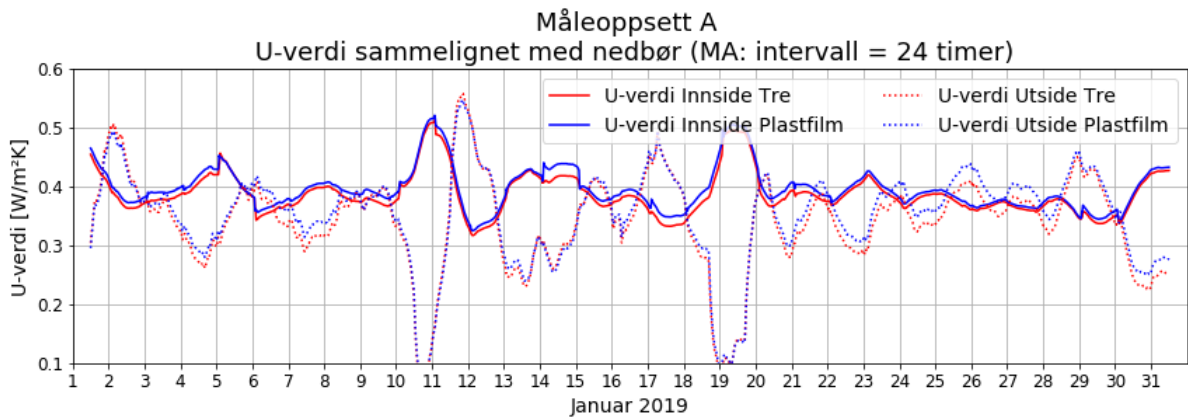
Måleoppsett A
U-verdi sammenlignet med vindstyrke og -retning
(MA: intervall = 24 timer)



Vedlegg D-4 U-verdi ved måleoppsett B sammenlignet med vindhastighet og -retning, januar (2019).
Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.



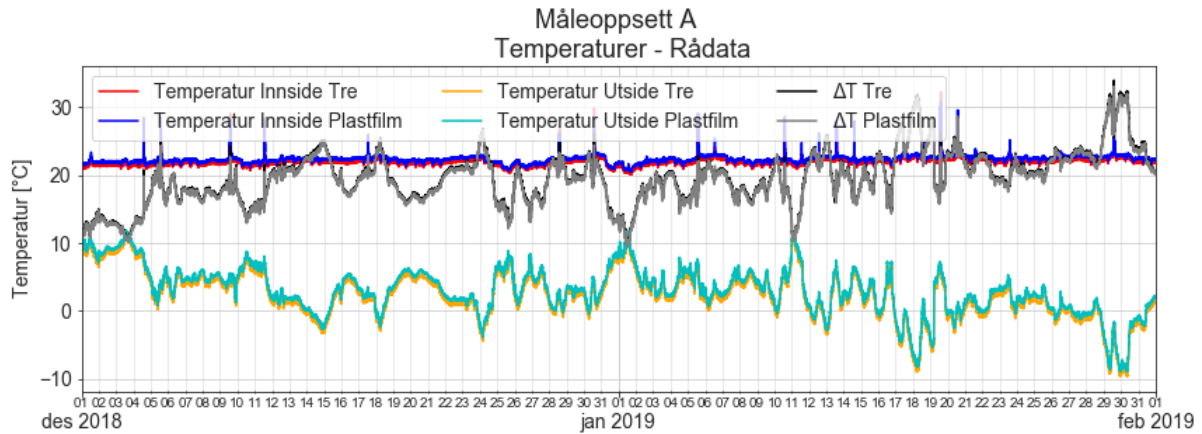
Vedlegg D-5 U-verdi ved måleoppsett B sammenlignet med nedbørsmengde, desember (2018).
Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.



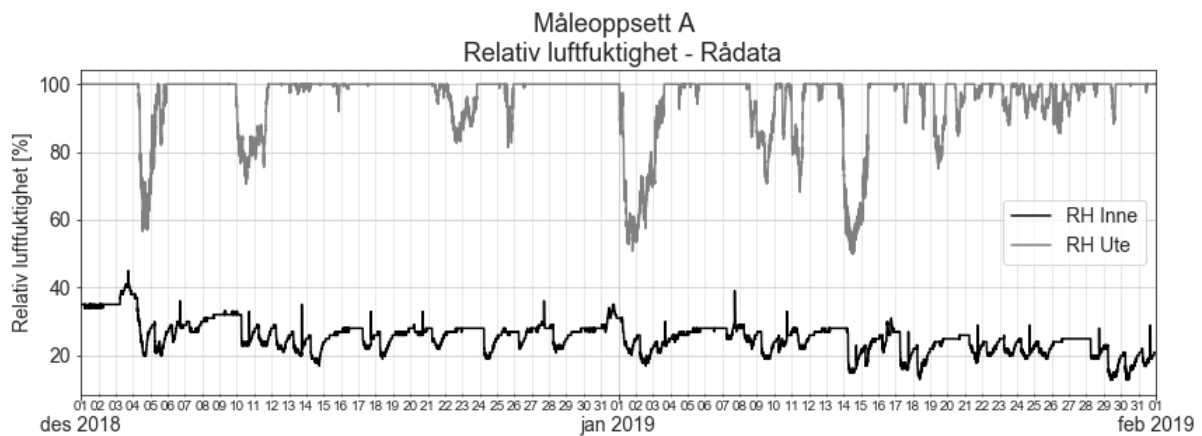
Vedlegg D-6 U-verdi ved måleoppsett B sammenlignet med nedbørsmengde, januar (2019).
Værdata er hentet fra eklima.net ved værstasjon Strømtangen, Østfold.

Vedlegg E Rådata for utvalgt periode

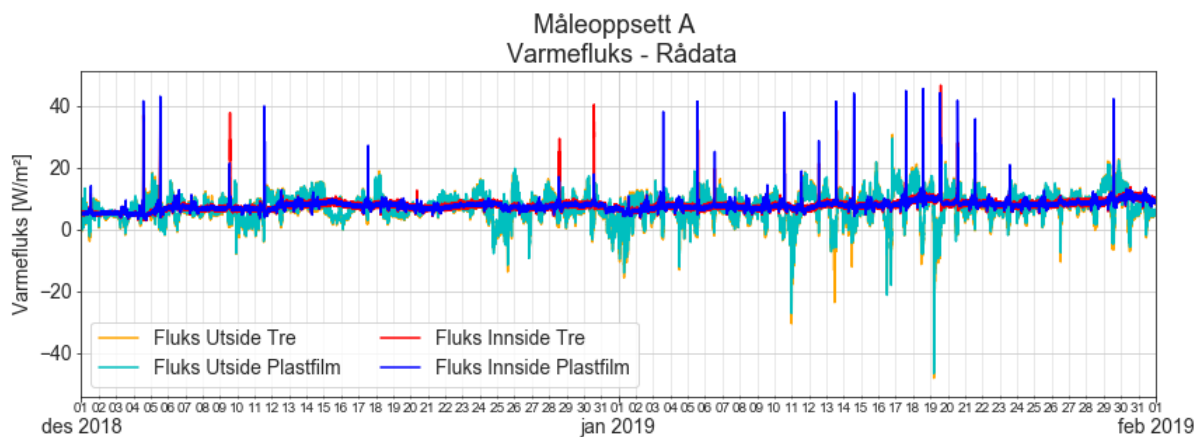
Rådata for måleoppsett A:



Vedlegg E-1 Rådata av temperaturer ved måleoppsett A for utvalgt periode.

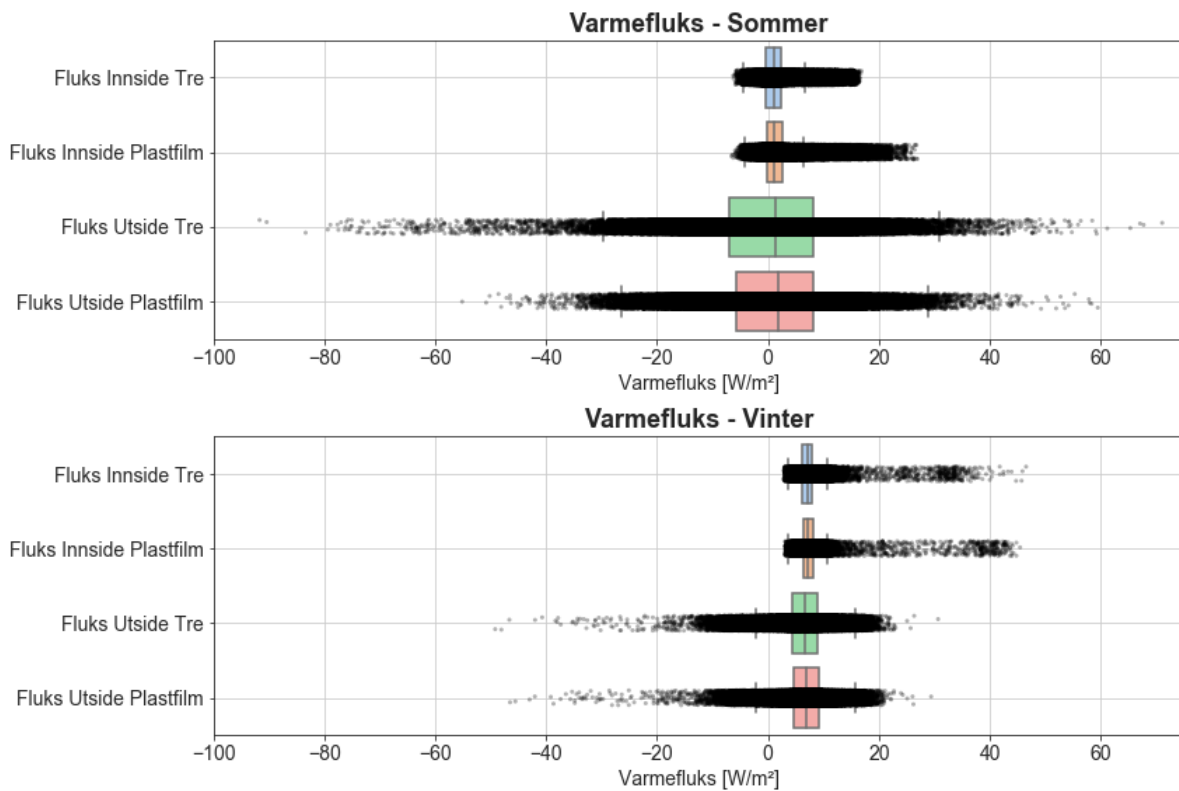


Vedlegg E-2 Rådata av relativ luftfuktighet ved måleoppsett A for utvalgt periode.



Vedlegg E-3 Rådata av varmeklaks ved måleoppsett A for utvalgt periode.

Vedlegg F Ekstremverdier sommer vs. vinter

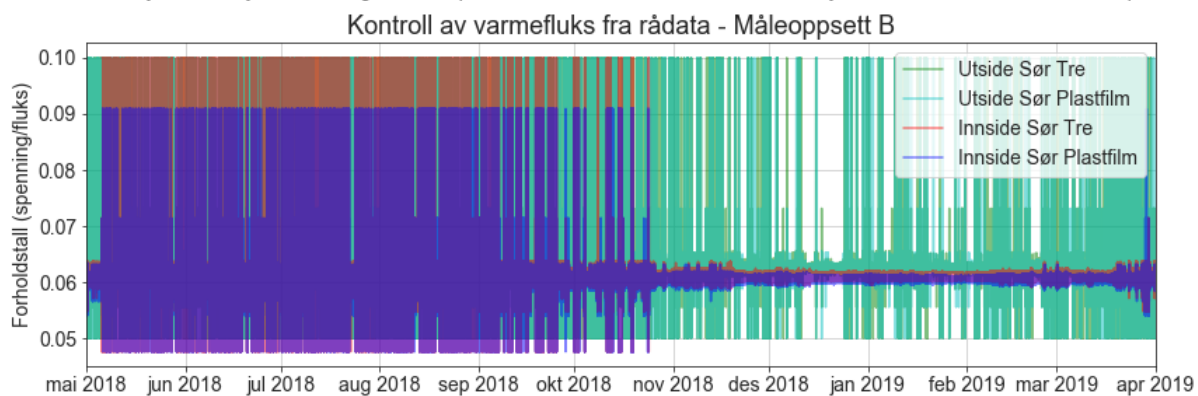
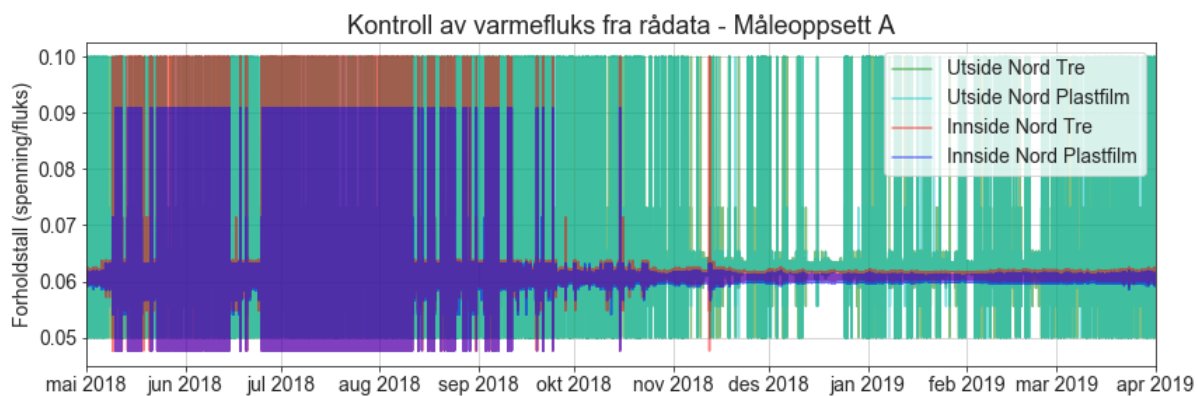


Vedlegg F-1 Boksplokk av varmekufluks for sommermånedene (juni, juli og august) og vintermånedene (desember, januar, februar)

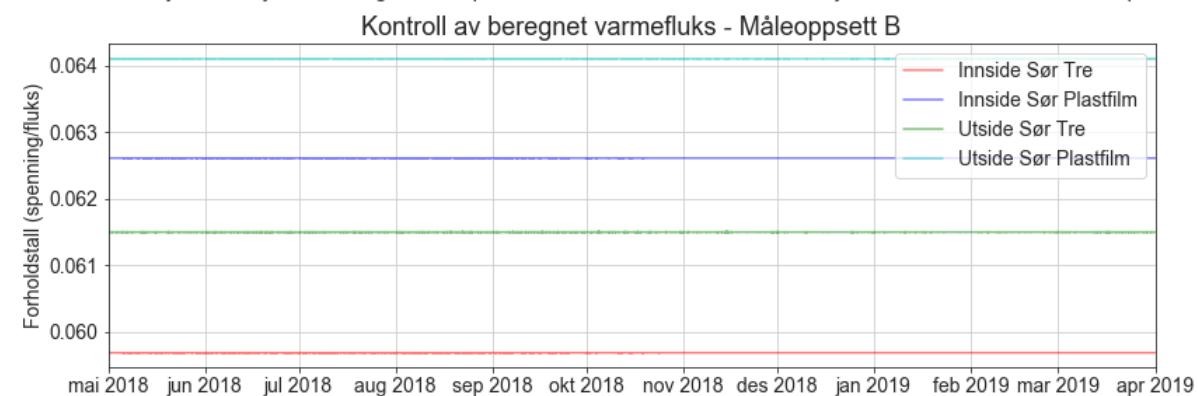
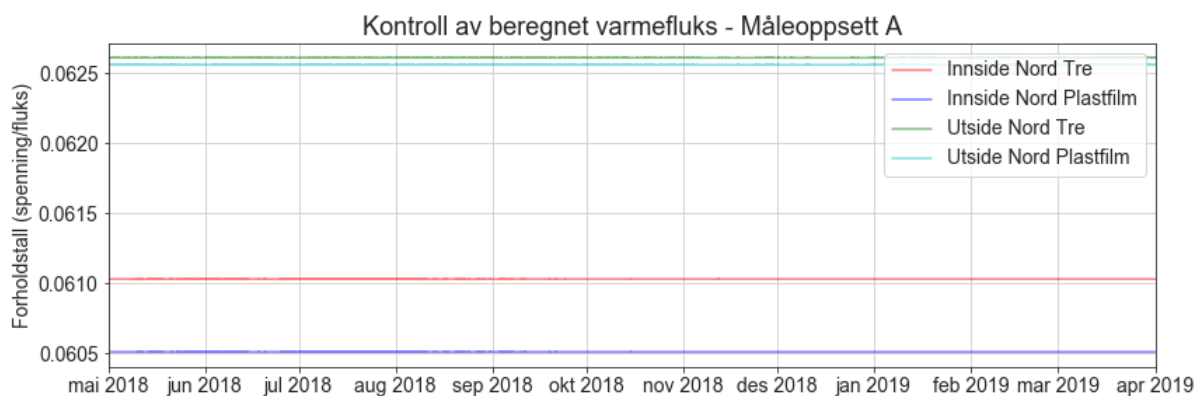
Vedlegg G Kontroller

Kontroll av varmekufluks

Varmefluksen beregnes av et forhold mellom voltsignalet som genereres på grunn av temperaturdifferansen over den termiske platen, og sensitiviteten til platen. Sensitiviteten er konstant for hver enkelt sensor og funnet ved kalibrering av sensorene. Det betyr at forholdet mellom varmekufluks og voltsignalet skal være konstant.



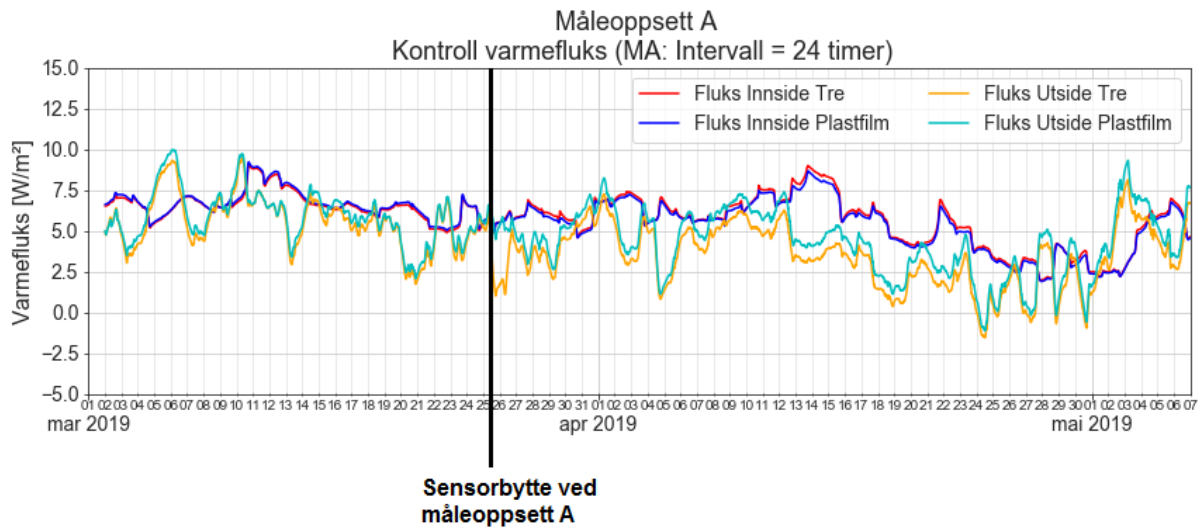
Vedlegg G-1 Kontroll av varmekraft fra rådatafilene.



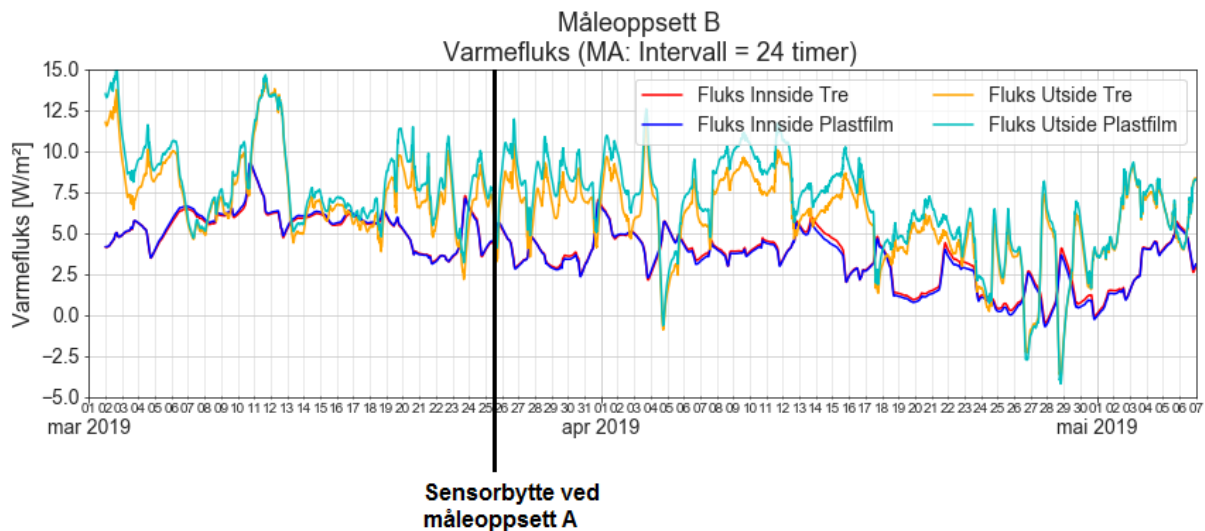
Vedlegg G-2 Kontroll av beregnet varmekraft.

Varmefluks etter sensorbytte

Varmeflukssensorene ble bare byttet ved måleoppsett A. Legger ved graf fra måleoppsett B til sammenligning. Det er tydelig at kurvene for varmeklukt målt fra innsiden har byttet plass etter byttet, men den samme tendensen finnes også ved måleoppsett B. Perioden etter at sensorene ble byttet har vært preget av klarvær og mye sol.



Vedlegg G-3 Varmeflukt ved måleoppsett A før og etter plassbytte av varmekluktssensorene.



Vedlegg G-4 Varmeflukt ved måleoppsett B. Det ble ikke gjennomført plassbytte av varmekluktssensorene her.

I dette vedlegget ligger de viktigste pytonskriptene for figurene som er benyttet i resultat og diskusjon. Noen av kodene er forkortet der det er repeterende koder med ulike variabelnavn.

Egendefinerte funksjoner – «functions»:

```
import pandas as pd
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
# Antall dager i måneden
def ant_dag(mnd_nr):
    m = {1:31, 2:28, 3:31, 4:30, 5:31, 6:30, 7:31, 8:31, 9:30, 10:31, 11:30, 12:31}
    return m[mnd_nr]

def mnd_navn(mnd_nr):
    m = {1:'januar', 2:'februar', 3:'mars', 4:'april', 5:'mai', 6:'juni', 7:'juli',
        8:'august', 9:'september', 10:'oktober', 11:'november', 12:'desember'}
    return m[mnd_nr]

#Funksjon som Leser alle filene i en mnd og legger de i en stor tabell.
def load_file(mnd_nr,start_dato,slutt_dato):
    if mnd_nr in [1,2,3]:
        mnd = pd.read_csv('Logfile_dp_2019_0{}_0{}.csv'.format(mnd_nr,start_dato))
        for i in range(start_dato+1,slutt_dato+1):
            if i < 10:
                ny_dag = pd.read_csv('Logfile_dp_2019_0{}_0{}.csv'.format(mnd_nr,i))
                mnd = mnd.append(ny_dag, ignore_index = True)
            else:
                ny_dag = pd.read_csv('Logfile_dp_2019_0{}_{}.csv'.format(mnd_nr,i))
                mnd = mnd.append(ny_dag, ignore_index = True)
    elif mnd_nr in [4,5,6,7,8,9]:
        mnd = pd.read_csv('Logfile_dp_2018_0{}_0{}.csv'.format(mnd_nr,start_dato))
        for i in range(start_dato+1,slutt_dato+1):
            if i < 10:
                ny_dag = pd.read_csv('Logfile_dp_2018_0{}_0{}.csv'.format(mnd_nr,i))
                mnd = mnd.append(ny_dag, ignore_index = True)
            else:
                ny_dag = pd.read_csv('Logfile_dp_2018_0{}_{}.csv'.format(mnd_nr,i))
                mnd = mnd.append(ny_dag, ignore_index = True)
    else:
        mnd = pd.read_csv('Logfile_dp_2018_{}_0{}.csv'.format(mnd_nr,start_dato))
        for i in range(start_dato+1,slutt_dato+1):
            if i < 10:
                ny_dag = pd.read_csv('Logfile_dp_2018_{}_0{}.csv'.format(mnd_nr,i))
                mnd = mnd.append(ny_dag, ignore_index = True)
            else:
                ny_dag = pd.read_csv('Logfile_dp_2018_{}_{}.csv'.format(mnd_nr,i))
                mnd = mnd.append(ny_dag, ignore_index = True)
    return mnd

#Funksjon som Leser flere måneder og legger de inn i en tabell #gjelder bare for
#hele måneder, må legge på eventuelle andre dager manuelt:
def load_more_files(mnd_liste):
    data = pd.DataFrame()
    for j in mnd_liste:
        ny_mnd = load_file(j,1,ant_dag(j))
        data = data.append(ny_mnd, ignore_index = True)
```

```
return data
```

#Funksjon som forandrer kolonnenavnene. Enklest å forandre alle siden det var flere som hadde samme kolonnenavn i den opprinnelige filen.

```
def column_names(df): df.columns = ['Time',\  
    'T_Air_1006',\  
    'RH_Air_1006',\  
    'T_Air_1010',\  
    'RH_Air_1010',\  
    'T_Air_1006out',\  
    'RH_Air_1006out',\  
    'T_Inside_1006_Wood',\  
    'T_Inside_1006_Film',\  
    'T_Outside_1006_Wood',\  
    'T_Outside_1006_Film',\  
    'T_Inside_1010_Wood',\  
    'T_Inside_1010_Film',\  
    'T_Outside_1010_Wood',\  
    'T_Outside_1010_Film',\  
    'Flux0_Inside_1006_Wood',\  
    'Flux0_Inside_1006_Film',\  
    'Flux0_Outside_1006_Wood',\  
    'Flux0_Outside_1006_Film',\  
    'Flux0_Inside_1010_Wood',\  
    'Flux0_Inside_1010_Film',\  
    'Flux0_Outside_1010_Wood',\  
    'Flux0_Outside_1010_Film',\  
    'Thermal_energy_360_01_Ventilation',\  
    'Thermal_power_360_01_Ventilation',\  
    'Thermal_energy_Radiators_Heating',\  
    'Electricity_433_01_F1LightOutlets',\  
    'Electric_power_433_01_F1LightOutlets',\  
    'Electricity_433_09_F2LightOutletsKitchen',\  
    'Electric_power_433_09_F2LightOutletsKitchen',\  
    'Electricity_434_01_Q15_Ventilation',\  
    'Electric_power_434_01_Q15_Ventilation',\  
    'Electricity_434_01_Q01_Ventilation',\  
    'Electric_power_434_01_Q01_Ventilation',\  
    'T_Air_Warehouse1',\  
    'RH_Air_Warehouse1',\  
    'CO2_Air_Warehouse1',\  
    'T_Air_1054',\  
    'RH_Air_1054',\  
    'T_Air_Warehouse2',\  
    'RH_Air_Warehouse2',\  
    'CO2_Air_Warehouse2',\  
    'T_Air_Warehouse3',\  
    'RH_Air_Warehouse3',\  
    'CO2_Air_Warehouse3',\  
    'Flux_Inside_1054_Wood',\  
    'Flux_Inside_1054_Film',\  
    'Flux_Outside_1054_Gypsum',\  
    'Flux_Outside_1054_Film',\  
    'T_Inside_1054_Wood',\  
    'T_Inside_1054_Film',\  
    'T_Outside_1054_Gypsum',\  
    'T_Outside_1054_Film',\  
    'Volt_Inside_1054_Wood',\  
    'Volt_Inside_1054_Film',
```

```

        'Volt_Outside_1054_Gypsum',\
        'Volt_Outside_1054_Film',\
        'Thermal-power_Radiators_Heating',\
        'Volt_Inside_1006_Wood',\
        'Volt_Inside_1006_Film',\
        'Volt_Outside_1006_Wood',\
        'Volt_Outside_1006_Film',\
        'Volt_Inside_1010_Wood',\
        'Volt_Inside_1010_Film',\
        'Volt_Outside_1010_Wood',\
        'Volt_Outside_1010_Film']

    return df

#Funksjon som velger ut de dataene som ønskes midlet av moving average
def utvalg(df):
    df_1 = df[['T_Air_1006',\
               'RH_Air_1006',\
               'T_Air_1010',\
               'RH_Air_1010',\
               'T_Air_1006out',\
               'RH_Air_1006out',\
               'T_Inside_1006_Wood',\
               'T_Inside_1006_Film',\
               'T_Outside_1006_Wood',\
               'T_Outside_1006_Film',\
               'T_Inside_1010_Wood',\
               'T_Inside_1010_Film',\
               'T_Outside_1010_Wood',\
               'T_Outside_1010_Film',\
               'Delta_T_1006_Wood',\
               'Delta_T_1006_Film',\
               'Delta_T_1010_Wood',\
               'Delta_T_1010_Film',\
               'Flux_Inside_1006_Wood',\
               'Flux_Inside_1006_Film',\
               'Flux_Outside_1006_Wood',\
               'Flux_Outside_1006_Film',\
               'Flux_Inside_1010_Wood',\
               'Flux_Inside_1010_Film',\
               'Flux_Outside_1010_Wood',\
               'Flux_Outside_1010_Film',\
               'U_verdi_Inside_1006_Wood',\
               'U_verdi_Inside_1006_Film',\
               'U_verdi_Outside_1006_Wood',\
               'U_verdi_Outside_1006_Film',\
               'U_verdi_Inside_1010_Wood',\
               'U_verdi_Inside_1010_Film',\
               'U_verdi_Outside_1010_Wood',\
               'U_verdi_Outside_1010_Film']]

    return df_1

#Beregne ny fluks. Beregnes ut fra voltsignal og sensitivitet
#Ganger Flux_Outside med -1 for at de skal gå samme veien.
def beregne_fluks(df):
    df['Flux_Inside_1006_Wood'] = df.Volt_Inside_1006_Wood * 1000/61.03
    df['Flux_Inside_1006_Film'] = df.Volt_Inside_1006_Film * 1000/60.51
    df['Flux_Outside_1006_Wood'] = df.Volt_Outside_1006_Wood * 1000/62.61 * (-1)
    df['Flux_Outside_1006_Film'] = df.Volt_Outside_1006_Film * 1000/62.56 * (-1)
    df['Flux_Inside_1010_Wood'] = df.Volt_Inside_1010_Wood * 1000/59.69

```

```

df['Flux_Inside_1010_Film'] = df.Volt_Inside_1010_Film * 1000/62.61
df['Flux_Outside_1010_Wood'] = df.Volt_Outside_1010_Wood * 1000/61.50 * (-1)
df['Flux_Outside_1010_Film'] = df.Volt_Outside_1010_Film * 1000/64.10 * (-1)
return df

#Beregne Delta_T
def delta_T(df):
    df['Delta_T_1006_Wood'] = df.T_Inside_1006_Wood - df.T_Outside_1006_Wood
    df['Delta_T_1006_Film'] = df.T_Inside_1006_Film - df.T_Outside_1006_Film
    df['Delta_T_1010_Wood'] = df.T_Inside_1010_Wood - df.T_Outside_1010_Wood
    df['Delta_T_1010_Film'] = df.T_Inside_1010_Film - df.T_Outside_1010_Film
    return df

#x-verdi dersom dataene ikke skal plottes med tidsformatering
def x_verdi(df):
    df['x_verdi'] = df.index + 1
    return df

# Beregne U-verdi: U = varmekuets/delta_T
def u_verdi(df):
    df['U_verdi_Inside_1006_Wood'] =
        df.Flux_Inside_1006_Wood / df.Delta_T_1006_Wood
    df['U_verdi_Inside_1006_Film'] =
        df.Flux_Inside_1006_Film / df.Delta_T_1006_Film
    df['U_verdi_Outside_1006_Wood'] =
        (df.Flux_Outside_1006_Wood / df.Delta_T_1006_Wood)
    df['U_verdi_Outside_1006_Film'] =
        (df.Flux_Outside_1006_Film / df.Delta_T_1006_Film)
    df['U_verdi_Inside_1010_Wood'] =
        (df.Flux_Inside_1010_Wood / df.Delta_T_1010_Wood)
    df['U_verdi_Inside_1010_Film'] =
        (df.Flux_Inside_1010_Film / df.Delta_T_1010_Film)
    df['U_verdi_Outside_1010_Wood'] =
        (df.Flux_Outside_1010_Wood / df.Delta_T_1010_Wood)
    df['U_verdi_Outside_1010_Film'] =
        (df.Flux_Outside_1010_Film / df.Delta_T_1010_Film)
    return df

```

Plotting av grafer for år og utvalgt periode:

Skript som lager grafer av trend i temperatur, RH, varmekuets, U-verdi og ulike standardavvik for mai 2018 til og med mars 2019. Det er bare inkludert et eksempel av plott for U-verdi, da de andre plottene gjøres på samme måte, men med andre variabelnavn som er gitt i Vedlegg B. Samme fremgangsmåte gjelder også for fremstilling av grafene for utvalgt periode, men månedslisten er begrenset til å bare gjelde desember og januar ([1,2]).

```

#Laster inn relevante kodebiblioteker
import numpy as np
import pandas as pd from matplotlib
import pyplot as plt from matplotlib
import dates as md import functions as f
import seaborn as sns

#Laster inn data

```

```

mnd_liste = [5,6,7,8,9,10,11,12,1,2,3]
data_alle = f.load_more_files(mnd_liste)
#Håndterer dataene og gjør beregninger ved hjelp av funksjonene definert
i "funksjoner":
f.column_names(data_alle)
f.delta_T(data_alle)
f.beregne_fluks(data_alle)
f.u_verdi(data_alle)

#Moving average (MA)
ma_1t = f.utvalg(data_alle).rolling(window=60,center=True).mean()
ma_7d = f.utvalg(data_alle).rolling(window=10080,center=True).mean()
ma_24t = f.utvalg(data_alle).rolling(window=1440, center=True).mean()

#Standardavvik
ma_1t_std = f.utvalg(data_alle).rolling(window=60,center=True).std()
ma_24t_std = f.utvalg(data_alle).rolling(window=60,center=True).std()
ma_7d_std = f.utvalg(data_alle).rolling(window=10080,center=True).std()
#Formaterer dato og tid til datetime64
data_alle['Time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')
ma_1t['Dato_time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')
ma_1t_std['Dato_time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')
ma_24t['Dato_time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')
ma_24t_std['Dato_time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')
ma_7d['Dato_time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')
ma_7d_std['Dato_time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')

#Format til aksene:
sns.set_style('ticks')
months = md.MonthLocator()
monthsFmt = md.DateFormatter('%b %Y')
days = md.DayLocator()
daysFmt = md.DateFormatter('%d')
import locale locale.setlocale(locale.LC_TIME, "no")

#U-verdi (MA: intervall = 1 uke)
plt.figure(figsize=(12,4.5))
ax1 = plt.subplot()
plt.plot(ma_7d.Dato_time,ma_7d.U_verdi_Inside_1006_Wood, color='r',\
         linestyle='--', label = 'U-verdi Innside Tre')
plt.plot(ma_7d.Dato_time,ma_7d.U_verdi_Inside_1006_Film,color='b',\
         linestyle='--', label = 'U-verdi Innside Plastfilm')
plt.plot(ma_7d.Dato_time,ma_7d.U_verdi_Outside_1006_Wood, color='r',\
         linestyle=':', label = 'U-verdi Utside Tre')
plt.plot(ma_7d.Dato_time,ma_7d.U_verdi_Outside_1006_Film, color='b',\
         linestyle=':', label = 'U-verdi Utside Plastfilm')
ax1.set_ylabel('U-verdi [W/m²K]',fontsize=16)
ax1.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax1.xaxis.set_major_locator(months)
ax1.xaxis.set_major_formatter(monthsFmt)
ax1.xaxis.set_tick_params(which='major',labelsize=14)
ax1.set_xlim('2018-05-01','2019-04-01')
ax1.grid(b=True, which='minor', axis = 'both', alpha=0.5)
ax1.grid(b=True, which='major', axis = 'both', alpha=1)
ax1.legend(fontsize=14, ncol=2)
plt.title('U-verdi (MA: Intervall = 1 uke)',fontsize=18)
plt.tight_layout() plt.savefig('Uverdi_movingAverage_luke_NORD_aar.png')
plt.show()

```

```

#Standardavvik
plt.figure(figsize=(12,4.5))
ax1 = plt.subplot()
plt.plot(ma_7d_std.Dato_time,ma_7d_std.U_verdi_Inside_1006_Wood, color='r',\
         linestyle='-', label = 'U-verdi Innside Tre')
plt.plot(ma_7d_std.Dato_time,ma_7d_std.U_verdi_Inside_1006_Film, color='b',\
         linestyle='-', label = 'U-verdi Innside Plastfilm')
plt.plot(ma_7d_std.Dato_time,ma_7d_std.U_verdi_Outside_1006_Wood, color='r',\
         linestyle=':', label = 'U-verdi Utside Tre')
plt.plot(ma_7d_std.Dato_time,ma_7d_std.U_verdi_Outside_1006_Film, color='b',\
         linestyle=':', label = 'U-verdi Utside Plastfilm')
ax1.set_ylabel('Standardavvik',fontsize=16)
ax1.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax1.xaxis.set_major_locator(months)
ax1.xaxis.set_major_formatter(monthsFmt)
ax1.xaxis.set_tick_params(which='major',labelsize=14)
ax1.set_xlim('2018-05-01','2019-04-01')
ax1.grid(b=True, which='minor', axis = 'both', alpha=0.5)
ax1.grid(b=True, which='major', axis = 'both', alpha=1)
ax1.legend(fontsize=14, ncol=2)
plt.title('Standardavvik U-verdi (MA: Intervall = 1 uke)',fontsize=18)
plt.tight_layout()
plt.savefig('Uverdi_std_movingAverage_1uke_NORD_aar.png')
plt.show()

```

#Plotte differansen mellom U_wood og U_film inne og ute, sammen med relativ Luftfuktighet =Hygrotermisk effekt

#MA: Intervall = 7d (1 uke)

```

ma_7d['Delta_U_Inside'] =
    ma_7d.U_verdi_Inside_1006_Film - ma_7d.U_verdi_Inside_1006_Wood
ma_7d['Delta_U_Outside'] =
    ma_7d.U_verdi_Outside_1006_Film - ma_7d.U_verdi_Outside_1006_Wood

```

```

plt.figure(figsize=(12,4.5))
ax1 = plt.subplot()
plt.plot(ma_7d.Dato_time,ma_7d.Delta_U_Inside, color='orange', linestyle='-',\
         label = 'Hygrotermisk effekt utside')
plt.plot(ma_7d.Dato_time,ma_7d.Delta_U_Outside, color='c', linestyle='-',\
         label = 'Hygrotermisk effekt innside')
ax1.set_ylabel('U-verdi [W/m²K]',fontsize=16)
ax1.set_ylim(0,0.07)
ax1.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax1.xaxis.set_major_locator(months)
ax1.xaxis.set_major_formatter(monthsFmt)
ax1.xaxis.set_tick_params(which='major',labelsize=14)
ax1.xaxis.set_minor_locator(days)
ax1.xaxis.set_tick_params(which='minor', direction='inout')
ax1.grid(b=True, which='minor', axis = 'both', alpha=0.5)
ax1.grid(b=True, which='major', axis = 'both', alpha=1)
ax2 = ax1.twinx()
plt.plot(ma_7d.Dato_time,ma_7d.RH_Air_1006, color = 'black', linestyle = '-',\
         label = 'RH Inne')
plt.plot(ma_7d.Dato_time,ma_7d.RH_Air_1006out, color = 'grey', linestyle = '-',\
         label = 'RH Ute')
ax2.set_ylabel('Temperatur [°C]', fontsize=16)
ax2.set_ylim(0,100)
ax2.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax2.xaxis.set_major_locator(months)
ax2.xaxis.set_major_formatter(monthsFmt)

```

```

ax2.xaxis.set_tick_params(which='major',labelsize=14)
ax2.xaxis.set_minor_locator(days)
ax2.xaxis.set_tick_params(which='minor', direction='inout')
ax2.set_xlim('2018-10-01','2019-04-01')
ax2.grid(b=True, which='minor', axis='both', alpha=0.5)
ax2.grid(b=True, which='major', axis='both', alpha = 1)
ax2.legend(fontsize=14, loc=1) ax1.legend(fontsize=14, loc=10)
plt.title('Hygrotermisk effekt og RH (MA: Intervall = 1 uke)',fontsize=18)
plt.tight_layout()
plt.savefig('DletaU_RH_MA1uke_NORD.png')
plt.show()

```

Akkumulert U-verdi:

```

from matplotlib import pyplot as plt
from matplotlib import dates as md
import functions as f
import seaborn as sns

```

```

#U akkumulert for hele året (Endrer mnd-lista til den perioden man ønsker å se på)
mnd_liste = [5,6,7,8,9,10,11,12,1,2,3]
data_alle = f.load_more_files(mnd_liste)
f.column_names(data_alle)
f.delta_T(data_alle)
f.beregne_fluks(data_alle)
f.u_verdi(data_alle)

```

```

data_alle['Time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')

```

```

data_alle['Accumulated_U_verdi_Inside_1006_Wood'] =
    data_alle.Flux_Inside_1006_Wood.cumsum()/data_alle.Delta_T_1006_Wood.cumsum()
data_alle['Accumulated_U_verdi_Inside_1006_Film'] =
    data_alle.Flux_Inside_1006_Film.cumsum()/data_alle.Delta_T_1006_Film.cumsum()
data_alle['Accumulated_U_verdi_Outside_1006_Wood'] =
    data_alle.Flux_Outside_1006_Wood.cumsum()/data_alle.Delta_T_1006_Wood.cumsum()
data_alle['Accumulated_U_verdi_Outside_1006_Film'] =
    data_alle.Flux_Outside_1006_Film.cumsum()/data_alle.Delta_T_1006_Film.cumsum()
data_alle['Accumulated_U_verdi_Inside_1010_Wood'] =
    data_alle.Flux_Inside_1010_Wood.cumsum()/data_alle.Delta_T_1010_Wood.cumsum()
data_alle['Accumulated_U_verdi_Inside_1010_Film'] =
    data_alle.Flux_Inside_1010_Film.cumsum()/data_alle.Delta_T_1010_Film.cumsum()
data_alle['Accumulated_U_verdi_Outside_1010_Wood'] =
    data_alle.Flux_Outside_1010_Wood.cumsum()/data_alle.Delta_T_1010_Wood.cumsum()
data_alle['Accumulated_U_verdi_Outside_1010_Film'] =
    data_alle.Flux_Outside_1010_Film.cumsum()/data_alle.Delta_T_1010_Film.cumsum()

```

```

sns.set_style('ticks')
import locale locale.setlocale(locale.LC_TIME, "no")
months = md.MonthLocator()
monthsFmt = md.DateFormatter('%b %Y')
days = md.DayLocator()
daysFmt = md.DateFormatter('%d')

```

```

#Måleoppsett A (nord)
plt.figure(figsize=(12,4.5))
ax1 = plt.subplot()
plt.plot(data_alle.Time,data_alle.Accumulated_U_verdi_Inside_1006_Wood,\
    color='r', linestyle='-', label = 'Akkumulert U-verdi Innside Tre')
plt.plot(data_alle.Time,data_alle.Accumulated_U_verdi_Inside_1006_Film,\

```



```

        color='b', linestyle='-', label = 'Akkumulert U-verdi Innside Plastfilm'
plt.plot(data_alle.Time,data_alle.Accumulated_U_verdi_Outside_1006_Wood,\
        color='r', linestyle=':', label = 'Akkumulert U-verdi Utside Tre')
plt.plot(data_alle.Time,data_alle.Accumulated_U_verdi_Outside_1006_Film,\
        color='b', linestyle=':', label = 'Akkumulert U-verdi Utside Plastfilm')
ax1.set_ylabel('U-verdi [W/m²K]',fontsize=16)
ax1.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax1.xaxis.set_major_locator(months)
ax1.xaxis.set_major_formatter(monthsFmt)
ax1.xaxis.set_tick_params(which='major',labelsize=14)
ax1.set_xlim('2018-05-01','2019-04-01')
ax1.grid(b=True, which='minor', axis = 'both', alpha=0.5)
ax1.grid(b=True, which='major', axis = 'both', alpha=1)
ax1.legend(fontsize=14, ncol=2, loc=1)
plt.title('U-verdi (Akkumulert)',fontsize=18)
plt.tight_layout()
plt.savefig('Uverdi_acc_NORD_aar.png')
plt.show()

```

#Samme kode for måleoppsett B, med noen modifikasjoner

Kode for boksploTT og fordelingskurver

```

#Laster inn relevante kodebiblioteker
from matplotlib import pyplot as plt
import functions as f
import seaborn as sns

#Laster inn data for vinter og sommer, Lager deretter dataFrames med relevante
kolonner
vinter = f.load_more_files([12,1,2])
f.column_names(vinter)
f.delta_T(vinter)
f.beregne_fluks(vinter)
f.u_verdi(vinter)

flux_vinter = vinter[['Flux_Inside_1006_Wood',\
                      'Flux_Inside_1006_Film',\
                      'Flux_Outside_1006_Wood',\
                      'Flux_Outside_1006_Film']]
u_verdi_vinter = vinter[['U_verdi_Inside_1006_Wood',\
                          'U_verdi_Inside_1006_Film',\
                          'U_verdi_Outside_1006_Wood',\
                          'U_verdi_Outside_1006_Film']]

sommer = f.load_more_files([6,7,8])
f.column_names(sommer)
f.delta_T(sommer)
f.beregne_fluks(sommer)
f.u_verdi(sommer)

flux_sommer = sommer[['Flux_Inside_1006_Wood',\
                        'Flux_Inside_1006_Film',\
                        'Flux_Outside_1006_Wood',\
                        'Flux_Outside_1006_Film']]

u_verdi_sommer = sommer[['U_verdi_Inside_1006_Wood',\

```



```

        'U_verdi_Inside_1006_Film',\
        'U_verdi_Outside_1006_Wood',\
        'U_verdi_Outside_1006_Film']]

#Boksplott som sammenligner varmekfluks og U-verdi sommer og vinter
#Varmefluks
plt.figure(figsize=(12,8))
plt.subplot(2,1,1)
ax = sns.boxplot(data=flux_sommer, orient='h',fliersize=0)
ax = sns.stripplot(data=flux_sommer, color='black', alpha=0.3,\
    orient = 'h', size=3)
ax.yaxis.set_ticklabels(['Fluks Innside Tre','Fluks Innside Plastfilm',\
    'Fluks Utside Tre','Fluks Utside Plastfilm'])
ax.xaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax.set_xlim(-100,75)
plt.xlabel('Varmefluks [W/m²]',fontsize=14)
plt.title('Varmefluks - Sommer',fontsize=18, fontweight = 'semibold')
plt.grid(axis='both')

plt.subplot(2,1,2)
ax = sns.boxplot(data=flux_vinter, orient='h',fliersize=0)
ax = sns.stripplot(data=flux_vinter, color='black', alpha=0.3,\
    orient = 'h', size=3)
ax.yaxis.set_ticklabels(['Fluks Innside Tre','Fluks Innside Plastfilm',\
    'Fluks Utside Tre','Fluks Utside Plastfilm'])
ax.xaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax.set_xlim(-100,75)
plt.xlabel('Varmefluks [W/m²]',fontsize=14)
plt.title('Varmefluks - Vinter',fontsize=18, fontweight = 'semibold')
plt.grid(axis='both')
plt.tight_layout()
plt.savefig('boxplot_fluks_sommer_vinter.png')
plt.show()

#U-verdi
plt.figure(figsize=(12,8))
plt.subplot(2,1,1)
ax = sns.boxplot(data=u_verdi_sommer, orient='h',fliersize=0)
ax = sns.stripplot(data=u_verdi_sommer, color='black', alpha=0.3,\
    orient = 'h', size=3)
ax.yaxis.set_ticklabels(['U-verdi Innside Tre','U-verdi Innside Plastfilm',\
    'U-verdi Utside Tre','U-verdi Utside Plastfilm'])
ax.xaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
plt.xlabel('U-verdi [W/m²K]',fontsize=14)
plt.title('U-verdi - Sommer',fontsize=18, fontweight = 'semibold')
plt.grid(axis='both')

plt.subplot(2,1,2)
ax = sns.boxplot(data=u_verdi_vinter, orient='h',fliersize=0)
ax = sns.stripplot(data=u_verdi_vinter, color='black', alpha=0.3,\
    orient = 'h', size=3)
ax.yaxis.set_ticklabels(['U-verdi Innside Tre','U-verdi Innside Plastfilm',\
    'U-verdi Utside Tre','U-verdi Utside Plastfilm'])
ax.xaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
plt.xlabel('U-verdi [W/m²K]',fontsize=14)

```

```

plt.title('U-verdi - Vinter',fontsize=18, fontweight = 'semibold')
plt.grid(axis='both')
plt.tight_layout()
plt.savefig('boxplot_Uverdi_sommer_vinter.png')
plt.show()

#Laster inn data for desember og januar
desember = f.load_more_files([12])
f.column_names(desember)
f.delta_T(desember)
f.beregne_fluks(desember)
f.u_verdi(desember)

delta_T_des = desember[['Delta_T_1006_Wood',\
                        'Delta_T_1006_Film',\
                        'Delta_T_1010_Wood',\
                        'Delta_T_1010_Film']]

flux_des = desember[['Flux_Inside_1006_Wood',\
                      'Flux_Inside_1006_Film',\
                      'Flux_Outside_1006_Wood',\
                      'Flux_Outside_1006_Film',\
                      'Flux_Inside_1010_Wood',\
                      'Flux_Inside_1010_Film',\
                      'Flux_Outside_1010_Wood',\
                      'Flux_Outside_1010_Film']]

januar = f.load_more_files([1])
f.column_names(januar)
f.delta_T(januar)
f.beregne_fluks(januar)
f.u_verdi(januar)

delta_T_jan = januar[['Delta_T_1006_Wood',\
                      'Delta_T_1006_Film',\
                      'Delta_T_1010_Wood',\
                      'Delta_T_1010_Film']]

flux_jan = januar[['Flux_Inside_1006_Wood',\
                    'Flux_Inside_1006_Film',\
                    'Flux_Outside_1006_Wood',\
                    'Flux_Outside_1006_Film',\
                    'Flux_Inside_1010_Wood',\
                    'Flux_Inside_1010_Film',\
                    'Flux_Outside_1010_Wood',\
                    'Flux_Outside_1010_Film']]

#Delta T - utvalgt periode, fyringssesong
plt.figure(figsize=(12,5))
plt.subplot(1,2,1)
ax = sns.boxplot(data=delta_T_des, fliersize=0)
ax = sns.stripplot(data=delta_T_des, color='black', alpha=0.3, size=3)
ax.set_xticklabels(['ΔT Tre \n Nord','ΔT Plastfilm \n Nord','ΔT Tre \n Sør',\
                    'ΔT Plastfilm \n Sør'],fontsize=14)
ax.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax.set_ylim(-15,35)
plt.grid(axis='both')
plt.ylabel('Temperatur [°C]',fontsize=14)
plt.title('ΔT - Desember',fontsize=18, fontweight = 'semibold')

```

```

plt.subplot(1,2,2)
ax = sns.boxplot(data=delta_T_jan, fliersize=0)
ax = sns.stripplot(data=delta_T_jan, color='black', alpha=0.3, size=3)
ax.set_xticklabels(['ΔT Tre \n Nord', 'ΔT Plastfilm \n Nord', 'ΔT Tre \n Sør', \
    'ΔT Plastfilm \n Sør'], fontsize=14)
ax.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
ax.set_ylim(-15,35)
plt.grid(axis='both')
plt.ylabel('Temperatur [°C]', fontsize=14)
plt.title('ΔT - Januar', fontsize=18, fontweight = 'semibold')
plt.tight_layout()
plt.savefig('boxplot_desember_og_januar_deltaT.png')
plt.show()

#Varmefluks - utvalgt periode, fyringssesong
plt.figure(figsize=(12,8))
plt.subplot(1,2,1)
ax = sns.boxplot(data=flux_des, fliersize=0)
ax = sns.stripplot(data=flux_des, color='black', alpha=0.3, size=3)
ax.set_xticklabels(['Fluks Innside Tre NORD', 'Fluks Innside Plastfilm NORD', \
    'Fluks Utside Tre NORD', 'Fluks Utside Plastfilm NORD', \
    'Fluks Innside Tre SØR'...], fontsize=14)
ax.set_ylim(-300,150)
ax.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
plt.grid(axis='both')
plt.ylabel('Varmefluks [W/m²]', fontsize=16)
plt.title('Varmefluks - Desember', fontsize=18, fontweight = 'semibold')

plt.subplot(1,2,2)
ax = sns.boxplot(data=flux_jan, fliersize=0)
ax = sns.stripplot(data=flux_jan, color='black', alpha=0.3, size=3)
ax.set_xticklabels(['Fluks Innside Tre NORD', 'Fluks Innside Plastfilm NORD', \
    'Fluks Utside Tre NORD', 'Fluks Utside Plastfilm NORD', \
    'Fluks Innside Tre SØR'... ], fontsize=14)
ax.set_ylim(-300,150)
ax.yaxis.set_tick_params(labelsize=14)
plt.grid(axis='both')
plt.ylabel('Varmefluks [W/m²]', fontsize=16)
plt.title('Varmefluks - Januar', fontsize=18, fontweight = 'semibold')
plt.tight_layout()
plt.savefig('boxplot_desember_og_januar_fluks.png')
plt.show()

#Fordelingskurver (kde-plott) for ΔT og varmekraft
plt.figure(figsize=(12,8))
plt.subplot(2,2,1)
sns.kdeplot(data=sommer.Delta_T_1006_Wood, shade=True)
sns.kdeplot(data=sommer.Delta_T_1006_Film, shade=True)
plt.title('Fordeling av ΔT-verdier for sommer', fontsize = 18, \
    fontweight = 'semibold')
plt.xlabel('Temperatur [°C]', fontsize=14)
plt.xlim(-15,35)
plt.ylim(0,0.12)
plt.legend(['ΔT Tre', 'ΔT Plastfilm'], fontsize=12)
plt.tick_params(labelsize=14)
plt.grid()

plt.subplot(2,2,3)

```

```

sns.kdeplot(data=vinter.Delta_T_1006_Wood, shade=True)
sns.kdeplot(data=vinter.Delta_T_1006_Film, shade=True)
plt.title('Fordeling av  $\Delta T$ -verdier for vinter', fontsize = 18,\
         fontweight = 'semibold')
plt.xlabel('Temperatur [°C]', fontsize=14)
plt.xlim(-15,35)
plt.ylim(0,0.12)
plt.legend([' $\Delta T$  Tre', ' $\Delta T$  Plastfilm'], fontsize=12)
plt.tick_params(labelsize=14)
plt.grid()

plt.subplot(2,2,2)
sns.kdeplot(data=sommer.Flux_Inside_1006_Wood, shade=True)
sns.kdeplot(data=sommer.Flux_Inside_1006_Film, shade=True)
sns.kdeplot(data=sommer.Flux_Outside_1006_Wood, shade=True)
sns.kdeplot(data=sommer.Flux_Outside_1006_Film, shade=True)
plt.title('Fordeling av varmefluks for sommer', fontsize = 18,\
         fontweight = 'semibold')
plt.xlabel('Varmefluks [W/m2]', fontsize=14)
plt.xlim(-20,20)
plt.ylim(0,0.35)
plt.legend(['Fluks Innside Tre', 'Fluks Innside Plastfilm',\
         'Fluks Utside Tre', 'Fluks Utside Plastfilm'], fontsize=12)
plt.tick_params(labelsize=14)
plt.grid()

plt.subplot(2,2,4)
sns.kdeplot(data=vinter.Flux_Inside_1006_Wood, shade=True)
sns.kdeplot(data=vinter.Flux_Inside_1006_Film, shade=True)
sns.kdeplot(data=vinter.Flux_Outside_1006_Wood, shade=True)
sns.kdeplot(data=vinter.Flux_Outside_1006_Film, shade=True)
plt.title('Fordeling av varmefluks for vinter', fontsize = 18,\
         fontweight = 'semibold')
plt.xlabel('Varmefluks [W/m2]', fontsize=14)
plt.xlim(-20,20)
plt.ylim(0,0.35)
plt.legend(['Fluks Innside Tre', 'Fluks Innside Plastfilm',\
         'Fluks Utside Tre', 'Fluks Utside Plastfilm'], fontsize=12)
plt.tick_params(labelsize=14)
plt.grid()
plt.tight_layout()
plt.savefig('Fordeling_varmefluks_deltaT.png')
plt.show()

```

Korrelasjoner

```

#Importerer nødvendige bibliotek
import functions as f

#Laster inn data
mnd_liste = [12,1]
data_alle = f.load_more_files(mnd_liste)

#Håndterer dataene og gjør beregninger ved hjelp av funksjonene definert i
"funksjoner":
f.column_names(data_alle)
f.delta_T(data_alle)
f.beregne_fluks(data_alle)
f.u_verdi(data_alle)

```

```

#Formaterer dato og tid til datetime64
data_alle['Time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')
data_alle.set_index('Time', inplace=True)

#Korrelasjon i U-verdi:
u_verdi = data_alle[['U_verdi_Inside_1006_Wood',\
                    'U_verdi_Inside_1006_Film',\
                    'U_verdi_Outside_1006_Wood',\
                    'U_verdi_Outside_1006_Film']]

u_verdi_ma = u_verdi.rolling(1440).mean()

u_verdi_ma.plot(figsize=(12,8))
korr_u_ma = u_verdi_ma.corr()

u_verdi_ma.diff().plot(figsize=(12,8))
korr_u_diff_ma = u_verdi_ma.diff().corr()

#Varmefluks og delta T
flux_T = data_alle[['Delta_T_1006_Wood',\
                   'Delta_T_1006_Film',\
                   'Flux_Inside_1006_Wood',\
                   'Flux_Inside_1006_Film',\
                   'Flux_Outside_1006_Wood',\
                   'Flux_Outside_1006_Film']]

flux_T_ma = flux_T.rolling(1440).mean()

flux_T_ma.plot(figsize=(12,8))
korr_flux_T_ma = flux_T_ma.corr()

flux_T_ma.diff().plot(figsize=(12,8))
korr_flux_T_diff_ma = flux_T_ma.diff().corr()

```

Skydekkeobservasjoner sammenlignet med temperatur og varmekraft

```

#Laster inn relevante kodebiblioteker
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
import pandas as pd
import functions as f

#Laster inn data - koden kan brukes for alle månedene, skifter bare på mnd_nr,
#så oppdateres navn i filen
mnd_nr = 12
data_alle = f.load_file(mnd_nr,1,f.ant_dag(mnd_nr))

#Håndterer dataene og gjør beregninger ved hjelp av funksjonene definert i
"funksjoner":
f.column_names(data_alle)
f.beregne_fluks(data_alle)
f.delta_T(data_alle)
f.u_verdi(data_alle)
f.x_verdi(data_alle)

#målinger er gjort hvert minutt. bruker derfor indexen+1 som x-verdier
#Moving average

```

```

ma_1t = f.utvalg(data_alle).rolling(window=60,center=True).mean()

ma_1t['Dag_time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')
ma_1t['x_verdi'] = data_alle.x_verdi
data_alle['Time'] = data_alle.Time.astype('datetime64')

verdata = pd.read_excel('skydekkeobservasjoner.xlsx')

#Må plukke ut værdata for aktuell måned:
verdata_utvalg = verdata[verdata.Mnd == mnd_nr]
verdata_utvalg.reset_index(inplace=True)

#Lage data for x-verdien
verdata_utvalg['x_verdi'] = verdata_utvalg.index + 0.5

#Må dele opp i to ulike tabeller, de som har observasjon og de som mangler
observasjon:

verdata_utvalg2 = verdata_utvalg[(verdata_utvalg.NN != '.')\
    & (verdata_utvalg.NN != 9)]
verdata_utvalg_mangler = verdata_utvalg[(verdata_utvalg.NN == '.')\
    | (verdata_utvalg.NN == 9)]
verdata_utvalg_mangler['ingen_data'] = 8 #Setter manglende observasjoner til
    verdien 8 slik at de fyller de røde søylene

#Temperatur og varmekraft på nordveggen (1006) sammenlignet med skydekke
plt.figure(figsize = (12,10))
ax = plt.subplot(3,1,1)
plt.plot(data_alle.x_verdi,data_alle.T_Inside_1006_Wood, color='r',\
    linestyle='--', label = 'Temperatur Innside Tre')
plt.plot(data_alle.x_verdi,data_alle.T_Inside_1006_Film, color='b',\
    linestyle='--', label = 'Temperatur Innside Plastfilm')
plt.plot(data_alle.x_verdi,data_alle.T_Outside_1006_Wood, color='orange',\
    linestyle='--', label = 'Temperatur Utside Tre')
plt.plot(data_alle.x_verdi,data_alle.T_Outside_1006_Film, color='c',\
    linestyle='--', label = 'Temperatur Utside Plastfilm')
ax.set_xticks(np.arange(0,len(data_alle),\
    len(data_alle)/f.ant_dag(mnd_nr)))
ax.set_xticklabels(np.arange(1,f.ant_dag(mnd_nr)+1))
plt.axis([0,len(data_alle),-20,35])
plt.tick_params(labelsize = 12)
plt.grid(True)
plt.legend(fontsize=14, ncol=2, loc=3)
plt.title('Temperatur og varmekraft sammenlignet med skydekke', fontsize = 18)
plt.xlabel('{} 2018'.format(f.mnd_navn(mnd_nr)).capitalize(),fontsize=14)
plt.ylabel('Temperatur [°C]',fontsize=14)
plt.tight_layout()

ax = plt.subplot(3,1,2)
plt.plot(ma_1t.x_verdi,ma_1t.Flux_Inside_1006_Wood, color='r',\
    linestyle='--', label = 'Fluks Innside Tre')
plt.plot(ma_1t.x_verdi,ma_1t.Flux_Inside_1006_Film, color='b',\
    linestyle='--', label = 'Fluks Innside Plastfilm')
plt.plot(ma_1t.x_verdi,ma_1t.Flux_Outside_1006_Wood, color='orange',\
    linestyle='--', label = 'Fluks Utside Tre')
plt.plot(ma_1t.x_verdi,ma_1t.Flux_Outside_1006_Film, color='c',\
    linestyle='--', label = 'Fluks Utside Plastfilm')
ax.set_xticks(np.arange(0,len(data_alle),len(data_alle)/f.ant_dag(mnd_nr)))
ax.set_xticklabels(np.arange(1,f.ant_dag(mnd_nr)+1))

```

```

plt.axis([0, len(data_alle), -10, 30])

plt.tick_params(labelsize = 12)
plt.grid(True)
plt.legend(fontsize=14, ncol=2, loc=4)
plt.xlabel('{} 2018'.format(f.mnd_navn(mnd_nr)).capitalize(), fontsize=14)
plt.ylabel('Varmefluks [W/m²]', fontsize=14) plt.tight_layout()

ax = plt.subplot(3, 1, 3)
plt.bar(verdata_utvalg2.x_verdi, verdata_utvalg2.NN, \
        label = 'Observasjon av skydekke')
plt.bar(verdata_utvalg_mangler.x_verdi, verdata_utvalg_mangler.ingen_data, \
        color = 'r', alpha = 0.2, label = 'Mangler observasjon')
ax.set_xticks(np.arange(0, len(verdata_utvalg), \
                        len(verdata_utvalg)/f.ant_dag(mnd_nr)))
ax.set_xticklabels(np.arange(1, f.ant_dag(mnd_nr)+1))
plt.axis([0, len(verdata_utvalg), 0, 8])
plt.tick_params(labelsize = 12)
plt.legend(fontsize=14, loc=1)
plt.xlabel('{} 2018'.format(f.mnd_navn(mnd_nr)).capitalize(), fontsize=14)
plt.ylabel('Grad av skydekke', fontsize=14)
plt.tight_layout()
plt.savefig('skyer_temperatur_fluks_nord_{}.png'.format(f.mnd_navn(mnd_nr)))
plt.show()

```



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway