

Antropogen påvirkning og bæreevne i  
turistgrotter:  
Grønligrotta, Mo i Rana

Masteroppgave i kvartærgeologi og paleoklima

av

Hildegunn Grindheim



Institutt for geovitenskap  
UNIVERSITETET I BERGEN

Juni 2018

## **SAMMENDRAG**

Grønligrotta er den eneste turistgrotta i Norge med innlagt belysning og god tilrettelegging for turister. Hensikten med denne masteroppgaven har vært å undersøke hvordan turistene påvirker miljøet i grotta, og om dette overskrider bæreevnen til grotta. For å undersøke dette har det blitt samlet inn temperatur- og CO<sub>2</sub>-data ved hjelp av dataloggere plassert på to planmorfologisk forskjellige steder i grotta. Storkirka er en stor passasje som er et knutepunkt av flere passasjer, mens Kapellet er en smal blindpassasje. I tillegg er det innhentet data fra nærliggende meteorologiske stasjoner for å sammenligne atmosfæren på terrengoverflaten mot endringer i grotteatmosfæren.

Ved stasjonen i Storkirka har temperaturmålingene vært preget av støy som har vanskeliggjort deteksjon av antropogen påvirkning. Temperaturen i Storkirka viser en bimodal fordeling for luftsensorene, og i kombinasjon med det støyende temperaturforløpet tyder dette på at denne stasjonen har god kontakt med atmosfæren utenfor grotta. Under turistsesongen i 2016 viser CO<sub>2</sub>-målinger i Storkirka en oscillasjon, der CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen synker under den globale atmosfæriske konsentrasjonen en stund etter det første turistbesøket for dagen. Dette fenomenet er derimot ikke å spore i 2017, der konsentrasjonen i stedet gir et høyt utslag før det synker til grunnivået. Denne oscillasjonen er tolket som en ventilasjonseffekt generert av turistbesøkene.

I Kapellet har derimot turistene gitt utslag i temperatur for hvert turistbesøk. Her synker temperaturen ned til bakgrunnsnivået mellom hvert besøk. Det er beregnet en gjennomsnittlig økning på 0.05°C per besøkende, noe som tilsvarer en tilførsel av energi på 1253 cal til hele luftvolumet ved stasjonen. Det er også utslag i CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen for hvert turistbesøk, og konsentrasjonen synker ned til et grunnivå mellom turistbesøkene. Regenereringstidene for CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen varierer mellom 10 min og 1 time for hoveddelen av besøkene. Forholdet mellom antall besøkende og maksimumsverdi i CO<sub>2</sub> gir 27.8±1.5 ppm per besøkende ved stasjonen.

Den ene stasjonen er preget av ventilasjon og ved den andre stabiliseres parameterne rundt grunnivået etter hvert turistbesøk, noe som tyder på at dagens besøksfrekvens i Grønligrotta ikke overskrider grottas bæreevne.

## FORORD

Først og fremst vil jeg takke hovedveileder professor Stein-Erik Lauritzen for sitt store engasjement og god veiledning under denne oppgaven. Og ikke minst, takk for at jeg har fått ta del i et så spennende prosjekt! En stor takk rettes også til medveileder, førsteamanuensis Rannveig Øvrevik Skoglund, for korrekturlesing og god hjelp til alle spørsmål jeg har hatt.

Videre må en stor takk rettes til Sverre Aksnes for sin kunnskap og hjelp om alle tekniske duppeditter som har inngått i dette prosjektet. Takk for all informasjon om loggerne du har samlet sammen for meg. En takk rettes også til Bjarte Hannisdal for statistikkspørsmål jeg har fått svar på.

Takk til grunneier Bjarne Pedersen for gjennomføring av dette prosjektet i Grønligrotta, og til Sissel Merete Lande for notering av antall besøkende.

Takk til mine medstudenter og venner gjennom både bachelor og master for morsomme og slitsomme stunder; Silje, Pernille, Sigurd og Kjetil. Det hadde aldri vært det samme uten dere! En spesiell takk rettes til Silje for at jeg alltid har deg i nærheten for en lunsj eller pause når livet er hardt.

Tusen takk til min kjære familie, som alltid har støttet meg i mine valg. En ekstra takk til storesøster Ann Kari som har korrekturlest, og som har blitt med på trening og fjellturer når jeg har hatt behov for å få ut litt frustrasjon.

Sist, men ikke minst: Takk Fredrik! For all trøst, oppmuntring og at du alltid tror på meg. Uten deg hadde det trolig klikket for meg for lenge siden.

Bergen, mai 2018

Hildegunn Grindheim

# Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	1
1.1	Problemstilling.....	1
1.2	Geografisk beliggenhet.....	2
1.3	Berggrunnsgeologi.....	3
1.4	Klimaforhold .....	4
1.5	Grottemorfologi og turistrute.....	6
1.6	Tidligere arbeid.....	9
2	Teori .....	10
2.1	Hva er karst og grotter? .....	10
2.2	Dannelsen av en grotte .....	10
2.3	Epikarstsonen eller den subkutane sonen .....	10
2.4	Planmorfologi – labyrintgrotte .....	11
2.5	Grottemeteorologi – grottens mikroklima .....	12
2.5.1	Ventilasjon .....	12
2.5.2	Temperatur .....	14
2.5.3	CO <sub>2</sub> .....	16
3	Metoder og innsamling av data .....	19
3.1	Innledning.....	19
3.2	Tidsrom med datamateriale .....	19
3.3	Innsamling av data.....	19
3.4	Uthenting av data.....	23
3.5	Programkoden.....	23
3.6	Beregning av tilført varme.....	25
3.7	Statistiske metoder og begreper .....	26
3.7.1	Korrelasjonsanalyse .....	26
3.7.2	Regresjonsanalyse .....	27
3.7.3	Autokorrelasjonsanalyse .....	27
3.7.4	Nullhypotese, P-verdi og Shapiro-Wilk test .....	28
4	Resultater.....	29
4.1	Innledning.....	29
4.2	Oversikt .....	29
4.3	Beskrivelse av en dag .....	32
4.3.1	Storkirka .....	32

4.3.2	Kapellet .....	33
4.4	Bevegelse og antall besøkende .....	34
4.5	CO <sub>2</sub> -konsentrasjonens dynamikk .....	36
4.5.1	Storkirka .....	36
4.5.2	Kapellet .....	46
4.6	Temperatur.....	55
4.6.1	Storkirka .....	55
4.6.2	Kapellet .....	61
5	Diskusjon.....	70
5.1	Mulige feilkilder knyttet til målinger .....	70
5.2	CO <sub>2</sub> .....	73
5.2.1	Mulige forklaringer på sesongtrend i CO <sub>2</sub> i Storkirka og Kapellet.....	73
5.2.2	Antropogen påvirkning på CO <sub>2</sub> -nivået.....	77
5.3	Temperatur.....	83
5.3.1	Sesongtrend Storkirka og Kapellet.....	83
5.3.2	Antropogen påvirkning på temperatur .....	84
5.4	Regresjon og korrelasjon .....	86
5.5	Videre arbeid .....	87
6	Konklusjon .....	88
	Referanser.....	89
	Vedlegg .....	93

# 1 Innledning

Denne masteroppgaven er en del av prosjektet CAVEMONITOR som har som mål å etablere en protokoll for måling av turistpåvirkning i grottemiljøet. Prosjektet er et samarbeid med «Emil Racovita», Institutt for speleologi i București og Cluj-Napoca og «Babes-Bolyai», Universitetet i Cluj-Napoca i Romania. Denne masteroppgaven vil først og fremst ta for seg resultatene fra Grønligrotta i Nordland, Nord-Norge. Dette vil gi et innblikk i hvordan mennesker påvirker grottemiljøet, men også hvordan mikroklimaet i grotten fungerer.

## 1.1 Problemstilling

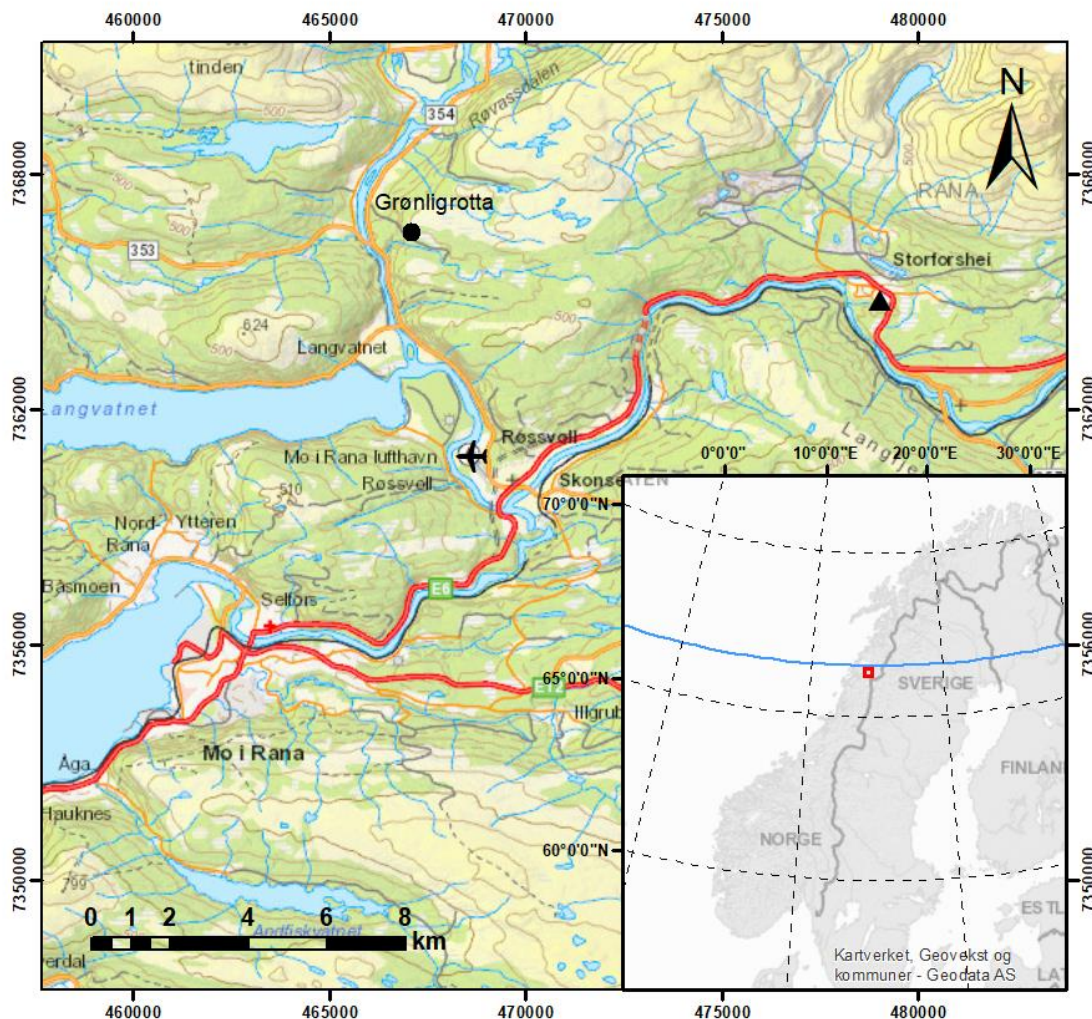
I Norge er det omtrent 2000 kjente grotter (Lauritzen, 2010), men få av disse er tilrettelagt for turister på kommersielt nivå. Grønligrotta er Norges eneste grotte med innlagt belysning for turister (Lauritzen, 2009). Det har vært gjort en del forskning utenlands på hvilken effekt turister har på mikroklimaet i grotter for både CO<sub>2</sub> (Lang et al., 2015) og temperatur (Šebela og Turk, 2014), påvirkningen dører har på ventilasjon og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon (Lang et al., 2017) og maksimum besøkskapasitet i turistgrotter (Calaforra et al., 2003). Det er derimot ikke gjort lignende arbeid i norske grotter.

Hensikten med denne oppgaven er å undersøke om Grønligrottas miljø er bærekraftig med dagens besøksfrekvens. For å undersøke dette har oppgaven som mål å besvare følgende spørsmål:

- Hva er grunnivået av CO<sub>2</sub> og middeltemperatur i grotta med og uten påvirkning fra turistene?
- Hvor lang er halveringstiden under CO<sub>2</sub>-regenereringen i etterkant av et turistbesøk?
- Hvordan påvirker antall besøkende maksimumsverdien av CO<sub>2</sub> og temperatur under et turistbesøk? Er det mulig å fastslå hvor mye som tilføres av CO<sub>2</sub> og varme per besøkende?
- Hvordan reagerer mikroklimaet i grotta på eksterne drivkrefter som endringer i lufttrykk og temperatur?

## 1.2 Geografisk beliggenhet

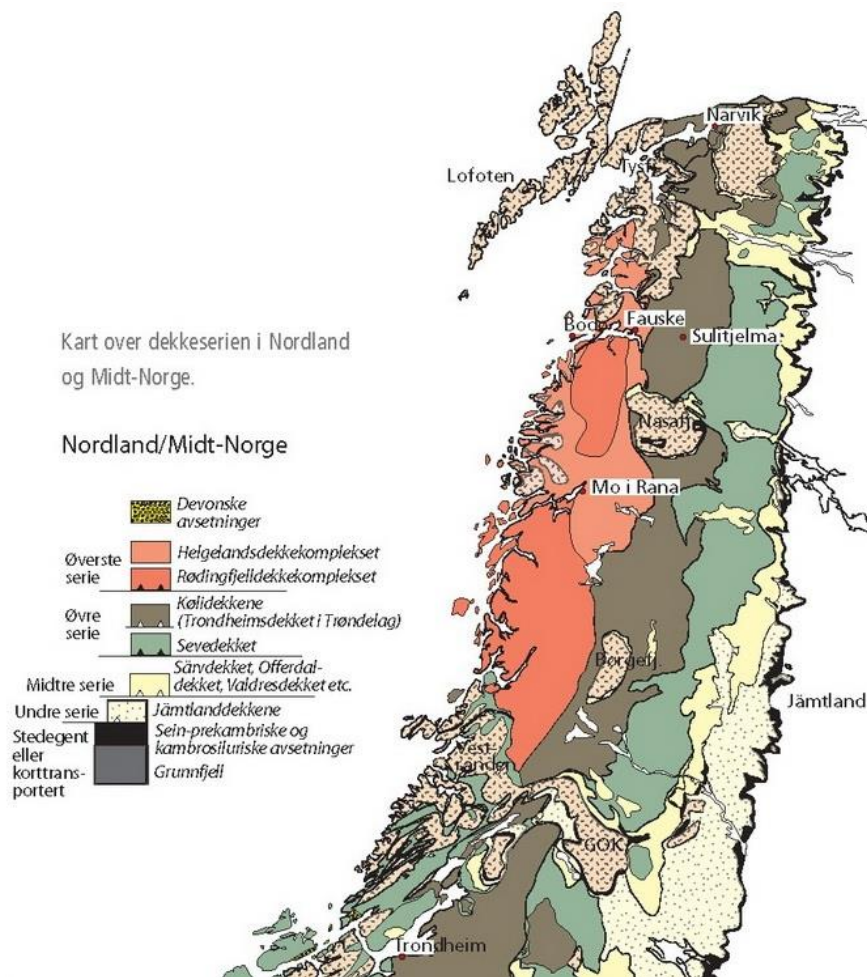
Grønligrotta er lokalisert ca. 12 km nordøst for Mo i Rana, Nordland, like sør for polarsirkelen, figur 1.2.1. Røvassdalen strekker seg i nordøst-sørvestlig retning, og Grønligrotta ligger på østsiden av dalen, merket med svart prikk på figur 1.2.1. Grønligrotta ligger på ca. 250 m o.h. ved gården Grønli. Dette er den eneste grotta med innlagt belysning for turister i Norge (Lauritzen, 2009). Den meteorologiske stasjonen på Mo i Rana Lufthavn, Røssvoll, er merket med flysymbol på kartet og den meteorologiske stasjonen på Storforshei er merket av med en svart trekant. Flyplassen/Lufthavnen ligger omtrent 6 km sør for grotten.



**Figur 1.2.1:** Blå linje på det lille kartutsnittet viser polarsirkelen og den røde firkanten viser området for det store kartutsnittet. Grønligrotta ligger på østsiden av Røvassdalen, merket med svart prikk. Meteorologiske stasjoner på Røssvoll og Storforshei er merket med henholdsvis flysymbol og trekant. Kartdata er hentet fra: Kartverket, Geovekst og Kommuner – Geodata AS.

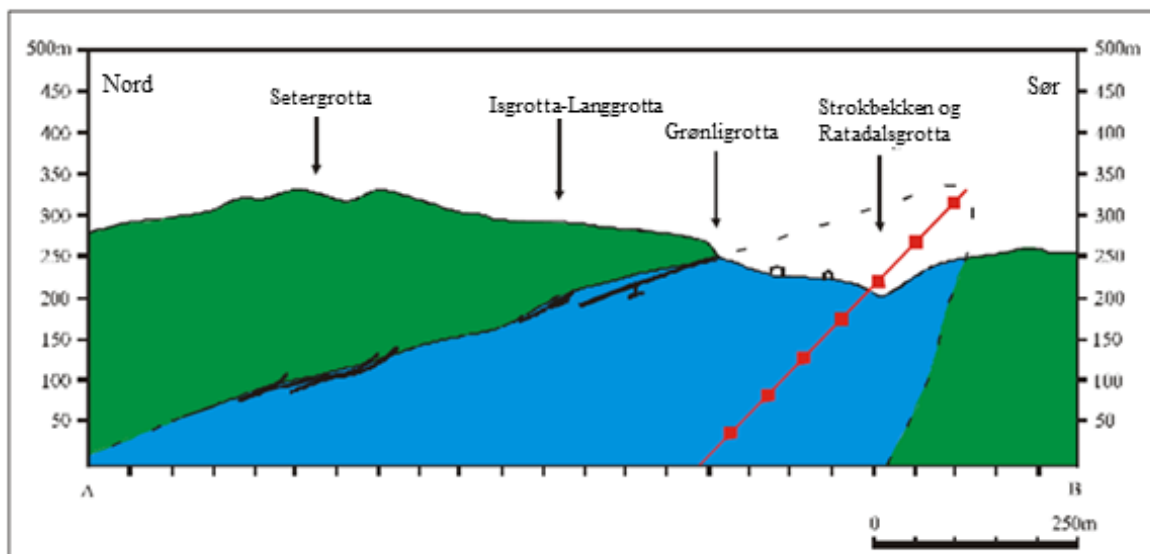
### 1.3 Berggrunnsgeologi

Berggrunnen i Nordland er påvirket av den kaledonske fjellkjededannelsen, da kontinentene Laurentia og Baltika kolliderte for ca. 425 millioner år siden og Iapetushavet ble lukket (Fossen et al., 2013). Under kollisjonen ble Laurentia presset over deler av Baltika, slik at berggrunnen her ble presset ned, og temperatur og trykk økte. Denne tektoniske aktiviteten førte til rekrystallisering av karbonatene til marmor. Kollisjonen førte også til dannelsen av dekkekomplekser, som består av et eller flere dekker, der et dekke består av flere bergarter, figur 1.3.1. Berggrunnen i området rundt Røvassdalen er antatt å være en del av Rødingfjelldekkekomplekset, der det er bergarter av antatt prekambrisk til kambro-silursk alder (Søvegjarto et al., 1989). Bergartene ved Grønligrotta tilhører Dunderlandsformasjonen i Ørtfjellgruppen, og er kalkspatmarmor og dolomittmarmor mellom lag av granatglimmerskifer og glimmerskifer (Søvegjarto et al., 1989).



**Figur 1.3.1:** Dekkeseerien i Nordland. Grønligrotta ligger nord for Mo i Rana som en del av Rødingfjelldekkekomplekset. Hentet fra Fossen et al. (2013).





**Figur 1.3.2:** Folden ved Grønlia i vertikalprofil. Glimmerskifer i grønt og marmor i blått. Akseplan merket i rødt. Fra Skutlaberg (2003).

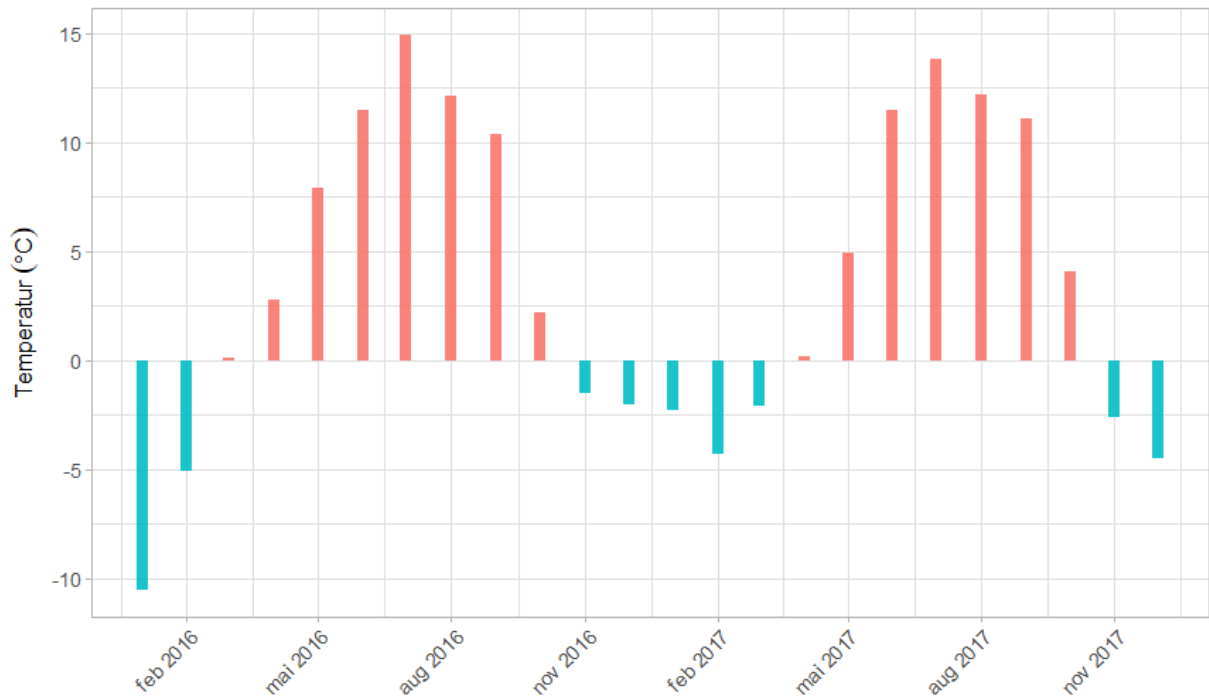
Grønligrotta er avgrenset under en granatglimmerskifer med omtrentlig helning  $19^\circ$  mot nord-nordøst (Øvrevik, 2002). Figur 1.3.2 viser lagpakken ved Grønlia, som er en stor, antyklinal fold med akseplan som faller om lag  $45^\circ$  mot nord (Øvrevik, 2002).

## 1.4 Klimaforhold

Klimaforholdene ved Grønligrotta er styrt av breddegrad og nærheten til kysten. Dette gir kalde vintre og milde somre i et klima som kan betegnes som en kombinasjon av subarktisk og maritimt (Øvrevik, 2002). Måleperioden for data i Grønligrotta er 15.02.16 til 04.12.17, og derfor er meteorologiske data innhentet for samme periode. Temperaturmålinger fra Mo i Rana lufthavn, Røssvoll, 70 m o.h. viser at juli 2016 er den varmeste måneden i området med middeltemperatur  $14.9^\circ\text{C}$ . Den kaldeste måneden innenfor måleperioden er februar 2017 med  $-4.6^\circ\text{C}$  (se figur 1.4.1).

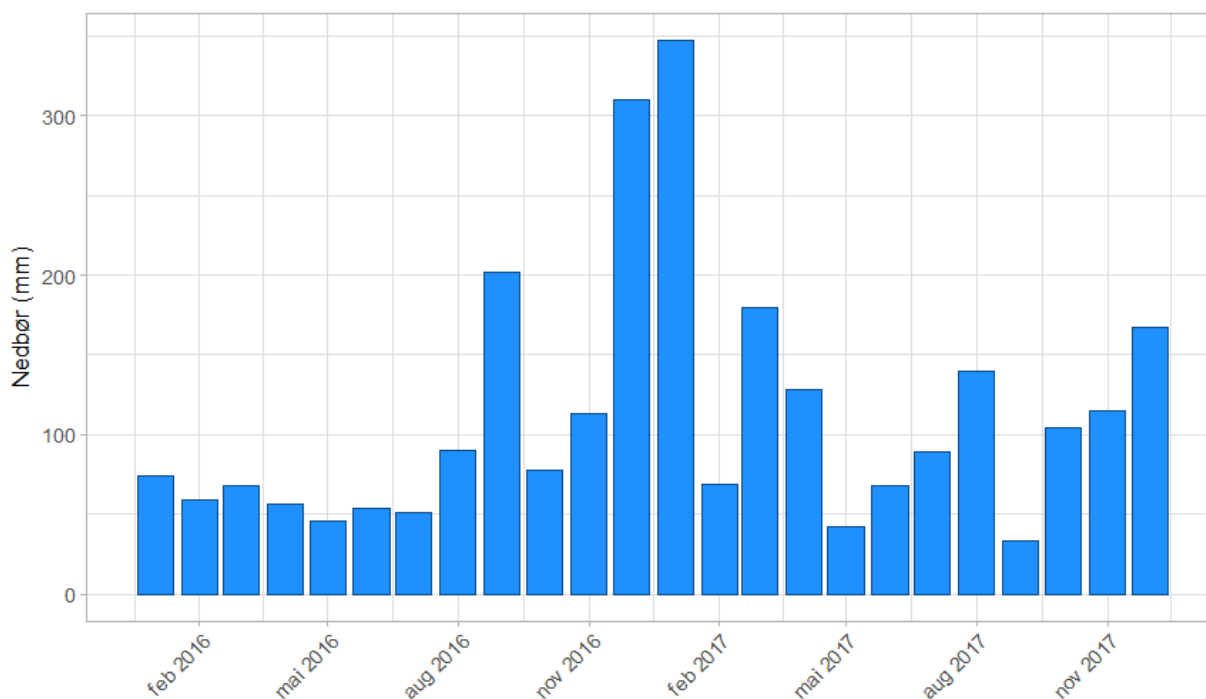
Den gjeldende normalperioden i dag er fra 1961 til 1990, men basert på innsamlingsperioden av data i Grønligrotta er det valgt å bruke årsmiddeltemperaturer for perioden 2007-2017 som sammenligning. Dette er fordi normaltemperaturen for normalperioden er  $2.3^\circ\text{C}$ , mens gjennomsnittet av årsmiddeltemperaturer for perioden 2007-2017 er  $3.5^\circ\text{C}$ . Grønlia ligger på ca. 250 m o.h. og dersom man tar hensyn til adiabatisk temperaturendring, oppgitt til  $0,6^\circ\text{C}/100$  m (Utaaker, 1991), vil årsmiddeltemperaturen ved Grønlia være omtrent  $1^\circ\text{C}$  lavere enn ved Røssvoll. Dette gir en årsmiddeltemperatur ved Grønlia på  $2.5^\circ\text{C}$ .

Middeltemperatur for april og juli 2017 ble regnet som altfor usikre fra Mo i Rana Lufthavn, Røssvoll. En grunn til dette er at det mange dager ikke er foretatt målinger, og verdiene kan være feil og ikke korrigerte i henhold til Meteorologisk Instituttts kvalitetskontroll. Det er dermed gjort et estimat for april og juli 2017 basert på størrelsesforhold fra månedene før og etter med utgangspunkt i målestasjonen ved Mo i Rana, figur 1.4.1.



**Figur 1.4.1:** Middeltemperaturer fra Mo i Rana Lufthavn, Røssvoll, for 2016-2017. Data er hentet fra Meteorologisk institutt gjennom [eklima.met.no](http://eklima.met.no).

Den årlige nedbørsnormalen ved Storforshei fra perioden 2012-2017 er omtrentlig 1390 mm. Generelt har sommermånedene minst nedbør i Grønlia, men september 2017 var måneden med minst nedbør over hele måleperioden med 33 mm, figur 1.4.2. Månedene med mest nedbør er desember og januar i årsskiftet 2016/2017, og mesteparten av dette kom sannsynligvis som snø, da middeltemperaturen lå på henholdsvis  $-2.0^{\circ}\text{C}$  og  $-2.3^{\circ}\text{C}$ . Ved Grønligrotta er det tidligere målt en årlig nedbørsmengde på 1680 mm (Øvrevik, 2002). Nedbørsdata er hentet fra målestasjon i Mo i Rana ved 40 m o.h og Storforshei ved 110 m o.h. Dataene er innhentet fra Meteorologisk Institutt gjennom [eklima.met.no](http://eklima.met.no).



**Figur 1.4.2:** Nedbør (mm) per måned i 2016-2017 ved Storforshei. Data er hentet fra Meteorologisk institutt gjennom [eklima.met.no](http://eklima.met.no)

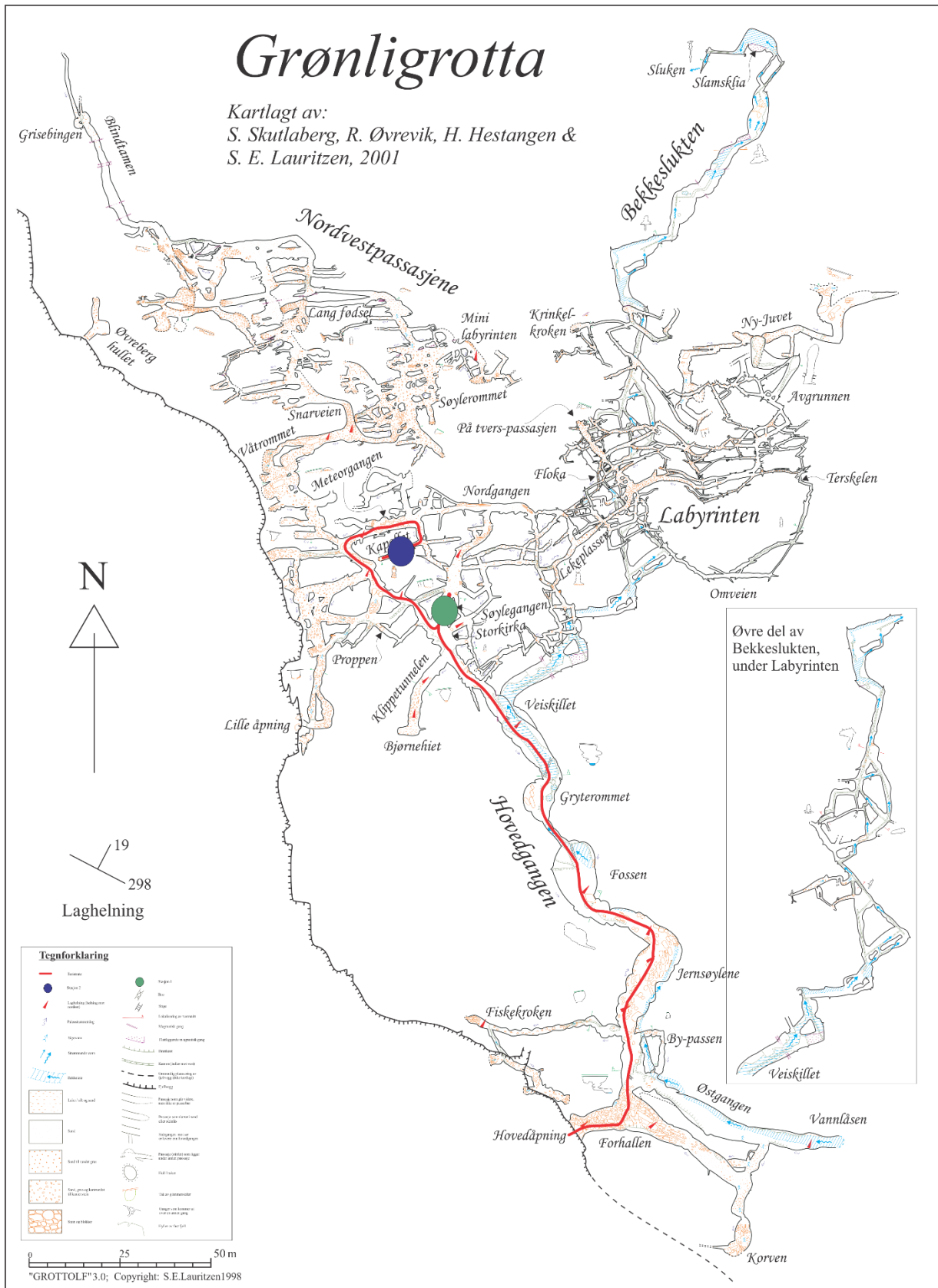
## 1.5 Grottemorfologi og turistrute

Grønligrotta har blitt kartlagt til en total lengde på 4100 m, med høyder som varierer fra 249 m o.h. ved *Hovedåpningen* til 139 m o.h. ved *Avgrunnen* og *Ny-Juvet* (Øvrevik, 2002). Grotta har to åpninger som ikke er fysisk avsperrert med dører eller lignende. *Hovedåpningen* er der turistene går inn og ut, figur 1.5.1, og *Lille åpning* som ligger på ca. 237 m o.h. ligger omtrentlig 150 m lenger nord langs fjellsiden. Dette gir en høydeforskjell på 12 m. De største passasjene i Grønligrotta er *Hovedåpningen*, *Hovedgangen*, *Fiskekroken*, *Klippetunnelen* og *Storkirka* (Øvrevik, 2002). Ved *Hovedåpningen* er det mye kollapsmateriale (blokker) og stien ned er anlagt på disse.



*Figur 1.5.1: Hovedåpningen ved Grønligrotta. Foto: Stein-Erik Lauritzen.*

Turistruten følger den røde linjen på figur 1.5.2. Turistene kommer inn *Hovedåpningen* og fortsetter forbi *Fiskekroken* og *By-passen* bort til *Jernsøylene*. Her er det lavt under taket, og man må gjerne kroke seg litt ned for å gå gjennom. Deretter fortsetter man i *Hovedgangen* forbi *Fossen* og *Jettegrytene*. Her er stien tilrettelagt med betongfundament og rekkverk. Ved *Veiskillet* forsvinner bekken ned en annen passasje enn der turistene går. Stien fortsetter inn mot *Storkirka* der den ene dataloggerstasjonen er plassert, merket med grønn prikk på kartet. Storkirka fungerer som et knutepunkt for flere passasjer, blant annet *Klippetunnelen*, *Søylegangen* og videre inn mot *Kapellet*. Etter at turistene har stoppet i *Storkirka*, fortsetter ruten inn mot *Kapellet*. *Kapellet* er en smal og 3.5 m høy passasje som er blokkert av en granittblokk i enden. I denne passasjen er den andre dataloggerstasjonen plassert, merket med blå prikk på kartet. Deretter beveger turistene seg ut langs samme rute som de kom inn. Langs hele denne ruten er det lagt inn lys.



**Figur 1.5.2:** Oversikt over Grønligrotta. Turistrute merket i rødt. Kapellet merket med blå prikk, Storkirka merket med grønn prikk. Modifisert etter Øvrevik (2002).

## 1.6 Tidligere arbeid

Grønligrotta ble trolig oppdaget rundt 1750 da folk først bosatte seg i området ved Grønlia (St. Pierre, 1988). I 1874 skal Corneliussen fra Norges Geologiske Undersøkelse ha vært en av de første geologene som besøkte Grønligrotta (Oxaal, 1914). Oxaal (1914) oppgir at også prof. J. H. L. Vogt har besøkt hulen og gitt en beskrivelse, og senere har den blitt besøkt og kartlagt av Kaptein Hvoslef i 1906. Oxaal (1914) beskrev Grønligrotta og kartla den til 1210 m, men anslo at den totale lengden kunne være omtrentlig 1500 m. Under denne kartleggingen beskriver Oxaal dannelser av enkelte speleothemer, men at forekomstene er sparsomme. En annen beskrivelse som er verdt å merke seg er fra det dypeste punktet han nådde i grotten, 107 m dypere enn *Hovedåpningen*:

*"Luften her nede er klam, fugtig og tilsyneladende stillestaaende, mens man litt lenger op i hulen, i Ny-Juvet, allerede merker træk."*

Etter dette har Grønligrotta blitt beskrevet og nevnt av flere geologer og grotteentusiaster som blant annet Horn (1947) og St. Pierre (1988). Kartlegginger på 1960-tallet av blant annet SWETC, Grønlie og Haugane ga en ny lengde på 2000 m (St. Pierre, 1988).

I perioden 2001-2005 har Lauritzen, Hestangen, Skutlaberg og Øvrevik gjort kartleggingsarbeid av Grønli-Setersystemet (Lauritzen et al., 2005). Denne kartleggingen avdekket en total lengde av Grønligrotta på 4100 m. Alderen til Grønligrotta ble diskutert i Øvrevik (2002), med den konklusjon at grotta har en minimumsalder på 15 000 år.

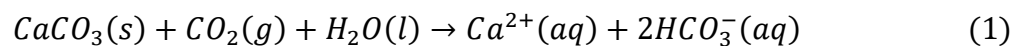
## 2 Teori

### 2.1 Hva er karst og grotter?

Karst beskriver et spesielt landskap som består av grotter og store system under jorden som er utviklet i og på lettløselige bergarter som kalkstein, marmor og gips (Ford og Williams, 2007). Dette landskapet blir dannet gjennom kjemisk forvitring hvor ulike prosesser løser opp berggrunnen, der vann er hovedkomponenten i prosessen. Et karstsystem kan deles i to overflater: eksokarst og endokarst. Eksokarst er den ytre sonen som har kontakt med atmosfæren, biosfæren og overflatevann, mens endokarst er den indre sonen som er i kontakt med vann, luft og sedimenter inne i grotta (Lauritzen, 2016c).

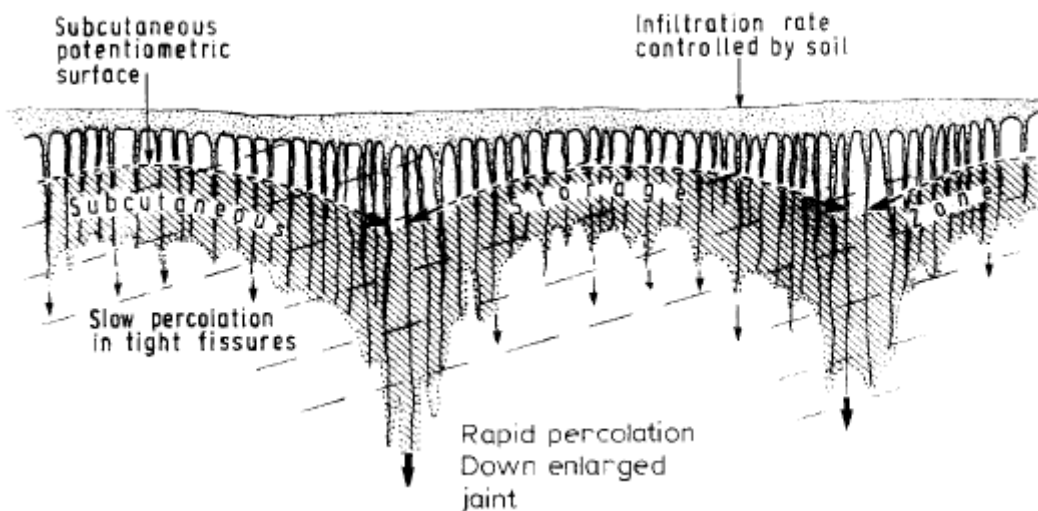
### 2.2 Dannelsen av en grotte

Karstifiseringsprosessen foregår ved at kalsitt ( $\text{CaCO}_3$ ) reagerer med vann og karbondioksid og det dannes ioner av kalsium og bikarbonat ( $\text{Ca}^{2+}$  og  $\text{HCO}_3^-$ ), ligning 1. Denne prosessen er avhengig av  $\text{CO}_2$ -tilførsel og blir betraktet som en syklus. Oppløsning av kalsitt binder altså  $\text{CO}_2$ , mens utfelling av kalsitt, for eksempel gjennom stalagmitter og stalaktitter, frigir  $\text{CO}_2$  til atmosfæren (Lauritzen, 2016a). Dersom  $\text{CO}_2$ -innholdet i atmosfæren øker, vil dette kunne løse opp mer kalkstein fordi mer karbonsyre blir løst i vann, noe som igjen akselererer karstprosessen. Når oppløsningen av bergarten har vært tilstrekkelig over lang nok tid vil sprekker kunne utvide seg ved at oppløsningshastigheten øker og vannstrømmen blir turbulent. På denne måten utvikles sprekke til farbare passasjer for mennesker.



### 2.3 Epikarstsonen eller den subkutane sonen

Den subkutane sonen, eller epikarstsonen, utgjør grensen mellom ekso- og endokarst (Lauritzen, 2016c). Den ligger gjerne rett under jordsmonnet, men kan også være eksponert. Epikarst er som regel forvitret og har høy sprekketetthet, se figur 2.3.1. Dette gjør at jordsmonn og vann kan trenge ned i sprekke og inn i et underliggende grottesystem gitt at det er forbindelse gjennom systemet. Epikarstsonen har typisk en dybde på 3-10 m, men i områder med massiv kalkstein og en lav sprekketetthet kan dybden være på 30 m eller mer (Ford og Williams, 2007). Den subkutane sonen kan være erodert bort under tidligere glasialer (Lauritzen, 2016c), slik at overflaten derimot har en lav sprekketetthet.



Figur 2.3.1: Den subkutane sonen med høy sprekketetthet som vann kan trenge ned i. Fra Williams (1983).

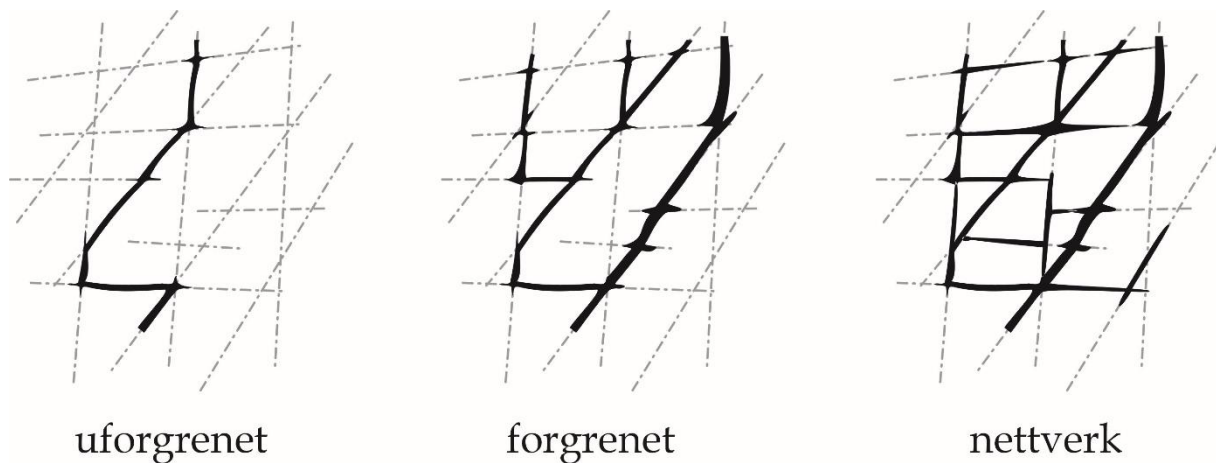
## 2.4 Planmorfologi – labyrintgrotte

Passasjene i en grotte utvikles langs forkastninger, sprekker og lagplan. Når hovedgeometrien til et grottesystem er etablert vil den videre utviklingen avhenge av om systemet er i den freatiske eller vadose sonen, og om systemet fylles eller tømmes for sedimenter (Lauritzen og Lundberg, 2000). Labyrintgrotter er en serie ganger som danner et nettverk av passasjer, figur 2.4.1, og er ganske vanlige i stripekarstområdet i sentral-Skandinavia (Skoglund og Lauritzen, 2011). Labyrintgrotter dannes under forhold der mesteparten av de hydrologiske tilgjengelige sprekkeene kan oppløses samtidig og under omtrentlig samme rate (Palmer, 1975).

Opprinnelig mente man at labyrintgrotter ble dannet ved to potensielle hovedmekanismer; diffus tilførsel av vann og flomvannstilførsel (Palmer, 1975). Palmer (1975) mener at ved diffus tilførsel vil vann kunne komme nedenfra eller ovenfra gjennom en porøs bergart slik at vannet beveger seg gjennom porene og løser opp alle tilgjengelige hulrom i kalksteinen. Under flomvannstilførsel vil grunnvannsnivået heves og senkes periodisk, slik at alle sprekker får korrosivt vann inn under hver flomhendelse og man får korrosjon av kalkstein på flere steder. Arbeidet av Skoglund et al. (2010) indikerer at dannelsen av labyrintgrottene i Nordland også er påvirket av subglasial drenering og iskontakt.

Sett i sammenheng med grotteklima gir en labyrintgrotte mange muligheter når det gjelder ventilasjon av luft. Variasjonen mellom innsnevrede blindpassasjer og godt forbundne passasjer gir muligheter for både stillestående luft og luft som er godt ventilert.





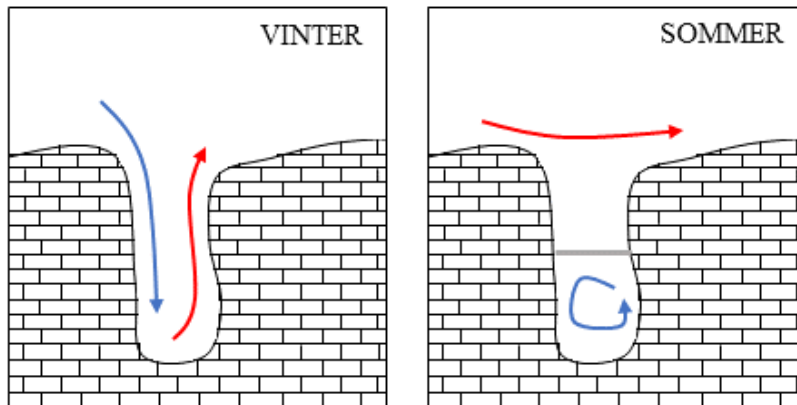
**Figur 2.4.1:** Hvordan nettverk- og labyrintgrotter skiller seg fra uforgrenede og forgrenede grotter. Fra Lauritzen (2010).

## 2.5 Grottemeteorologi – grottens mikroklima

Grottemeteorologi beskriver hvordan temperatur, luftfuktighet, vind og luftens bevegelser utarter seg inni en grotte (Wigley og Brown, 1976). Inne i grotter er mange av disse variablene mer konstante enn de er på terrengoverflaten. Bögli (1980) karakteriserer mangelen på sol som den største forskjellen mellom klimaet inni en grotte og på terrengoverflaten. Forskjellene i et mikro- og lokalklima er bestemt av vær- og klimaforhold, hvilke overflatetyper som finnes i området og topografien i området (Utaaker, 1991).

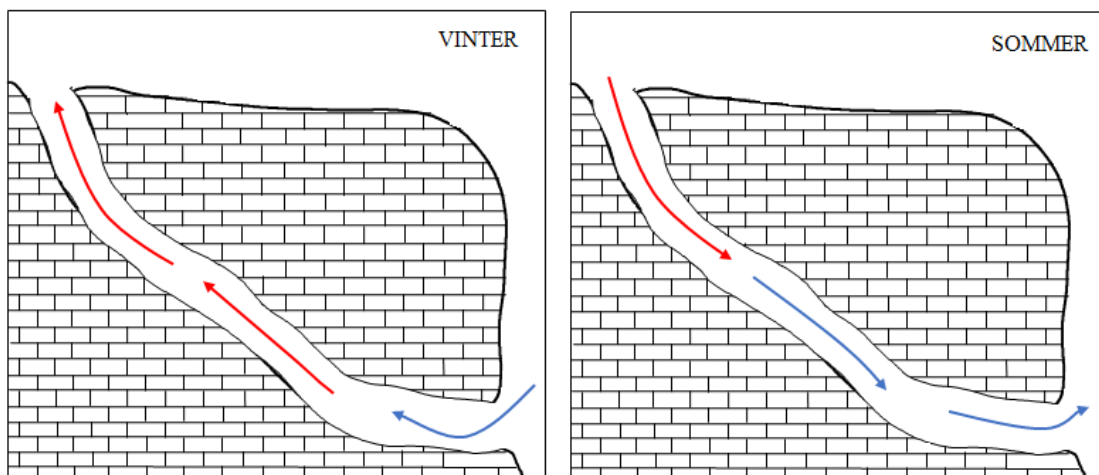
### 2.5.1 Ventilasjon

Når det gjelder vind, eller trekk gjennom grotta, avhenger dette ofte av om grotta har én eller flere åpninger. Grotter som har én åpning og der luften har lav sirkulasjon, blir kalt statiske grotter (Geiger, 1965). Wigley og Brown (1976) mener derimot at statiske grotter kan ha en aktiv sirkulasjon av luft. Disse grottene er typiske kaldluftsfeller, figur 2.5.1. Mange statiske grotter har vertikale åpninger der kald, tørr luft kan akkumuleres i grottene som følge av at denne luften har høyere tetthet enn varm, fuktig luft (Lauritzen, 2016b). Dette skjer først og fremst om vinteren. På sommeren vil den varme luften ligge som et lokk over grotta, slik at den kalde grotteluften ikke blir skiftet ut.



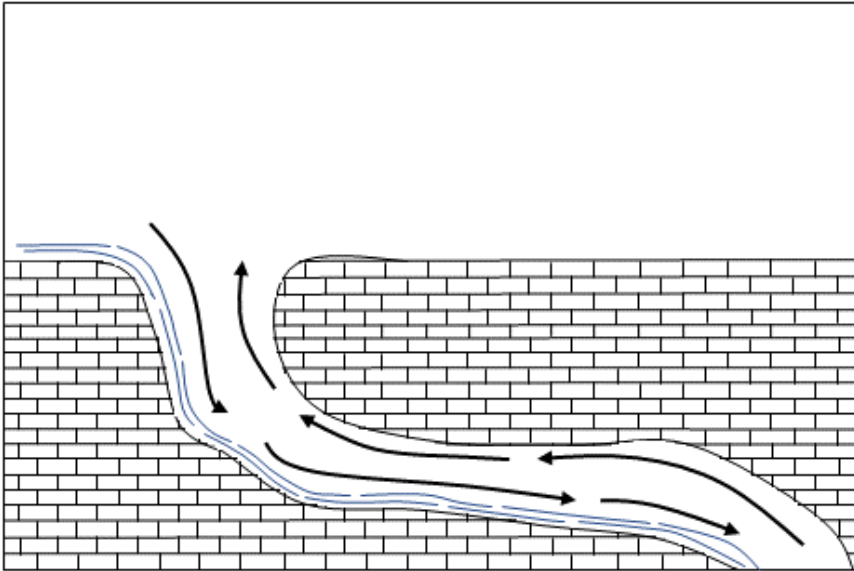
**Figur 2.5.1:** Grotter som fungerer som kaldluftsfeller med betydelig ventilasjon om vinteren, og mindre grad av ventilasjon om sommeren.

Dersom en grotte derimot har flere åpninger, noe som kan gi en sirkulasjon av luft, blir den kalt en dynamisk grotte (Geiger, 1965; Bögli, 1980). I de dynamiske grottene kan en høydeforskjell på åpningene eller andre eksogene krefter som temperaturforskjeller ha en innvirkning på luftsirkulasjonen, se figur 2.5.2. Om vinteren er luften i grotta varmere enn på terrengoverflaten grunnet tetthetsforskjeller i luften (Wigley og Brown, 1976; Lauritzen, 2016b). Varm luft stiger og kan strømme ut den øvre inngangen, og kald luft kan da trekkes inn den nedre inngangen. Om sommeren er grotteluften kaldere, og vil derfor synke, slik at den kalde luften strømmer ut den nedre inngangen. Dette blir karakterisert som en sesongbetinget trekk eller skorsteinseffekt (Wigley og Brown, 1976; Lauritzen, 2016b).



**Figur 2.5.2:** Skorsteinseffekt. Om vinteren er temperaturen i grotta varmere enn luften i atmosfæren utenfor, om sommeren er grotteluften kaldere enn i atmosfæren utenfor.

Rennende vann kan også indusere en trekk av luft på grunn av friksjon med vannet, figur 2.5.3 (Cigna, 1968; Wigley og Brown, 1976; Bögli, 1980) som gjør at luften blir dratt med nedover i grotta. Returen av luft går gjerne i den øvre delen av luftsøylen. På våren og høsten er det gjerne høyest vannføring i en slik bekk, grunnet snøsmelting om våren og stormer på høsten.



**Figur 2.5.3:** Rennende vann kan indusere en trekk ved friksjon med luften. Luften blir dratt med nedover i et grottesystem og ventileres gjerne ut igjen i de øvre deler.

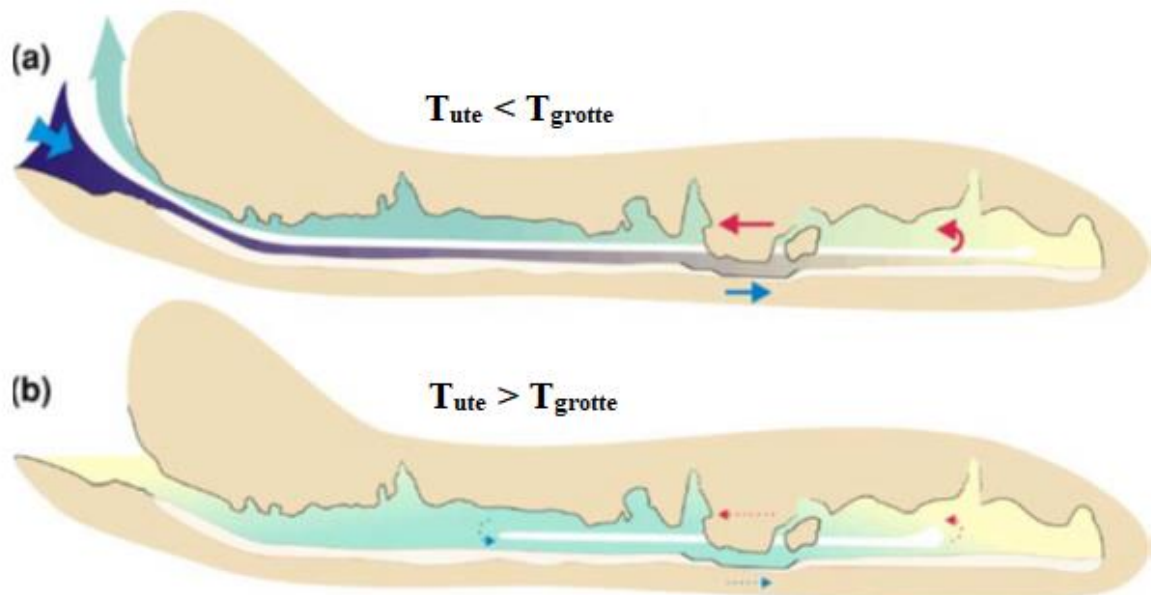
## 2.5.2 Temperatur

### *Temperatur på terrengoverflaten*

Temperatur defineres som de gjennomsnittlige bevegelsene til molekyler i gasser, væsker og faste stoffer (Utaaker, 1991). Temperaturen i bakken er styrt av temperaturen på overflaten (Geiger, 1965), og er styrt av faktorer som solstråling, nedbør og prosesser relatert til evapotranspirasjon. På terrengoverflaten vil varme transporteres ned i den kaldere jorda på dagtid, mens om natten vil varme transporteres fra den varmere jorda til den kaldere overflaten (Utaaker, 1991). Dette er termiske utvekslingsprosesser som foregår hele tiden og over et helt år vil energi lagres gjennom sommeren og frigis i løpet av vinteren.

## Temperatur i grotter

Temperaturen i grotter påvirkes hovedsakelig av de klimatiske middelverdiene utendørs (f.eks. Badino, 2004; Šebela og Turk, 2014). Dette betyr at temperaturen på terrengoverflaten ser ut til å være den største drivkraften for temperaturendringer i en grotte. Milanolo og Gabrovsek (2009) foreslo to regimer basert på forholdet mellom utetemperaturen og temperaturen i grotta. Under regime I er utetemperaturen lavere enn temperaturen i grotta, og ved hjelp av gravitasjonen vil den kalde, tette luften synke inn i grotta og erstatte den varmere luften, figur 2.5.4.a. Under regime II er temperaturen høyere utendørs enn inne i grotta. Da vil den kalde luften bli holdt inne i grotta av den varmere luften utenfor, figur 2.5.4.b. Temperaturen i en grotte har derfor en sammenheng med graden av ventilasjon gjennom grotta, tilsvarende kaldluftsfeller beskrevet i kapittel 2.5.1.



**Figur 2.5.4:** Temperaturregimer i Srednja Bijambarska Cave avhengig av temperaturforskjeller. Modifisert etter Milanolo og Gabrovsek (2009).

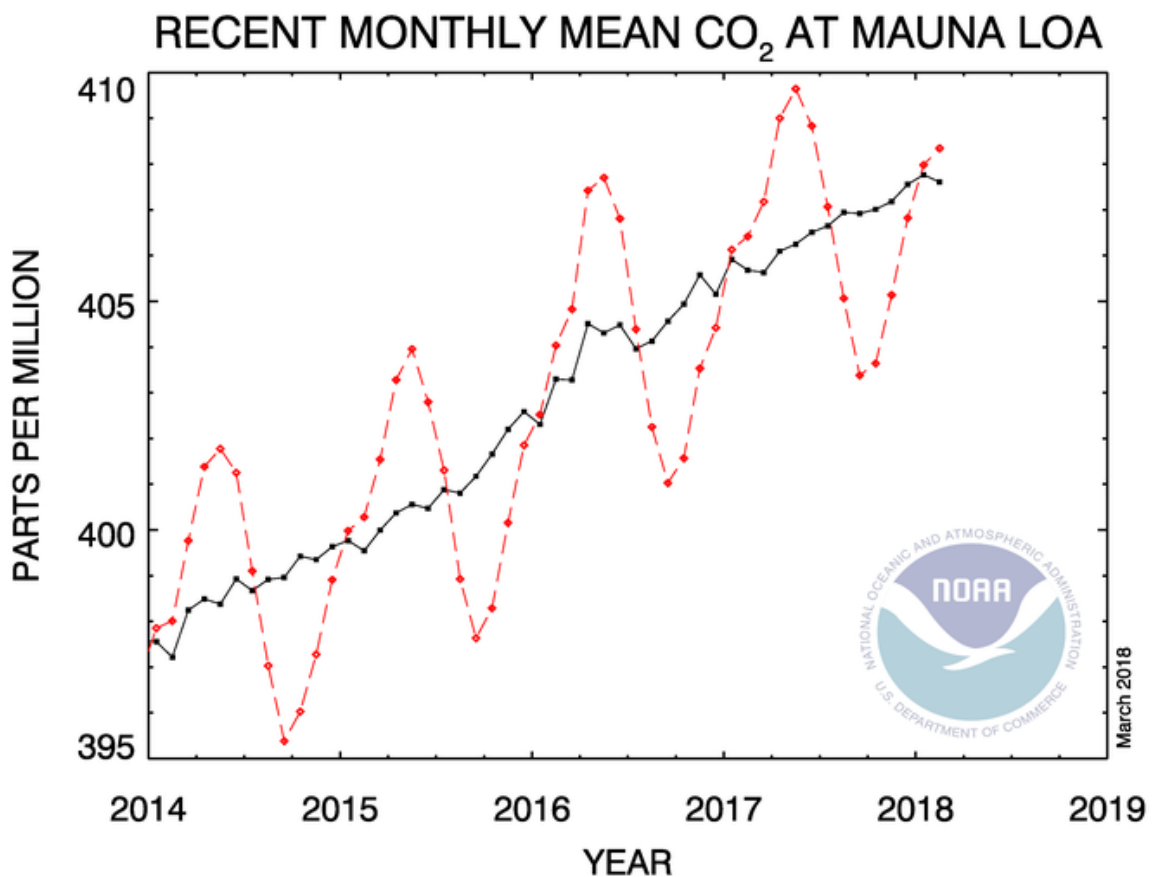
Med økende avstand til grotteinngangen, vil temperaturen ha en avtagende amplitude (Bourges et al., 2006). Dette fører til at noen steder i grotta, som for eksempel en blindpassasje 200 m inne har en mindre variasjon mellom maksimum- og minimumstemperatur enn ved en åpen passasje med god konnektivitet 150 m inne i grotta. Rennende vann gjennom undergrunnen kan også ha en kjølede effekt på grottetemperaturen (Bögli, 1980). Det er også muligheter for at vann kan ha en varmende effekt, spesielt på vinteren når lufttemperaturen i grotta er lavere enn  $0^{\circ}\text{C}$ .

### 2.5.3 CO<sub>2</sub>

Karbondioksid, CO<sub>2</sub>, spiller en stor rolle i karstprosessene som nevnt tidligere, kapittel 2.2, men gassen er også en bestanddel i luft og inngår i karbonsyklusen. Siden den industrielle revolusjonen har det globale CO<sub>2</sub>-nivået bare økt, noe som kan komme til å påvirke karstprosessene i fremtiden.

#### *CO<sub>2</sub> i atmosfæren på terrengoverflaten*

På Mauna Loa Observatory på Hawaii gjøres det målinger på det globale CO<sub>2</sub>-nivået i atmosfæren. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen ble i februar 2018 målt til en gjennomsnittsverdi på 408.35 ppm (Earth System Research Laboratory, 2018). CO<sub>2</sub> har en naturlig årlig syklus som avhenger av vegetasjonen, figur 2.5.5 (White, 1988). Når trær og planter har fått utvikle blad, blir mengder CO<sub>2</sub> tatt opp i vegetasjonen gjennom fotosyntesen til plantene. Dette fører generelt til at CO<sub>2</sub>-nivået synker om sommeren. Når bladene begynner å visne i løpet av høsten vil CO<sub>2</sub>-nivået øke frem til neste vår/sommer (White, 1988).



**Figur 2.5.5:** Oversikt over den globale CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen (ppm) ved Mauna Loa Observatory på Hawaii. Den røde linjen er månedlige gjennomsnittsverdier og den svarte linjen er månedlige gjennomsnittsverdier korrigert for sesongsyklus. Hentet fra Earth System Research Laboratory (2018).

### *CO<sub>2</sub> i atmosfæren i grotta*

Atmosfæren i grotta har høyere konsentrasjon av CO<sub>2</sub> enn lufta ute (Ek og Gewalt, 1985). Nivået av CO<sub>2</sub> i grotteatmosfæren avhenger av forskjellige faktorer, blant annet den eksterne atmosfæren, om det er jordsmonn over grotta, oksidasjon av organisk materiale i bergartene eller avsetningene, diffusjon av gasser og antropogen påvirkning (Liñán et al., 2008). Disse faktorene blir delt inn i "input" fluks eller "output" fluks, alt etter om faktoren fører til at CO<sub>2</sub>-nivået øker eller minker. Faimon et al. (2006) poengterer at en "input" fluks av CO<sub>2</sub> er styrt av en naturlig fluks, men også av en antropogen fluks. Dette betyr at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen øker som følge av diffusjon inne i grotta fra sprekker og jordsmonn, samt menneskelig påvirkning i form av respirasjon. Output fluks er i stor grad kontrollert av ventilasjonen i grotta, som kan avhenge av antall åpninger eller eksterne drivkrefter, kap. 2.5.1. CO<sub>2</sub> avhenger også av eksternt lufttrykk (Hoyos et al., 1998; Bourges et al., 2001). Under høytrykk er det vanlig med høye CO<sub>2</sub>-verdier fordi luften holdes stabil inne i grotta og CO<sub>2</sub> kan akkumuleres. Under et lavtrykk vil derimot lufta dras ut av grottesystemet noe som gir lavere CO<sub>2</sub>-konsentrasjon.

CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen kan også variere inne i en grotte. Sprekker har høyere CO<sub>2</sub>-konsentrasjon enn store, åpne passasjer, mest sannsynlig grunnet diffusjon av CO<sub>2</sub> gjennom sprekke fra for eksempel overliggende jordsmonn (Ek og Gewalt, 1985). En horisontal gradient av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er vanligst i horisontale grotter, men det kan også være en vertikal differensiering av CO<sub>2</sub> i grotteluften (Ek og Gewalt, 1985). Ved en horisontal gradient vil mengden CO<sub>2</sub> i luften øke jo lenger inn i grotta man kommer. Ved en vertikal differensiering av luftføylen vil CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen være lavere ved taket enn ved bakken. Dette blir omtalt som den normale tetthetsgradienten som er tenkt styrt av gravitasjonen.

### *CO<sub>2</sub> i jordsmonn og epikarst*

*Konsentrasjonen og produksjonen av CO<sub>2</sub> i jordsmonn over den subkutane sonen/epikarst:*

Mengden CO<sub>2</sub> i jordsmonnet avhenger av en rekke faktorer, blant annet hvilken type jordsmonn det er, hva vegetasjonsdekket består av, dybden på jordsmonnet i tillegg til flora og fauna i jordsmonnet (Ford og Williams, 2007). Dette gjør at det kan være vanskelig å bestemme hva som er en typisk CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i gitte jordsmonn på gitte geografiske steder på jordkloden. CO<sub>2</sub> fra jordsmonnsporene kan dreneres inn i underliggende sprekker og grottesystemer godt hjulpet av gravitasjonen, siden gassen har høyere tetthet enn luft (Ford og Williams, 2007).

CO<sub>2</sub> i jordsmonnsporene kan også løse seg i regnvann og trenge inn i sprekke på denne måten. Maksimum CO<sub>2</sub> i jordsmonn på den nordlige halvkule er beregnet til juli-september (Ford og Williams, 2007), da konsentrasjonene gjerne er to til fire ganger så høye som på vinteren.

*Dersom epikarst er eksponert uten jordsmonn:*

Epikarst kan være eksponert som et resultat av glacial skuring. Dette kan føre til at sprekketettheten er lavere. Selv om det ikke er noe jordsmonn direkte på epikarst, kan nedbryting av vegetasjon i nærheten av sonen føre til at et miljø av trerøtter eller bakterier lever av næringen produsert av nedbrytingen. Det organiske materialet som blir produsert, kan deretter filtreres ned i sprekker og grottesystemer.

## **3 Metoder og innsamling av data**

### **3.1 Innledning**

Dette kapitlet gir en beskrivelse av metodene som er brukt og hvordan innsamlingen av dataene er blitt gjort. Dette omhandler blant annet hvordan de ulike sensorene fungerer og hvordan de er plassert. Deretter blir det gitt en introduksjon til et program utviklet av professor Stein-Erik Lauritzen, som er mye brukt til behandlingen av rådataene. Til slutt er det gitt en kort innføring i statistiske metoder og andre beregninger. De statistiske metodene er brukt for å undersøke forholdet mellom variablene og om det er statistisk signifikant.

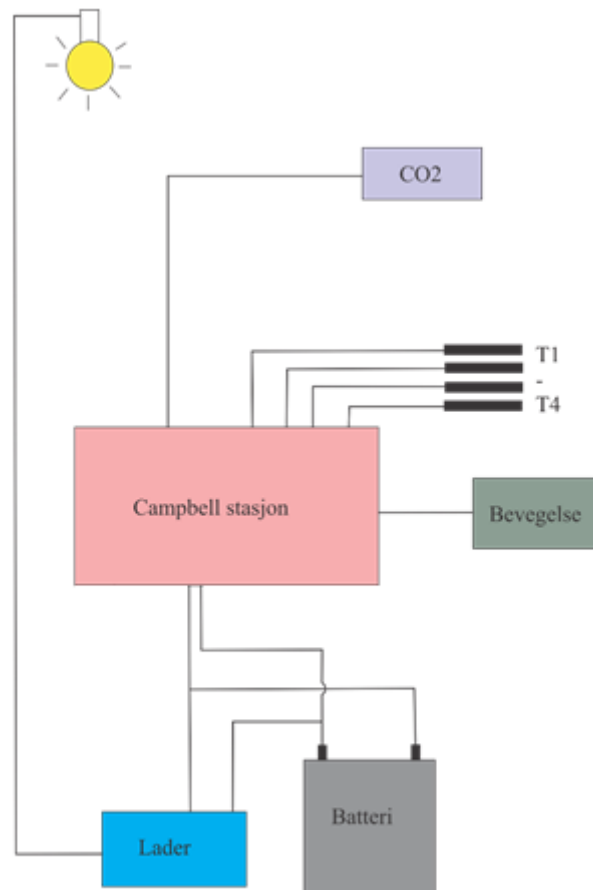
### **3.2 Tidsrom med datamateriale**

Datamaterialet brukt i oppgaven er fra tidsrommet 15.02.16 til 04.12.17 for Campbell-stasjonene. Fra disse stasjonene mangler derimot tidsrommet mellom 31.05.17 til 26.06.17, mest sannsynlig grunnet overskriving i lagringsminnet til dataloggeren. For å kunne sammenligne mikroklimaet i grotta med klimaet på terrengoverflaten er det brukt meteorologiske data hentet fra Meteorologisk institutt. En del av disse dataene har store usikkerheter ifølge kvalitetskontrollen til Meteorologisk Institutt, og faller derfor vekk fra tidsseriefigurene.

### **3.3 Innsamling av data**

Dataene fra Grønligrotta er innsamlet med et dataloggersystem fra Campbell. Systemet består av 4 temperatursensorer (Termistor 109, Campbell), en CO<sub>2</sub>-sensor (EE870, E+E Elektronik) og en bevegelsessensor (NaPiOn, Panasonic). Disse sensorene er koblet til en datalogger (CR800, Campbell) som registrerer målingene, figur 3.3.1. Tekniske spesifikasjoner for sensorene er oppsummert i vedlegg 1. For at dette systemet skal holdes i gang er det koblet til et batteri, som lades når lyset i grotta er på. På denne måten sørger man for at batteriet har nok strøm til at loggingen kan foregå over lang tid.





**Figur 3.3.1:** Oversikt over Campbellstasjonene. Dette oppsettet er likt for både Storkirka og Kapellet.

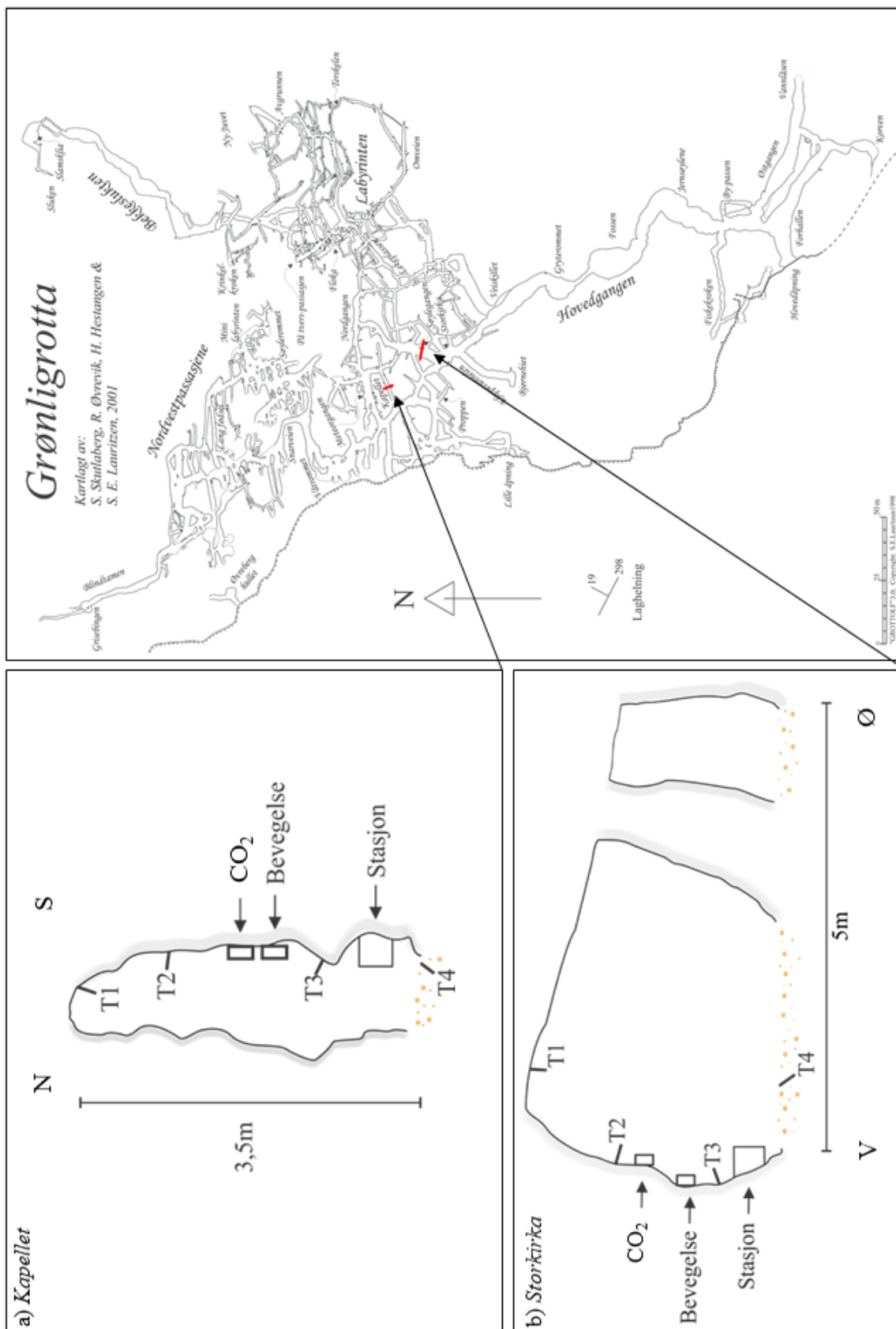
CO<sub>2</sub>-sensoren er plassert i personhøyde, for å kunne detektere mest mulig påvirkning fra menneskelig respirasjon. Den er også beskyttet med et strålings skall som hindrer vandrdåper fra taket å påvirke målingene. Måleområdet til sensoren er mellom 0-5000 ppm med en måleusikkerhet på  $\pm 50$  ppm. Det har vært noen tilfeller med verdier opp til 5000 ppm. Det har også vært andre tilfeller der målingene dropper fra 2000 ppm til 0 ppm og opp til 450 ppm i løpet av 3 målinger over 30 sek. CO<sub>2</sub>-sensorene er brukt med fabrikkinnstillinger, men det er foretatt kontroller med et håndholdt Vaisala-instrument, vedlegg 2.

Bevegelsessensoren baserer seg på samme prinsipp som en vanlig tyverialarm. Sensoren oppdager endringer i infrarød stråling (altså varme) og sender et signal til alarmen, eller i dette tilfellet en datalogger. Loggeren er "smart" og endrer frekvens på hele systemet når det blir registrert bevegelse, slik at systemet går fra å logge en gang i timen til å logge hvert 15. sekund. Bevegelsessensoren logger også antall bevegelser. Måleområdet er avgrenset til 100° i horisontal retning og 82° vertikalt, der området består av 64 soner. Sonene er bygget opp av en polaritet (+ og -) og når både + og - er trigget samtidig er det en sjanse for at signalene kan

kansellere hverandre og bevegelsen ikke blir registrert. Innen en avstand på 2 meter vil sensoren kunne oppdage og registrere selv små bevegelser. Under turistsesongen registrerer bevegelsessensoren flest antall bevegelser under det første besøket. I tillegg er det enkelte andre tilfeller der sensoren registrerer bevegelser og setter i gang smartlogging, mens andre ganger oppdager den bevegelser og registrerer disse uten å sette i gang smartlogging.

Temperatursensorene er plassert i fire ulike høyder; en i taket, to i personhøyde og en 5-10 cm ned i bakken. Dette gjør at man kan registrere små endringer i lufttemperaturen, men også får et inntrykk av sesongvariasjonene i grottetemperaturen, siden bakketemperaturen gjerne er mer stabil enn lufttemperaturen. Måleområdet til sensoren er  $-50^{\circ}\text{C}$  til  $+70^{\circ}\text{C}$ , der måleusikkerheten for  $0^{\circ}\text{C}$  til  $70^{\circ}\text{C}$  er gitt til  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Måleusikkerheten øker til  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  når temperaturen nærmer seg  $-50^{\circ}\text{C}$ . Produsent (Campbell Scientific) oppgir at temperatursensoren kan brukes til å logge temperaturen i bakken, gitt at den ikke begravnes for langt ned.

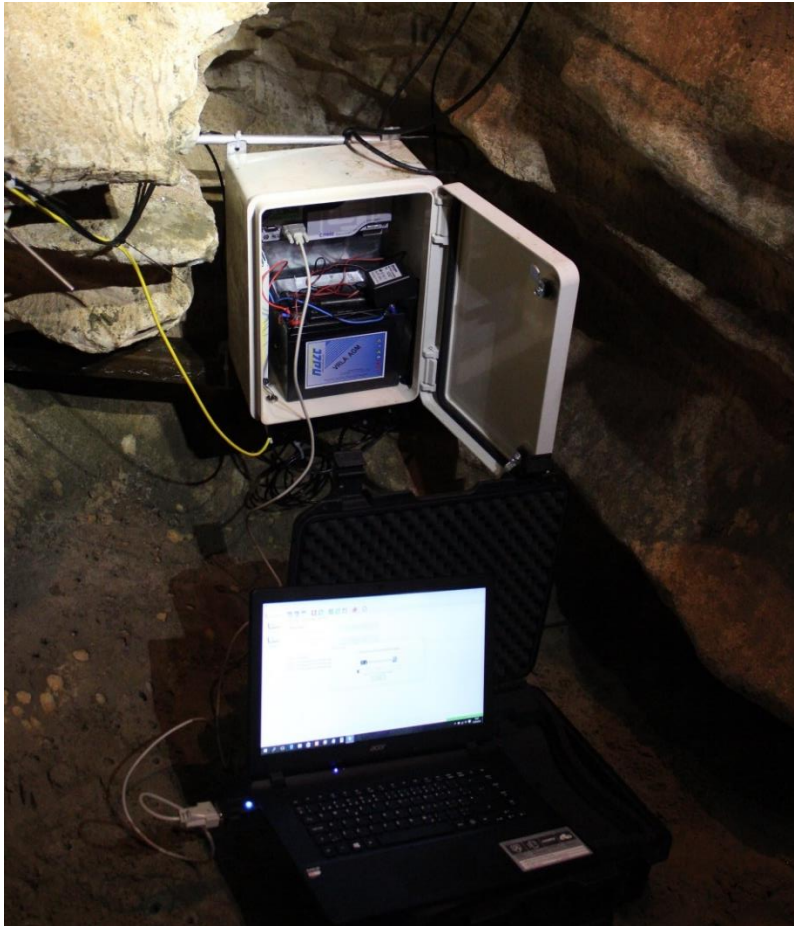
Figur 3.3.2a og 3.3.2b viser hvordan alle sensorene er plassert på de to ulike stasjonene i grotta. Selve plasseringen av sensorene på figuren kan avvike noe i forhold til virkeligheten, siden sensorene ikke er montert i et vertikalt transekt. T1-T4 er de fire temperatursensorene. Disse to stedene er valgt fordi det ved Storkirka er god forbindelse til flere andre passasjer. Kapellet er derimot en blindpassasje som er mye smalere.



**Figur 3.3.2:** Tverrsnittprofil ved Kapellet og Storkirka. Temperatursensorene (T1-T4), CO<sub>2</sub> og bevegelse, samt stasjonen som inneholder dataloggeren. Plasseringen av sensorene kan avvike noe i forhold til virkeligheten, fordi de ikke er montert i et vertikalt transekt av grotta. Kart over Grønligrotta er modifisert etter Øvrevik (2002).

### 3.4 Uthenting av data

Uthenting av data skjer gjennom direkte tilkobling til dataloggeren i grotta, figur 3.4.1. For å hente ut dataene blir det brukt et program relatert til Campbell – PC200W. Under måleperioden er det hentet ut data omtrent hver 3. måned. Programmet er også brukt til å programmere og styre den "smarte" delen av loggingen.

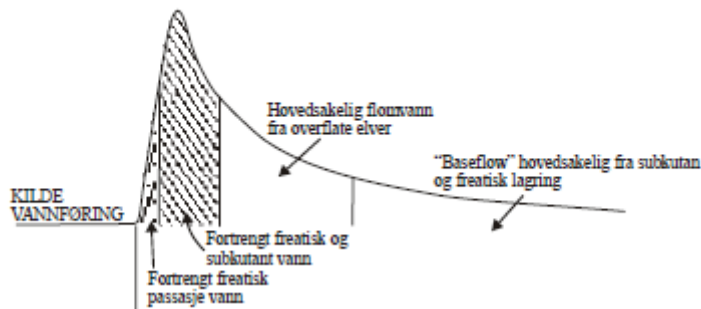


*Figur 3.4.1: Uthenting av data. Direkte tilkobling mellom PC og datalogger ved stasjonen.*

### 3.5 Programkoden

Professor Stein-Erik Lauritzen har skrevet et delphikode-program for behandling av rådataene. Programmet laster inn rådataene og oppretter en kolonne med  $\ln \text{CO}_2$ . Her ble det tatt utgangspunkt i regresjonslinjer generert fra første til siste valgte punkt under et turistbesøk. Tilpasning og usikkerhet av regresjonslinja baserer seg på *jackknife*, som er en resamplingsmetode som gir et estimat av bias og standardavvik til regresjonslinjene (Efron, 1982; Shao og Tu, 1995). Se kode for usikkerhetsberegning til regresjonslinjene i vedlegg 3.

Ideen om å beregne halveringstider for CO<sub>2</sub>-forløpene i grotta stammer fra flomforløpene i hydrologien og hvordan man anlegger lineære forhold til disse. Under en flomsyklus vil vannføringen først stige raskt, før den har en noe slakere senkning (resesjon), figur 3.5.1. Ved å bruke en logaritmisk y-akse kan man prøve å anlegge lineære forhold til en slik kurve.

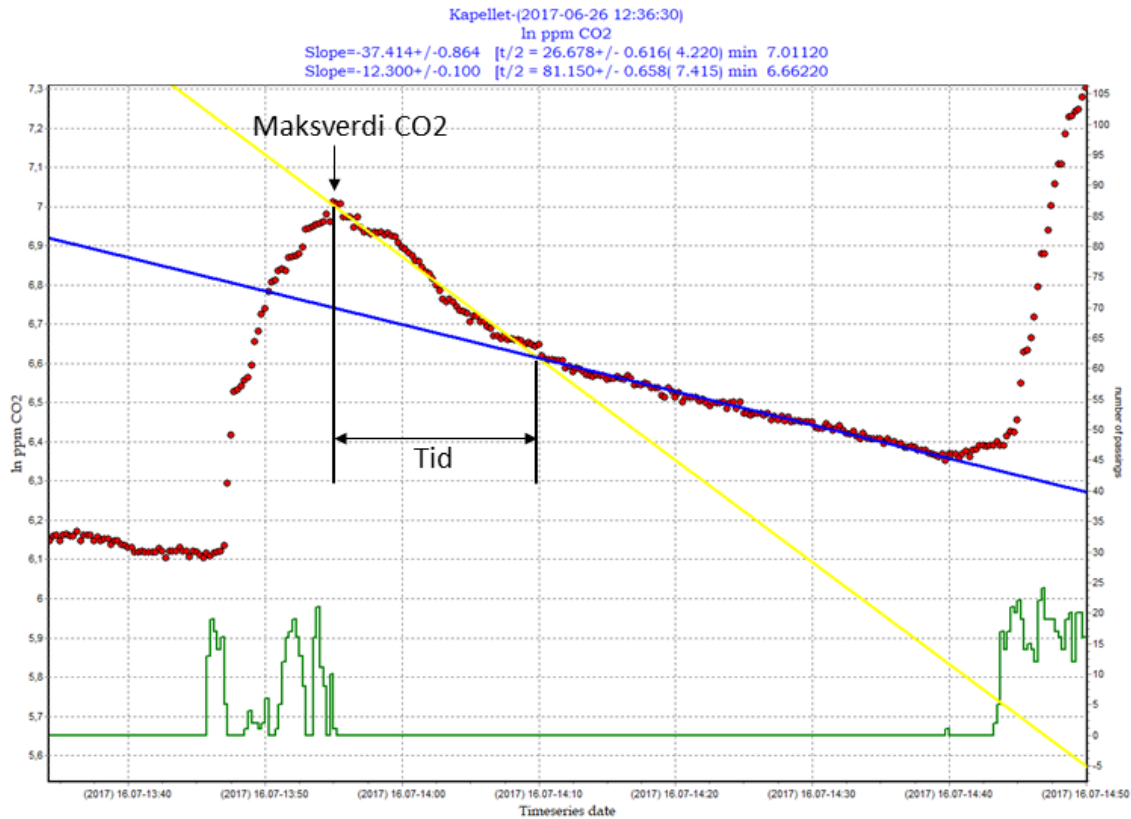


Figur 3.5.1: Kildehydrograf. Fra Øvrevik (2002), etter Williams (1983).

Som en analogi til flom kan man derfor forsøke å regne halveringstid eller regenereringstid for CO<sub>2</sub> etter et turistbesøk. Ved å plote dataene semilogaritmisk får man en eller flere lineære deler med gitt stigningstall. Dersom halveringstiden er kort er regenereringen bratt, noe som indikerer rask utlufting av passasjene. Dersom halveringstiden derimot er lang tyder det på saktere utlufting av passasjene, som indikerer at systemet er relativt stabilt og gjerne nært sitt naturlige grunnivå.

Figur 3.5.2 viser et tilfeldig valgt turistbesøk for Kapellet 16.07.17 kl 13.50. Den grønne linjen i bunn viser antall bevegelser og de røde prikkene er ln CO<sub>2</sub> (ppm) over tid. Y-aksen er logaritmisk for å undersøke de lineære forholdene i dataene. For å generere en regresjonslinje for denne resesjonen ble den høyeste CO<sub>2</sub>-målingen valgt som første punkt, og ved visuell vurdering et siste punkt lenger nede. I den visuelle vurderingen må man vurdere om det kan være en rett linje, eller om forløpet har et knekkpunkt. Programmet regner ut en regresjonslinje med stigningstall og halveringstid med standardavvik som summeres opp i et eget regneark. Regresjonslinjen tegnes inn over det valgte området med tilfeldig farge, se figur 3.5.2, som i dette tilfellet er merket med gul og blå. Regnearket kan deretter overføres til en excel-fil eller tekstfil og deretter behandles og analyseres i R.

For å undersøke hvor lang tid det tar etter en CO<sub>2</sub>-topp før halveringstiden endrer seg, brukes tidsdifferansen mellom første og siste punkt som er valgt, se figur 3.5.2. Knekkpunktet er dermed krysningspunktet mellom den gule og blå linjen i figuren. Det første punktet er alltid maksimumsverdien av CO<sub>2</sub>.



Figur 3.5.2: Skjermdump fra delphi-programmet. Semilogaritmisk plot der de røde punktene er CO<sub>2</sub>. Gul og blå linje er anlagte regresjonslinjer. X-aksen er lineær tidsakse. Grønn strek er antall bevegelser.

### 3.6 Beregning av tilført varme

Under beregning av tilført varme blir det regnet med et luftvolum på 78 m<sup>3</sup> i Kapellet, og det blir antatt en temperatur på 5°C og et lufttrykk på 1013 hPa. Det blir også antatt en luftfuktighet på 98%, der lufttettheten er gitt til  $\rho = 1.2647 \text{ kgm}^{-3}$ . Massen av luften i Kapellet blir regnet ved hjelp av ligning 2, og gir et resultat på 98.65 kg.

$$m = \rho V \quad (2)$$

For å kunne beregne hvor mye varme et menneske tilfører systemet brukes ligning 3.

$$Q = mc\Delta T \quad (3)$$

I ligning 3 er spesifikk varmekapasitet,  $c$ , for fuktig luft er gitt ved:

$$C_p = 1.005 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} + 1.82 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * H \quad (4)$$

Der  $H$  er gitt som spesifikk fuktighet i kg/kg. Verdien hentes fra Mollier diagram og gir:

$$C_p = 1.005 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} + 1.82 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * 0.005 \frac{kg}{kg} = 1.0641 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \quad (5)$$

Denne verdien settes deretter inn i ligning 3 for å kunne beregne tilført varme basert på  $\Delta T$ .

### 3.7 Statistiske metoder og begreper

Programvaren R har blitt brukt for å fremstille grafer og gjøre statistiske analyser.

#### 3.7.1 Korrelasjonsanalyse

Korrelasjonsanalyser brukes for å undersøke forholdet mellom to vilkårlige variabler, der den ene variabelen ikke trenger være årsak til den andre (Bhattacharyya og Johnson, 1977). Korrelasjonskoeffisienten,  $r$ , er gitt for lineær korrelasjon (Pearson) og setter forutsetninger som normalfordistribusjon og normalitet for dataene. Korrelasjonskoeffisienten gir et mål på forholdet mellom de vilkårlige variablene og har verdier mellom -1 og 1:

$r > 0$  (positiv korrelasjon): Dersom  $y$  øker, så øker  $x$ , og motsatt.

$r < 0$  (negativ korrelasjon): Dersom  $y$  øker, så minker  $x$ , og motsatt.

$r = 0$  (ingen lineær korrelasjon): ingen lineær sammenheng mellom  $x$  og  $y$ , og det er stor spredning i datapunktene.

En «god» korrelasjonskoeffisient på -1 eller 1 indikerer ikke nødvendigvis et årsaksforhold mellom de to variablene, men viser heller en matematisk sammenheng mellom variablene (Bhattacharyya og Johnson, 1977). Det finnes også ikke-parametriske korrelasjonstester, noe som vil si at testene ikke er avhengig av fordelingen til variablene. Blant disse testene er blant annet Spearman ( $\rho$ ) og Kendall ( $\tau$ ), som baseres på verdienes rang. I dette tilfellet viser et utvalg av datasettene at forskjellene mellom Pearsons  $r$  og Spearmans  $\rho$  på mellom 0.01-0.04.

### 3.7.2 Regresjonsanalyse

Regresjonsanalyser blir brukt for å beskrive forhold mellom en uavhengig variabel  $x$  og en avhengig variabel  $y$ , og i hvilken grad  $x$  kan forutsi  $y$  (Bhattacharyya og Johnson, 1977). For å kunne gjennomføre en regresjonsanalyse er det gitt at  $y$  er avhengig av  $x$ . Analysen gir en lineær modell med beste mulige tilpasning.

Ligning for lineær regresjon er gitt ved:

$$y = ax + b$$

der  $a$  er stigningstallet og  $b$  er skjæringspunktet.

For å vite hvor godt den lineære modellen passer dataene, kan man bruke målet  $R^2$ , som er en deterministisk koeffisient.  $R^2$  har en verdi mellom 0 og 1, der  $R^2=1$  er en perfekt lineær sammenheng mellom variablene, som indikerer at variasjonen i  $x$  kan forklare all variasjon i  $y$ . Ved  $R^2=0$  er det ingen lineær sammenheng mellom variablene.  $R^2$  er andelen av variabiliteten i  $y$ -verdiene som kan forklares ved hjelp av minste kvadraters metode (regresjonen) (Moore et al., 2012). For normalfordelte datasett vil 68% av datapunktene havne innenfor et standardavvik og 95% av datapunktene havner innenfor to standardavvik. Dette er mer kjent som konfidensintervall, som angir hvor det er mest sannsynlig at en verdi forekommer.

### 3.7.3 Autokorrelasjonsanalyse

En autokorrelasjonsanalyse for tidsseriedata benyttes for å sjekke om systemet innehar en avhengighet eller gjentakelse, for eksempel fra en dag til en annen (Crawley, 2007). Denne metoden er spesielt nyttig for å undersøke dataene for sykliske mønstre. Et lag er en forskyvning i tid, som typisk er en time, et døgn eller en uke. Autokorrelasjonsfunksjonen er gitt ved  $\rho(k)$  som beregner korrelasjonen mellom alle parene av datapunkter som er  $k=1,2,3\dots$ , der  $k$  er antall forskyvninger mellom parene (Teetor, 2011). Dette betyr at datasettene som inngår i utregningen minker med 1 per økning i forskyvning  $k$ . Dersom man har et datasett på 100 verdier, vil det ved lag 0 være 100 verdier korrelert med 100 verdier, og korrelasjonen vil være 1. Ved lag 1 er de 99 første verdiene korrelert med de 99 siste, lag 2 er de 98 første verdiene korrelert med de 98 siste, osv. Under denne typen analyse er det gitt et konfidensintervall på 95%. Verdier som faller utenfor disse intervallene viser autokorrelasjoner som er statistisk forskjellige fra 0. Korrelasjonsverdier mellom 0 og konfidensintervallet er ikke regnet som statistisk signifikante fra 0.



### 3.7.4 Nullhypotese, P-verdi og Shapiro-Wilk test

En statistisk hypotese forteller noe om en populasjon eller et utvalg av data, og kan være sann eller usann. En nullhypotese,  $H_0$ , sier at ingenting skjer (Crawley, 2005). En typisk nullhypotese som testes for i denne oppgaven er at det ikke er et forhold mellom variablene. Dersom nullhypotesen kan forkastes blir det opprettet en alternativ hypotese,  $H_1$ . I dette tilfellet blir den alternative hypotesen at det er et forhold mellom variablene.

P-verdien er sannsynligheten for at forskjellen mellom variablene har oppstått ved tilfeldig variasjon. Denne verdien angir dermed signifikansen til variablene. Det blir brukt et lavest mulig signifikansnivå, siden det gir størst mulig konfidens for dataene. Et signifikansnivå på 0.05 betyr at det er mindre enn 5% sannsynlig at resultatet oppstår ved tilfeldig variasjon dersom nullhypotesen er sann. Dersom p-verdien er lavere enn dette signifikansnivået, kan man forkaste nullhypotesen.

En Shapiro-Wilk test brukes på dataene for å undersøke om de er fra en normalfordeling (Crawley, 2007). I denne testen er nullhypotesen at dataene tilhører en normalfordeling, mens den alternative hypotesen er at dataene ikke tilhører en normalfordeling. Dersom p-verdien er over signifikansnivået på 0.05 betyr det at nullhypotesen ikke kan forkastes og man kan anta at dataene kommer fra en normalfordeling. Dersom p-verdien er lavere enn signifikansnivået på 0.05 betyr det at nullhypotesen forkastes, og man antar at dataene ikke kommer fra en normalfordeling.

## 4 Resultater

### 4.1 Innledning

I dette kapitlet presenteres resultater fra feltarbeidet og databehandlingen. Data fra loggestasjonene er hentet ut under feltarbeid og i forbindelse med vedlikehold av sensorene. Først blir det gitt en oversikt over de innsamlede dataene. Deretter følger en beskrivelse av utvalgte dager fra turistsesongen, for å illustrere hvordan CO<sub>2</sub> og temperatur påvirkes av turistbesøk. Det blir også gitt en kort introduksjon til bevegelse for å studere eventuelle avvik i bevegelsessensoren. Videre blir parameterne CO<sub>2</sub> og temperatur undersøkt for hver av stasjonene, og hvordan disse påvirkes av mennesker. Omfanget av data innenfor datasettene kan variere og er derfor spesifisert under hvert avsnitt.

### 4.2 Oversikt

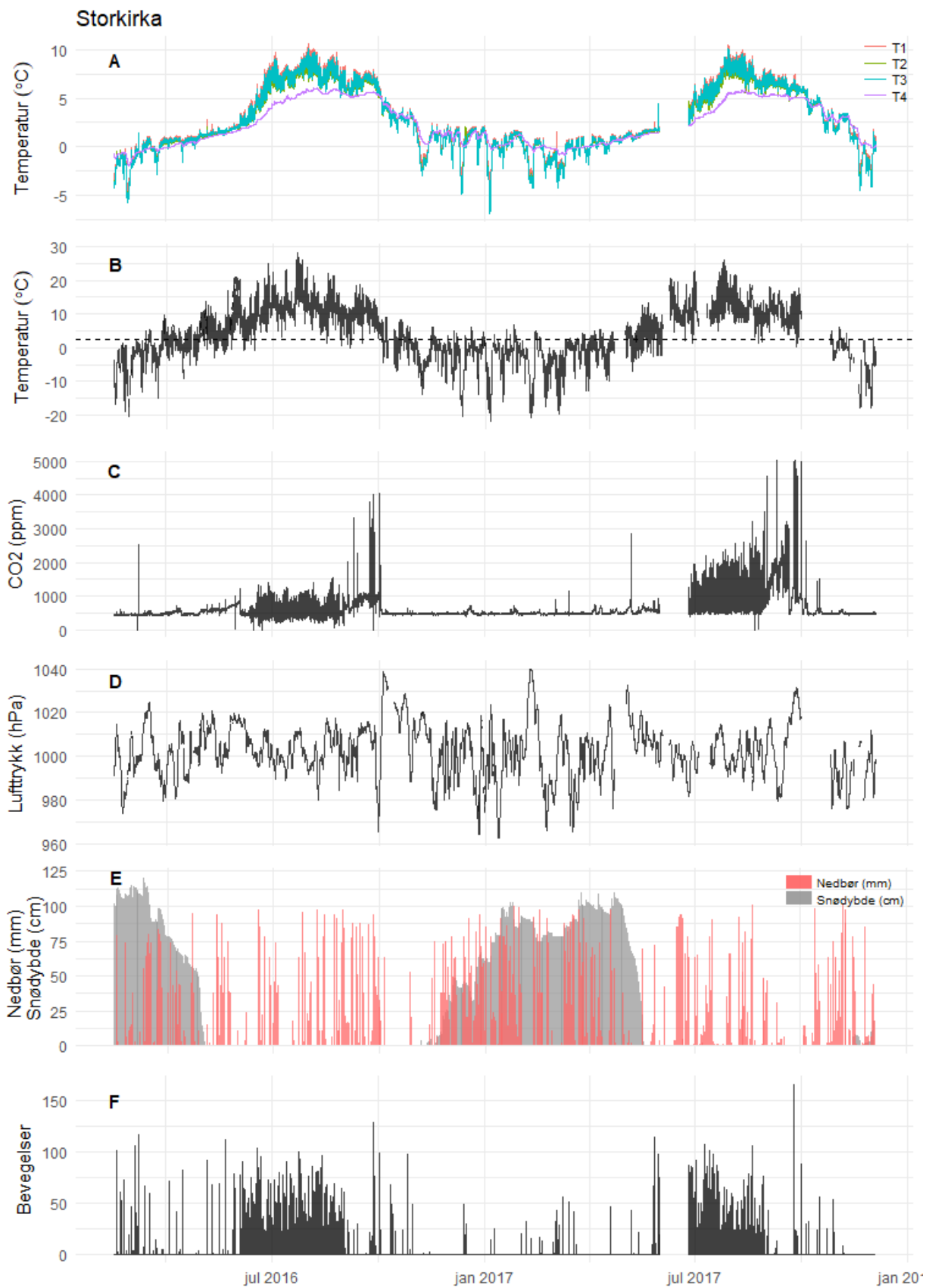
Figur 4.2.1 og 4.2.2 viser en oversikt over innsamlede data fra Grønligrotta og meteorologiske data fra målestasjoner i nærheten. Dette er med på å gi en introduksjon til resultatene som skal utdypes nærmere i de neste delkapitlene, og hvordan disse miljøparameterne henger sammen. Aksene på disse figurene har samme skala for å lettere illustrere forskjellene mellom stasjonene.

Figur 4.2.1.A/4.2.2.A og 4.2.1.B/4.2.2.B viser temperaturen inne i grotta og korrigert utendørstemperatur for Grønlia. Stiplet linje viser årsmiddeltemperaturen på 2.5°C. For temperaturen i grotta er T1-T3 relativt like, da alle disse sensorene måler lufttemperaturen. T4 skiller seg ut, da denne sensoren er plassert i bakken. Storkirka ser ut til å ha en større korrelasjon med utetemperaturen enn Kapellet. Utetemperaturen blir senere diskutert som en mulig drivkraft for CO<sub>2</sub>-endringer, kapittel 5.3.1.

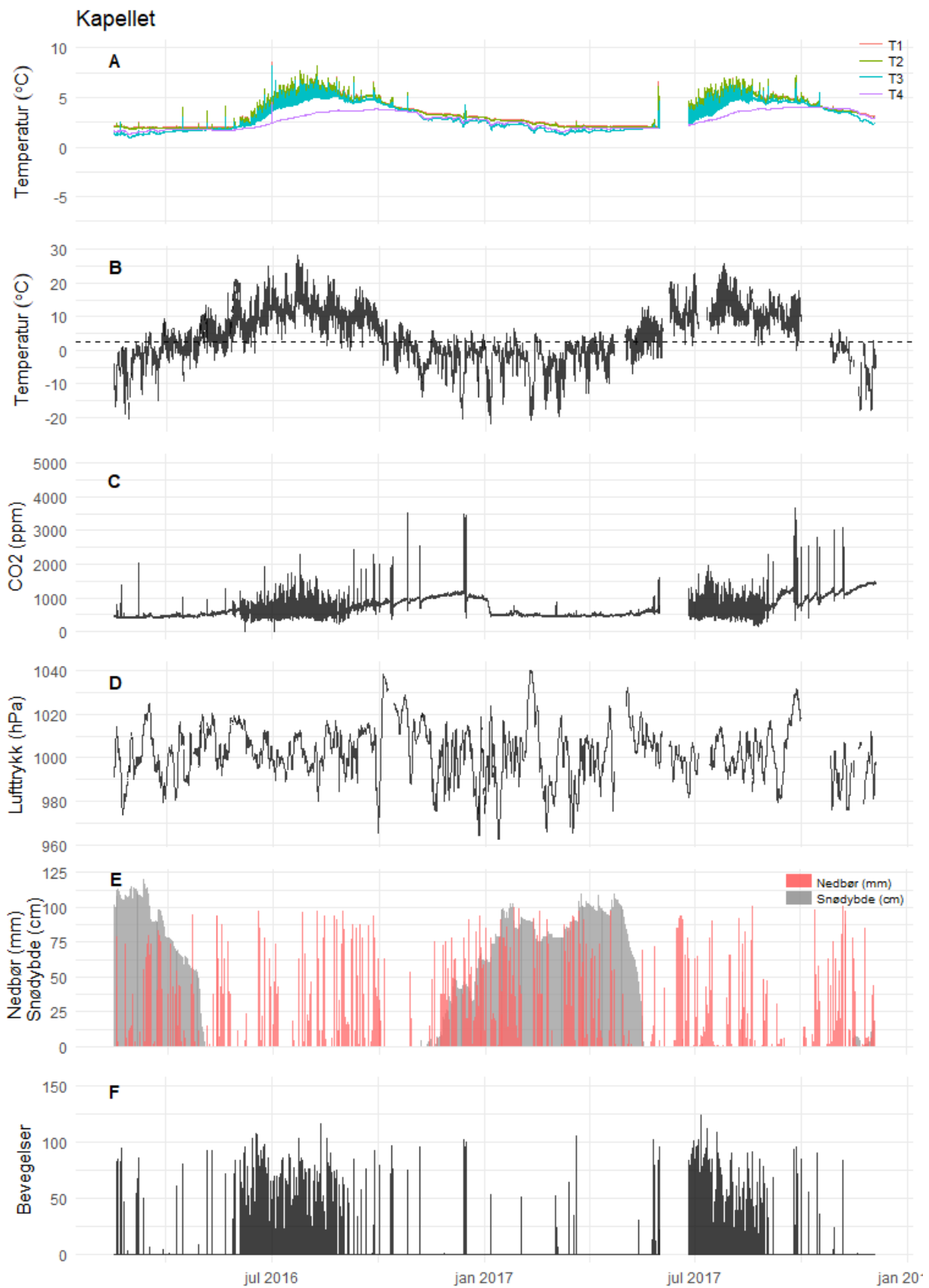
Figur 4.2.1.C/4.2.2.C viser CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i grotta. Storkirka viser de høyeste CO<sub>2</sub>-toppene med maksima opp mot 5000 ppm. Kapellet har noe lavere maksimumskonsentrasjon med i overkant av 3500 ppm. Figur 4.2.1.D/4.2.2.D viser variasjonen i lufttrykket, som blir diskutert som en mulig drivkraft for endringer i CO<sub>2</sub>, kapittel 5.3.1.

Figur 4.2.1.E/4.2.2.E viser nedbørsmengde, som blir diskutert som en mulig drivkraft for endringene i miljøparametre inne i grotta, samt snødybde fra Storforshei. 4.2.1.F/4.2.2.F viser antall bevegelser registrert av bevegelsessensoren, som også kan brukes til å definere turistsesongen. For 2016 og 2017 er turistsesongen omtrentlig fra 15.06 til 31.08.

6 måneders bolker av dataene er gitt i vedlegg 4A og 4B.



**Figur 4.2.1:** Meteorologiske og mikroklimatiske data fra henholdsvis Storkirka i Grønligrotta (A, C, F), Røssvoll (B, D) og E fra Storforshei og Mo i Rana. Brudd i grafene (A-D) skyldes manglende data, av ulike årsaker (kap. 3.2).



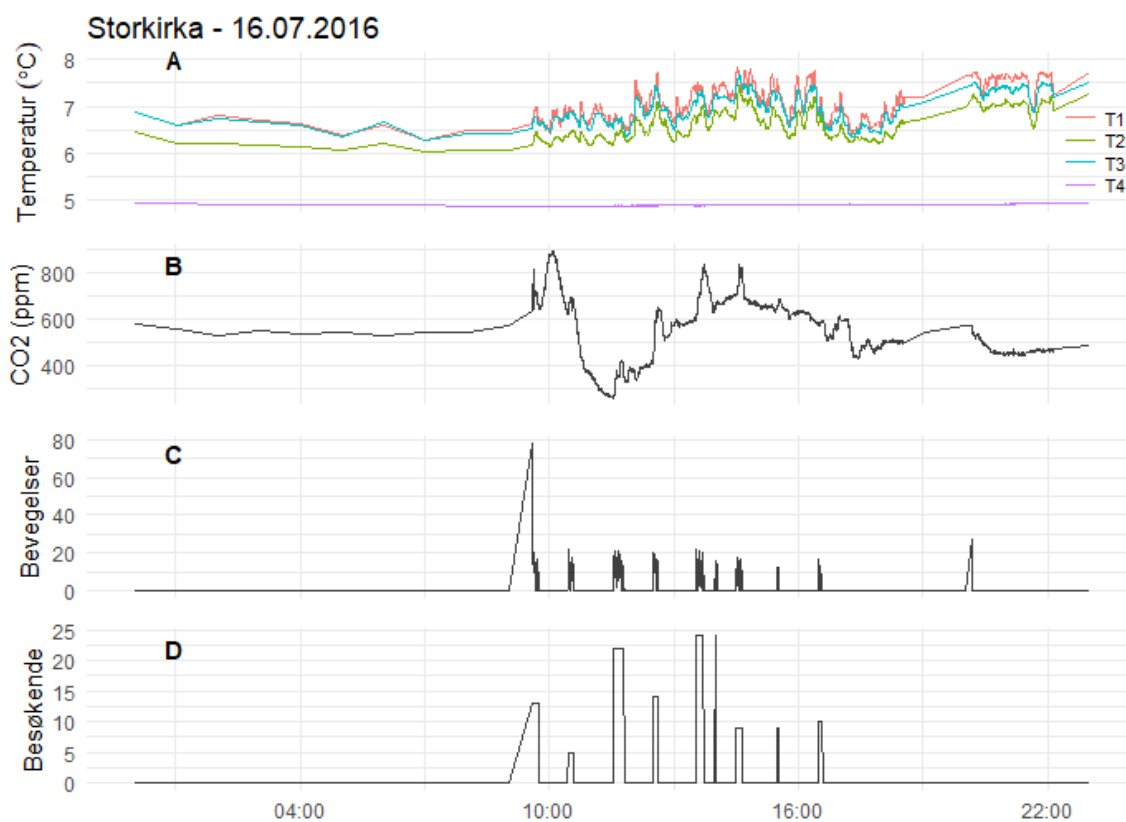
**Figur 4.2.2:** Meteorologiske og mikroklimatiske data fra henholdsvis Kapellet i Grønligrotta (A, C, F), Røssvoll (B, D) og E fra Storforshei og Mo i Rana. Brudd i grafene (A-D) skyldes manglende data, av ulike årsaker (kap. 3.2).

## 4.3 Beskrivelse av en dag

### 4.3.1 Storkirka

Figur 4.3.1 viser en tilfeldig utvalgt dag i Storkirka i turistsesongen. Temperaturen varierer med 1.55°C, 1.43°C og 1.42°C for T1, T2 og T3 gjennom hele dagen, figur 4.3.1.A. T4 holder seg generelt stabil med en endring på 0.07°C i løpet av dagen. Stabiliteten til T4 kan forklares med at sensoren er plassert i bakken og dermed ikke reagerer like raskt på antropogen påvirkning. Temperaturen har et støyende og kaotisk forløp, der det kan være vanskelig å detektere hva som skyldes påvirkning fra besøkende, figur 4.3.1.C og 4.3.1.D.

CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen trigges under det første besøket, stiger fra 500 ppm til 900 ppm og synker deretter til under 400 ppm, figur 4.3.1.B. Utover dagen øker konsentrasjonen sakte, med enkelte topper som korrelerer med besøk fra turister. Etter kl. 15:00 synker CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen jevnt, før den terminerer i grunnivået. CO<sub>2</sub>-toppene fra turistbesøkene forsvinner derfor litt i oscillasjonen som skapes under det første besøket. Forholdet mellom antall besøkende i hvert turistbesøk og CO<sub>2</sub>-topp kan derfor være litt misvisende ved denne stasjonen. I vedlegg 5A er et utvalg tilfeldige dager fra turistsesongen.



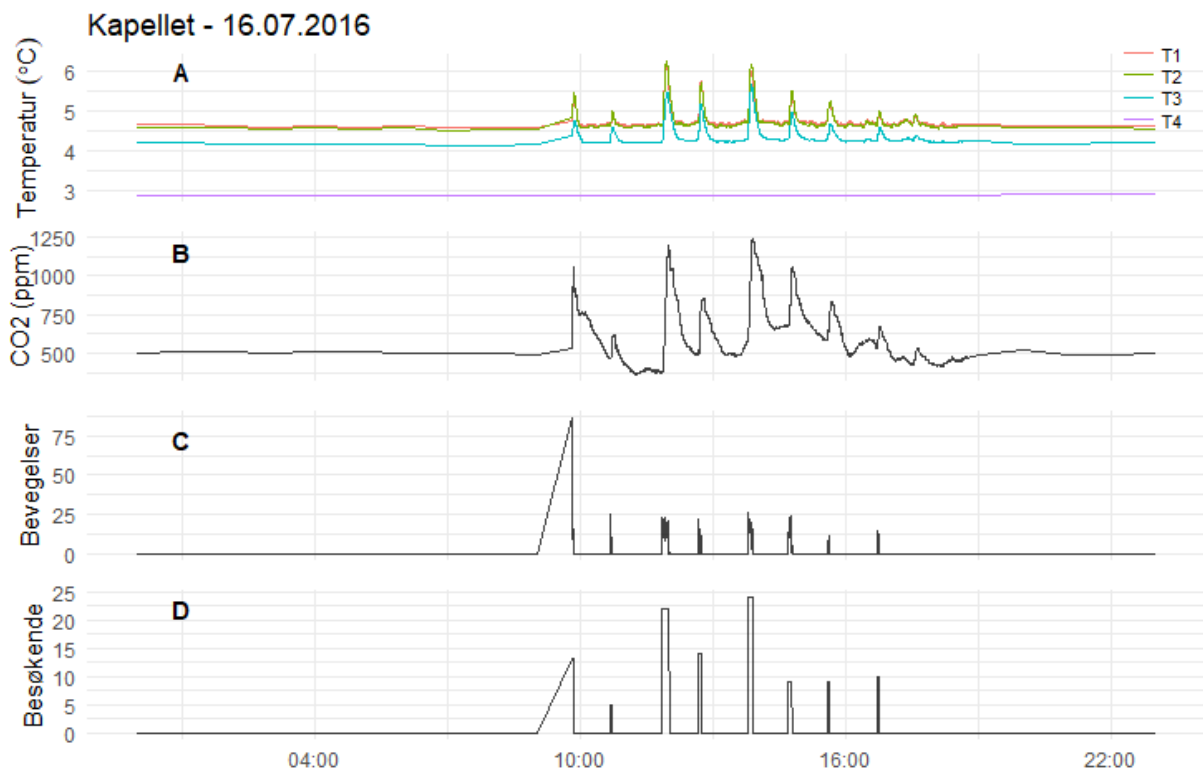
**Figur 4.3.1:** Tilfeldig utvalgt dag fra turistsesongen i Storkirka. Temperatur (T1-T4), CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i B, antall bevegelser i C og antall besøkende i D.

### 4.3.2 Kapellet

Samme dag, 16.07.2016, i Kapellet i turistsesongen forløper som vist i figur 4.3.2.

Temperaturen øker og synker jevnt i forbindelse med hvert turistbesøk, figur 4.3.2.A. Under besøkene kan temperaturen stige med 0.25 til 1.55°C, men turistbesøkene er kun merkbare for sensorene i lufta. Temperaturen har bratte stigningskurver, og noe slakere nedgang. Sensoren i bakken (T4) reagerer ikke på turistbesøk, og holder seg derfor stabil hele dagen. Temperaturen endrer seg 1.67°C, 1.73°C og 1.49°C for henholdsvis T1, T2 og T3 gjennom hele dagen. T4 endrer seg 0.03°C.

CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen følger samme forløp som temperaturen og reagerer på turistbesøkene. Konsentrasjonen har ganske bratte stigningskurver og noe slakere nedgang, som terminerer i et noe varierende grunnivå i løpet av dagen. Dette viser en noe svakere oscillasjon enn ved stasjonen i Storkirka. Disse kurvene brukes senere i avsnitt 4.5.2.2 og 4.5.2.3 til å beregne en halveringstid for CO<sub>2</sub>. Figur 4.3.2.C og 4.3.2.D viser antall bevegelser og antall besøkende under turistbesøkene. For det første besøket vises et større areal under disse to kurvene på grunn et hopp i tidsopløsningen. I vedlegg 5B er flere utvalgte dager fra turistsesongen illustrert.

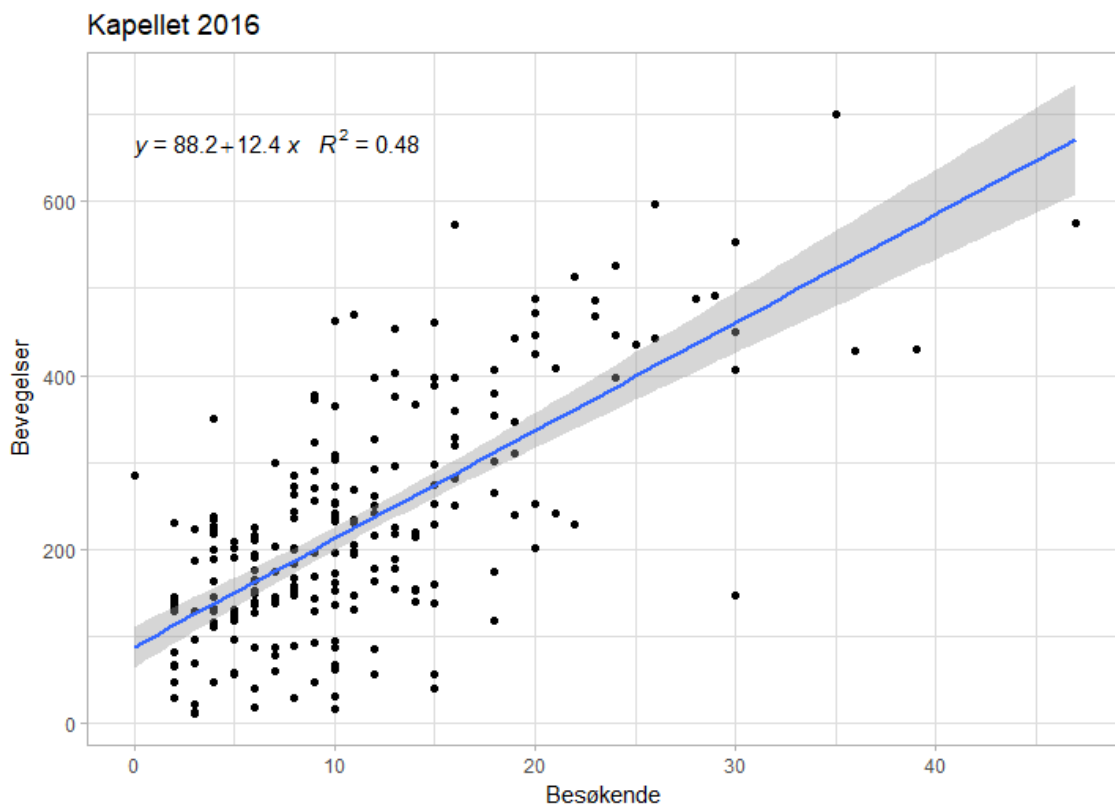


Figur 4.3.2: Tilfeldig utvalgt dag fra turistsesongen i Kapellet. Temperatur (T1-T4), CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i B, antall bevegelser i C og antall besøkende i D.

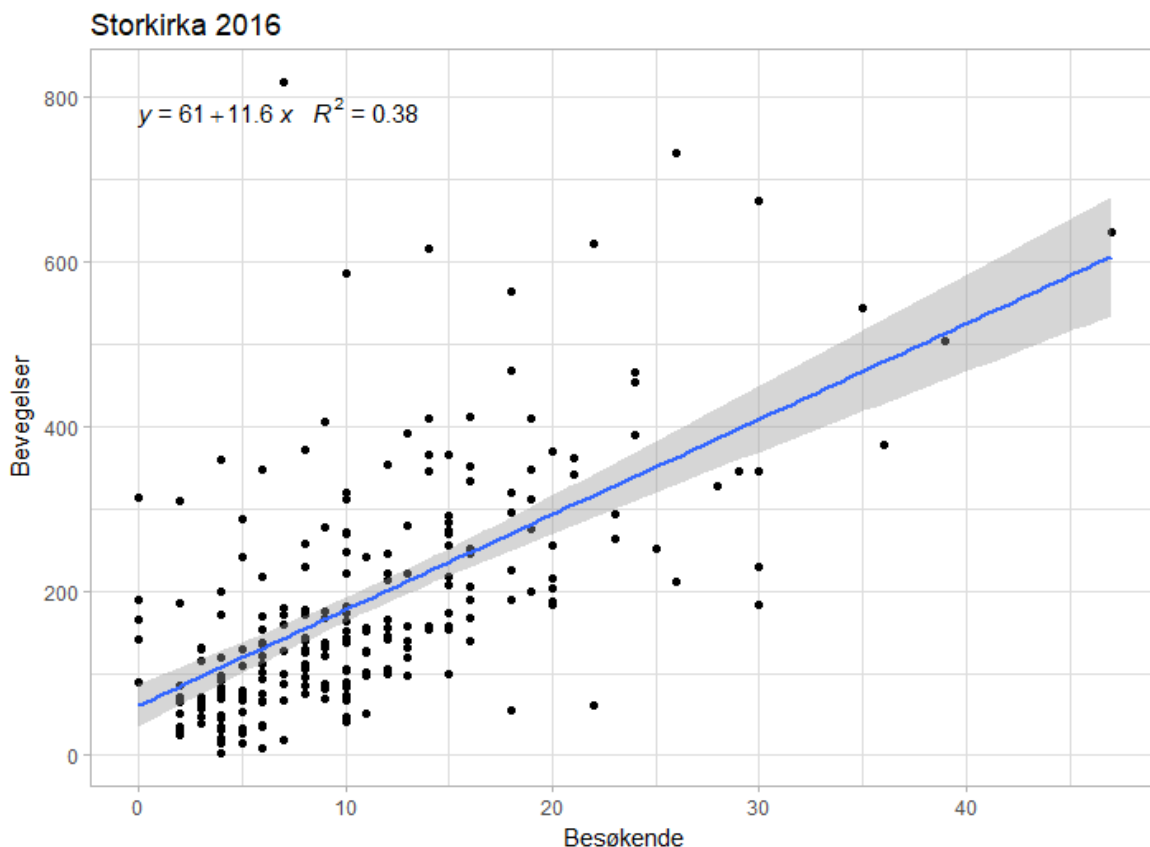
#### 4.4 Bevegelse og antall besøkende

Det er valgt data fra 04.07.16 til 30.07.16 for å studere forholdet mellom antall besøkende i grotta og hvor mye bevegelser de genererer under hvert turistbesøk, figur 4.4.1 og figur 4.4.2. Y-aksen viser det totale antallet bevegelser under hvert turistbesøk og x-aksen viser antall registrerte besøkende under hvert turistbesøk. Det er kun notert ned antall besøkende for turistsesongen 2016, og dermed er det ikke noe sammenligningsgrunnlag mellom disse variablene for 2016 og 2017.

For datasettet fra Kapellet er  $R^2$ -verdien for den lineære regresjonen 0.48 ( $p < 0.001$  for a og b). Stigningstallet til regresjonslinjen gir  $12.4 \pm 0.88$  bevegelser per besøkende. Korrelasjonsanalyse ga positiv lineær korrelasjon,  $r = 0.69$  ( $p < 0.001$ ).



**Figur 4.4.1:** Antallet bevegelser som funksjon av antall besøkende i Kapellet. Et menneske genererer i utgangspunktet 12.4 bevegelser. Regresjonslinje i blått og de grå feltene er konfidensbånd. Antall besøkende er en diskret variabel og gir derfor «striper» i figuren.



**Figur 4.4.2:** Antall bevegelser som funksjon av antall besøkende i Storkirka. Et menneske genererer 11.6 bevegelser. Regresjonslinje i blått, grå områder er konfidensbånd. Antall besøkende er en diskret variabel og gir derfor «striper» i figuren.

Regresjonslinjen for datasettet fra Storkirka gir en tilpasning på  $R^2=0.38$  ( $p<0.001$  for a,  $p<0.001$  for b). Stigningstallet er oppgitt til  $11.6 \pm 0.98$  bevegelser per antall besøkende. Korrelasjonskoeffisienten er  $r=0.62$  ( $p<0.001$ ). Turistene besøker gjerne Storkirka på ruta tilbake fra Kapellet, noe som kan føre til en høyere sum av bevegelser.

Det kan være litt misvisende å se på regresjonslinjer på denne måten, fordi skjæringspunktet indikerer at det allerede er 88 bevegelser ved 0 besøkende i Kapellet og 61 bevegelser ved 0 besøkende i Storkirka!

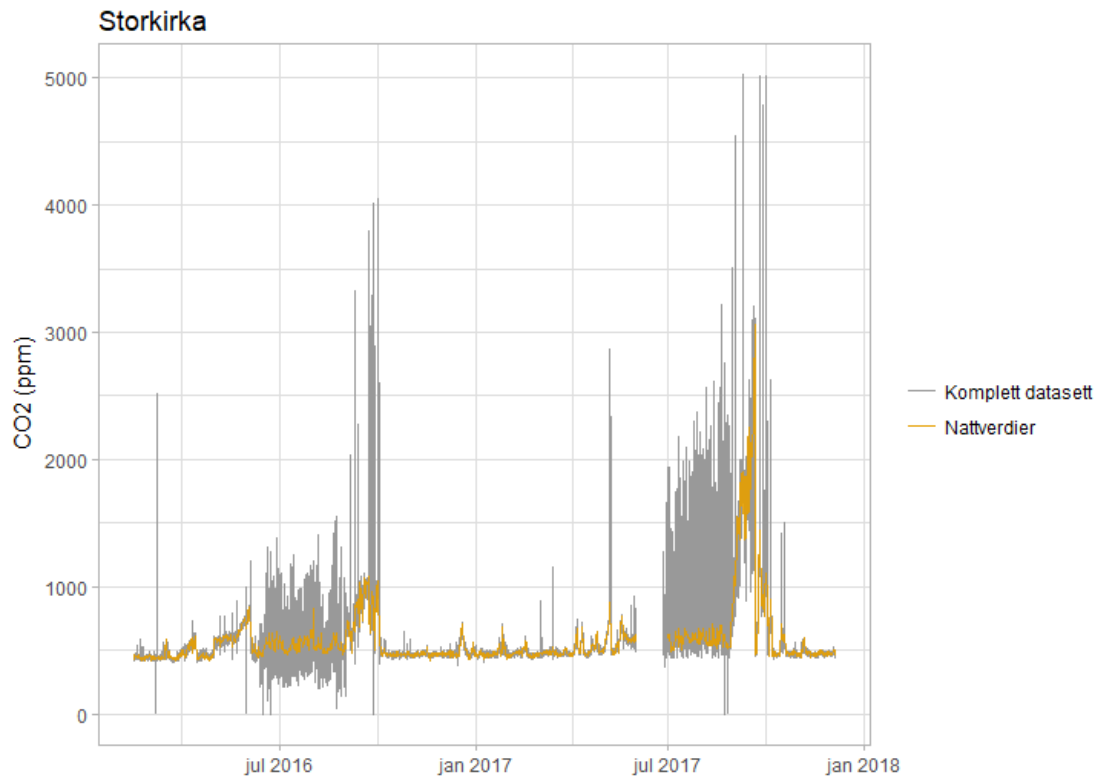
Jo flere mennesker som er ved stasjonene, desto mer bevegelse er det detektert. Siden antall besøkende er en diskret variabel gir den «striper» i figuren, noe som kan påvirke et lineært forhold mellom dataene. Faktorer som kan påvirke hvorfor tilpasningen av regresjonslinjene og korrelasjonskoeffisientene kun delvis forklarer antallet bevegelser ved stasjonene er hvor urolige en gruppe med mennesker er, størrelsen på gruppene og varigheten på besøkene. Dersom varigheten på besøket er langt, vil dette kunne generere flere bevegelser.



## 4.5 CO<sub>2</sub>-konsentrasjonens dynamikk

### 4.5.1 Storkirka

#### 4.5.1.1 Sesongtrend



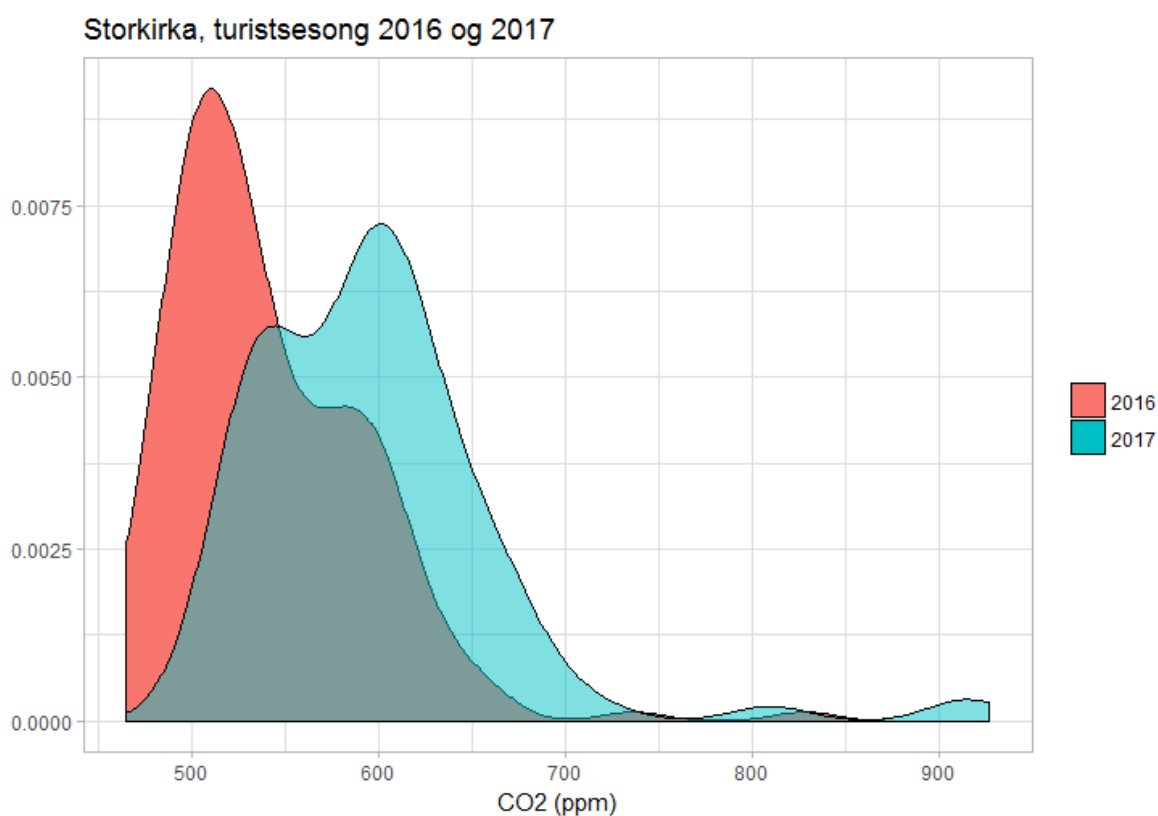
*Figur 4.5.1: Forskjeller mellom det komplette datasettet og nattverdier av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i Storkirka.*

På figur 4.5.1 viser den oransje linjen målinger fra tidspunktene 02:00-04:00. Dette fungerer som en form for sesongtrend, da man har sett at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen ikke påvirkes av turister i løpet av natten og derfor gir mer stabile verdier. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er på et stabilt nivå gjennom vinteren, øker noe i mai-juni 2016, deretter er det en nedgang når turistsesongen starter. Konsentrasjonen øker igjen når turistsesongen er over. I overgangen mellom september-oktober er det en nedgang til grunnivået. I 2017 er det ikke like lett å se en økning i konsentrasjonen før turistsesongen, men nivået stiger høyere for høsten dette året. Dersom man tar utgangspunkt i begge turistsesongene kan man beregne middelverdien for å etablere et grunnivå av CO<sub>2</sub> i grotta. I tabell 4.5.1 er det gitt en oversikt over middelverdi, standardavvik, maksimums- og minimumsverdi innenfor juli-august i de respektive år, samt for den totale måleperioden. Disse månedene er valgt, da de er de travleste månedene med turistbesøk hver dag.

**Tabell 4.5.1:** Oversikt over middelvei, maksimums- og minimumsverdier og standardavvik for CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen innenfor periodene 01.07-01.09 for 2016 og 2017 ved Storkirka, samt den totale måleperioden 15.02.16-04.12.17. Ved denne beregningen er det brukt de filtrerte nattverdiene fra datasettet.

Periode	Middelvei	Standardavvik	Maksimumsverdi	Minimumsverdi
01.07.16 – 01.09.16	541.1	52.3	828.0	464.9
01.07.17 – 01.09.17	596.9	67.0	490.9	927.0
15.02.16 – 04.12.17	579.5	261.2	3063.0	411.4

Nattverdiene i turistsesongen er derimot ikke normalfordelte og derfor gir ikke middelvei og standardavvik et godt bilde på grunnivået, figur 4.5.2. Modalverdien med høyest frekvens for turistsesongen 2016 er 528 ppm. For turistsesongen 2017 er modalverdien 600 ppm. Modalverdiene med lavere frekvens kan komme av naturlige fluktuasjoner i konsentrasjonen, for eksempel som følge av en sirkulasjon av luften.

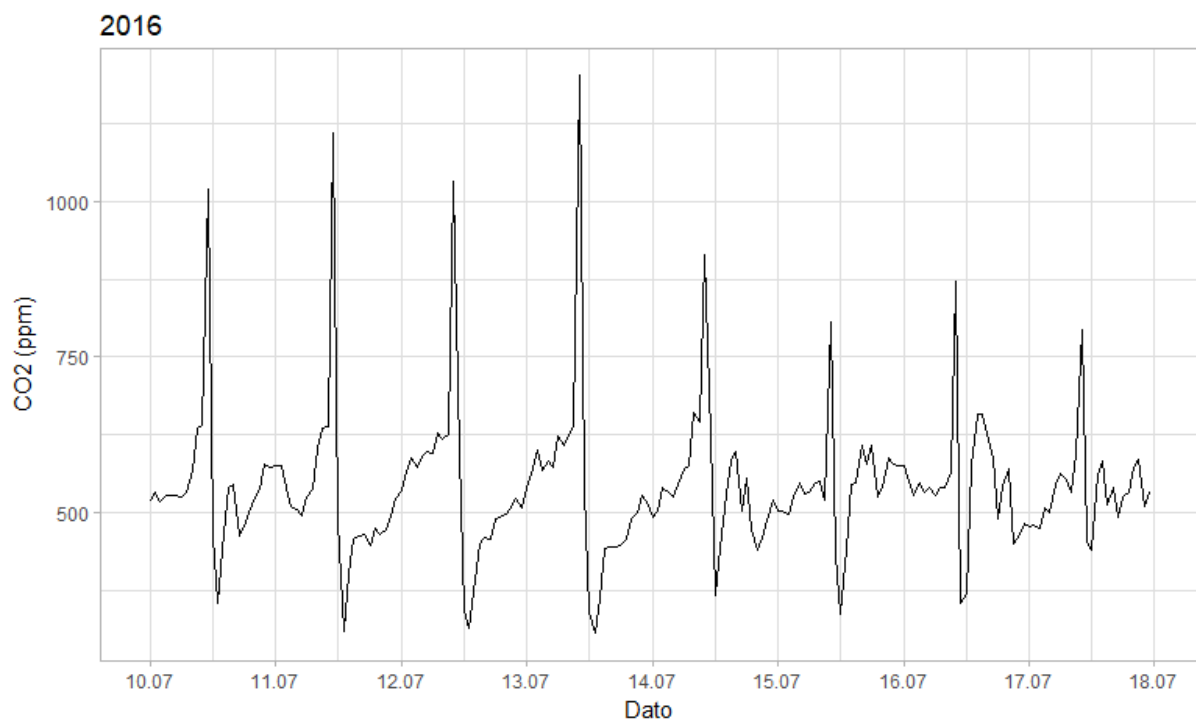


**Figur 4.5.2:** Tetthetskurve for nattverdier av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i turistsesongene.

Hele måleperioden (15.02.16 – 04.12.17) gir derimot en middelværdi på 579.5 ppm. Økningen i CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen om høsten kan trekke denne verdien opp. Målingene for hele måleperioden er heller ikke normalfordelte og viser en lav modalverdi, vedlegg 6A. De høyere CO<sub>2</sub>-verdiene har lavere frekvens. Modalverdien for hele perioden er omtrentlig 493 ppm, og denne verdien kan regnes som et grunnivå. Dette betyr at grunnivået av CO<sub>2</sub> er høyere ved Storkirka-stasjonen i grotta enn den globale atmosfæriske konsentrasjonen.

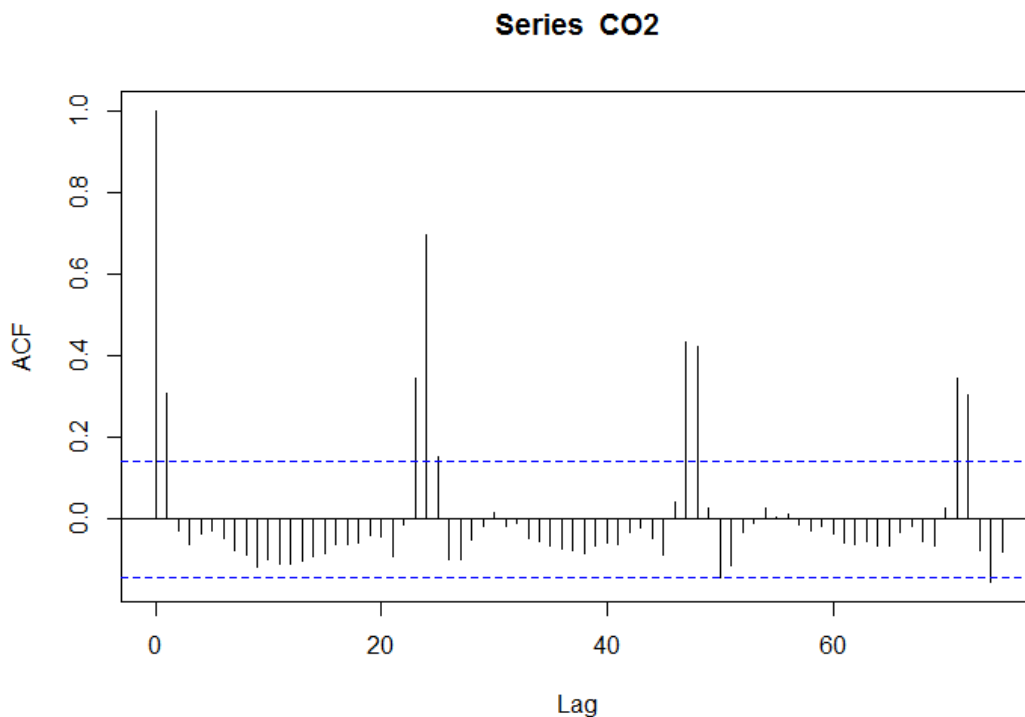
#### 4.5.1.2 Autokorrelasjon 2016

Ved å se nærmere på CO<sub>2</sub>-utslagene over et ukeseintervall, tegner det seg et spesielt fenomen. Figur 4.5.3 viser en forenklet fremstilling (timedata) av CO<sub>2</sub>-utslag i løpet av en uke. Denne viser at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen stiger bratt hver dag, og synker deretter ned til et nivå på under 375 ppm. Det er variasjon i maksimums- og minimumsverdien av CO<sub>2</sub>, men også noen variasjoner for konsentrasjonen om natten. I perioden mellom 11.07-14.07 stiger konsentrasjonen gjennom natten, slik at nivået er på 600 ppm når turistbesøket ankommer stasjonen. De siste dagene er ikke dette tilfellet, da nattverdiene fluktuerer mer om grunnivået.



**Figur 4.5.3:** CO<sub>2</sub>-utslag av timedata for 10.07.16 til 17.07.16. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen øker under det første turistbesøket, synker under grunnivået på 493 ppm og øker deretter utover dagen. I perioden mellom 11.07-14.07 stiger konsentrasjonen jevnt gjennom natten, slik at nivået allerede er 600 ppm når turistbesøket ankommer stasjonen.

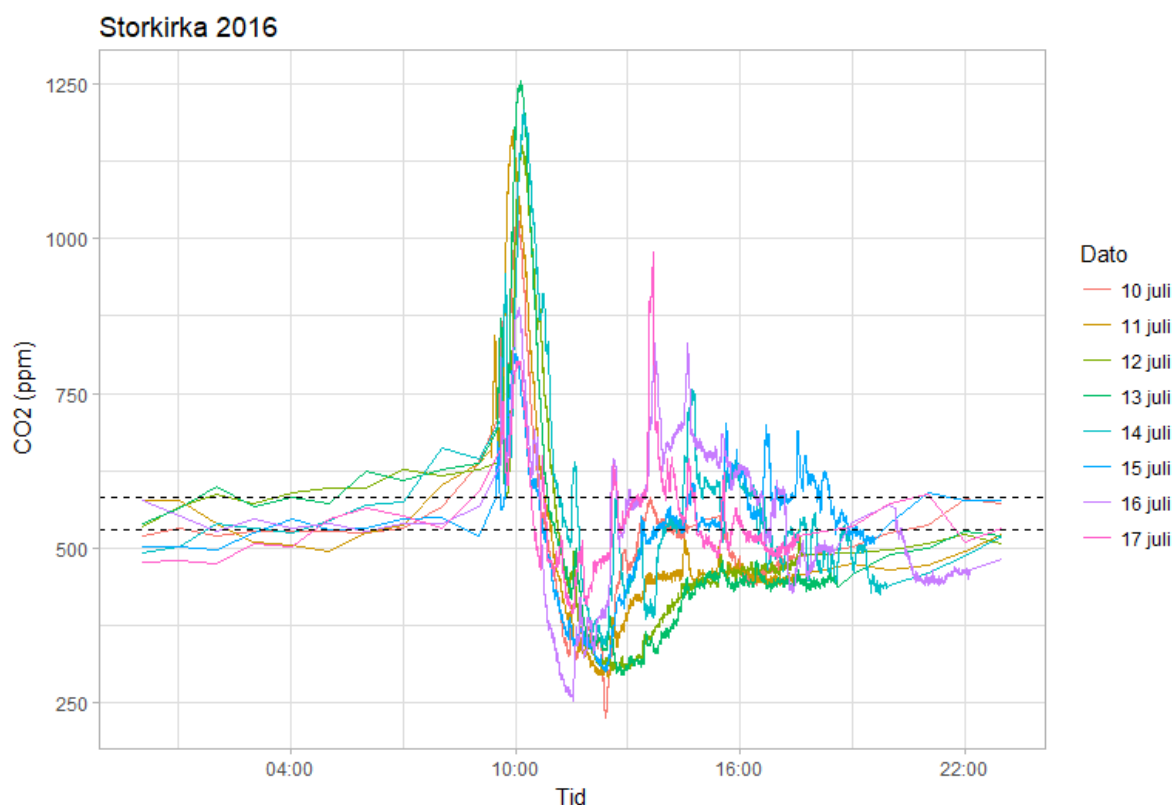
En autokorrelasjonsanalyse viser om en tidsserie er avhengig av tidligere verdier, altså om systemet gjentar seg selv. For å unngå statistiske misforståelser og feil er det valgt å bruke et «rensket» plot med timeverdier, slik at «time lag» blir riktig. Resultatet fra autokorrelasjonen er gitt i figur 4.5.4, der de positive toppene (positiv avhengighet) indikerer en autokorrelasjon når CO<sub>2</sub> er nært grunnivået. Dette betyr at den største gjentakelsen i systemet er ved verdier rundt 530 ppm med en syklus på 24 timer. De negative utslagene (negativ avhengighet) indikerer besøkene på dagtid, hvorav disse har en mindre grad av gjentakelse i systemet. Avhengigheten i systemet avtar med tid fordi antallet målinger som korreleres fra lag  $n$  til lag  $n+1$  minker når  $n$  øker. De blå stiplede linjene er konfidensintervallene med 95%, derfor er det kun linjene som faller utenfor disse som kan regnes som statistisk signifikante. Y-aksen merket ACF angir korrelasjonskoeffisienten.



**Figur 4.5.4:** Resultatet av autokorrelasjonsanalyse for 10.07.16 til 17.07.16. Y-aksen viser et mål på korrelasjonen, og x-aksen viser "time lag" i antall timer. De blå stiplede linjene er konfidensintervallene. De positive utslagene som går over konfidensintervallene kan regnes som statistisk forskjellige fra null.

Variasjonen mellom maksimumsverdiene av CO<sub>2</sub>-toppene og hvor mye turistbesøkene påvirker CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i sin helhet påvirker korrelasjonen mellom dagene, noe som kan føre til at korrelasjon ikke er signifikant. For å se nærmere på hvorfor CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen ikke har signifikant korrelasjon på dagtid, er samme tidsintervall valgt ut fra det komplette datasettet. CO<sub>2</sub>-utslagene for juni og august er gitt i vedlegg 7. For disse periodene er CO<sub>2</sub>-utslagene blitt justert for tid, slik at første bevegelse og utslag er samtidig for dataene. På denne måten kan

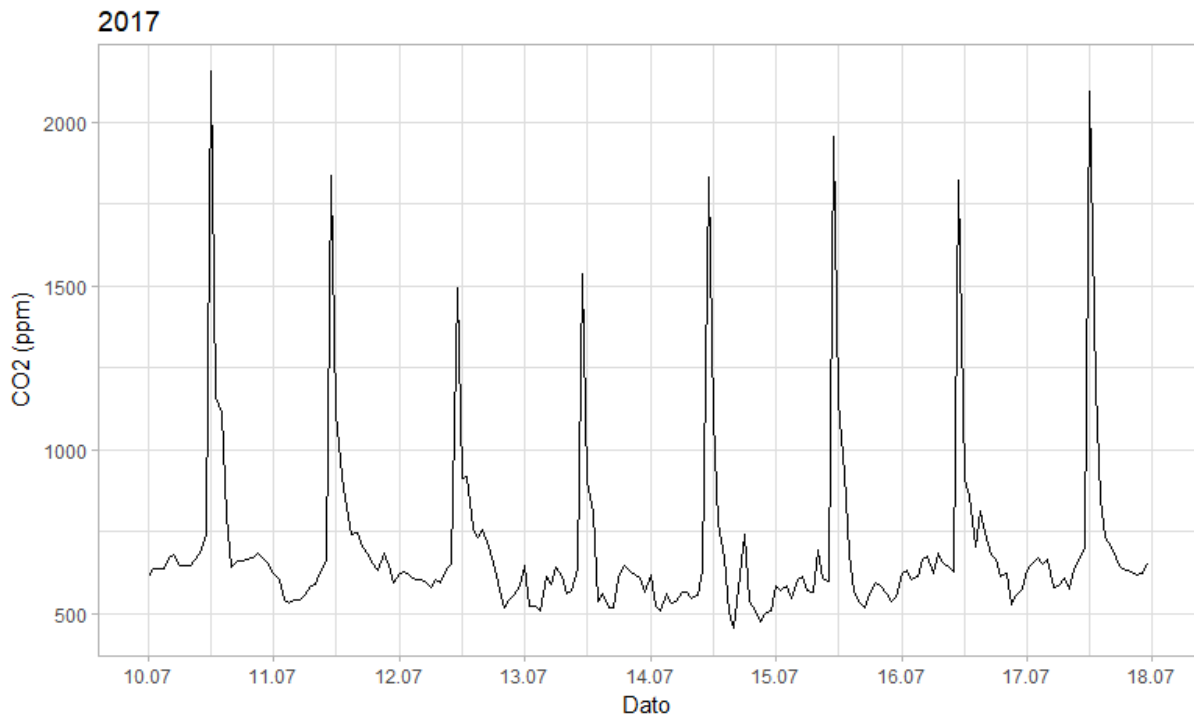
man se nærmere på hva som gjør at CO<sub>2</sub>-utslagene ikke er like fra dag til dag. Figur 4.5.5 viser hvordan CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen øker under det første turistbesøket for dagen, deretter hvordan CO<sub>2</sub> først synker langt under grunnivået og så stiger jevnt resten av dagen, bare avbrutt av turistbesøkene. Dette fenomenet er avgrenset til perioden 10.06.16 til 31.08.16. Dette gir grunn til å tro at målingene som observeres er et resultat av turistbesøkene. En teori er at turistbesøkene skaper en ventilasjonseffekt med "resonans" i systemet. Middelerdien av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen for nattverdiene (kl 02:00-04:00) i løpet av denne uken er 537.4 ppm, men det er bimodal fordeling med modalverdier rundt 530 ppm og 582 ppm. Modalverdiene er merket med stiplede linjer i figur 4.5.5. Disse forskjellene stammer fra variasjonen i CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i løpet av natten. Figur 4.5.5 viser hvorfor det ikke er signifikant korrelasjon på dagtid. Det er stor variasjon i dataene mellom kl 10-19, både når det gjelder maksimums- og minimumsverdi av CO<sub>2</sub>, samt hvordan konsentrasjonen stabiliseres utover dagen. Dette viser at verdier som korrelerer mest med seg selv er nattverdiene og derfor kommer de positive utslagene her.



**Figur 4.5.5:** CO<sub>2</sub>-forløp for 10.07.16 til 17.07.16 lagt over hverandre. Her er 10.07 og 11.07 korrigert tilbake med 1 time, for å understreke at selv om besøket starter senere, så er selve CO<sub>2</sub>-forløpet likt.

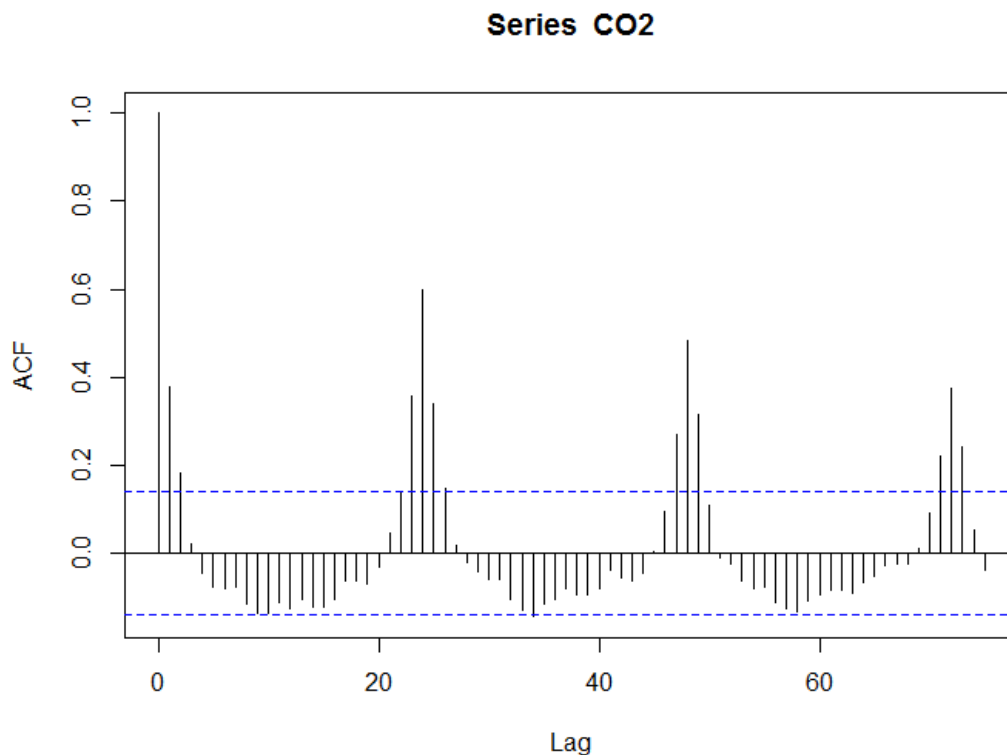
### 4.5.1.3 Autokorrelasjon 2017

For 2017 er det brukt det samme tidsintervallet (10.07-17.07). CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen stiger bratt hver dag når det første turistbesøket er ved stasjonen, figur 4.5.6. Nedgangen er noe slakere og konsentrasjonen synker ikke under grunnivået, i motsetning til dataene for 2016. I stedet stabiliseres konsentrasjonen ved grunnivået på mellom 537-617 ppm. I 2017 hadde CO<sub>2</sub> høyere maksverdier med konsentrasjoner på 1500 ppm eller mer.



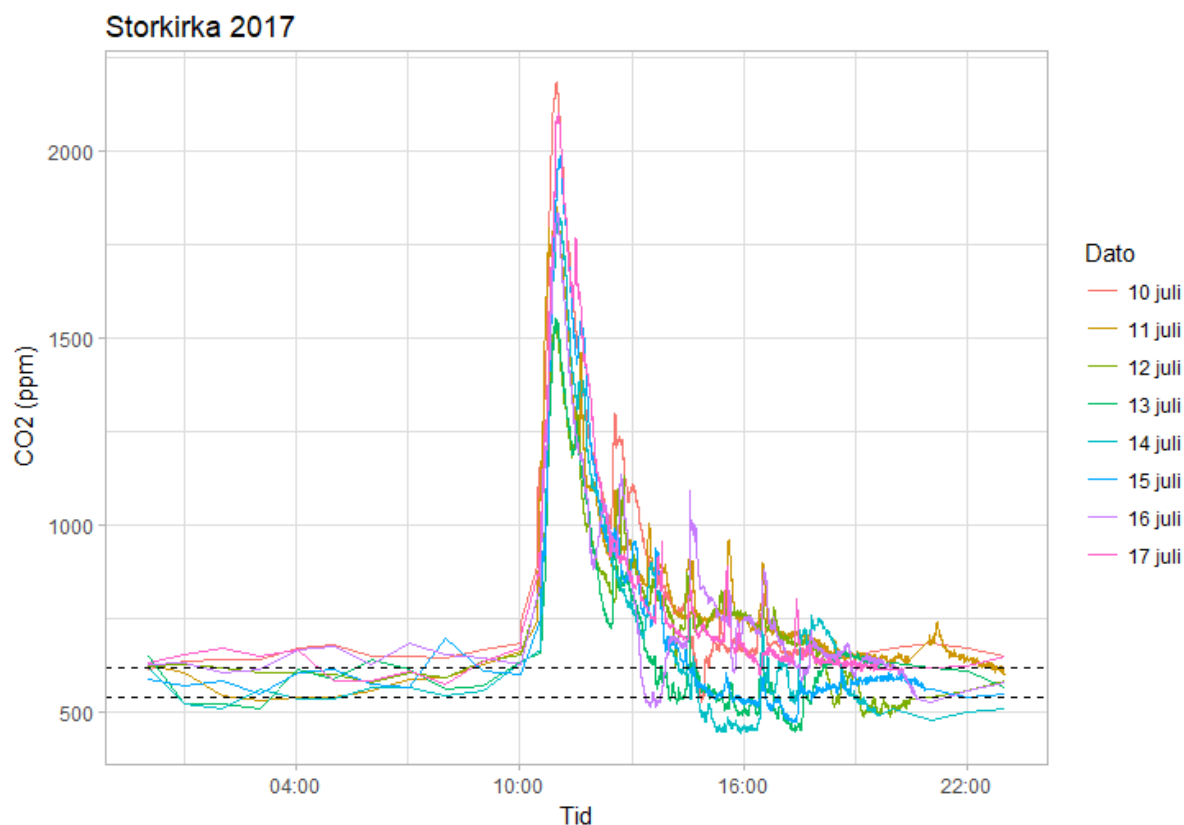
**Figur 4.5.6:** Tidedata for 10.07.17 til 17.07.17. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen øker under det første turistbesøket og har deretter en noe slakere nedgang før det terminerer i grunnivået. Maksverdiene for konsentrasjonen er høyere for 2017.

Ved å bruke samme fremgangsmåte som på dataene for 2016, blir det også gjort en autokorrelasjonsanalyse på dataene fra 2017. Autokorrelasjonen viser sterkere avhengighet i disse dataene enn i dataene for 2016, figur 4.5.7. Y-aksen viser korrelasjonskoeffisienten for hvert "time lag". Det er igjen de positive utslagene som er statistisk signifikante med en syklus på 24 timer. Disse korrelasjonene er nattverdiene som holder seg ganske stabile fra dag til dag. Det er derimot en klarere trend i de negative utslagene, som tilsvarer CO<sub>2</sub>-målingene på dagtid. En grunn til dette kan være at man ikke har den samme minimumsverdien langt under grunnivået, og at selve CO<sub>2</sub>-forløpet fra dag til dag er ganske likt. Konfidensintervallet for datasettet er merket med stiplede blå linjer i figuren.



**Figur 4.5.7:** Autokorrelasjon for 10.07.17 til 17.07.17. Analysen viser at de positive utslagene kommer med 24 timers syklus, noe som tilsvarer nattverdiene. Det er kun utslagene som går lenger enn konfidensbåndene, stiplet i blått, som kan regnes som statistisk forskjellig fra null. ACF på y-aksen viser korrelasjonskoeffisienten for hvert "time lag".

For 2017 er samme fremgangsmåte brukt for overlappende dager, se figur 4.5.8. Noen dager er korrigert tilbake med enten 1 eller 2 timer, slik at alle grafene har likt tidspunkt for det første turistbesøket. CO<sub>2</sub> øker raskt under det første turistbesøket og har deretter en noe slakere nedgang, bare avbrutt av turistbesøk. For 2017 synker ikke CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen under grunnnivå. Her ser man at forløpene er mer like, og at dette derfor gir en sterkere trend i dataene. Variasjonen i maksimumsverdi, samt nedgang og hvilket nivå konsentrasjonen er på, skaper mindre avhengighet i systemet på dagtid. Middelverdi av nattverdier (02:00-04:00) over dette tidsrommet på 10.07 -17.07 var 592.2 ppm, men dataene har bimodal fordeling med modalverdier på 537 ppm og 617 ppm. Disse modalverdiene er merket med stiplede linjer i figur 4.5.8. En del av informasjonen fra de resterende turistbesøkene utover dagen faller bort, siden det første besøket gir et stort utslag og mye fluktuasjon i systemet.

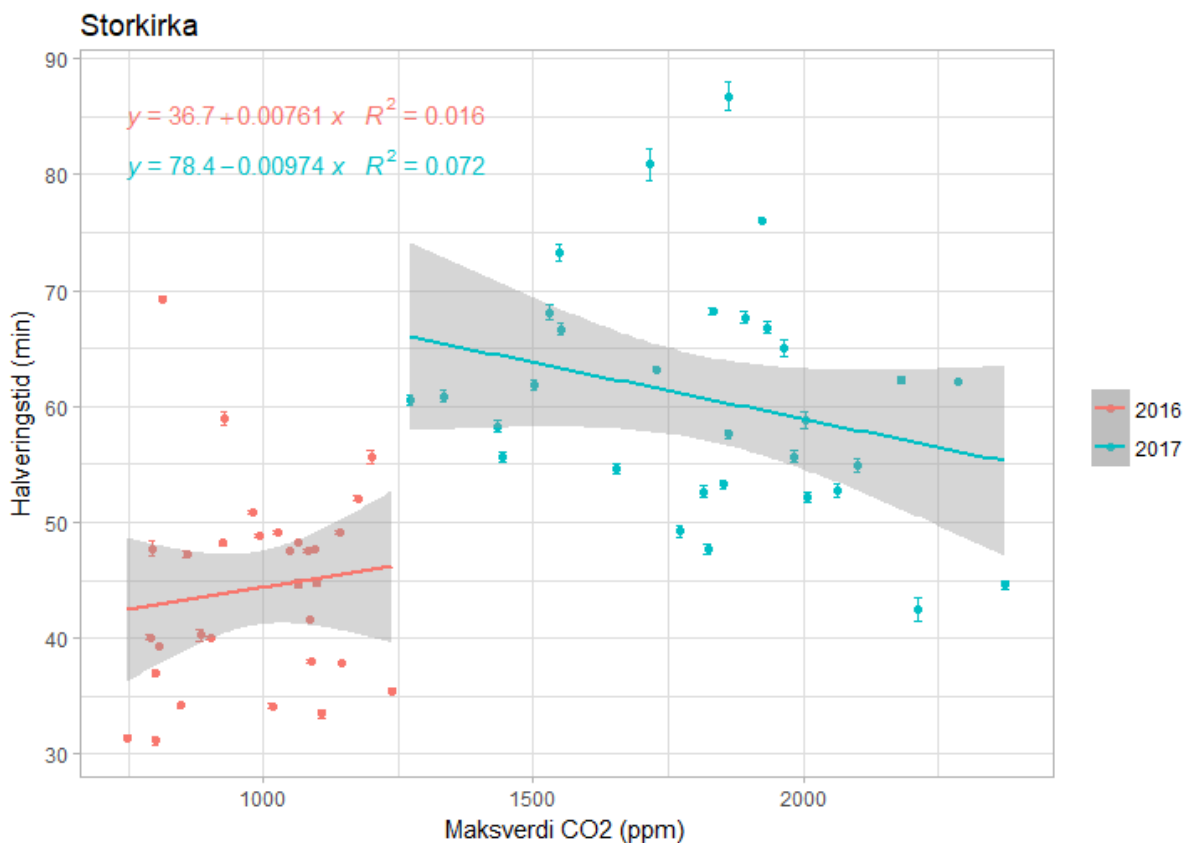


**Figur 4.5.8:** CO<sub>2</sub>-forløpene fra det komplette datasettet i perioden 10.07.17 til 17.07.17. Noen utslag er korrigert tilbake med henholdsvis 1 og 2 timer, slik at grafene treffer likt ved det første turistbesøket.

#### 4.5.1.4 Halveringstider etter CO<sub>2</sub>-påvirkning

Basert på CO<sub>2</sub>-utslagene for 2016 og 2017 er det beregnet en halveringstid ved hjelp av programkoden på det første og største utslaget, se kapittel 3.5. Resten av utslagene på CO<sub>2</sub> er det ikke tatt hensyn til siden disse kan være påvirket av tidligere besøk og indusert ventilasjon ved stasjonen. Figur 4.5.9 viser halveringstid som funksjon av maksimumsverdi på CO<sub>2</sub>-utslagene fra 2016 og 2017 sammenstilt. Her ser man at både halveringstidene og maksimumsverdi på CO<sub>2</sub>-utslagene er lavere for 2016 enn for 2017. Feillinjene illustrerer beregnet usikkerhet for halveringstidene.





**Figur 4.5.9:** Halveringstid som funksjon av maksverdien til CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen på det største utslaget. Feillinjene angir beregnet usikkerhet for halveringstidene.

Stigningskoeffisientene til regresjonslinjene er ganske lave med henholdsvis 0.00761 og -0.00974. Usikkerhetene i disse er oppgitt til  $\pm 0.01106$  og  $\pm 0.00649$ . Dette betyr i utgangspunktet at dataene for 2016 har en usikkerhet som påvirker stigningstallet til å kunne være både positivt og negativt. Dette er også synlig i konfidensbåndene. Den lineære regresjonen gir en dårlig tilpasning til dataene ( $R^2 = 0.016$ ,  $p = 0.497$  for a,  $p = 0.002$  for b). Siden kun den ene p-verdien er under signifikansnivået på 0.05, kan ikke regresjonslinjen regnes for å være statistisk signifikant. Korrelasjonen mellom variablene i 2016 er  $r = 0.13$  ( $p = 0.497$ ). P-verdien er høyere enn signifikansnivået, og derfor er ikke korrelasjonen mellom variablene statistisk signifikant.

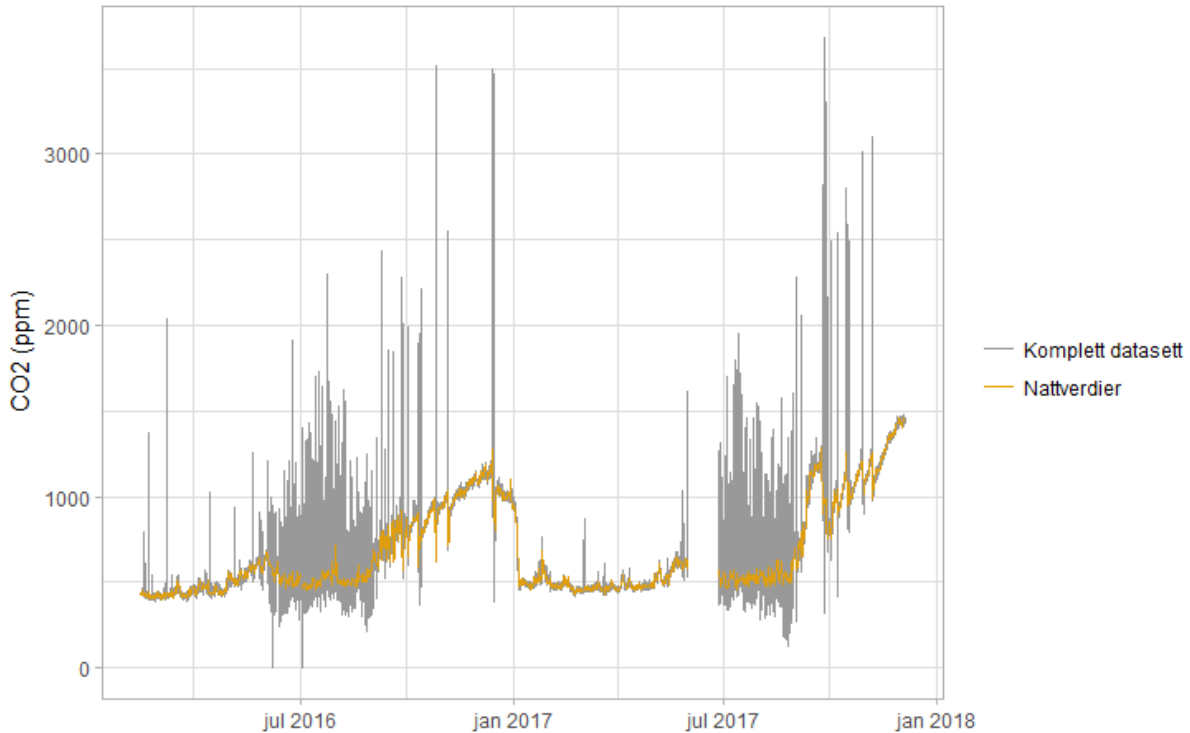
For 2017 er det minste stigningstallet gitt til -0.00325. Det indikerer at den er relativt flat, men at stigningstallet uansett vil være negativt. Dette betyr at når maksverdi av CO<sub>2</sub> øker, vil halveringstiden bli noe kortere. Regresjonslinjen gir en dårlig tilpasning til punktene ( $R^2 = 0.072$ ,  $p = 0.145$  for a,  $p < 0.001$  for b). I dette tilfellet er også kun den ene p-verdien signifikant, slik at regresjonslinjen som helhet ikke er statistisk signifikant. Den negative korrelasjonen for 2017 er heller ikke signifikant ( $r = -0.29$ ,  $p = 0.14$ ). Statistisk sett er det ikke et klart lineært

forhold mellom variablene for datasettene for verken 2016 eller 2017. Dette indikerer at halveringstiden i CO<sub>2</sub>-regeneringen er uavhengig av maksimumsverdien i CO<sub>2</sub>-nivået.

## 4.5.2 Kapellet

### 4.5.2.1 Sesongtrend

#### Kapellet



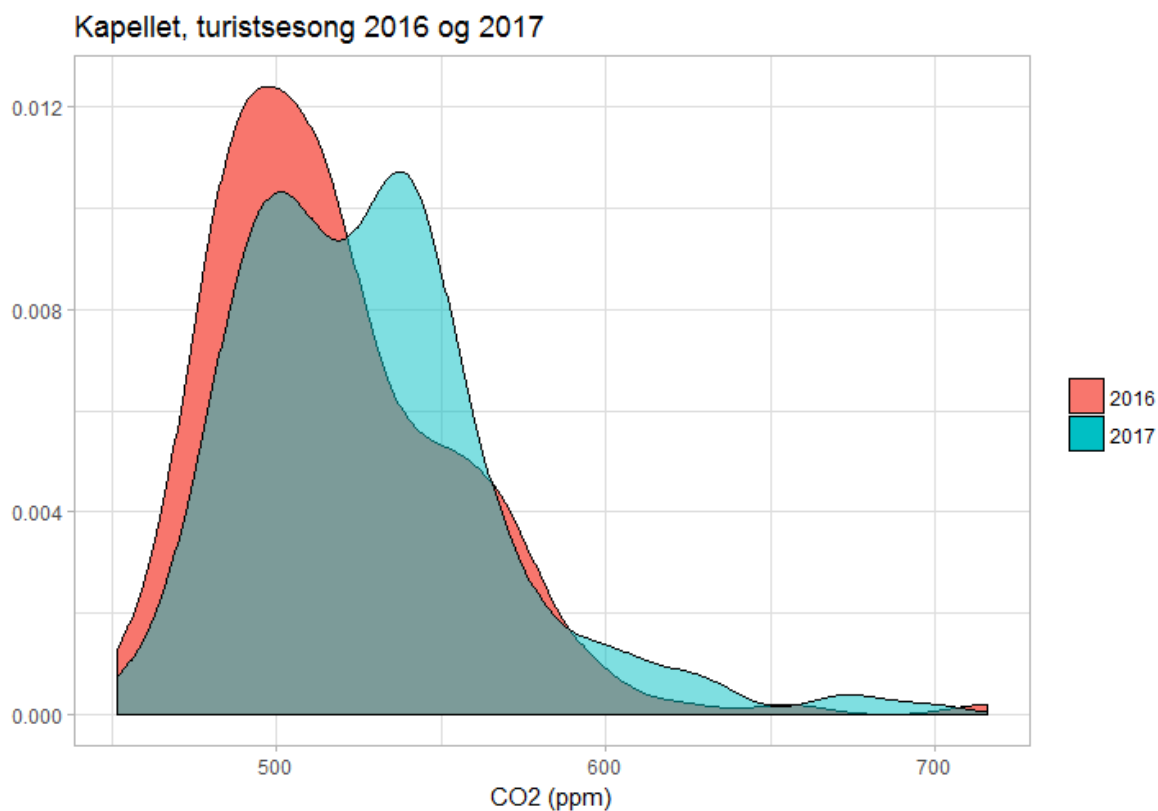
*Figur 4.5.10: Komplett datasett og nattverdier av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen ved Kapellet.*

På figur 4.5.10 er den oransje linjen målinger fra tidspunktene 02:00-04:00. Dette fungerer som en form for sesongtrend, da man har sett at CO<sub>2</sub> ikke påvirkes av turister i løpet av natten og at målingene derfor er mer stabile. Konsentrasjonen holder seg på et stabilt nivå rundt 500 ppm i løpet av vinteren, før konsentrasjonen øker litt i løpet av april og mai. I juli og august er CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen lavere, mest sannsynlig på grunn av turistsesongen, figur 4.5.10. Deretter stiger konsentrasjonen idet turistsesongen avsluttes i slutten av august. Grunnivået stiger helt frem til overgangen mellom desember 2016/januar 2017, før konsentrasjonen brått synker. Akkurat når konsentrasjonen synker ned igjen etter høsten 2017 er vanskelig å vite, siden dette faller utenfor måleperioden. Dersom man tar utgangspunkt i begge turistsesongene (juli-august 2016 og 2017) kan vi prøve å beregne en middelværdi for et grunnivå av CO<sub>2</sub>. Middelerdiene for disse periodene er gitt i tabell 4.5.2. Nattverdiene i turistsesongen begge år er derimot ikke normalfordelte, og middelværdi gir derfor et misvisende bilde på et grunnivå innenfor respektive turistsesonger, figur 4.5.11.

**Tabell 4.5.2:** Oversikt over middelvei, standardavvik, maksimums- og minimumsverdi for CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen for juli-august 2016 og 2017 i Kapellet, samt hele innsamlingsperioden. Beregningene av disse verdiene baserer seg utelukkende på nattverdiene.

Periode	Middelvei	Standardavvik	Maksimumsverdi	Minimumsverdi
01.07.16 – 01.09.16	517.4	37.7	715.5	453.5
01.07.17 – 01.09.17	528.2	39.8	697.8	451.8
15.02.16 – 04.12.17	672.5	263.0	1464	396.9

Modalverdien for turistsesongen 2016 er 495 ppm. Turistsesongen 2017 har derimot en klarere bimodal fordeling med modalverdier på 500 og 540 ppm. Hele innsamlingsperioden har en middelvei på 672.5 ppm. Det som trekker opp middelveien her er de lange periodene fra august til desember der CO<sub>2</sub> stiger gradvis. Dataene for hele perioden viser en bimodal fordeling med forskyving mot venstre, vedlegg 6B. Modalverdien med høyest frekvens er 538 ppm. Den andre modalverdien har lavere frekvens i histogrammet, men er gitt til omtrentlig 1050 ppm. Denne verdien tilsvarer perioden med forhøyet CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i løpet av høsten. I dette tilfellet er det den første modalverdien på 538 ppm som gir den beste beskrivelsen på et grunnivå for hele perioden, noe som betyr at konsentrasjonen ved denne stasjonen både er høyere enn den globale atmosfæriske konsentrasjonen og grunnivået ved Storkirka.

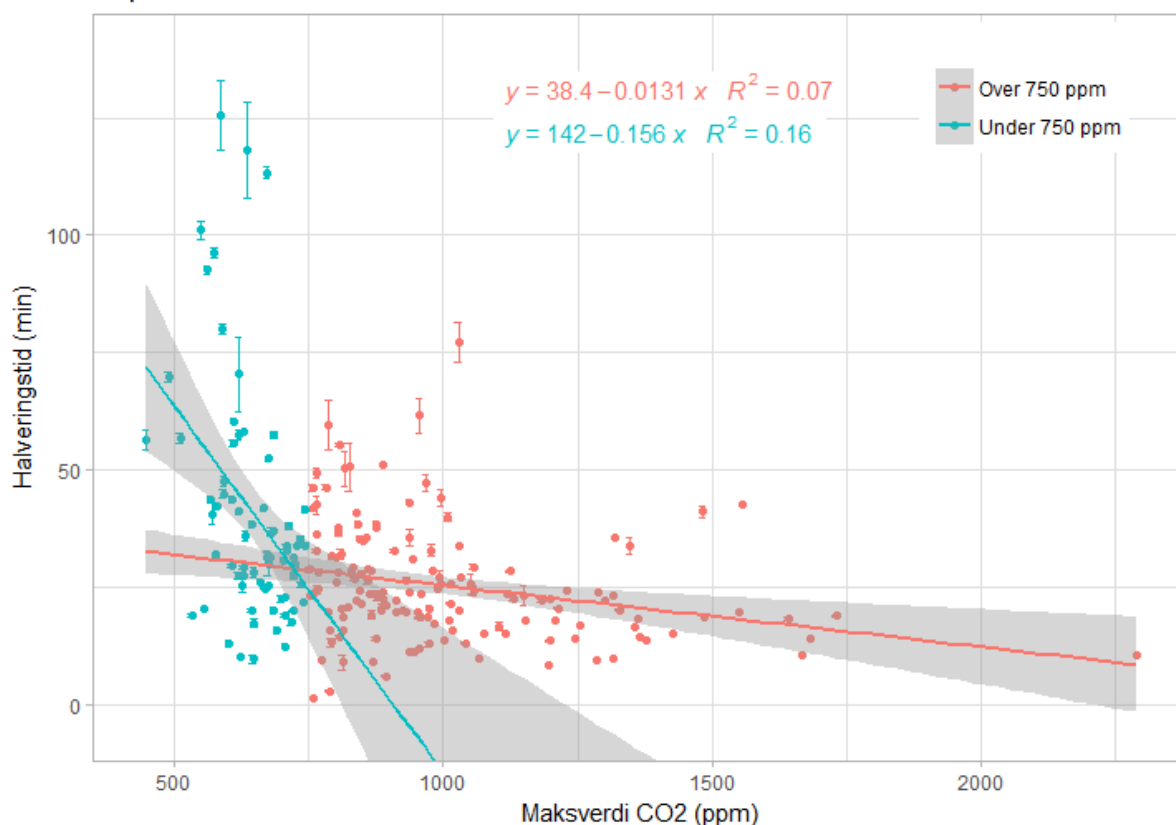


*Figur 4.5.11: Tetthetskurve av nattverdier for turistsesonger i Kapellet, 2016 og 2017.*

#### 4.5.2.2 Halveringstider etter CO<sub>2</sub>-påvirkning 2016

For Kapellet er det mye lettere å hente ut informasjon fra CO<sub>2</sub>-utslagene under turistbesøk, noe som gjør at datamengden for denne stasjonen er større. Under utregning av halveringstider er det satt en øvre grense på 180 min. Figur 4.5.12 viser at jo høyere maksverdi av CO<sub>2</sub> er, desto kortere er halveringstiden. Inndelingen i datasettet er satt til under og over 750 ppm. Denne inndelingen er valgt fordi variasjonen i halveringstid er større for maksverdier under 750 ppm enn for over 750 ppm. Datapunktene med turkis farge er for under 750 ppm, og punktene med rød farge er for over 750 ppm. Det er tilpasset to lineære regresjonslinjer til datasettet basert på denne inndelingen.

## Kapellet 2016



**Figur 4.5.12:** Halveringstid som funksjon av maksverdi av CO<sub>2</sub>-topper generert av turistbesøk. Datasettet er inndelt i verdier under (turkis) og over 750 ppm (rødt). Feillinjene viser beregnet usikkerhet til halveringstid.

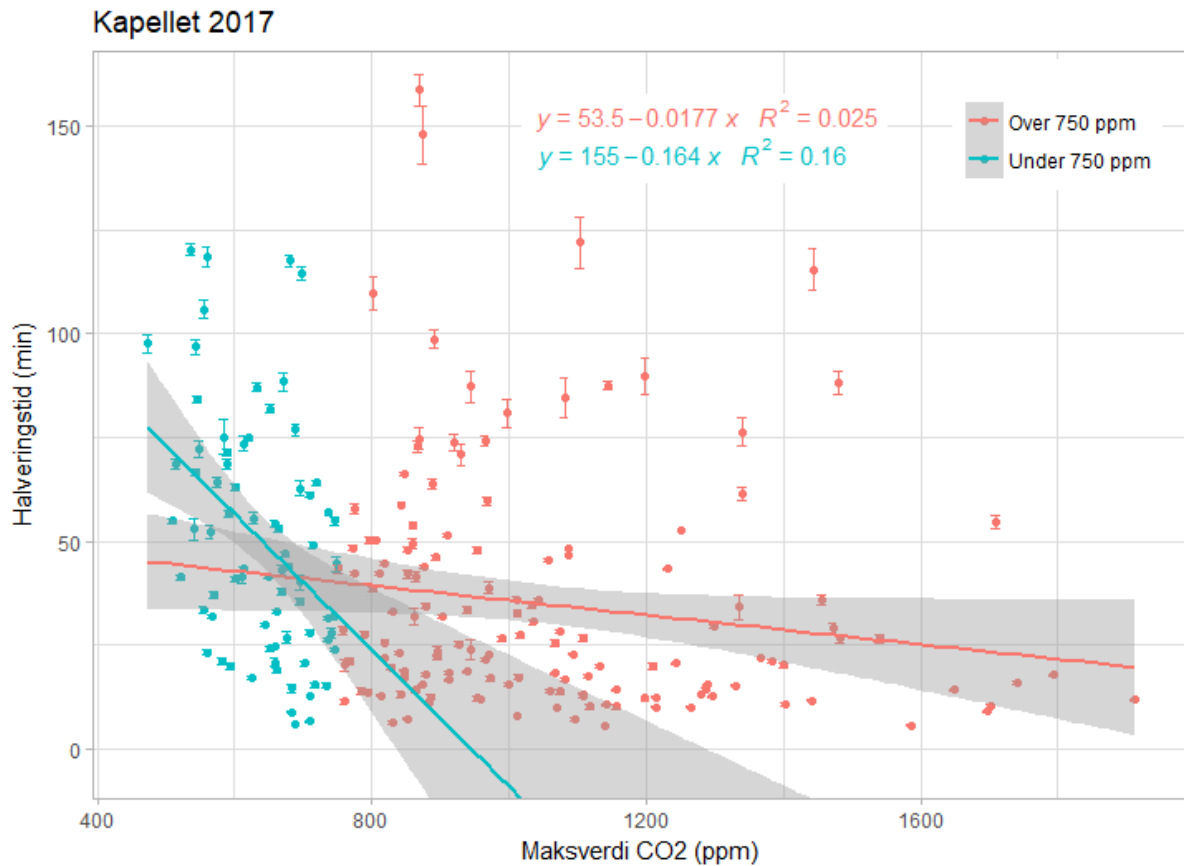
Den lineære regresjonen for de lave CO<sub>2</sub>-toppene ga ingen god tilpasning med  $R^2=0.16$  ( $p = 0.005$  for a,  $p < 0.001$  for b). Datasettet viser en moderat negativ korrelasjon ( $r = -0.40$ ,  $p < 0.001$ ). For dette intervallet er stigningstallet  $-0.155 \pm 0.043$  noe som indikerer at per 1 ppm maksverdien i CO<sub>2</sub>-toppen øker, vil halveringstiden synke mellom 0.198 min og 0.112 min.

For CO<sub>2</sub>-toppene over 750 ppm har regresjonslinjen ingen god tilpasning ( $R^2=0.07$ ,  $p=0.001$  for a,  $p < 0.001$  for b). Korrelasjonen er svak negativ med  $r = -0.26$  ( $p=0.0011$ ). Stigningstallet på  $-0.0131 \pm 0.004$  indikerer at per 1 ppm økning i maksverdi CO<sub>2</sub> vil halveringstiden minke med omtrentlig 0.01 min. For maksverdier over 750 ppm synker halveringstiden saktere enn for maksverdier under 750 ppm.

Feillinjene til punktene som ligger langt fra regresjonslinjene og konfidensbåndene har noe større usikkerhet i halveringstid enn de som ligger nærmere. Krysningspunktet mellom regresjonslinjene er ved omtrentlig  $x = 720$  ppm og  $y = 30$  min. Det betyr at dersom maksverdien er høyere enn 720 ppm er det sannsynlig at halveringstiden vil være 30 min eller kortere.

### 4.5.2.3 Halveringstider etter CO<sub>2</sub>-påvirkning 2017

For 2017 er det valgt samme framgangsmåte og samme inndeling av dataene som for datasettet fra 2016, se figur 4.5.13. Den samme inndelingen gir ikke like mye mening for datasettet for 2017, men er valgt på sammenligningsbakgrunn mellom sesongene.



**Figur 4.5.13:** Halveringstid som funksjon av maksverdi CO<sub>2</sub> for 2017. Inndelingen er under (turkis) og over 750 ppm (rødt). Feillinjene viser beregnet usikkerhet for halveringstiden. De grå feltene viser konfidensbåndene til regresjonslinjene.

Den turkise regresjonslinjen for de lave CO<sub>2</sub>-toppene gir en dårlig tilpasning med  $R^2=0.14$  ( $p=0.0597$  for a,  $p < 0.001$  for b). Her er den ene p-verdien noe høyere enn signifikansnivået på 0.05. Dette betyr i utgangspunktet at stigningstallet ikke er signifikant. Dermed er ikke regresjonslinjen som helhet statistisk signifikant. Korrelasjonen er svak negativ med  $r = -0.376$  ( $p=0.00088$ ). Usikkerhet i stigningstallet på  $-0.164 \pm 0.043$  indikerer at halveringstiden minker mellom 0.21 og 0.12 min per 1 ppm økning i maksverdi CO<sub>2</sub>.

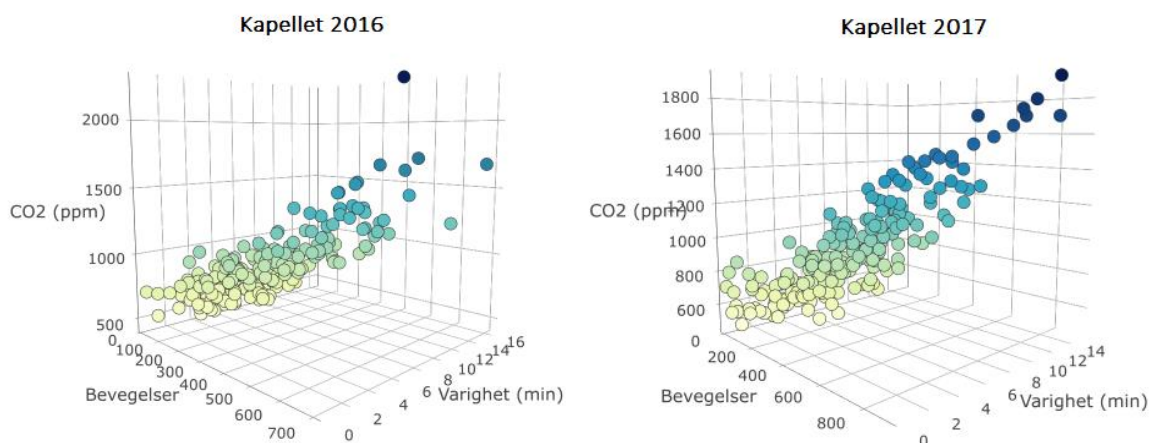
Datasettet med maksverdi over 750 ppm viser en stor spredning i verdiene. Dette påvirker tilpasningen av en regresjonslinje med  $R^2 = 0.025$  ( $p= 0.00088$  for a,  $p < 0.001$  for b). Dette er en dårlig tilpasning, men p-verdiene er fortsatt signifikante. En grunn til dette kan være størrelsen på datasettet. Korrelasjonsanalyse gir et svakt, negativt lineært forhold med  $r = -0.16$  ( $p=0.059$ ). Korrelasjonen har p-verdi som er høyere enn signifikansnivået på 0.05, dermed kan

ikke korrelasjonen anses som signifikant. Dette skyldes antagelig den store spredningen i datasettet, noe som også støttes av den dårlige tilpasningen til regresjonslinjene. Usikkerhet i stigningstall er  $-0.0177 \pm 0.0093$  noe som indikerer en halveringstid som minker mellom 0.027 og 0.008 min.

Krysningspunktet for regresjonslinjene er på omtrentlig  $x = 700$  ppm og  $y = 40$  min. Dette betyr at ved en maksimumsverdi i CO<sub>2</sub>-utslag på mer enn 700 ppm er det sannsynlig med halveringstid kortere enn 40 min. Avvikere fra regresjonslinjene i datasettet har større beregnet usikkerhet enn punktene som ligger nært regresjonslinjene og konfidensbåndene.

#### 4.5.2.4 Maksimumsverdi CO<sub>2</sub> og totalpåvirkning

Totalpåvirkning er definert som produktet av varigheten av et turistbesøk og integralet av antall bevegelser i det samme besøket. For å undersøke hvilken av faktorene som spiller størst rolle for maksimumsverdien i CO<sub>2</sub> er det plottet i en tredimensjonal figur med integralet av bevegelser, varighet av besøket og maksimumsverdi i CO<sub>2</sub> på aksene. Datasettene baserer seg på målinger fra tidsrommet 04.07-30.07 for både 2016 og 2017. I figur 4.5.14 ser man at de høyeste CO<sub>2</sub>-verdiene opptrer som en kombinasjon av både lang varighet av besøket og mye bevegelser fra de besøkende. Dette gjelder for begge årene, men med en noe klarere trend i 2017. Lys farge tilsvarer en lav CO<sub>2</sub>-verdi, og mørkeblå farge indikerer høy CO<sub>2</sub>-verdi. Mye bevegelser kan ikke direkte sies å være en årsak til et høyt CO<sub>2</sub>-nivå, men dersom folk beveger seg mye, løper rundt eller hopper kan dette ha en sammenheng med hvor mye CO<sub>2</sub> et menneske puster ut.



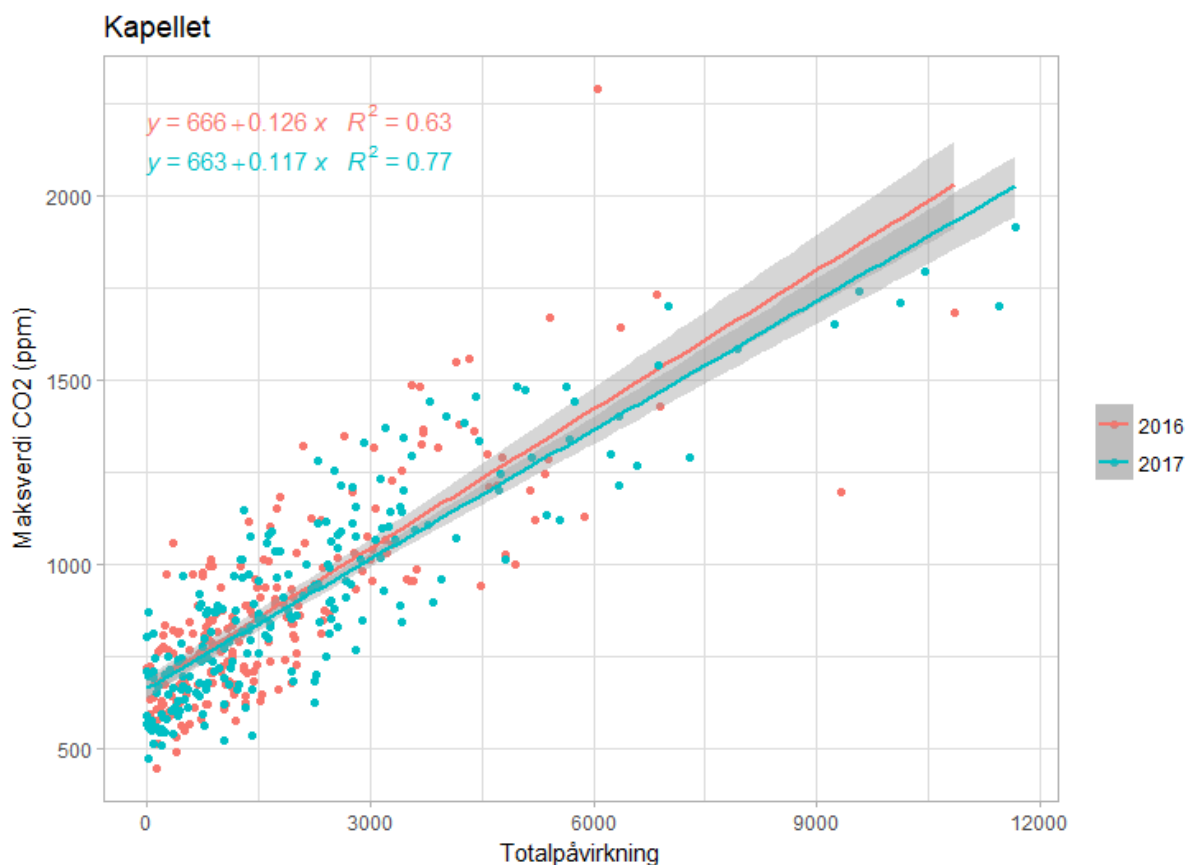
**Figur 4.5.14:** Tredimensjonale figurer viser forholdet mellom samlede bevegelser per besøk, hvor lenge besøkene varte og maksimumsverdien av CO<sub>2</sub>-utslagene i perioden fra 04.07. til 30.07. for både 2016 og 2017.



Maksimumsverdi av CO<sub>2</sub> som funksjon av totalpåvirkningen gir derfor et bilde på hvordan mennesker påvirker CO<sub>2</sub>-nivået ved hvor lenge de er inne og hvor mye de beveger seg, figur 4.5.15. Dermed er det mulig å studere det lineære forholdet mellom variablene. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen øker som følge av mye bevegelse under et besøk og lang varighet på besøket.

Regresjonslinjene for begge datasettene er statistisk signifikante med  $R^2 = 0.63$  ( $p < 0.001$  for a,  $p < 0.001$  for b) og  $R^2 = 0.77$  ( $p < 0.001$  for a,  $p < 0.001$  for b). Korrelasjonsanalyse gir positiv lineær korrelasjon med  $r = 0.79$  ( $p < 0.001$ ) og  $r = 0.88$  ( $p < 0.001$ ).

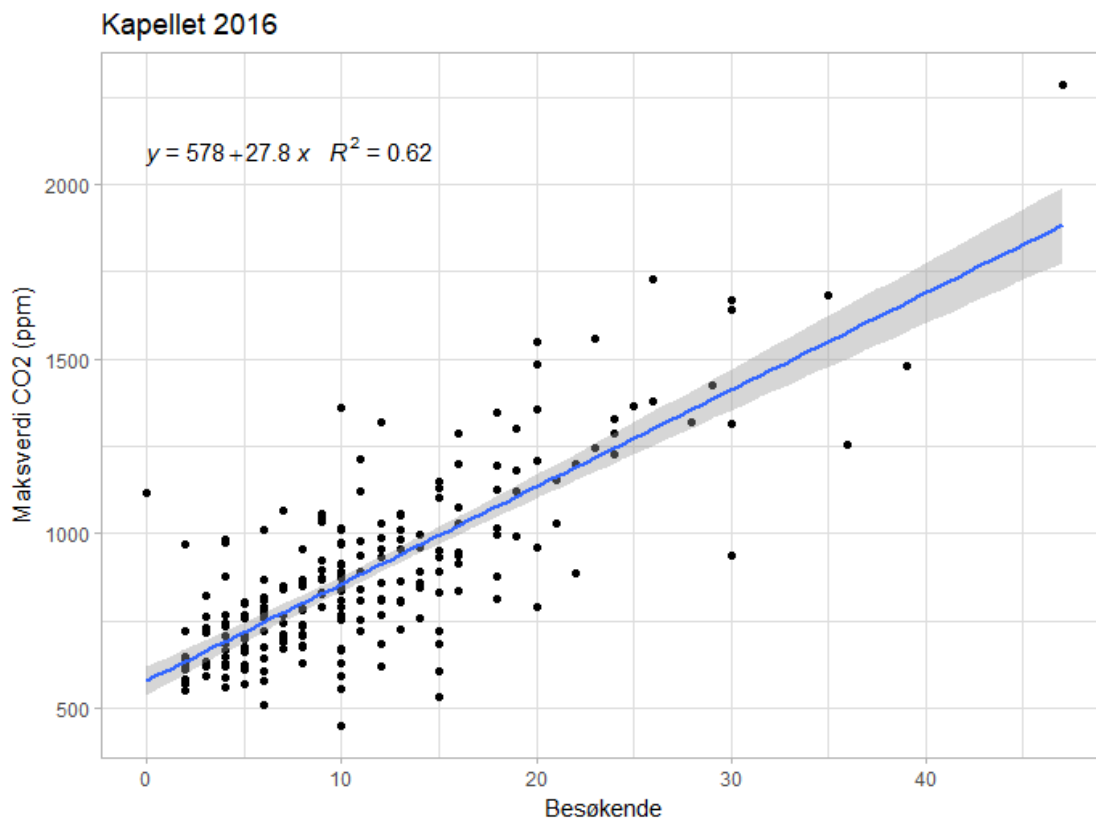
Forskjellene mellom stigningsgradientene er ikke veldig store og kan skyldes avvikere i datasettet fra 2016. I tillegg, har datasettet fra 2017 en del høyere maksverdier som kan være med på å trekke denne linjen litt lenger ned. Skjæringspunktene for de to regresjonslinjene er omtrentlig likt med 666 ppm og 663 ppm. Dette er høyere enn den beregnede modalverdien på 538 ppm. Siden denne modalverdien er beregnet fra nattverdiene, kan den antropogene påvirkningen føre til et noe høyere grunnnivå på dagtid og derfor kan disse skjæringspunktene stemme ganske godt overens med virkeligheten.



Figur 4.5.15: Maksverdi av CO<sub>2</sub> som funksjon av totalpåvirkningen for både 2016 og 2017.

#### 4.5.2.5 Maksimumsverdi CO<sub>2</sub> og antall besøkende

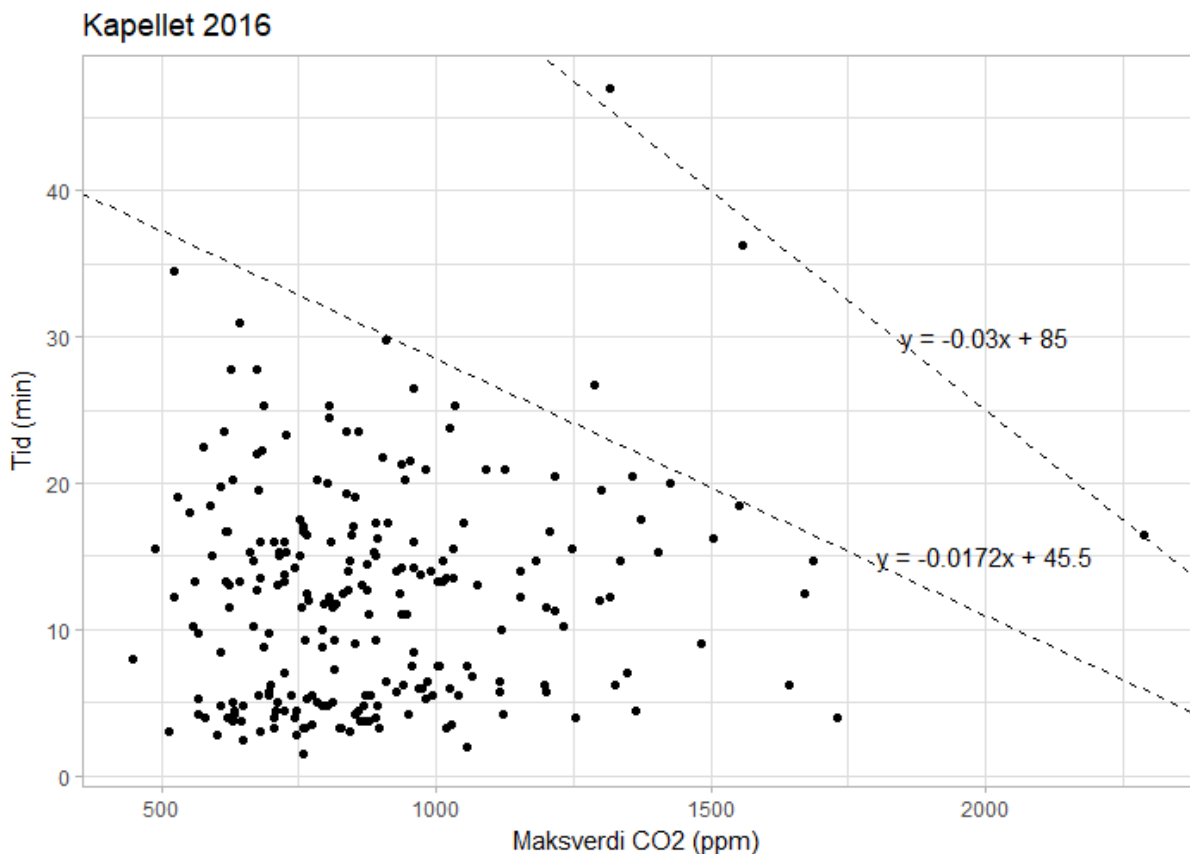
Fra tidligere delkapittel 4.5.2.4 undersøkes det hvilken påvirkning faktorer som antall bevegelser og varighet av turistbesøkene har på maksimumsverdien i CO<sub>2</sub>. I dette delkapittelet studeres det nøyere hvilken påvirkning antall besøkende har på CO<sub>2</sub>-toppene under turistbesøk, figur 4.5.16. Datasettet baserer seg på målinger fra 04.07.16 til 30.07.16. Dataene tyder på at jo høyere antall besøkende, desto høyere er maksimumsverdien i CO<sub>2</sub>. Tilpasningen av regresjonslinjen gir  $R^2=0.62$  ( $p<0.001$  for a,  $p<0.001$  for b), noe som indikerer en statistisk signifikant tilpasning. Stigningstallet til regresjonslinjen er gitt til  $27.8 \pm 1.5$  ppm per besøkende. Dersom det er 10 besøkende dreier dette seg om en økning på mellom 263 og 293 ppm fra grunnivået. Det er derimot stor variasjonsbredde i maksverdi CO<sub>2</sub> innenfor hvert enkelt antall besøkende. Variasjonsbredden i maksverdi CO<sub>2</sub> når det er 10 besøkende varierer mellom i underkant av 500 ppm til omtrentlig 1400 ppm. Korrelasjonen mellom variablene er  $r = 0.79$  ( $p<0.001$ ). Maksimumsverdien i CO<sub>2</sub> ved 0 besøkende er 578 ppm, noe som er høyere enn modalverdien på 495 ppm for turistsesongen som er gitt i avsnitt 4.5.2.1. Dette skjæringspunktet er også noe høyere enn modalverdien for hele måleperioden på 538 ppm. Dette avviket kan komme som følge av at dette datasettet har dagverdier, mens modalverdien er basert på nattverdier over to måneder.



**Figur 4.5.16:** Maksverdien av CO<sub>2</sub> som funksjon av antall besøkende. Datasettet baserer seg på data fra 04.07.16 til 30.07.16. Antall besøkende er en diskret variabel og derfor oppstår det striper i diagrammet.

#### 4.5.2.6 Når endres halveringstidene?

Tiden mellom maksimumsverdi i CO<sub>2</sub> til halveringstiden endrer seg, kan defineres som et knekkpunkt i regenereringen etter et turistbesøk. Datasettet baserer seg på målinger fra 04.07.16 til 30.07.16. Figur 4.5.17 viser at jo høyere CO<sub>2</sub>-konsentrasjon, desto kortere tid tar det før det log-lineære forløpet knekker, og halveringstiden derfor endrer seg. De lavere CO<sub>2</sub>-toppene har en større variasjonsbredde i tid enn de høyere CO<sub>2</sub>-toppene. Når halveringstiden overstiger 20 min er en av grunnene til dette at halveringstiden ikke endrer seg over tid (altså at stigningstallet ikke endrer seg) og det tar gjerne en stund før den knekker over til grunnivået, regnet som en halveringstid på mer enn 3 timer. Den øvre stiplede linjen representerer ekstremitetene, mens den nedre linjen representerer grensen for hoveddelen av knekkpunktene. Y-interseptet til slike linjer kan være noe misvisende siden et CO<sub>2</sub>-nivå på omtrentlig 500 ppm blir sett på som grunnivået, og ikke 0 ppm. Fra figuren er det klart at hoveddelen av tiden til knekkpunkt holder seg mellom 3 og 20 min, uavhengig av om maksimumsverdien til CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er 600 ppm eller 1200 ppm.



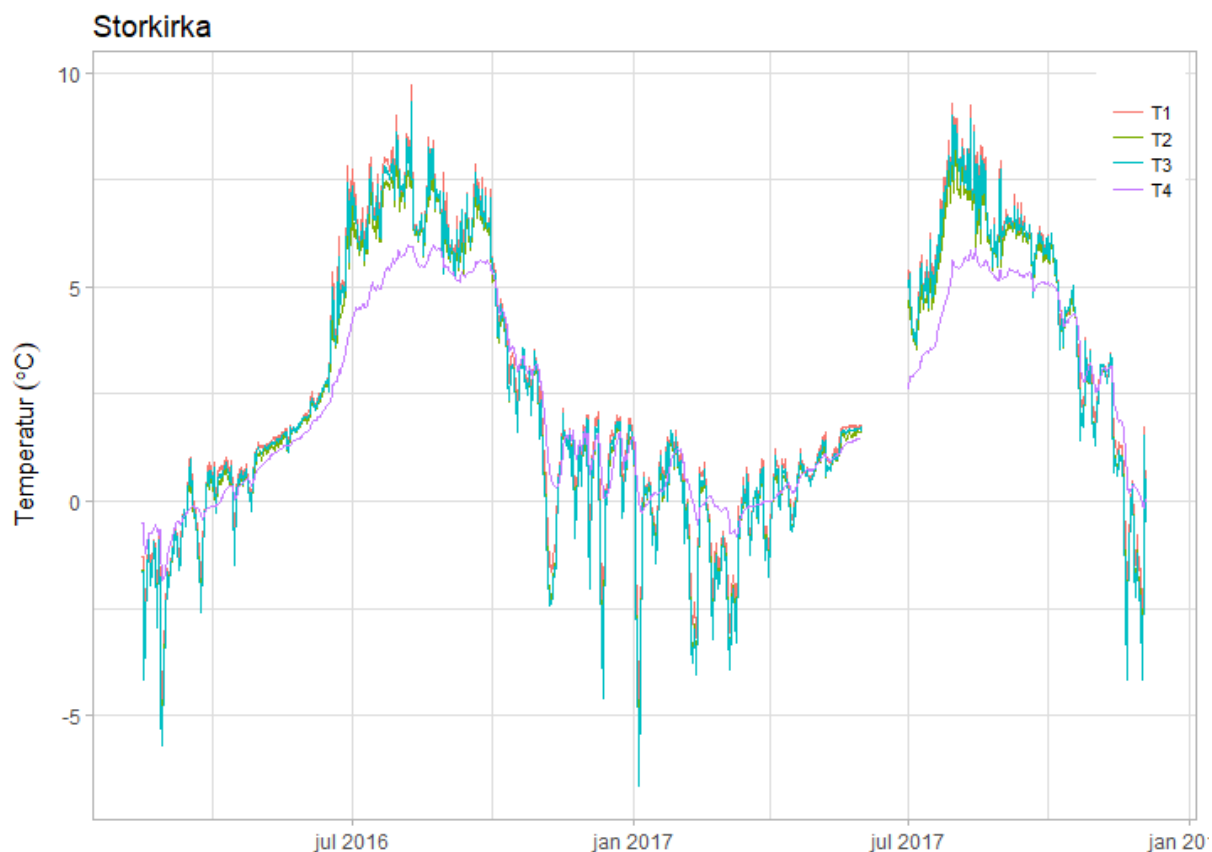
**Figur 4.5.17:** Figuren viser hvor lang tid etter en CO<sub>2</sub>-topp før halveringstiden endrer seg; altså et knekkpunkt i regenereringen. Data fra 04.07.16 til 30.07.16.

## 4.6 Temperatur

### 4.6.1 Storkirka

#### 4.6.1.1 Sesongtrend

Figur 4.6.1 viser filtrerte nattverdier for temperatursensorene ved Storkirka. T1-T3 er ganske like, men varierer noe i maksimums- og minimumsverdi. På vinteren reagerer lufttemperaturen på kuldehendelser på terrengoverflaten. T4 er mer stabil og oppnår ikke de samme maksimums- og minimumsverdier som for luftsensorene. Middelverdi, standardavvik og maksimums- og minimumsverdier basert på disse nattverdiene er gitt i tabell 4.6.1. Samlet tyder dette på at lufttemperaturen ved Storkirka, upåvirket av mennesker, er ganske lik årsmiddeltemperaturen utendørs. Utetemperaturen varierer mellom minimumstemperatur  $-21.9^{\circ}\text{C}$  på vinteren og maksimumstemperatur  $20.1^{\circ}\text{C}$  på sommeren, men middelverdien på  $1.62^{\circ}\text{C}$  avviker fra den oppgitte årsmiddeltemperaturen på  $2.5^{\circ}\text{C}$ . Dette er fordi disse beregnede verdiene er basert på nattverdier.

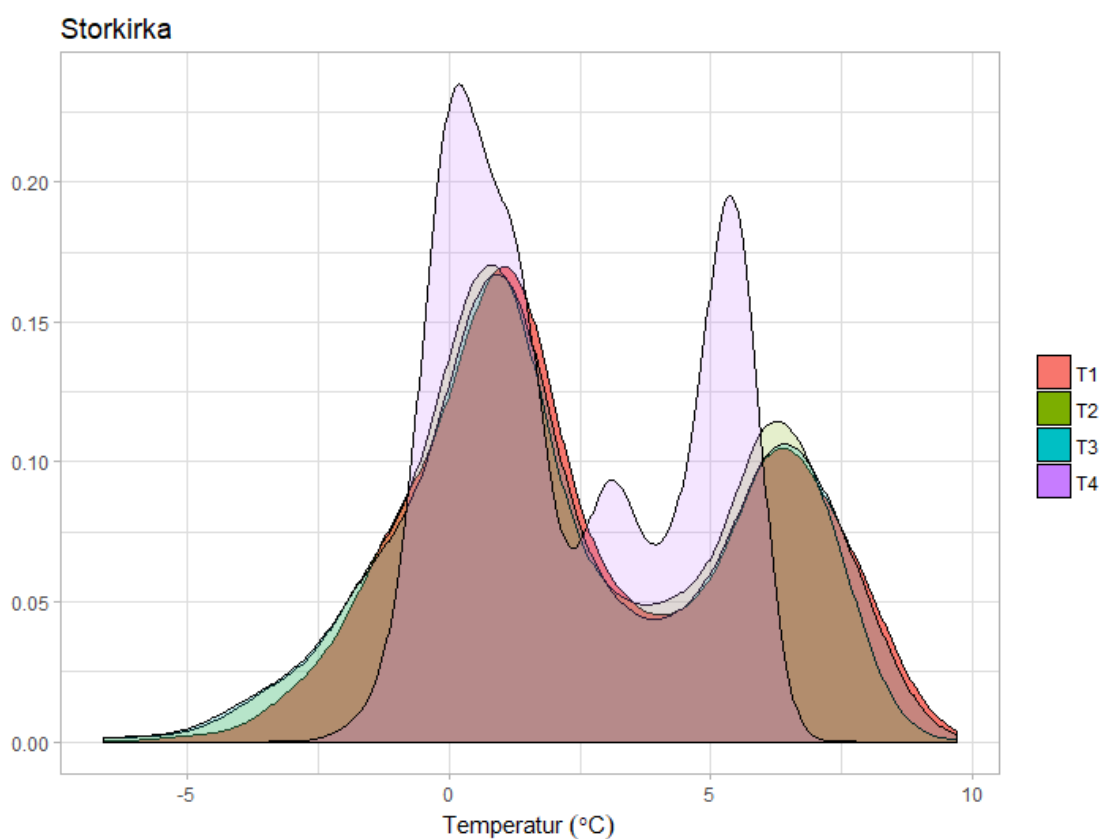


Figur 4.6.1: Nattverdier av temperatursensorene (T1-T4) ved Storkirka over hele måleperioden.

**Tabell 4.6.1:** Oversikt over middelværdi, standardavvik, maksimums- og minimumsverdier og variasjonsbredden basert på nattverdiene fra Storkirka og Grønlia.

	Middelværdi	Standardavvik	Maksimum	Minimum	Variasjonsbredde
T1	2.68	3.12	9.7	-5.19	14.886
T2	2.40	3.10	9.01	-6.43	15.444
T3	2.50	3.22	9.33	-6.62	15.953
T4	2.31	2.22	5.98	-1.83	7.815
Grønlia	1.62	6.96	20.1	-21.9	42

Middelværdi for temperatur er derimot ikke et like godt mål for å beskrive parameteren, da alle luftsensorene (T1, T2, T3) har en bimodal fordeling, se figur 4.6.2. Målinger fra T4 viser derimot en trimodal fordeling. Det er valgt å bruke en oppløsning på 1°C for fordelingen ved denne stasjonen. Dette er fordi variasjonsbredden er på nesten 16 °C for T3.



**Figur 4.6.2:** Tetthetskurve for nattverdier av temperatursensorene (T1-T4). T1-T3 viser bimodal fordeling, T4 viser trimodal fordeling.

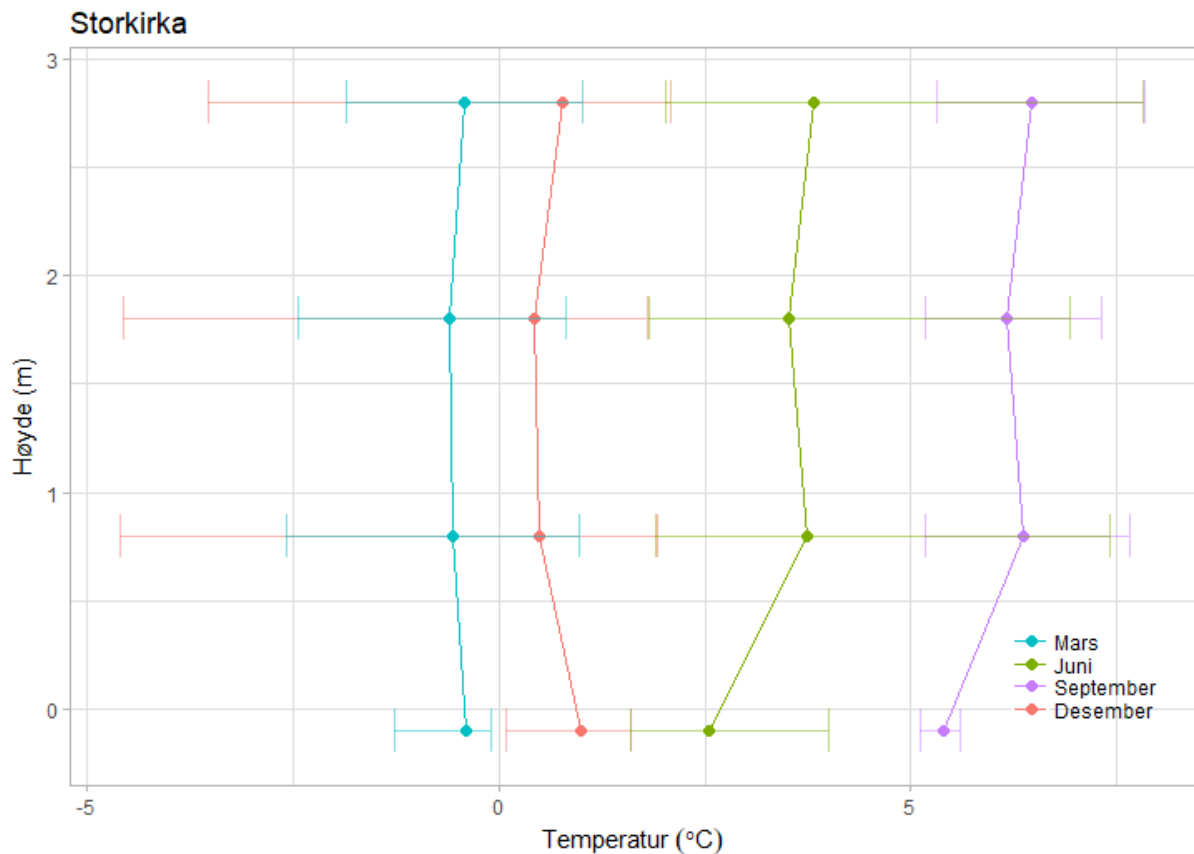
Oppsummert har alle de tre øverste sensorene modalverdier på 1°C og 6 °C, mens T4 har modalverdier på 0°C, 3°C og 5°C, tabell 4.6.2. Disse modalverdiene tilsvarer to sesonger; vinter og sommer. I vintersesongen og i overgangen mellom vår- og høstsesongene er det gjerne store fluktuasjoner rundt 1°C. Modalverdi på 6°C kommer av høye temperaturer mellom juli-september hvert år. Toppen på 3°C for T4 kan være et spor av vår- og høstsesongen, og siden denne sensoren ligger i bakken er temperatursvingningene noe forsinket i forhold til for luftsensorene. Nattverdier av utetemperaturen indikerer også en bimodal fordeling, vedlegg 8.

*Tabell 4.6.2: Oversikt over modalverdier for målingene fra de fire temperatursensorene i Storkirka.*

Sensor	Modalverdier (°C)		
T1 – Tak	1	-	6
T2 – 1.8 m	1	-	6
T3 – 0.8 m	1	-	6
T4 – Bakke	0	3	5

#### 4.6.1.2 Stratifisering i tverrsnitt

Temperaturstratifiseringen er basert på gjennomsnittstemperaturen av nattverdiene ved hver sensor i plasseringshøyden, figur 4.6.3. Forholdet mellom sensorene i luft viser ikke stor forskjell mellom sesongene, men forholdet mellom de tre luftsensorene og den i bakken, utgjør hovedforskjellen. Temperaturen i bakken holder seg relativt stabil over hele året. For de utvalgte månedene har T3 litt høyere gjennomsnitt enn T2. Dette er spesielt synlig i sommermånedene, noe som relativt sett betyr at T1 og T3 er «varm» og T2 og T4 er «kald». For stratifiseringen er det bare brukt målinger for 2016, siden målinger fra juni og desember 2017 er ganske ufullstendige. Maksimums- og minimumsverdiene gitt i tabell 4.6.1 for hver sensor kan avvike noe i forhold til maksimums- og minimumsverdier i figur 4.6.3, da figuren baserer seg utelukkende på nattverdier innenfor den gitte måneden. Feillinjene illustrerer maksimums- og minimumstemperatur av nattverdiene. En grunn til store overlapp i disse feilfeltene er for eksempel økning i temperatur i juni som trekker maksverdiene opp, og i desember er det kuldehendelser som trekker minimumsverdiene ned.

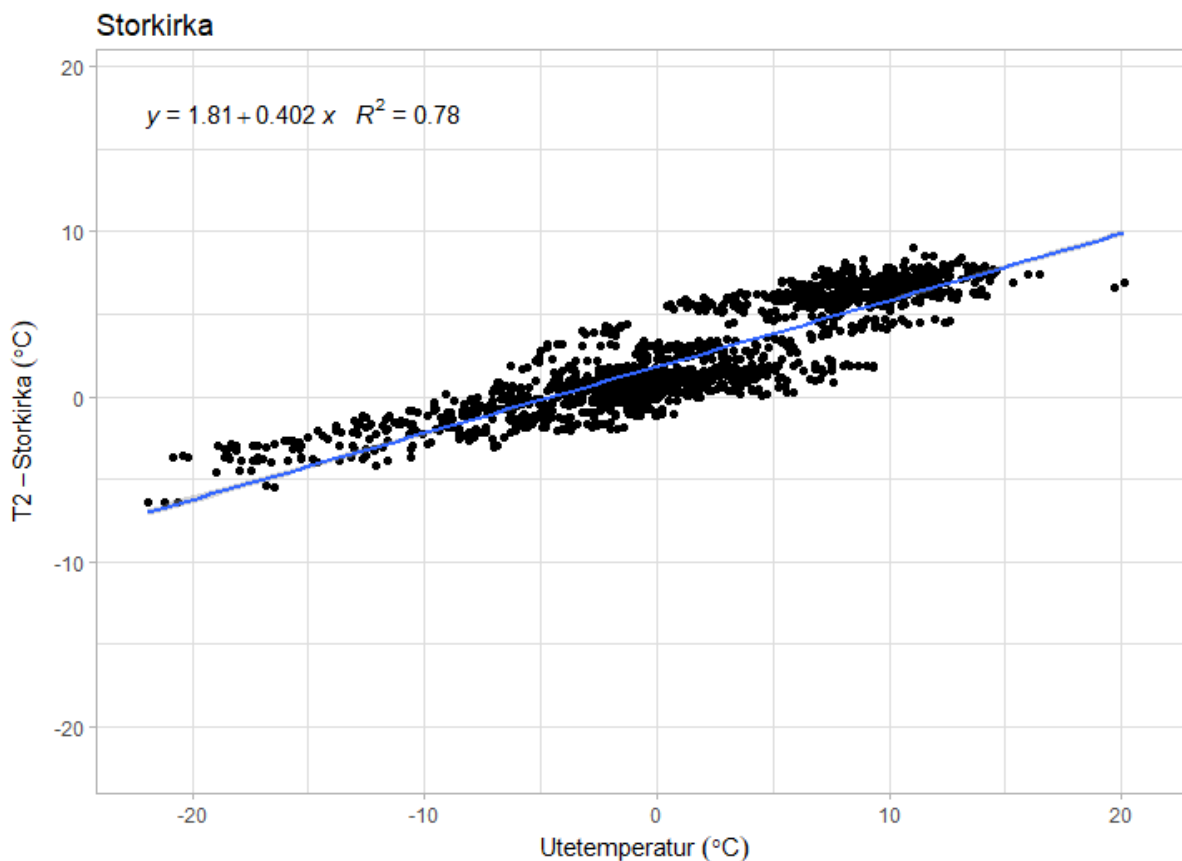


**Figur 4.6.3:** Temperaturstratifiseringen i tverrsnittet ved Storkirka for tilfeldig utvalgte måneder. Punktene viser gjennomsnittstemperaturen målt i høyden til sensorene. De horisontale feillinjene viser maksimums- og minimumstemperatur.

### 4.6.1.3 Temperaturkorrelasjon

#### Regresjon

For å undersøke hva som er drivkreftene bak sesongendringene i grottetemperaturen kan vi se nærmere på grottetemperaturen som en funksjon av utetemperaturen, figur 4.6.4. Korrelasjonen mellom variablene er gitt til  $r=0.88$  ( $p<0.001$ ), noe som indikerer en sterk positiv korrelasjon. Datasettet baserer seg på nattverdier fra 15.02.16 til 04.12.17.



**Figur 4.6.4:** Temperatur ( $T_2$ ) ved Storkirka som funksjon av utetemperaturen.

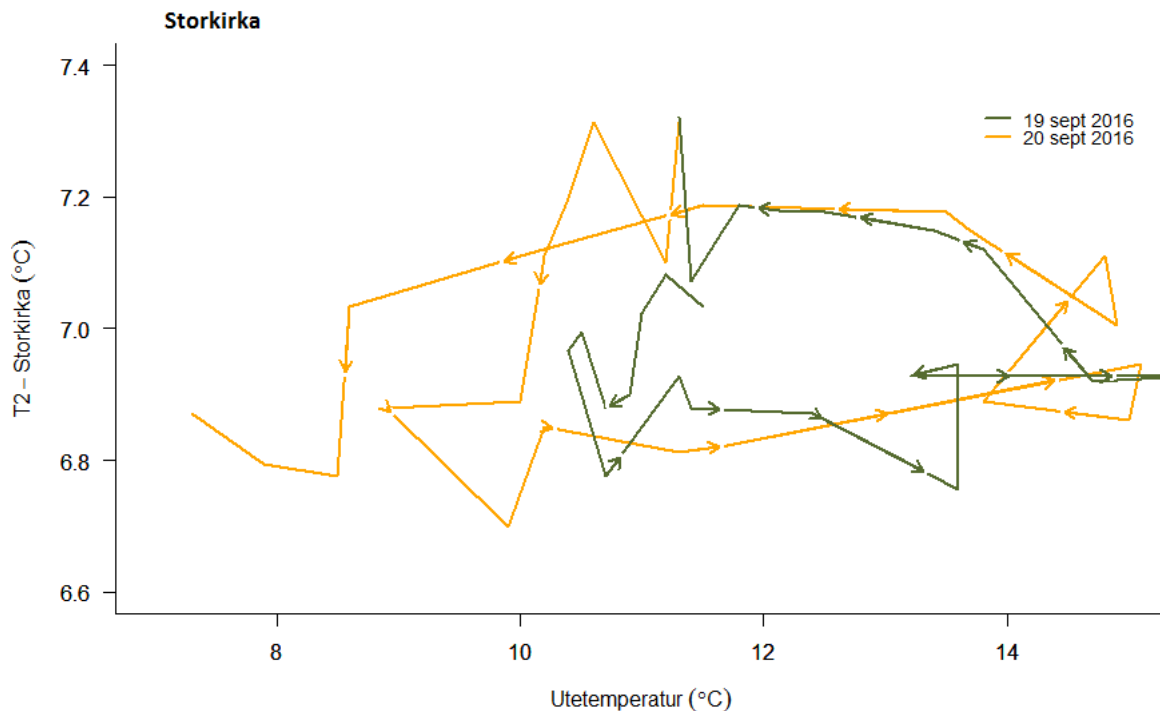
Her er en blå regresjonslinje tilpasset punktene i figur 4.6.4 som gir  $R^2=0.78$  ( $p<0.001$  for a,  $p<0.001$  for b), noe som indikerer en middels god tilpasning. Ved å undersøke forholdet mellom  $T_2 - \text{Storkirka}$  og utetemperaturen nærmere er det mulig å forstå hvorfor denne verdien og korrelasjonskoeffisienten ikke er så bra som ønsket. I dette tilfellet er konfidensbåndene så smalt at det knapt er synlig. Smale konfidensbånd kan tyde på flere ting, som blant annet liten variasjon i dataene eller store utvalg. Her er det nok den store datamengden som minsker konfidensbåndet. Tilpasning av regresjonslinjer til data fra de øvrige temperatursensorene er gitt i vedlegg 9A.

#### *Hystereseeffekter i temperaturforløpet*

I dette tilfellet er det en positiv lineær korrelasjon ( $r=0.88$ ), men hystereseeffekt kan forårsake lavere korrelasjon enn 1, figur 4.6.5. I denne figuren er det valgt å bruke timedata fra 19.09-20.09 i 2016 for å undersøke forholdet mellom temperaturene på daglig basis. Hystereseeffekten viser at temperaturen inne i grotta er noe forsinket i forhold til utetemperaturen. For å illustrere hystereseeffekten på henholdsvis vår og høst, er 03.04-04.04 i



2016 gitt i vedlegg 10A. Disse dagene er et tilfeldig utvalg av dager uten besøkende, og forholdsvis langt unna turistsesongen slik at fluktuasjoner fra denne ikke påvirker målingene. I begge tilfellene er det valgt å bruke målinger fra T2, da forløpet for de tre øverste sensorene er omtrentlig likt og kun varierer i temperaturrekkevidde.



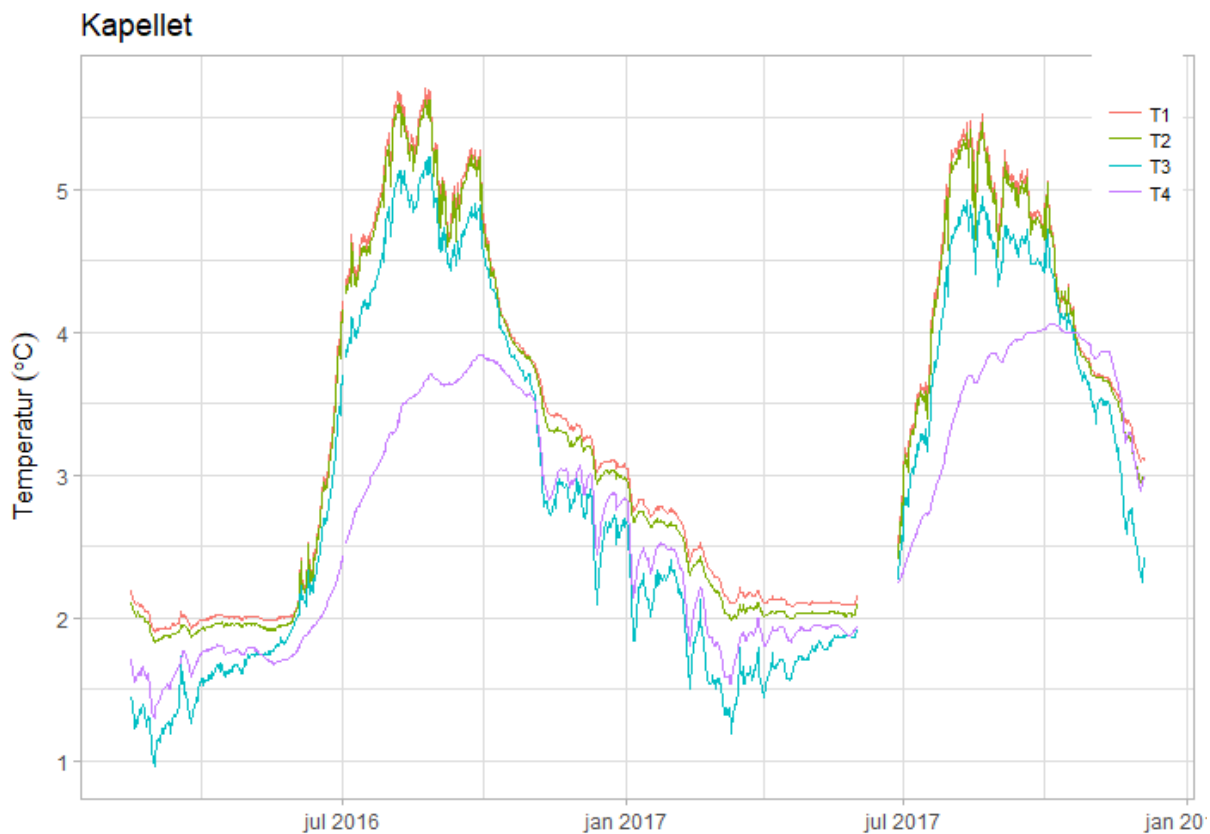
**Figur 4.6.5:** Forholdet mellom variablene viser en hystereseeffekt. Når temperaturen på terrengoverflaten er høyest er ikke nødvendigvis temperaturen ved Storkirka det samme. Når temperaturen inne i grotta er på sitt høyeste, er ikke utetemperaturen på sitt høyeste. Dette betyr at det er en forsinkelse mellom systemene. Pilene viser retningen på endring i temperatur.

For å finne ut av hvor stor forsinkelsen i grottetemperaturen er, brukes de største kuldehendelsene mellom september 2016 og mars 2017. Dette gir klare utslag i lufttemperaturen ved Storkirka som er mulig å sammenligne med utetemperaturen. Forsinkelsen over de syv største kuldehendelsene er mellom 0-5t, og det er ikke noe klar sammenheng mellom hvor lavt temperaturen synker og hvor lang forsinkelsen mellom temperaturen er, vedlegg 11. Statistisk sett er dette et altfor lavt representativt utvalg å trekke slutninger fra.

## 4.6.2 Kappellet

### 4.6.2.1 Sesongtrend

Nattverdier av temperaturen ved Kappellet er gitt i figur 4.6.6. Temperaturen for alle sensorene i luften har sitt minimum i mars, men temperaturen holder seg stabilt lav gjennom april og mai. Maksimumsperioden er i august, men temperaturen er over 4.5°C gjennom store deler av september. Data fra T4 oppfører seg litt annerledes ved at maksimum er i overgangen mellom september-oktober, men med samme minimum som luftsensorene. Dette betyr at maksimum i bakken er noe forsinket i forhold til luften. Dette stemmer overens med at bakken har høyere varmekapasitet enn luft. Generelt for alle sensorene holder temperaturen det laveste nivået i perioden mars-mai og det høyeste juli-september.



**Figur 4.6.6:** Nattverdier av temperatursensorer (T1-T4) ved Kappellet.

T3 og T4 reagerer mer enn de øvre temperatursensorene (T1 og T2) mellom oktober 2016 og mars 2017 (på vinteren). En mulig grunn til dette kan være påvirkning av sigevann fra *Lille åpning* eller en eventuell temperaturstratifisering i tverrsnittet på passasjen, som følge av liten luft sirkulasjon.

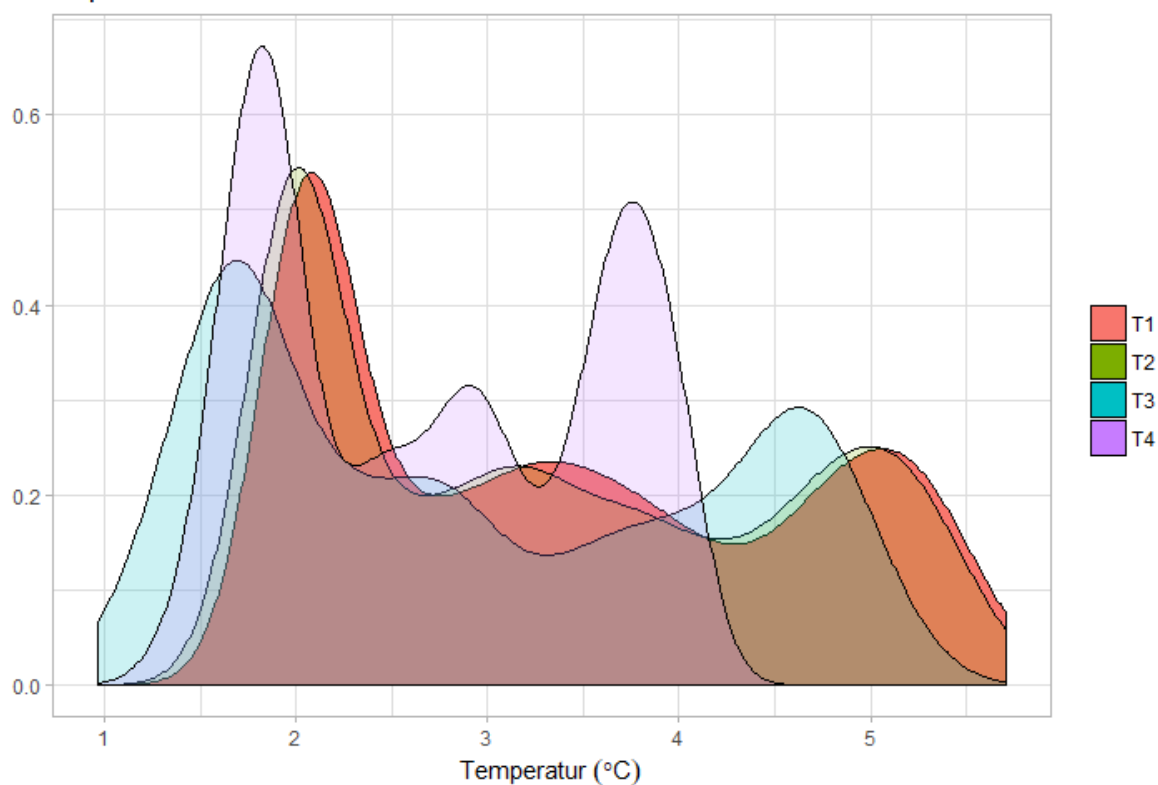
Ved Kapellet er middelverdiene for alle sensorene høyere enn årsmiddeltemperaturen ute på 2.5°C, se tabell 4.6.3. Det indikerer at Kapellet i svært liten grad er påvirket av temperaturen utendørs.

**Tabell 4.6.3:** Oversikt over middelverdi, standardavvik, maksimums- og minimumstemperatur og variasjonsbredde for nattverdiene ved Kapellet, samt data fra utetemperaturen ved Grønlia.

	Middelverdi	Standardavvik	Maksimum	Minimum	Variasjonsbredde
T1	3.37	1.21	5.71	1.90	3.81
T2	3.31	1.22	5.63	1.82	3.81
T3	2.95	1.25	5.23	0.96	4.27
T4	2.72	0.85	4.06	1.29	2.77
Grønlia	1.62	6.96	20.1	-21.9	42

Ved hjelp av en tetthetskurve ser man tendensen til en trimodal fordeling på temperaturen i Kapellet, figur 4.6.7. Dermed har ikke middelverdi eller standardavvik noe mening og forteller lite om datasettet. Modalverdiene for denne stasjonen er valgt å ha en noe skarpere oppløsning på 0.25°C enn for modalverdiene ved Storkirka som hadde 1°C. Dette er fordi variasjonsbredden på det meste er i overkant av 4°C for den ene sensoren. Man mister dermed mye av signalet dersom modalverdiene skal gjelde for hele grader.

## Kapellet



**Figur 4.6.7:** Tetthetskurve av nattverdier av temperaturen fra Kapellet. Temperaturene ved denne stasjonen viser en trimodal fordeling.

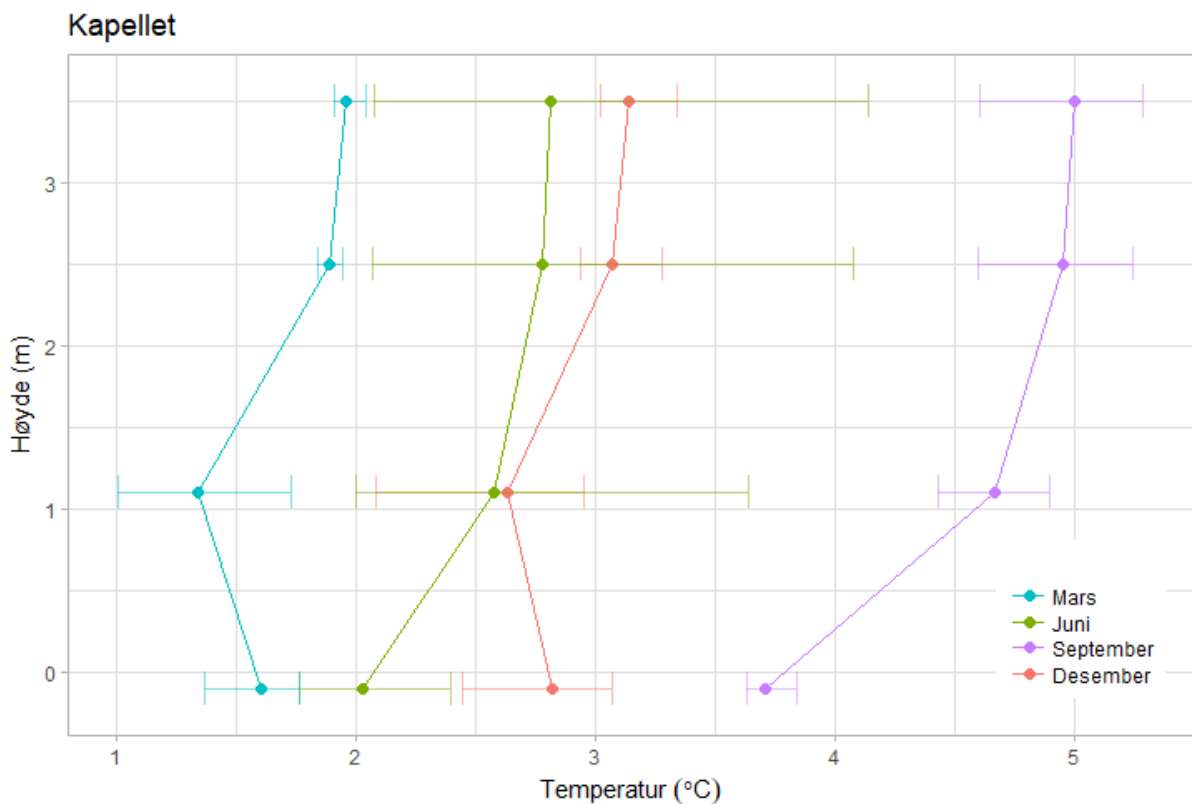
Oppsummering av modalverdiene er gitt i tabell 4.6.4. Grunnen til den midtre modalverdien på 3-3.5°C kan være den gradvise nedgangen av temperaturen mellom september 2016 og mars 2017. Modalverdiene på 1.75-2°C og 4.5-5°C kommer henholdsvis fra periodene mars-mai og juli-september. Siden det kun foreligger en komplett måling mellom september-mars er det vanskelig å si om denne trimodale fordelingen opptrer hvert år, eller om dette var tilfeldig for denne vinteren.

**Tabell 4.6.4:** Oversikt over modalverdier fra de ulike temperatursensorene (T1-T4) i Kapellet.

Sensor	Modalverdier (°C)		
T1 – Tak	2	3.5	5
T2 – 2.5 m	2	3.25	5
T3 – 1.1 m	1.75	2.75	4.75
T4 - Bakke	1.75	3	3.75

#### 4.6.2.2 Stratifisering i tverrsnitt

Temperaturstratifiseringen i tverrsnittet er basert på gjennomsnittstemperaturen av nattverdiene ved hver sensor, figur 4.6.8. Feillinjene indikerer maksimum- og minimumstemperatur av nattverdiene, der middelverdiene er markert med punkter. Forholdet mellom sensorene i luft viser ikke stor forskjell mellom sesongene, men forholdet mellom de tre luftsensorene og den i bakken, utgjør hovedforskjellen. Temperaturen i bakken holder seg relativt stabil over hele året. Trenden ved denne stasjonen er at temperaturen øker oppover i tverrsnittet, noe som kalles en inversjon. For sensorene i lufta gjelder dette uansett hvilken sesong det er. Forholdet mellom luftsensorene og bakkesensoren er derimot litt forskjellig etter sesong. Siden luften varmes lettere opp enn bakken om sommeren vil T4 ha den laveste middelverdien. Om vinteren vil derimot T4 ikke oppnå et like stort varmetap som luftsensorene, og spesielt sensoren som er plassert lavest, nemlig T3. Det fører til at T3 har lavere middelverdi enn bakketemperaturen på vinteren. I tillegg ser man at sommermånedene juni har et større spenn mellom minimums- til maksimumstemperatur enn de tre resterende månedene. En grunn til dette kan være den bratte økningen i temperatur i løpet av måneden som modifierer dette resultatet. Dette er kun basert på målinger fra 2016, siden noen av disse månedene for 2017 var ufullstendige.

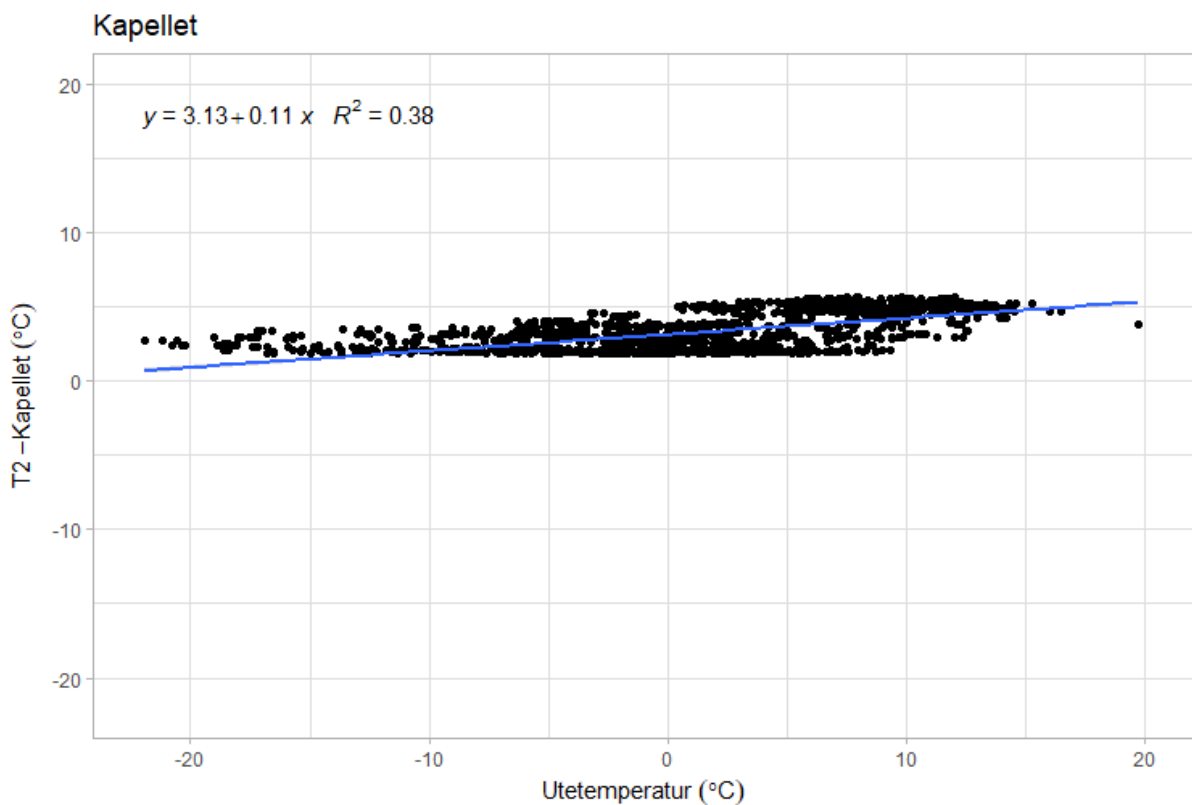


**Figur 4.6.8:** Temperaturstratifisering ved Kapellet. Punktene er middelverdier av nattverdiene innenfor de gitte månedene. De horisontale feillinjene er maksimums- og minimumsverdier.

### 4.6.2.3 Temperaturkorrelasjon

#### Regresjon

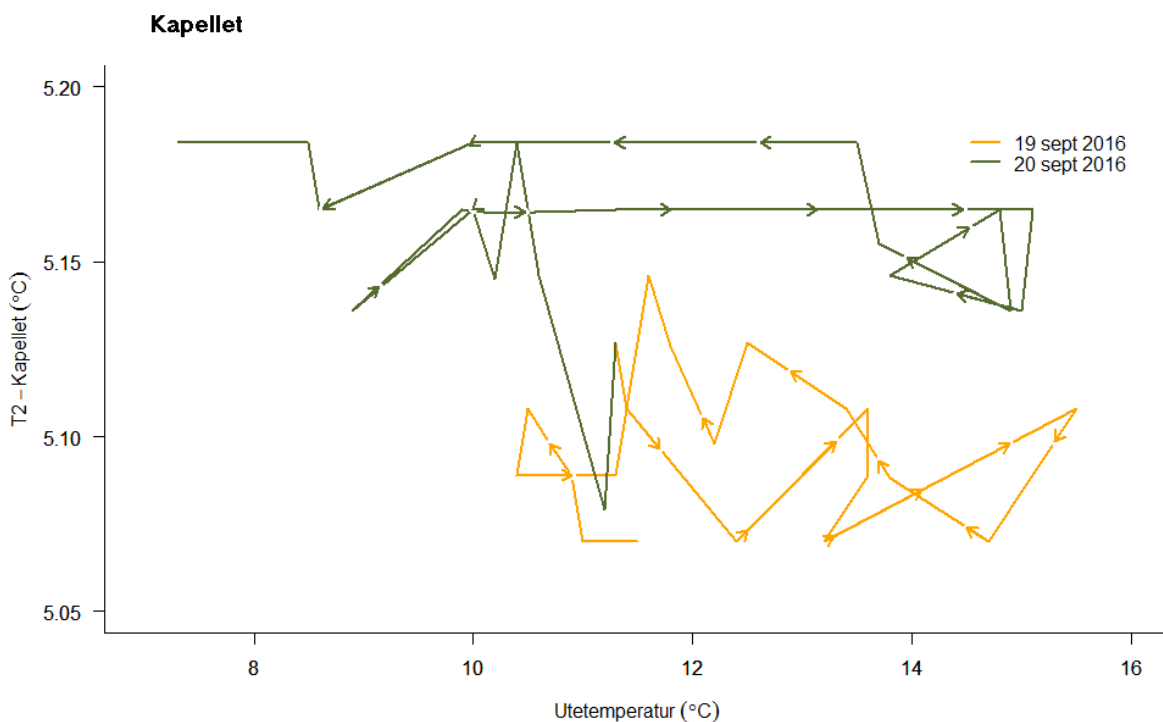
På samme måte som for Storkirka blir forholdet mellom utetemperatur og grottetemperatur undersøkt ved Kapellet, figur 4.6.9. Det er også i dette tilfellet valgt å bruke nattverdiene av T2 mellom 15.02.16 til 04.12.17. Stigningstallet for regresjonslinjen er på 0.1, noe som betyr at når utetemperaturen stiger 1°C, stiger temperaturen i Kapellet med 0.1°C. Dette støtter opp under utgangspunktet om at Kapellet i liten grad reagerer på temperaturendringene utendørs. Dette forklarer også hvorfor regresjonslinjen gir en tilpasning med  $R^2 = 0.38$  ( $p < 0.001$  for a og b). Korrelasjonsanalyse gir en positiv lineær korrelasjon med  $r = 0.61$  ( $p < 0.001$ ). De smale konfidensbåndene kommer som følge av liten variasjon i data og/eller stor datamengde. Tilpasning av regresjonslinjer til målinger fra de øvrige temperatursensorene er gitt i vedlegg 9B.



Figur 4.6.9: Regresjon av forholdet mellom temperaturen inne i grotta ved Kapellet og utetemperaturen.

### Hystereseeffekter i temperaturforløpet

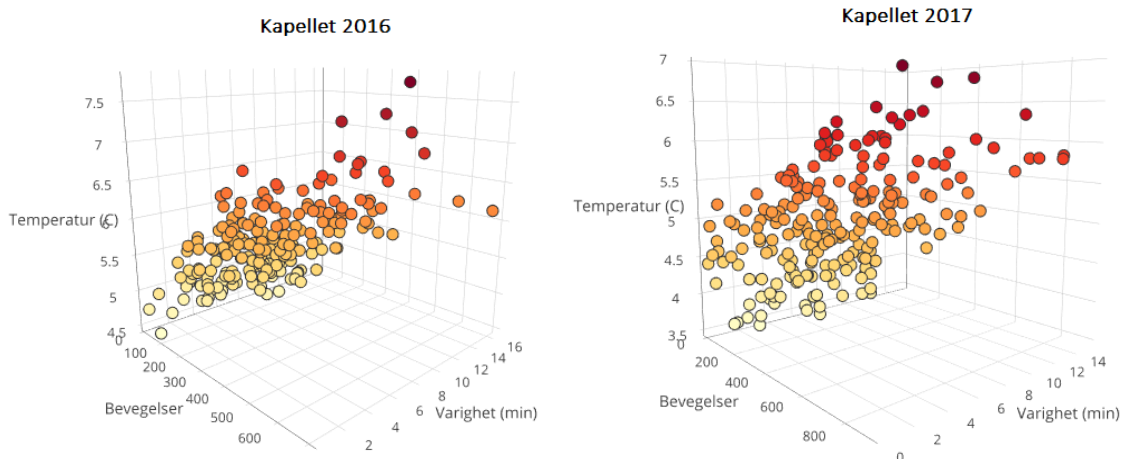
For å undersøke den dårlige tilpasningen av den lineære regresjonslinjen og en korrelasjon på  $r=0.61$  kan man se etter hystereseeffekt også på denne stasjonen. Hystereseeffekten for Kapellet er vist i figur 4.6.10. For data ved Kapellet er det brukt timedata fra samme dager som i avsnitt 4.6.1.3. Her er det viktig å merke seg at y-aksen for figur 4.6.10 og figur 4.6.5 i avsnitt 4.6.1.3 er ganske forskjellige, som gjør at ved sammenligning vil hystereseeffekten for Kapellet se ganske flat ut. 03.04-04.04 i 2016 er gitt i vedlegg 10B. I Kapellet holder temperaturen et mye mer stabilt nivå på dager uten besøk med variasjon på omtrentlig  $0.1^{\circ}\text{C}$ , noe som fører til at en temperatursammenligning kan få et ganske horisontalt forløp. Dette gjør at korrelasjonskoeffisienten for lineær korrelasjon gir en moderat verdi, samt at regresjonslinjen ikke oppnår en god tilpasning. Dette støtter funnet om at stasjonen i Kapellet i liten grad er påvirket av utetemperaturen.



**Figur 4.6.10:** Hystereseeffekten ved Kapellet. Når utetemperaturen er på sitt høyeste er ikke nødvendigvis temperaturen i grotta på sitt høyeste. Denne stasjonen viser derimot noen brå endringer, men maksimum variasjon over en dag er på omtrentlig  $0.1^{\circ}\text{C}$ . Pilene indikerer temperaturendringene mellom variablene.

#### 4.6.2.4 Maksverdi av temperatur og totalpåvirkning

Totalpåvirkningen er som nevnt tidligere produktet av varigheten av et turistbesøk og integralet av antallet bevegelser i det samme besøket. I dette delkapittelet undersøkes det hvilken rolle disse faktorene spiller for maksverdien av temperaturen. Det blir for mye informasjon dersom alle tre luftsensorene skal visualiseres i en figur, derfor er målinger fra T2 valgt ut som eksempel. Figur 4.6.11 viser at det er forskjeller mellom datasettene for 2016 og 2017. Den tredimensjonale figuren for 2016 viser at høy maksverdi av temperatur opptrer som en kombinasjon av lang varighet og høyt antall bevegelser. Datasettet for 2017 viser derimot en større spredning i datapunktene, slik at de høye maksverdiene også opptrer som følge av kortere varighet på besøket og mindre antall bevegelser. Den lyse fargen indikerer lav makstemperatur under besøket, og jo mer rød fargen blir desto høyere er makstemperatur. Datasettene baserer seg på data innsamlet mellom 04.07 – 30.07 for 2016 og 2017.



**Figur 4.6.11:** Tredimensjonale figurer som viser forholdet mellom maksverdi av temperatur, antall bevegelser og varighet på turistbesøk i Kapellet 2016 og 2017. Datasettene baserer seg på tidsperioden 04.07-30.07. Lys gul farge indikerer lav temperatur, rød farge indikerer høy temperatur.

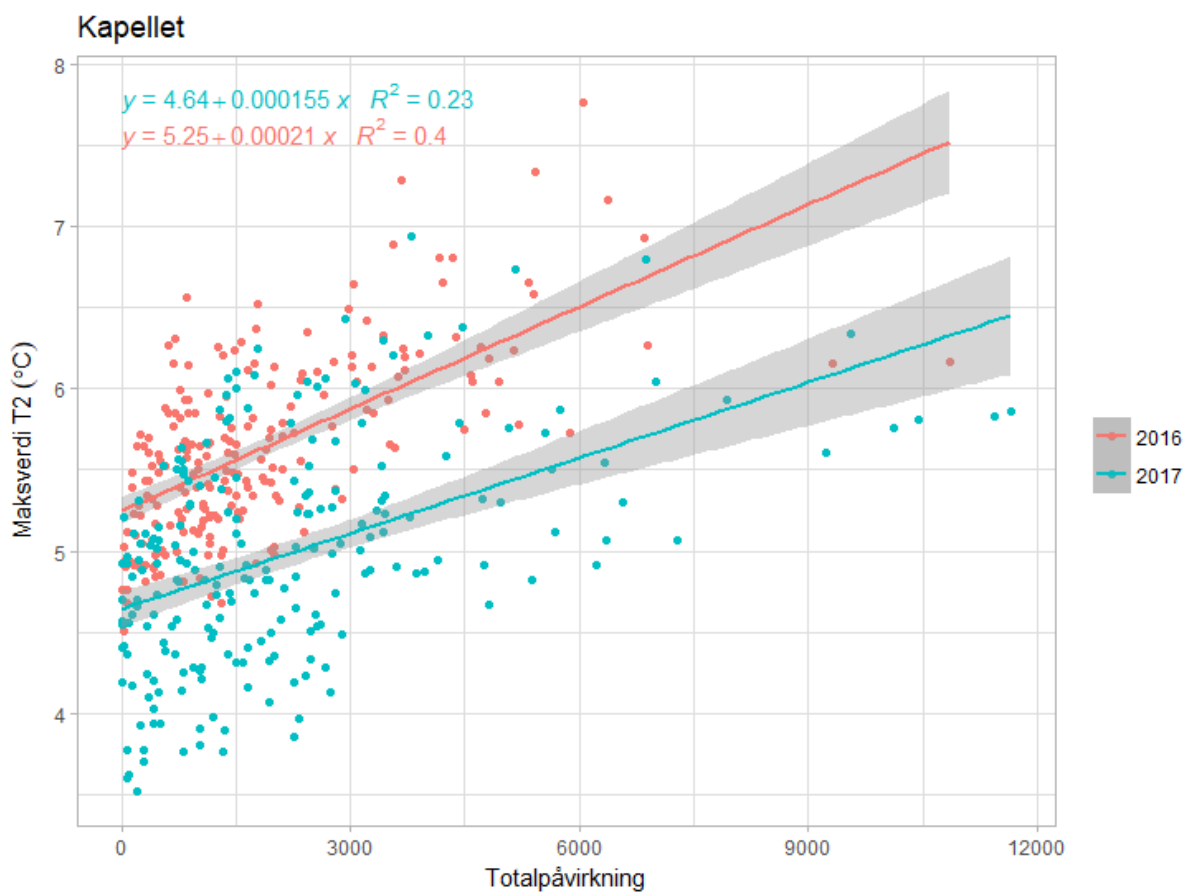
Det lineære forholdet mellom datasettene er gitt i figur 4.6.12. Tilpasningen av en regresjonslinje til datasettet for 2016 gir  $R^2=0.40$  ( $p<0.001$  for a,  $p<0.001$  for b). Korrelasjonsanalyse gir positiv lineær korrelasjon med  $r=0.64$  ( $p<0.001$ ).

Regresjonslinjen for datasettet fra 2017 gir derimot en noe dårligere tilpasning med  $R^2=0.23$  ( $p<0.001$  for a,  $p<0.001$  for b). Korrelasjonsanalyse gir en moderat positiv



korrelasjonskoeffisient på  $r=0.48$  ( $p<0.001$ ). Punktene i dette datasettet har stor spredning, noe som påvirker både tilpasningen av regresjonslinjen og korrelasjonskoeffisienten.

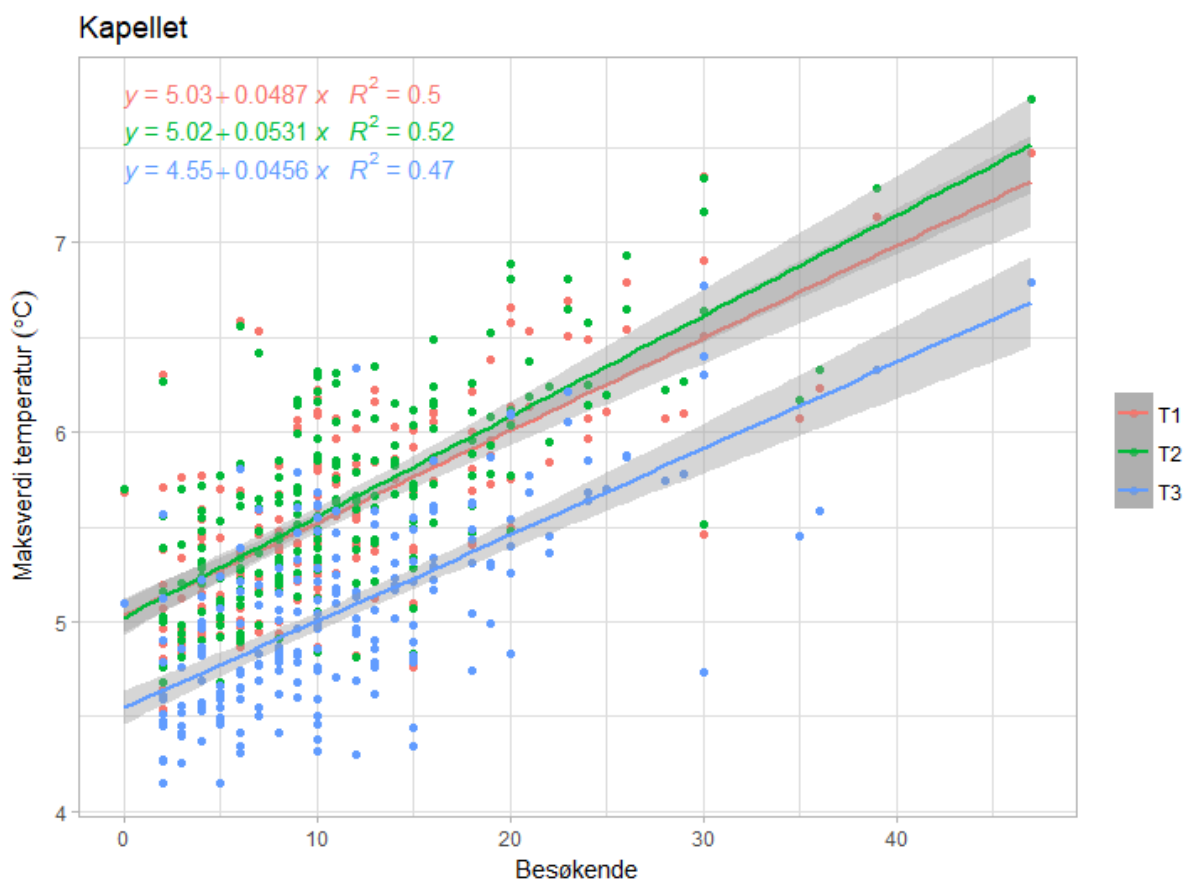
Skjæringspunktet for begge datasettene er noe ulike med  $5.25^{\circ}\text{C}$  og  $4.64^{\circ}\text{C}$ . Dette betyr at skjæringspunktene er enten høyere eller lavere enn modalverdien på  $5^{\circ}\text{C}$  for sensoren. Fordelingen av punktene i datasettene kan påvirke skjæringspunktene til å være så forskjellige. Selve stigningstallet for regresjonslinjene er ikke så ulike, noe som tyder på at maksverdien av temperatur øker når totalpåvirkningen blir større.



Figur 4.6.12: Maksverdi av temperatur og totalpåvirkningen for T2 i Kapellet 2016 og 2017.

#### 4.6.2.5 Maksverdi av temperatur og antall besøkende

Figur 4.3.2 og i vedlegg 4B viser at temperaturen reagerer under turistbesøk. Ved å undersøke forholdet mellom maksverdi av temperatur og antall besøkende kan vi få et bilde på hvor mye varme et menneske tilfører grotteluften. Datasettene baserer seg på målinger mellom 04.07.16 og 30.07.16. Forholdet mellom maksverdi av temperatur og antall besøkende tyder på at jo høyere antall besøkende ved stasjonen, desto høyere er maksverdien av temperaturen målt under besøket, figur 4.6.13. Tilpasningen av regresjonslinjene er  $R^2 = 0.50$ ,  $R^2 = 0.52$  og  $R^2 = 0.47$  (alle  $p < 0.001$  for både a og b). Basert på stigningstallene til regresjonslinjene tyder det på at 1 besøkende omtrentlig tilfører en temperaturøkning på  $0.05^\circ\text{C}$  på maksimumsverdien i temperatur. Denne verdien kan brukes til å beregne hvor mye varme et menneske tilfører luften ved Kapellet. Ved å sette dette inn i ligning 3 i kapittel 3.6, vil en besøkende tilføre 1253 cal til det totale luftvolumet i Kapellet under et turistbesøk. Korrelasjonskoeffisientene for sensorene viser positiv lineær korrelasjon med  $r=0.71$ ,  $r=0.72$  og  $r=0.69$  (alle  $p < 0.001$ ). For T1 og T2 stemmer skjæringspunktene på  $5.02^\circ\text{C}$  og  $5.03^\circ\text{C}$  godt overens med modalverdien for sommeren på omtrentlig  $5^\circ\text{C}$  for sensorene. T3 har et skjæringspunkt på  $4.55^\circ\text{C}$ , noe som er noe lavere enn modalverdien på  $4.75^\circ\text{C}$  for denne loggeren i løpet av sommeren.



**Figur 4.6.13:** Maksverdi av temperatur for T1-T3 som funksjon av antall besøkende. Jo høyere antall besøkende, desto høyere er maksverdien av temperaturen.

## 5 Diskusjon

### 5.1 Mulige feilkilder knyttet til målinger

#### *Temperatursensor*

Tidligere erfaringer tilsier at temperatursensorer i grotter helst skal plasseres 1 m fra grotteveggen eller vekk fra jordsmonn og sedimenter, slik at man unngår sigevann (Cigna, 2002). I dette prosjektet har sensorene vært plassert langs grotteveggen og ned i løsmasser, fordi man på den måten kan registrere hvordan temperaturen endrer seg i de forskjellige høydene i en passasje. Det er også begrenset med plass i enkelte passasjer, slik at plassering av sensorene langs veggen var den beste løsningen. Målingene kan derfor ha blitt påvirket av vann som renner ned langs veggene, eller eventuelt sigevann i løsmassene. På grunn av forskjeller i varmekapasitet mellom vann og luft, kan dette føre til kaldere eller varmere målinger enn den reelle lufttemperaturen i grotta. I Kapellet er det vinteren 2016/2017 antatt at sigevann er grunnen til at T4 på et tidspunkt reagerer mer enn loggerne i luften (T1-T3). Dette sigevannet kommer fra *Lille åpning*, og kan blant annet ha påvirket beregnede modalverdier for denne sensoren. Produsent oppgir at temperatursensorene kan plasseres i bakken, men kun ned til visse dybder og i visse jordsmonn (Campbell Scientific, 2018). Måleusikkerheten til loggeren er oppgitt til  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  mellom  $0^{\circ}\text{C}$  og  $70^{\circ}\text{C}$ , og denne usikkerheten øker ned til  $-50^{\circ}\text{C}$ . Denne usikkerheten eller toleransen til loggeren kan i enkelte tilfeller utgjøre temperaturutslaget til et lite turistbesøk.

#### *CO<sub>2</sub>-sensor*

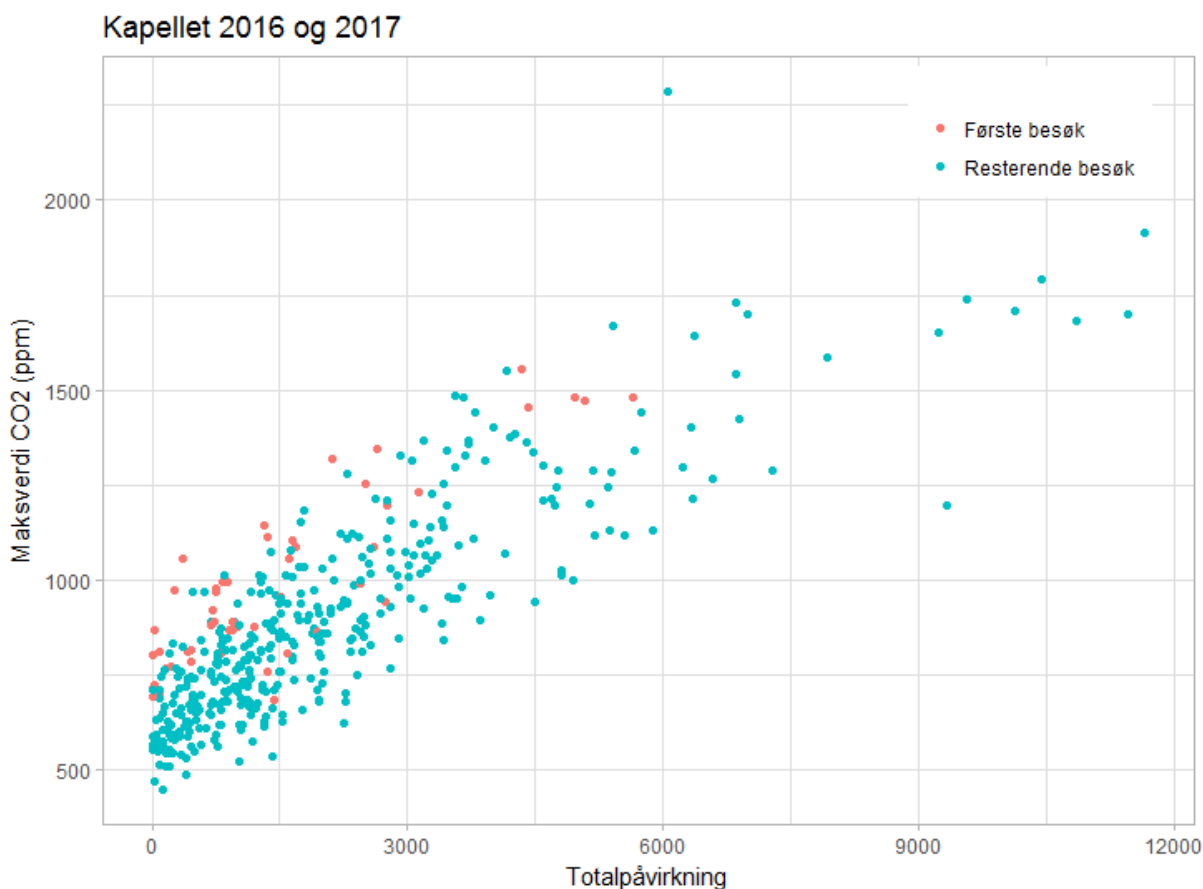
CO<sub>2</sub>-sensoren er plassert på veggen i personhøyde ved begge stasjoner for å detektere den antropogene påvirkningen bedre. For resultatene er det antatt at denne målingen gjelder for hele luftsøylen ved stasjonene, men det er vanskelig å vite om luftsøylen har en vertikal gradient. Høyden på passasjene er på omtrentlig 2.5-3 m, og derfor blir det antatt at konsentrasjonen ikke endres drastisk fra bakke til tak. Måleområdet til sensoren er oppgitt til 0-5000 ppm (E + E Elektronik, 2018). I Storkirka er det flere tidspunkt i løpet av høsten 2017 som viser maksimumsverdier nært eller på 5000 ppm. Det kan dermed være vanskelig å avgjøre om disse verdiene var de høyeste, eller om CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen reelt sett var høyere. I tillegg har det vært noen hendelser med store dropp i målinger fra 2000 ppm til 0 ppm over 30sek. Årsaken til dette kan være dårlig strømforsyning eller en kort teknisk svikt i systemet. Disse målingene var

under turistbesøk, og siden nattverdiene er grunnlag for store deler av datasammenligningen regnes ikke disse verdiene med i noen grunnlag.

### *Bevegelsessensor*

Bevegelsessensoren er grunnlaget for smart-loggingen og dersom det oppstår feil med denne, vil dette trolig gi typiske følgefeil videre. Noen ganger oppdager den bevegelser og registrerer disse og setter i gang smartlogging, mens andre ganger oppdager den bevegelser og registrerer det, men uten å sette i gang smartlogging. Grunnen til dette er uklart, men polariteten i sonene eller avstanden mellom logger og mennesker kan nok spille en rolle. En eventuell usikkerhet i denne loggeren gjenspeiles i størst grad i dataene fra Kapellet, siden det er enklere å trekke linjer mellom antall bevegelser og CO<sub>2</sub>/temperatur ved denne stasjonen. I Kapellet er passasjen smal og dersom folkemengden er stor vil ikke nødvendigvis alle kunne komme seg langt nok inn i passasjen til å bli registrert av loggeren. Dette kan være med på å gi et misvisende forhold mellom variabler som besøkende, bevegelser og totalpåvirkning. Dersom loggeren ikke registrerer bevegelse, selv om det fortsatt er mennesker ved stasjonen, vil varigheten på besøket blir kortere enn det som er reelt. Dette fører til at forholdet mellom maksimumsverdi av CO<sub>2</sub>/temperatur og totalpåvirkning også kan bli noe feil.

Loggeren registrerer det høyeste antallet bevegelser i det første turistbesøket. Dette skjer som regel hver dag, se figurer i kapittel 4.3.1 og 4.3.2, samt vedlegg 4A og 4B. Dersom dette ikke er reelle bevegelser, men heller et resultat av at strømmen slås på, kan det påvirke resultatene fra Kapellet med for eksempel maksimumsverdi i CO<sub>2</sub>/temperatur og totalpåvirkning. Integralet av bevegelser for det første besøket er derimot ikke betydelig større enn for de resterende besøkene resten av samme dag. Tvert imot viser det seg at det ligger på omtrentlig samme nivå, siden varigheten for det første turistbesøket er relativt kort. For å undersøke innvirkningen dette første turistbesøket har på blant annet forholdet mellom maksverdi CO<sub>2</sub> og totalpåvirkning for Kapellet 2016 og 2017 er disse punktene gruppert og merket i rødt i figur 5.1.1. Her legger flertallet av punktene seg i det øvre sjiktet, noe som kan være med på å trekke regresjonslinjen litt oppover for begge datasettene. Punktene utgjør 12.7% av hvert datasett, og avviker ikke fra de øvrige punktene. Dette betyr at selv om bevegelsessensoren slår «hardt» ut på første besøk, påvirker ikke dette resultatene i noen stor grad.



**Figur 5.1.1:** Forholdet mellom maksimumsverdi i CO<sub>2</sub> og totalpåvirkning for både 2016 og 2017. De røde punktene illustrerer det første turistbesøkene for begge årene. Flertallet av disse punktene legger seg i det øvre sjiktet, men de avviker ikke nødvendigvis mer enn de andre punktene.

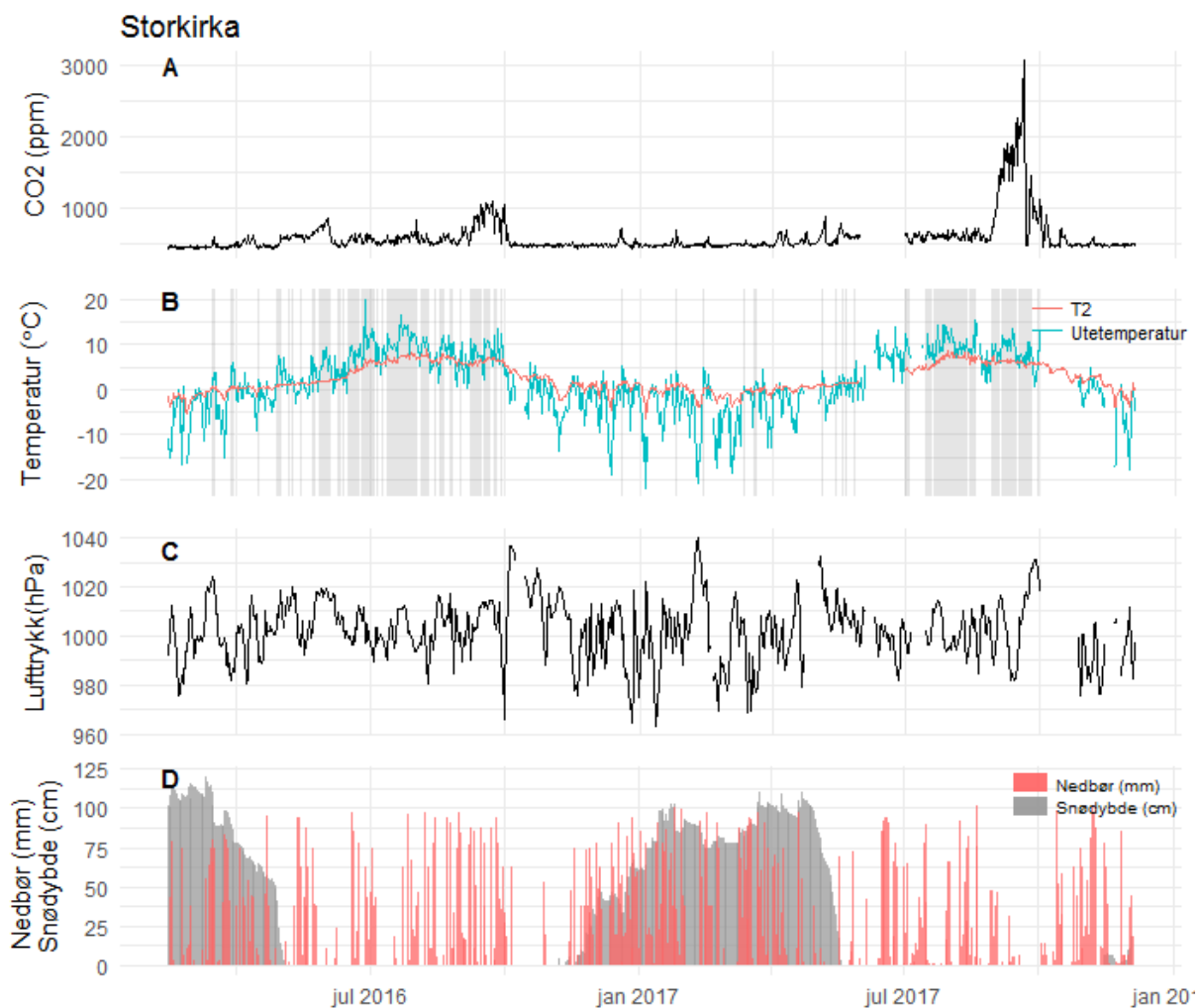
### Tidsserie

Det kan forekomme enkelte avvik i tidspunkt når dataloggersystemet er tilkoblet PC. Avvik i tidspunkt kan forekomme dersom det ikke har blitt tatt hensyn til overgangen mellom sommer- og vintertid og dersom tidspunktet har blitt justert i forhold til tidspunkt på data som kan være feil. Det er mulig at dette ikke er rettet opp i alle tilfeller, siden slike feil er vanskelig å oppdage i såpass store datasett. Dette kan i så fall gi følgefeil på store deler av datasettet, med en times forskyvning av dataene. Spesielt gir det følger for sammenligningen av temperaturer inne i grotta og utenfor, men det kan også påvirke korrelasjonen mellom antall besøkende og maksimumsverdier av parameterne.

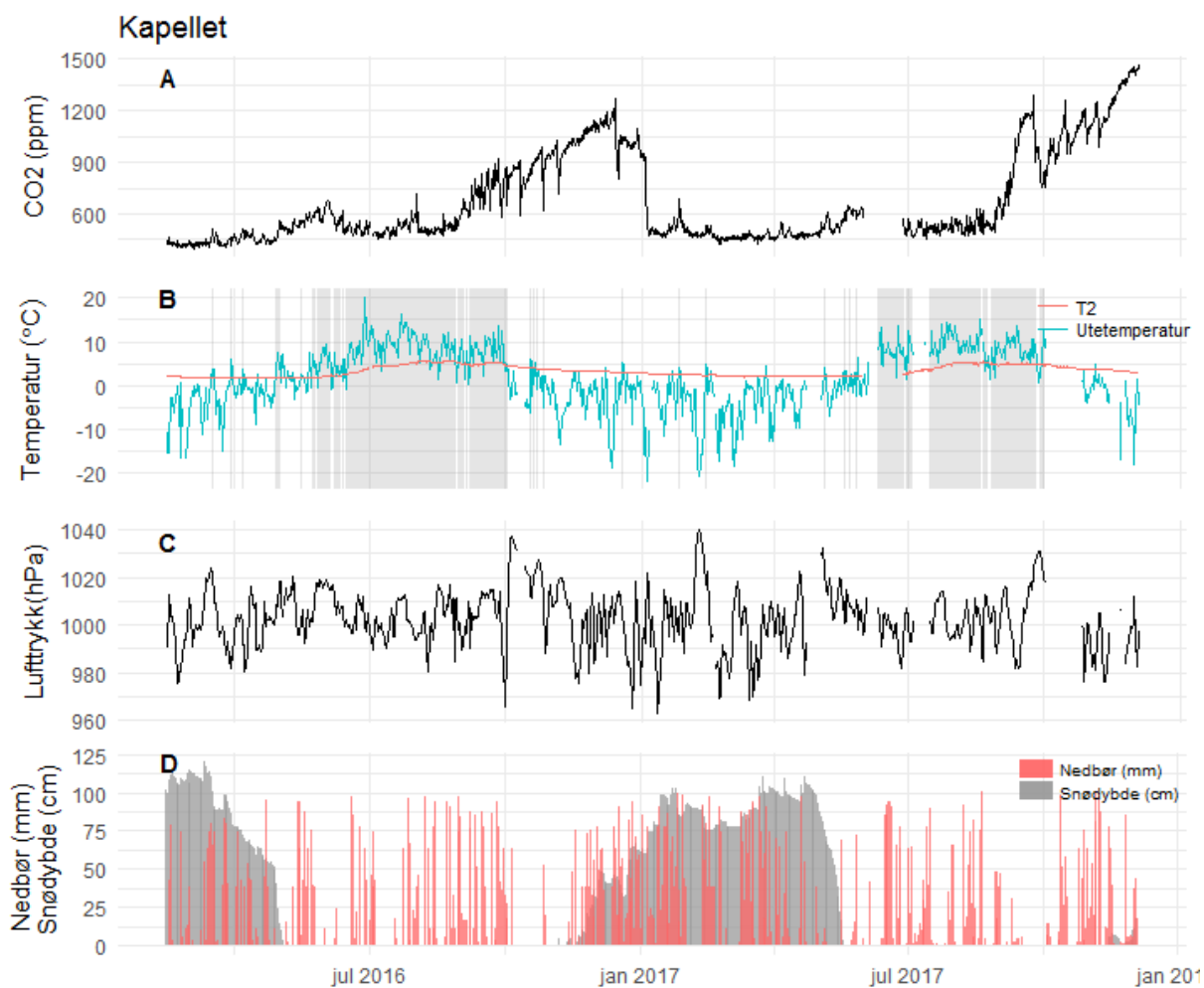
## 5.2 CO<sub>2</sub>

### 5.2.1 Mulige forklaringer på sesongtrend i CO<sub>2</sub> i Storkirka og Kapellet

Endringene i CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen som er observert ved Storkirka og Kapellet på høsten, figur 5.2.1.A og figur 5.2.2.A, er vurdert å ikke stamme fra menneskelig påvirkning, men heller vise en sesongmessig trend. De neste avsnittene tar for seg om eksterne drivkrefter kan være en årsak til disse endringene, blant annet nedbør og snødybde, påvirkning gjennom epikarstsonen, kontakt med utendørs atmosfære og forskjeller i utetemperatur og grottetemperatur. Det blir spesielt fokusert på hva som forårsaker utluftingen av CO<sub>2</sub> i overgangen mellom september/oktober for Storkirka og desember/januar for Kapellet.



**Figur 5.2.1:** CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen (A) i Storkirka sett i sammenheng med forskjeller i temperatur (B), luftrykket utendørs (C) og nedbørsmengde og snødybde (D). De grå feltene i B viser når utetemperaturen er høyere enn grottetemperaturen (T2).



**Figur 5.2.2:** CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen (A) i Kapellet sett i sammenheng med temperaturforskjeller (B), lufttrykket utendørs (C) og nedbørmengden og snødybde (D). De grå feltene i B viser når utetemperaturen er høyere enn grottetemperaturen (T2).

## 1. Nedbør og snødybde

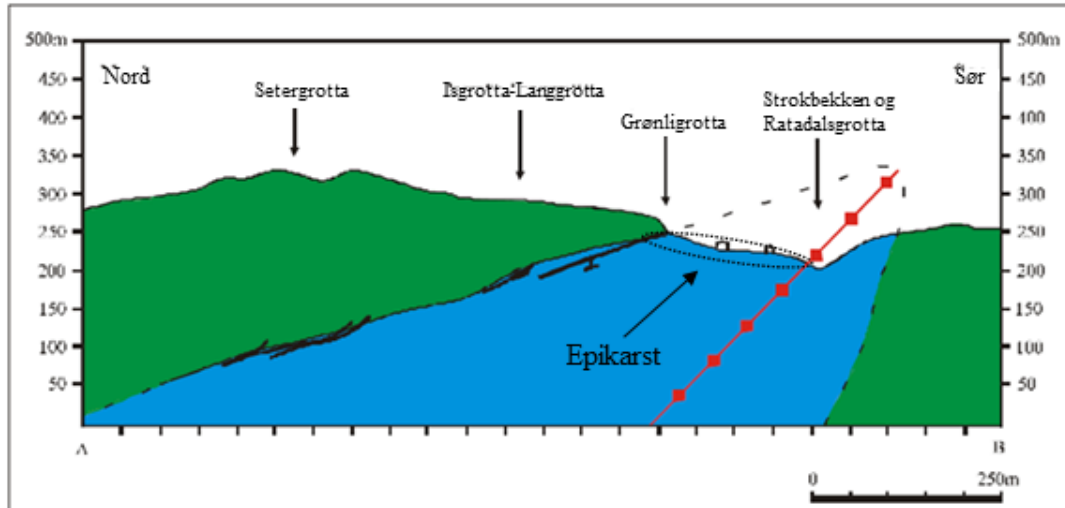
Snøen ligger som regel til april/mai ved Grønlia, slik at snøsmeltingen foregår til ganske sent på våren, figur 5.2.1.D og figur 5.2.2.D. Perioden med snøsmelting fører til økt vannføring blant annet ved Nyrud og Møsabekken (Skoglund og Lauritzen, 2017), og det er grunn til å tro at dette også foregår i Grønligrotta. Dette gir i så fall en periode der bekken har høyere vannføring, noe som kan øke ventilasjonen i delene av grotta med tilknytning til bekken. Dersom denne økte vannføringen foregår i overgangen mai/juni, starter turistsesongen opp relativt raskt etter dette og det kan være vanskelig å skille om det er vannføring eller den antropogene faktoren som påvirker CO<sub>2</sub> mest. Grunnivået ved Storkirka ser ut til å stige i løpet av mai/juni 2016, mens under samme periode i 2017 er det en del fluktuasjoner. I Kapellet ser man derimot en klarere økning i denne perioden, før konsentrasjon synker litt når turistsesongen starter. Nedbørsnivået over hele året er relativt jevnt og det ser ikke ut til at disse små mengdene tilfører

noen endringer i CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i disse periodene. I overgangen mellom september/oktober (Storkirka) eller desember/januar (Kapellet) er det en brå nedgang i CO<sub>2</sub>-konsentrasjon, figur 5.2.1.A og figur 5.2.2.A, men det er derimot ingen store nedbørshendelser på dette tidspunktet som kan antas å ha en innvirkning på dette. Det er derimot ikke gjort noen målinger med anemometer som kan bekrefte eller avkrefte en eventuell korrelasjon mellom vannføring og ventilasjonen av luften ved stasjonene.

## **2. Vegetasjon på terrengoverflaten – påvirkning gjennom epikarstsonen**

En faktor som er kjent å kunne påvirke CO<sub>2</sub>-nivået i grotter er påvirkningen fra jordsmonn gjennom epikarstsonen (White, 1988; Ford og Williams, 2007). Over Grønligrotta ligger det massiv glimmerskifer med omtrentlig 20-80 m tykkelse. Epikarstsonen for denne marmoren er derfor svært begrenset og strekker seg over ca. 250 m, figur 5.2.3. Dersom påvirkning gjennom epikarstsonen er en aktiv prosess i Grønlia, er det antatt at den er mest aktiv i sommermånedene fordi respirasjonen i humus er temperaturavhengig. Om vinteren ligger snøen som et beskyttende lag over vegetasjonen og epikarstsonen, slik at temperaturen er lav og respirasjonen av humus er på et lavt nivå. Det er også en mulighet for at det er en forsinkelse mellom CO<sub>2</sub>-nivået i jordsmonn og epikarstsonen og CO<sub>2</sub>-nivået i grotta. Dette er blant annet vist av Ek og Godissart (2014), der maksimumsverdien av CO<sub>2</sub> i jordsmonnet var høyere på et tidligere tidspunkt enn i grottene. Dette kan stemme godt overens med at økningen i CO<sub>2</sub>-konsentrasjon er i september. Sekundært kan sprekker i glimmerskifer påvirke CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i grotta ved at vann mettet med CO<sub>2</sub> dreneres gjennom sprekke. Dette foregår trolig i mye mindre grad enn påvirkning og drenering gjennom epikarstsonen. Over glimmerskiferen er det sparsom vegetasjon, med områder av myr og bart fjell. Det er derimot ikke foretatt noen målinger av tilsiget av vann, diffusjon av gasser gjennom sprekker, eller CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen av jordsmonnet utenfor grotta, som gjør det vanskelig å korrelere noen av disse faktorene med CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i grotta. Det er derimot aktiv dannelse av speleothemer i grotta, som tyder på at det er et visst grunnvannstilsig gjennom epikarstsonen.





**Figur 5.2.3:** Vertikalprofil av lagpakken ved Grønli. Epikarstsonen er merket med stiplet sirkel. Denne sonen er kun merket av i det nærmeste området av grottesystemene. Grønn farge er glimmerskifer og blå farge er marmor. Rød linje er akseplanet til lagpakken. Modifisert fra Skutlaberg (2003).

### 3. Kontakt med utendørs atmosfære

CO<sub>2</sub> i utendørs atmosfære er lavere enn konsentrasjonen som er målt i grotta. Dette er tidligere vist blant annet av Ek og Gewalt (1985). Ved begge stasjonene holder derimot grunnivået seg noenlunde stabilt gjennom hele måleperioden med verdier på 493 ppm for Storkirka og 538 ppm for Kapellet. I september, når turistsesongen er over, stiger CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen gradvis opp mot 1000 ppm i Storkirka i 2016, mens i samme periode i Storkirka i 2017 når konsentrasjonen en maksimumsverdi på 3000 ppm. Under samme periode i Kapellet når konsentrasjonen et nivå på i overkant av 1200 ppm for både 2016 og 2017. Siden det ikke finnes kontinuerlige målinger av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen utenfor grotta, er det vanskelig å fastslå om dette kan korrelere med en global syklus av CO<sub>2</sub>.

CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i grotter kan også avhenge av det atmosfæriske lufttrykket (Hoyos et al., 1998; Bourges et al., 2001). Lufttrykket fluktuerer ofte, figur 5.2.1.C og figur 5.2.2.C, slik at man skulle anta at CO<sub>2</sub> ville endret seg tilsvarende. Det er derimot ikke lett å se sammenheng mellom lufttrykk og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i dette tilfellet. Verken ved stasjonene i Storkirka eller i Kapellet ser det ut til at lufttrykket er den største drivkraften for endringer i CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen.

#### **4. Temperatur som drivkraft for sesongvariasjoner i CO<sub>2</sub>-nivå**

Figur 5.2.1.B og figur 5.2.2.B viser forholdet mellom utetemperaturen og T2 ved Storkirka og Kapellet. Områdene med grå bakgrunn angir tidspunktene når utetemperaturen er høyere enn temperaturen i grotta. Dersom man overfører regimene fra Milanolo og Gabrovsek (2009) til dette tilfellet, vil det bety at luft blir holdt inne i grotta for de grå områdene. Dette betyr at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen kan akkumuleres over tid. Når utetemperaturen blir lavere enn grottetemperaturen vil regimet snu og luft ventileres ut.

For Storkirka er det godt mulig at temperaturforskjellene inne og ute er en drivkraft for CO<sub>2</sub>-endringene. Dette stemmer godt overens med den tilknytningen denne passasjen har med utendørs atmosfære. Dette kan også være en grunn til at CO<sub>2</sub> ventileres ut mye fortere ved denne stasjonen. I Kapellet er det derimot liten grunn til å tro at temperaturforskjellene er en drivkraft. Dersom det er tilfellet, er det en forsinkelse på omtrentlig 3 måneder i dette systemet, noe som kan forklares med at det tar mye lengre tid før temperaturendringene når denne stasjonen.

For grotta som helhet kan det spille en rolle at grotta har en helning på 19° og at det er to innganger på omtrentlig samme høyde. Dersom grotta blir betraktet som en kaldluftsfelle vil den kalde luften kunne samle seg nederst i grotta på vinteren, slik at man får en gjennomgående ventilasjon på vinterstid. Dette gjør at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen holder seg på et stabilt grunnivå gjennom hele vinteren. Om sommeren vil den varmere luften fra terrengoverflaten trekke inn og legge seg som et lokk over den kalde luften som ble akkumulert i løpet av vinteren og holde den der. Dette fører til at grotta har mindre ventilasjon om sommeren, og en mulighet for at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen akkumuleres.

#### **5.2.2 Antropogen påvirkning på CO<sub>2</sub>-nivået**

##### **5.2.2.1 Storkirka**

I turistsesongen 2016 har CO<sub>2</sub>-nivået et forløp som ligner hjerteslag i et EKG-diagram. Det er vanskelig å fastslå nøyaktig hva som forårsaker denne daglige oscillasjonen. Siden oscillasjonen oppstår under det første turistbesøket er det grunn til å tro at menneskene som går inn i grotta genererer en ventilasjon av luften. Luften som måles av loggeren har lavere CO<sub>2</sub>-konsentrasjon enn den globale atmosfæren. CO<sub>2</sub>-målingene for 2017 viser derimot kun et kraftig utslag i løpet av dagen og synker aldri under grunnivået.

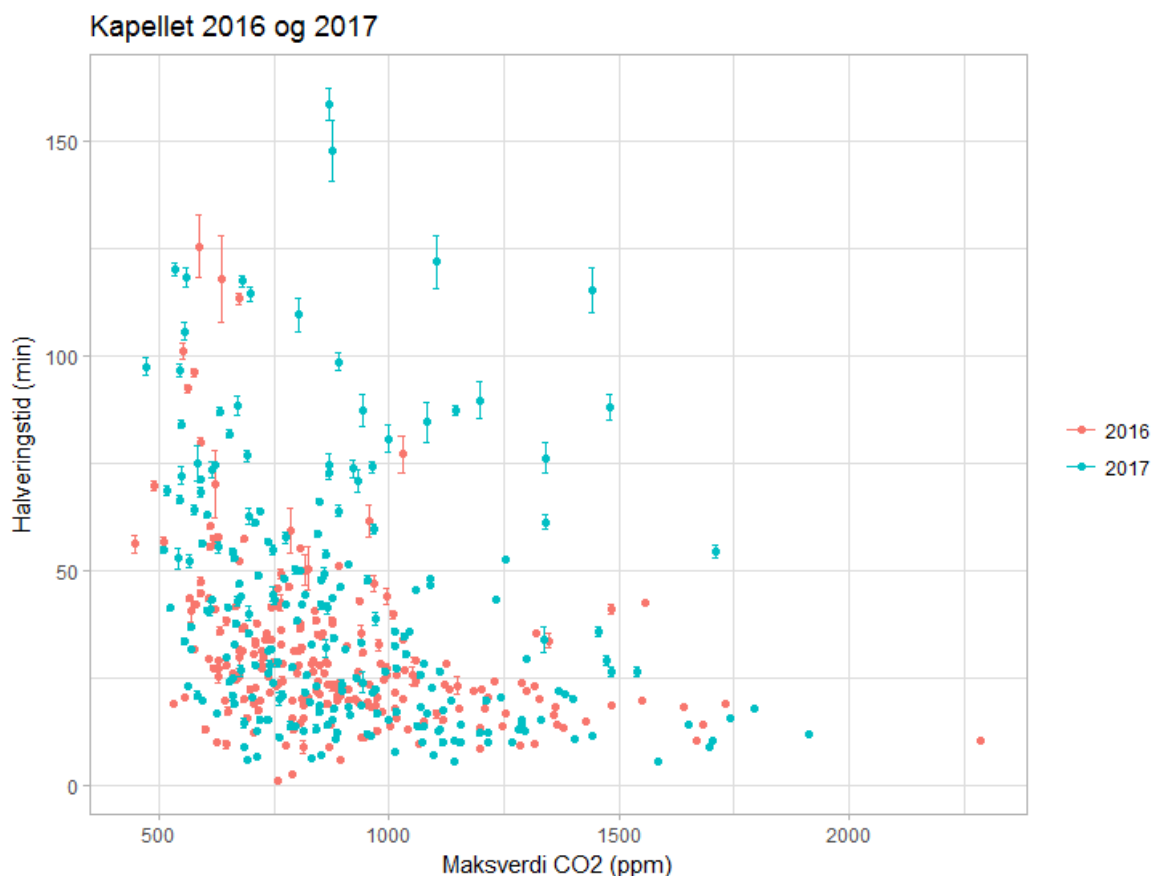
Helningen på grotta kan ha en innvirkning på CO<sub>2</sub> og ventilasjon av luften. For en normal tetthetsgradient vil CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i luften være høyere langs bakken enn i taket på grunn av at CO<sub>2</sub>-gass har høyere tetthet enn luft (Ford og Williams, 2007). Ford og Williams (2007) spesifiserte dette for CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i epikarst og hvordan denne kunne trekke ned i grottesystemene gjennom sprekker ved hjelp av gravitasjonen. Badino (2009) viser derimot til at konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> er høy på bunnen av en sjakt, ikke på grunn av høyere tetthet, men heller en høy produksjon av CO<sub>2</sub> i en rolig atmosfære. Denne produksjonen stammer fra oksidasjon av organisk materiale dersom atmosfæren er stillestående (Ek og Gewalt, 1985). Hvis man antar at det er en normal gradient av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i grotteluften betyr det at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er høyere i de nedre delene av grotta. Når turistene kommer inn til stasjonen i den øvre delen og genererer en ventilasjon, kan dette føre til at luften i nedre deler av grotta blir dratt oppover. Dersom denne luften har en høy CO<sub>2</sub>-konsentrasjon, er det en mulighet for at maksimumsverdien i CO<sub>2</sub> ville vært høyere enn 1250 ppm for 2016 og 2200 ppm for 2017. Man kan heller ikke se bort ifra at disse maksimumsverdiene er en kombinasjon av den antropogene påvirkningen og CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i lufta som blir dratt opp. Siden disse «hjerteslagene» gjentar seg hver dag i turistsesongen i 2016 er det usikkert om atmosfæren i bunnen av grotta får tid til å «bygge seg opp igjen». Dersom det er en inversjon av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i luften i grotta, vil dette bety at konsentrasjonen nederst i grotta er lavere enn hva den er i øvre deler. I et slikt tilfelle må tettheten til CO<sub>2</sub> være lavere enn luften, noe som kan være tilfellet i enkle passasjer eller gallerier i grotter (Ek og Gewalt, 1985). Når mennesker da kommer inn i grotta, kan man tenke seg at det startes en prosess der luft trekkes opp fra de nedre delene. Dette kan gi det typiske utslaget der CO<sub>2</sub>-nivået er mindre enn den globale konsentrasjonen. Man skulle anta at de påfølgende turistbesøkene ville hatt en lignende effekt som det første, slik at luft vil fortsatt dras opp og ut fra de nedre delene. Istedenfor stabiliseres grotteluften ved stasjonen utover dagen. Det er ikke gjort konsekvente målinger av CO<sub>2</sub>-nivået nedover i grotta, slik at verken den ene eller andre prosessen kan bekreftes. Dersom man sammenligner resultatene fra 2016 og 2017, ser det derimot ut til at målingene fra 2016 er et resultat fra den andre prosessen, mens målingene fra 2017 ser ut til å være på grunn av den første prosessen.

Man kan heller ikke se bort ifra at noe av den CO<sub>2</sub>-mengden menneskene puster ut akkumuleres på ulike steder i grotta, gitt at den normale tetthetsgradienten er dominerende. Grønligrotta er en labyrintgrotte der det er mange steder luft kan være mer eller mindre stillestående. Dette avhenger så klart av nærhet til bekk eller åpninger, men også sprekker og lignende.

Regenereringstidene for CO<sub>2</sub>-utslagene i Storkirka er uavhengige av maksimumsverdien av CO<sub>2</sub>. Den store usikkerheten i stigningstall for en regresjonslinje for dataene kan komme av en ventilasjon i systemet som nevnt i tidligere avsnitt. Denne ventilasjonen kan føre til forskjellig grad av utlufting under et besøk, spesielt dersom man ser for seg at ventilasjonen i stor grad er styrt av ankomst av det første turistbesøket. Dataene for disse resultatene er basert på tidsrommet 04.07.-30.07., noe som gir et lavt antall datapunkter. Dersom man hadde utvidet denne perioden til 31.08. kunne man fått flere datapunkter som kunne vippet regresjonslinjene den ene eller andre veien. Det kan også være vanskelig å skille ut om maksimumsverdien av CO<sub>2</sub> er utelukkende fra mennesker, eller om menneskene genererer en småskala ventilasjon som trekker ut luft fra sprekker i nærheten eller fra de nedre delene av grotta hvor det er sannsynlig at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er høyere. Dette kan føre til økt konsentrasjon i lufta, som ikke kan relateres direkte til antall besøkende.

#### **5.2.2.2 Kapellet**

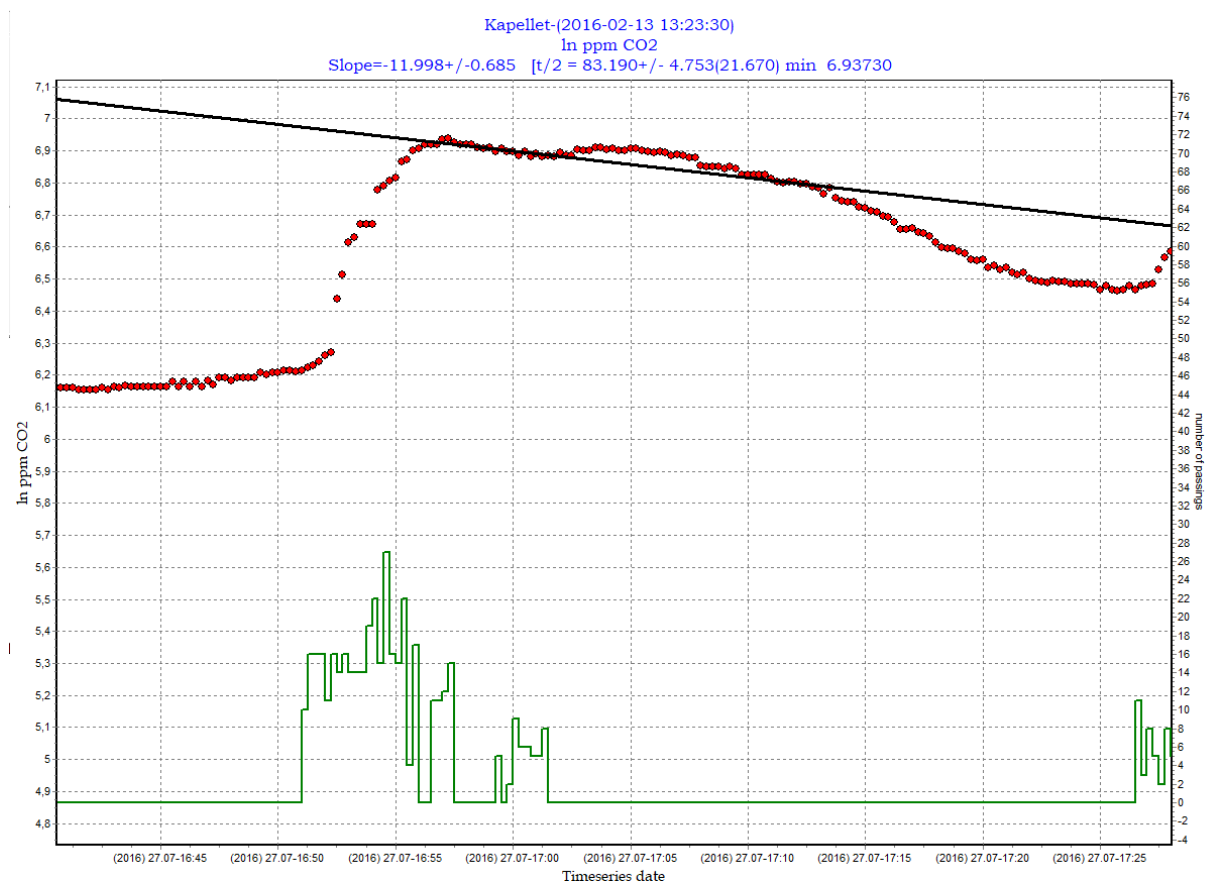
Både for 2016 og 2017 er det detektert flere CO<sub>2</sub>-utslag gjennom dagen som ser ut til å ha direkte sammenheng med turistbesøkene, figur 4.3.2 og vedlegg 4B. Mellom hvert turistbesøk synker CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen ned til et noe varierende grunnivå. Når maksimumsverdi av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen er høy, skjer utluftingen relativt raskt. Når man studerer forholdet mellom maksimumsverdi av CO<sub>2</sub> og halveringstid kunne en annen inndeling av datasettene ha blitt valgt. Tilpasningen av alle regresjonslinjene er dårlige, men linjene er statistisk signifikante. En grunn til dette er nok datamengden. Generelt sett ser det ut til å være en negativ, eksponentiell økning i forholdet mellom halveringstid og maksimumsverdien av CO<sub>2</sub>, figur 5.2.4, dersom man ser bort fra tidligere inndeling.



**Figur 5.2.4:** Halveringstid som funksjon av maksverdi CO<sub>2</sub> sammenstilt for 2016 og 2017 i Kapellet. Feillinjene illustrerer den beregnede usikkerheten til halveringstidene.

Halveringstidene kan være lange som følge av treg utluffing. Forskjeller i spredning i datasettene kan være på grunn av endringer i resesjonene eller menneskelige tolkningsfeil. Noen nedsynkninger har helt log-lineære forhold, noe som gjør at halveringstiden ikke endrer seg før konsentrasjonen er nede på grunnivået. Andre nedsynkninger viser gjerne en lengre halveringstid de første minuttene etter avsluttet besøk, og får deretter en mye kortere halveringstid før forløpet igjen endrer seg. I resultatet er det likevel valgt å bruke de første halveringstidene for alle slike CO<sub>2</sub>-utslag, selv om halveringstiden kan vise seg å være kortere eller lengre på et tidspunkt etterpå. Avvikere med halveringstider lengre enn 60 min i figur 5.2.4 kan komme som følge av fenomenet som opptrer i figur 5.2.5. I dette tilfellet nås maksimumsverdi i CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i løpet av turistbesøket og avtar deretter noe. Derpå øker konsentrasjonen igjen etter at besøket er avsluttet, før konsentrasjonen synker jevnt mot grunnivået. Den tilpassede regresjonslinjen gir derfor en lang halveringstid på over 80 min, selv om maksimumsverdi er i overkant av 1000 ppm. Slike målinger kan være med å gi spredning i datasettene. De menneskelige tolkningsfeilene er styrt av hvilke punkt man velger som start og

slutt for de lineære regresjonslinjene for halveringstiden i programkoden. Under enkelte nedsynkninger kan det være punkter som trekker opp eller ned og dermed kan påvirke halveringstiden til å bli kortere eller lengre. Til tross for dette viser hoveddelen av punktene at halveringstiden er mellom 10 min og 1 time. Målinger fra Ursilor Cave i Romania viser derimot opp mot 2 ukers halveringstid i de travleste turistperiodene (S. Constantin, pers. komm.), og sammenlignet med dette har Grønligrotta en mye raskere regenering etter turistbesøk.



**Figur 5.2.5:** Et eksempel av et semilogaritmisk plot av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen over tid. Dataene er fra 27.07.17 kl 17:00. Røde punkter er CO<sub>2</sub>-konsentrasjon, der maksimumsverdien er 1030 ppm. Grønn linje indikerer antall bevegelser registrert ved stasjonen. Den svarte linjen er en tilpasset regresjonslinje for de første minuttene etter turistbesøket. Deretter stiger CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen noe, før den sakte avtar.

Ved Kapellet ble det også trukket linjer mellom maksverdi av CO<sub>2</sub> og antall bevegelser under et turistbesøk, varigheten på besøket og antall besøkende. Resultatene viser at årsaken til et høyt CO<sub>2</sub>-nivå opptrer som en kombinasjon av lang varighet på besøket og høyt antall bevegelser. I tillegg viser resultatet at et høyere antall besøkende gir høyere maksimumsverdi i CO<sub>2</sub>. Stigningstallet for maksverdi CO<sub>2</sub> som funksjon av antall besøkende viser at 1 besøkende gir en gjennomsnittlig økning på 27.8±1.5 ppm. Denne gjennomsnittlige økningen baserer seg på

tilpasningen av en regresjonslinje. Datasettet viste derimot stor variasjonsbredde i maksimumsverdi i CO<sub>2</sub>-konsentrasjon for antall besøkende, og som et eksempel ble det tatt opp at 10 besøkende ga maksverdier på mellom 500 og 1400 ppm. Det kan være vanskelig å fastslå hva som fører til disse forskjellene, men trolig kan forskjellig grad av ventilasjon ved stasjonen spille en rolle. En annen mulighet er forskyvning i tidsseriene (kap. 5.1), slik at CO<sub>2</sub>-toppene blir korrelert mot feil antall besøkende. Til tross for dette er det sjelden maksimumsverdien blir høyere enn 1750 ppm under turistsesongene i 2016 og 2017, se figur 5.2.4. Dette er betydelig lavere enn målinger av CO<sub>2</sub>-nivået i Ursilor Cave i Romania, som har vist i overkant av 14 000 ppm med et håndholdt Vaisala-instrument (S. Constantin, pers. komm.).

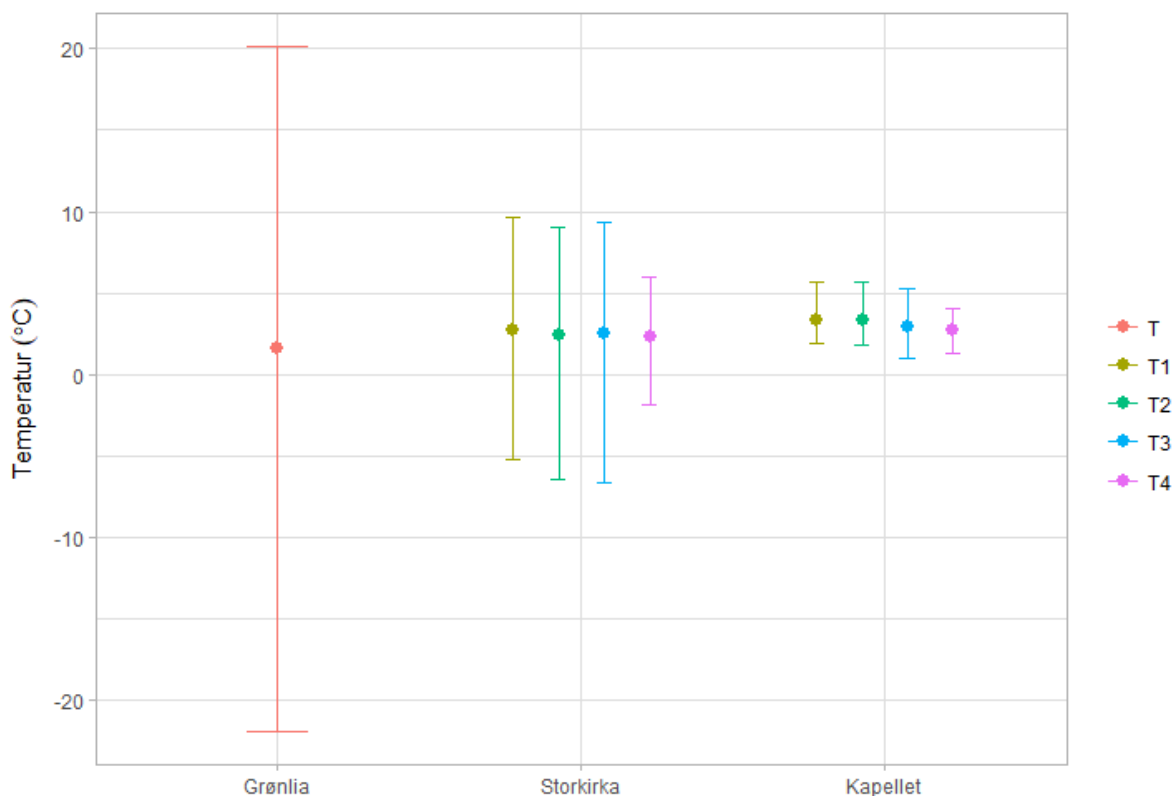
## 5.3 Temperatur

### 5.3.1 Sesongtrend Storkirka og Kapellet

Temperaturen i grotta er vist å være mer stabil enn utendørs, noe som blant annet også er dokumentert i Frankrike (Bourges et al., 2006), og i henhold til ventilasjonsteori (Wigley og Brown, 1976). Det er klare forskjeller mellom stasjonene som er plassert på ulike steder langs turistruta. Lufttemperaturen ved Storkirka ser ut til å følge lufttemperaturen utendørs i mye større grad enn ved Kapellet, figur 5.3.1. Lufttemperaturen ved Storkirka viser en bimodal fordeling i likhet med utetemperaturen, mens verdiene ved Kapellet viser en trimodal fordeling. Middelsestemperatur for T3 i Storkirka er 2.5°C, noe som er lik estimert årsmiddelsestemperatur ved Grønli. Til sammenligning viser T3 fra Kapellet en middelsestemperatur på 2.95°C. Middelsestemperaturen for grotta er derimot beregnet utelukkende fra nattverdier i motsetning til beregningen av årsmiddelsestemperaturen ved Grønli. Samtidig viser målingene ved Storkirka og Kapellet forsinkelse i forhold til utetemperaturen, og det er godt mulig nattverdiene gir et godt grunnlag for en middelsestemperatur som kan sammenlignes med årsmiddelsestemperatur på terrengoverflaten. Totalt sett betyr dette at stasjonen ved Storkirka har mye bedre kontakt med atmosfæren på terrengoverflaten enn stasjonen ved Kapellet.

Det er mulig at sesongtrendene som observeres i temperatur ved begge stasjonene er påvirket av restvarme fra turistbesøkene. Dette betyr at noe av varmen som menneskene tilfører luften og systemet blir værende, og kan føre til en økning i temperatur over tid. Dette vil i så fall påvirke de beregnede modalverdiene og middelsestemverdiene for temperaturmålingene, spesielt under turistsesongen.





**Figur 5.3.1:** Punktene viser middeltemperaturer, og feillinjene viser maksimums- og minimumstemperaturer for utetemperatur ved Grønlia og de fire temperatursensorene ved stasjonene Storkirka og Kapellet. Disse verdiene er en grafisk fremstilling av verdiene oppsummert i tabell 4.6.1 og 4.6.3.

## 5.3.2 Antropogen påvirkning på temperatur

### 5.3.2.1 Storkirka

Temperaturutslagene ved Storkirka er kaotiske og støyende, men om dette skyldes påvirkning fra ekstern atmosfære eller antropogen påvirkning er vanskelig å fastslå. Ved denne stasjonen kan verken antall bevegelser eller antall besøkende relateres til et temperaturn maksimum, og det er derfor ikke mulig å undersøke eller beregne hvor mye varme et menneske tilfører ved denne stasjonen. Målingene fra temperatursensorene støtter derfor opp under antagelsen om en ventilasjonseffekt ved denne stasjonen. Dersom luften hele tiden blir skiftet ut vil temperaturen ha små fluktuasjoner som observert.

### 5.3.2.2 Kapellet

Temperaturen i Kapellet øker ved hvert turistbesøk i større eller mindre grad, men temperaturen synker også ned til grunnnivået mellom turistbesøkene. Dersom man først tar utgangspunkt i maksimumsverdi i temperatur som funksjon av totalpåvirkning ser man at det er forskjeller

mellom datasettene for 2016 og 2017, figur 4.6.12. Forskjellen mellom de to årene er spesielt synlig under lav totalpåvirkning. Denne forskjellen kan komme fra et forskjellig grunnivå i temperatur. Ved å studere figur 4.6.6 nøyere ser man at natt-temperaturen er høyere i juli 2016 enn juli 2017 som danner grunnlaget for datasettene. Begge datasettene tar utgangspunkt i maksimumstemperaturen under besøk, men siden grunnivået av temperatur er forskjellig mellom årene, kan også maksimumsverdiene opptre forskjellig. Avviket i skjæringspunkt for regresjonslinjene kommer som følge av denne forskjellen. Dermed er det sannsynlig at en modalverdi på 5°C for hele måleperioden ikke nødvendigvis er beskrivende dersom man sammenligner datasettene fra 2016 og 2017. Dersom man i stedet hadde tatt utgangspunkt i integralet under grafen for hvert turistbesøk er det sannsynlig at resultatene ville vært noe annerledes. Dette er fordi grunnivå og maksimumsverdi ikke spiller en like stor rolle i distribusjonen av dataene, men at man heller bør knytte arealet under grafen til totalpåvirkningen.

For det andre kan man ta utgangspunkt i temperatur som funksjon av antall besøkende, figur 4.6.13. Datasettene inneholder kun data fra 2016, siden det ikke er notert ned antall besøkende for 2017. Basert på datasettene for de ulike luftsensorene og tilpasning av regresjonslinjene tilfører et menneske en økning på 0.05°C til maksverdien av temperatur. Ved å se på utslagene fra turistbesøkene fra blant annet 16.07.16 (figur 4.3.2), ser man at utslagene er mye større enn den naturlige variasjonen i grunnivået. Mens grunnivået for de tre luftsensorene varierer med 0.22-0.29°C uten turistbesøkene, fører et turistbesøk med 22 besøkende til en økning i temperatur på mellom 1.34-1.58°C. Dette betyr at den daglige variasjonen tilsvarer omtrent en sjettedel av temperaturøkningen turistbesøkene står for. Man kan ikke se bort ifra at den naturlige variasjonen ville vært mindre eller større uten påvirkning fra turistene denne dagen. Det må også nevnes at disse dataene tar utgangspunkt i det største utslaget i temperatur, og at de fleste andre turistbesøkene genererer mindre økning. I dette tilfellet var det 22 besøkende under turistbesøket som ga størst utslag i temperatur. Enkelte turistbesøk kan ha høyere antall besøkende uten å nødvendigvis gi høyere utslag i temperatur. Nøyaktig hva som er grunnen til dette er usikkert. Calaforra et al. (2003) definerer maksimumskapasiteten av turister som antall turister i grotta samtidig uten at temperaturen øker mer enn størrelsesordenen på den daglige naturlige variasjonen. I dette tilfellet fra 16.07.16 er man langt over det som kan regnes som en maksimumskapasitet dersom man skal følge denne definisjonen. Samme dag er det et besøk med 5 turister som genererer en økning i temperatur på 0.26 °C, 0.36 °C og 0.37 °C for T1, T2 og T3, noe som er nærere den naturlige variasjonen denne dagen. Selv om antall besøkende er

høyere enn maksimumkapasiteten etter denne definisjonen, viser målingene i løpet av dagen at temperaturen stiger for hvert turistbesøk og deretter synker ned til bakgrunnsnivået innen 20-30 min. Dermed kan det ikke sies at dagens besøksfrekvens har en langvarig eller permanent påvirkning på systemet, mest sannsynlig fordi det er tilstrekkelig ventilasjon av luften i grotta.

#### **5.4 Regresjon og korrelasjon**

Lave p-verdier for skjæringspunkt og stigningstall for regresjonslinjene er sterke bevis for at forholdet mellom variabler er lineært, men samtidig er det viktig å skille mellom kausalitet og korrelasjon under statistiske tester. Høy korrelasjon mellom CO<sub>2</sub>-konsentrasjon og totalpåvirkning gir ikke nødvendigvis en god forklaring på hva som øker konsentrasjonen. Ingen av variablene i totalpåvirkning; antall bevegelser eller varigheten av besøket, gir direkte innvirkning på maksimumsverdien av CO<sub>2</sub>. Et høyt antall bevegelser forteller oss om mennesker som kan veive mye med armer eller går litt frem og tilbake. Et høyt aktivitetsnivå gir høyere puls, og dermed høyere frekvens på utpusting, noe som igjen kan påvirke maksimumsverdien av CO<sub>2</sub>. Jo lenger folk er ved stasjonen, desto mer utpusting får man under det besøket. En observert korrelasjon kan også være på grunn av en tredje, men ukjent variabel (Bhattacharyya og Johnson, 1977). Det er sannsynlig at menneskene induserer en trekk når de går gjennom turistruta i grotta, og man kan ikke se bort ifra at denne ventilasjonen kan trekke CO<sub>2</sub> ut fra sprekker. Dette kan i så tilfelle øke CO<sub>2</sub> under besøkene.

I resultatet ble det valgt å bruke Pearsons r som korrelasjonskoeffisient, som er godt brukt og vanlig i korrelasjonsanalyser (Moore et al., 2012). De fleste datasettene har derimot ikke normalfordeling, noe som er en forutsetning for å kunne bruke Pearsons r som metode i korrelasjonstesten. Helst skulle det blitt brukt en ikke-parametrisk metode, som betyr at metoden ikke er avhengig av distribusjonen til variablene. En av disse metodene er Spearman som har korrelasjonskoeffisient  $\rho$ . Testing mellom metodene indikerer forskjeller på 0.01-0.04 mellom Pearsons r og Spearmans  $\rho$  på et utvalg av datasettene. Om denne forskjellen er i positiv eller negativ retning varierer fra tilfelle til tilfelle, men som regel gir Spearmans  $\rho$  et noe sterkere lineært forhold. En variabel i denne oppgaven består i de aller fleste tilfeller av 220 verdier, noe som gjør at Pearson kan tåle litt avvik. Dette kan gjøre at forskjellen mellom metodene blir så liten. For datasettene angående halveringstid for CO<sub>2</sub> ved Kapellet vil Spearman-metoden gi en korrelasjonskoeffisient som er 0.04 bedre enn Pearson-metoden i 3 av de 4 tilfellene. Pearson er derimot valgt fordi denne korrelasjonsmetoden har en direkte link til regresjonslinjer

gjennom  $r$  og  $R^2$ . Denne tolkningen er derimot ikke like enkel dersom man velger å bruke Spearmans  $\rho$ .

## 5.5 Videre arbeid

Datasettene innsamlet over disse to årene inneholder mye data, der mesteparten ikke er utforsket skikkelig ennå. For eksempel vil det å utvide datasettene fra 04.07-30.07 til 15.06-31.08 føre til et økt datagrunnlag og at andre potensielle trender kan undersøkes. En annen mulighet er å dekomponere tidsseriene for å få et bedre innblikk i hvilke utslag som skyldes naturlige svingninger og antropogen påvirkning. For å øke forståelsen av den antropogene påvirkningen kan man også se nærmere på hvor lang tid det tar fra turistbesøkene ankommer stasjonene til temperatur og CO<sub>2</sub> responderer.

For å videre undersøke hvordan turister påvirker mikroklima og miljø i Grønligrotta ville det vært interessant med målinger av temperatur og CO<sub>2</sub> fra inngangen og ned til de dypere delene av grotta. På denne måten er det mulig å kartlegge utviklingen av parameterne nedover i grotta. Det ville vært spesielt interessant å kartlegge hva som skjer i de ulike sesongene og hvordan turistene påvirker dette. I tillegg kan vindmålinger fra de ulike stedene i grotta gi en bedre forståelse for dynamikken i ventilasjonsmønstrene.

## 6 Konklusjon

- Målingene fra Storkirka tyder på at denne stasjonen er preget av ventilasjon, som enten kommer fra eksterne drivkrefter eller er generert av antropogen påvirkning under turistsesongen. I 2016 viser CO<sub>2</sub>-målingene en oscillasjon der konsentrasjonen stiger under det første turistbesøket og deretter synker under den globale atmosfæriske konsentrasjonen. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen stabiliseres på et grunnivå på 493 ppm etter turistbesøkene. Denne ventilasjonen påvirker målingene i så stor grad at det ikke er mulig å fastslå hvor mye et menneske tilfører CO<sub>2</sub>-nivået og halveringstidene i CO<sub>2</sub>-regenereringen er uavhengig av maksimumsverdien i CO<sub>2</sub>-nivået.
- Nattverdiene av temperaturen ved Storkirka viser en bimodal fordeling på 1°C og 6°C for T1-T3, og trimodal fordeling på 0°C, 3°C og 5°C for T4 som er plassert i bakken.
- Målingene fra Kapellet viser et grunnivå i CO<sub>2</sub>-konsentrasjon på 538 ppm for hele måleperioden. CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen stabiliseres mellom turistbesøkene og etter at turistbesøkene er ferdig for dagen, noe som tyder på at stasjonen har tilstrekkelig ventilasjon. Hoveddelen av halveringstidene for CO<sub>2</sub>-regenereringen etter turistbesøkene er mellom 10 min og 1 time.
- Nattverdiene av temperaturen i Kapellet viser en trimodal fordeling (T1-T4) med varierende modalverdier for de ulike sensorene.
- I Kapellet tilfører et menneske  $27.8 \pm 1.5$  ppm til maksimumsverdi i CO<sub>2</sub> og en temperaturøkning på 0.05°C som tilsvarer en energitilførsel på 1253 cal til luftvolumet til passasjen.
- Den eksterne drivkraften som ser ut til å ha størst innvirkning på parameterne i grotta er endringene i utetemperaturen, som kan føre til en utlufting av akkumulert CO<sub>2</sub> i løpet av høsten. Drivkrefter som endringer i nedbør, luftrykk og påvirkning gjennom epikarstsonen på sesongendringene i CO<sub>2</sub> ser ikke ut til å spille en like stor rolle som forholdet mellom utetemperatur og grottetemperatur.
- Dagens besøksfrekvens i Grønligrotta er bærekraftig. Dette vil nok gjelde så lenge grotteinngangene ikke blir stengt igjen med tette dører og begrenser muligheten for den naturlige ventilasjonseffekten.

## Referanser

- Badino, G. 2004. Cave temperatures and global climatic change. Bologna: Bologna, Italy: Societa Speleologica Italiana.
- Badino, G. 2009. The legend of carbon dioxide heaviness. *Journal of Cave and Karst Studies*, 71, 100-107.
- Bhattacharyya, G. K. & Johnson, R. A. 1977. *Statistical concepts and methods*, New York, Wiley.
- Bourges, F., Genthon, P., Mangin, A. & D' Hulst, D. 2006. Microclimates of l'Aven d'Orgnac and other French limestone caves (Chauvet, Esparros, Marsoulas. *International Journal of Climatology*, 26, 1651-1670.
- Bourges, F., Mangin, A., Amp, Apos & Hulst, D. 2001. Le gaz carbonique dans la dynamique de l'atmosphère des cavités karstiques : l'exemple de l'Aven d'Orgnac (Ardèche). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science*, 333, 685-692.
- Bögli, A. 1980. *Karst hydrology and physical speleology*, Berlin, Springer.
- Calaforra, J. M., Fernandez-Corts, A., Snchez-Martos, F., Gisbert, J. & Pulido-Bosch, A. 2003. Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Envir. Conserv.*, 30, 160-167.
- Campbell Scientific, I. 2018. *Temperatur Probe, 109* [Internett]. Tilgjengelig fra: <https://www.campbellsci.com/109> [Lest 14. april 2018].
- Cigna, A. 1968. An analytical study of air circulation in caves. *International Journal of Speleology*, 3, 41-54.
- Cigna, A. 2002. Monitoring of caves: conclusions and recommendations. *Acta Carsologica*, 31, 175-177.
- Crawley, M. J. 2005. *Statistics : an introduction using R*, Chichester, Wiley.
- Crawley, M. J. 2007. *The R book*, Chichester, Wiley.
- E + E Elektronik, G. M. B. H. 2018. *EE870* [Internett]. Tilgjengelig fra: <https://www.eplus.com/en/products/co2-measurements/co2-sensor/ee870/> [Lest 12. april 2018].

- Earth System Research Laboratory. 2018. *Recent Monthly Average Mauna Loa CO2* [Internett]. Tilgjengelig fra: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> [Lest 3. mars 2018].
- Efron, B. 1982. *The Jackknife, the bootstrap and other resampling plans*, Philadelphia, Pa, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Ek, C. & Gewalt, M. 1985. Carbon dioxide in cave atmospheres; new results in Belgium and comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 173-187.
- Ek, C. & Godissart, J. 2014. Carbon dioxide in cave air and soil air in some karstic areas of Belgium; a prospective view. *Geologica Belgica*, 17, 102-106.
- Faimon, J., Stelcl, J. & Sas, D. 2006. Anthropogenic CO<sub>2</sub>-flux into cave atmosphere and its environmental impact: A case study in the Cisarska Cave (Moravian Karst, Czech Republic). *Sci. Total Environ.*, 369, 231-245.
- Ford, D. & Williams, P. 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*, Chichester, Wiley.
- Fossen, H., Pedersen, R.-B., Bergh, S. & Andersen, A. 2013. En fjellkjede blir til. I: RAMBERG, I. B., BRYHNI, I., NØTTVEDT, A. & RANGNES, K. (red.) *Landet blir til. Norges geologi*. Trondheim: Norsk Geologisk Forening.
- Geiger, R. 1965. *The climate near the ground*, Cambridge, Mass, Harvard University Press.
- Horn, G. 1947. *Karsthuler i Nordland*, Oslo, Norges geologiske undersøkelse
- Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J. C., Sánchez-Moral, S. & Sanz-Rubio, E. 1998. Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, northern Spain). *International Journal of Geosciences*, 33, 231-242.
- Kartverket. u.å. *N1000 Kartdata* [Internett]. Tilgjengelig fra: <https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/kartverket/n1000-kartdata/aee42bb6-d0e9-4d70-86fe-6ea76c381055> [Lest 12. januar 2018].
- Lang, M., Faimon, J. & Ek, C. 2015. A case study of anthropogenic impact on the CO<sub>2</sub> levels in low-volume profile of the Balcarka Cave (Moravian Karst, Czech Republic). *Acta Carsologica*, 44, 71-80.
- Lang, M., Faimon, J. & Kejíková, S. 2017. The impact of door opening on CO<sub>2</sub> levels: A case study from the Balcarka Cave (Moravian Karst, Czech Republic). *International Journal of Speleology*, 46, 345-358.

- Lauritzen, S.-E. 2009. *Grønligrotten* [Internett]. Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Gr%C3%B8nligrotten> [Lest 12. januar 2018].
- Lauritzen, S.-E. 2010. *Grotter : Norges ukjente underverden*, Oslo, Tun.
- Lauritzen, S.-E. 2016a. Del II: Kjemiske prosesser i karsthydrologi og speleologi. I: LAURITZEN, S.-E. (red.) *Karst- og grottelære*. Universitetet i Bergen.
- Lauritzen, S.-E. 2016b. Kapittel 1: Grottemineraler og speleothemer. I: LAURITZEN, S.-E. (red.) *Karst- og grottelære*. Universitetet i Bergen.
- Lauritzen, S.-E. 2016c. Kapittel 8: Klassifikasjon av eksokarst. I: LAURITZEN, S.-E. (red.) *Karst- og grottelære*. Universitetet i Bergen.
- Lauritzen, S.-E., Hestangen, H., Skutlaberg, S. & Øvrevik, R. 2005. The Grønli-Seter cave research project, Rana, North Norway. *14th International Congress of Speleology*. Athen-Kalamos.
- Lauritzen, S.-E. & Lundberg, J. 2000. Meso- and micromorphology of caves. I: KLIMCHOUK, A. B., FORD, D. & PALMER, A. N. (red.) *Speleogenesis: evolution of karst aquifers*. January 2000 ed. ed. Huntsville, Alabama: National Speleological Society.
- Liñán, C., Vadillo, I. & Carrasco, F. 2008. Carbon dioxide concentration in air within the Nerja cave (Malaga, Andalusia, Spain). *International Journal of Speleology*, 37, 99-106.
- Meteorologisk Institutt. *eKlima* [Internett]. Tilgjengelig fra: [www.eklima.met.no](http://www.eklima.met.no) [Lest 10. januar 2018].
- Milanolo, S. & Gabrovsek, F. 2009. Analysis of Carbon Dioxide Variations in the Atmosphere of Srednja Bijambarska Cave, Bosnia and Herzegovina. *Boundary-Layer Meteorology*, 131, 479-493.
- Moore, D. S., McCabe, G. P. & Craig, B. A. 2012. *Introduction to the practice of statistics*, New York, Freeman.
- Oxaal, J. 1914. Kalkstenshuler i Ranen.
- Palmer, A. N. 1975. The Origin of Maze Caves. *The NSS Bulletin*, 56-76.
- Šebela, S. & Turk, J. 2014. Natural and anthropogenic influences on the year-round temperature dynamics of air and water in Postojna show cave, Slovenia. *Tourism Management*, 40, 233-243.
- Shao, J. & Tu, D. 1995. *The jackknife and bootstrap*, New York, Springer.



- Skoglund, R. Ø. & Lauritzen, S.-E. 2011. Subglacial maze origin in low-dip marble stripe karst: Examples from Norway. *Journal of Cave and Karst Studies*, 73, 31-43.
- Skoglund, R. Ø. & Lauritzen, S.-E. 2017. Karst Hydrology In Sub-Arctic Norway. *17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia.
- Skoglund, R. Ø., Lauritzen, S.-E. & Gabrovšek, F. 2010. The impact of glacier ice-contact and subglacial hydrochemistry on evolution of maze caves: A modelling approach. *Journal of Hydrology*, 388, 157-172.
- Skutlaberg, S. 2003. *Paleohydrogeologi, bruddgeometri og litostratigrafi i GrønliSetergrottesystemet, Mo i Rana*. Masteroppgave, Universitetet i Bergen.
- St. Pierre, S. 1988. Morphology and sediments of the Grønli - Seter Caves, Norway. *Cave Science*, 15, 109-116.
- Søvegjarto, U., Marker, M. & Gjelle, S. 1989. Berggrunnskart Storforshei 2027-4M 1:50 000 trykt i farger. *NGU*.
- Teetor, P. 2011. *R cookbook*, Beijing, O'Reilly.
- Utaaker, K. 1991. *Mikro- og lokalmeteorologi : det atmosfæriske miljø på liten skala*, Bergen, Alma Mater.
- White, W. B. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*, New York, Oxford University Press.
- Wigley, T. M. L. & Brown, M. C. 1976. The Physics of Caves. I: FORD, T. D. & CULLINGFORD, C. H. D. (red.) *The Science of speleology*. London: Academic Press.
- Williams, P. W. 1983. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61, 45-67.
- Øvrevik, R. 2002. *Hydrogeologi og karstkorrosjon i Grønli-Seterakviferen, Mo i Rana*. Masteroppgave, Universitetet i Bergen.

## Vedlegg

### Vedlegg 1: Tekniske spesifikasjoner dataloggersystem

Sensor	Type	Produsent	Nøyaktighet/ Usikkerhet	Rekkevidde	Oppløsning	Distanse
Temperatur	Termistor 109	Campbell	± 0.1°C fra 0°-70 °C ±0.5°C ned til -50°C	-50°C til +70°C	0.1	-
CO2	EE870	E+E Elektronik	± 50ppm	0-5000ppm	0.1	-
Bevegelse	MP Motion Sensor	Panasonic	-	100° horisontalt. 82° vertikalt.	-	5m

## Vedlegg 2: Kontroll med håndholdt Vaisala-instrument

<b>Storkirka – 26.09.16</b>		
<b>Klokkeslett</b>	<b>Vaisala (ppm)</b>	<b>Datalogger Campbell (ppm)</b>
13:10	700	1039
13:53	720	1033
14:01	600	1532

<b>Kapellet – 26.09.16</b>		
<b>Klokkeslett</b>	<b>Vaisala (ppm)</b>	<b>Datalogger Campbell (ppm)</b>
før	660	931
13:40	660	1682
13:45	1040	2120
13:48	1420	2125

<b>Storkirka – 02.03.17</b>		
<b>Klokkeslett</b>	<b>Vaisala (ppm)</b>	<b>Datalogger Campbell (ppm)</b>
11:20	530	469

<b>Kapellet – 02.03.17</b>		
<b>Klokkeslett</b>	<b>Vaisala (ppm)</b>	<b>Datalogger Campbell (ppm)</b>
12:13	550	749

<b>Storkirka – 03.03.17</b>		
<b>Klokkeslett</b>	<b>Vaisala (ppm)</b>	<b>Datalogger Campbell (ppm)</b>
15:30	520	462
17:20	550	465

<b>Kapellet – 03.03.17</b>		
<b>Klokkeslett</b>	<b>Vaisala (ppm)</b>	<b>Datalogger Campbell (ppm)</b>
17:20	540	870

### Vedlegg 3: Kode for beregning av usikkerhet

```
Procedure LinReg1(var Data:TDataarray;N:integer;
    var R, A,Ea,B,Eb,SS2y,S2y:real);
{Dataarray : input data, R:korrelasjonskoefficient, A +/- Ea: faktor
 B +/- Eb : vinkelkoefficient, SS2y :ResidualVarians, S2y: Kvadratsum(y)
}
var
i:integer;
x,y,
SumX,SumY,SumX2,SumY2,SumXY,Mx,My,
S2x,Sxy,R2:real;

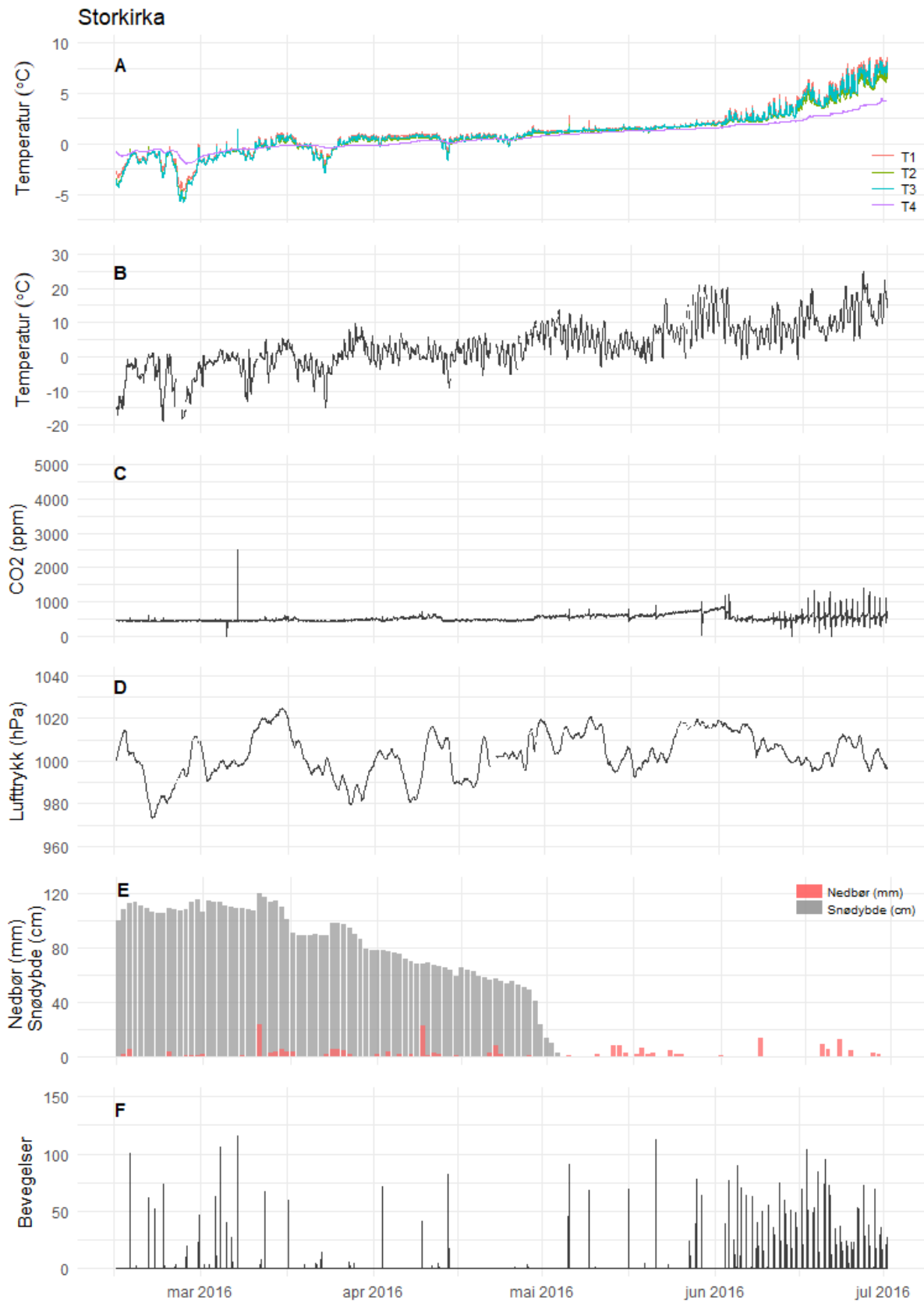
begin
    SumX:=0; SumY:=0; SumX2:=0; SumY2:=0; SumXY:=0; { initialiserer }
    for i:= 0 to N-1 do
        begin
            x:= data[i,1]; y:= data[i,2]; { x og y }
            SumX := SumX + x;      {sum av x}
            SumY := SumY + y;      {sum av y}
            SumX2 := SumX2 + sqr(x); {kvadratsum x}
            SumY2 := SumY2 + sqr(y); {kvadratsum y}
            SumXY := SumXY + x*y;   {produktsum xy}
        end;
        Mx := SumX/N; My:= SumY/N;   { x middel, y middel}
        S2x := (SumX2/N) - sqr(Mx);   { varians av x}
        S2y := (SumY2/N) - sqr(My);   { varains av y}
        Sxy := (SumXY/N) - Mx*My;    { covariance xy}
        if (n > 2) and (S2y > 0) then
            R2 := 1-((N-1)/(N-2)) * (1- sqr(Sxy)/(S2x*S2y)) {r kvadrat}
        else R2 :=1;
    if r2 > 0 then
```

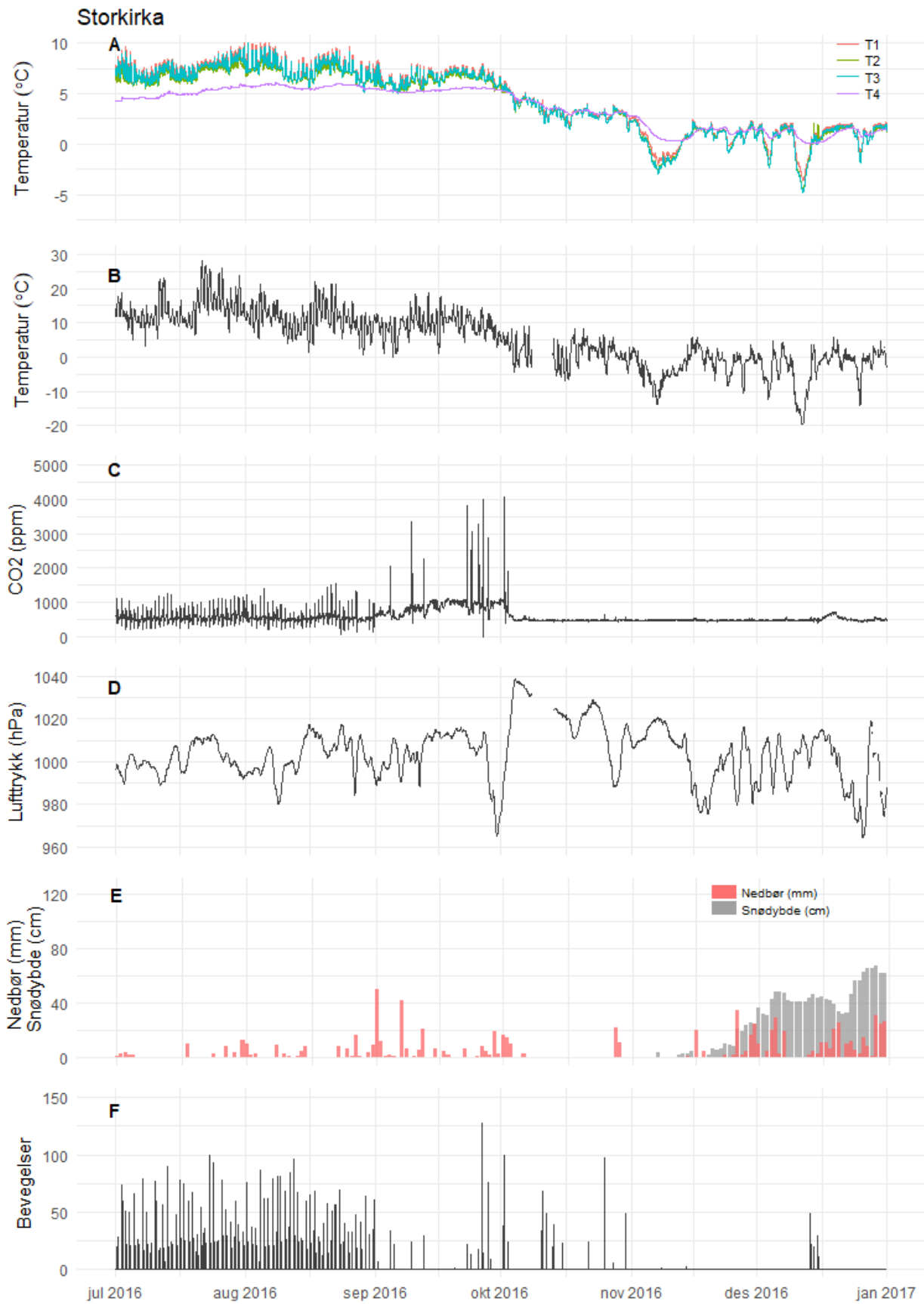
```

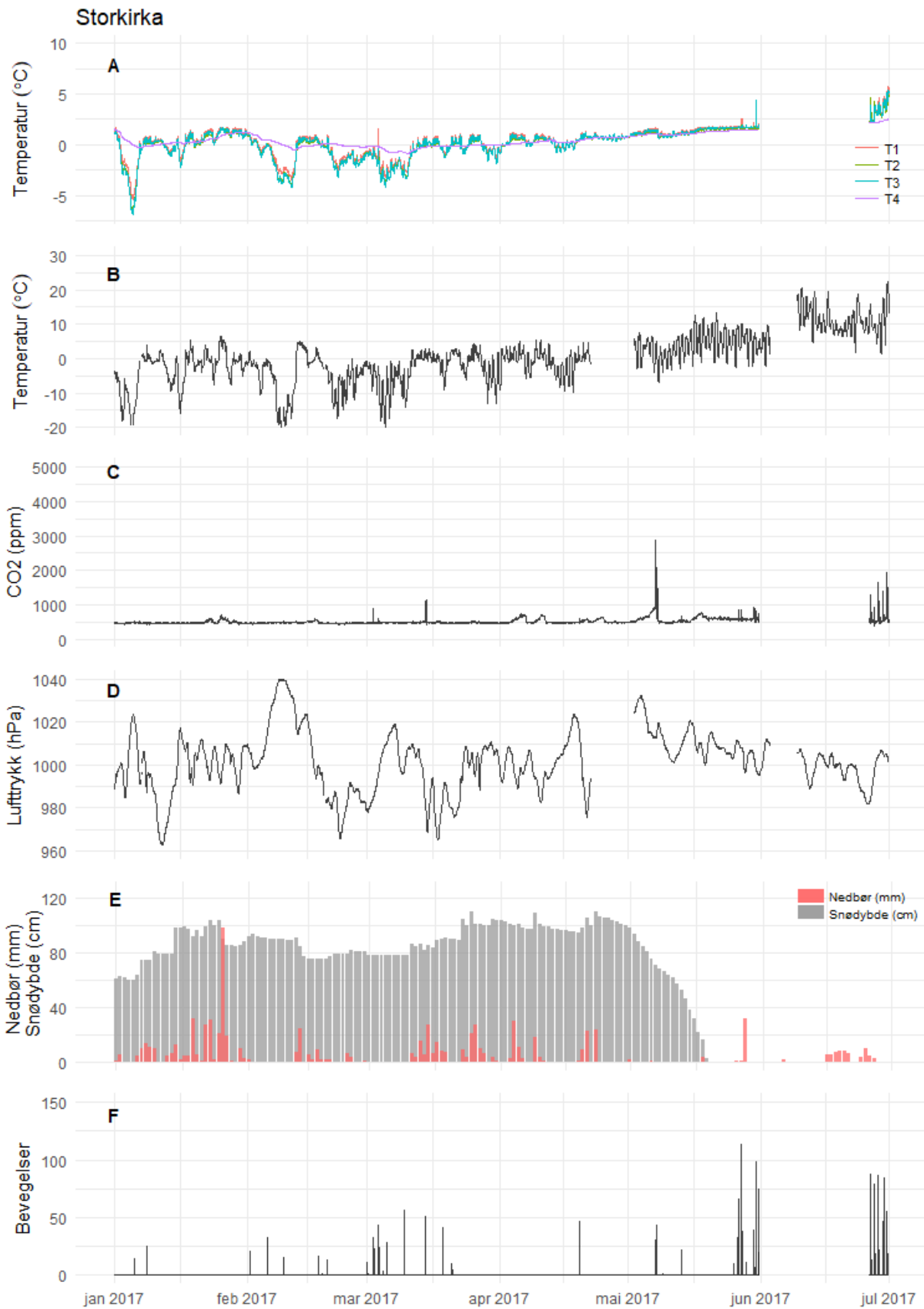
    R := sqrt(R2)      {r}
else r:=-sqrt(abs(R2));
if Sxy < 0 then R:= -R;      { fortegn av r avhengig av CovXY }
SS2y := S2y*(1-R2);      { residualvarians }
A := My -((Mx*Sxy)/S2x);    { Konstantledd, y-intersept}
Ea := S2y/S2x;            { Usikkerhet i y-intersept }
B := Sxy/S2x;            { Stigningskoeffisient }
if S2y > 0 then
    Eb := Sqrt(S2y/(S2x*N))    { Usikkerhet i denne}
else Eb :=99999;
end;

```

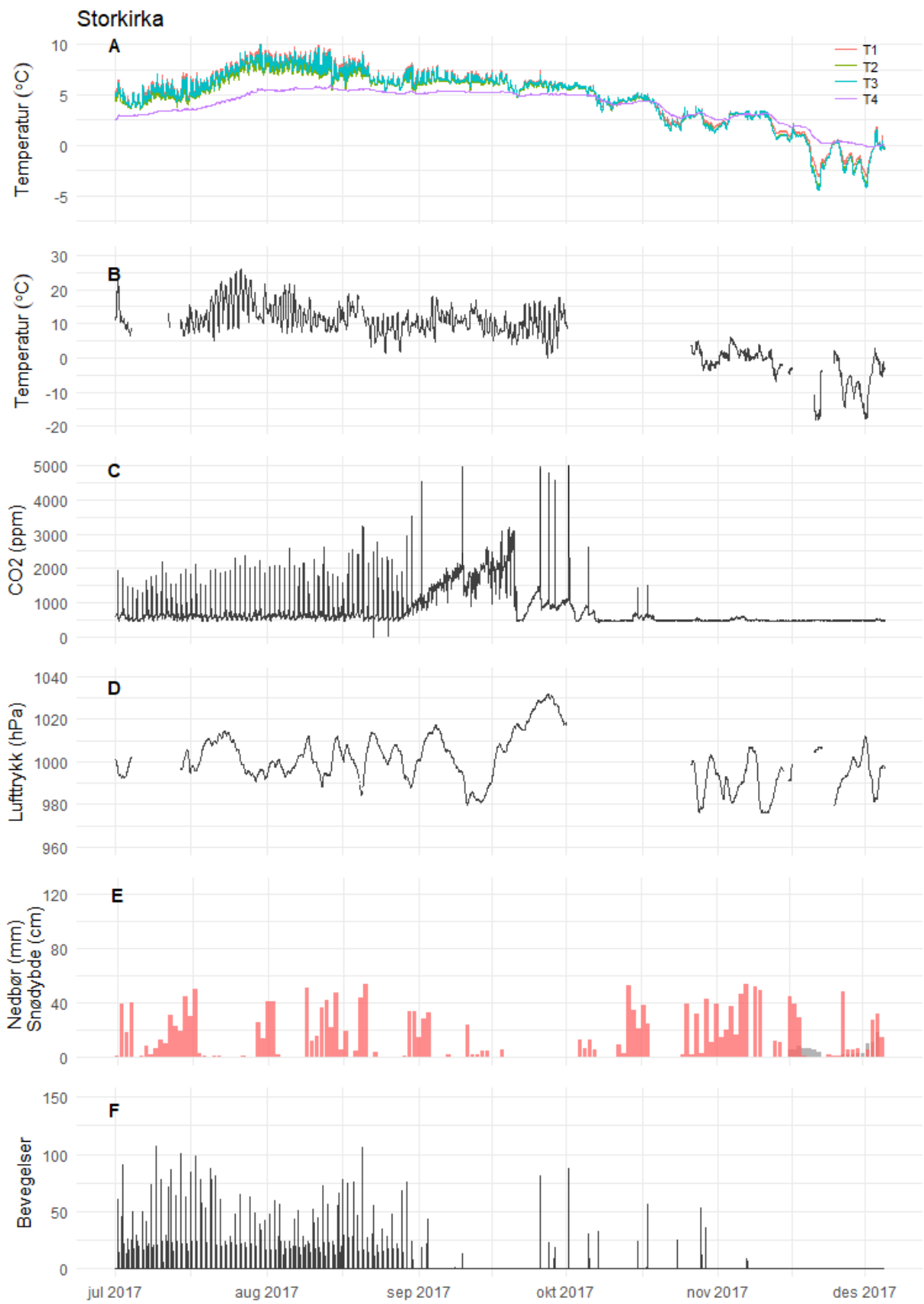
## Vedlegg 4A: 6 måneders bolker Storkirka



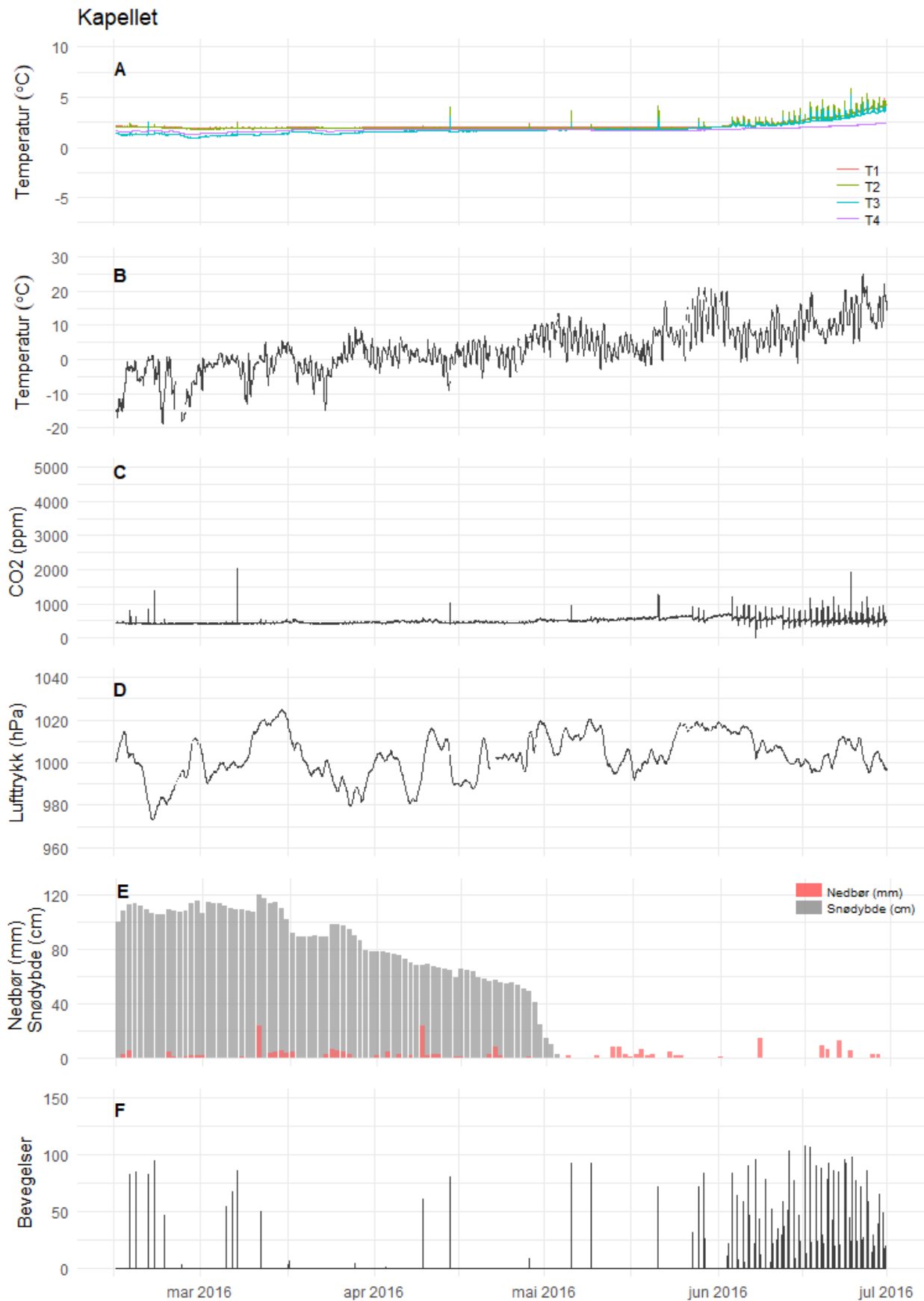


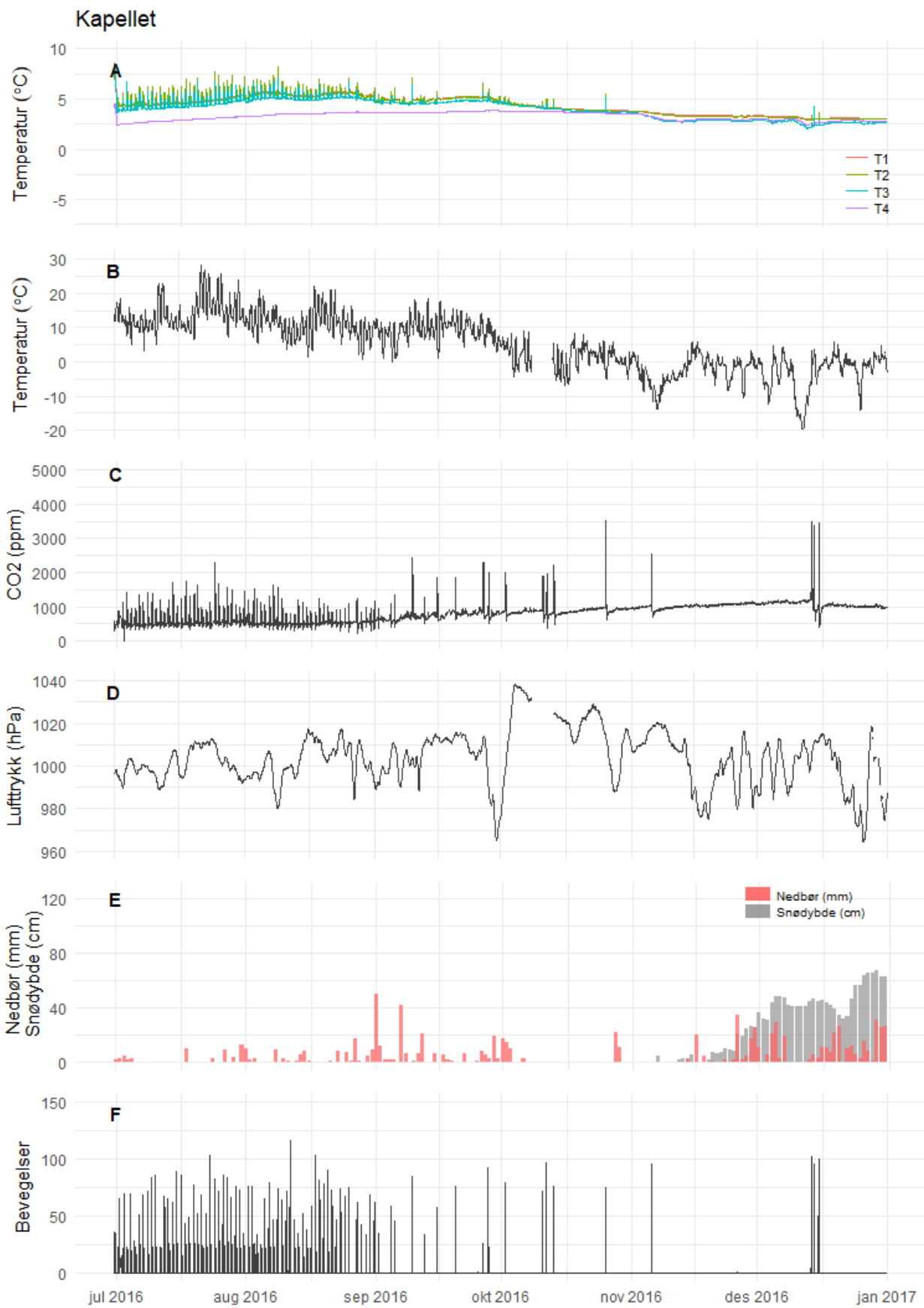


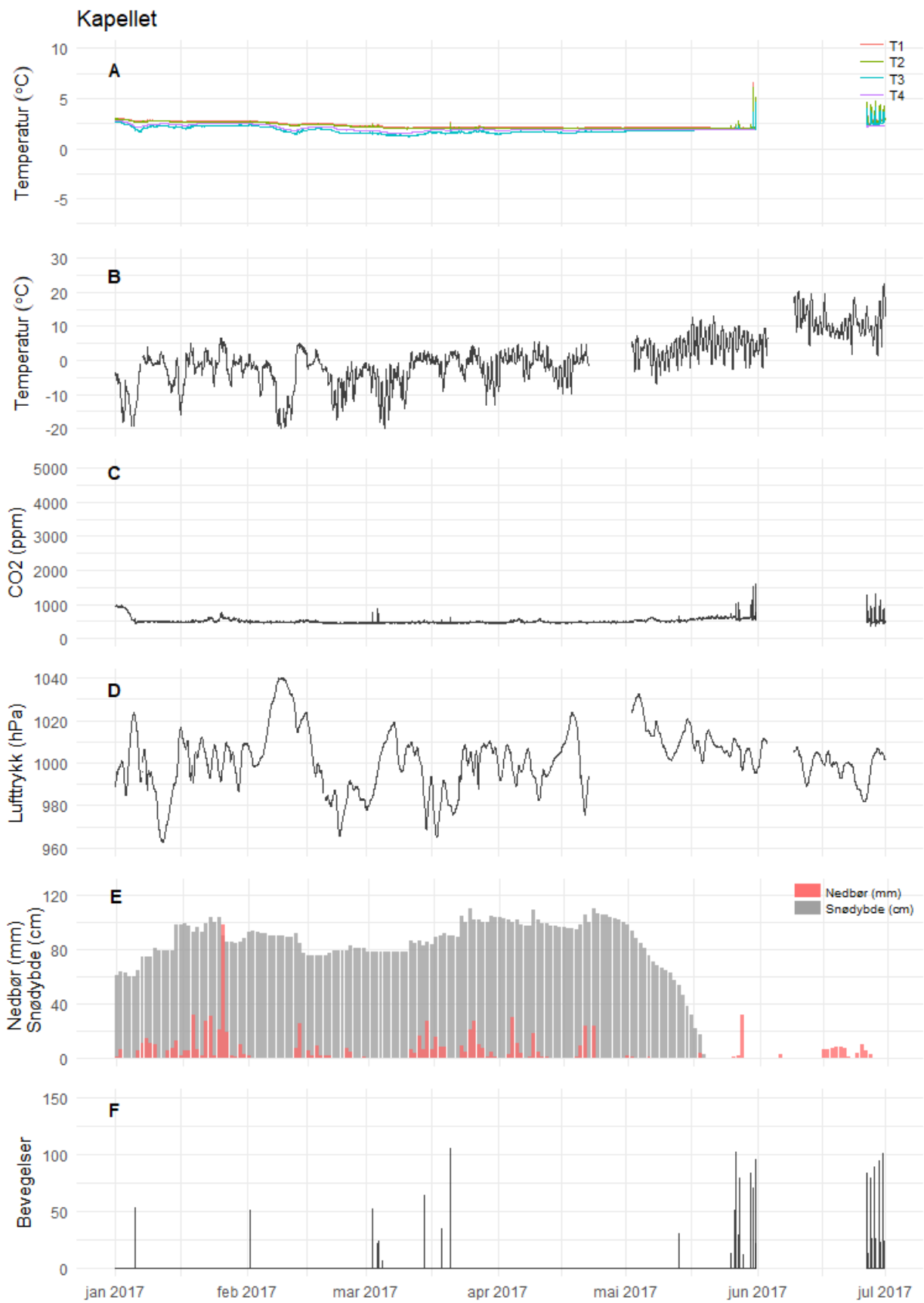


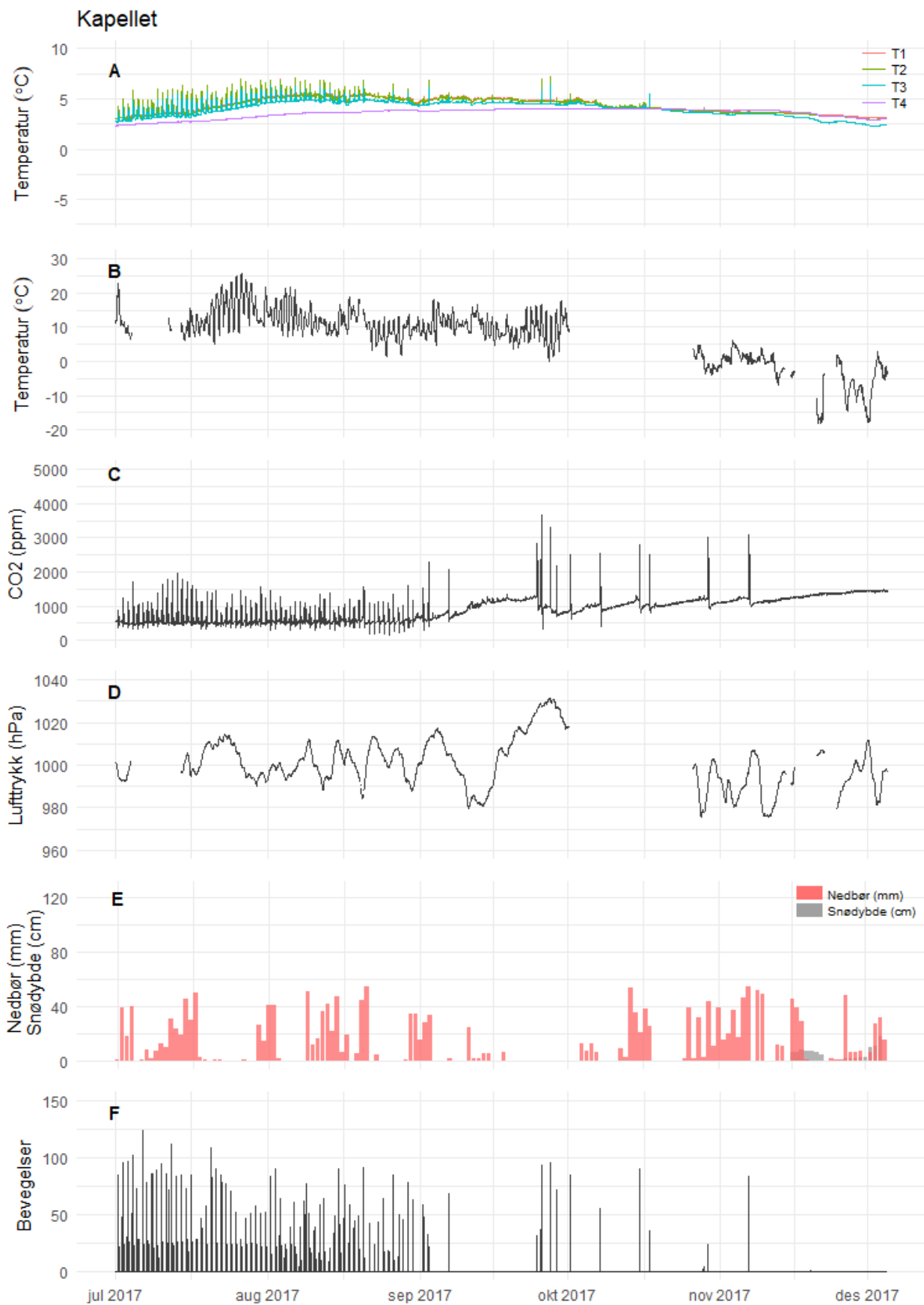


## Vedlegg 4B: 6 måneders bolker Kapellet

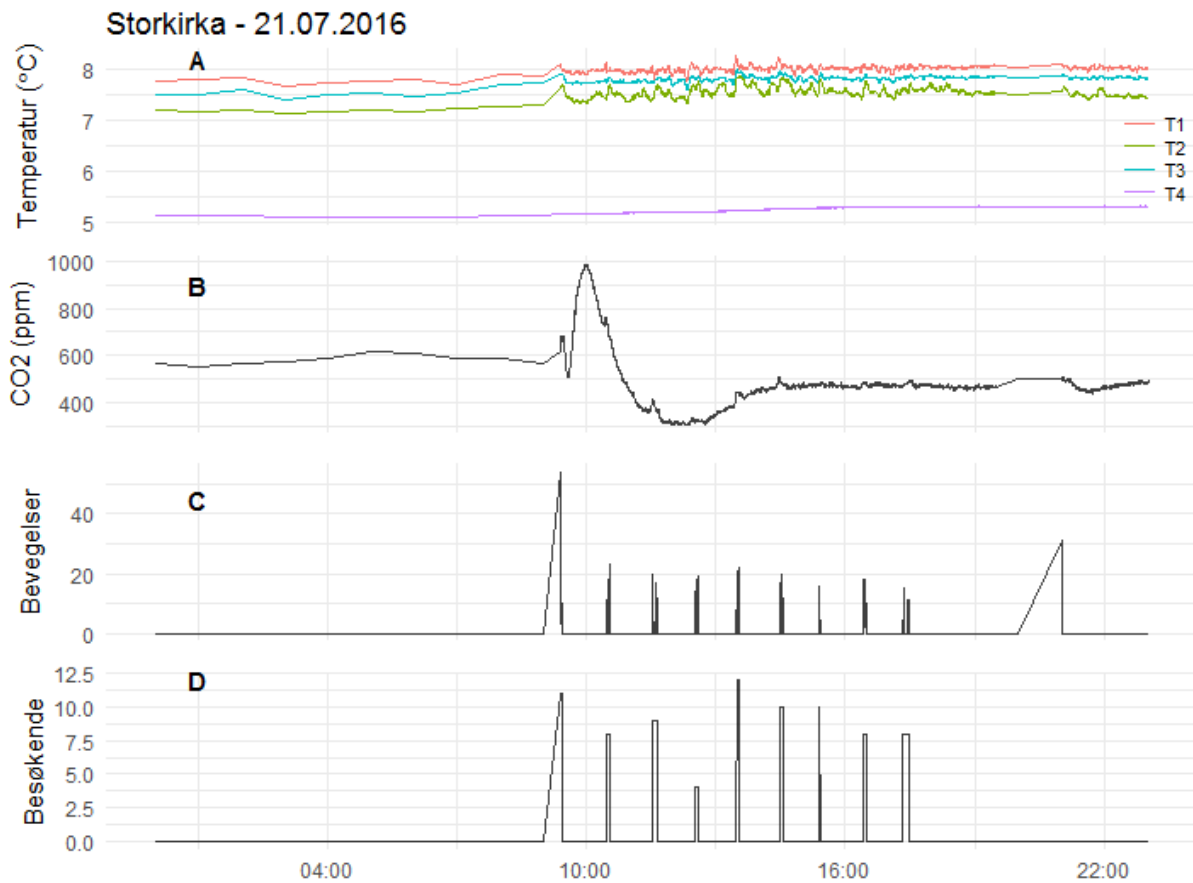
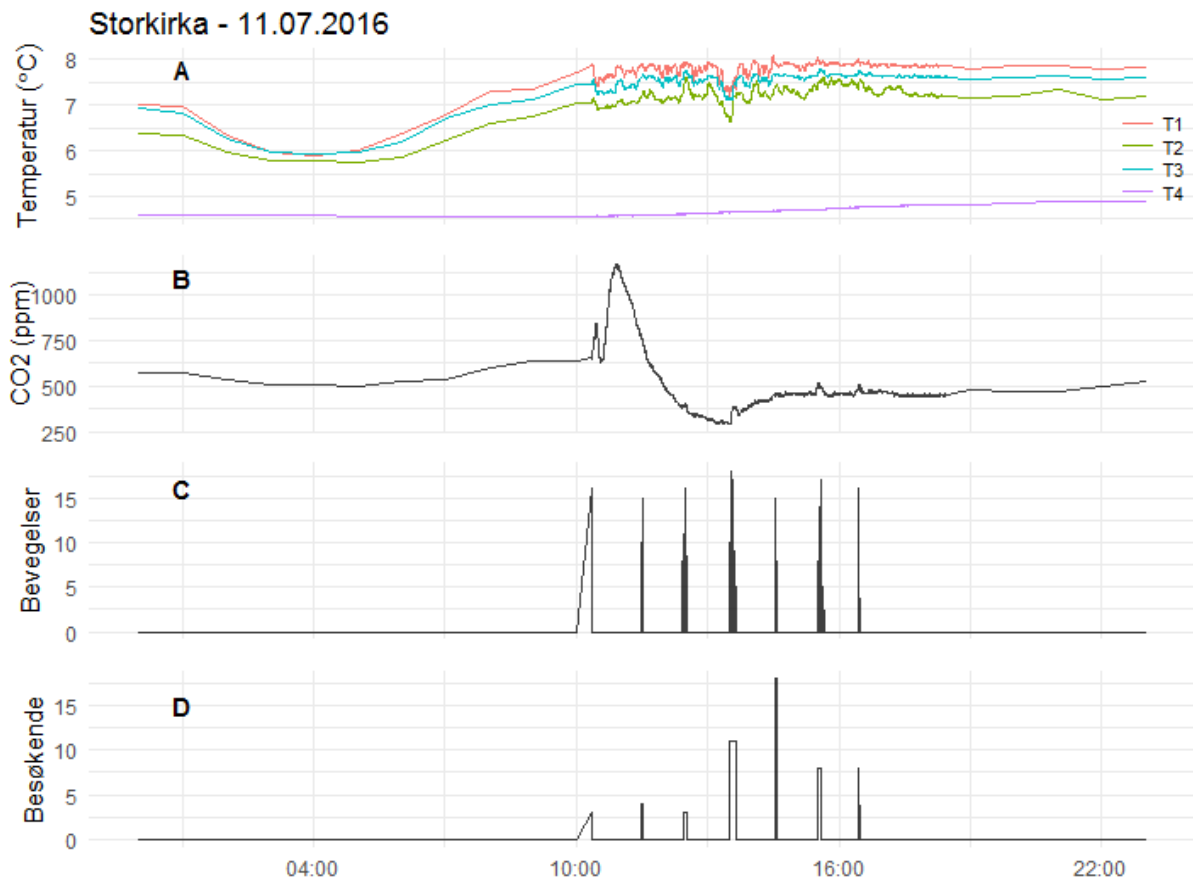




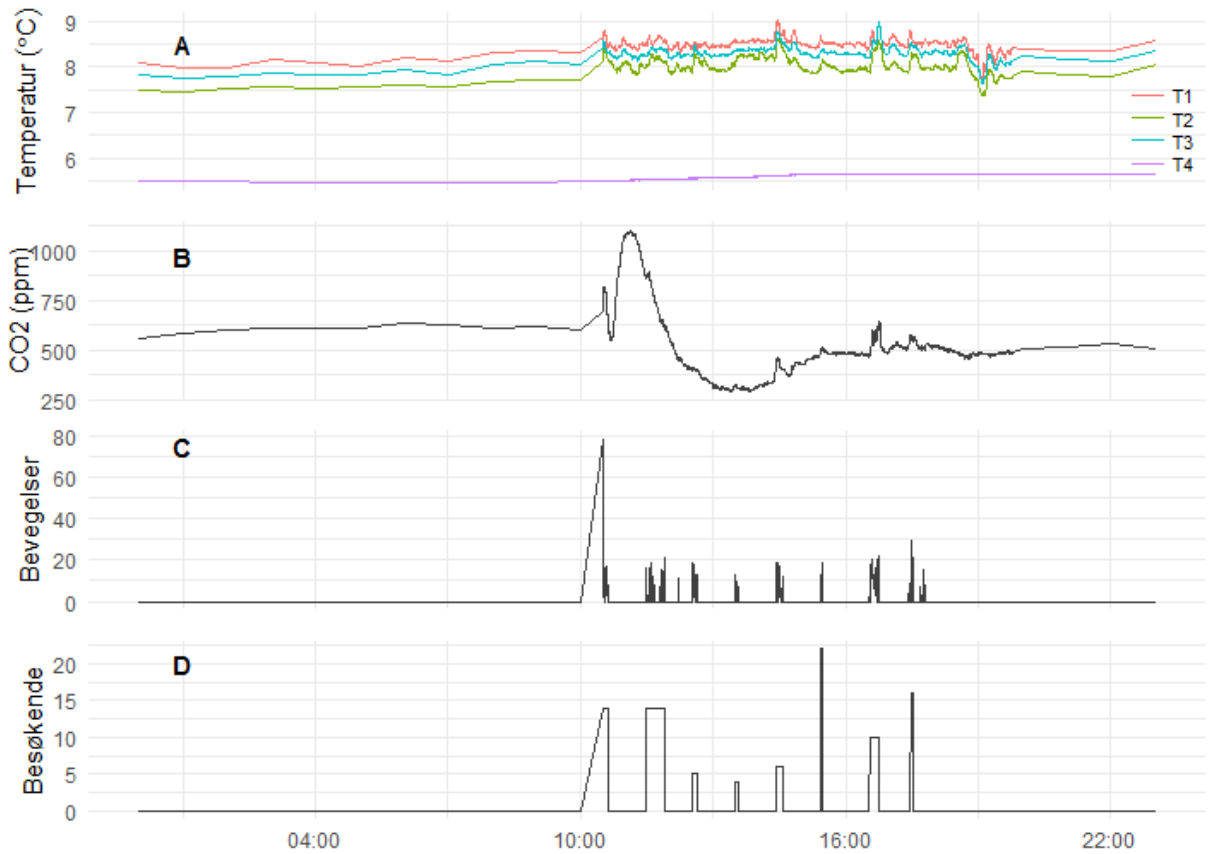




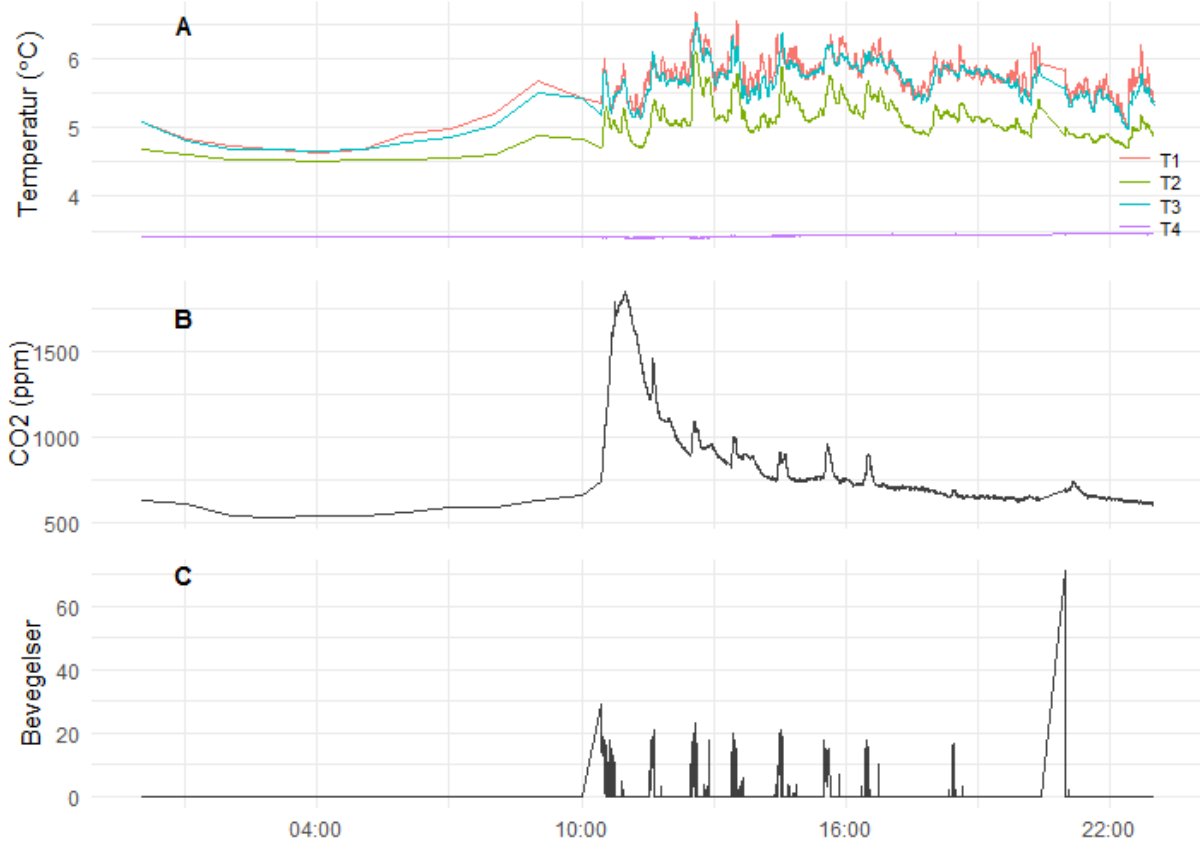
## Vedlegg 5A: Beskrivelse dag Storkirka



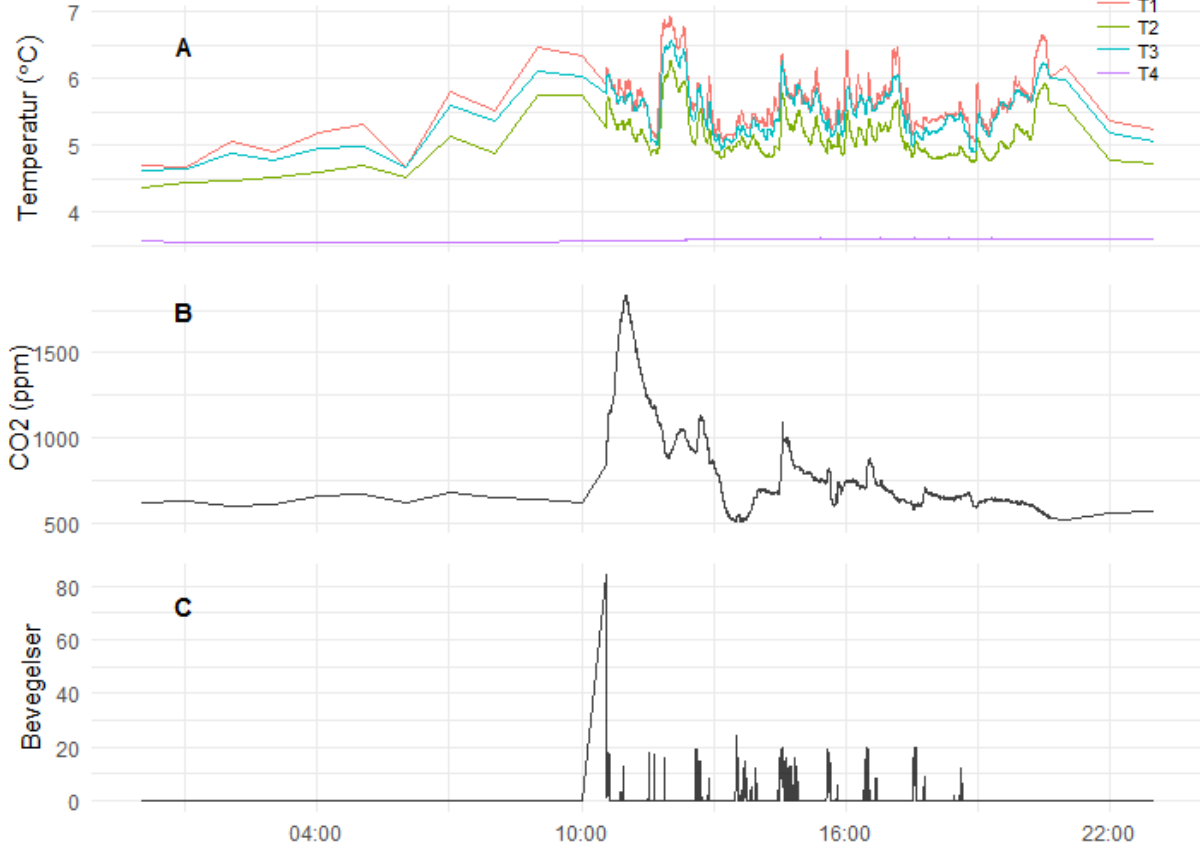
# Storkirka - 26.07.2016



### Storkirka - 11.07.2017

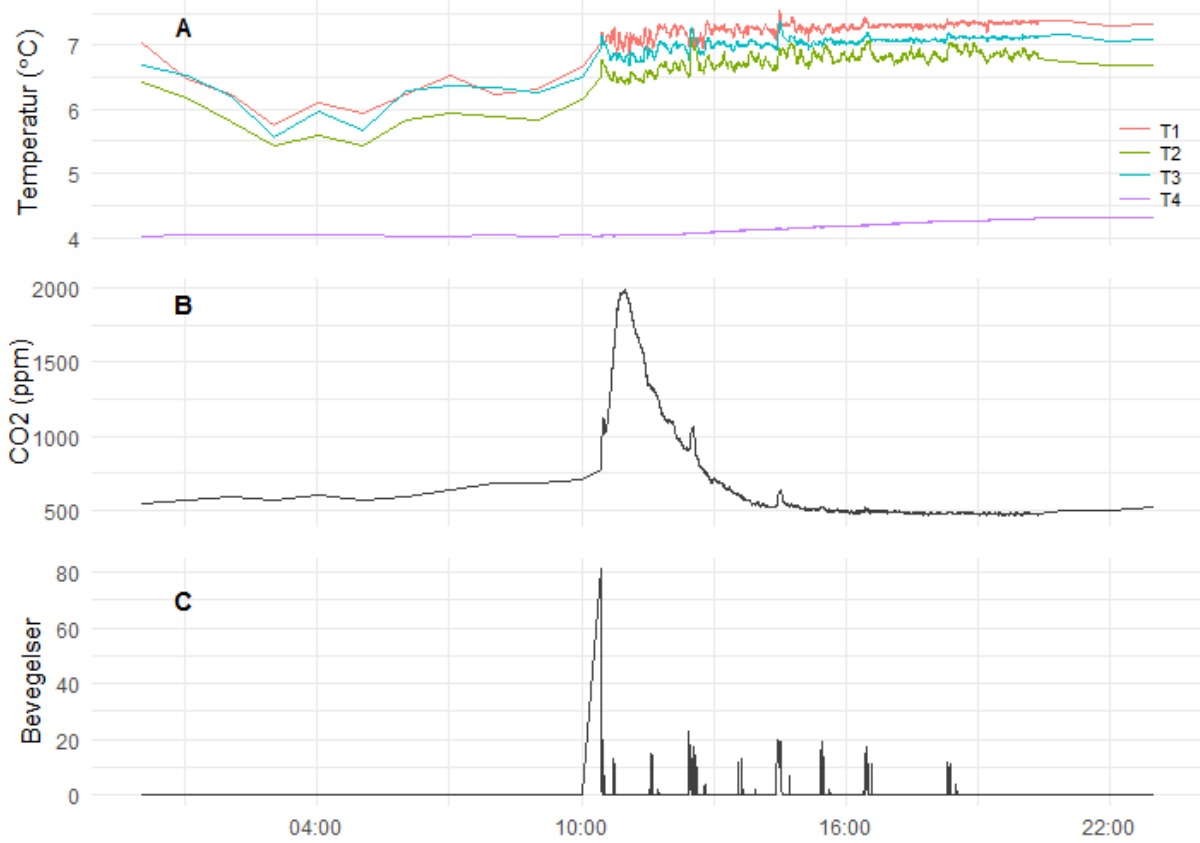


### Storkirka - 16.07.2017

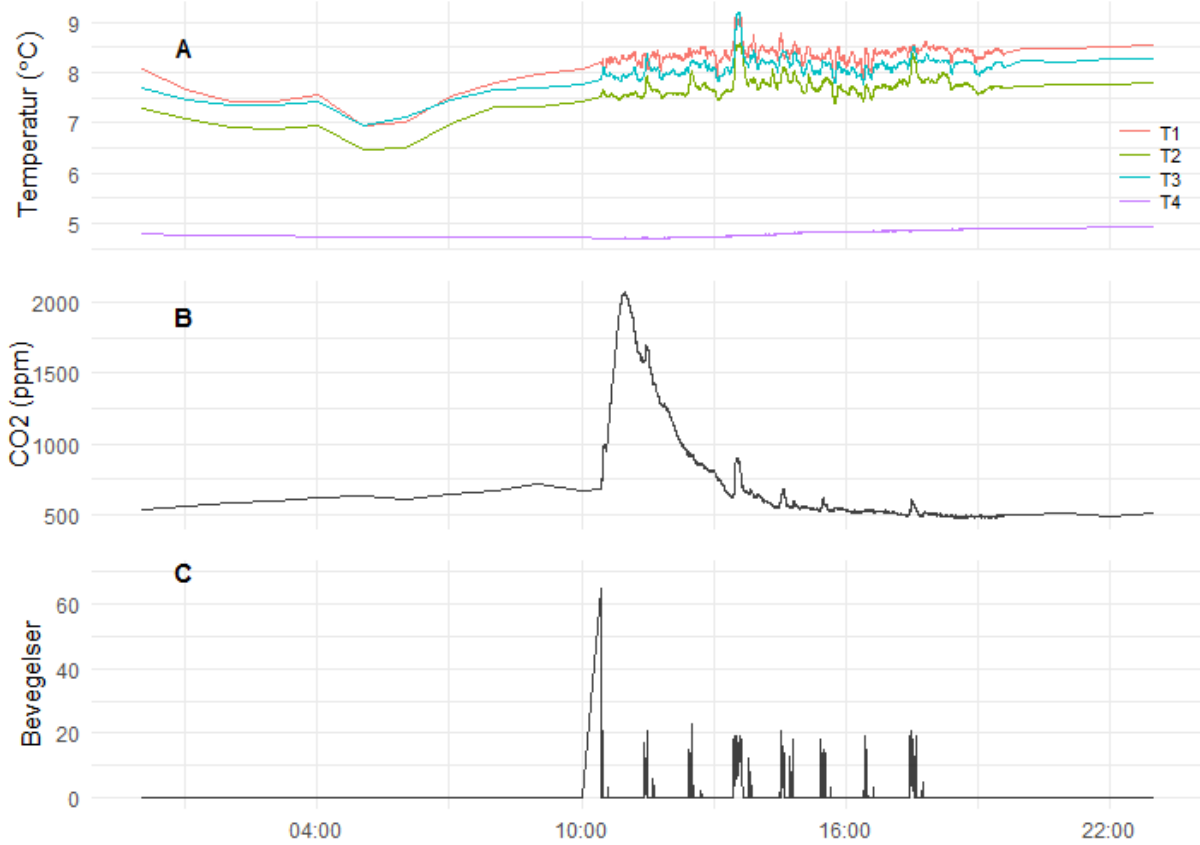




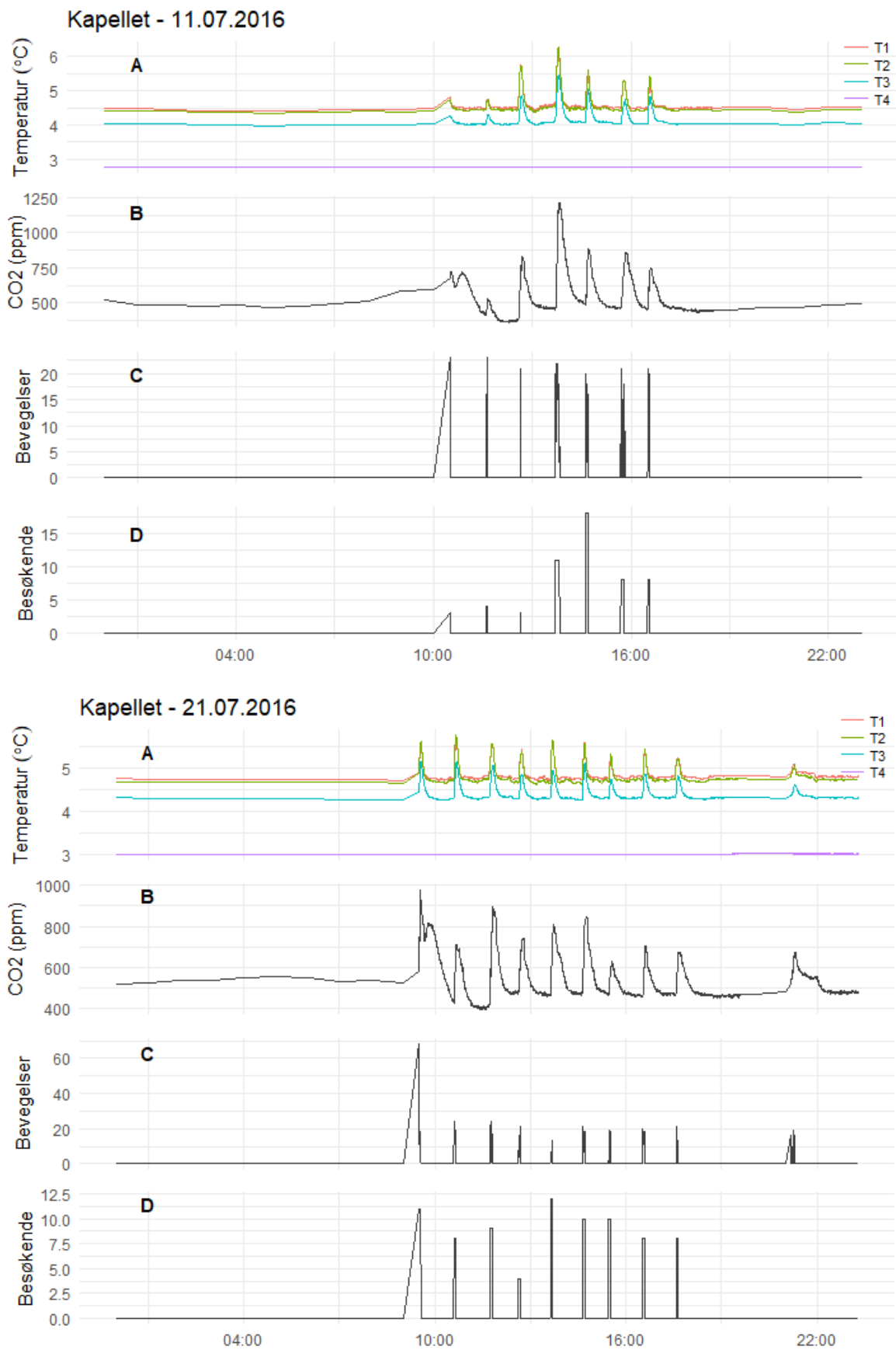
Storkirka - 21.07.2017

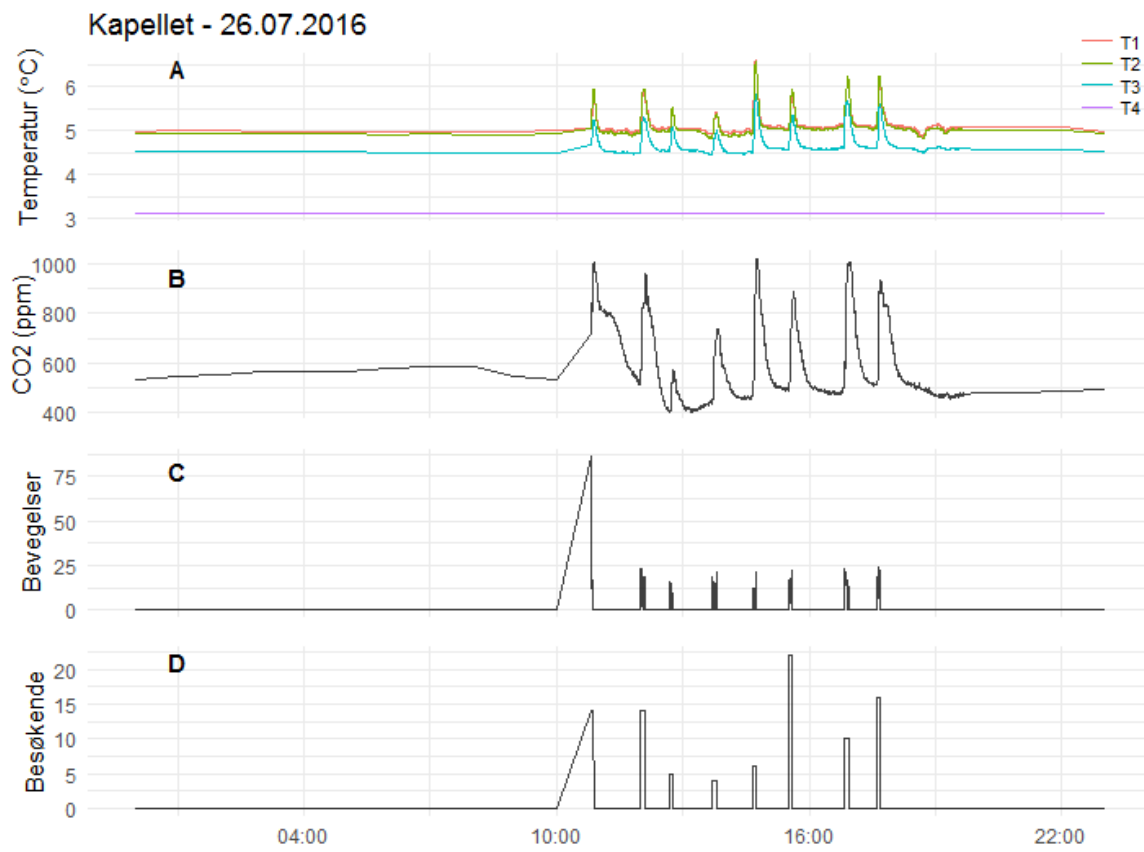


Storkirka - 26.07.2017

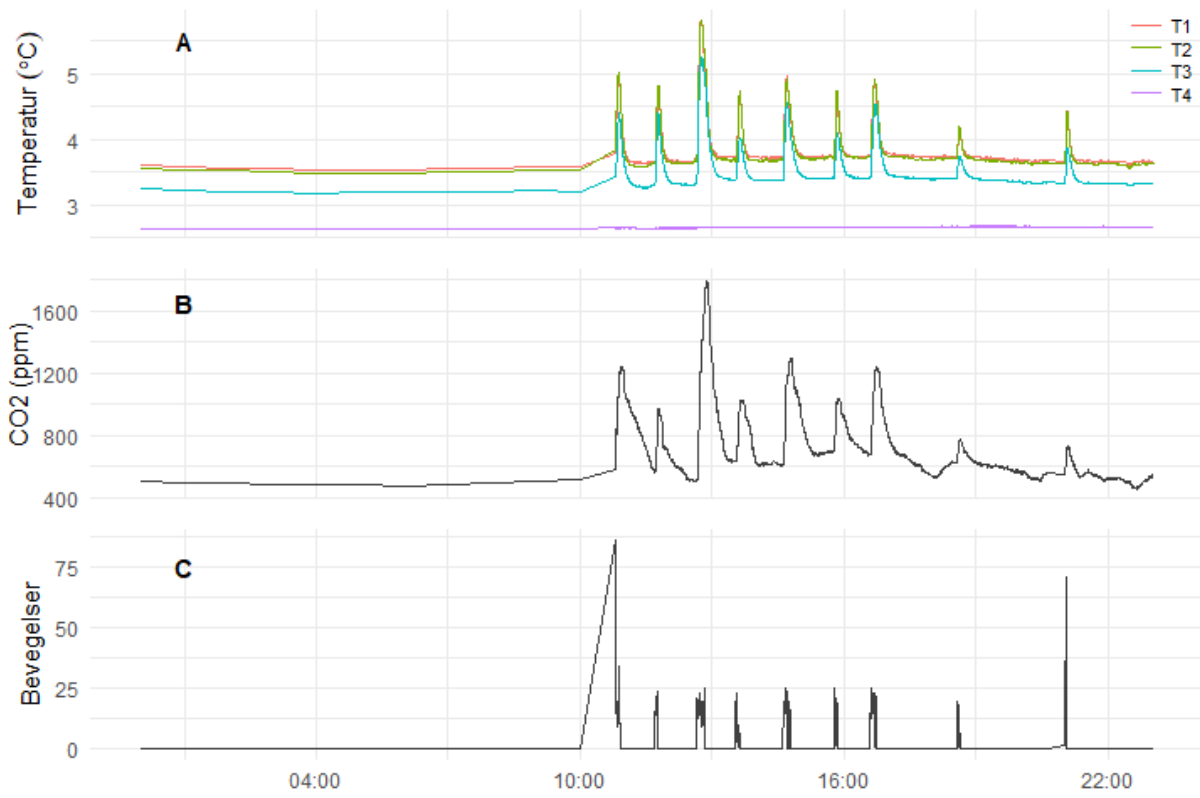


## Vedlegg 5B: Beskrivelse dag Kapellet

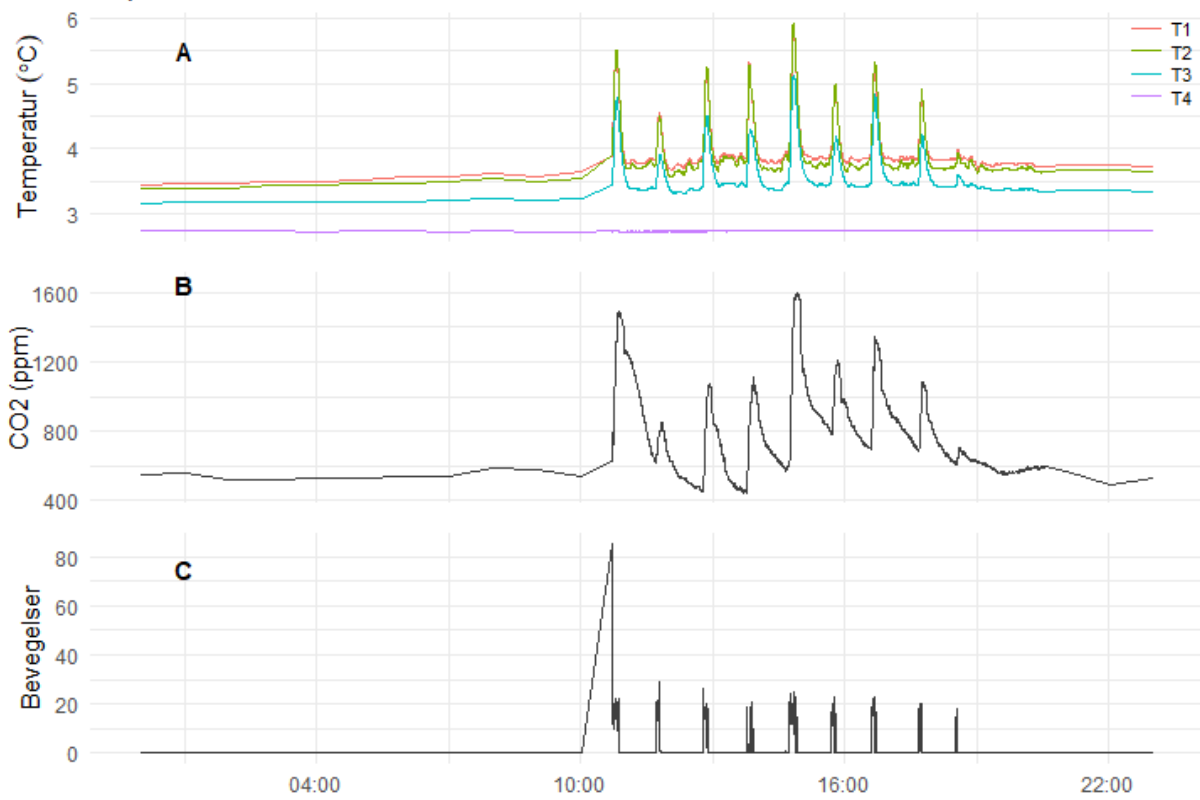




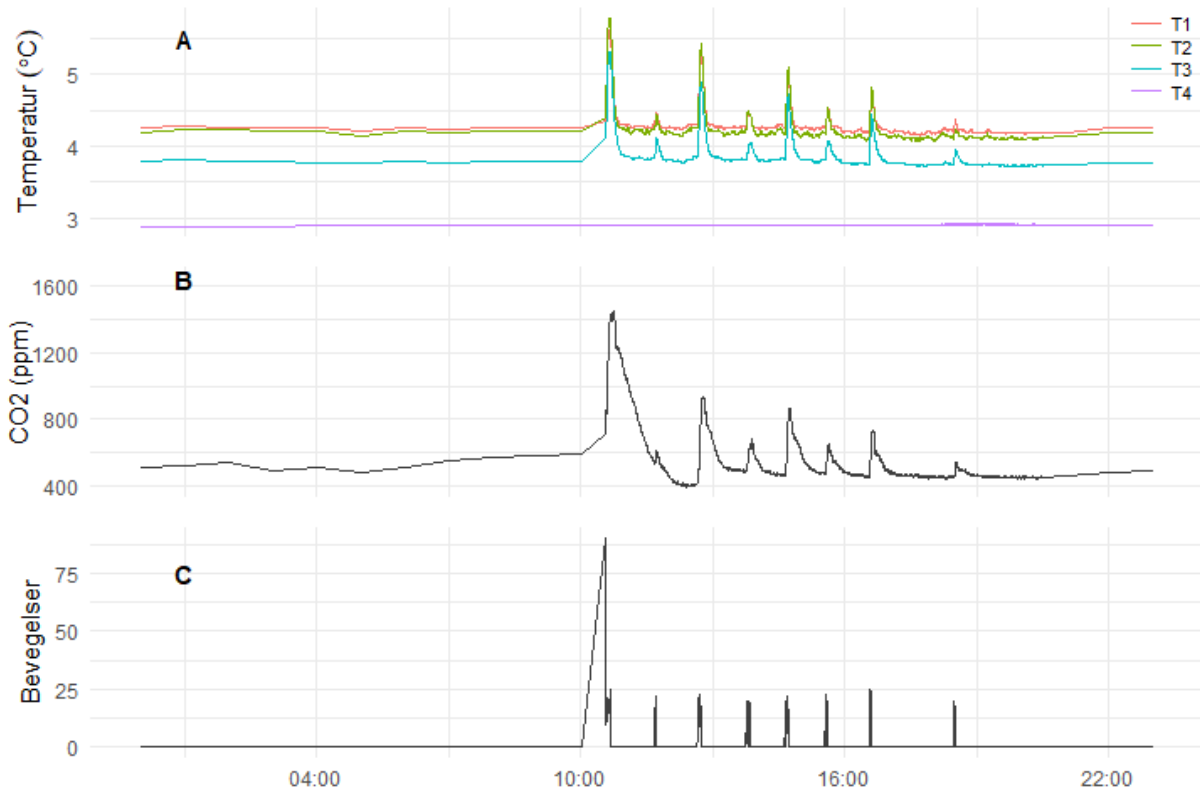
### Kapellet - 11.07.2017



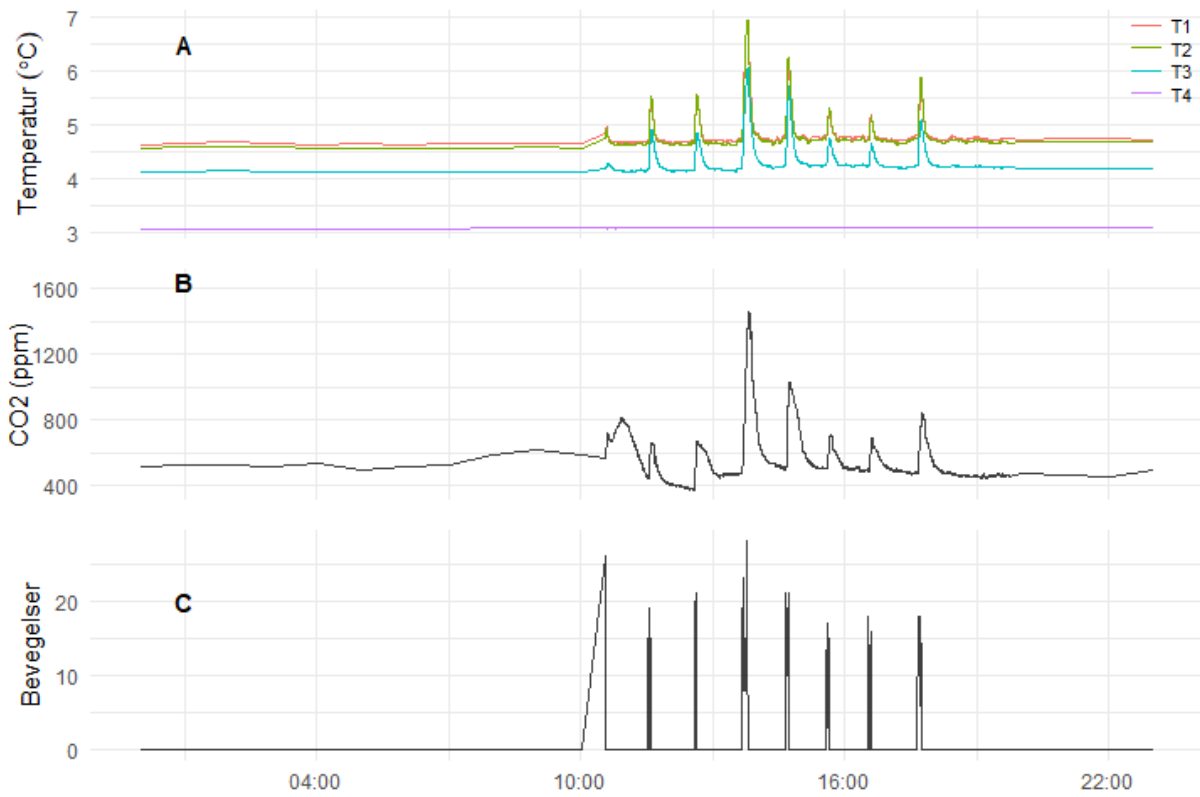
### Kapellet - 16.07.2017



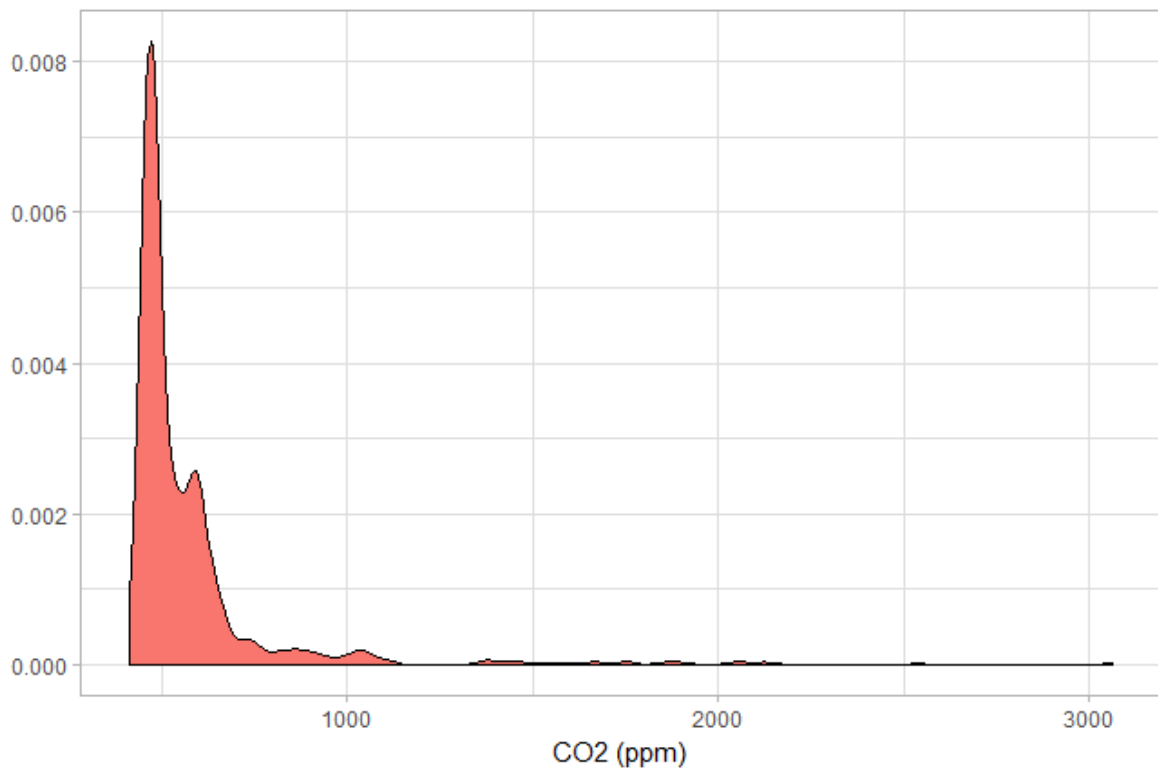
### Kapellet - 21.07.2017



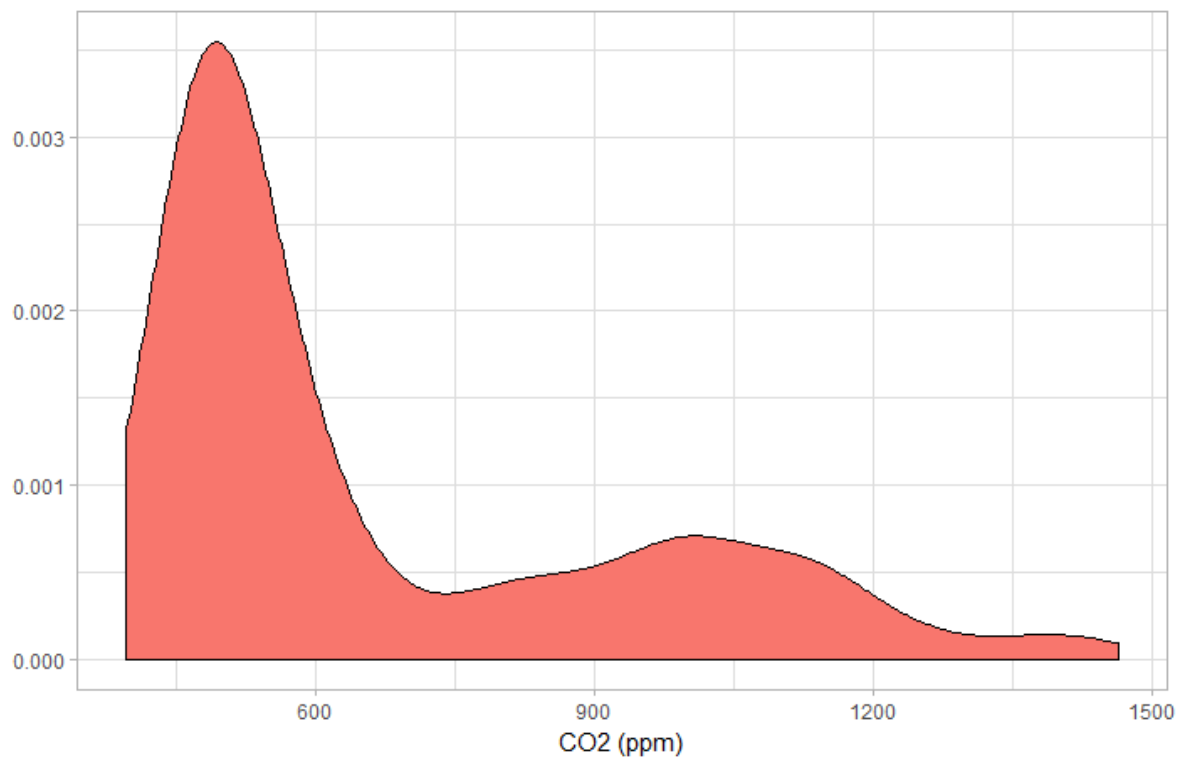
### Kapellet - 26.07.2017



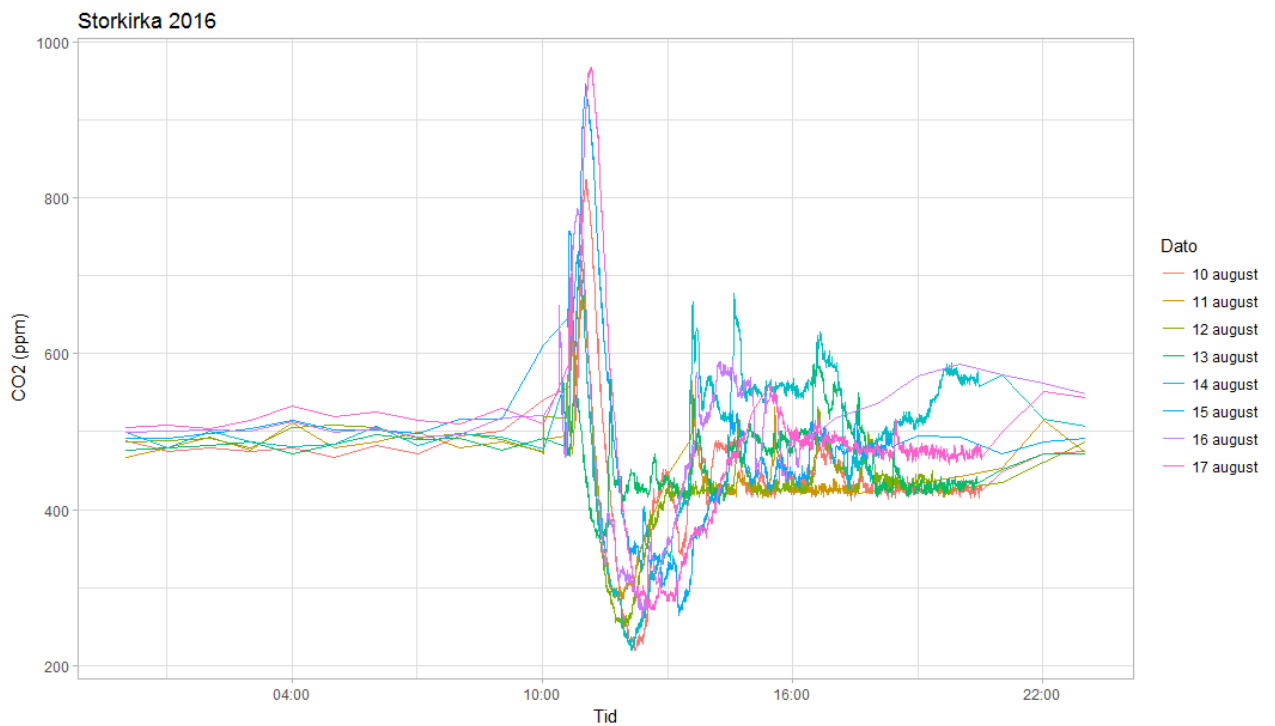
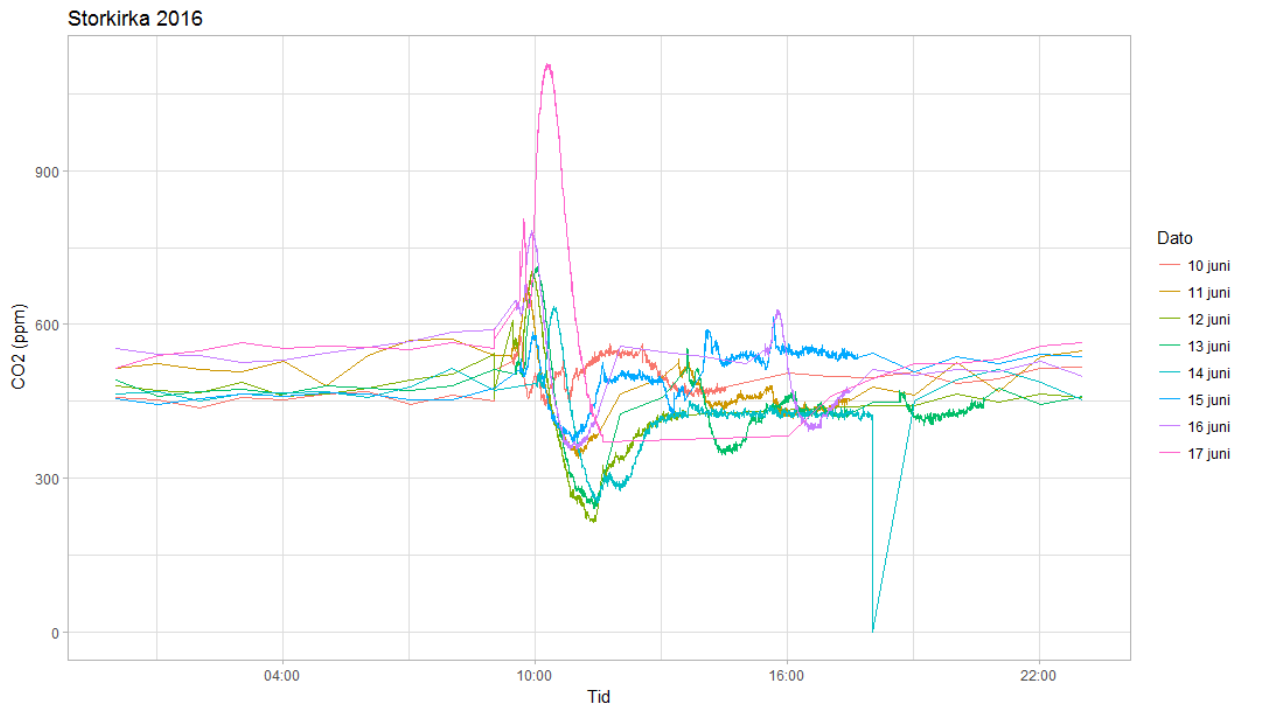
### Vedlegg 6A: Tetthetskurve CO<sub>2</sub> Storkirka



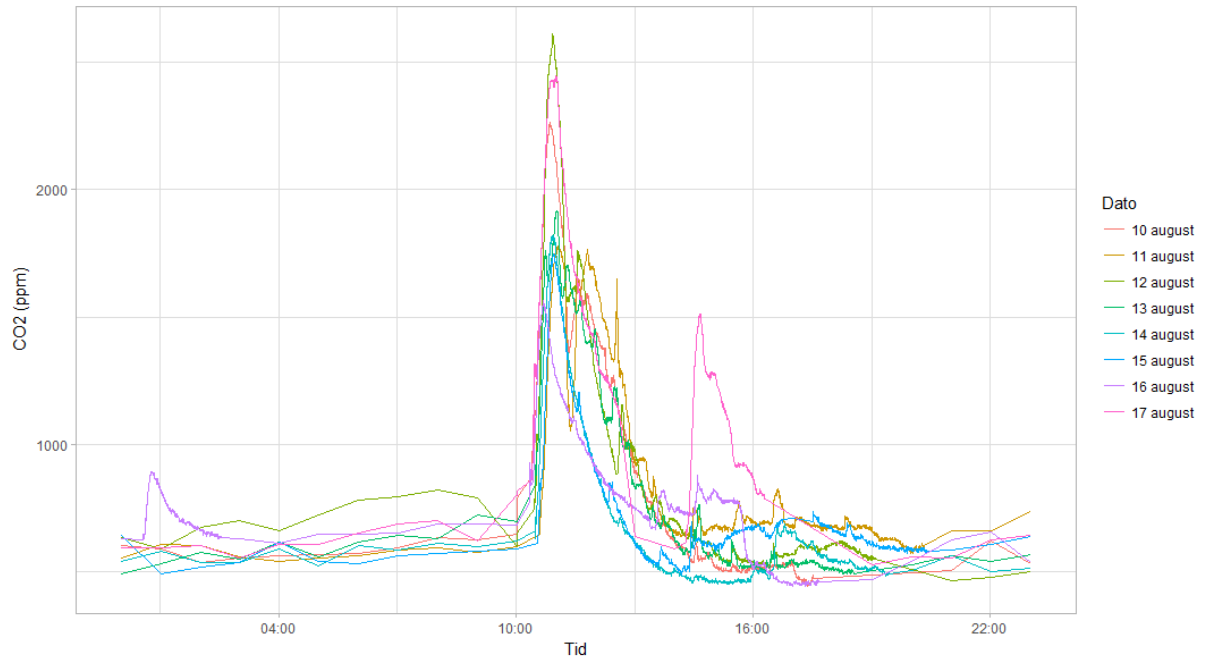
### Vedlegg 6B: Tetthetskurve CO<sub>2</sub> Kapellet



## Vedlegg 7: Overlappende CO<sub>2</sub>-utslag i Storkirka 2016 og 2017

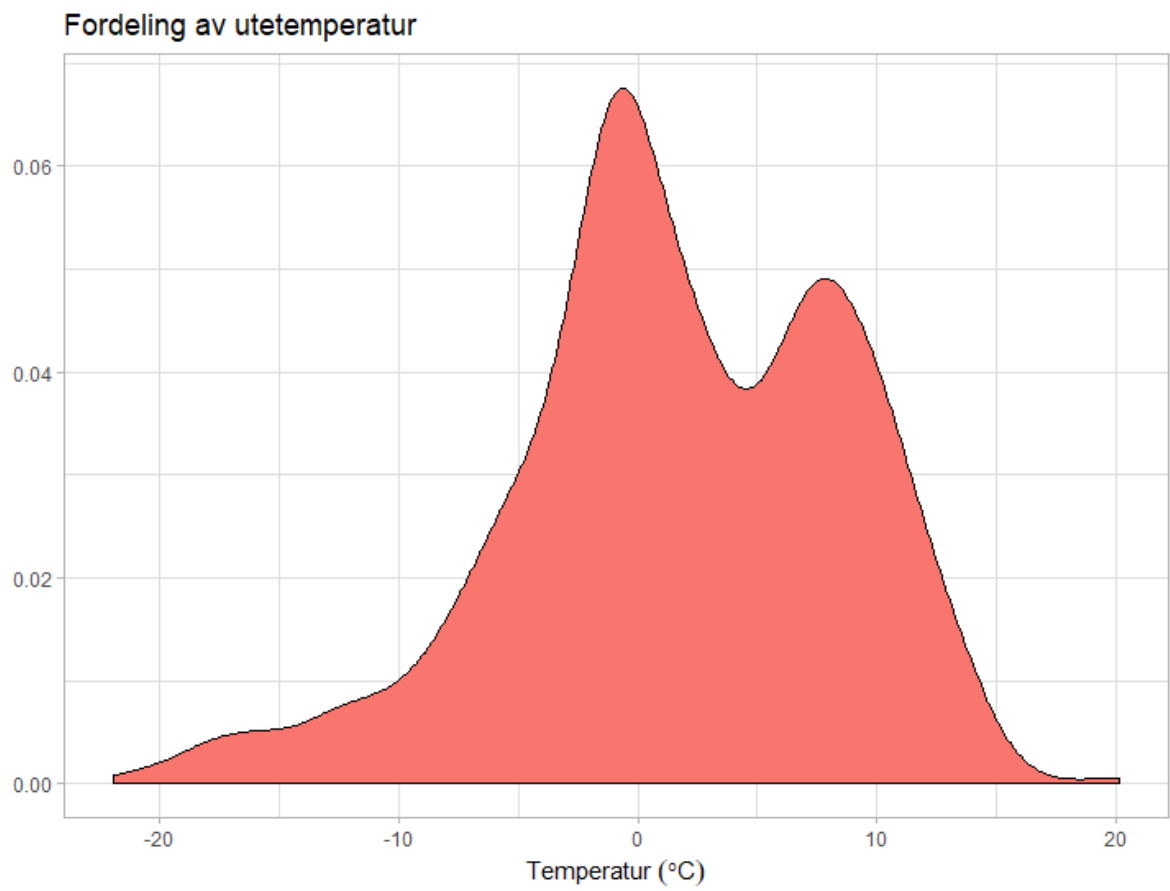


Storkirka 2017

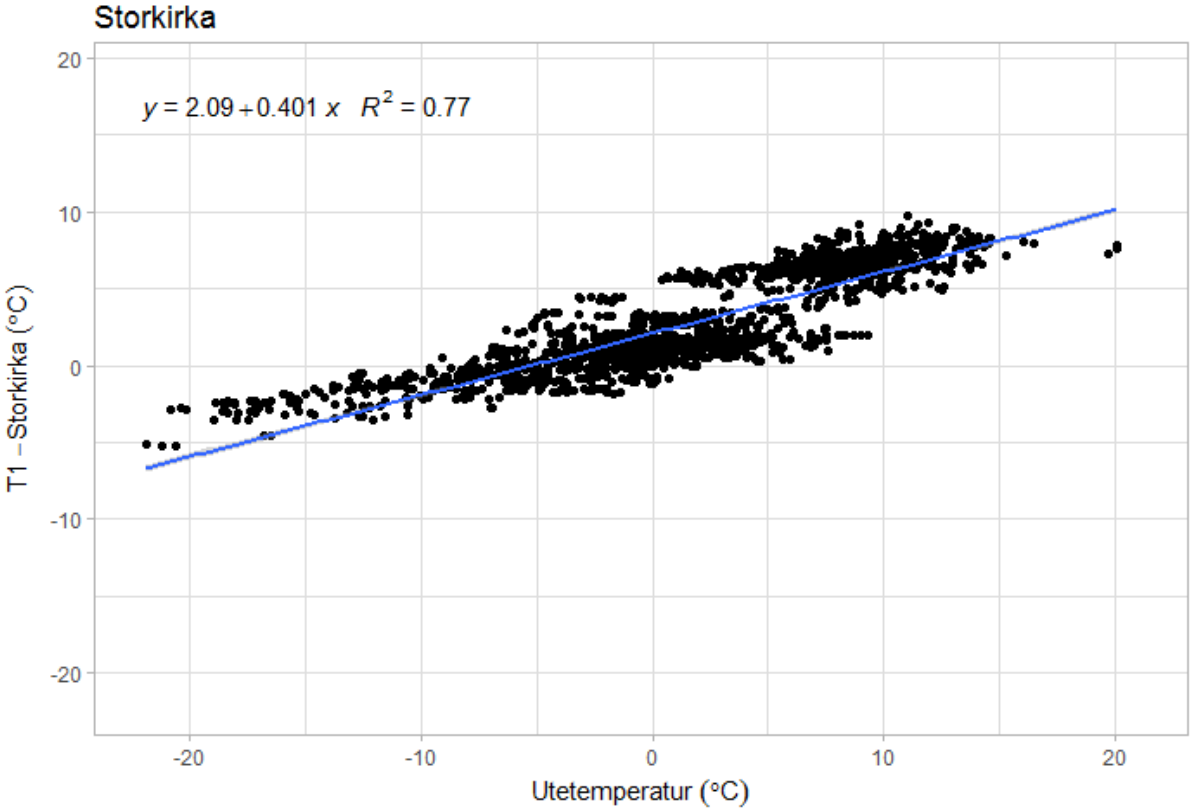


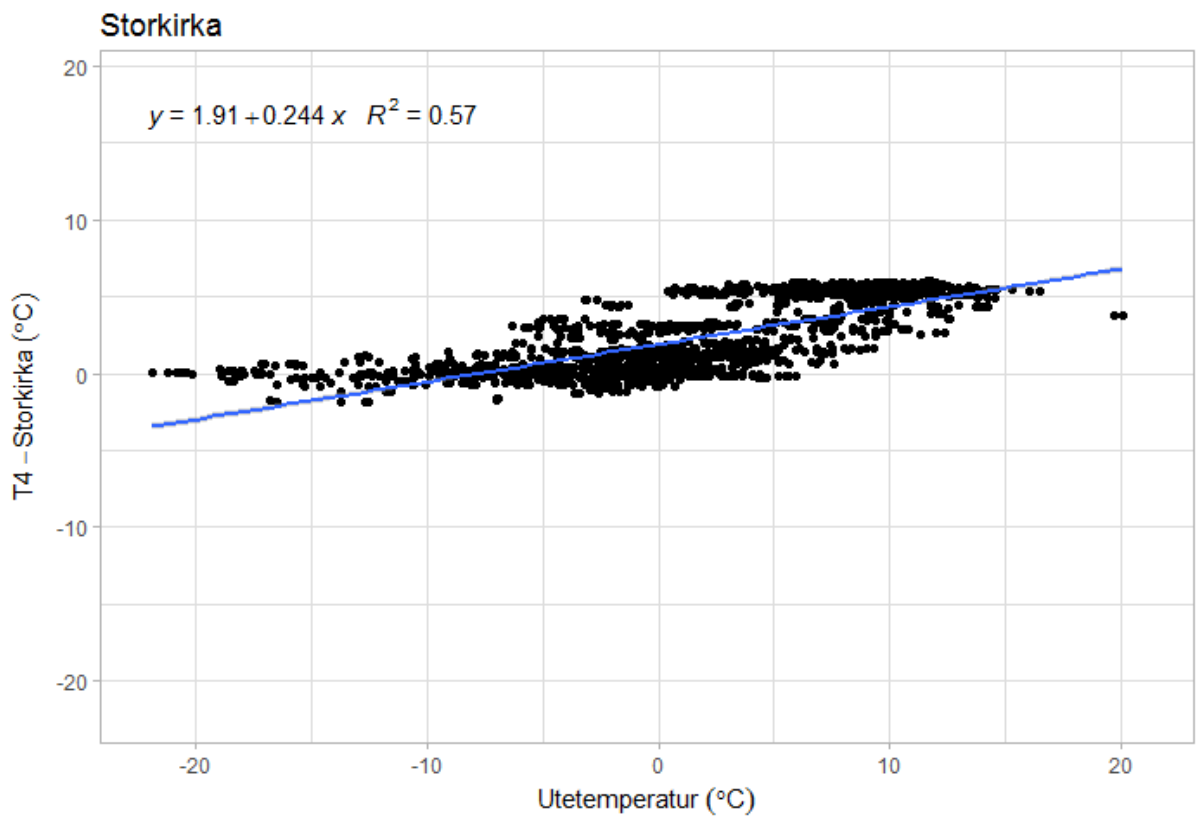
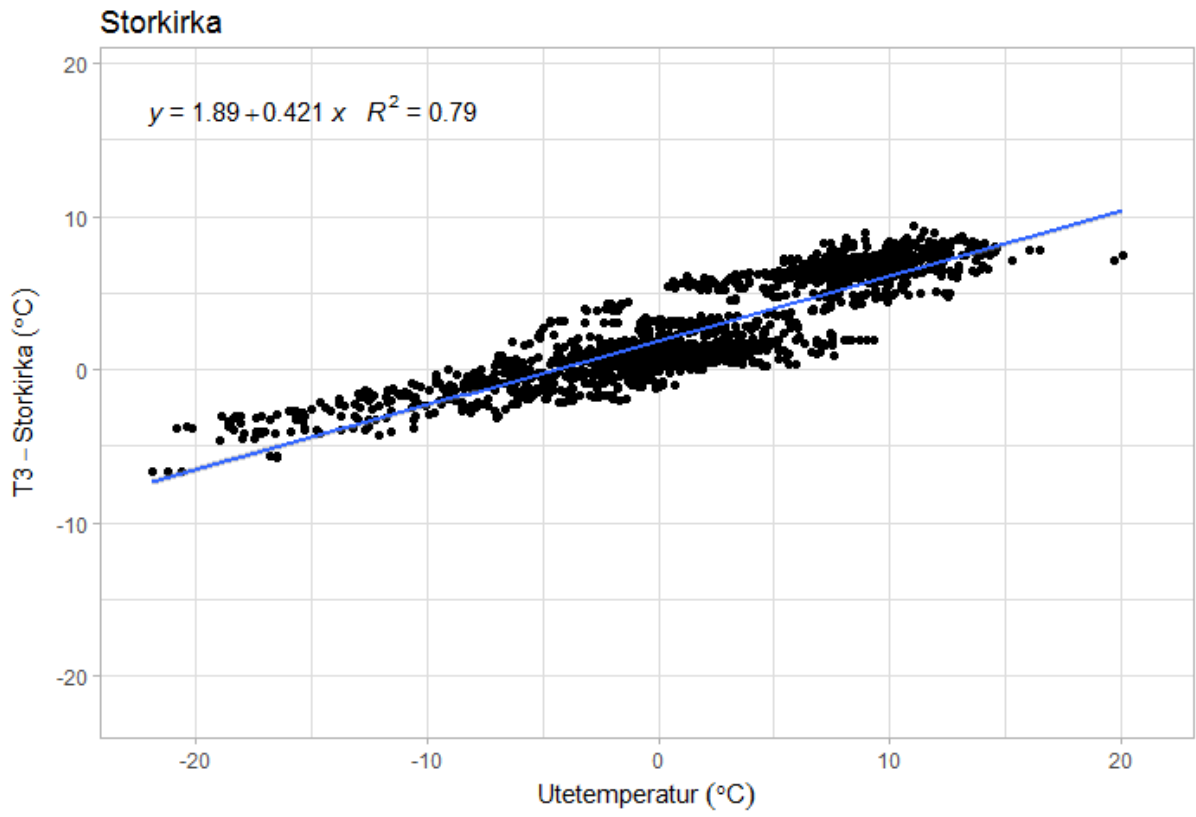


## Vedlegg 8: Fordeling av utetemperatur

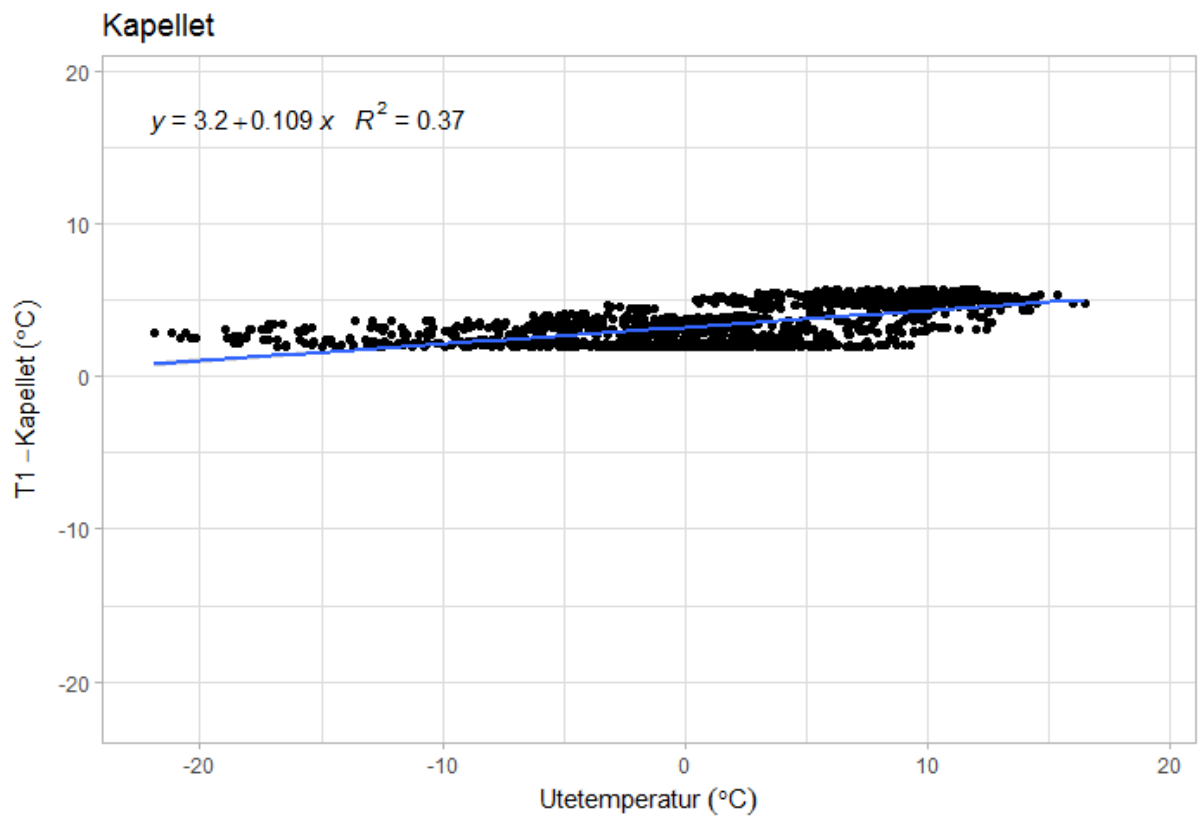


# Vedlegg 9A: Temperaturregresjon Storkirka

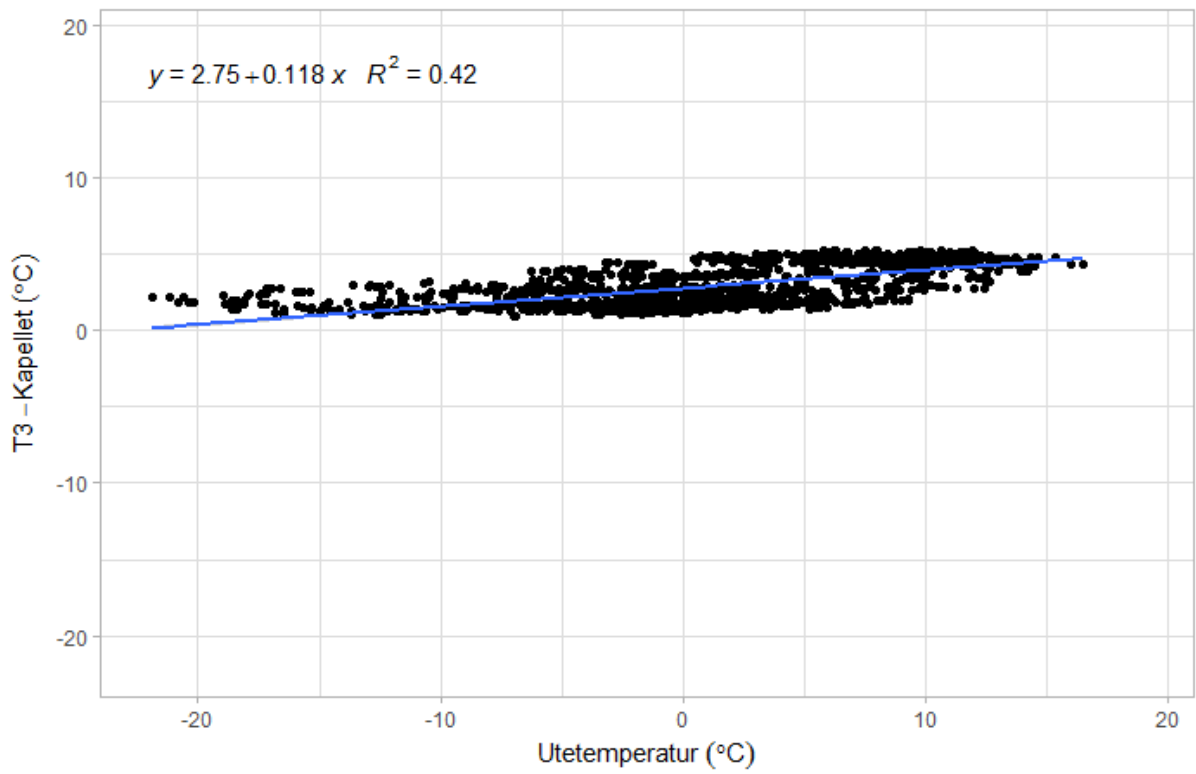




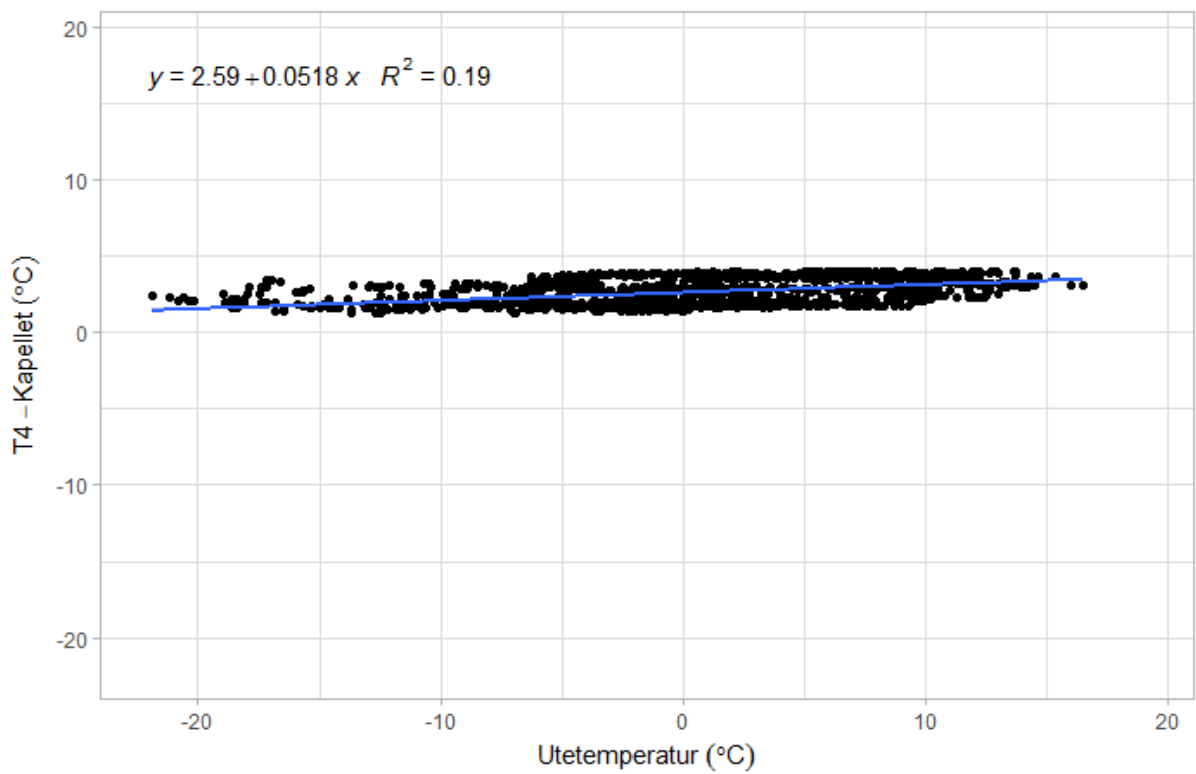
## Vedlegg 9B: Temperaturregresjon Kapellet



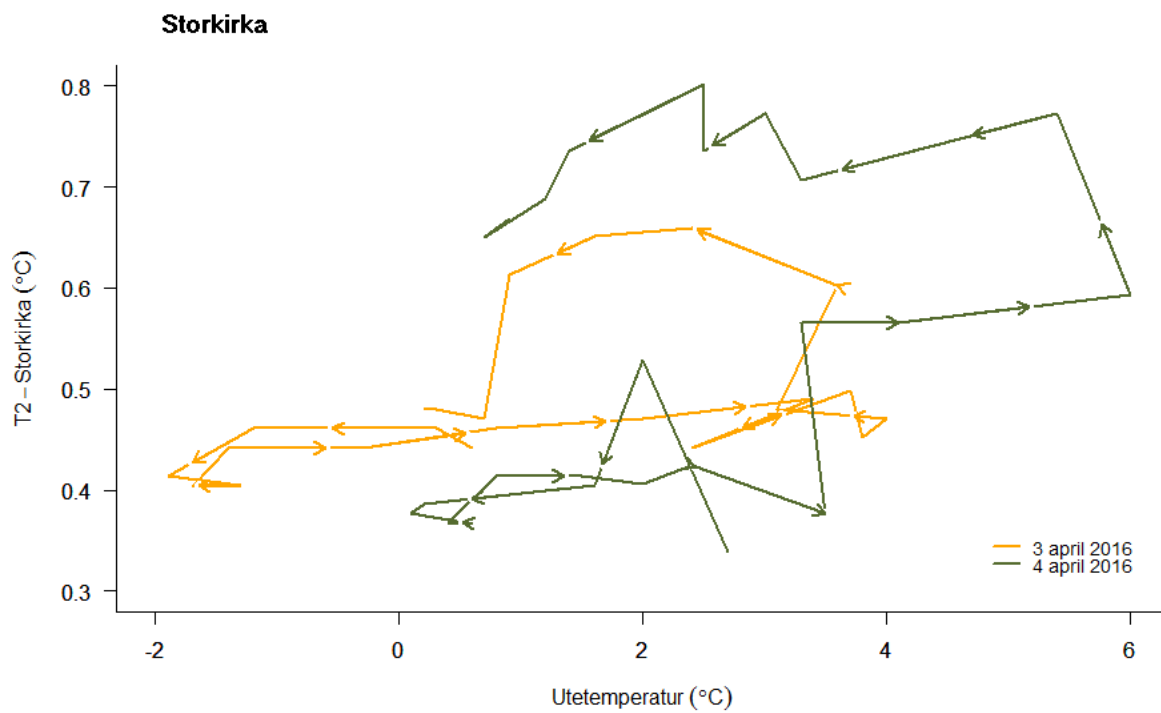
Kapillet



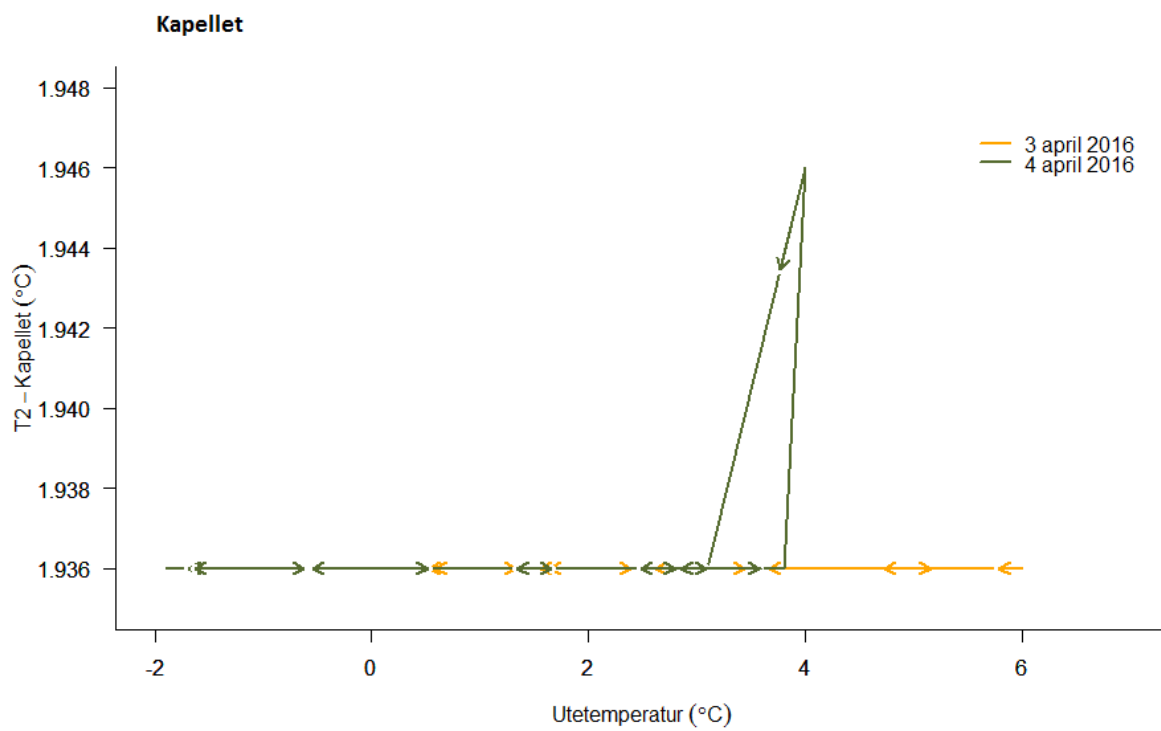
Kapillet



## Vedlegg 10A: Hystereseeffekt Storkirka



## Vedlegg 10B: Hystereseeffekt Kapellet



## Vedlegg 11: Forsinkelse mellom utetemperatur og grottetemperatur

Dato/tid	Minimumstemperatur ute	Dato/tid	Minimumstemperatur Storkirka			Differanse i tid (t)
			T1	T2	T3	
07.11.16 kl. 06:00	-12.8	07.11.16 kl 10:00	-1.98	-2.88	-3.01	4
11.12.16 kl. 22:00	-19.5	11.12.16 kl. 22:00	-3.61	-4.66	-4.84	0
05.01.17 kl. 02:00	-20.9	05.01.17 kl. 07:00	-5.39	-6.72	-6.88	5
09.02.17 kl. 05:00	-19.9	09.02.17 kl. 10:00	-2.90	-3.66	-3.73	5
22.02.17 kl. 02:00	-16.4	22.02.17 kl. 07:00	-2.52	-3.14	-3.27	5
05.03.17 kl. 07:00	-18.8	05.03.17 kl. 08:00	-3.25	-4.09	-4.22	1
29.03.17 kl. 05:00	-11.9	29.03.17 kl. 06:00	-1.08	-1.50	-1.62	1