



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Deteksjon av vannlekkasjer og varmgang i elektriske elementer i tunnel ved bruk av 3D-punktsky med termografisk informasjon

Detection of water leaks and heating in electrical
elements in tunnels using 3D-pointclouds with
thermographic information

Ole-Håkon Tronsli Drabløs
Geomatikk
Fakultetet for realfag og teknologi

Forord

Oppgaven er skrevet for Scan Survey AS, og er en milepæl for meg personlig etter 5 herlige år på Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU). Jeg har hatt gode støttespillere i mine veiledere Amanuensis Ivar Maalen-Johansen, NMBU, og sivil ingeniør Morten Taraldsten Burnes, Scan Survey AS. En stor takk rettes til dere for hjelp og støttende ord underveis.

I tillegg skal Professor Thomas Kringlebotn Thiis takkes for god hjelp med forståelsen av teknologien brukt i oppgaven og for å være en jeg har kunne spurt om alt jeg har lurt på gjennom arbeidet. Takk skal dere ha alle tre!

Etter 18 år med skolegang er tiden inne for å tre inn i de voksnes rekker, begynne å jobbe og slutte med alt av tull og fanteri som har funnet sted de siste 5 årene på Ås. I den anledning rettes en stor takk til Studentsamfunnet i Ås, Broderskapet Unity og foreningslivet samt mine mange samboere gjennom alle årene med mye moro.

Takk for meg!

Ole-Håkon Tronsli Drabløs, Ås, 10.05.2018

Sammendrag

3D-modellering har eksistert lenge og i den siste tiden har det blitt eksperimentert med en blanding av laserskanning og termografi. Kombinasjonen av disse kan gi 3D-modeller med god nøyaktighet inklusive informasjon om varme objekter, lekkasje i form av vann eller isolasjon og eventuelle defekte elektriske komponenter.

Denne masteroppgaven tar for seg hva slags informasjon som kan hentes ut av en slik punktsky. Datainnsamlingen er gjort med et mobilt kartleggingssystem med en termisk enhet, som består av 4 termiske kameraer med 360° dekning vertikalt på kjøreretningen.

Oppgaven går ut på å detektere varmgang i elektroniske elementer og vannlekkasjer i tunnel. Det ble gjort et forsøk på å kalibrere kameraene da innsamlingen av data ikke ga en uniform punktsky og samme overflate/objekt som har blitt fanget opp av to ulike kameraer ikke hadde samme farge i punktskyen, altså ulik målt temperatur. Dermed ble det gjort et forsøk på å finne årsaken til forskjellen i målt temperatur i hvert kamera og å kalibrere kameraene for å kunne lage en informativ og god punktsky.

Mulighetene for en automatisering av deteksjonsprosessen for å effektivisere arbeidet ble også drøftet, samt det ble testet ut en egen metode for dette.

Denne masteroppgaven kom frem til at det er mulig å detektere både vannlekkasjer i tunnel der vannet har trengt inn i tunnelen og varmgang i elektriske elementer basert på en punktsky med termisk informasjon. Det må tas hensyn til hva som skal detekteres i form av hvilken egenskap på punktskyen det skal filtreres på og satt temperaturspenn på punktskyen. En uniform punktsky ble laget etter en offset-korreksjon, og at en kalibrering kanskje ikke er nødvendig da en feilkilde kan skyldes den forvirrende punktskyen. En automatisering av deteksjonsprosessen kan gjøres for å oppdage varmgang, men det må jobbes mer med andre alternativer for å detektere lekkasje enn det som er gjort i denne oppgaven grunnet begrensinger i brukt programvare.

Abstract

3D-modeling has been around for a long time and lately it has been experimented with a blend of laser scanning and thermography. The combination of these can provide 3D-models with good accuracy including information about hot objects, leakage in the form of water or insulation and any defective electrical components.

This master thesis takes care of what information can be obtained from such a point cloud. The data collection is done with a mobile mapping system with a thermal device, with 4 thermal cameras that provide 360 ° vertical coverage to the driving direction.

The task is to detect heating in electronic elements and water leaks in tunnels.

Due to the fact that there are 4 cameras, an attempt has also been made to calibrate these as the collection of data did not give a uniform point cloud and the same surface / object that was captured by two different cameras did not have the same color in the cloud, i.e. different measured temperature. Thus, an attempt was made to find the cause of the difference in measured temperature and to calibrate the cameras to create an informative and good spot cloud.

The possibilities for automation of the detection process to streamline the work were also discussed and an own developed method was tested for this.

This master thesis revealed that it is possible to detect both water leaks in tunnels where the water has penetrated the tunnel and heating in electrical elements from a point cloud with thermal information. Consideration must be given to what is to be detected in terms of which property on the point cloud it is to be filtered and set temperature range on the point cloud. A uniform point cloud was made after an offset correction and that a calibration may not be necessary as a source of error may be due to the confusing point cloud. Automation of the detection process can be done to detect heating, but it is necessary to work with other alternatives to detect leakage than what has been done in this task due to limitations in used software.

Innhold

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Innhold	VII
Figurliste:	XI
Tabelliste	XIII
1. Innledning	1
1.1 Problemstilling.....	1
1.2 Bakgrunn	1
1.3 Dette skal gjøres	2
1.4 Avgrensning.....	3
1.5 Liknende arbeid	3
2. Teori.....	5
2.1 IR-stråling og radiometri	5
2.2 Blackbody og emissivitet.....	11
2.3 Objektets egenskaper som spiller inn på emissiviteten	13
2.4 IR/termiske-kameraer	13
2.4.1 IR/termiske kameraer	13
2.4.2: Typen IR-sensorer	14
2.5 Bolometer	15
2.6 Nøyaktighet	16
2.6.1 NETD	16
2.6.2 Absolutt temperatur.....	16
2.7 Bølgelengder vs. Behov.....	16

2.8	Påvirkning fra sola, himmelen, og forhåndsregler for utendørs og innendørs målinger	17
2.9	«Switch-on»-oppførsel, drift og termisk sjokk.....	18
2.10	NUC.....	19
2.11	Deteksjon av vann med termografi og intensitet.....	21
2.12	Mobile Mapping System (MSS).....	22
3.	Metode.....	25
3.1	Del 1: Deteksjon av varme elektriske elementer og vannlekkasjer.....	25
3.1.1	Deteksjon av varme.....	25
3.1.2	Deteksjon av vann.....	26
3.2	Del 2: Kalibreringsprosessen.....	27
3.2.1	Metode 1: «NUC».....	28
3.2.2	Metode 2, del 1: Offset-korreksjon.....	28
3.2.3	Metode 2, del 2: Offset-korreksjon etter endt prosessering.....	29
3.3	Del 3: Automatisering av deteksjonsprosessen.....	29
3.3.1	Plotting av punkt basert på intensitet, rød-verdi og grunnriss-koordinater.....	29
4.	Resultater.....	31
4.1	Del 1: Deteksjon.....	31
4.1.1	Deteksjon av varme.....	31
4.1.2	Deteksjon av vann.....	32
4.2	Del 2: Kalibrering av kameraene.....	34
4.2.1	Metode 1: «NUC».....	34
4.2.2	Metode 2, del 1: Offset-korreksjon.....	34
4.2.3	Metode 2, del 2: Offset-korreksjon etter endt prosessering.....	37
4.3	Del 3: Automatisering av prosessen.....	42
4.3.1	Plotting av R-verdier og intensitetsverdier.....	42
5.	Diskusjon.....	44
5.1	Del 1: Deteksjon.....	44

5.1.2 Deteksjon av varme.....	44
5.2.2 Deteksjon av vann:.....	44
5.2 Del 2: Kalibrering	45
5.3 Del 3: Automatisering av prosessen	49
6. Konklusjon.....	51
6.1 Deteksjon	51
6.2 Kalibrering.....	51
6.3 Automatisering av prosessen	52
7. Videre Arbeid.....	53
7.1 Deteksjon og automatisering av prosessen	53
7.2 Kalibrering.....	53
7.3 Implementering av temperatur.....	53
8. Litteratur og kilder	54
9. Vedlegg	56
Vedlegg 1: Matlab-Script	56
Vedlegg 2: MatLab-funksjon.....	58
Vedlegg 3: Script for plotting av punktsky.	59

Figurliste:

Figur 1: Illustrasjon av hva som skal gjøres.....	2
Figur 2: Ulike kilder for ekstern påvirkning av et IR-kamera. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)	6
Figur 3: Bølgebevegelse (Vollmer and Klaus-Peter 2017)	9
Figur 4: Lys og inndelingen av IR-lyset til det termiske infrarøde-lyset (Vollmer and Klaus- Peter 2017)	9
Figur 5:Refleksjon og refraksjon, samt lovene som gjelder (Vollmer and Klaus-Peter 2017)	10
Figur 6: a) refleksjon ved en glatt flate b) refleksjon ved litt ruhet c) refleksjon ved en ru overflate.(Vollmer and Klaus-Peter 2017)	10
Figur 7: Sammenhengen mellom temperatur, bølgelengde og stråling.(Vollmer and Klaus- Peter 2017)	12
Figur 8: Microbolometer, hvor Readout Circuit(ROIC) og silikon er nederst, en refleksjonsflate ligger over(Sørger for optimalt absorpsjon), og VOX-en, det IR-absorberende materialet(Wikipedia 2018).....	15
Figur 9:Sammenheng mellom IR-bånd og temperatur(Tattersall 2016)	17
Figur 10: NUC-prosessen (Vollmer and Klaus-Peter 2017)	20
Figur 11: Hvordan en NUC gjennomføres	20
Figur 12:Reflektans av laser med forskjellige bølgelengde på ulike materialer(Husefest 2017)	22
Figur 13:t.v: MSS T.H: MSS m/ de termiske kameraene på toppen.....	23
Figur 14:Illustrasjon av rotasjonen og posisjonen til den termiske sensoren.....	24
Figur 15:Fargeskala, fra kaldt(blå) til varmt(rødt).	25
Figur 16:Punktsky farget av IR-bilder, temperaturspennet er på 5(blå)-15(rød)°C. Skjøt er tydelig, og de forskjellige t-banesporene samt vegger har store forskjeller i temperatur.	28
Figur 17: Kalibreringsfilen til hvert av kameraene. Skala = mulitpliseringsfaktor, offset = målt offset fra det valgte kamera.....	29
Figur 18:Før og etter filtrering av punktsky.....	31
Figur 19:Sikringsskap, og «cropping» av sikringsskap for datafangst av interesseområde.....	32
Figur 20:Før filtrering av punktskyen	32

Figur 21: Etter filtrering av punktskyen på RGB-verdier. I resultatbildet ser vi også eksempelet med at kameraene viser forskjellig temperatur på samme flate da det ene sporet blir igjen etter filtreringen og kan gjøre punktskyen forvirrende og en del støy, se to.....	33
Figur 22: Resultat etter filtrering på intensitet.	33
Figur 23: Illustrasjon av ferdig rapport etter endt deteksjon.	34
Figur 24: Illustrasjon av «NUC» gjennomføring.	35
Figur 25: t.v: De 4 ulike kameraene uten pappkassen rundt. T.h: De 4 kameraene med pappkasse rundt. Temperaturspennene som måles er like, og dermed ingen offset mellom kameraene som kan leses av før innsamling av data.....	35
Figur 26: Opptak av Operatunnelen etter endt «NUC».....	36
Figur 27: Forskjell på vegger, asfalt og tak.....	37
Figur 28: t.v: Modell med temperaturspenn på 5-15°C. t.h: Modell med temperaturspenn på 10-30°C.....	38
Figur 29: Illustrasjon av sikringskap, vegg, togskinne og tak før korreksjon.....	38
Figur 30: Utsnitt fra programvare. Til venstre punktskyen, til høyre bilder fra termisk kamera. Nederst er verdier for målt temperatur, fargeskala og temperaturskala, hvor det kan måles forskjeller ved samme objekt/overflate.	39
Figur 31: Resultat av kalibrering i programvare.	40
Figur 32: Resultat av kalibrering, punktskyen ferdig eksportert og lastet inn. Temperaturspenn: 5-15°C	40
Figur 33: Illustrasjon av sikringsskapet etter offset-korreksjonen Temperaturspenn 5-15°C..	41
Figur 34: Punktsky som ble plottet i MatLab.....	42
Figur 35: Resultat av plottet punktsky fra MatLab	42
Figur 36: Punktsky plottet med intensitet langs Z-aksen, og X og Y-koordinat langs X- og Y-aksen i plottet.	43
Figur 37: Over: Overblikk tunnel før korreksjon. Under: Overblikk tunnel etter korreksjon..	47
Figur 38: Bilde fra kamera 3. Mulig feilkilde til fargeleggingen i punktskyen. Litt av togvognen i bildet. Temperaturspenn 5-15 °C.	48
Figur 39: Illustrasjon av «ekstreme» verdier fremhevet i en punktsky med høyere temperaturspenn(20-40°C)	49

Tabelliste

Tabell 1: Parametere og faktorer som kan påvirke bilder tatt med moderne IR-kamerasystemer(Vollmer and Klaus-Peter 2017)	7
Tabell 2: Relasjon mellom de tre temperatur skalaene i termografien(Vollmer and Klaus-Peter 2017).....	8
Tabell 3: Nøyaktighet Pegasus (Leica Geosystems 2017)	23
Tabell 4: Beskrivelse av retningen til de ulike kameraene.....	24
Tabell 5: Målte temperaturspenn etter forsøk på offset-korreksjon	36
Tabell 6: Differanse mellom valgt referansekamera(høyre) målt i programmet tilhørende utstyret.....	39

1. Innledning

1.1 Problemstilling

Denne oppgaven er skrevet i for Scan Survey AS. Oppgavens problemstilling er å finne ut om det kan brukes termiske kameraer til å avdekke varmgang i elektriske elementer og lekkasjer i tunneler, og om det er nødvendig med en kalibrering av kameraene? I tillegg det skal drøftes muligheter for en automatisering av deteksjonsprosessen.

1.2 Bakgrunn

Bakgrunnen for denne oppgaven skyldes investeringer gjort av Scan Survey i et «mobile mapping»-system. Systemet skal brukes til kartlegging av byer, tunneler, vei og annet ved hjelp av 2 laserskannere, GNSS og et INS-instrument. Ut av dette systemet kommer det en georeferert punktsky som skal leveres til kunden. I tillegg kan dette systemet bli tilkoblet til et element bestående av 4 termiske kameraer som tar bilder med en dekning på til sammen 360° vertikal på kjøreretningen underveis gjennom skanningen av tunnelen. Med laserskanning og billedtakning skal det lages et produkt som kan selges i form av en punktsky med informasjon om varmgang i elektriske elementer, vannlekkasjer, og hvor disse kan finnes i tunnelen.

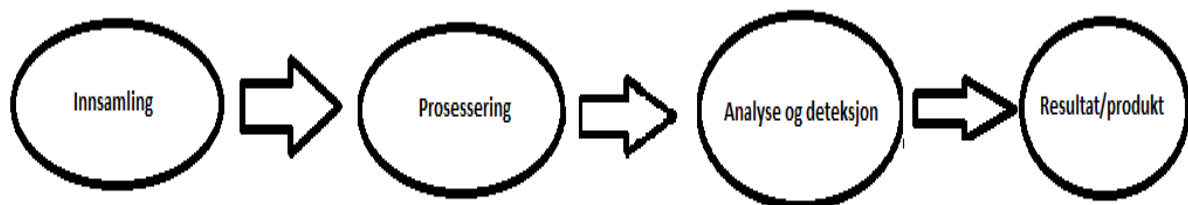
Gjennom «mobile mapping»-systemet blir den indre og ytre orientering til hvert bilde som tas bestemt, hvilket gir et georeferert bildedatasett. Dette bildedatasettet skal brukes til å fargelegge punktskyen med farger fra de termiske dataene. Når dette er gjort er hensikten at fargene i punktskyen kommer fra de termiske dataene til bildene og representerer en temperatur i 3D-modellen. Sluttproduktet vil da være en georeferert punktsky hvor hvert punkt har en koordinat, intensitet og RGB-verdier. I punktskyen skal det detekteres høye temperaturer som kan indikere varmgang, og lekkasjer i form av inntrengning av vann. Når disse punktene har en koordinat, vil det kunne angis hvor i tunnelen interesseområdene er.

Den første delen av problemstillingen er hvorvidt det er mulig å avdekke varmgang i elektriske elementer og vannlekkasjer i tunneler med termiske kameraer. Dette for å kunne avverge eventuelle konsekvenser som kan oppstå ved varmgang i elektroniske elementer slik som strømbrudd og brann i tunnelen. Vannlekkasjer kan slite på betong og skape sprekker. Dette kan også føre til skade på infrastruktur som er i og rundt tunnelen når eksempelvis grunnvann trenger inn, og kan dermed avverges før de største konsekvensene inntreffer.

Den andre delen av problemstillingen oppsto da det ble oppdaget at punktskyens farger ikke var uniform, altså ulike målte temperaturer på samme objekt/flate. Det virket som om noen deler av tunnelen var veldig varm eller veldig kald i forhold til resten. Det ble tatt mistanke om at det trengtes en kalibrering i startfasen av billedtagningen når systemet startes opp eller en relativ kalibrering/korreksjon mellom kameraene. Kalibreringen i startfasen ville sørge for at kameraene ble startet under en lik radiometrisk stråling og dermed vil bruke den samme fargeskalaen for like målte temperaturer. Dette vil gi en kalibrering i starten eller ett offset mellom kameraene slik at samme gjenstand ikke får ulik farge i de forskjellige bildene og at uniformiteten til punktskyen blir god etter at punktskyen er prosessert.

Den siste delen av problemstillingen er å se på mulighetene for en automatisering av deteksjonsprosessen. En automatisering av deteksjonsprosessen vil gjøre bearbeidingen av punktskyen mer effektivt dersom modellene er store. Disse krever mye tid å bearbeide manuelt. Dette vil gi spart tid av arbeidskraft i etterkant av innsamlingen av data, i tillegg til kutt i kostnader ved bearbeiding av punktskyen.

1.3 Dette skal gjøres



Figur 1: Illustrasjon av hva som skal gjøres

Arbeidet skal utføres på to datasett som er samlet inn. Det ene er samlet inn høsten 2017, og representerer t-banelinjene og t-banetunnelene i Oslo. Deteksjonen skal foregå på dette datasettet. Det andre datasettet er samlet inn etter oppgavens start og er en representasjon av Operatunnelen i Oslo. Datasettet er samlet inn for å kontrollere at forsøk på kalibrering fungerte eller ikke.

I tidsrommet mellom datainnsamlingene kom det en programvareoppdatering til de termiske kameraene. Disse oppdateringene skulle forbedre den termiske enhetens innsamlede data og

kan dermed ha hatt en påvirkning på punktskyen som er samlet inn under oppgaveskrivingen sammenliknet med datasettet fra høsten 2017.

1.4 Avgrensning

Oppgaven avgrenses til behandlingen av punktskyen ut fra innsamlet data, og kalibrering av kamera ved oppstart og i etter prosesseringen. Kamera som brukes i oppgaven er av typen FLIR Tau 2, 7,5mm. Dette kameraet er et VoX ukjølt-microbolometer, og enheten kameraene er i blir kalt «360 thermal imaging kit». Korreksjoner på bilder og annet er ikke jobbet med, da programvare for fargelegging og behandling av innsamlet data ikke gir tilgang til rådata, men kun data hvor en minimumstemperatur og en maksimumstemperatur blir satt av bruker, og får dermed ut et RGB-bilde som punktskyen skal farges med. Derfor avgrenses denne oppgaven til kun å omfatte mulighetene for å avdekke varmgang og vannlekkasjer ut fra RGB-verdier, samt skape et produkt som gir god informasjon om tilstanden til tunnelen. I tillegg vil mulighetene for en automatisering av prosessen drøftes.

1.5 Liknende arbeid

Tidligere arbeid er blitt gjort på dette feltet. Det er blitt kartlagt bygninger med termiske data og punktsky, hvor punktskyen har blitt fargelagt med farger fra termiske data.

Den forskningen som ligger nærmest denne oppgaven er «Project Thermal Mapper»(Borrmann, Nüchter et al. 2012) Disse har klart å lage 3D-modeller av bygg med termiske data, samt legge til temperaturen i punktskyen slik at hvert punkt har en XYZ-koordinat, intensitet, RGB-verdi og temperatur. I tillegg har de utviklet en egen programvare i prosjektet «Thermal Mapper» (Borrmann, Nüchter et al. 2012). Denne programvaren heter 3D-TK, og står for 3D-ToolKit, og er utviklet av Borrmann, Nüchter med flere.(Borrmann and Nüchter 2018) Programmet lager 3D-modeller der temperaturen fra de termiske dataene inngår som en attributt til hvert enkelt punkt.

Annet arbeid som er gjort er Wang og Cho(Wang and Cho 2012), Borrmann, Afzal, Nüchter, Elseberg og Cramer (Borrmann, Afzal et al. 2012, Borrmann, Nüchter et al. 2012, Borrmann, Elseberg et al. 2013, Cramer 2014). Disse har alle jobbet med 3d-modellering av bygg med termiske data og laserskanning, men lite av tunnel. Forskningen har enten foregått med en ryggsekk med flere termiske kameraer (Cramer 2014), eller med et mindre kjøretøy og et kamera(Borrmann, Afzal et al. 2012, Borrmann, Elseberg et al. 2013) eller med terrestriske målinger laser og et kamera(Wang, Cho et al. 2012).

Kalibreringen av kameraene seg imellom er gjort av Cramer(Cramer 2014) ved bruk av et termisk sjakkbrett for å finne kameraenes radielle forskyvning seg imellom, og kalibrere disse med RGB-kameraene. En kalibrering av de termiske egenskapene ved kameraene mot hverandre er ikke blitt gjort. I tillegg har Cramer (Cramer 2014) detektert gjenstander i punktskyen med en gjennomgang av punktskyen manuelt, noe som også skal gjøres her , men med en annen fremgangsmåte.

2. Teori

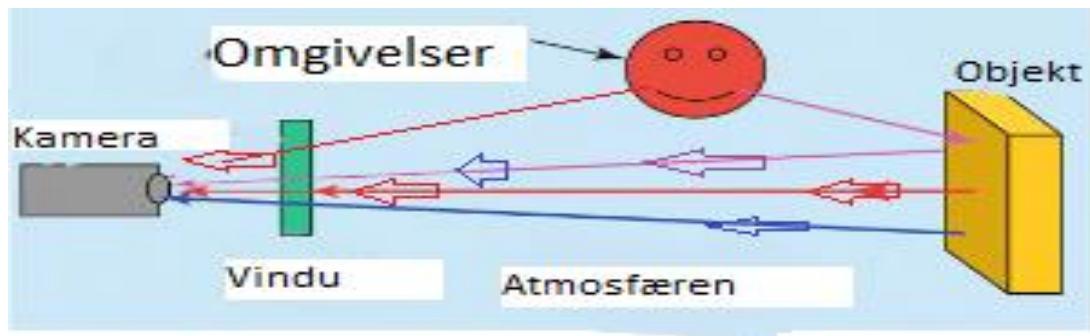
2.1 IR-stråling og radiometri

Infrarød(IR) termisk stråling refereres ofte til som termografi. Dette er et raskt voksende felt innenfor vitenskapen og industrien grunnet den enorme progresjonen innenfor IR-detektorenes design, elektronikk og teknologi. Termografi i dag blir brukt innenfor forskning og utvikling, samt i industrien gjennom ikke-ødeleggende testing, tilstandsovervåking, forebyggende vedlikehold, redusering av varmetap og gassdeteksjon. I nyere tid har denne teknologien blitt tilgjengelig for folk flest, grunnet fremskritt innad i bransjen, som har gitt lavpriskameraer og mobile IR-kameraer som gir nytt brukergrunnlag for teknologien. Skoler vil kunne bruke varmekameraene til å forklare abstrakte fenomener i fysikken som friksjon og varmetap, og som privatpersoner vil slike kameraer kunne brukes til å avdekke lekkasjer, isolasjonsproblemer og elektrisk varmgang i sitt eget hjem.

Termografi er en målingsteknikk der det i måles overflatetemperaturer til gjenstander. Moderne IR-kameraer kan gi fargerike bilder, men kan samtidig inneholde lite relevant informasjon. Dette avhenger av bildekvaliteten og feilkilder, men med kunnskap og dersom de rette forhåndsreglene er tatt kan et samles inn gode bilder med mye relevant informasjon. For det siste vil det være mulig å måle temperaturen på overflaten til forskjellige objekter, men for å få dette til må det være kunnskap i bunn om hvordan kameraene fungerer og hvordan informasjonen kan hentes ut fra bildene.

Det er mange faktorer som kan påvirke et IR-kamera. Det er hovedsakelig 3 faktorer som spiller inn, illustrert i figur (2):

- 1) Et IR-kamera fanger opp stråling fra et objekt. Denne stråling kan bli dempet og forstyrret på sin vei gjennom atmosfæren, et IR-vindu eller kamera optikken, ved å bli absorbert eller spredt (Rød).
- 2) Atmosfæren kan ha en egen temperatur som avgir IR-stråling tilhørende atmosfærens temperatur (Blå).
- 3) Refleksjon fra andre varme kilder. Strålingen fra disse andre kildene kan bli reflektert i vårt interesseobjekt og dermed gi kamera en stråling som ikke kun består av objektets egen varmestråling (Lilla).



Figur 2: Ulike kilder for ekstern påvirkning av et IR-kamera. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

Bidragene fra disse objektene eller vinduene avhenger av andre faktorer igjen som er beskrevet i tabell (1).

Tabell 1: Parametere og faktorer som kan påvirke bilder tatt med moderne IR-kamerasystemer (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

<p>- <i>Parametere som påvirker IR-bilder generert fra rå detektordata i kameraet som vanligvis kan bli justert med kameraets programvare. Kvantitative resultater kan sterkt avhenge av disse parameterne. De kan ofte bli endret i analyseringsprosessen dersom rett programvare blir brukt.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Emissiviteten til objekt</i> • <i>Avstand fra kamera til objektet</i> • <i>Størrelsen på objektet</i> • <i>Relativ luftfuktighet</i> • <i>Omgivende temperatur</i> • <i>Atmosfærisk temperatur</i> • <i>Den eksterne optikkens temperatur</i> • <i>Den eksterne optikkens overføring av varme</i>
<p>- <i>Parameterne som påvirker hvordan data blir plottet som et bilde. Dersom disse velges dårlig forsvinner mange viktige detaljer</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Temperaturspenn ΔT</i> • <i>Temperaturområde og nivå</i> • <i>Fargepalett</i>
<p>- <i>Noen parametere som kan påvirke den kvantitative analysen og tolkningen av IR-bildene</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bølgelengdes avhengighet av emissivitet</i> • <i>Vinkelens avhengighet av emissivitet</i> • <i>Temperatures avhengighet av emissivitet</i> • <i>Optiske egenskaper av materie mellom kamera og objekt</i> • <i>Bruk av filter (Eks. høy temp \rightarrow smalt bånd)</i> • <i>Termisk refleksjon</i> • <i>Vindhastighet</i> • <i>Solbelastning</i> • <i>Skyggeeffekt fra nærliggende objekter</i> • <i>Fuktighet</i> • <i>Termiske egenskaper til objekter.</i>

I termografien brukes det tre forskjellige temperaturskalaer, og forholdet mellom dem er beskrevet i tabell (2):

Tabell 2: Relasjon mellom de tre temperatur skalaene i termografien(Vollmer and Klaus-Peter 2017)

Kelvin, T(K)	Celsius, T(°C)	Fahrenheit, T(°F)
0 (absolutt 0)	-237,15	-459,67
237,15	0	0
373,15	100	212
1273,15	1000	1832

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}); \Delta T(^{\circ}\text{C}) = (5/9) * \Delta T(^{\circ}\text{F});$$

$$T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}) + 237,15; \Delta T(^{\circ}\text{C}) = (5/9) * (T(^{\circ}\text{F}) - 32);$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = (9/5) * T(^{\circ}\text{C}) + 32.$$

I fysikken blir synlig lys, UV-lys og Infrarødt lys(IR) beskrevet som bølger. Disse bølgene beveger seg periodisk, og har en bølgelengde λ med enheten meter. Elektromagnetiske bølger, eller EM-bølger, svinger og med en periode T, som blir kalt den periodiske svingningen, og har enheten sekund. Hvor ofte bølgen svinger kalles frekvens og har benevnningen Hertz, altså $f = 1/T$, hvor T er perioden, se figur (3). Disse blir knyttet sammen via forplantningshastigheten, c, til bølgen som er gitt ved

$$c = f * \lambda$$

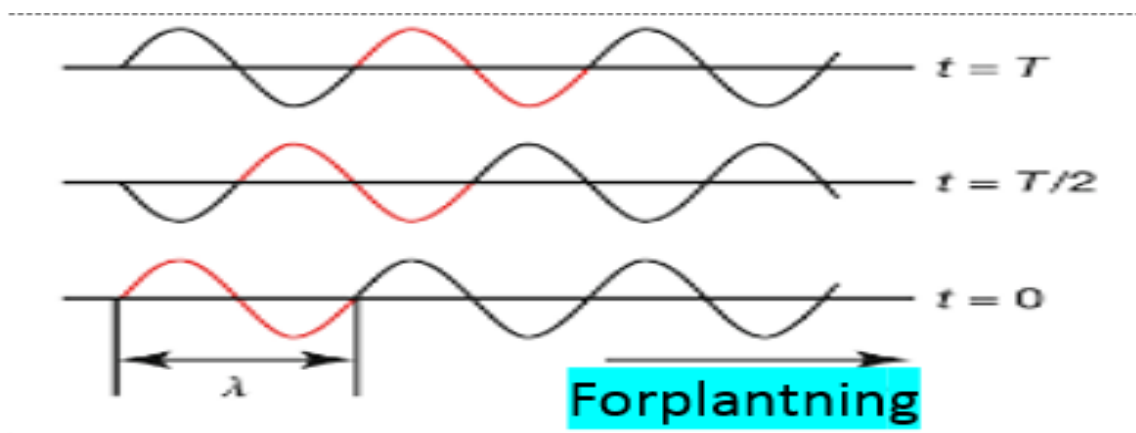
Forplantningshastigheten, c, til bølger avhenger av ulike type bølger. EM-bølger, som IR-stråling er, beveger seg i lysets hastighet. Lysets hastighet i vakuum er:

$$c \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

og i friluft er farten til lyset gitt ved

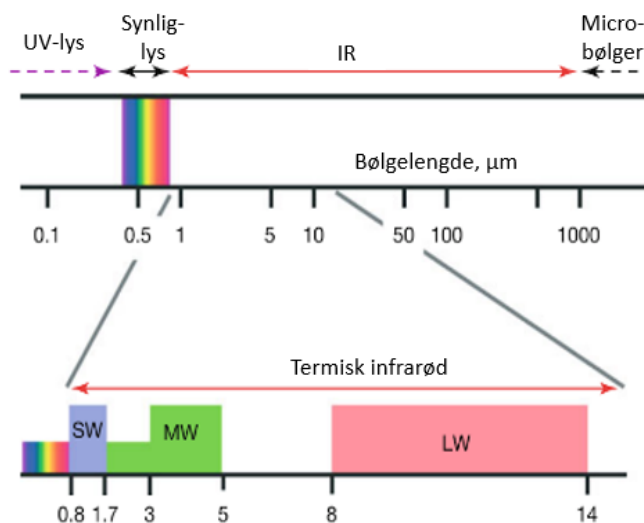
$$v = c/n$$

der n er refraksjonsindeksen til materien lyset går igjennom, hvilket vil si at mediet som lyset går igjennom kan ha en stor innvirkning på farten og strålingen fra objektet. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)



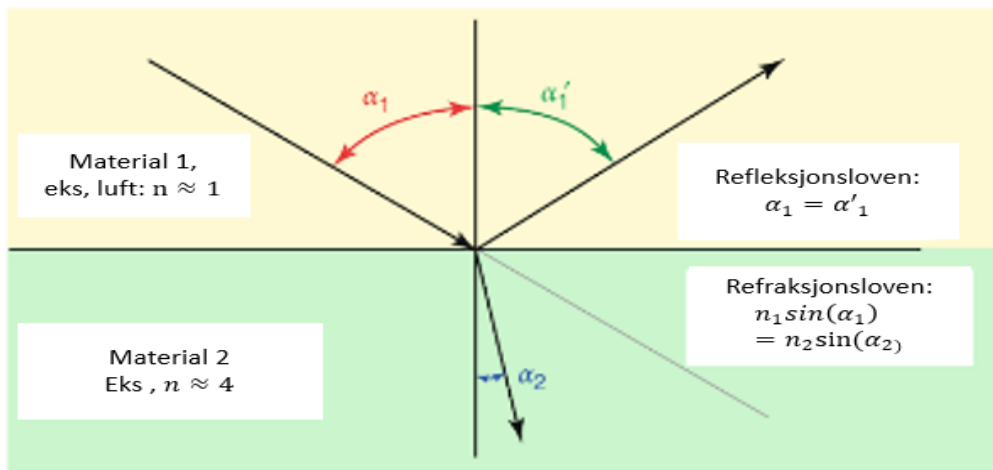
Figur 3: Bølgebevegelse (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

Lys har forskjellige bølgelengde, og dette gjelder også for den infrarøde delen av lyset. I termografien brukes kun en liten del av det infrarøde lyset. Det infrarøde lyset er delt opp i 3 bånd i termografien, langbølget(LW) som går fra 8-14 μm , mellombølget(MW) som går fra 3 til 5 μm , og til slutt kortbølget(SW) som går fra 0.9 til 1.7 μm . Se figur (4).



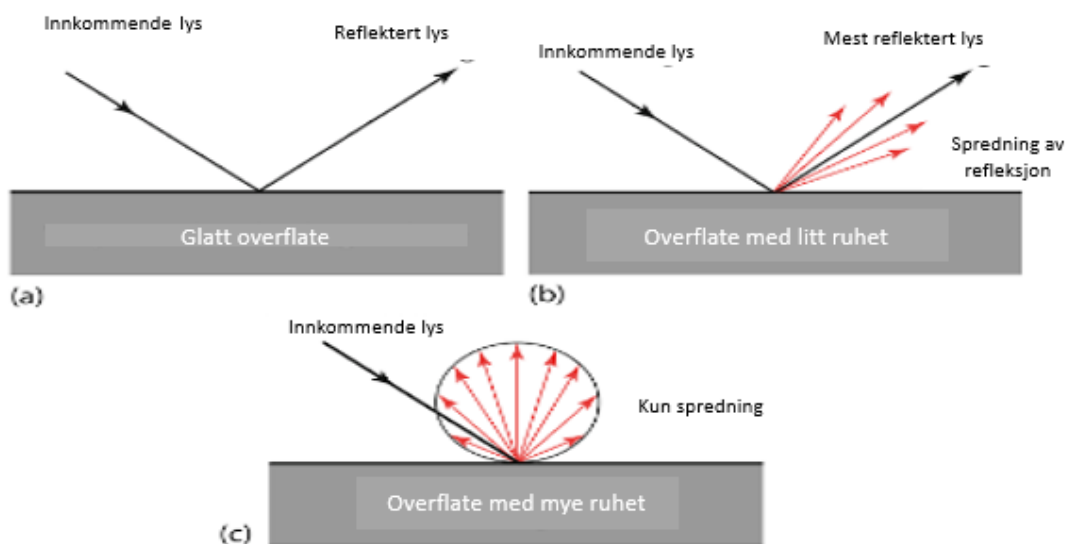
Figur 4: Lys og inndelingen av IR-lyset til det termiske infrarøde-lyset (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

Lys som treffer en overflate blir enten reflektert eller det kan bli utsatt for en refraksjon før lyset går videre. Dette skjer ofte med lys som treffer en grense mellom to materier, for eksempel lys som treffer et vanlig vindu etter å ha reist i friluft. Lysets opprinnelige rette bane blir brutt, og lyset får en annen vinkel når det reiser videre, altså en refraksjon. Noe av lyset blir også reflektert ut med samme vinkel som det traff overflaten slik at innfallsvinkelen = utfallsvinkelen slik som beskrevet i figur (5).



Figur 5: Refleksjon og refraksjon, samt lovene som gjelder (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

Materialer har egen evne til å reflektere lys. Dette avhenger av materialets egenskaper og overflate, altså om overflaten er glatt eller ru spiller inn på hvor mye stråling som blir reflektert. Ved glatte flater vil mye av strålingen som treffer bli reflekterte i samme vinkel som inntreffende lys, mens det resterende lyset vil bli spredt rundt i forskjellige vinkler grunnet ruheten til materialet. Dersom ruheten er ekstrem vil lyset spre seg i en sfære, se figur (6). (Vollmer and Klaus-Peter 2017)



Figur 6: a) refleksjon ved en glatt flate b) refleksjon ved litt ruhet c) refleksjon ved en ru overflate. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

2.2 Blackbody og emissivitet

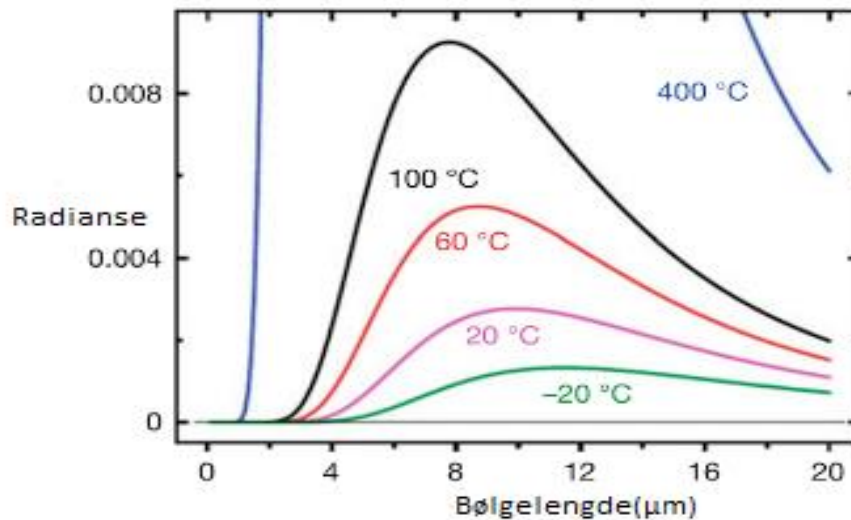
Basisen til termografien er at alle objekter over det absolutte nullpunkt, 0 Kelvin, sender ut stråling. Den maksimale strålingen som kan bli sendt ut av et objekt avhenger bare av temperaturen til objektet. Derfor kalles den utsendte strålingen fra et objekt for termisk stråling. For virkelige objekter spiller også en annen faktor inn og det er emissiviteten til objektet, altså hvor mye stråling det sendes ut i forhold til et idealt objekt på samme temperatur, også kjent som en «Blackbody(BB)». BB-er er såkalt perfekte utsendere av termisk stråling, altså de sender ut maksimalt med termisk energi for sin temperatur. BB-er minner om ideale overflater og har følgende egenskaper:

- 1) En BB absorberer all innkommende stråling, uavhengig av bølgelengden og retningen til strålingen.
- 2) For en gitt temperatur og bølgelengde, kan ingen overflate sende ut mer termisk stråling enn en BB.
- 3) Stråling utsendt av BB avhenger av bølgelengde, men avhenger ikke av retning grunnet den oppfører seg som et Lambertian-objekt, altså lik stråling fra objektet uansett vinkel objektet observeres det fra.

En BB kan være en pappkasse med sorte vegger og et lite hull i den ene veggen. Gjennom bruken av disse BB-ene, kan det vises til at utsendt mengde stråling avhenger av bølgelengde og temperatur, se figur (7). Her brukes Plancks distribusjons funksjon for Blackbody-stråling til å beregne radiansen ut fra bølgelengde og temperatur: (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

$$M_{\lambda}(T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} d\lambda$$

Hvor $h = 6.626 \times 10^{-34} Js$ er Plancks konstant, og $c \approx 300\,000 \text{ km/s}$, og T er absoluttemperaturen i Kelvin.



Figur 7: Sammenhengen mellom temperatur, bølgelengde og stråling. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

Blackbodies blir brukt til å kalibrere kamera fra produsenten. I tillegg sees BB-er på som en ideal strålingskilde, og andre objekter blir gjerne målt opp mot dette ved et forholdstall kalt emissivitet. Emissiviteten til et objekt, ϵ , er definert som raten av stråling som faktisk blir utsendt av overflaten i forhold til det som blir sendt ut av en BB som har samme temperatur. Emissiviteten er relatert til refleksiviteten ρ ved at $\rho + \epsilon = 1$. Altså dersom et materiale har lav emissivitet er refleksjonen høy, og ved høy emissivitet er refleksjonen lav. Objekter som har en emissivitet som er lavere enn 1 blir kalt «greybodies». «Greybodies» har en emissivitet som er konstant. Dersom objektene har en høy emissivitet er strålingen som det termiske-kameraet ser en kombinasjon av stråling som er sendt ut av objektet selv, og reflektert stråling fra omgivelsene. Dette kan slå ut ved et objekt med lav emissivitet enten blir målt til en for høy temperatur eller en for lav temperatur av det termiske kameraet enn overflatens faktiske fysiske temperatur. (OLSEN 2003)

Teoretisk er det viktig å bruke emissiviteten til objektet for å kunne måle den nøyaktige temperaturen. Dette er ikke tilfelle i praksis der kameraene opererer ved en forhåndsdefinert bølgelengde. I tillegg er emissiviteten avhengig av vinkelen objektet sees fra, og derfor må ha en gjennomsnittlig verdi for retningen. Symbolsk er emissivitet nødvendig, men i praksis brukes mest en retningsbestemt nær-normal emissivitet, som er antatt å være uavhengig av bølgelengde og temperatur. Grunnen til dette er at en «greybody» ikke sender ut like mye stråling i alle retninger, slik som et Lambertian-objekt, og ved måling med IR-kamera vil det måles forskjellige temperaturer avhengig av hvilken vinkel objektet observeres fra grunnet emissiviteten endrer seg ved store vinkler ($40^\circ < \delta$). Her spiller også strukturen på objektets

overflate inn. I praksis er ikke dette kritisk da alle objekter ofte blir behandlet som greybodies, hvor temperatur og bølgelengde-avhengigheter ikke er relevant og det er sjelden objekter observeres fra en vinkel større en 45° . (OLSEN 2003, Vollmer and Klaus-Peter 2017)

2.3 Objekters egenskaper som spiller inn på emissiviteten

I følge FFIs rapport (OLSEN 2003) er observasjoner med termisk kamera avhengig av temperaturforskjeller: *«For observasjon med termisk kamera er det temperaturforskjellen mellom mål og bakgrunn som avgjør kontrasten. Til forskjell fra visuell kontrast er ikke flatenes temperaturkontrast avhengig av flatenes egenskaper alene, men også en rekke egenskaper ved selve materialene i tillegg til påvirkning fra det ytre miljøet, dvs værforholdene. Temperaturene i naturen endrer seg raskt med værforhold og tid på døgnet, og ulike materialer som for eksempel vegetasjon og stein endrer temperatur ulikt. Dette gjør at temperaturkontrastene også endres raskt»*. Varmeledningsevne, varmekapasitet og absorpsjon spiller også inn på strålingen til objektet. Et materiale med liten varmeledningsevne vil varmes raskt opp av andre strålingskilder, ettersom energien fra disse objektet ikke ledes vekk fra objektets overflate. Hvor mye av andre objekters strålingsenergi, for eksempel solens stråling, som absorberes varierer med bølgelengden til lyset, men generelt absorberer mørke overflater mer av lys enn lyse overflater. (OLSEN 2003)

For denne oppgaven er ikke dette så kritisk da temperaturen i en tunnel er nokså jevn og det er begrenset med strålingskilder, men ved måling på dagtid av tunneler vil det være en påvirkning ved tunnelens munning der solen treffer. Dette kan også føre til etterglød, som kan gi en kunstig høy temperatur på objekter og vil slå ut på en eventuell deteksjonsprosess hvor det skal detekteres varme objekter.

2.4 IR/termiske-kameraer

2.4.1 IR/termiske kameraer

Formålet med et IR-kamera er å konvertere IR-stråling til et falskfarge/gråtonebilde. Bildet skal representere distribusjonen av IR-stråling som er utsendt fra et objekt eller område i 2D. For et temperaturmålede system viser bilde objekt-temperaturer og det finnes forskjellige type sensorer som konverterer IR-stråling til temperaturer.

Termiske sensorene konverterer absorbert elektromagnetisk stråling til termisk energi, som skaper en temperaturøkning i detektoren. Effektiviteten til denne konverteringen er absorpsjonen, alfa. Energi konverteringen i detektoren kan beskrives av følgende formel:

$$\alpha\Phi_0 = C_{th} \frac{d\Delta T}{dt} + G_{th}\Delta T$$

Hvor C_{th} er varmekapasiteten og G_{th} er varmeledningsevnen til detektoren. Varmeledningen beskriver all varme som utveksles i mekanismen, slik som konduksjon, konveksjon, og stråling. Strålingskraften er $\Phi_0 = \Phi(T_{objekt}) - \Phi(T_{detektor})$, representerer netto strålingskraft overført til detektoren som er gitt ved differansen mellom stråling mottatt fra objektet, $\Phi(T_{objekt})$, og stråling utsendt av detektoren, $\Phi(T_{detektor})$. Den absorberte strålingen, $\alpha\Phi_0$, leder til en økning i detektorens temperatur, ΔT . Med en kvadratisk-bølgepuls av stråling kan endringer av temperaturen vises som en brå vekst etterfulgt av et brått fall med en tidskonstant, τ . Denne tidskonstanten er et mål på hvor raskt sensoren responderer på innkommende stråling og temperaturer. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

2.4.2: Typer IR-sensorer

IR-sensorer kan deles inn i to grupper: Foton sensorer og termiske sensorer.

Fotondetektorer, der fører en enkelt-trinns overføring til endringer i konsentrasjonen eller mobiliteten til de frie ladede bærerne («carriers») i detektoren ved absorpsjon av fotoner fra IR-strålingen. Hvis den inntreffende strålingen genererer ikke-likevekts ladede bærere, vil den elektriske motstanden i detektorelementet endres, fotoleder, eller en ekstra fotonstrømning blir generert altså fotodioder.(Vollmer and Klaus-Peter 2017)

I termiske detektorer er det en to trinns overføring. Først blir den innkommende strålingen absorbert og endrer temperaturen på et material. Deretter genereres et elektrisk utadgående signal ut i fra en korresponderende endring i en fysisk egenskap i materialet. Disse fysiske egenskapene kan være temperaturavhengighet til den elektriske motstanden, som brukes i bolometere, dannelsen av spenning ved temperaturdifferanse, som kalles Termoelektrisitet eller Seebeck-effekten, og temperaturavhengighet i den elektriske polarisasjonen, som brukes i pyroelektriske sensorer. Per dags dato er det bolometer som er den ledende teknologien, og det er også denne typen sensor som blir brukt i denne oppgaven. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

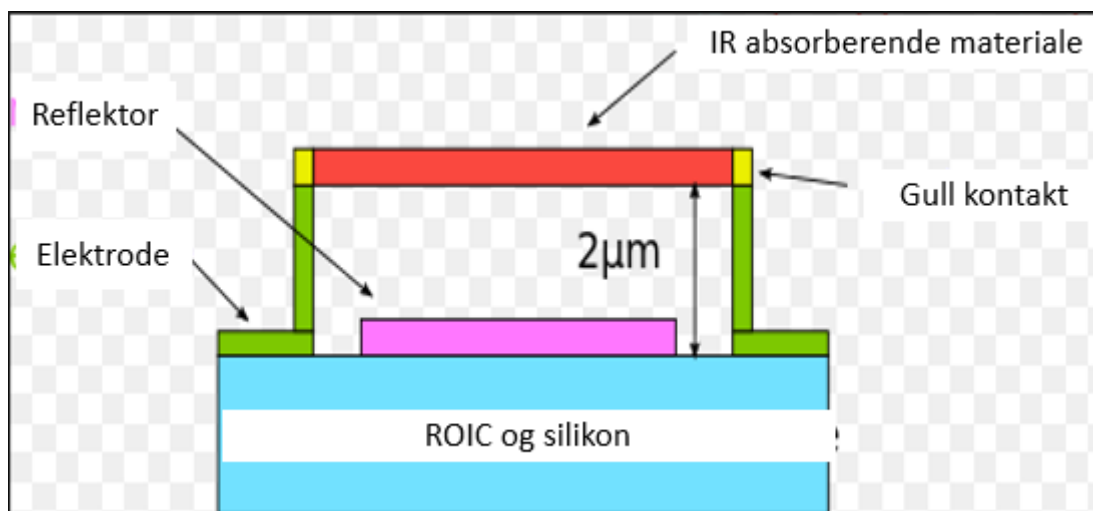
2.5 Bolometer

Den bolometeriske effekten er endringen i den elektriske motstanden til et materiale grunnet temperaturøkning som skyldes den absorberte strålingen i sensorelementet. Den elektriske motstandens avhengighet til temperaturen i et material er det som gjør det mulig å få et signal fra IR-strålingen og som gjør at det kan fanges opp temperaturer ut fra mottatt stråling.

Endringen i motstanden blir målt og sammenliknet med verdiene ved operasjonstemperaturen for sensoren. Dette kalles for temperaturavhengig elektrisk motstand. Dette brukes i det som kalles et bolometer. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

Microbolometerne i dagens kameraer er som regel temperaturstabilisert ved et Peltier-element som kjøler ned systemet og sørger for en stabil temperatur. Microbolometeret som er brukt i denne oppgaven er et VOX-ukjølt microbolometer. VOX er forkortelsen for Vanadium Oxide, og er en tynn film som blir dratt over reflektoren. Det er dette materialet som absorberer IR-strålingen og får en endring i den elektriske motstanden. Se figur (8) for oppbygningen av et microbolometer.

Microbolometer blir foretrukket grunnet sensoren termiske oppløsning, hvilket vil si muligheten til å skille mellom ulike temperaturer. Dette er å foretrekke da denne egenskapen er god selv ved ukjølte bolometre (Gade and Moeslund 2014)



Figur 8: Microbolometer, hvor Readout Circuit(ROIC) og silikon er nederst, en refleksjonsflate ligger over(Sørger for optimalt absorpsjon), og VOX-en, det IR-absorberende materialet(Wikipedia 2018)

2.6 Nøyaktighet

2.6.1 NETD

Noise Equivalent Temperature Difference, også kjent som NETD, er et mål på hvor god en termisk sensor er til å skille mellom små differanser i termisk stråling, altså hvor god den er til å skille forskjellige temperaturer. NETD er gitt i mili-Kelvin (mK). NETD blir også kalt «termisk kontrast», eller termisk oppløsning. NETD er verdien der støyen er ekvivalent med den minste målbare temperatur-differansen, og når dette er nådd så har sensoren nådd sin grense for å gi et brukbart termisk signal. Altså økt støy gir økt NETD verdi. Typiske verdier for ukjølte microbolometer sensorer er de termiske kameraene nede i en NETD-verdi på 45mK. I vårt tilfelle med FLIR Tau 2(FLIR 2016)så er det oppgitt en NETD på <50mK @f/1. Foton baserte sensorer kan komme ned i NETD verdi rundt 18mK.

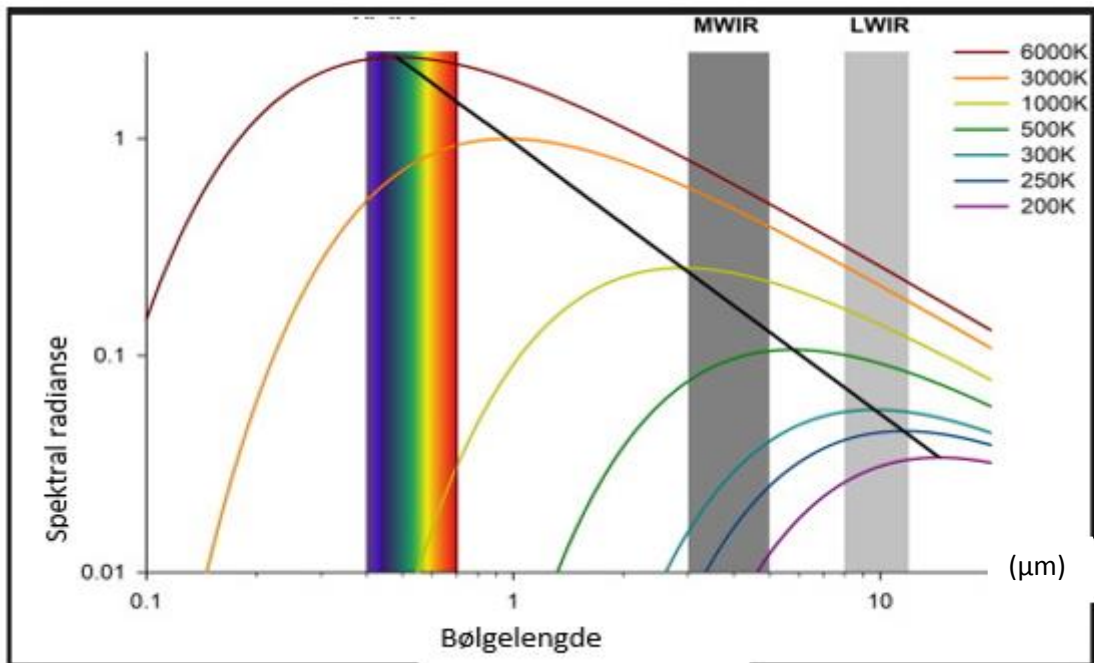
2.6.2 Absolutt temperatur

Absolutt temperaturen til kameraet er ifølge produsent(Systems 2018) oppgitt til å være (+/-) 2°C . I følge (Nugent and Shaw 2014) er kameraets nøyaktighet (+/-)7,12°C ved -12 til +38°C, hvor romtemperaturen endrer seg med tiden, hvor denne raten stiger etter gitt tidspunkt. Dette går over lang tid, og der kan det ikke antas at kameraet har en så unøyaktig absolutt temperatur. At driften, altså avvik i målinger over tid, eksisterer i bolometere som ikke er nedkjølt er et faktum som må tas hensyn til når resultatene skal tolkes.(Vollmer and Klaus-Peter 2017). I følge (BFI 2015) er nøyaktigheten til Flir Tau2 (+/-) 5 °C. Dette fører til tvil om nøyaktigheten til kameraet, og det er mange faktorer som spiller inn på nøyaktigheten til kamera når det kommer til å måle absolutte temperaturer, se tabell (1).

2.7 Bølgelengder vs. Behov

Valg av riktig bølgelengde på kameraet er viktig i forhold til bruksområde. Bruksområde i denne oppgaven tilsier at det trengs et kamera som kan fange opp stråling fra lave temperaturer under 0°C og oppover. Grunnen til dette er det skal være mulig å identifisere is, som kan indikerer lekkasje i tunnel, og samtidig varmegang i objekter. Dersom det velges en annen type kamera som er sensitiv for kortere bølgelengder, vil ikke alltid all stråling fra objektene med lavere temperatur bli fanger opp. LW er derfor et godt valg i denne oppgaven da det ikke er mye stråling i SW- og MW-båndet, da disse korresponderer med høyere temperaturer og en høyere frekvens på strålingen. LW gir et godt spenn med tanke på vannlekkasjer i tillegg til varmgang grunnet jevne temperaturer ellers i tunnelen.

Elektriske elementer kan komme opp i høye temperaturer. Dette vil bli fanget opp av et LW kamera, men en nøyaktig temperatur på objektet kan være vanskelig å få da noe av strålingen kan være utenfor LW-båndet ved ekstreme temperaturer på objektet, se figur (9).



Figur 9: Sammenheng mellom IR-bånd og temperatur (Tattersall 2016)

2.8 Påvirkning fra sola, himmelen, og forhåndsregler for utendørs og innendørs målinger

I følge (Vollmer and Klaus-Peter 2017) fører nattehimmelen og solas stråling på dagtid til store variasjon i temperaturer på materiale i bygg, veier, biler osv. Derfor er ikke temperaturer som er målt utendørs så gode siden en detaljert kvantitativ analyse er vanskelig da det er mange feilkilder som spiller inn.

Dersom det er ønskelig å få best mulig målinger av absolutte temperaturer inne, f.eks i en bygning, så er det noen regler som bør følges:

- $\Delta T = T(\text{inne}) - T(\text{ute}) \leq 15\text{K}$ for mer enn et par dager. Dette impliserer at det burde gjøres mest undersøkelser om kvelden og ved kjølige årstider da det er minst forskjell i temperatur mellom ute og inne, og etter effekten av strålingen til sola er borte fra byggets materialer.
- La kamera oppnå termisk likevekt (ca.30min)

Dette er for å unngå solas og nattehimmelens påvirkning av de målte temperaturene, og å utsette kameraet for minst mulig temperaturendringer. I tillegg til dette bør det, ved samling av termisk data ute, gjøres følgende:

- Ta opp før soloppgang og etter en overskyet natt for å få minst mulig effekt fra himmel og sol
- Unngå tåke, regn og snø
- Unngå sterk vind
- La kamera oppnå termisk likevekt, hvilket betyr en ventetid på 20-30min før opptak.

Noen parametere som kan ha innvirkning på den målte temperaturen som det bør logges data for:

- Innendørs og utendørs luft-temperatur
- Innendørs og utendørs reflekterte temperaturer
- Innendørs og utendørs luftfuktighet
- Vindstyrke
- Distanse fra kamera til objekt som skal måles
- Emissivitet til objekter, her kan det brukes tape/annet materiale der emissiviteten er kjent
- Bilder av område som skal undersøkes med IR-bilder

2.9 «Switch-on»-oppførsel, drift og termisk sjokk

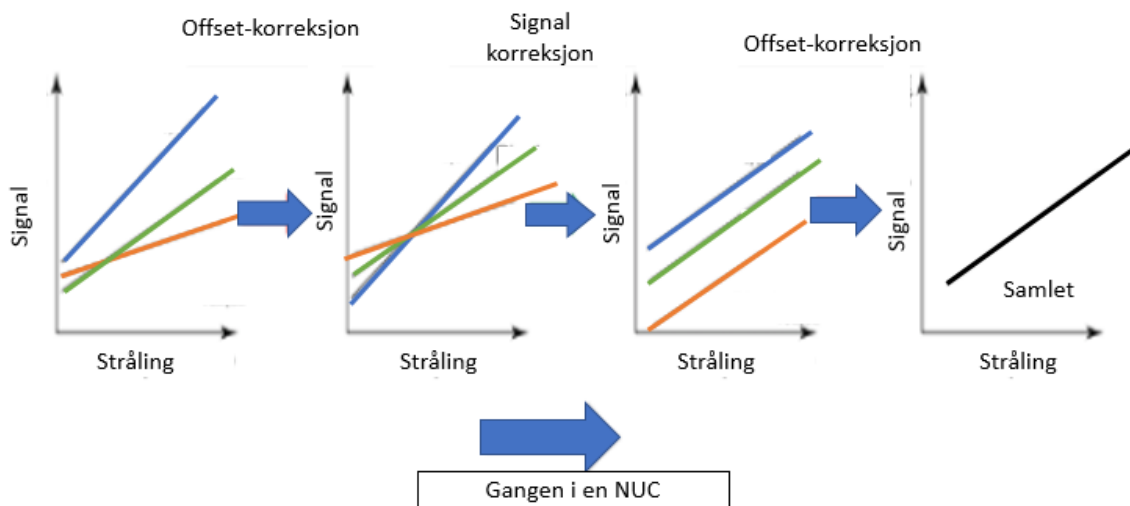
Vollmer & Möllman (Vollmer and Klaus-Peter 2017) skriver om hvordan kameraene oppfører seg i startfasen og ved store temperaturendringer. Dette har innvirkning på den målte temperaturen da det har blitt bevist at et bolometer måler 2-3°C høyere enn temperatur enn faktisk overflate temperatur på et objekt. Dette er ikke mye, men nok til å skape feilmålinger fra bolometeret. Som nevnt tidligere er bolometeret avhengig av netto stråling på sensoren, samt at bolometeret er avhengig av dens egen temperatur. Derfor vil uoppnådd termisk likevekt og drift i bolometeret påvirke temperaturmålingene. Termisk likevekt oppnås etter mer enn 90 minutter, men kameraet når en temperatur nøyaktighet på (+/-)2°C etter 10 minutter.

Termisk sjokk dukker opp ved bruk av sensorene ved vekslende omgivende temperaturer. Dersom den omgivende temperaturen til kameraet endres raskt, for eksempel ved å kjøre inn i

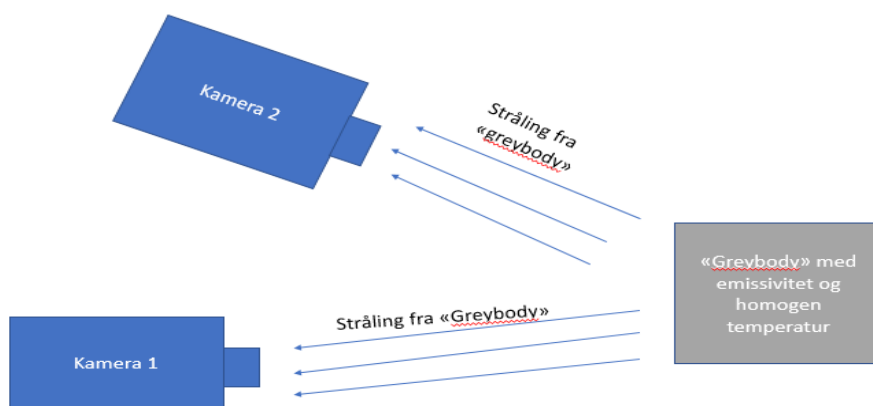
en tunnel og ut av en tunnel en kald vinterdag, vil dette ha en innvirkning på temperaturmålingene til bolometeret. Dette er grunnet det termiske kameraet kommer ut av den termiske likevekt, selv om det har fått varme seg opp i mange timer. Nøyaktigheten til de radiometriske temperaturmålingene er avhengig av nøyaktigheten på signalberegningen. Det målte detektor signalet må korrigeres for stråling fra kameraoptikken og andre deler av kamerahuset. Denne signalberegningen kan bli forstyrret når det blir store temperaturendringen over kort tid. Kameraet vil vise forbigående temperaturendringer med temperaturgradienter inne i kameraet. Dette begrenser nøyaktigheten til detektorsignal-korreksjons algoritmen og skaper da feil i målingene på 3-4°C. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

2.10 NUC

I følge Vollmer og Möllman (Vollmer and Klaus-Peter 2017) må det utføres viktige bildebehandlingsprosesser før kameraet kan brukes til en kvantitativ temperatur måling. Først må de forskjellige forsterkningene, eller «gain», til kameraene finnes og ett mulig signaloffset til de individuelle kameraene må bestemmes. I denne oppgaven brukes 4 like kameraer. Deretter må en absolutt temperaturkalibrering for kvantitativ analyse gjennomføres. Disse henger sammen, men kan også skilles fra hverandre. Spredningen i forsterkningen, «gainen», og offset resulterer i en spredning av sensorsignaler til de forskjellige pixlene for den samme innkommende strålingen. Dersom denne ulikheten av de individuelle sensorene blir for stor, blir bildene uklare og fulle av støy. Derfor må alle systemer der det inngår flere kameraer enn ett må gjennom en NUC, «Non Uniformity Correction». For de fleste kommersielle kameraene er denne NUCen gjennomført under kameraets kalibreringsprosess i fabrikken, og korreksjonsparameterne blir lagret i kameraets maskinvare. Korreksjonsprosessen starter med en signaloffset-korreksjon for å styre responsen av et objekt med et kjent temperaturspenn på hver sensor. Etter dette blir sensorens signalavhengighet av temperaturen rettet på. Etter dette burde alle sensorene ha den samme signalgraf for den samme strålingen. Helt til slutt kommer en ekstra offset korreksjon for å få identiske responskurver på de forskjellige sensorene. Illustrasjon av gangen i en NUC og hvordan det gjøres er illustrert i figur (10) og (11).



Figur 10: NUC-prosessen (Vollmer and Klaus-Peter 2017)



Figur 11: Hvordan en NUC gjennomføres

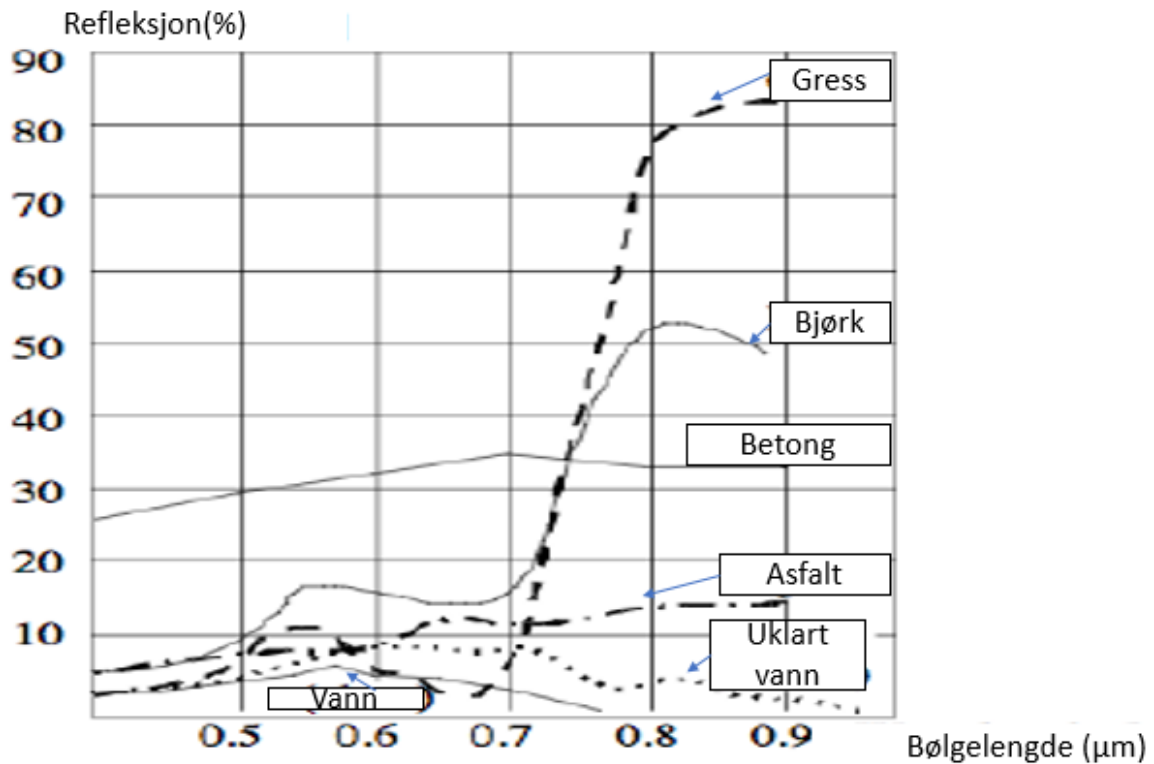
I praksis gjennomføres denne kalibreringen ved å plassere en røff gjenstand, en greybody, med homogen temperatur rett foran kameraene. Som en konsekvens av dette burde hvert pixel gi det samme signalet og måle nokså lik temperatur. Temperaturen trenger ikke være kjent for å gjennomføre en NUC, men får å få så korrekte absolutt temperaturer som mulig lønner det seg å kjenne temperaturen til objektet. I tillegg til dette vil det skje en drift over tid innad i kameraet som gir endringer i sensorens deteksjonskurve og en ny NUC må gjennomføres. Denne driften skyldes at bolometeret lager signaler fra netto strålingskraft overført til sensoren, som er differansen mellom mottatt stråling fra objektet og den radiometriske strålingen sendt ut av sensoren selv. Dette fører til en liten endring i den termiske balansen i

kamera, som da også endrer den netto overførte strålingen og skaper feil i målingene. (Vollmer and Klaus-Peter 2017)

2.11 Deteksjon av vann med termografi og intensitet

Deteksjon av vann med termografi er mulig da vann er fuktig og vil gi et utslag eller en endring i bildet. I denne oppgaven skal det avdekkes vann i tunnel, og i teorien skal det være mulig. Det vil gi utslag i form av at veggene eller omliggende området for vannet vil ha en annen nyanse eller farge grunnet annen temperatur og fuktighet. I tillegg har vann en annen emissivitet enn betong eller annet omliggende objekt og derfor vil det bli forskjellige målinger grunnet denne egenskapen ved materialene. Vann er også fuktig og har evnen til å fordampe. Fordampningsprosessen tar til seg energi, og dermed termisk stråling, og vil fremstå som kaldere i punktskyen og på bildene. Den termiske strålingen fra fordampningsprosessen vil dermed kunne fanges opp med IR-kameraet (Tattersall 2016). Dette gjør det mulig å avdekke vann bak vegger grunnet temperaturforskjellen.

I tillegg til termiske data med RGB-farger fra punktskyen, er returen fra det utsendte lasersignalet i punktskyen, intensiteten. Returen fra vann består stort sett av lave verdier fra 0 og opp mot 10% av utsendt laserstråling grunnet vannets evne til refleksjon og gjennomtregning. Ved lengre bølgelengde så vil vannet reflekteres veldig lite (Husefest 2017), se figur (12). I denne oppgaven er laserens bølgelengde 635nm (Zoller+Fröhlich). Dette vil føre til enten områder uten punkt eller områder der intensiteten til de omliggende punktene er større enn det fuktige område. I tunneler det vanlig med betong eller råsprenget fjell som vegger, men ved inntregning av vann vil det ha påvirkning på intensiteten til veggene og dermed skille seg ut fra det omliggende materialet rundt lekkasjeområde i tillegg til forskjellige RGB-verdier.



Figur 12: Reflektans av laser med forskjellige bølgelengde på ulike materialer (Husefest 2017)

2.12 Mobile Mapping System (MSS)

Mobile mapping, eller mobil kartlegging, er prosessen å samle kartdata fra et kjøretøy i bevegelse. Et MSS består av et navigeringssystem, som gir en posisjon for hvert tidspunkt og et målingssystem, som samler inn informasjonen om omgivelsene rundt systemet. Vanligvis er et Inertielt Navigerings System (INS) og Globalt Navigasjons Satellitt System (GNSS) inkludert i navigeringssystemet. Målingssystemet består vanligvis av laserskannere og kameraer, og i dette tilfelle også termiske/IR-kameraer. (Løvås 2017)

Mobile mapping systemet som er brukt er en Leica Pegasus:Two. Pegasus:Two består av 2 skannere, GNSS-antenne, IMU (inertial measuring unit), odometer, 8 RGB-kameraer, og 4 IR-kameraer. Systemet har mulighet for 2 GNSS-antenner for å hjelpe heading og pitch ved lite dynamikk i kjøringen, som for eksempel ved måling med jernbane, båt og ved lave hastigheter. I tillegg hjelper den til å «hente inn heading» GNSS-brudd ved for eksempel utgangen tunnel.

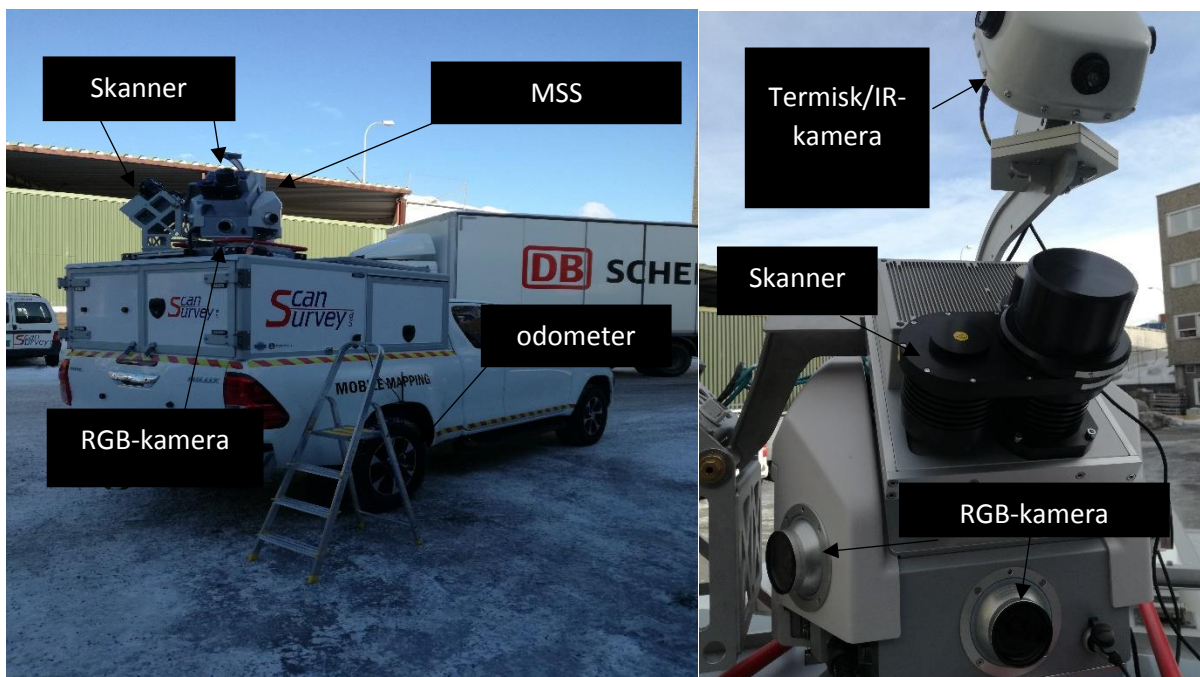
Grunnet INS er det mulig å kartlegge områder der det er dårlig eller ingen GNSS dekning, og allikevel få en georeferert punktsky som sluttresultat. Nøyaktigheten (RMS) på selve punktskyen oppgis til å være:

Tabell 3: Nøyaktighet Pegasus (Leica Geosystems 2017)

Forhold	Åpen himmel (Med GNSS)	Posisjonsnøyaktighet etter 10 sekunders bruddvarighet
X, Y, Z	0.004, 0.004, 0.001 (m)	0.02, 0.02, 0.02(m)
Roll, Pitch, Heading		0.008, 0.008, 0.013(°)

En beskrivelse av hvilke komponenter og sensorer systemet består av figur (13), og vinkel mellom bil og termisk enhet i figur (14).

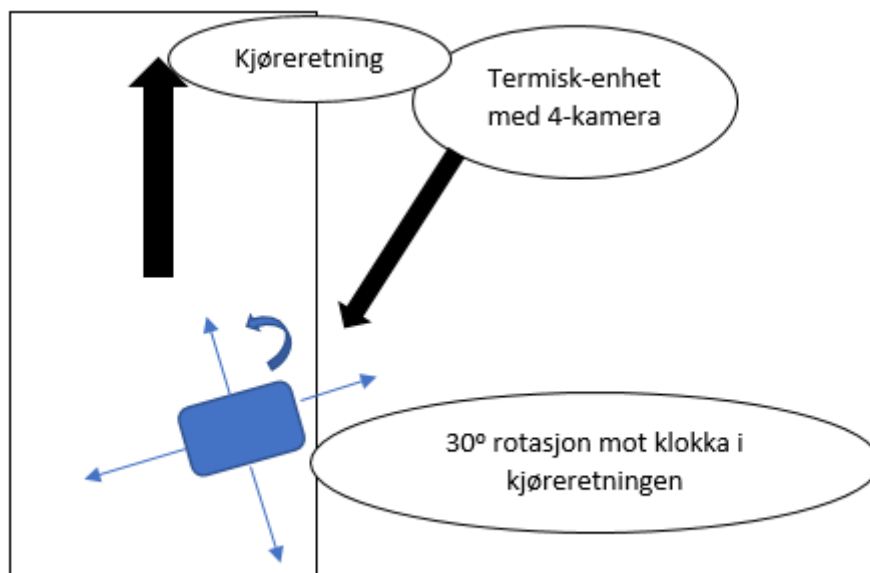
Laserskannerne som blir brukt er 2 Zoller Frölich skannere som gir en dekning på 360°, i tillegg 8 vanlige kameraer som gir 360° dekning. De termiske kameraene dekker 360° i det vertikale plan, da det er 4 kameraer, hvor ett peker opp, ett ned, og et til hver side. De termiske kameraene som er brukt i oppgaven er av typen FLIR Tau 2, 7.5mm, og er en del av Leicas «360 thermal kit».



Figur 13:t.v: MSS T.H: MSS m/ de termiske kameraene på toppen

Tabell 4: Beskrivelse av retningen til de ulike kameraene.

Kamera nr:	1	2	3	4
Retning på kjøreretning:	OPP	HØYRE	NED	VENSTRE



Figur 14: Illustrasjon av rotasjonen og posisjonen til den termiske sensoren.

3. Metode

3.1 Del 1: Deteksjon av varme elektriske elementer og vannlekkasjer

Punktskyen i seg selv inneholder ikke temperaturer. Egenskapene til punktskyen er X-, Y- og Z-koordinat, intensitet og RGB-verdier. Dette gjør det vanskelig å filtrere på temperaturer, da dette kunne vært ønskelig for å finne ekstremverdier og for å kunne si noe om objektets temperatur om det skulle være fare for varmgang. RGB-verdiene gir kun da en indikasjon på hvor det er varmt i det gitte temperaturspennet, og dermed vil det ikke være mulig å knytte fargene i punktskyen til en bestemt temperatur, da det ikke er sikkert om rødfargen er angitt maksimumstemperatur eller om den er over angitt temperatur. Konverteringen mellom temperatur og RGB-farger som er brukt i prosesseringsprogrammet er ukjent, og en rekonstruksjon vil dermed bli unøyaktig.

Vannlekkasjer er vanskeligere å detektere med kun fargelegging fra termiske data. Ved å bruke egenskapen til vann som materie og intensiteten fra laseren kan det filtreres på punktenes intensitet i punktskyen og dermed blir resultatet av filtreringen områder med vannlekkasjer, fukt og «støy».

Deteksjonsprosessen i denne oppgaven er gjort i programvaren Quick Time Modeler. Konvertering av punktsky til tekstfil er gjort med LasTools, og beregninger av koordinater/polygon til interesseområdet gjøres ved hjelp av MatLab.

3.1.1 Deteksjon av varme

Filtrering av punktsky er en standard løsning i de fleste programvarer. Punktskyen inneholder RGB-verdier, hvor JET-fargeskalaen blir brukt, se figur (15). Dette fører til at de varme områder får fargen rødt og de kalde områdene blir blå. Alt resterende på den satte temperaturskalaen fordeler seg mellom rødt og blått. En konsekvens av temperaturskalaen er at det ikke er mulig å koble temperaturer opp mot farge, da rødt kan være enten satt maksimumstemperatur eller over. Det samme gjelder for temperaturer under minimumsgrensen, der alt under gitt minimumsgrense blir blått.



Figur 15: Fargeskala, fra kaldt (blå) til varmt (rødt).

Metoden som er brukt i oppgaven for å avdekke varmgang er filtrering av punktskyen basert på farge, ettersom det kun er RGB-verdier fra punktskyen som er termisk data. Grunnen til dette er at programvaren lager RGB-bilder med rød, grønn og blå, hvor blå er kaldt og går oppover til rødt. Et problem med dette er at programvaren ikke gir tilgang til rådata, kun bearbeidet data der temperaturene forsvinner fra punktskyen. I stedet er det RGB-verdier som representerer temperaturene, men det blir vanskelig å gi en nøyaktig temperatur til hvert punkt ut i fra dette. I tillegg vil det utelukke temperaturer som overstiger grensene som blir satt ved prosessering av dataene som gir en usikkerhet på overflatenes temperatur.

RGB-verdiene inneholder likevel en del informasjon. Dersom en temperaturskala er satt fra (+/-)5-10° enn omgivelsene vil dette gi en pekepinn på hvor slike ekstremverdier kan finnes. Hvor varmt det er ukjent grunnet mangel på absolutte temperaturer til punktene, men det kan siles ut ekstremverdier i det gitte temperaturspennet og dermed vite hvor de er. Programvaren som blir brukt til prosesseringen har ikke muligheten til å legge absolutte temperaturverdier til punktskyen. Derfor brukes RGB-verdiene til filtrering, slik at ekstrepunktene kan detekteres.

3.1.2 Deteksjon av vann

Deteksjon av vann ble gjort ved å filtrere punktskyen med andre parametere. Dette skal gjøres på både RGB-verdier, og intensitetsverdier til punktskyen. Intensiteten til fuktige områder vil være lav, under 10% illustrert i figur (12), og kan ha en lik temperatur som omliggende materiale da med tanke på vegger, bakken og annet. Temperaturen til vannet er ukjent, og derfor må det velges en lav minimumstemperatur for å få frem nyansene i de lavere temperaturene slik at effekten av fordampningsprosessen kommer frem i de termiske dataene. I tillegg skal ikke temperaturspennet være for stort, altså en maksimumstemperatur bør ikke velges så altfor stor, helst 10-15°C over minimumstemperatur. Dette er for å beholde detaljnivået i de termiske dataene med hensyn til deteksjon av vann og struktur i punktskyen, og å holde temperaturspennet nede slik at fargene får færre temperaturer å fordele seg på. Temperaturspennet bør også inneholde ca. omgivelses temperatur midt i spennet.

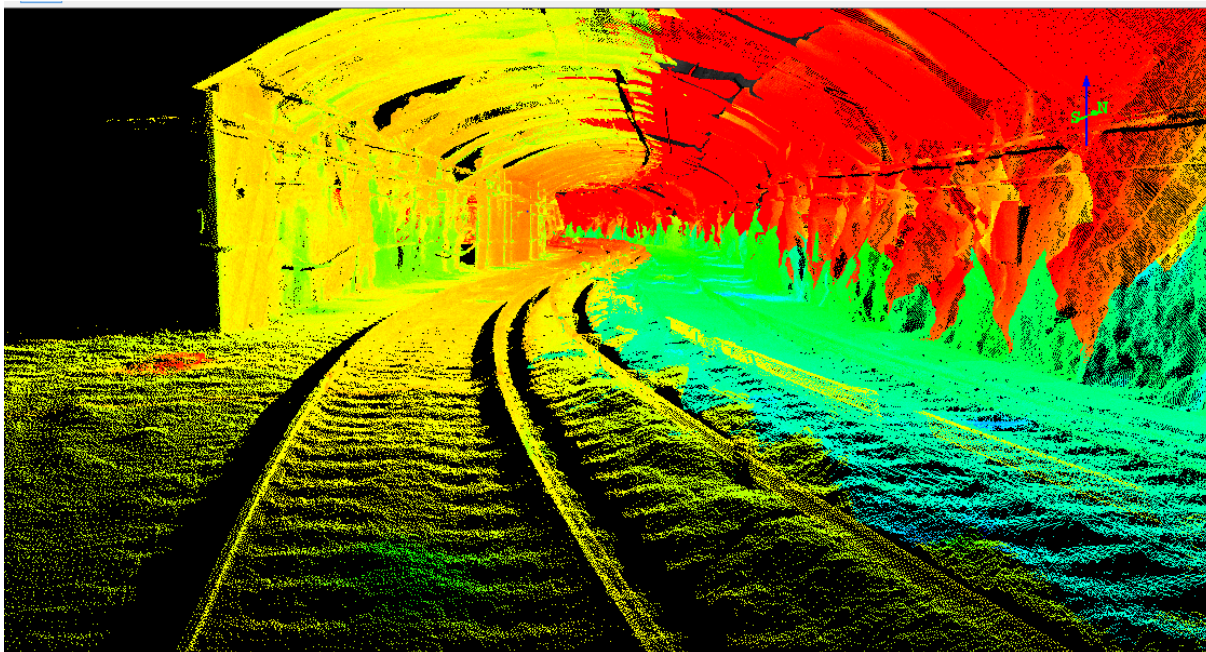
Filtrering på intensitet er en annen måte å detektere vannet på. Vann har en egenskap ved seg som gjør at refleksjonen av laseren er lav, grunnet overflate med lite struktur. Refleksjonen vil spres i forskjellige retninger, og lite av laseren vil bli reflektert tilbake til utgangspunktet. Ved å filtrere ut de store verdiene i punktskyen og beholde de fra 15% og nedover, vil det fukten og vannet som ligger i tunnelen komme tydeligere frem.

Intensitetsverdiene kan variere gjennom tunnelen, med tanke på vinkel, kjørehastighet og andre faktorer som kan spille inn. Støy på retursignal kan forekomme, selv om avstandene fra laseren til objekter ikke er stor, da innsamlingen av data utføres i tunnel. Men det kan antas at de største støybidragene på retursignalet ikke vil være tilstede i punkttskyen grunnet kort avstand til objektene som måles.

3.2 Del 2: Kalibreringsprosessen

En av problemstillingene er kalibrering av kameraene. Fra produsent kommer kameraene ferdig kalibrert i seg selv, men relativt til hverandre virker å være noe annerledes ut i fra fargene på punkttskyen. Som vist i punkttskyen, figur (16), er det store forskjeller i fargeleggingen av punktene fra kamera til kamera. Det er mulig å se hvor de ulike kameraene starter og slutter, og dermed en forskjell i målt temperatur på samme overflate. Dette gir en stor kontrast i punkttskyen og fremstår mer forvirrende enn oppklarende for en eventuell kunde. Det gir lite mening at det ene sporet er kaldt(blått) og det andre har en liten lunk(gul), i tillegg til at taket kan virke som fullstendig overtent(rødt).

Del 2 av denne oppgaven var å kalibrere kameraene slik at det ble en uniform punkttsky etter fargelegging med IR-bilder. I denne delen var målet å få alle kameraene til å samarbeide, i form av å unngå for store sprik i måling av temperatur på samme objekt. Målet er å unngå store kontraster i fargeleggingen av punkttskyen fra de forskjellige kameraene når temperaturspennet ikke er stort, slik at detaljene i punkttskyen blir beholdt og at skjøtene mellom kameraene skal flyte i hverandre. Som nevnt tidligere er det slik at temperaturene brukes kun til fargelegging av punkttskyen og blir ikke med selve punkttskyen. Dermed kan det ikke sies hvor varmt noe er i punkttskyen med mindre programvaren som følger med MSS-prosesseringen brukes. Der finnes muligheten til å vandre gjennom punkttskyen med de termiske bildene i nabovinduet, som da inneholder absolutte temperaturer til punktene. Dette kan brukes til kontroll av punkttskyen og for å måle differansen mellom et objekt fanget opp av to forskjellige kamera. Grunnen til at det er ønskelig med en uniform punkttsky er å skape en informativ og lite forvirrende punkttsky som kan gi god visuell informasjon om tunnelens tilstand.



Figur 16: Punktsky farget av IR-bilder, temperaturspennet er på 5(blå)-15(rød)°C. Skjøt er tydelig, og de forskjellige t-banesporene samt vegger har store forskjeller i temperatur.

3.2.1 Metode 1: «NUC»

Første metode som ble gjort for å kalibrere kameraene for denne effekten var å kontrollere innkommen stråling. Denne kalibreringen skulle sørge for at punktskyen var uniform, og at samme objekt ga samme temperatur. Det kan ikke kalles en NUC, da dette gjøres av produsenten. Kalibreringen som ble foretatt var å legge en uniform «greybody» foran hvert kameraene ved oppstart. Det er da viktig å sørge for at den termiske enheten står i skygge, og at kameraene og objektet blir minst mulig påvirket av sol og andre varmekilder.

«Greybodyen» er en pappkasse som settes over kameraene for å stenge ute annen stråling enn pappkassens egen stråling og dermed sørge for at kameraene skal måle den samme stråling slik at de får startet seg opp under samme forhold. Kalibreringen skulle skje inne i selve kameraet og dermed gi en uniform punktsky.

3.2.2 Metode 2, del 1: Offset-korreksjon

Metoden er lik som metode 1. Korreksjonen som ble foretatt var å legge en uniform «greybody» foran hvert kameraene etter at det har nådd termisklikevekt. Det er da viktig å sørge for at den termiske enheten er i skyggen, og at kameraene og objektet blir minst mulig påvirket av sol og andre varmekilder. Dermed kan temperaturspennet leses av i hvert kamera, og kontrollere om det er forskjeller kameraene imellom. Det kontrolleres om det er avvik fra et valgt referansekamera, og avvikene re ut regnes ut fra minste og største målte temperatur. Dette noteres, og legges så inn i en kalibrerings fil som følger med datasettet ved eksportering

av dataene. Før prosessering av dataene legges avviket inn i kalibreringsfilen. Det er da ett offset som registreres manuelt og legges inn etter at dataene er hentet ut av MSS-en. Ved prosessering av punktskyen vil disse kalibreringsfilene bli en del av prosesseringen av de termiske bildene. Når de termiske bildene draperes over vil det bli en mer uniform punktsky ved lavere temperaturspenn. Prosesseringen foregår i Leicas programvare Pegasus Manager.

3.2.3 Metode 2, del 2: Offset-korreksjon etter endt prosessering

Offsetet kan oppdages i programvaren etter prosesseringen av dataene. Programvaren som brukes for å prosessere punktskyen gjør det mulig å se de termiske bildene samtidig som punktskyen. Dette gir en muligheten til å se hvor store temperaturforskjeller det er mellom kameraene på samme objekt/overfalte. Det er i bildene de termiske dataene ligger, da formatet på disse er radiometrisk JPEG. Det samme punktet eller objektet kan sees med forskjellige kameraer og dermed kan temperaturforskjellen mellom dem måles. Av figur (16) så synes det at bakken og overganger til vegg/tak, som består av samme materiale, ofte får et hopp i både temperatur og farge i punktskyen ved endt prosessering av rådata. Avviket som registreres kan så legges inn i en kalibrerings fil til hvert av kameraene der ett offset kan settes for hele opptaket av dataene fra det spesifikke kameraet. Det er også mulighet for å multiplisere målt temperatur med en faktor, men dette er ikke undersøkt i oppgaven.

```
*.tcalib  
[Temperature]  
Scale=1.0  
Offset=0
```

Figur 17: Kalibreringsfilen til hvert av kameraene. Skala = multipliseringsfaktor, offset = målt offset fra det valgte kamera..

3.3 Del 3: Automatisering av deteksjonsprosessen

3.3.1 Plotting av punkt basert på intensitet, rød-verdi og grunnriss-koordinater

Automatisering av deteksjonsprosessen vil være mulig. Laseren har forskjellige egenskaper som intensitet, og punktskyen inneholder RGB-data som kan brukes til å avdekke høye verdier av rød-farge. Dersom temperaturer hadde vært tilgjengelig ville dette vært en god attributt å plote punktene på for å avdekke varme områder, og mulige lekkasjer dersom omgivelsenes temperatur var kjent.

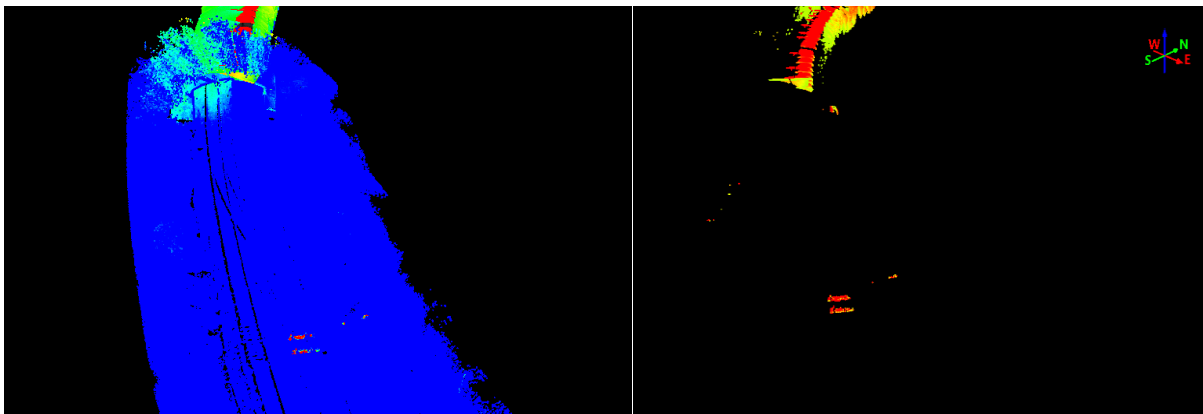
Klassifisering av punktene er ikke mulig med programvaren som er brukt i oppgaven, og dermed skal punktene plottes i en graf ved hjelp av MatLab. Dette for å lete etter grupperinger av punkter i rød-verdier og intensitetsverdier for å kunne avdekke varme elementer og eventuelt lekkasjer. Grupperinger av rødverdier kan indikere varme og grupperinger av intensitet kan indikere lekkasje. Dette blir plottet med grunnriss koordinater langs x- og y-aksen for å i tillegg kunne si noe om posisjonen til interesseområde.

4. Resultater

4.1 Del 1: Deteksjon

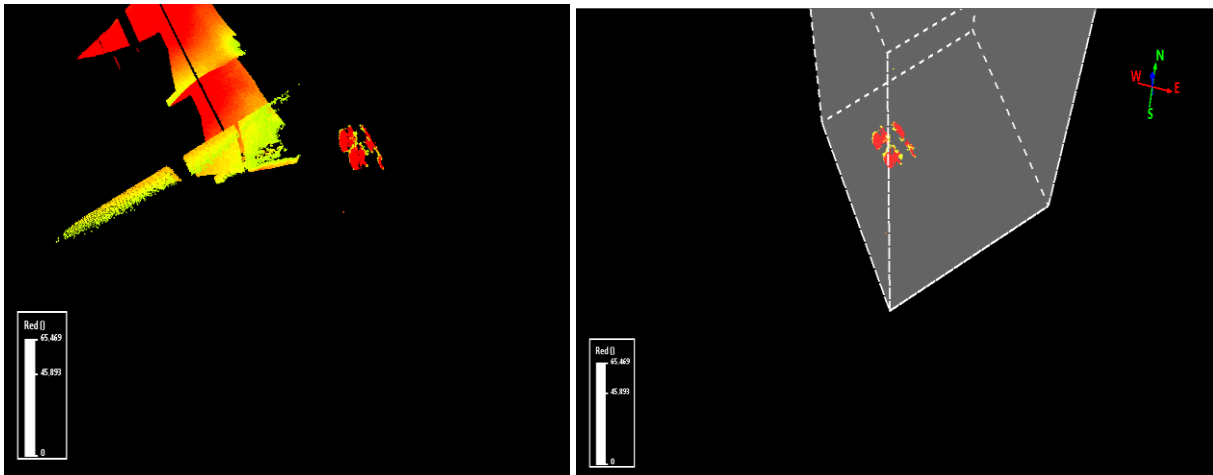
4.1.1 Deteksjon av varme

Deteksjonen av varme skulle gjøre ved en filtrering på RGB-verdier. Dette ble gjort med programmet Quick Time Modeler. RGB-verdiene blir i programmet gjort om til 16-bit verdier, og dermed er blir det 65536 mulig RGB-verdier for hvert bånd. Filtreringen ble gjort på rødeverdier. Figur (18) viser resultatet av filtreringen hvor alle verdier over ett satt rød-nivå er blitt bevart, og resten er filtrert vekk fra punktskyen. Temperaturspenet på punktskyen ble satt fra 5-15°C.



Figur 18: Før og etter filtrering av punktsky.

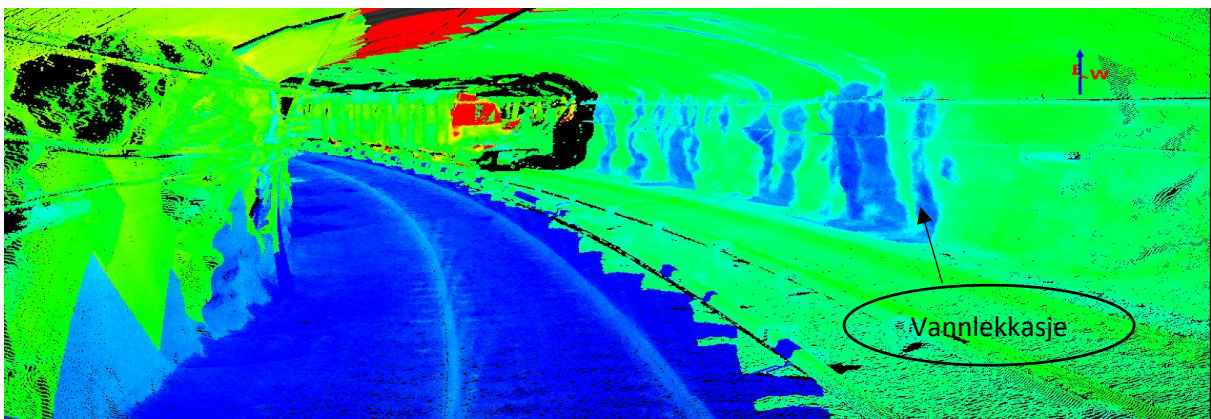
Det som er igjen av filtreringen er områder som er varme, 15°C eller over. De områdene som er av interesse, som eksempelvis sporveksleren som vises i figuren (18), kan klippes ut som vist i figur (19) og lagres som en las.1.2-fil. Denne filen kan igjen gjøres om til en tekst-fil, med LasTools, som inneholder koordinater, intensitet og RGB-verdi for videre behandling. Dette gjøres for alle områder av interesse slik at hvert område er i en egen las-fil.



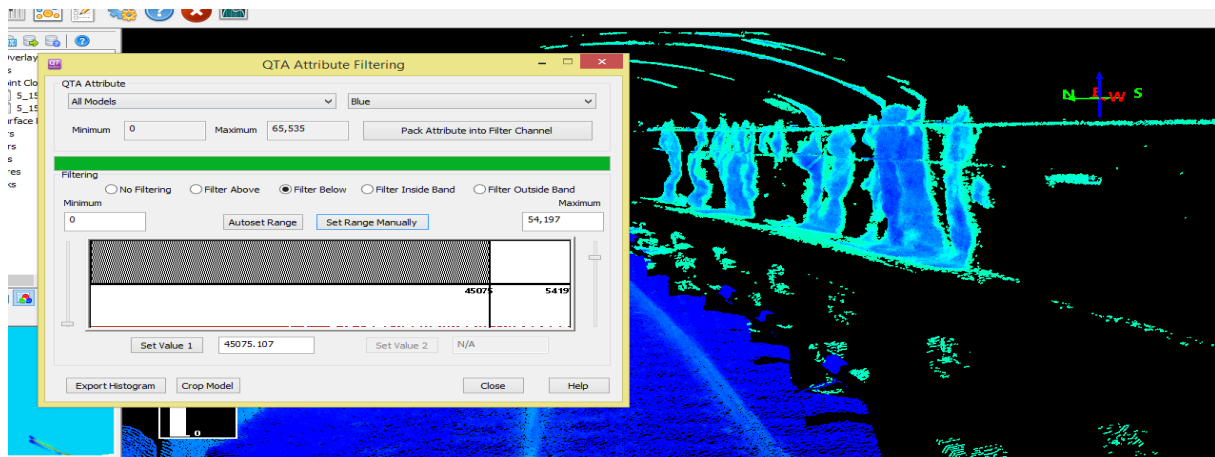
Figur 19: Sikringssskap, og «cropping» av sikringssskap for datafangst av interesseområde.

4.1.2 Deteksjon av vann

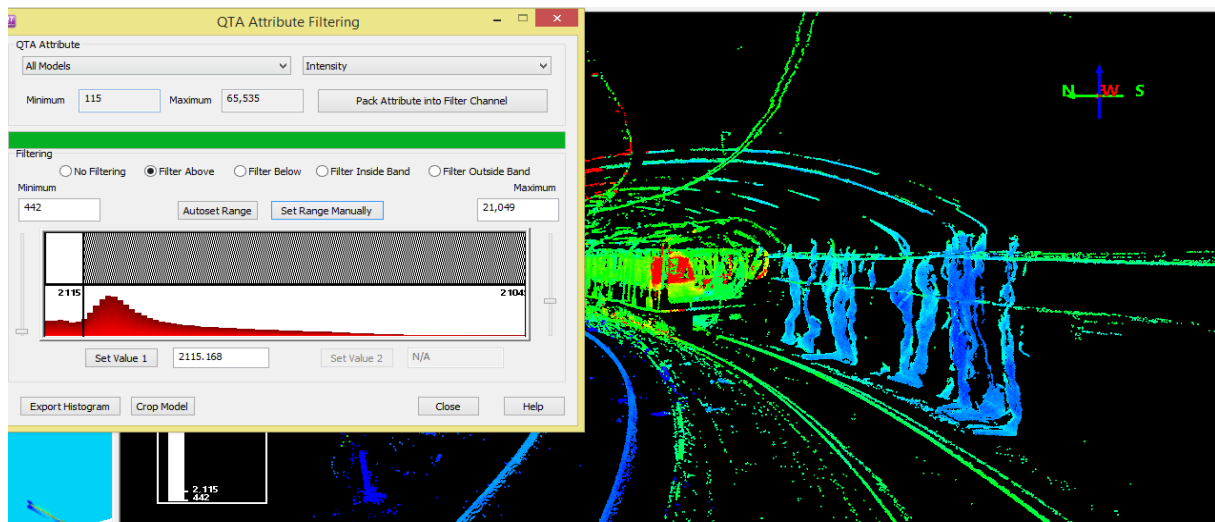
Deteksjon av vann ble forsøkt med to ulike filtreringer, en på RGB-verdier, og en på intensitet. Som tidligere nevnt i oppgaven er det viktig å bruke et lavt temperaturspenn på punkttskyen, for å få frem de små temperaturforskjellene i den lavere delen av temperaturskalaen. Derfor er filtreringen med RGB-verdier og intensitet gjort på samme datasett med samme temperaturspenn som filtreringen på varme. Resultatet av filtreringen er vist i figurene (21 & 22), og utgangspunkt vist i figur (20).



Figur 20: Før filtrering av punkttskyen



Figur 21: Etter filtrering av punktskyen på RGB-verdier. I resultatbildet ser vi også eksempelet med at kameraene viser forskjellig temperatur på samme flate da det ene sporet blir igjen etter filtreringen og kan gjøre punktskyen forvirrende og en del støy, se to



Figur 22: Resultat etter filtrering på intensitet.

Intensitetsgrensen brukt til filtreringen er på ca.10% av maks registrert intensitetsverdi i punktskyen.

Når filtreringen er gjennomført gjøres det samme som tidligere, interesseområde «klippes» ut av punktskyen og blir lagret i en egen fil, som igjen gjøres om til en tekstfil. Denne fila blir senere brukt i en rapport som lages ved hjelp av MatLab hvor maks- og minimumskoordinatene blir tatt ut i X, Y, og Z samt snitt koordinat for X, Y, og Z. Dette får å ha muligheten til å lage ett polygon eller angi et punkt i fila der interesseområde finnes. Dette er laget med et eget produsert script se vedlegg (1 & 2) og illustrasjon av rapport i figur (23)

```

Resultater:
Tidspunkt: 2018 12 04 12 21 35.00

Koordinater over interesseområder
-----
Mulig varmgang i elektroniske elementer

Togskinne/sporveksel:
X = 115999.156 m Y = 1213280.715 m Z = 52.574 m

Sikringsboks/elektronisk element:
X = 115957.686 m Y = 1213319.462 m Z = 53.545 m

Førerhus
X = 116275.488 m Y = 1213153.247 m Z = 54.079 m
-----
Vanninntrengning og lekkasjer

Vann ved togskinne/vegg, område 1)
X = 115841.861 m Y = 1213537.922 m Z = 42.774 m

Vann ved togskinne/vegg område 2)
X = 116263.604 m Y = 1213148.272 m Z = 52.538 m

Vanninntrengning ved vegg/mulig fukt:
X = 115930.794 m Y = 1213329.881 m Z = 52.939 m
-----
Kommentarer til interesseområder:

Det er funnet 2 varme elementer som ligger mellom 20 og 40grader Celsius
Dette er sannsynligvis ikke av noen interesse, da det ikke er direkte varmgang
i elementene mtp objektets temperatur
Vannlekkasjene er sannsynligvis kun fukt på veggene, men det er noen damper ved sporene
Grunnet råsprengt fjell på veggene er ikke fukten her noe å bry seg om, med mindre det viser seg at det
begynner å sprekke opp dersom tælen kommer om vinteren og kan skade tunnelen nevneverdig

```

Figur 23: Illustrasjon av ferdig rapport etter endt deteksjon.

4.2 Del 2: Kalibrering av kameraene

4.2.1 Metode 1: «NUC»

Første kalibreringsforsøk var å kontrollere innkommende stråling til kamera. Målet var at dette skulle gi en lik oppstart av kameraene og sørge for at samme fargeskala skulle bli brukt på samme målte temperatur av kameraene, og dermed unngå en ikke-uniform punktsky. Pappkassen ble plassert over kameraene ved oppstart, og sto over sensoren i 10 minutter før datainnsamlingen ble startet, se figur (24). Resultatet av datainnsamlingen etter «NUC» er vist i figurene (26 & 27)

4.2.2 Metode 2, del 1: Offset-korreksjon

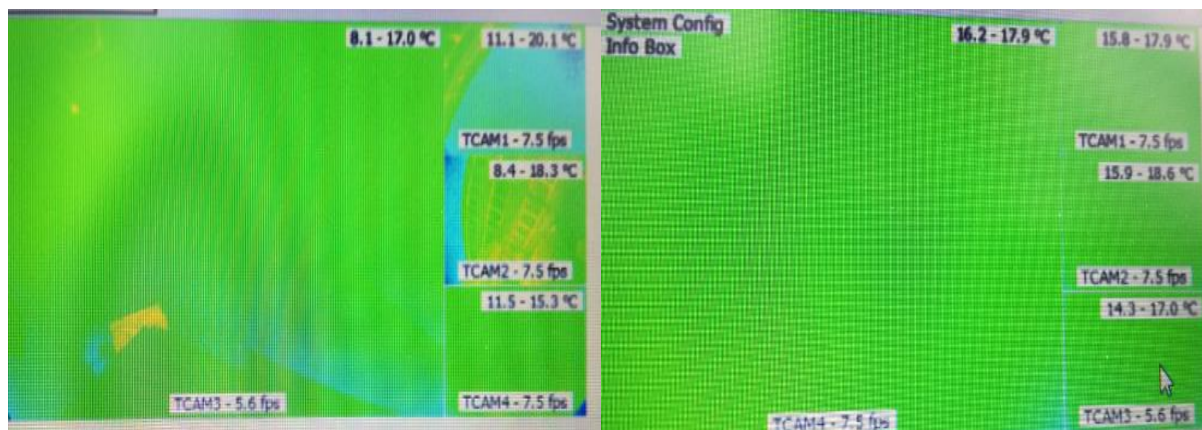
Kalibreringen av kameraene skulle gjøres på samme måte som metode 1. Pappkassen ble plassert over den termiske enheten og det ble undersøkt temperaturspenn på hvert enkelt kamera. Dette skulle gi en indikasjon på om det er en offset mellom kameraene ettersom vi kan se temperaturspennet som blir målt i sanntid. Dette ble også gjort ved å plassere en

pappkasse over den termiske enheten 10 minutter etter oppstart, for så å sjekke hvilke temperaturspenn som ble registrert i hvert av de 4 kameraene. Resultatet er vist i figur (25).



Figur 24: Illustrasjon av «NUC» gjennomføring.

Pappkassen sørger for at ingen annen stråling treffer de 4 ulike kameraene enn pappkassens egen stråling. Dette skulle gjøres for å kontrollere at kameraene måler likt og et forsøk på å gjennomføre en «NUC»-kalibrering.

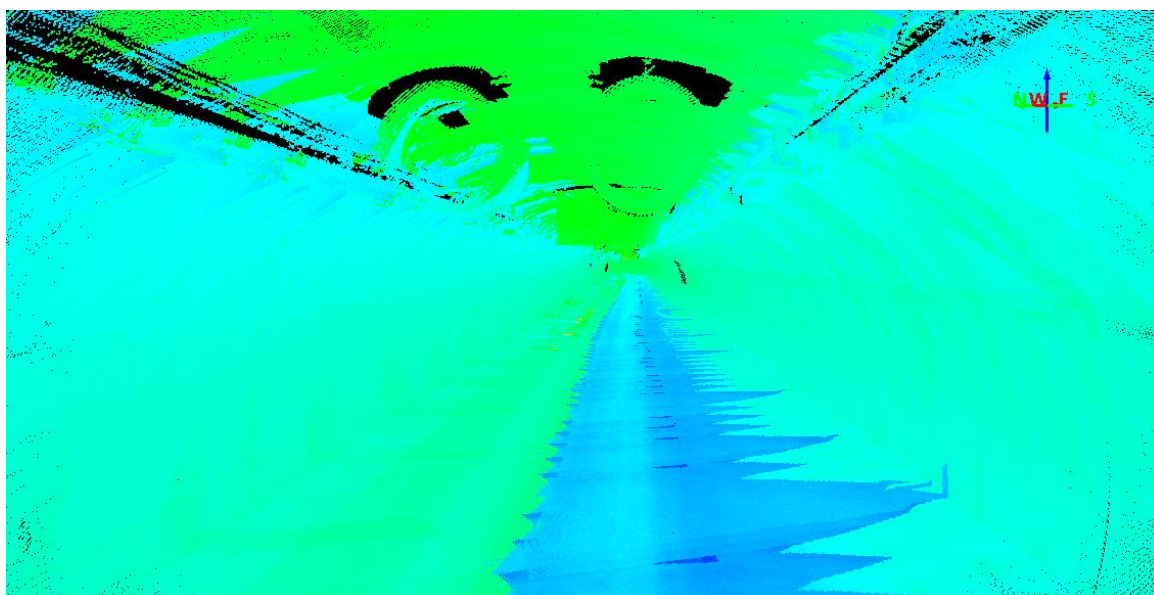


Figur 25: t.v: De 4 ulike kameraene uten pappkassen rundt. T.h: De 4 kameraene med pappkasse rundt. Temperaturspennene som måles er like, og dermed ingen offset mellom kameraene som kan leses av før innsamling av data.

Tabell 5: Målte temperaturspenn etter forsøk på offset-korreksjon

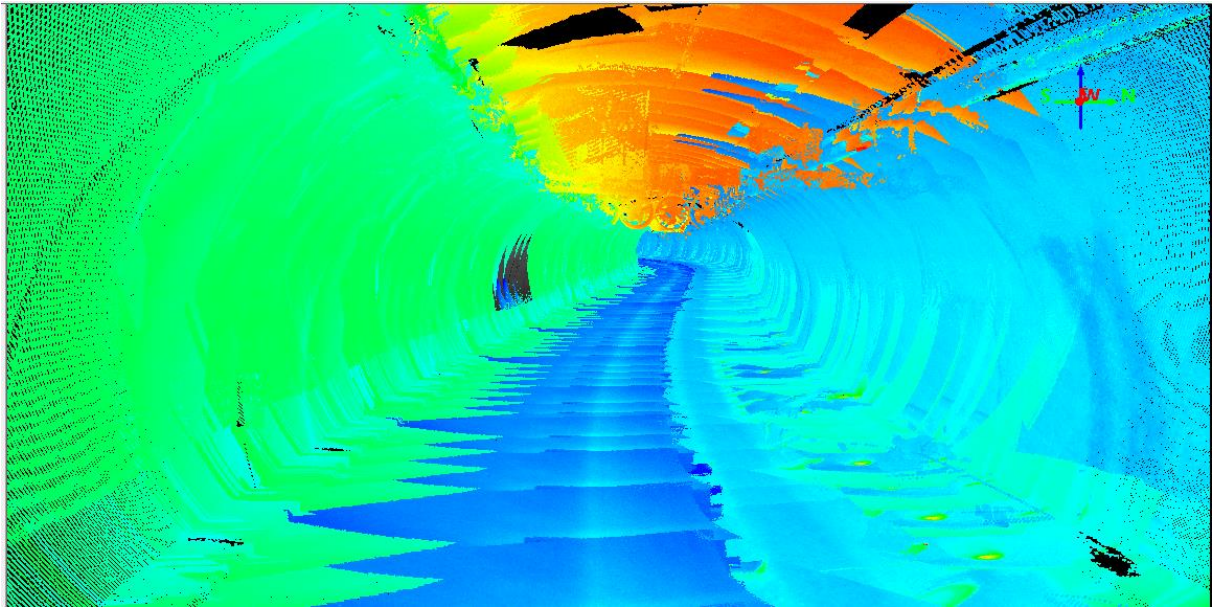
Kamera	Nr.1	Nr.2	Nr.3	Nr.4
Målt temperaturspenn(°C)	15,8-17,9	15,9-18,6	14,3-17,0	16,2-17,9

Det ble ikke registrert noen store offset mellom kameraene som var urovekkende, se tabell (5). Dette ble testet uten sol på kassen for å unngå ytre påvirkninger mest mulig, men ingen store avvik ble registrert. Prosesseringen av punktskyen ga igjen en stor forskjell i farge mellom samme overflate. Det viste fortsatt en brå endring av farge, og derav temperatur, i overgangen mellom kameraene og over samme overflate.



Figur 26: Opptak av Operatunnelen etter endt «NUC».

Figur (26) er opptak av operatunnelen etter første forsøk på offset-korreksjon. Spennet er på (-)3°C til 20°C. Her er et eksempel på ikke-uniformhet ved at asfalten har ulik farge. Temperaturspennet er høyt i forhold til omgivelsestemperaturen, og derav ikke like mye nyanser i fargeleggingen grunnet høy temperatur på spennet.

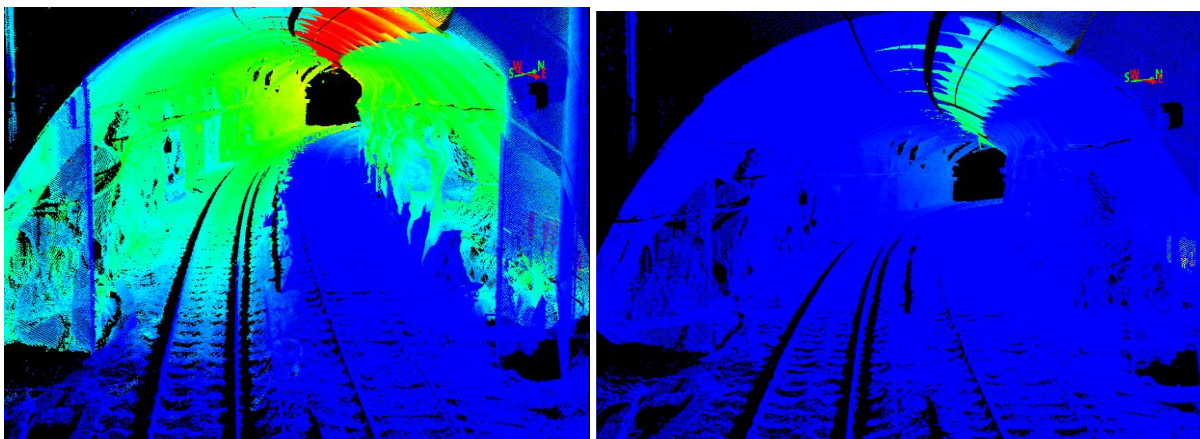


Figur 27: Forskjell på vegger, asfalt og tak.

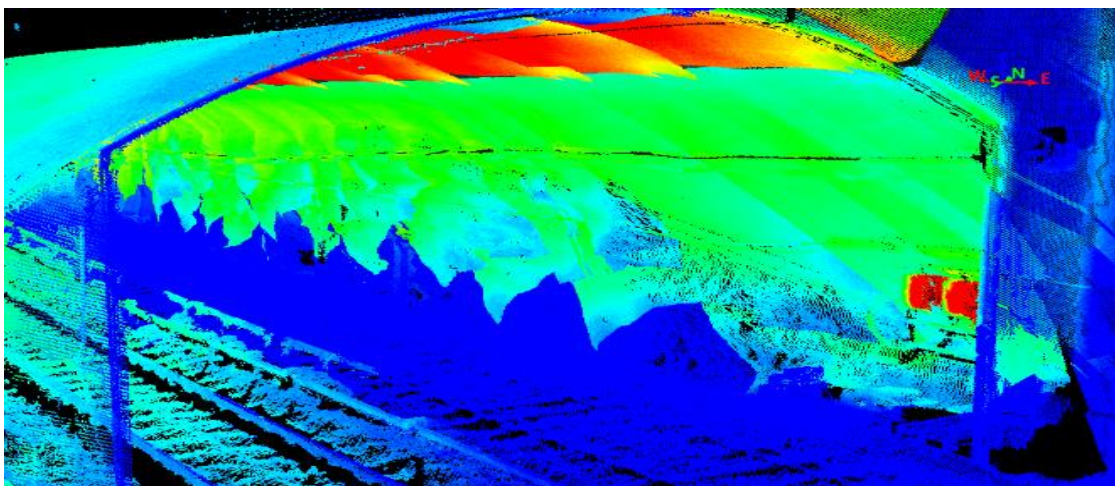
Bildene ble undersøkt for å måle forskjeller i temperatur og det viste seg at målt temperatur på samme flate ikke var så forskjellig, men fortsatt stor nok til å gi utslag i punktskyen, se figur (27). Dette gir grunn til å tro at det ikke er noe i veien med kameraene i seg selv, men derimot at kameraene drifter under billedtagningen eller gjennomgår et termisk sjokk grunnet vindmotstanden som oppstår ved kjøring og rask endring av omgivelsens temperatur. Den termiske likevekten blir ikke opprettholdt, og dermed kan kameraene måle forskjellig temperatur på like overflater, se kapittel 2.10.

4.2.3 Metode 2, del 2: Offset-korreksjon etter endt prosessering

Dermed var siste mulighet å kalibrere kameraene etter endt førstegangs prosessering av dataene. Det ble merket at ved lave temperaturer, og et lavt temperaturspenn, så var forskjellene i punktskyens farger større enn ved høye temperaturer. Altså punktskyen var mer uniform ved et høyere temperaturspenn og en høyere minimums og maksimums temperatur. Eksempel vist i figur (28).

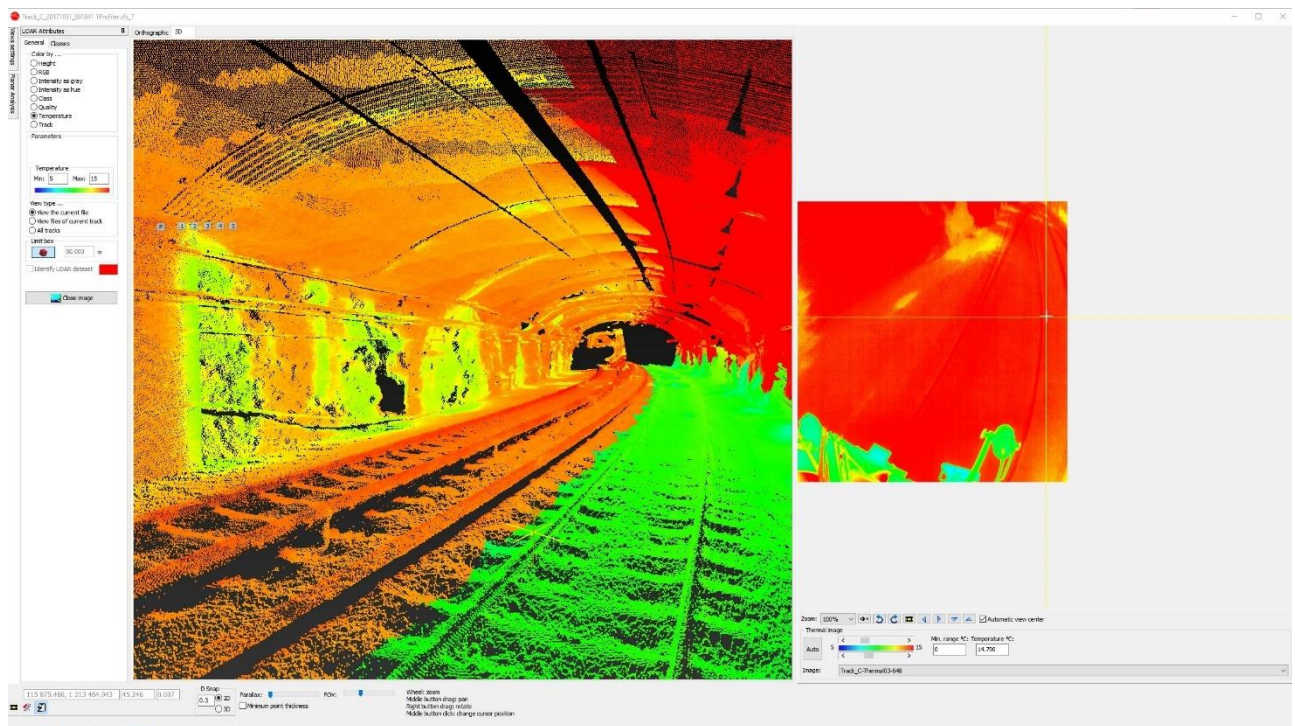


Figur 28: t.v: Modell med temperaturspenn på 5-15°C. t.h: Modell med temperaturspenn på 10-30°C.



Figur 29: Illustrasjon av sikringskap, vegg, togskinne og tak før korreksjon.

Kalibreringen ble gjort på modellen med en temperaturskala 5-15°C som er samlet inn fra kartleggingen av t-banelinjene i Oslo høsten 2017. Punktskyen som ble brukt var samlet inn uten noen form for kalibrering i forkant, som forsøkt over i oppgaven. I bildene ble det målt en forskjell mellom kameraene. Her ble det målt en forskjell mellom samme flate som kameraene fanget opp, som er gjengitt i tabell (6). Referansekamera ble valgt til å være kamera 2. Kamera 4 og kamera 2 målte begge det samme på lik type flate, altså høyre og venstre kamera i kjøreretning, se figur (30).

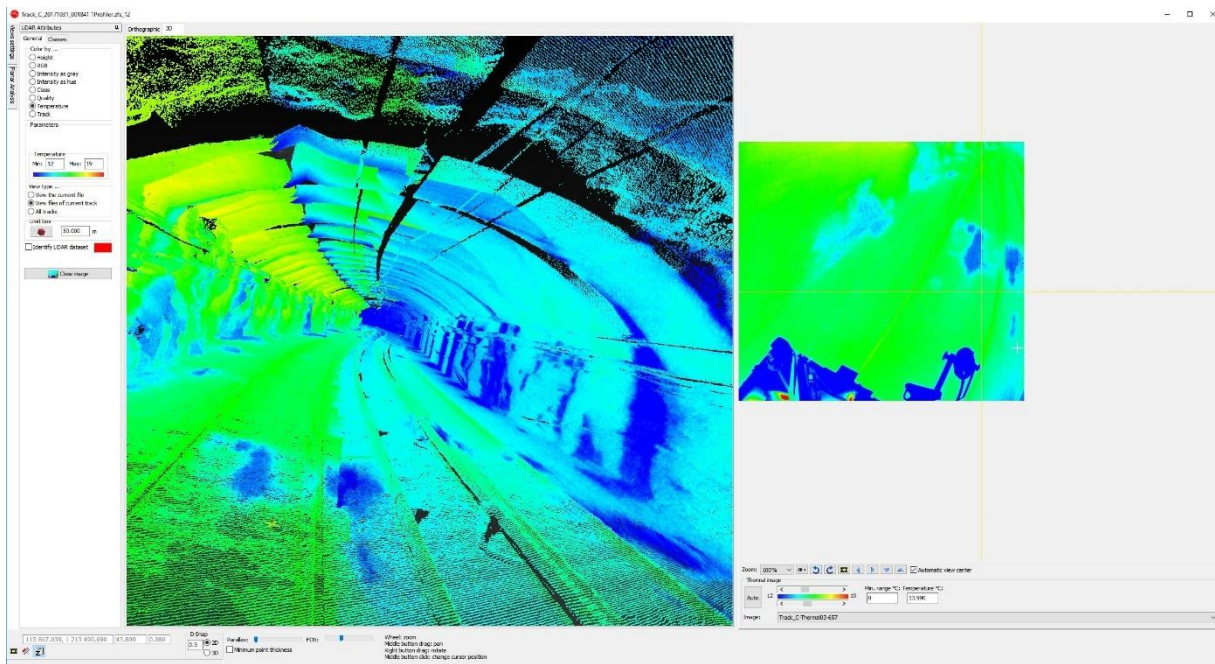


Figur 30: Utsnitt fra programvare. Til venstre punktskyen, til høyre bilder fra termisk kamera. Nederst er verdier for målt temperatur, fargeskala og temperaturskala, hvor det kan måles forskjeller ved samme objekt/overflate.

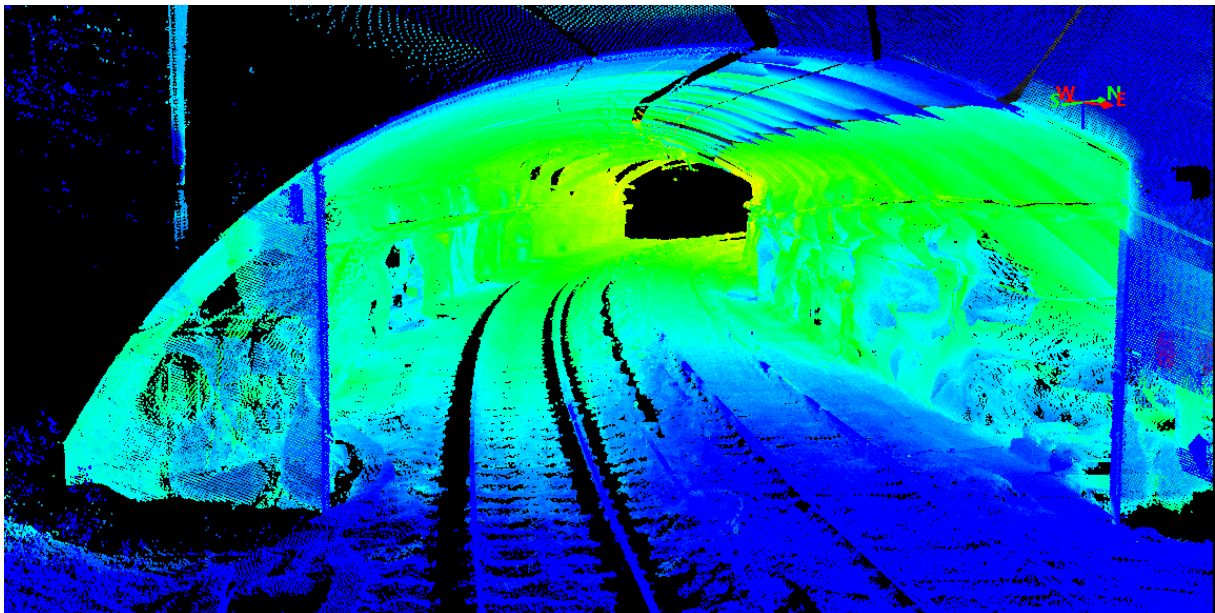
Tabell 6: Differanse mellom valgt referansekamera(høyre) målt i programmet tilhørende utstyret

Cam.2	Cam.4	Cam.1	Cam.3
13,5°C	13,5°C	21,5°C	9°C
Diff: 0	0	(-) 8°C	+4,5°C

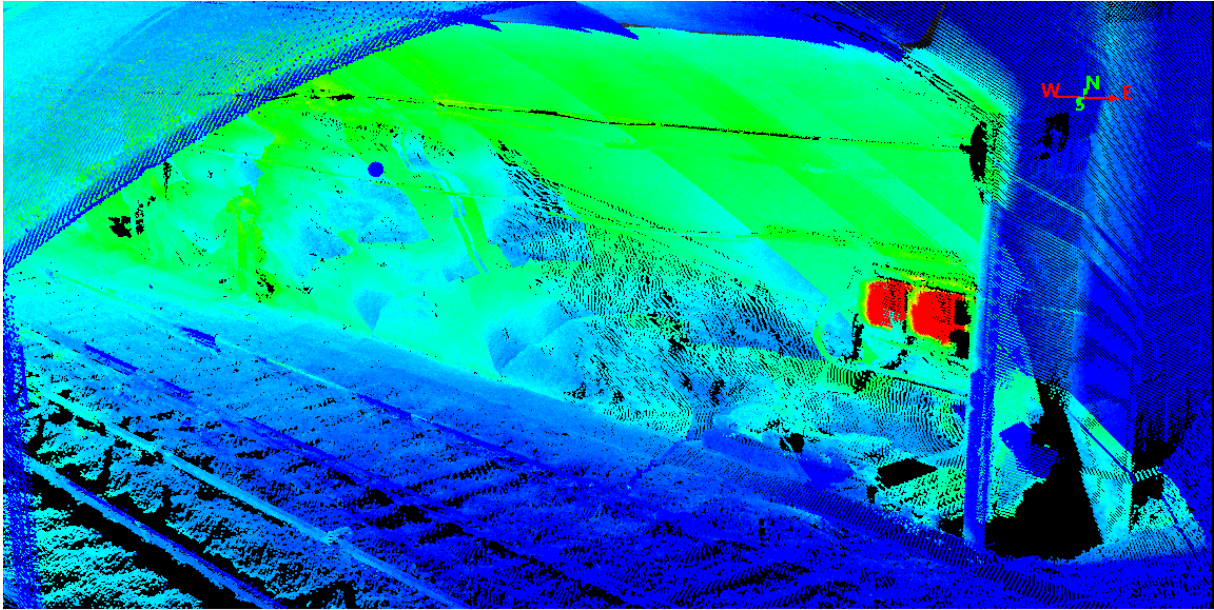
Differansen ble skrevet inn i kalibreringsfilen og datasettet ble igjen prosessert med ett offset på hvert av kameraene. Resultatet av kalibreringen kan sees i figur (31 & 32). Det er uvisst om kamera 2 måler riktig temperatur i forhold til de andre det må derfor sees bort ifra temperaturene som blir generert i ettertid og heller holde fokuset på å få en uniform og informativ punktsky.



Figur 31: Resultat av kalibrering i programvare.



Figur 32: Resultat av kalibrering, punktskyen ferdig eksportert og lastet inn. Temperaturspenn: 5-15°C



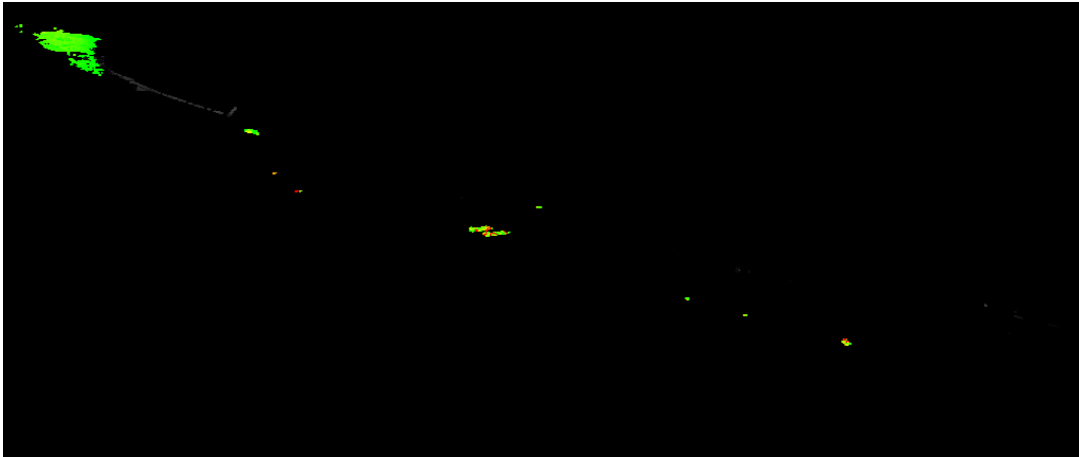
Figur 33: Illustrasjon av sikringsskapet etter offset-korreksjonen Temperaturspenn 5-15°C.

I figur (32) og figur (33) er det en forbedring i punktskyen, og punktskyen er dermed en informativ og brukbar punktsky for videre prosessering og visualisering av mulige resultater. Detaljene er tydeligere og i tillegg synes det at når utgangen av tunnelen nærmer seg blir det kaldere langs togsporet, og varmere innover i tunnelen noe som gjenspeiler virkeligheten da datasettet ble samlet inn på natten. Punktskyen er mer informativ og detaljert, samt at ekstrempunktene blir bedre fremhevet.

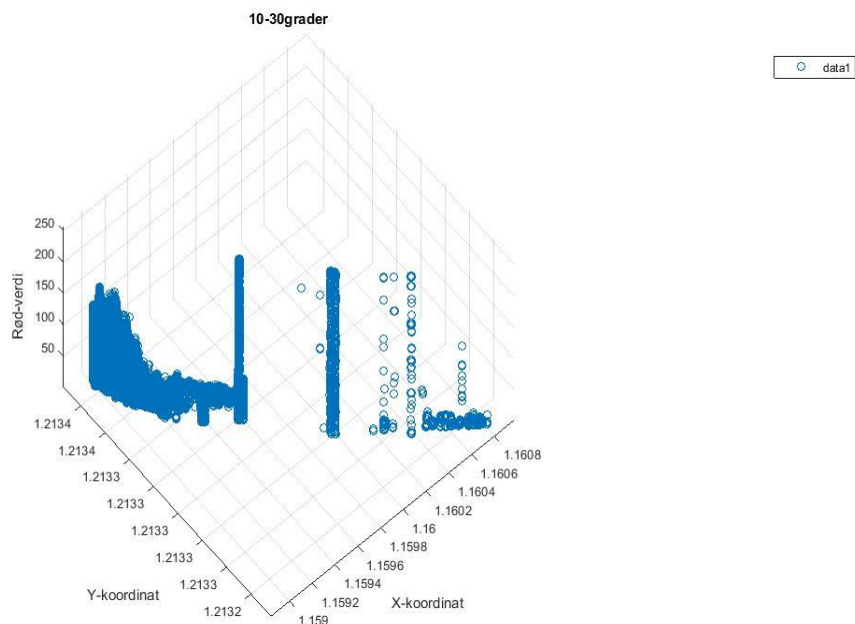
4.3 Del 3: Automatisering av prosessen

4.3.1 Plotting av R-verdier og intensitetsverdier

Automatisering av prosessen ble forsøkt under oppgaven. Et utdrag av punktskyen som var filtrert ble forsøkt plottet i en graf med R-verdier, X- og Y-koordinat på henholdsvis Z-, X- og Y-aksen. Grunnet regnekapasitet ble punktskyen filtrert før plotting og det ble brukt en punktsky der maksimumstemperaturen var 30°C, og minimumstemperaturen var på 10°C. Figur (34) gir en oversikt over punktskyen som ble plottet, og figur (35) er plottet.



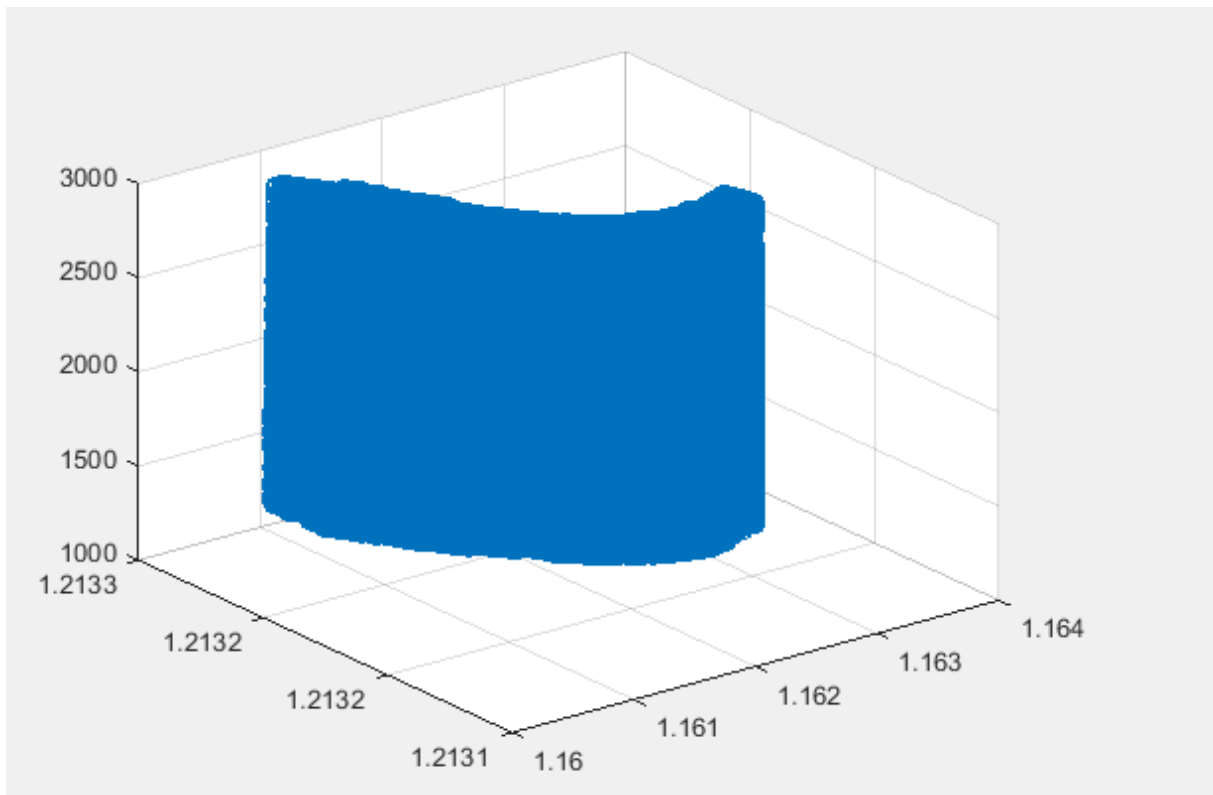
Figur 34: Punktsky som ble plottet i MatLab



Figur 35: Resultat av plottet punktsky fra MatLab

I figur (35) ser vi samlingen av punktene for togsporene og sikringsboksen, i tillegg til taket. Dette ble gjort på punktskyen som ikke var korrigert for offsetet mellom kameraene.

Dette ble også gjort for intensitetsverdier. Punktskyen var filtrert her på nettopp intensitetsverdier grunnet mangel på regnekraft. Punktskyen er så plottet med X- og Y-koordinat langs x- og y-aksen, og intensitetsverdien langs z-aksen.



Figur 36: Punktsky plottet med intensitet langs Z-aksen, og X og Y-koordinat langs X- og Y-aksen i plottet.

Av figur (36) gir ikke plottet noen informasjon grunnet mengden av punkt, og dermed vanskeligheter for å detektere områder i plottet. En bedre filtrering av punktene ville ha gitt færre punkt, men med tanke på støyen som er igjen i punktskyen, se figur (21 & 22), så blir det vanskelig å detektere lekkasje med et slikt plott. En mulig klassifisering på intensitetsverdier kan testes ut, men er da ikke gjort her grunnet manglende mulighet i programvaren.

5. Diskusjon

5.1 Del 1: Deteksjon

5.1.2 Deteksjon av varme

Deteksjonen av varme elementer og vannlekkasjer ble gjort ved en filtrering, utklipping og prosessering av koordinatene til interesseområdene. Filtringen ble gjort på samme temperaturspenn.

Varmedeteksjonen ble gjort ved å filtrere på rød-verdier. Grunnet taket fremsto varmt og det ikke var en korrigert punktsky vi jobbet med, var det en del støy fra taket da filtreringen var gjennomført. Dette kan unngås ved å øke temperaturspennet og minimums- og maksimumstemperaturen, slik som vist i figur (28).

En utfordring med deteksjonen er tilgjengeligheten av temperaturer. Den er tilgjengelig, men kun ved bruk av Leicas egen programvare og tilgang til bildene. Dette er tungvint grunnet mangel på verktøy som filtrering og klassifisering i programvaren, og brukeren blir «låst» til den programvaren for å ha tilgang til temperaturer.

I tillegg er det vanskelig å knytte fargene til en temperatur grunnet det settes en maksimums- og minimumstemperatur som utgjør temperaturspennet til punktskyen. Dette gjør som nevnt tidligere at alle temperaturer over maks- og under minimumsgrensen, blir enten røde eller blå i punktskyen. Vi kan dermed ikke si sikkert ut ifra punktskyen hvilken temperatur punktene har, grunnet 65536 mulig verdier å fordele seg ut på. Dermed kan vi kun peke på interesseområder der det er mistanke om varmgang, men vi kan ikke si noe om hvor varmt det faktisk er grunnet feilkilder, valg av temperaturspenn på punktskyen og at selve temperaturen er utelatt fra punktskyen. En konvertering av RGB-verdiene kan være en løsning, men da må konverteringsalgoritmen være kjent og det vil fortsatt være noen temperaturer som kan bli utelatt da et temperaturspenn må settes for å få ut punktskyen.

5.2.2 Deteksjon av vann:

Deteksjon av vann ble gjort på filtrering av intensitet og fargeverdier. De gå nokså like resultater, men intensiteten er da ikke avhengig av temperaturspennet for å få frem vannet slik som det er ved bruk av RGB-verdier. Det er ingen sikkerhet i at intensiteten angir alle vannområder da vannet ikke er så dypt, og noe av refleksjonen kan komme fra stein/betongen

under vannflaten. Allikevel vil dette gi en lav intensitet tilbake, grunnet noe refleksjon på vannflaten av laseren, og strålingen blir spredt rundt i rommet.

Dersom intensiteten ble brukt ble resultatet områder der det var inntrengning av vann eller fukt på vegger og gulv. Støyen i den filtrerte punktskyen høy, da mange punkt med nokså lik intensitet ble igjen i punktskyen etter endt filtrering. Det er mange små områder som dukker opp hvor det er usikkert om det er fukt, lekkasje eller en vanndam. Verifisering av det samme områdene kan gjøres med RGB-bilder fra MSS, men ble ikke gjort i oppgaven. Dette burde gjøres for å ikke vise til gale områder.

RGB-verdiene er kun en framstilling av den målte temperaturen. Det trengs et lavt temperaturspenn og en lav min- og makstemp for å gi de lave temperaturene et godt fargespekter å spre seg på, og dermed fremheve nyansene fra fordampingen av vannet eller temperaturendringene fra tørt til vått område. I noen tilfeller kan vannet kanskje ha oppnådd termisk likevekt med omliggende objekter eller flater, altså samme temperatur som omliggende flate, men det skal kunne fanges opp grunnet vannets egenskaper som materiell og fordampningseffekten som vil slå ut ifølge Vollmer & Möllman (Vollmer and Klaus-Peter 2017) og (Tattersal, 2016).

Lekkasje bak betongvegger ble ikke detektert, da det ikke ble funnet eksempler på dette i datasettet. Det ble heller ikke bekreftet i feltarbeidet at det en slik lekkasje eksisterte så dette er noe som det anbefales å jobbe videre med, men ifølge (Vollmer and Klaus-Peter 2017) skal dette være mulig i teorien.

Antall feilkilder er antatt å være stort når det kommer til deteksjon av vann, og det kan derfor ikke settes noen om absolutt temperatur på vannet heller. Det er kanskje ikke ønskelig, men de målte temperaturene kunne vært fine å ha når det skal detekteres lekkasjer i punktskyen i tillegg til RGB-verdier, intensitet og den visuelle informasjon som punktskyen gir etter endt korreksjon.

5.2 Del 2: Kalibrering

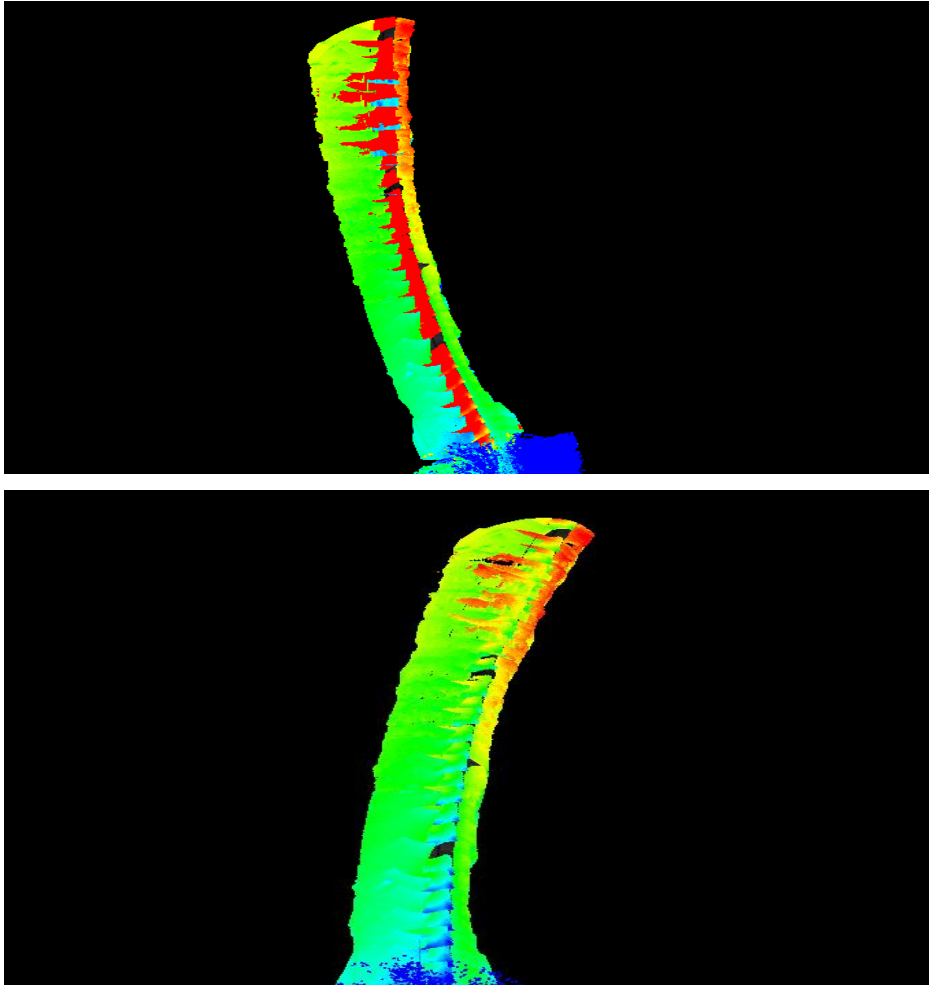
Kalibreringen av kameraene ble forsøkt gjort på 2 måter. Dette var ved en «NUC» og en offset-korreksjon. Ettersom at «NUC»-en og det første forsøket på offset-korreksjon ikke viste tegn til forskjell av målt temperaturspenn er det grunn til å tro at dette skyldes noe annet enn selve kamerakalibreringen. Dette kan være feilkilder som dukker opp inne i selve kamera

når datainnsamlingen pågår og temperaturendringer i omgivelsene skjer hurtig. Dermed kan kameraene gjennomgå termisk sjokk ifølge Vollmer & Möllmann (Vollmer and Klaus-Peter 2017) grunnet manglende termisk likevekt, eller en termisk drift dersom dette ikke korrigeres for under opptak.

Den termiske driften skal ifølge Leica rettes opp i av en såkalt «Flat Field Correction», FFC. Dette er kjent som en korreksjon for å forbedre bilder, men Leica mener at denne skal korrigerer for termisk drift innad i kamera. Med tanke på at enheten består av fire kameraer er det grunn til å tro at det ene kan drifte, mens det andre blir rettet opp da det er ukjent om FFC-en fungerer på alle kameraene samtidig eller ett og ett. Dette burde vært undersøkt mer, og kameraene skulle vært forsøkt koblet opp til tilhørende programvare for kameraene for å hente ut mer informasjon om sensorenes parametere, men tiden strakk ikke til.

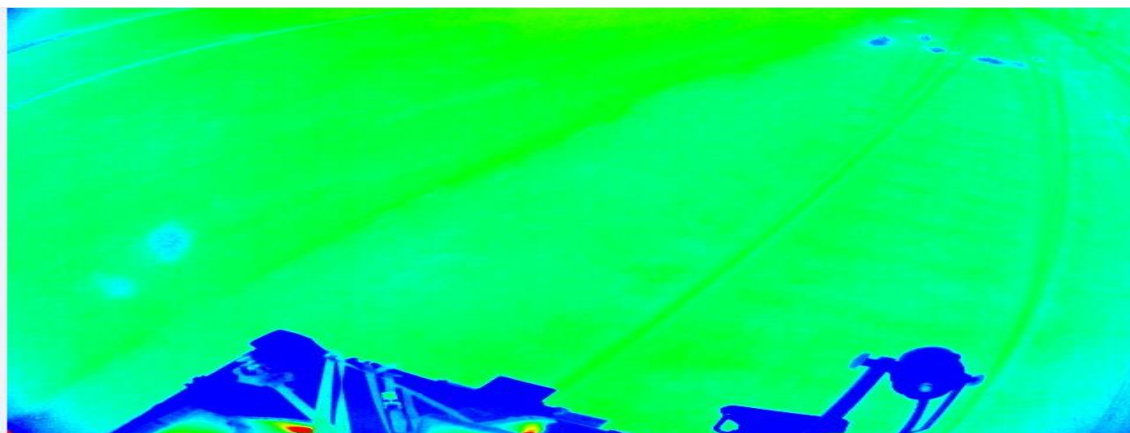
Det er stor grunn til å tro at noe som er nevnt over skjer under innsamling av dataene. Feilkildene er såpass mange og kjøringen inn og ut av tunneler utsetter kameraene for store endringer i temperatur dersom datainnsamlingen foregår på dagen og vinteren som er gjort på datasettet av Operatunnelen. Retningslinjene for termisk fotografering utendørs er ikke blitt fulgt, se kapittel 2.8, og maks oppvarmingstid på kamera var ca.15 minutter. Dette kan ha hatt en innvirkning på punktskyens uniformhet og avviket mellom de samme flatene i temperatur.

Av punktskyene som er blitt laget ser vi kameraet som peker ned mot kjøreretningen og opp i taket har en tendens til å gi en kaldere og varmere temperatur. Kamera i taket er ofte utsatt for kunstig lys og varm luft i tunneler, som kan være forstyrrende i en punktsky der temperaturspennet er lavt. Det gir en effekt av at taket er overtent, og blir detaljer i punktskyen borte. Det vises ikke hvor lamper og annet er, se figur (16). Med offset-korreksjon ble dette bedre, og detaljene i taket kom frem. Dersom feil i målingene skyldes drift i kameraene er det grunn til å tro at denne korreksjonen vil varier gjennom hele punktskyen. Dermed blir det forskjeller i den korrigerte punktskyen langs vegger og tak, men det er bedre enn utgangspunktet, se figur (37).



Figur 37: Over: Overblikk tunnel før korreksjon. Under: Overblikk tunnel etter korreksjon

Dette forklarer likevel ikke det kalde sporet som er helt blått. Det samme problemet var tilstede før utført «NUC», og dersom det ene drifter eller gjennomgår termisk sjokk ville nok alle gjort det og fargene ville endret seg langs sporet. Bildene fra kamera 3, se figur (38) viser at bilen/plattformen har blitt med i bildene. Dette kan tyde på at fargeleggingsalgoritmen som blir brukt i programvaren kan gi feil i punktskyen når uønskede elementer er med i bildene. Dette vil kanskje kunne løses ved endring av vinkel/orienteringen på den termiske enheten for å unngå å fange opp bilen i bildene, og dermed unngå den misvisende kalde asfaltstripen som er gjennomgående for begge datasettene brukt i denne oppgaven. Se figur (16) og figur (26 & 27). I tillegg er da punktskyen fortsatt lite uniform etter forsøkt «NUC» og offset-korreksjon, og gir dårlig informasjon om tunnelens tilstand.



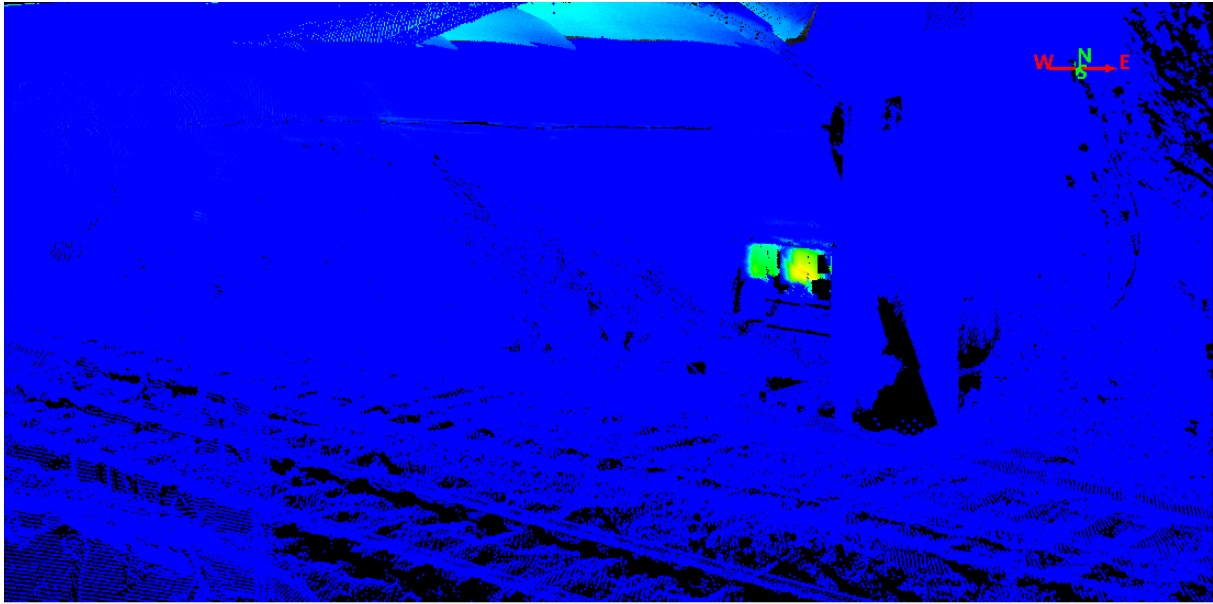
Figur 38: Bilde fra kamera 3. Mulig feilkilde til fargeleggingen i punktskyen. Litt av togvognen i bildet. Temperaturspenn 5-15 °C.

Med offsetkalibreringen ble ting bedre, og en uniform og informativ punktsky ble til. Siden det legges til eller trekkes fra ett offset i grader på de allerede målte temperaturene blir temperaturene feil, da det velges et referansekamera uten å vite sikkert at det måler korrekt. Grunnet mengden av feilkilder som kan oppstå ved termografi innendørs og utendørs kan det ikke sies at temperaturene er nøyaktige i utgangspunktet og nøyaktigheten på sensorene som er brukt i oppgaven er heller ikke gode i samspill med alle feilkildene.

For å kunne få en nøyaktig absolutt temperatur må emissiviteten til objektene være kjent, korreksjoner for lysets innfallsvinkel på kamera må gjøres, termisklikevekt må være opprettet, og objektets overflateegenskaper må tas hensyn til. Se tabell (1) for mer info om feilkildene. Ved en offset-kalibrering er det viktig å først måle i de termiske dataene og korrigere punktskyen, men samtidig sørge for at informasjonen blir fremhevet etter endt korreksjon slik at verken lekkasjer eller varme-elementer blir påvirket.

En bedre kalibrering av kameraene skulle vært forsøkt, og termisk likevekt i kameraene skulle vært opprettet før en eventuell kontroll av stråling form av pappkassen. I tillegg skulle kameraene vært undersøkt med tilhørende programvare, men det ble ikke gjort. Grunnen til at dette er ønskelig er for å prøve å oppnå en uniform punktsky fra førstegangsprosessering da ved lav minimumstemperatur og makstemperatur, og et lavt temperaturspenn. Kilden til avviket hadde vært lettere å finne, og det kunne blitt utført en permanent kalibrering av kameraene dersom kameraets programvare hadde blitt brukt til kalibrering. Dermed kan det unngås korrigerende offset på kameraene etter endt førstegangs prosessering, og kunne fremhevet

eventuelle vannlekkasjer samtidig med de varme elementene. Ved høyt temperaturspenn blir kun ekstremverdiene fremhevet, mens resten av punktskyen som oftest blir i samme farge, se figur (39).



Figur 39: Illustrasjon av «ekstreme» verdier fremhevet i en punktsky med høyere temperaturspenn (20-40 °C)

En mulighet som anbefales å jobbe videre med er å ta opp bildene i gråtone, og ikke med JET-fargeskalaen. Dermed vil det være mulig å koble gråtoneverdiene til en temperaturskala da det er én verdi å forholde seg til, og ikke 3. Dette ble ikke betraktet i denne oppgaven hvor fokuset ikke ble lagt på bildene selv, men punktskyen som genereres i ettertid.

5.3 Del 3: Automatisering av prosessen

Automatisering av prosessen er mulig. En «klusterings» analyse som er forsøkt gjort i oppgaven fungerer på de varme verdiene, men ikke på intensitet. Av figur (36) gir ikke plottet noen informasjon grunnet mengden av punkt, og dermed vanskeligheter for å detektere områder i plottet. En bedre filtrering av punktene ville ha gitt færre punkt, men med tanke på støyen som er igjen i punktskyen, se figur (21 & 22), så blir det vanskelig å detektere lekkasje med et slikt plott. En mulig klassifisering på intensitetsverdier kan testes ut, men er da ikke gjort her grunnet manglende mulighet i programvaren.

RGB-verdiene er som nevnt en fremstilling av temperaturene, og dermed oppdage varme områder ved et plott med R-verdier og grunnriss koordinater. Av figur (35) er det mulig å

plukke ut skinner og sikringsboks, men det også er en del støy. Det kreves en analyse av plottet i etterkant, og det synes at dette er en veldig primitiv måte å detektere på.

En klassifisering av punktene på RGB-verdier burde kunne skille ut varme objekter og vann i samme prosess slik at det en filtrering på to ulike attributter unngås. Det hadde vært interessant å teste dette ut, men det ble ikke gjort grunnet programvaren, Quick Time Modeler, ikke hadde et klassifiseringsverktøy tilgjengelig.

Intensiteten er jevnt fordelt utover og dermed umulig å hente ut kun det som er vann ut fra et plott som er gjort i denne oppgaven, se figur (36). Deteksjon av vann via å plotte RGB-verdier vil være vanskelig da vannlekkasje ikke er noen ekstremverdi grunnet temperaturen til vannet kan være nokså lik omgivelsene, og dermed vil den representative RGB-verdien ikke være et ytterpunkt på skalaen. En klassifisering er mulig, men av erfaringer er det å anbefale manuell analyse av punktskyen gjennom nettopp filtrering, utklipping av områder og skjønn for deteksjon av vann i tunnel.

Dersom det hadde blitt laget en 3D-modell med tilhørende temperaturverdier eller fått implementert temperaturer i skyen kunne brukt disse til en filtrering eller klustering ,og eventuelt utviklet et deteksjonsscript som ser på endringer i temperatur i forhold til omgivelsene. En mulighet for dette foreløpig vil være å lage en 3D-modell ut i fra de termiske bildene, men da er spørsmålet om modellen vil være godt nok detaljert grunnet de termiske kameraene lave oppløsning. En annen løsning er et videre samarbeid med Leica om implementering av temperatur i skyen, eller ta i bruk programvaren 3D-TK fra prosjektet «Thermal Mapper»(Borrmann, Nüchter et al. 2012) for å oppnå en punktsky med temperatur som attributt.

6. Konklusjon

I denne oppgaven har det vært jobbet med deteksjon av varme elektriske elementer og vannlekkasje, kalibrering av kameraene og det er blitt sett på mulighetene for en automatisering av deteksjonsprosessen.

6.1 Deteksjon

Etter endt arbeid er det bevist at en deteksjon av varme elementer og vannlekkasjer er mulig i punktskyen. Det må utøves skjønn når det velges temperaturspenn, og maksimums- og minimums-temperatur for å detektere ulike objekter som vann og varme objekter. Ved deteksjon av varme elementer har ikke temperaturspennet så stor innvirkning, da disse elementene ofte vil ha en høy temperatur, men temperaturspennet kan ikke settes til hva som helst. Det må være innenfor et reelt temperaturspenn, (+/-)10°C fra omgivelsestemperaturen, men vil som oftest skille seg ut fra omgivelsene ved store temperaturspenn grunnet «ekstreme» RGB-verdier.

En utfordring med deteksjonen er at det ikke er mulig å si hvor varmt område er med punktskyen. Dette må gjøres ved målinger i bildene. Det har kun blitt fremstilt en punktsky som gir et inntrykk av hvor varmt det er og det kan dermed ikke sies at det er varmgang i noen element ut ifra punktskyen.. Det kan kun påpekes områder av interesse, og grunnet mengden av feilkilder, som mangel på emissivitet, inntreffende vinkel og en lav nøyaktighet fra før, kan det ikke med sikkerhet angis riktig temperatur.

6.2 Kalibrering

Den planlagte kalibreringen av kamera ga ingen indikasjon på offset mellom kameraene. Likevel ble ikke punktskyen uniform og dette gir opphav til nye problemstillinger som kan jobbes videre med i senere tid, som dette med endring av vinkel/orientering av det termiske elementet for å unngå å fange opp transportplattformen som brukes og som kan ha forårsaket problemet med å få en uniform punktsky.

«NUC»-kalibreringen fungerte ikke som forventet, og en offset-korreksjon før datainnsamling lyktes heller ikke. Offset-korreksjonen etter prosessering lyktes for å oppnå den uniforme punktskyen som var ønsket. Men dette er da en manipulasjon av innsamlede data og er tidkrevende da dataene må reprosesserer etter førstegangsprosessering, så et videre arbeid på dette er ønskelig.

6.3 Automatisering av prosessen

Det er muligheter som tilsier at en automatisering av prosessen burde gå, men ikke alle muligheten som har blitt drøftet i oppgaven har blitt testet ut grunnet mangel på verktøy i brukt programvare. Derfor er det foreløpig kun mulig å detektere varme områder gjennom plotting/klustering, og deteksjon av vann må testes ved en klassifisering på intensitet. Dette vil utelukke deteksjon av vann bak vegger i tunnelen grunnet egenskap ved laseren, men kan brukes til deteksjon av vann som har trengt inn i tunnelen. I tillegg er det ønskelig med en klassifisering av RGB-verdier for deteksjon av varme og vann i samme prosess.

7. Videre Arbeid

7.1 Deteksjon og automatisering av prosessen

Deteksjonsprosessen og automatiseringen anbefales å jobbe videre med. Det er mulig å jobbe med dataen slik som i denne oppgaven, men dersom datasettet er stort kan det være tidkrevende. Derfor er det ønskelig at det jobbes videre med en klassifisering av punktskyen på intensitet og RGB-verdier for å effektivisere deteksjonsprosessen, med annen programvare som CAD- og andre punktskyprogramvarer kan testes ut.

Et videre arbeid med deteksjon av lekkasje og fukt bak vegger er også ønskelig da dette ikke ble bevist i oppgaven med dataene som var tilgjengelig. I tillegg anbefales det å teste ut ordentlige klusteringsmetoder for å detektere vann og fukt i tunnelen.

7.2 Kalibrering

En kalibrering av kameraene har ikke vist seg å være en nødvendighet for å få en uniform punktsky, da dette kan skyldes andre faktorer. Derfor anbefales de å jobbe videre med vinkelen på den termiske enheten. Denne burde endres for å se hvilken innvirkning dette har på punktskyens fargelegging, i tillegg til at termisk likevekt skal være forsøkt oppnådd før innsamling av data. Dersom dette ikke hjelper må en kalibrering av kameraene gjøres.

For mer informasjon om kameraene er det ønskelig å forsøke å koble disse opp til FLIR Systems sin tilhørende programvare for å undersøke om en kalibrering faktisk er nødvendig, og for å få mer informasjon om kameraenes parametere.

7.3 Implementering av temperatur

Temperatur i punktskyen er også ønskelig og der kan en datainnsamling i gråtone verdier og ikke JET-farger være aktuelt å se på slik at det er mulig å knytte gråtoneverdier mot temperatur. Implementering av temperatur i punktskyen gjennom da enten en forbedring av eksisterende programvare eller se på muligheten for bruk av 3D-TK(Borrmann and Nüchter 2018) er og ønskelig for å kunne si noe om hvor varmt de forskjellige detekterte elementene er, selv om en absolutt temperatur ikke vil være så nøyaktig.

En generering av en 3D-modell ut i fra de termiske bildene kan også være aktuelt å jobbe videre med, da det er muligheter for dette er der grunnet alle bilder har en bestemt posisjon og orientering, og dermed kan en 3D-modell genereres i teorien.

8. Litteratur og kilder

BFi, A. (2015). "FLIR Tau 2 specifications, accessories, lenses and price." Retrieved 12.04, 2018, from <https://www.acalbfi.com/uk/articles/articlesContentPage/FLIR-Tau-2-specifications--accessories--lenses-and-price/NA-000716/suppliers>

Borrmann, D., et al. (2012). "Mutual calibration for 3D thermal mapping." IFAC Proceedings Volumes **45(22)**: 605-610.

Borrmann, D., et al. (2013). Thermal 3D mapping of building façades. Intelligent autonomous systems **12**, Springer: 173-182.

Borrmann, D. and A. Nüchter (2018). 3D-ToolKit.

Borrmann, D., et al. (2012). "The project thermalmapper—thermal 3d mapping of indoor environments for saving energy." IFAC Proceedings Volumes **45(22)**: 31-38.

Cramer, J. (2014). "Automatic generation of 3d thermal maps of building interiors." ASHRAE transactions **120**: C1.

FLIR (2016). FLIR TAU 2 Long Wave Infrared Camera, FLIR SYSTEMS.

Gade, R. and T. B. Moeslund (2014). "Thermal cameras and applications: a survey." Machine vision and applications **25(1)**: 245-262.

Husefest, J. T. (2017). Automatisk klassifisering av vannflater i LiDAR-data, Norwegian University of Life Sciences, Ås.

Leica Geosystems (2017). Leica Pegasus Two; Mobile reality Capture, Geosystems, Leica.

Løvås, M. (2017). Increasing the Accuracy of Positioning in Mobile Mapping Systems-A method supported by Simultaneous Localization And Mapping, NTNU.

Nugent, P. W. and J. A. Shaw (2014). Calibration of uncooled LWIR microbolometer imagers to enable long-term field deployment. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXV, International Society for Optics and Photonics.

OLSEN, F. B. (2003). Formulering av krav til termisk kamuflasje, FFI/RAPPORT-2003/00537, FFI.

Systems, F. (2018). "Accuracy specification of FLIR cameras." Retrieved 01.03

2018, from http://flir.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/221/~/accuracy-specification-of-flir-cameras.

Tattersall, G. J. (2016). "Infrared thermography: A non-invasive window into thermal physiology." Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology **202**: 78-98.

Vollmer, M. and M. Klaus-Peter (2017). Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications, John Wiley & Sons.

Wang, C. and Y. K. Cho (2012). Non-invasive 3D Thermal Modeling for Buildings. ICSDC 2011: Integrating Sustainability Practices in the Construction Industry: 474-481.

Wang, C., et al. (2012). "As-is 3D thermal modeling for existing building envelopes using a hybrid LIDAR system." Journal of Computing in Civil Engineering **27**(6): 645-656.

Wikipedia (2018). "Microbolometer." Retrieved 14.03, 2018, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Microbolometer>.

Zoller+Fröhlich "Z+F PROFILER® 9012_Datasheet." Z+F PROFILER® 9012.

9. Vedlegg

Vedlegg 1: Matlab-Script

%% Koordinater til utslag på varme:

clc

clear all

% Forerhus, feilkilde:

```
[minX,minY,minZ,maxX,maxY,maxZ,X,Y,Z] = int2koord('Forerhus.txt');
```

%%

% Sikringsboks:

```
[minX1,minY1,minZ1,maxX1,maxY1,maxZ1,X1,Y1,Z1] =  
int2koord('Sikringsboks_element.txt');
```

%%

% Togskinne:

```
[minX2,minY2,minZ2,maxX2,maxY2,maxZ2,X2,Y2,Z2] = int2koord('togskinne.txt');
```

%% Koordinater til vann:

% Vann ved tog 1) og 2):

% 1)

```
[minX3,minY3,minZ3,maxX3,maxY3,maxZ3,X3,Y3,Z3] = int2koord('vannvedtog.txt');
```

% 2)

```
[minX4,minY4,minZ4,maxX4,maxY4,maxZ4,X4,Y4,Z4] = int2koord('vannvedtog2.txt');
```

% Vann på råsprengt fjell:

```
[minX5,minY5,minZ5,maxX5,maxY5,maxZ5,X5,Y5,Z5] =  
int2koord('vannsprengt fjell.txt');
```

%% Notat med Koordinater over interesseområder som er funnet.

```
fil = fopen('ResultaterTunnel.txt', 'wt');
```

```
fprintf(fil,'Resultater:');
```

```
fprintf(fil,'\nTidspunkt: 2018 12 04 12 21 35.00');
```

```
fprintf(fil,'\n');
```

```
fprintf(fil,'\nKoordinater over interesseområder');
```

```
fprintf(fil,'\n-----');
```

```
fprintf(fil,'\nMulig varmgang i elektroniske elementer');
```



```

fprintf(fil,'\n');
fprintf(fil,'\nTogskinne/sporveksel:');
fprintf(fil,'\n X = % 12.3f m Y = % 12.3f m Z = %4.3f m', X2,Y2,Z2);
fprintf(fil,'\n');
fprintf(fil,'\nSikringsboks/elektronisk element:');
fprintf(fil,'\n X = % 12.3f m Y = % 12.3f m Z = %4.3f m', X1,Y1,Z1);
fprintf(fil,'\n');
fprintf(fil,'\nFørerhus');
fprintf(fil,'\n X = % 12.3f m Y = % 12.3f m Z = %4.3f m', X,Y,Z);
fprintf(fil,'\n-----');
fprintf(fil,'\nVanninntrengning og lekkasjer');
fprintf(fil,'\n');
fprintf(fil,'\nVann ved togskinne/vegg, område 1');
fprintf(fil,'\n X = % 12.3f m Y = % 12.3f m Z = %4.3f m', X3,Y3,Z3);
fprintf(fil,'\n');
fprintf(fil,'\nVann ved togskinne/vegg område 2');
fprintf(fil,'\n X = % 12.3f m Y = % 12.3f m Z = %4.3f m', X4,Y4,Z4);
fprintf(fil,'\n');
fprintf(fil,'\nVanninntrengning ved vegg/mulig fukt:');
fprintf(fil,'\n X = % 12.3f m Y = % 12.3f m Z = %4.3f m', X5,Y5,Z5);
fprintf(fil,'\n-----');
fprintf(fil,'\nKommentarer til interesseområder: ');
fprintf(fil,'\n');
fprintf(fil,'\nDet er funnet 2 varme elementer som ligger mellom 20 og 40grader Celsius');
fprintf(fil,'\nDette er sannsylingvis ikke av noen interesse, da det ikke er direkte varmgang');
fprintf(fil,'\ni elementene mtp objektets temperatur');
fprintf(fil,'\nVannlekkasjene er sannsynligvis kun fukt på veggene, men det er noen dammer ved sporene');
fprintf(fil,'\nGrunnet råsprengt fjell på veggene er ikke fukten her noe å bry seg om, med mindre det viser seg at det ');
fprintf(fil,'\nbegynner å sprekke opp dersom tælen kommer om vinteren og kan skade tunnelen nevneverdig');

```

Vedlegg 2: MatLab-funksjon

%% Henter ut snitt posisjon i XYZ fra et interesseområde

```
function [minX,minY,minZ,maxX,maxY,maxZ,X,Y,Z] = int2koord(n)
```

```
    data = load(n);
```

```
    x = data(:,1);
```

```
    y = data(:,2);
```

```
    z = data(:,3);
```

```
    %Snittverdier, for et punkt.
```

```
    X = sum(x)/length(data(:,1));
```

```
    Y = sum(y)/length(data(:,2));
```

```
    Z = sum(z)/length(data(:,3));
```

```
    %% Verdier for ett polygon
```

```
    %X
```

```
    minX = min(x(:));
```

```
    maxX = max(x(:));
```

```
    %Y
```

```
    minY = min(y(:));
```

```
    maxY = max(y(:));
```

```
    %Z
```

```
    minZ = min(z(:));
```

```
    maxZ = max(z(:));
```

```
end
```

Vedlegg 3: Script for plotting av punktsky.

```
%% Test Clustering
clc

clear all

data = load('filtrertintensitet.txt');

R = data(:,5)./256;

G = data(:,6)./256;

B = data(:,7)./256;

I = data(:,4);

x = data(:,1)./(10^5);

y = data(:,2)./(10^6);

% Plotte R-verdier mot posisjon i fila, for så å sjekke ut hvor om det er
% clustering / ikke i forskjellige posisjoner. Det vil slå ut, da det går
% fra grønt til rødt f.eks(dette skulle vært gjort med ett segment av
% fila).

figure (1)

scatter3(x,y,I)
```



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway