



# Anvendelse af drone til termisk kortlægning af forureningsudstrømning

MST-792-00136

11-2016

Redaktion: Miljøstyrelsen

Tekst & Fotos, Rapport & Bilag 1:  
Drone Systems: Henrik Grosen, Sune Nielsen

Tekst & Fotos, Bilag 2:  
Drone Systems: Henrik Grosen, Sune Nielsen  
DTU: Christian Köppl, Filippo Bandini, Sheng  
Wang, Monica García, Peter Bauer-Gottwein

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

# Indhold

|           |                                             |           |
|-----------|---------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Introduktion</b>                         | <b>4</b>  |
| 1.1       | Resume                                      | 4         |
| 1.2       | Formål                                      | 4         |
| 1.3       | Problemstilling                             | 4         |
| 1.4       | Hovedkonklusioner                           | 4         |
| 1.5       | Lokaliteterne                               | 5         |
| 1.5.1     | Gasværksgrunden, Horsens Havn               | 5         |
| 1.5.2     | Grindsted Å                                 | 5         |
| 1.6       | Drone Systems                               | 6         |
| <b>2.</b> | <b>Teori</b>                                | <b>7</b>  |
| 2.1       | Termografi                                  | 7         |
| 2.2       | Opblanding og densitetsforskel              | 7         |
| 2.3       | Vejrforhold                                 | 7         |
| 2.4       | Brug af drone                               | 8         |
| <b>3.</b> | <b>Udstyr &amp; teknik</b>                  | <b>9</b>  |
| 3.1       | Droneplatform                               | 9         |
| 3.2       | Payload                                     | 9         |
| 3.2.1     | Termisk Sensor                              | 9         |
| 3.2.2     | OBA                                         | 9         |
| 3.3       | Ground control                              | 9         |
| 3.4       | Dataanalyse                                 | 9         |
| <b>4.</b> | <b>Metode</b>                               | <b>10</b> |
| 4.1       | Forundersøgelse                             | 10        |
| 4.2       | Flyveplanlægning                            | 10        |
| 4.3       | Udførsel af flyvning                        | 10        |
| 4.4       | Analyse af termisk data                     | 11        |
| <b>5.</b> | <b>Eksterne bemærkninger</b>                | <b>12</b> |
| 5.1       | Helle Blæsbjerg - Region Midtjylland, Miljø | 12        |
| 5.2       | Henrik Bjørn - VIA                          | 12        |
| <b>6.</b> | <b>Konklusioner</b>                         | <b>13</b> |
| 6.1       | Horsens Havn                                | 13        |
| 6.2       | Grindsted Å                                 | 13        |
| 6.3       | Tværgående perspektiver                     | 13        |
| 6.4       | Metodens anvendelighed                      | 14        |

# 1. Introduktion

## 1.1 Resume

Der er gennemført fem flyvninger både ved Horsens Havn og Grindsted Å. Flyvningerne er udført under forskellige vejrforhold og med forskellige flyvehøjder. Drone, kamera og dataopsamling har fungeret som forventet. Ved Horsens Havn er der identificeret to indsivningszoner ved påvisning af faner af opvarmet vand i overfladen. Efterfølgende indhentning af oplysninger fra Horsens Vand viser, at der på de to identificerede steder udledes regnvand. Sandsynligvis skyldes temperaturforskellene udløb af regnvand. Det er uafklaret om indsivning af forurenede grundvand sker sammen med regnvandsudledningerne. Ved Grindsted Å er der ikke identificeret indsivningszoner.

Denne rapport sammenfatter projektet på et overordnet plan.

Bilag 1 beskriver Horsens Havn.

Bilag 2 beskriver Grindsted Å, hvor de udførte undersøgelser er udvidet med deltagelse af DTU. Detaljeret beskrivelser, resultater og konklusioner herfra er indeholdt i Bilag 2.

## 1.2 Formål

Projektets overordnede formål er at afprøve og dokumentere, om termisk kortlægning fra drone kan anvendes som en tidsbesparende og omkostningsreducerende platform til detektion af grundvandsindsivning til havnebassin og vandløb. De specifikke formål ved de to feltlokaliteter var følgende:

- at lokalisere indsivningszoner ved spunsvæg til havnebassin, samt at identificere punkter med størst gennemsvivning ved Horsens Havn
- at teste metoden mod allerede kortlagte indsivningszoner i Grindsted Å

## 1.3 Problemstilling

Ændringen af jordforureningsloven i 2013 indebar, at regionerne nu har indsats mod jordforureninger, der truer overfladevand. Derfor vil der fremadrettet være behov for at identificere indsivningszoner af forurenede grundvand. Denne identifikation vil medføre, at undersøgelser samt afværgeforanstaltninger kan målrettes og dermed øge effekten af indsatsen samt reducere udgifterne.

Det er dog tidskrævende og ressource tungt at udføre det manuelle feltarbejde, der kræves for at indsamle nødvendig data til identifikation. Det vil derfor være en betydelig lettelse, hvis der kan udvikles en sikker, men mindre resursekrævende, metode til identifikation af indsivningszoner.

## 1.4 Hovedkonklusioner

Termograferingen med tilhørende dataopsamling er gennemført som planlagt. Ved Horsens Havn er der lokaliseret indsivningszoner. Det er uafklaret om forureningsindsivningen sker ved de identificerede zoner. Ved Grindsted Å er der ikke lokaliseret indsivningszoner. Der er observeret temperaturforskelle både på lokal og større skala, men observationerne er ikke tilstrækkelig konsistent og tydelig til at disse kan betragtes som bekræftede indsivningszoner.

Projektets resultater viser, at termografering fra drone generelt er en anvendelig metode til identifikation af indsivningszoner i havvand/havnebassiner. Grænseværdier for hvornår metoden er anvendelig skal identificeres. Når grænseværdierne er opfyldt er termografering fra drone en tidsbesparende og omkostningsreducerende platform.



## 1.5 Lokalteterne

### 1.5.1 Gasværksgrunden, Horsens Havn



Horsens Havn

Den 20.000 m<sup>2</sup> store gasværksgrund ved Horsens Havn er kraftigt forurennet. Der siver forurennet grundvand fra gasværksgrunden ud i havnebassinet langs Nordre Kaj. Der er anslået et flow på 20m<sup>3</sup>/døgn igennem spunsvæggen. Vandet indeholder PAH-forbindelser (polyaromatiske hydrocarboner), BTEX'er (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene), naphthalen og phenoler. Primært område for overflyvning er markeret med den røde ellipse. Sekundært område for overflyvning er markeret med den blå ellipse. Områderne er udvalgt og prioriteret af Miljø, Region Midtjylland.

### 1.5.2 Grindsted Å



Grindsted Å

I Grindsted Å har DTU Miljø gennem flere år dokumenteret forurening fra omkringliggende punktkilder, primært Grindstedværket. I modsætning til Gasværksgrunden i Horsens, er indsivningerne i Grindsted Å nøje kortlagt, hvilket giver mulighed for at verificere metoden til iden-

tifikation af indsivningszoner i vandløb. DTU Miljø har defineret det primære fokusområde, som er markeret med blå ramme. Sekundært ønskes at hele strækning af åen i kortudsnittet overflyves. De røde markeringer er allerede identificerede indsivningszoner.

## **1.6 Drone Systems**

Virksomheden Drone Systems udfører de termiske droneinspektioner.

Hertil anvender Drone Systems eget udviklet termisk system til drone, som gemmer indsamlet termisk data digitalt korreleret med geografisk information. Systemet er velafprøvet og verificeret til termografisk kortlægning og inspektion inden for fjernvarmesektoren.

## 2. Teori

### 2.1 Termografi

Termografi kan anvendes til at identificere temperaturforskelle i overfladevand.

Alle legemer udsender varmestråling. Ved almindelige temperaturer er der tale om stråling med bølgelængder i området 0,9 – 14  $\mu\text{m}$ . Strålingens intensitet afhænger af legemets temperatur og beskaffenheden af legemets overflade. Nogle materialer, som f.eks. vand eller anodiseret aluminium, er gode varmestrålere. De har høj emissivitet forstået på den måde, at de ved en given temperatur afgiver over 90% af den teoretisk mulige varmestråling, mens blanke metaller ved samme temperatur kun afgiver 2 – 5%. En del af varmestrålingen absorberes ved passage gennem af atmosfærens luft, primært i området 5 – 7,5  $\mu\text{m}$ .

Varmestrålingen opfører sig i øvrigt som synligt lys og kan derfor fokuseres med en linse og opsamles af en detektor i et kamera. I et termografisk kamera måles strålingens intensitet hen over billedfeltet, der er opdelt i pixels. På baggrund af den registrerede intensitet udregnes en "temperatur" for hver pixel.

Omregningen fra registreret strålingsintensitet til temperatur er kompliceret og de temperaturer, der angives i et termografisk billede, er ikke pålidelige absolutte temperaturer. Men når der måles på overflader med samme emissivitet (f.eks. vand) er de registrerede temperaturdifferencer i hvert enkelt billede overordentligt pålidelige.

### 2.2 Opblanding og densitetsforskel

Ved indstrømmende grundvand i stillestående vand, som f.eks. Horsens Havn: Om vinteren opstår temperaturkontrasterne, fordi det indstrømmende grundvand har en ret konstant temperatur på 8 – 9 °C, og dermed er varmere end det modtagende vand, der om vinteren har en temperatur på 0 – 4 °C. Temperaturforskellen giver en forskel i densitet. Det varmere, og derfor lettere grundvand stiger op og giver en registrerbar termisk kontrast i overfladen, da der kun i begrænset omfang finder en opblanding sted. Ved indstrømning af grundvand med lavt saltindhold i havvand, vil forskellene i saltindhold ligeledes give en forskel i densitet, der forstærker den termisk betingede densitetsforskel.

Ved indstrømmende grundvand i vand med høj aktivitet som f.eks. Grindsted Å: Det forventes ikke at densitetsforskel er en betydelig faktor når der er høj aktivitet i vandet. Høj aktivitet medfører en hurtig vertikal opblanding (over dybden) og en langsommere opblanding på tværs af åen. Dermed forventes en indsivning at kunne identificeres som en temperaturforskel på tværs af åen, hvis indsivningen er stor nok i forhold til åens vandføring (Aisopou, A., 2014).

### 2.3 Vejrforhold

Isdannelse i havvand begynder når vandtemperaturen er ca. -2 °C. Termografering bør prioriteres udført når vandtemperaturen i havnebassinet er imellem -2 °C og +4 °C.

Herved opnås en optimal densitetsforskel imellem havvand og indsivende grundvand samt størst mulig temperaturkontrast i vandoverfladen.

Termografering kan ikke udføres med pålidelige resultater når der er direkte sollys. Endvidere bør termografering ikke udføres imens overfladetemperaturer har en forhøjet temperatur grundet opvarmning fra sollys. Af den årsag bør termografering først foretages flere timer efter solnedgang. Dette sikrer at ophobet varme er diffunderet.

Øget vindhastighed giver øget aktivitet i vandet, og derigennem øget opblanding. For at opnå bedst mulige temperaturkontraster ønskes så lav opblanding som muligt. Derfor tilstræbes flyvning ved lav vindhastighed.

Ved Grindsted Å udføres to af de fem flyvninger i sommerhalvåret, når vandtemperaturen i åen er så høj som mulig. Dette giver et potentielt negativt bidrag af densitetsopdrift, men, givet den hurtige opblanding ved Grindsted Å vurderes densitetsopdrift at udgøre en ubetydelig faktor.

## **2.4 Brug af drone**

Ved at anvende en drone som platform kan større områder effektivt afsøges. Desuden muliggør en drone platform dækning af områder der normalt er svært tilgængelige.

## 3. Udstyr & teknik

### 3.1 Droneplatform

Dronen (DJI S1000+) er en professionel og alsidig octocopter med stor løftekapacitet og driftssikkerhed. Den giver en høj grad af sikkerhed, idet den har indbygget redundans, således at den kan flyve med op til 2 motorer ude af drift. Dronen muliggør en bred palette af payloads i kraft af dens løftekapacitet og montagesystem.

Detaljer og specifikationer:

<http://www.dji.com/product/spreading-wings-s1000-plus>

### 3.2 Payload

Payload systemet er udviklet af Drone Systems. Det er bygget op omkring en 2-akslet gimbal, der har monteret en termisk sensor samt processerings- og lagringsenhed, kaldet OBA.

#### 3.2.1 Termisk Sensor

Den termiske sensor er en FLIR Tau 2 336 LWIR (opløsning: 336 × 256 pixels).

FLIR Systems er verdens største leverandør af termografiske sensorer og systemer. Tau 2 er en serie af termiske sensorer der er designet til integration på bl.a. droner.

Detaljer og specifikationer:

<http://www.flir.com/cores/display/?id=54717>

#### 3.2.2 OBA

OBA er et embedded computersystem som interfacer til den termiske sensor samt dronens flightcontroller. Systemet producerer og gemmer et termisk billede 9 gange i sekundet. Til hvert billede gemmes data fra flightcontrolleren, bl.a. GPS position, højde og kompasretning.

### 3.3 Ground control

Ground control består af to enheder.

Primær kontrol af dronen foretages via et setup bestående af Taranis X9D samt 2 stk. Black Pearl 7" HD Diversity Screens. Piloten kan herfra kontrollere OBA samt observere livefeeds fra den termiske sensor og et fremadrettet kamera.

Detaljer og specifikationer:

[http://www.frsky-rc.com/product/pro.php?pro\\_id=113](http://www.frsky-rc.com/product/pro.php?pro_id=113)

iPad Ground Station anvendes som sekundær kontrolenhed. Herfra kan assistenten aktivere forud planlagte flyveruter, og monitorere deres afvikling. Enheden fungerer også som backup for den primære kontrolenhed, således at kontrol af dronen kan overtages hvis nødvendigt.

Detaljer og specifikationer:

<http://www.dji.com/product/ipad-ground-station>

### 3.4 Dataanalyse

Til at analysere de indsamlede termiske data anvendes FLIR Tools.

Detaljer og specifikationer:

<http://www.flir.com/instruments/display/?id=54865>

## 4. Metode

### 4.1 Forundersøgelse

Inden der foretages droneflyvning udføres en forundersøgelse af området. Denne består til dels af en visuel on-site inspektion, hvor området evalueres for elementer, der kan udgøre en sikkerhedsrisiko for flyvning, f.eks. master, skorstene og elledninger. Desuden foretages en desktop undersøgelse, hvor det undersøges, om der er myndighedsinstanser, der skal underrettes og at krævede minimumsafstande overholdes til lufthavne, naturfredede områder, militæranlæg, radarinstallationer, jernbane, tæt bebyggelse og hovedveje.

### 4.2 Flyveplanlægning

Det verificeres om vejrforhold tillader flyvning. Hvis det er hensigtsmæssigt planlægges flyvning ved lavvande. Hvis der skal afvikles foruddefineret flyveruter, skal disse udarbejdes. Sensorens opløsning samt field-of-view er relevant, når flyvehøjde skal bestemmes, idet hver pixel dækker et areal der afhænger af højden. Umiddelbart inden flyvning skal det verificeres, at der ikke er publiceret NOTAMS (Notice to Airmen), der forhindrer flyvning i området.

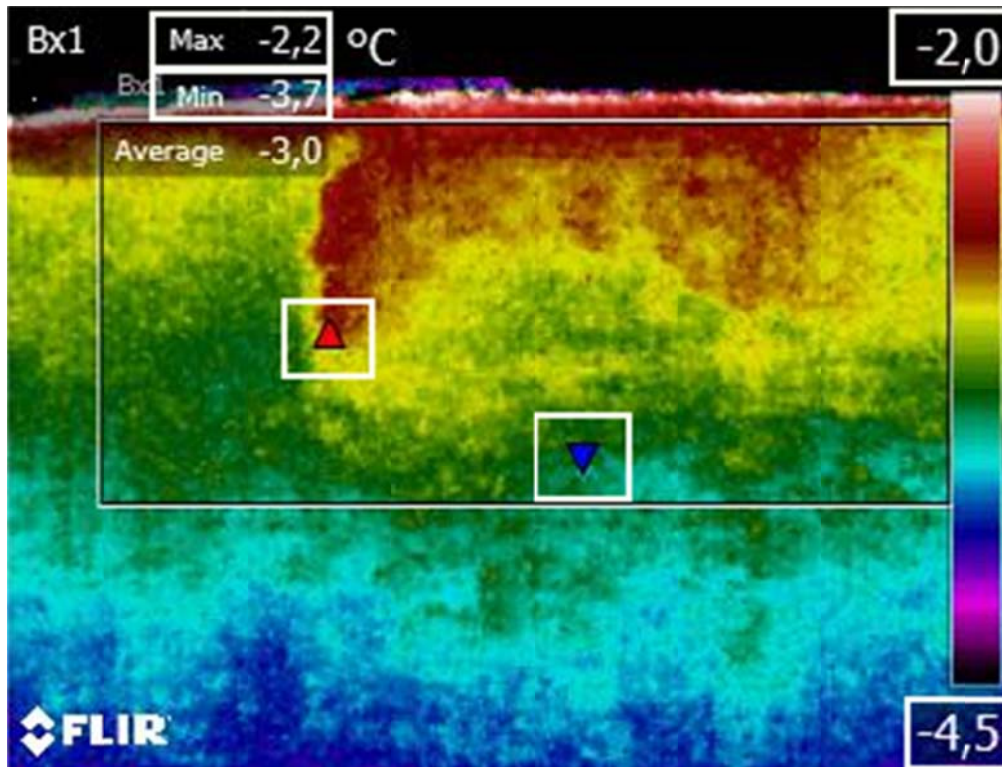
### 4.3 Udførsel af flyvning

En flyvning vil normalt gennemgå følgende trin:

- Først udføres et preflight check, hvor dronen gennemses for løse dele, skruer og forbindelser. Mekaniske dele skal bevæge sig uhindret. Alle propeller skal være uden deformationer/skader
- Landingszone etableres med kegler på en jævn fast overflade hvor der ikke er forhindringer
- Flyvning initieres og flyverute startes hvis planlagt. Under flyvning bibeholdes visuel line-of-sight til dronen. Dataindsamling aktiveres og deaktiveres efter behov.
- Når den planlagte flyvning er færdig, bringes dronen til landing manuelt i den etablerede landingszone
- Efter flyvning udføres et postflight check af samme karakter som preflight check

#### 4.4 Analyse af termisk data

De indsamlede termiske data efterbehandles i Flir Tools. Den visuelle præsentation af de termiske billeder er afhængig af hvilken palette der vælges under bearbejdningen. Som palette anvendes Rainbow HC. Den høje kontrast er valgt, fordi den giver en klar og skarp visualisering af temperaturforholdene i det valgte billede. En høj kontrast palette kan være misvisende, hvis ikke man er opmærksom på temperaturdifferencerne i billedet. Derfor er ROI (region of interest) tilføjet som supplement til de høje kontraster. I ROI angives det varmeste og koldeste punkt ved hhv. en rød og en blå trekant. Den relative temperatur gældende for punkterne vises i øverste venstre hjørne af billedet.



Eksempel på termisk billede med ROI. Den laveste relative temperatur indenfor ROI ses i øverste venstre hjørne og er angivet til  $-3,7^{\circ}\text{C}$ . Den højeste er angivet til  $-2,2^{\circ}\text{C}$ .

Under databehandling i FLIR Tools er der angivet følgende parameterværdier:

- Emissivitet er sat til 0,98 for vand.  
<http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>
- Afstand til objekt er sat lig flyvehøjden. Denne parameter kompenserer for absorption af varmestråling i atmosfæren mellem objektet/overfladen og den termiske sensor.
- Den relative luftfugtighed er sat til 50% på alle billeder (uanset den faktiske). Denne standardværdi anbefales af FLIR ved termografering under korte afstande.



## 5. Eksterne bemærkninger

### 5.1 Helle Blæsbjerg - Region Midtjylland, Miljø

- Temperatur kontrasten fra etablerede udløb er tydelig (muligvis så markant at den skjuler andre små kontraster)
- Termograferingen giver indikationer af opblandingszonens udbredelse
- Opblandingszonen varierer formentligt med tidevandspåvirkning og andre strømninger
- Der kan ikke konstateres en markant udstrømning fra spunsen i form af fx et konkret hul
- Udstrømningen kan muligvis antages at være så dybtliggende eller så diffus (jævnt fordelt) over spunsen og/eller med en så langsom strømning så den ikke kan detekteres.
- Test med konstrueret udstrømning kan anvendes til at kvalificere målbarhed i forhold til dybder, mængder og temperaturkontraster

### 5.2 Henrik Bjørn - VIA

For mig at se har du (Drone Systems) bl.a. påvist at dronebåret termografering kan anvendes til påvisning af tilstrømning/indstrømning af vand i bassiner, såfremt der er en temperaturkontrast mellem det indstrømmende vand og vandet i bassinet. Det er påvist, at kontrasten ikke behøver at være større, end den der opstår mellem et vinterafkølet havnebassin (ca. 2-3 grader C?) og terrænnært grundvand/ledningsført vand (ca. 8 grader C).

Der er klare indikationer på, at opblandingen mellem det varme og kolde vand kan følges i bassinet i en vis afstand fra udstrømningspunktet. Disse informationer kan sandsynligvis overføres til opblandingsmønstret for komponenter opløst i det tilstrømmende vand.

Der er ikke fundet tydelige lækager i den eksisterende spuns, hvilket kan skyldes at der faktisk ikke er nogen huller. Det kan også være fordi, at hullerne er meget små, og derfor hver især ikke medfører tilstrækkelig udstrømning/påvirkning. Endelig kan der være tale om, at de lokaliserede regnvandsudløb er ført gennem spunsen på en måde, som ikke giver en fuldstændig tætning mellem spunsvæg og yderside af rør. De lokaliserede regnvandsledninger kan tænkes at fungere som dræn for det område de løber igennem. Det vil medføre, at forureningsfanen fra gasværksgrunden til en vis grad styres af ledningernes forløb og løber ud i havnebassinet samme sted som regnvandsudløbet. Denne sidste teori underbygges af, at der har kunnet observeres kontinuert dannet (olie?)film på vandet på samme sted som udløbet af en Ø 1200 mm regnvandsledning angiveligt skulle være lokaliseret.

Forslag til yderlige undersøgelser:

Hvor stor en tilstrømning er nødvendig for at kunne foretage en lokalisering?

Hvor lille en temperaturkontrast er tilstrækkelig for at kunne foretage en lokalisering?

Det må umiddelbart forventes (ved sommerflyvning), at udstrømning af relativt koldt grundvand i et varmt havnebassin er vanskeligere at lokalisere på grund af densitetsforskellene, der vil tvinge det kolde vand ned under overfladen. Men det bør undersøges, om det rent faktisk også er tilfældet.



# 6. Konklusioner

## 6.1 Horsens Havn

Ved Horsens Havn er der fundet i alt fire interesseområder. De er nærmere beskrevet i Bilag 1.

Interesseområde 1 og 2 konkluderes at være tydelige indsivningszoner. De giver kraftige udslag på data fra adskillige flyvninger. Efter identifikation af zonerne er der indhentet ledningsregistrering fra Horsens Vand for at sammenholde med eventuelle ukendte ledningsføringer. Der viste sig at være ledningsgennemføringer præcist ved de to identificerede zoner, som ikke var projektgruppen bekendt. Den endelige konklusion for disse zoner er derfor, at den observerede indstrømning er regnvand fra eksisterende ledningsføring. Det er dog sandsynligt, at indstrømningen af grundvand sker ved de identificerede zoner, enten igennem ledningsføringen, eller langs med den.

Interesseområde 3 er identificeret som potentiel indsivningszone. I området ses et hotspot på billeder fra to separate TUP flyvninger. Udslagene vurderes ikke tydelige nok til at en indsivning kan konkluderes. Eftersom der er observeret hotspots og billederne udviser mindre indikationer på en indsivning anbefales det at undersøge denne zone nærmere. Der er god sandsynlighed for at de observerede udslag stammer fra kilden i interesseområde 1.

Ved interesseområde 4 er der identificeret opvarmede områder med forskellige karakteristika over flere flyvninger. Selvom udslagene generelt er små, er der en tendens henover interesseområdet. Det vurderes, at der er høj sandsynlighed for de observerede udslag stammer fra kilden i interesseområde 2. Interesseområde 4 har derfor lavere prioritet for opfølgende undersøgelse end interesseområde 3.

## 6.2 Grindsted Å

Ved Grindsted Å er der ikke identificeret indsivningsområder der kan karakteriseres som bekræftede. Der er observeret temperaturforskelle både på lokal og større skala, men observationerne er ikke tilstrækkelig konsistent og tydelig til at disse kan betragtes som bekræftede indsivningszoner. Bilag 2 indeholder en detaljeret beskrivelse af forhold, flyvning, databehandling og resultater.

## 6.3 Tværgående perspektiver

Indsivningszoner er identificeret i Horsens Havn, men ikke i Grindsted Å selvom der findes kendte zoner.

De primære årsager vurderes at være:

- Størrelsen af indsivning ved zonerne i Horsens Havn er markant større og koncentreret i forhold til indsivningszonerne i Grindsted Å.
- Ved Horsens Havn var vandet stillestående, imens der er høj aktivitet i vandet i Grindsted Å. Dermed er stor forskel opblandingsgraden for de to lokaliteter.

Sekundære faktorer vurderes at være:

- Ved Horsens Havn er termisk opdrift samt densitetsforskellen imellem salt- og ferskvand en medvirkende faktor til at faciliterer detektion i vandoverfladen. Denne faktor vurderes at være minimal ved Grindsted Å givet hastig opblanding grundet stor aktivitet i vandet.
- Ved Horsens Havn er vandet skarpt afgrænset af kajen. Ved Grindsted Å er afgrænsningen en flodbredde som er mere diffus.

Ved Horsens Havn er der udelukkende udført flyvninger om vinteren. Ved Grindsted Å er der både udført flyvninger om vinteren og sommeren. På baggrund af det indsamlet data og tilhørende observationer, vurderes vinterflyvningerne at udgøre et bedre grundlag for dataindsamling end sommerflyvninger. En væsentlig årsag hertil kan tilskrives en større temperaturforskel (imellem vandet i åen og det indsvivende grundvand). Ved vinterflyvningerne var der en temperaturforskel i størrelsesordenen 5 – 8 °C, imod 3 - 6 °C ved sommerflyvningerne.

## 6.4 Metodens anvendelighed

Termografering fra drone har en høj anvendelighed til identifikation af indsvivningszoner i havvand/havnebassiner hvis indsvivningen har en størrelse der er detekterbar med termografi. Ved vandløb vil der ofte være en større opblandingsgrad hvilket komplicere identifikation af små temperaturforskelle. Metodens anvendelighed vurderes derfor at være mindre ved vandløb. Projektets resultater har ikke muliggjort en mere konkret vurdering af metodens anvendelighed for vandløb.

Projektet har vist at indsvivende vand i havnebassinet ved Horsens havn kan detekteres med termografi. Metodens anvendelighed afhænger af faktorer som størrelsen (flow) og dybde af indsvivningskilden, temperaturforskel, og vandforhold/aktivitet. Det anbefales at nærmere fastlægge grænseværdier for disse faktorer for at endeligt kunne konkludere på metodens anvendelighed i større skala. Anvendeligheden er størst i årets koldeste måneder idet forholdene her giver det bedste udgangspunkt for at identificere små temperaturforskelle. Det er uafklaret om metoden kan anvendes i årets varmeste måneder. I store dele af året hvor vandtemperaturen er relativ tæt på grundvandstemperaturen er metoden ikke anvendelig.

Anvendelse af drone til termografering gør det muligt at afdække et meget større område end ved håndholdt termografering, inden for samme tidsramme. En drone gør det desuden nemt at indsamle billeder fra svært tilgængelige områder og samtidig tages billederne lodret fra oven, hvilket giver et bedre overblik i billedet. Anvendelse af drone konkluderes derfor som værende en tidsbesparende og omkostningsreducerende platform.

Det er tydeligt, at metoden har et interessant og relevant udviklingspotentiale.

## Referencer

Aisopou, A., 2014. Dilution and volatilization of groundwater contaminant discharges in streams. *Journal of Contaminant Hydrology* 172 (2015) 71–83.



Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)



# Anvendelse af drone til termisk kortlægning af forureningsudstrømning

## Bilag 1 Horsens Havn

MST-792-00136

11-2016

Redaktion: Miljøstyrelsen

Tekst:

Henrik Grosen, Drone Systems

Sune Nielsen, Drone Systems

Fotos:

Henrik Grosen, Drone Systems

Sune Nielsen, Drone Systems

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

# Indhold

|           |                                       |          |
|-----------|---------------------------------------|----------|
| <b>1.</b> | <b>Horsens Havn</b>                   | <b>4</b> |
| 1.1       | Introduktion                          | 4        |
| 1.2       | Interesseområder                      | 4        |
| 1.3       | Interesseområde 1                     | 5        |
| 1.4       | Interesseområde 2                     | 8        |
| 1.5       | Interesseområde 3                     | 9        |
| 1.6       | Interesseområde 4                     | 12       |
| 1.7       | Flyvninger & Vejrforhold              | 14       |
| 1.8       | Ledningsregistrering fra Horsens Vand | 14       |
| 1.9       | Referat fra styregruppemøde 1         | 15       |
| 1.10      | Referat fra styregruppemøde 2         | 17       |
| 1.11      | Referat fra styregruppemøde 3         | 18       |

# 1. Horsens Havn

## 1.1 Introduktion

I dette bilag præsenteres den indsamlede termiske data fra de fem udførte flyvninger ved Horsens Havn, Nordre Kaj.

Som resultat af de fem flyvninger er der fundet fire interesseområder langs spunsvæggen på Havnen og Nordre Kaj. De fire interesseområder, benævnt interesseområde 1-4, beskrives individuelt i afsnittet interesseområder.

Områderne er sammenholdt med ledningsregistrering rekvireret fra Horsens Vand.

## 1.2 Interesseområder

De fire interesseområder er vist på kortudsnittet herunder:



Oversigt over de fire interesseområder

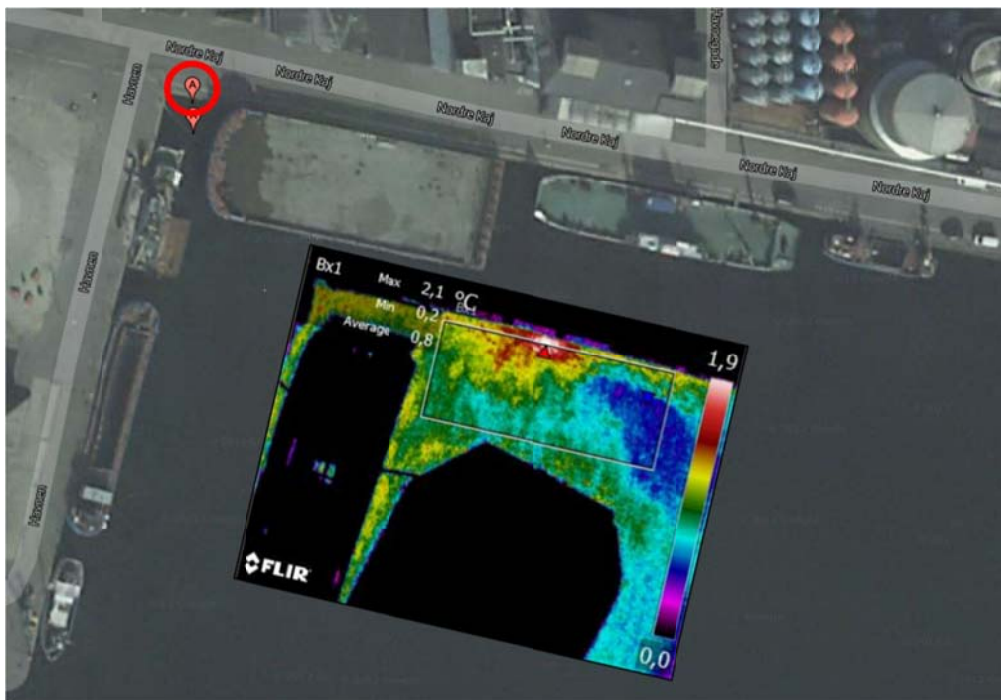
Områderne har forskellig karakteristik. Ved interesseområde 1 og 2 viser de termografiske optagelser kraftige temperaturkontraster og signifikant udbredelse af den opvarmede fane i overfladevandet. Disse observationer forekommer på flere af de gennemførte flyvninger. Ved interesseområde 3 og 4 er der observeret en tendens til opvarmede faner med små kontraster og af varierende udbredelser.



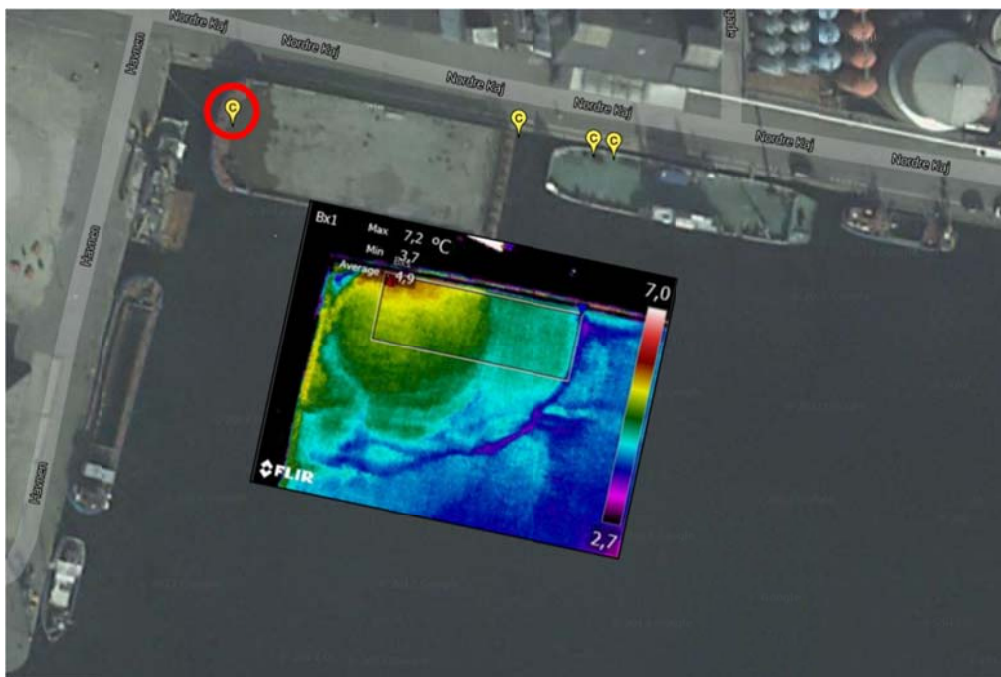
### 1.3 Interesseområde 1

Det første område er præcist afgrænset og er placeret ca. 5m fra det vestlige hjørne af spursvæggen på Nordre Kaj, hvor Havnen og Nordre Kaj mødes.

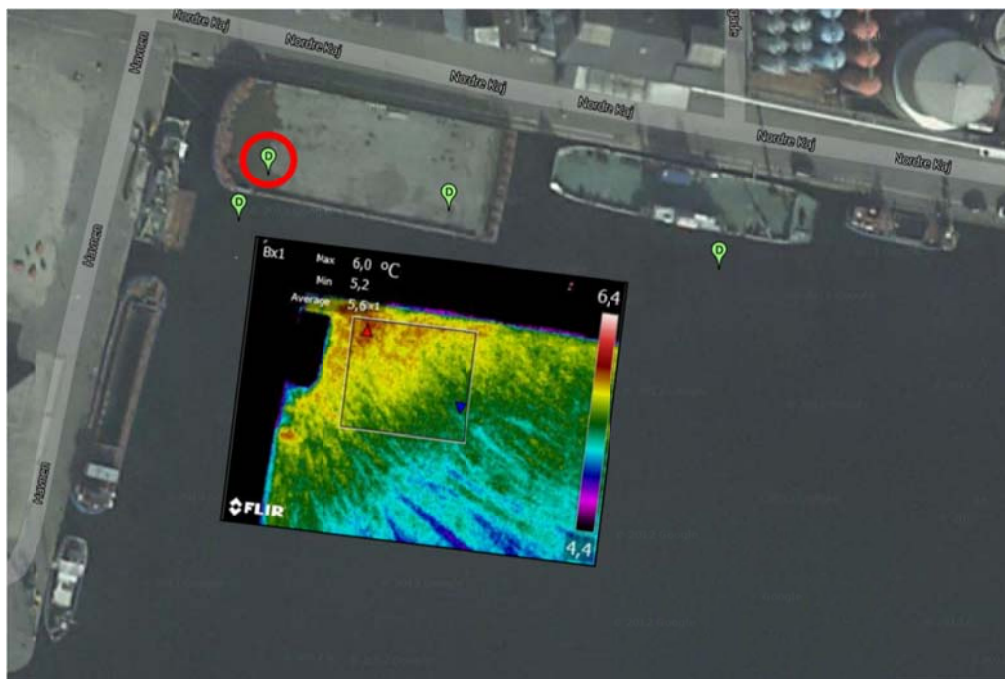
Området er udvalgt fordi der på tre af de fem flyvninger er en klar indikation af indstrømning fra samme sted.



TUP1, Dato: 05/01/2016, Tid: 21:45, Højde: 15m, Vind 8m/s, Beskrivelse: Urolig vandoverflade, Udstrømning ses tydeligt og afgrænset



TUP3, Dato: 12/02/2016, Tid: 18:39, Højde: 60m, Beskrivelse: Tyndt islag i bassin. Stor udbredelse af opvarmet fane.



TUP4, Dato: 01/04/2016, Tid: 06:49, Højde: 100m, Beskrivelse: Opvarmet område i hjørne af bassin. Udløbet fremstår mindre tydeligt.

På billederne ses en markant temperaturkontrast nær hjørnet af spunsvæggen. Mest markant er den på billederne fra TUP1 og TUP3.

Ved TUP1 var vindhastigheden 8 m/s, hvilket resulterede i en høj aktivitet i vandoverfladen. Til trods for den høje aktivitet fremstår kontrasten afgrænset, hvilket indikerer et højt og sandsynligvis konstant flow fra indstrømningskilden.

Ved TUP3 var der et meget tyndt islag i bassinet. Isens overflade var intakt i hjørnet af bassinet. Det opvarmede område og indstrømningskildens placering er tydelig og nemt identificerbar.

På billedet fra TUP4 er både indstrømningskilden og den opvarmede fane mindre markant, men begge dele er stadig identificerbare. Årsagen til at fanen her er mindre kan være en højere vandtemperatur i havnebassinet, eventuelt kombineret med et mindre flow fra kilden.

På baggrund af billeder fra interesseområde 1 og deres karakteristika besluttede styregruppen at Horsens Vand skulle kontaktes for at rekvirere ledningsdata for området langs Nordre Kaj. Årsagen til denne beslutning var opstået mistanke om ikke kendte udledninger af regnvand til havnebassinet.

Følgende udsnit viser ledningsdata for interesseområde 1:

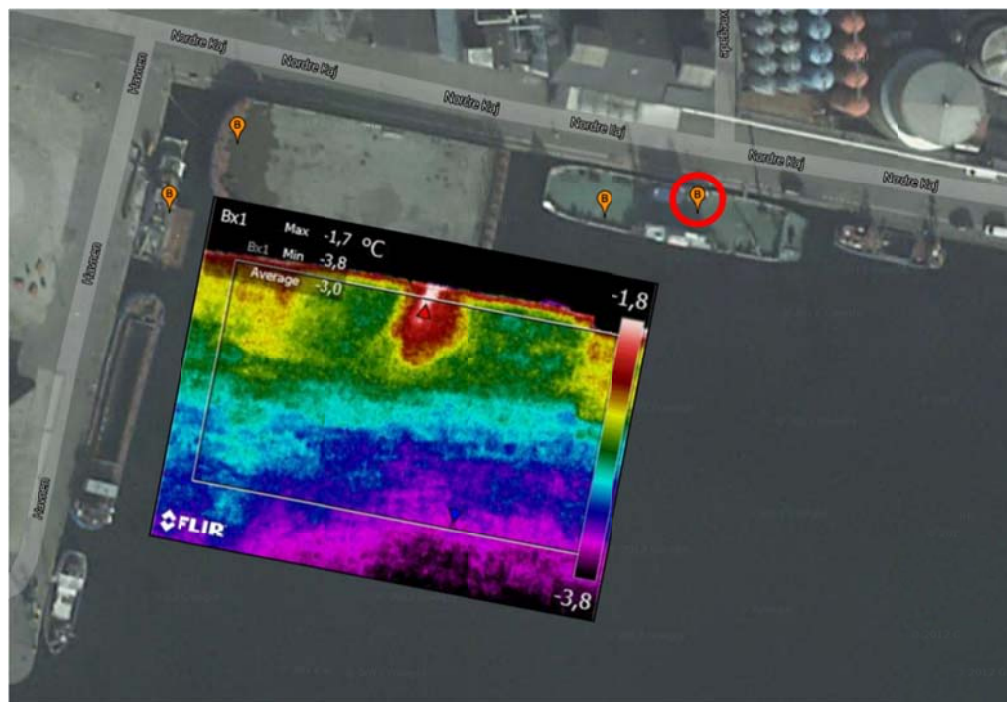


A67UF Udløb, 1200mm betonrør, BK: -1,40m

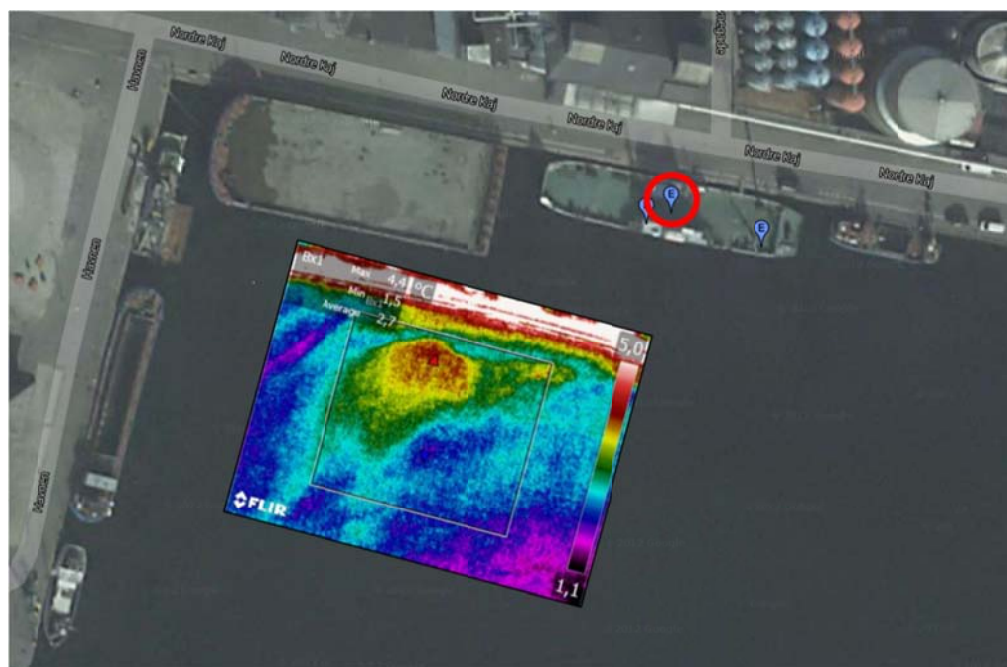
Ud fra ledningsdata ses, at der forekommer en udledning af regnvand i et 1200mm betonrør præcis hvor der er identificeret en indstrømningskilde på de termiske billeder.

## 1.4 Interesseområde 2

Interesseområde 2 er placeret for enden af Ny Havnegade. Området er præcist afgrænset på billeder fra TUP2 flyvninger. Billeder fra TUP4 og TUP5 underbygger observationer fra TUP2, dog er de opvarmede faner mindre tydelige.



TUP2, Dato: 18/01/2016, Tid: 05:06, Højde: 60m, Beskrivelse: Tydelig billede af indstrømningen. Stor temperaturdifferens i ROI.



TUP5, Dato: 04/04/2016, Tid: 06:58, Højde: 40m, Vind: 4 m/s, Beskrivelse: Opvarmet zone fri fra spunsvæggen.

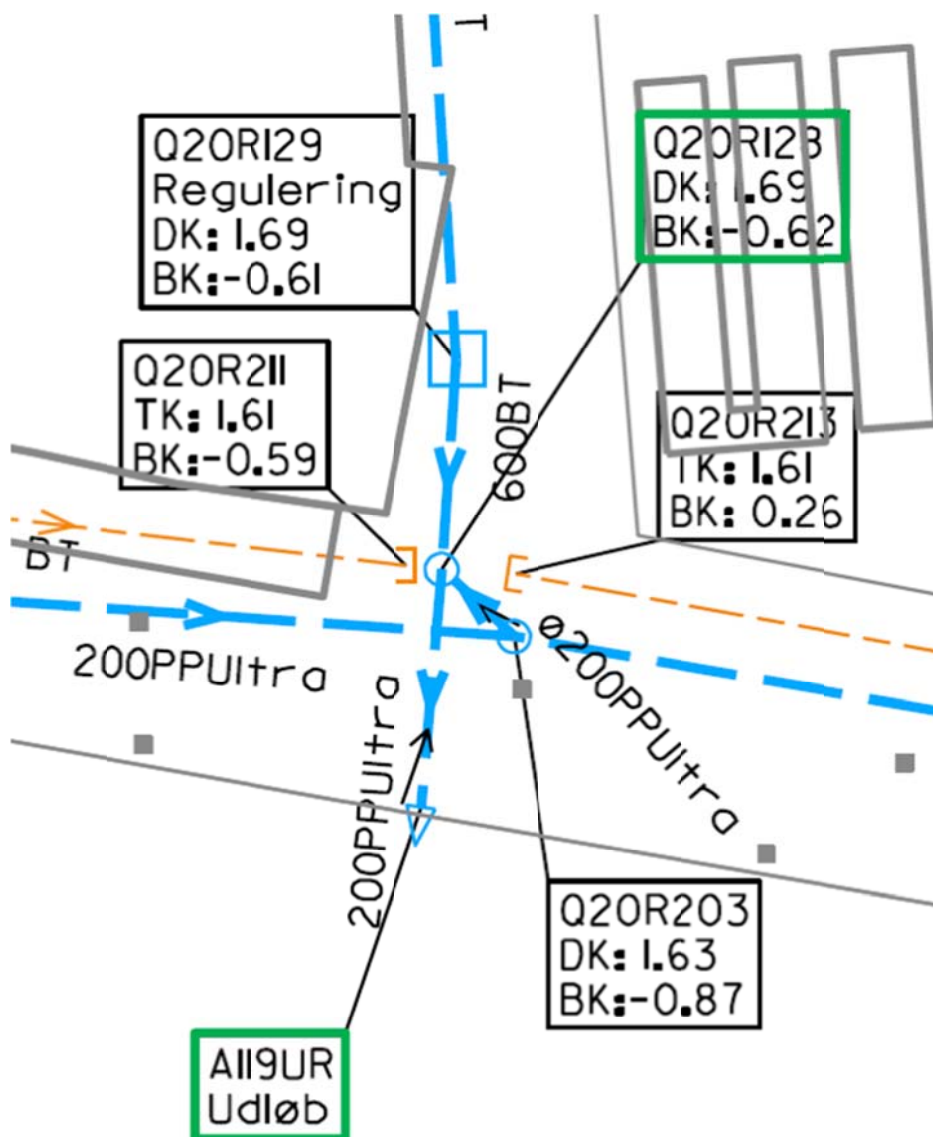
Ovenstående billede fra TUP2 viser en tydelig indstrømning syd for Ny Havnegade. Indstrømningen ses som en markant fane med udspring ved spunsvæggen. Fanen stråler fra spunsvæggen vinkelret ud i havnebassinet, hvilket indikerer et afgrænset udløbssted, og et relativt



stort flow. Vejrforholdene ved TUP2 flyvningen var optimale. Det var koldt (-5 °C) og vindstille (0,5 m/s).

På billedet fra TUP5 flyvningen ses et opvarmet område ved samme lokalitet. Her ses det opvarmede område "afskåret" fra spunsvæggen. Det blæste 4 m/s fra øst under flyvningen, og dette kan være medvirkende til de mere uklare afgrænsninger af det opvarmede område sammen med et formodentlig mindre flow.

Følgende udsnit viser ledningsdata for interesseområde 2:



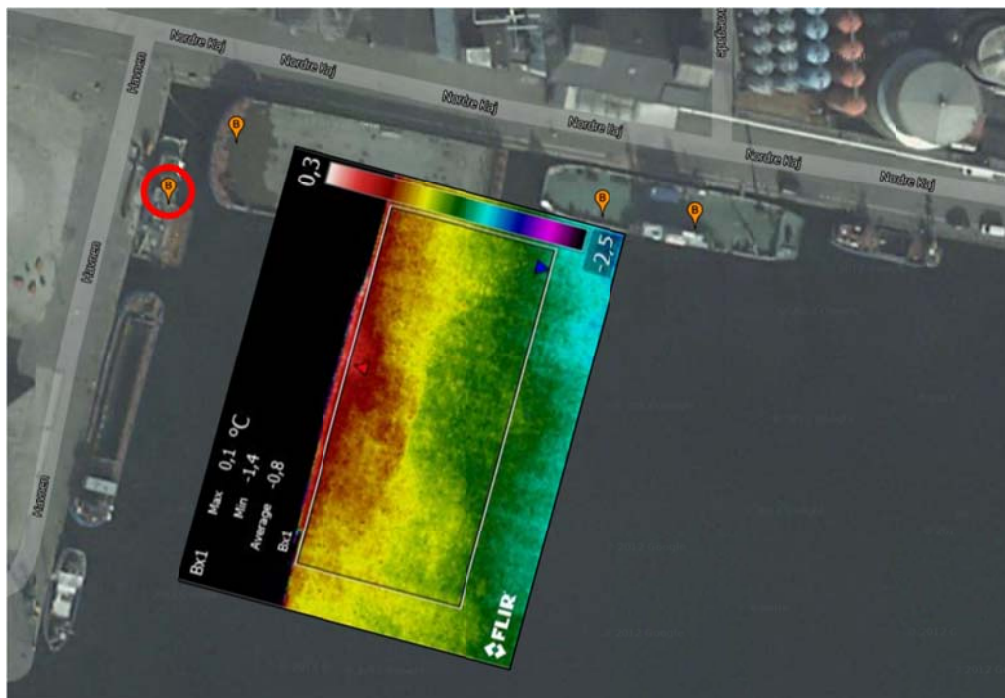
A119UR udløb, 200mm PP rør, BK: -0,62m

Ud fra ledningsdata kan det ses at der forekommer en udledning af regnvand i et 200mm PP rør ved samme placering hvor der er identificeret en indstrømningskilde på de termiske billeder. Situationen er derfor nogenlunde den samme som ved interesseområde 1.

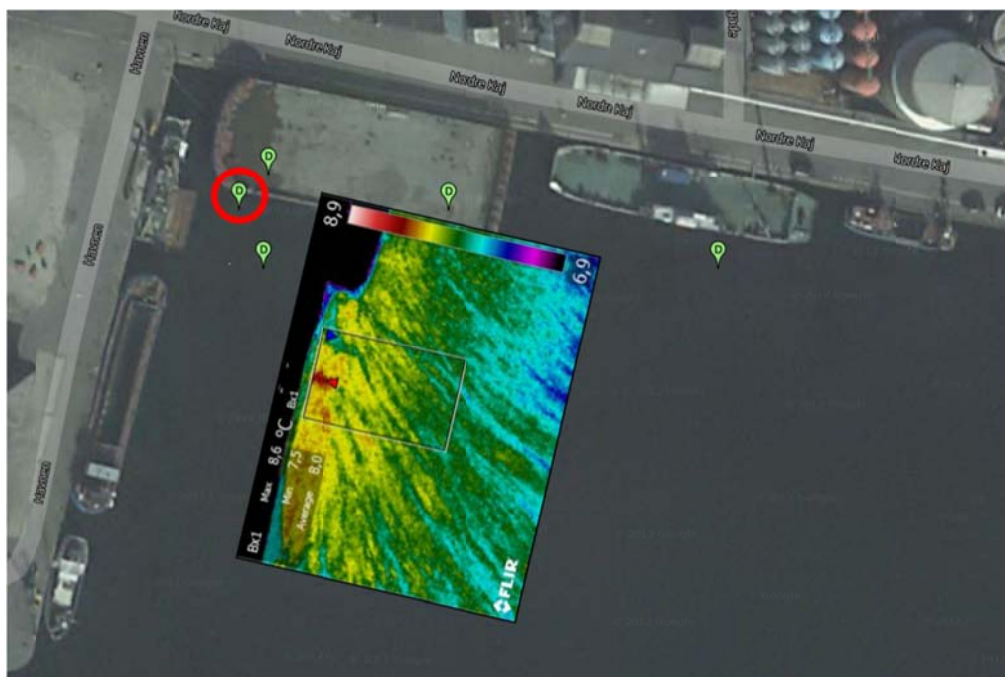
### 1.5 Interesseområde 3

Interesseområde 3 ligger ca. 20 meter syd for Hjørnet mellem Nordre Kaj og Havnen.

Området er identificeret som potentiel indsvivningszone, hvor der ses et hotspot på billeder fra 2 forskellige flyvninger. Ved de resterende flyvninger er der en jævn temperaturfordeling i området.



TUP2, Dato: 18/01/2016, Tid: 05:04, Højde: 60m, Beskrivelse: Bredt afgrænset opvarmet område. Højeste temperatur målt i ROI har samme placering som på andet billede fra samme interesseområde.



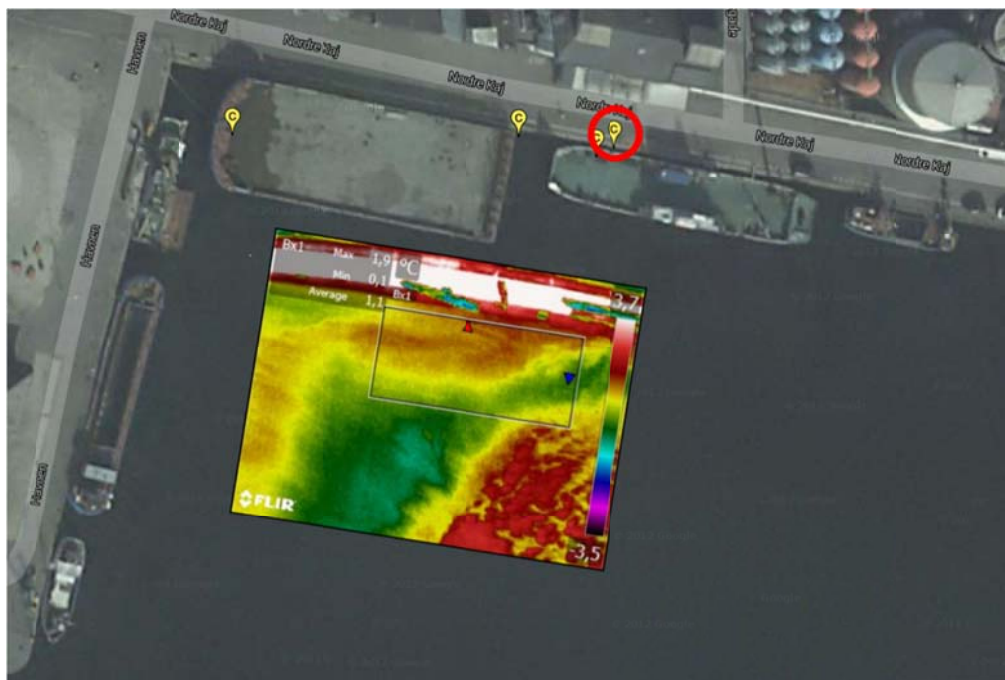
TUP4, Dato: 01/04/2016, Tid: 06:50, Højde: 60m, Lille hotspot med lave temperaturdifferens i ROI.

Udslagene vurderes ikke kraftige nok til, at en indsvivning kan konkluderes. I perioden fra d. 05/01/2016 til d. 04/04/2016 er området der grænser op til spunsvæggen blevet byggemodnet og delvist bebygget. Det er muligt, at de identificeret hotspots er et resultat af byggeriet.

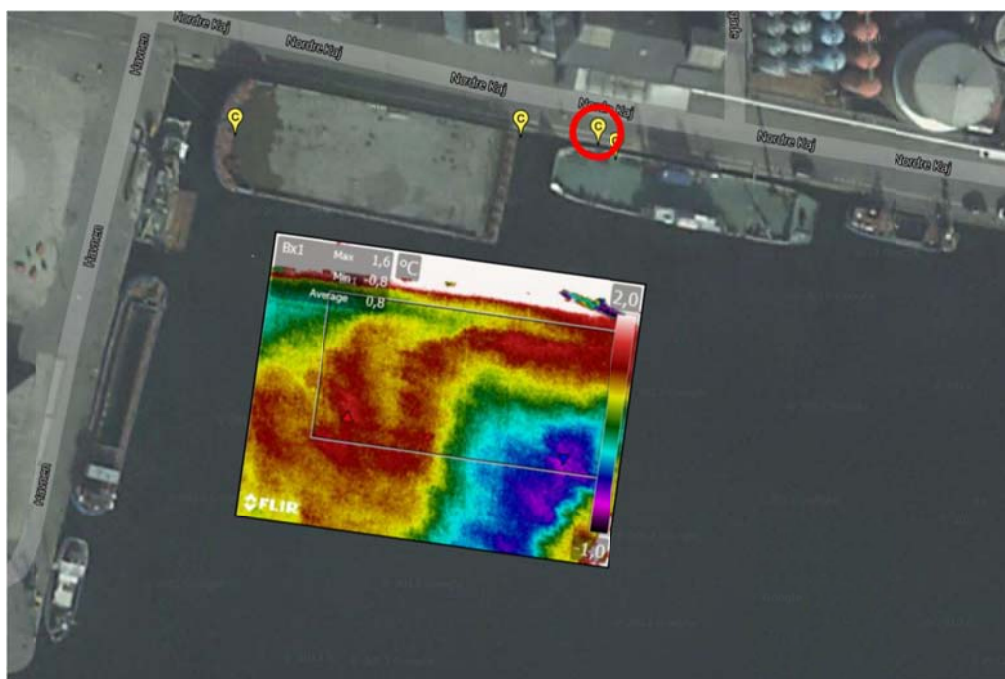
Eftersom der er observeret hotspots og billederne udviser mindre indikationer på en indsivning anbefales det at undersøge denne zone nærmere. Der er også en sandsynlighed for at de observerede udslag stammer fra kilden i interesseområde 1.

## 1.6 Interesseområde 4

Ved interesseområde 4 er der identificeret opvarmede områder med forskellige karakteristika over flere flyvninger.

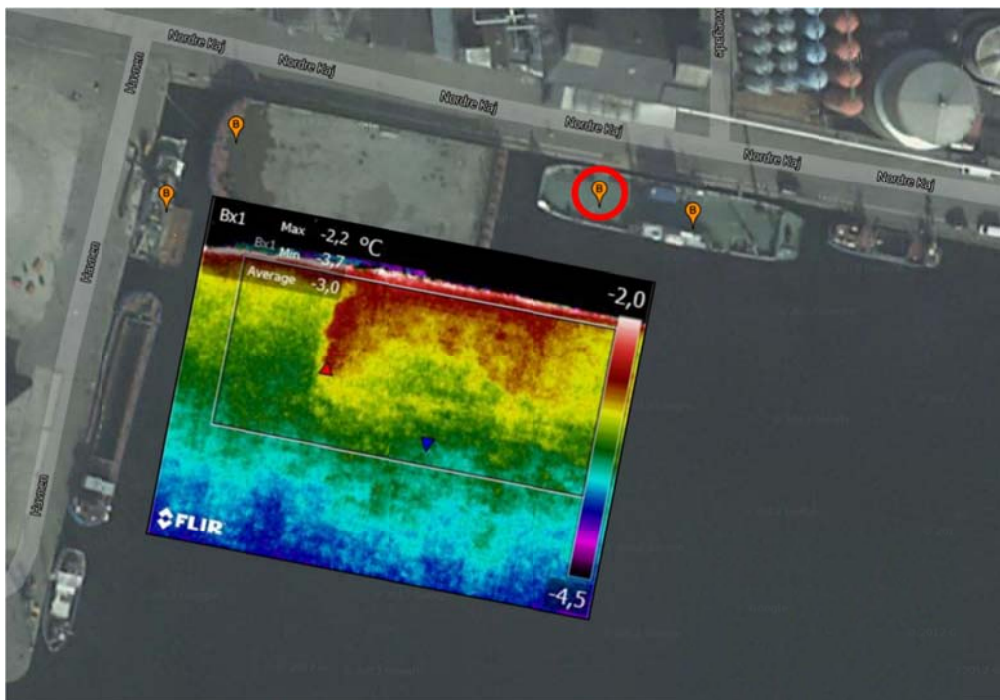


TUP3, Dato: 12/02/2016, Tid: 18:36, Højde: 15m, Beskrivelse: Tyndt islag i bassin. Fanen har udspring til højre i billedet, og føres mod venstre af strømmen.

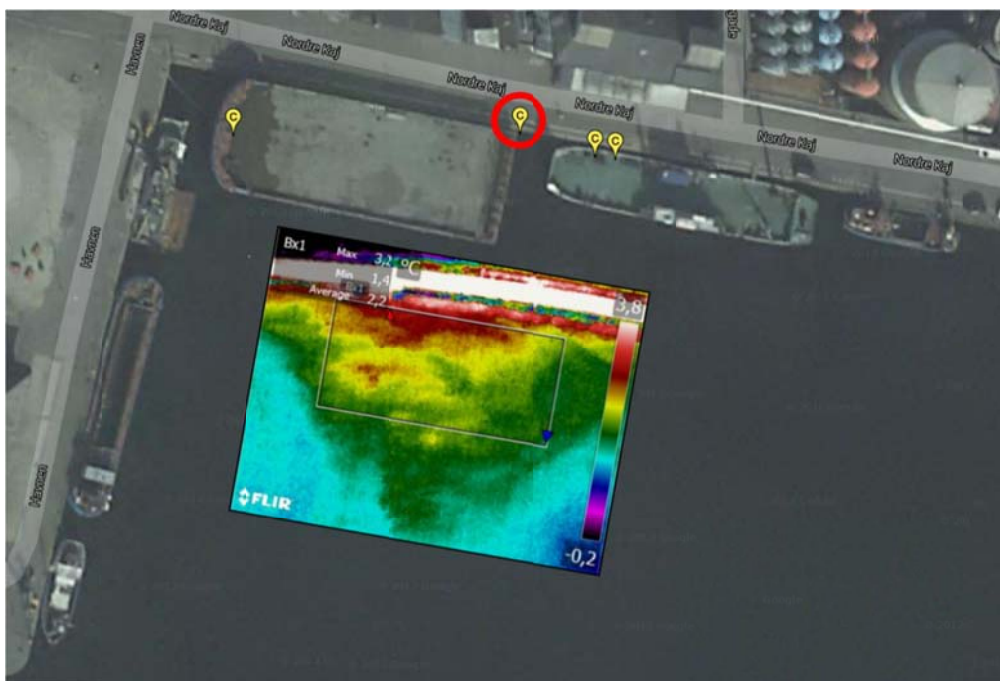


TUP3, Dato: 12/02/2016, Tid: 18:36, Højde: 15m, Beskrivelse: Tynd islag i bassin. Fanen har udspring uden for billedet, og spreder sig til et stort område ud i bassinet.





TUP2, Dato: 18/01/2016, Tid: 05:06, Højde: 50m, Beskrivelse: Bredt opvarmet område det breder sig ud i bassin. Relativ lille temperaturdifferens.



TUP3, Dato: 12/02/2016, Tid: 18:36, Højde: 15m, Beskrivelse: Tyndt islag i bassin. Det opvarmede område er tydelig afgrænset.

Selvom udslagene generelt er små, er der en tendens henover interesseområdet. Det vurderes, at der er en høj sandsynlighed for de observerede udslag stammer fra interesseområde 2. Interesseområde 4 har derfor lav prioritet for opfølgende undersøgelse.

## 1.7 Flyvninger & Vejrforhold

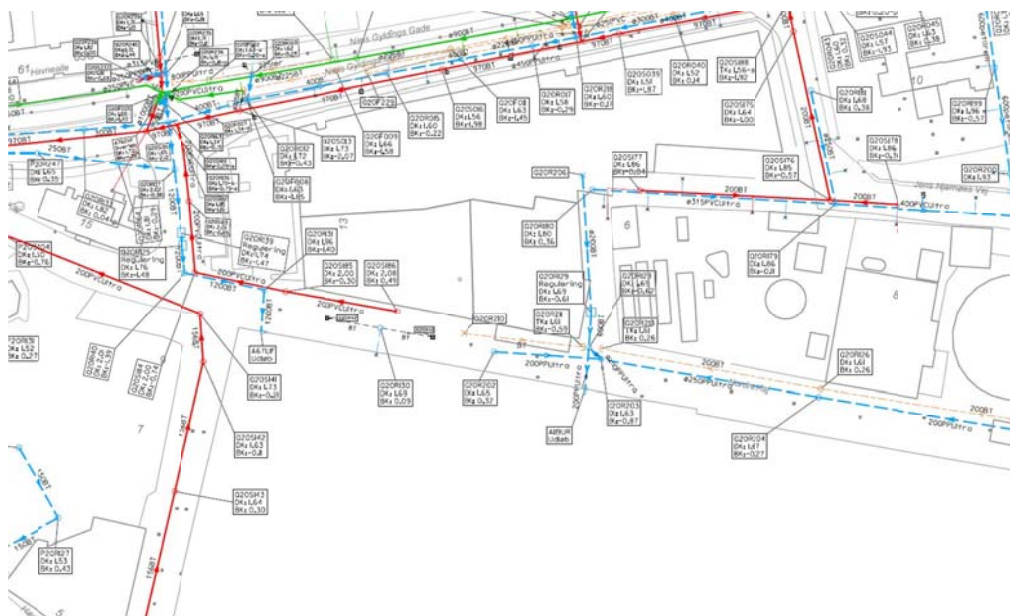
For at opnår den største temperaturdifferens mellem recipientvandet og det indsvende grundvand, er flyvningerne i Horsens planlagt i den koldeste periode i 2016. Vandtemperaturen i havnebassinet var ved første flyvning d. 5/1/2016 i gennemsnit 0,0 C, målt ca. 20cm under vandspejlet. Gennemsnittet er beregnet på baggrund af 5 målepunkter. Målingerne er foretaget af Helle Blæsbjerg – RM. Der forligger ikke andre målinger af vandtemperatur i rapporten.

|                       | TUP1                                    | TUP2                      | TUP3                                                       | TUP4                      | TUP5                |
|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Dato                  | 05-01-2016                              | 18-01-2016                | 12-02-2016                                                 | 01-04-2016                | 04-04-2016          |
| Tidspunkt             | 21:00-22:30                             | 04:45-06:15               | 18:00-19:30                                                | 06:15-07:45               | 06:15-07:45         |
| Lufttemperatur        | -2 C°                                   | -5 C°                     | -2 C°                                                      | -4 C°                     | 7 C°                |
| Relativ luftfugtighed | 70%                                     | 98%                       | 93%                                                        | 83%                       | 92%                 |
| Vindretning           | Ø                                       | Ø                         | SV                                                         | V                         | Ø                   |
| Vindhastighed         | 8 m/s                                   | 1 m/s                     | 2 m/s                                                      | 1 m/s                     | 4 m/s               |
| Kommentar             | Relativ kraftig vind. Bølger i bassinet | Meget rolig vandoverflade | Tyndt slag i havnebaasin. Ingen bevægelse i vandoverfladen | Meget rolig vandoverflade | Små bølger i bassin |

Vejrforhold for de fem flyvninger.

## 1.8 Ledningsregistrering fra Horsens Vand

Samlet ledningsregistrering ses herunder:



Ledningsregistrering fra Horsens Vand

## 1.9 Referat fra styregruppemøde 1

Styregruppemøde 1 blev afholdt i forbindelse med et andet projekt, også støttet af MST, med titlen: "Geologisk og hydrogeologisk karakterisering af forurenede grunde"  
Derfor omfatter referatet begge projekters første styregruppemøde.

### Opstartsmøde – TUP projekter

"Anvendelse af drone til termisk kortlægning af forureningsudstrømning"

"Geologisk og hydrogeologisk karakterisering af forurenede grunde"

Sted:

Industrimuseet

Mødedato: 08.januar 2015

Deltagere

Danmarks Industrimuseum: David Olsen

Drone Systems: Sune Yde Nielsen

Miljøstyrelsen: Jens Aabling

Rambøll: Peter Thomsen

Region Midtjylland: Karsten Rosenkilde, Rolf Johnsen, Helle Blæsbjerg

VIA University College: Søren Erbs Poulsen, Theis Raaschou Andersen, Henrik Gæster

Afbud

Danish Soil Partnership: Christian Andersen

Horsens Kommune: Tom Heron

Dagsorden

1. Fælles velkommen og introduktion af tilstedeværende (Theis)
2. Gasværksgrunden kort (Helle)
3. Projektet "Anvendelse af drone til termisk kortlægning af forureningsudstrømning".
4. Projektet "Geologisk og hydrogeologisk karakterisering af forurenede grunde".
5. Evt.

- 1)
  - Fælles velkommen og introduktion af tilstedeværende
  - Kort velkomst af Theis. Overordnet præsentation af de to projekter.
  - Præsentation af folk på projekterne.

- 2)
  - Gasværksgrunden kort
  - Gasværksgrunden intro; Helle Blæsbjerg – se slides

- 3)
  - **Projektet "Anvendelse af drone til termisk kortlægning af forureningsudstrømning"**
  - **Intro, metodik og teori; Sune Nielsen – se slides**
  - **Første dataopsamlinger:**

- **Horsens – der ses en markant temperaturkontrast i et område**  
**Det skal undersøges om dette stammer fra spildevandsledning eller fra udstrømning – Sune kontakter Horsens Vand**
- **Grindsted – mange temperatur kontraster**  
**Snak om muligheder for at optimere optagelser – problematik omkring turbulens, opblanding, samt nye elementer (fx et træ) som ændrer kontrastbilledet**
- **Snak om data præsentation generelt. Hvordan skal resultaterne præsenteres fremadrettet, både i dette projekt og videre. Muligheder indenfor f.eks. Google Earth, tidsserier, kombinere data med geofysiske data**
- **Der blev endvidere diskuteret andre målemuligheder for de 2 sites**
- **Mulighed for større kontraster i Grindsted om sommeren**
- **Mulighed for større udstrømning i Horsens Havn ved målinger ved lavvande**

**Det forventes at der udføres flere målinger på hver lokalitet.**

- 4) Projektet "Geologisk og hydrogeologisk karakterisering af forurenede grunde"
- Intro, projekt formål og teori; Theis Raaschou Andersen – se slides
  - Gennemgang af indsamlede data – geofysik (Peter Thomsen) – se slides
  - Gennemgang af den geologiske og hydrologiske model (Theis) – se slides
  - Målinger af modstand i jordprøver og vandprøver viser lav modstand i forurenat vand og sand
  - Infiltrationsbetragtninger – ønske om studenterprojekt
  - Usikkerhed omkring lækage/dræn fra kloakledninger. Antages at være 5-10 %.
  - Jens Aabling ville gerne have af følgende ting blev belyst i nærværende projekt
- ☐ Sker der en ændring af trusselsbilledet pga. vores undersøgelse?
  - ☐ Får vi et meget præcist trusselbillede – uden en væsentligt højere økonomi.
  - ☐ Betydningen af opblandingszoner. Optimeret afgrænsning af videre undersøgelsespunkter samt oprensningsafgrænsning.

5) Evt.

- Det er vigtigt at der opnås synergi mellem de to projekter. Det blev aftalt af data skal flyde mellem de to projekter.
- Rapportskabelon fra Miljøministeriet skal benyttes.
- Jens vil gerne involveres løbene i projekterne samt ved afrapporteringen.
- Det blev snakket om at projektet evt. skal i review af Torben Sonnenborg – Jens tager kontakt.
- Hvis muligt, koordineres det næste møde i de to projekter. Theis og Sune arbejder for dette.

## 1.10 Referat fra styregruppemøde 2

Styregruppemøde 2 - TUP Horsens

Dato: 2016.03.15

Type: Møde afholdt VBI Park Horsens lokale 1.04

Deltagere:

Sune Nielsen – Drone Systems

Henrik Bjørn – VIA

Karsten Rosenkilde – Region Midtjylland

Helle Blæsbjerg RM og Theis R VIA meldte afbud.

Agenda:

1. Præsentation TUP 1+2+3
2. Status Grindsted
3. Databehandling – DTU v. Peter Bauer-Gottwein
4. TUP 4+5

Noter/referat:

Tilfredshed med nuværende resultater. Henrik Bjørn og Karsten Rosenkilde mener vi med nuværende resultater kan konkludere at metoden virker som effektivt værktøj til detektion af udledning af vand/spildevand til havnebassin.

Henrik Bjørn opfordrede til at indsamle nedbørsdata fra Horsens vand eller DMI/meteorologisk institut, og sammenholde dette med udslag på termisk data. Sune nævnte at det strækker sig ud over afrapportering at udføre dette arbejde. Det var der fuld forståelse for, og det blev aftalt at vi nævner relevans af nedbør i vores afrapportering.

Sune har sendt mail til Horsens vand vedr. yderligere dokumentation på ledningsføring på Nordre Kaj, specielt interessant er det om der er udløb for enden af Ny Havnegade, da der ved TUP2 flyvning er markant udslag her.

Beslutninger:

Det blev besluttet at afholde næste og sidste styregruppemøde i forbindelse med arbejdet forbundet med afrapportering. Henrik Bjørn vil inden næste møde kigge nærmere på skabelonen til MST, der anvendes til afrapportering.

Det blev aftalt at afholde de sidste to flyvninger TUP 4+5 inden for de næste 14 dage. TUP 4 er planlagt til 2016.03.15.

## 1.11 Referat fra styregruppemøde 3

Styregruppemøde 3 - TUP Horsens

Dato: 2016.05.27

Type: Skypemøde

Deltagere:

Sune Nielsen – Drone Systems

Henrik Bjørn – VIA

Helle Blæsbjerg – Region Midtjylland

Karsent Rosenkilde – RM kunne ikke deltage da han var på feltarbejde i Palm Springs

Agenda:

1. Termisk data sammenholdt med ledningsregistrering fra Horsens Vand
2. Evaluering af forløb
3. Fremtidigt arbejde som resultat af projektet

Noter/referat:

Henrik fortalte indledningsvis at Theis og ham har været en tur forbi Horsens havn og kigge efter udløbet i det NV hjørne (Nordre Kaj / Havnen). Ca. 5m mod øst fra hjørnet, kunne en kontinuert udstrømning m oliefilm ses ved vandoverfladen. Udløb/rør kunne ikke ses men var skjult af fremspring i træværk, eller under overfladen.

1. Jf. ledningsregistrering passer anomaliteterne på de termiske billeder jf. Helle og Henrik, fint med de to udløb der fremgår at tilsendte materiale fra Horsens Vand. Den varierende zone med opvarmede områder kan henføres til strømning i bassin samt skift i vandstand. Det vurderes der er god sammenhæng mellem de lokaliserede udsivningsområder, gennem flere flyvninger.

2. Henrik Bjørn:

Som udgangspunkt var ingen udledninger til havnebassinet kendt. De 2 steder der er fundet med dronen, er nu verificeret med tegningsmateriale fra Horsens Vand. Metoden vil være billigere end en evt. dykker, eller termografering på anden måde. Det er bevist at metoden virker, og at dronen er en effektiv platform der virker under danske forhold, under de rette temperaturforhold.

Helle Blæsbjerg:

Den beregnede udstrømning på 20m<sup>3</sup>/døgn kan være spredt over et stort område eller er strømningsmæssig langsom. Udstrømningen kan ikke differencieres på baggrund af data fra drone. En mulighed kunne være at afspærre udløbene og foretage nye målinger med drone. Er enig med Henrik Bjørn, at platformen er effektiv, men at den ikke nødvendigvis har fundet forureningsudstrømningen. Glæder sig til at se data fra Grindsted sammenholdt med Horsens.

3. Helle og Henrik var begge enige om, at data fra drone åbner nye muligheder for flere forsøg med termografering, ind/ud-sivning og opblanding af vand med forskellige temperatur og densitet. Disse forslag forventes omtalt i afsnittet Perspektivering og konklusioner i hovedrapporten. (Evt. et andet afsnit)

Beslutninger:

Henrik og Helle vil begge sende tanker, konklusioner og ideer til fremtidigt arbejde på mail til Sune. Disse inddrages i den endelige rapport.





Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)





# Applying drones for thermal detection of contaminated groundwater influx

## Bilag 2 Grindsted Å

MST-792-00136

11-2016

Redaktion: Miljøstyrelsen

Tekst/Fotos:

Drone Systems: Henrik Grosen, Sune Nielsen

DTU: Christian Köppl, Filippo Bandini, Sheng

Wang, Monica García, Peter Bauer-Gottwein

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

# Contents

|           |                                                                   |           |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Introduction</b>                                               | <b>5</b>  |
| <b>2.</b> | <b>The site</b>                                                   | <b>6</b>  |
| <b>3.</b> | <b>Winter Surveys</b>                                             | <b>7</b>  |
| 3.1       | Survey #1                                                         | 7         |
| 3.1.1     | Overview                                                          | 7         |
| 3.1.2     | Results                                                           | 8         |
| 3.1.2.1   | Section 1                                                         | 8         |
| 3.1.2.2   | Section 2                                                         | 10        |
| 3.1.2.3   | Section 3                                                         | 12        |
| 3.1.3     | Observations                                                      | 13        |
| 3.2       | Survey #2                                                         | 13        |
| 3.2.1     | Overview                                                          | 13        |
| 3.2.2     | Results                                                           | 14        |
| 3.2.2.1   | Section 1                                                         | 14        |
| 3.2.2.2   | Section 2                                                         | 14        |
| 3.2.2.3   | Section 3                                                         | 15        |
| 3.2.3     | Observations                                                      | 16        |
| 3.3       | Survey #3                                                         | 17        |
| 3.3.1     | Overview                                                          | 17        |
| 3.3.2     | Results                                                           | 17        |
| 3.3.2.1   | Section 1                                                         | 17        |
| 3.3.2.2   | Section 2                                                         | 18        |
| 3.3.2.3   | Section 3                                                         | 18        |
| 3.3.3     | Observations                                                      | 18        |
| 3.4       | Conclusions                                                       | 19        |
| <b>4.</b> | <b>Summer Surveys</b>                                             | <b>21</b> |
| 4.1       | Field Procedures                                                  | 21        |
| 4.1.1     | Flight plan                                                       | 21        |
| 4.1.2     | DTU airborne thermal imaging system                               | 22        |
| 4.1.3     | Drone Systems airborne thermal imaging system                     | 22        |
| 4.1.4     | Ground control points for orthorectification                      | 22        |
| 4.1.5     | In-situ temperature measurements                                  | 22        |
| 4.2       | Data Processing                                                   | 23        |
| 4.2.1     | Camera calibration                                                | 23        |
| 4.2.2     | Orthorectification and mosaicking                                 | 23        |
| 4.2.3     | Conversion from brightness temperature to radiometric temperature | 23        |
| 4.3       | Results                                                           | 24        |
| 4.3.1     | Brightness temperature                                            | 24        |
| 4.3.2     | Radiometric temperature                                           | 32        |
| 4.4       | Discussion                                                        | 32        |
| 4.5       | Conclusions                                                       | 35        |

## Summary

Five surveys have been completed at Grindsted Å to evaluate the capability of lightweight thermal mapping systems to map water surface temperature variations in rivers. Drone Systems (DS) completed the first three surveys in January and February 2016. The fourth and fifth survey were flown on the 18<sup>th</sup> of August 2016, as joint operation between DTU and DS. Two equivalent systems were flown, one maintained and developed by DTU and the other by DS. Both systems use essentially the same thermal sensor.

Results indicate that spatial patterns of water surface temperature variations can be reliably mapped using these systems. However, absolute temperatures obtained from the two systems and from different waypoints, sensor angles and orientations are inconsistent and do not accurately match ground truth. This is problematic for mapping groundwater infiltration because temperature variations due to this process are expected to occur gradually over larger spatial scales.

# 1. Introduction

Unmanned Airborne Vehicles (UAVs) are the latest frontier in environmental science and engineering. Compared to classical airborne surveying, UAV deployment is cheap and flexible. Compared to satellite remote sensing, spatial resolution is much higher and temporal sampling more flexible. UAVs can be equipped with a variety of payloads, e.g. cameras, thermal sensors, GNSS sensors, geophysical sensors, and produce datasets for many different applications. In this appendix, we describe a thermal imaging application on a Danish stream, Grindsted Å. The lightweight thermal sensors map the water surface temperature in the stream. Variations in water surface temperature can be interpreted in terms of ecohydrological processes, e.g. groundwater-surface water exchange, shading and lateral inflows.

Thermal imagery of the river was acquired by Drone Systems (DS) in January and February 2016, using a DJI S1000+ UAV and a FLIR Tau 2 336 thermal infrared sensor, with the objective of identifying hotspots of groundwater infiltration through warm temperature signals. Survey results showed some interesting temperature anomalies, but findings were not conclusive as signal-to-noise ratio was low. In particular, it was unclear to what extent the recorded temperature anomalies were due to sensor artifacts.

In order to investigate this further, a joint field survey was conducted in August 2016 at the same site using the DS platform and the DTU platform. Both thermal imaging systems are very similar and results should be directly comparable.

## 2. The site

The river Grindsted Å is located in Jutland, Denmark, close to the town of Grindsted (approximate location 55.758N / 8.914E). An industrial plant contaminated the local groundwater with a wide range of chemicals, which are leaking into the river via groundwater flow. Therefore, it is of high interest to determine the groundwater discharge into the river. Rasmussen et al., 2016 estimated the groundwater infiltration based on temperature gradient measurements in the river bed and found infiltration fluxes of up to  $5 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$  and a river discharge of  $1.46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Three sections of interest were chosen (see Figure 1), which, according to an existing groundwater flow model developed by DTU Environment, should be hotspot locations for groundwater-surface water exchange.

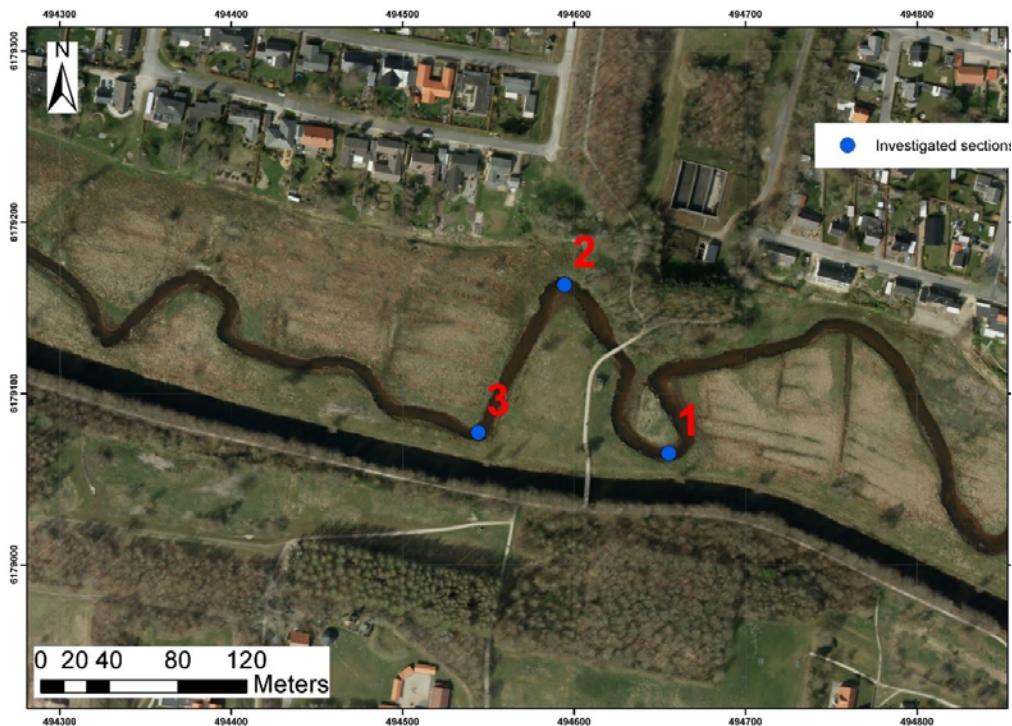


Figure 1: Overview of the Grindsted site and investigated river sections. All coordinates in this report refer to UTM Zone 32N with WGS 1984 datum

## 3. Winter Surveys

This chapter describes the first three surveys completed by DS.

| Survey # | Time                   | Weather conditions                                                                                | Water conditions                                                     |
|----------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1        | 05.01.2016 18:30-20:00 | Temperature: -2° C<br>Wind: 6 m/s, east<br>Humidity: 62%<br>Partial cloud cover                   | High water level<br>High activity in the water                       |
| 2        | 18.01.2016 06:15-07:45 | Temperature: -4° C<br>Wind: 1.5 m/s, sw<br>Humidity: 93%<br>Light snow cover, partial cloud cover | Partial ice formation along the banks.<br>High activity in the water |
| 3        | 12.02.2016 20:00-22:00 | Temperature: -1° C<br>Wind: 2 m/s, south<br>Humidity: 88%<br>Partial cloud cover                  | Very high water level<br>High activity in the water                  |

The first three surveys were completed at different altitudes, flight patterns and different sections of the stream. This strategy was employed to obtain a diverse set of data in order to ascertain the procedure best suited for data collection.

### 3.1 Survey #1

#### 3.1.1 Overview

The main purpose was to gather data from the zones of highest interest and simultaneously determine if different altitudes and flight speeds have a noticeable impact on the quality/precision of data acquisition. Velocity was between 2 – 4 m/s. Employed flight altitude was 30m & 40m. All data was acquired using autonomous flights where the only settings changed in the control software were height and velocity.



Figure 2: Performed flight routes from survey #1

### 3.1.2 Results

#### 3.1.2.1 Section 1

The four images below are representations of two thermal data frames. Figure 3a and 3b are produced from the same source data, likewise for 4a and 4b.

In Figure 3a and 4a, the temperature stretch is  $2.0^{\circ}\text{C}$  ( $4.8^{\circ}\text{C} - 6.8^{\circ}\text{C}$ ).

In Figure 3b and 4b, the temperature stretch is  $2.1^{\circ}\text{C}$  ( $5.0^{\circ}\text{C} - 7.1^{\circ}\text{C}$ ).

The images serve to illustrate how small changes in the variables will incur a large impact in the visual representation.

There is a marginal tendency for a warm zone in the top near the bend, then a cold zone below, followed by yet a warm zone at the bottom left.

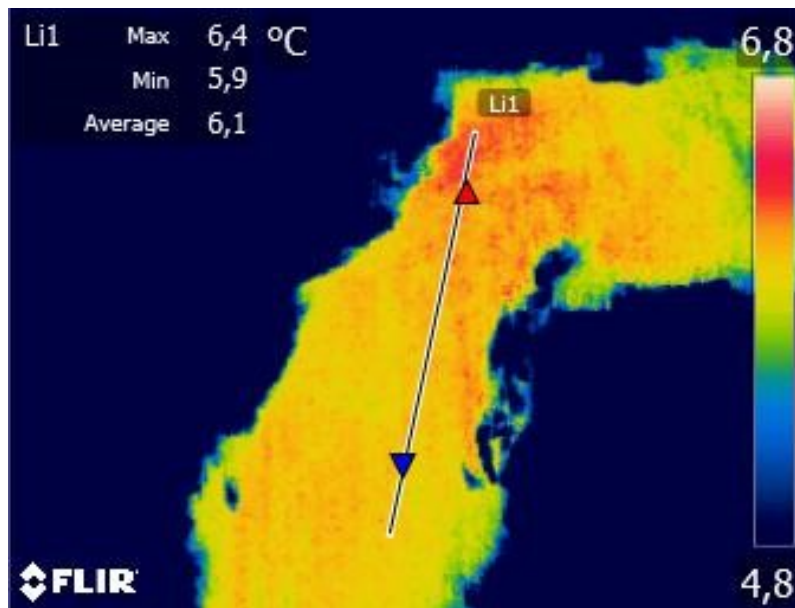


Figure 3a: DS survey 1, section 1, acquired at 40m, 4 m/s

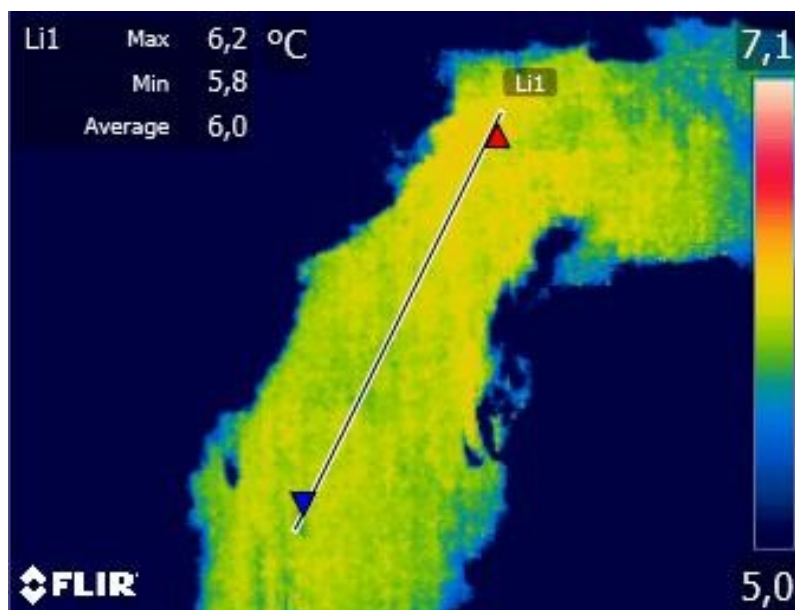


Figure 3b: DS survey 1, section 1, acquired at 40m, 4 m/s



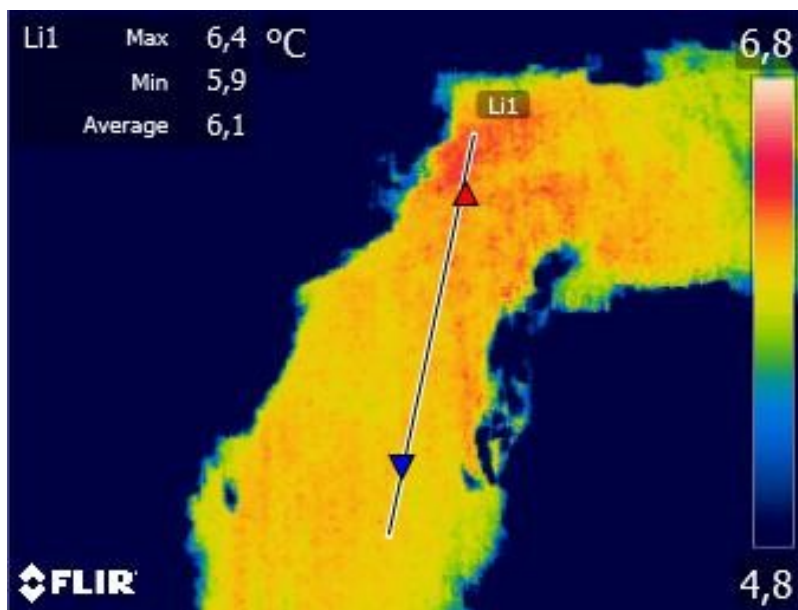


Figure 4a: DS survey 1, section 1 acquired at 30m, 2m/s

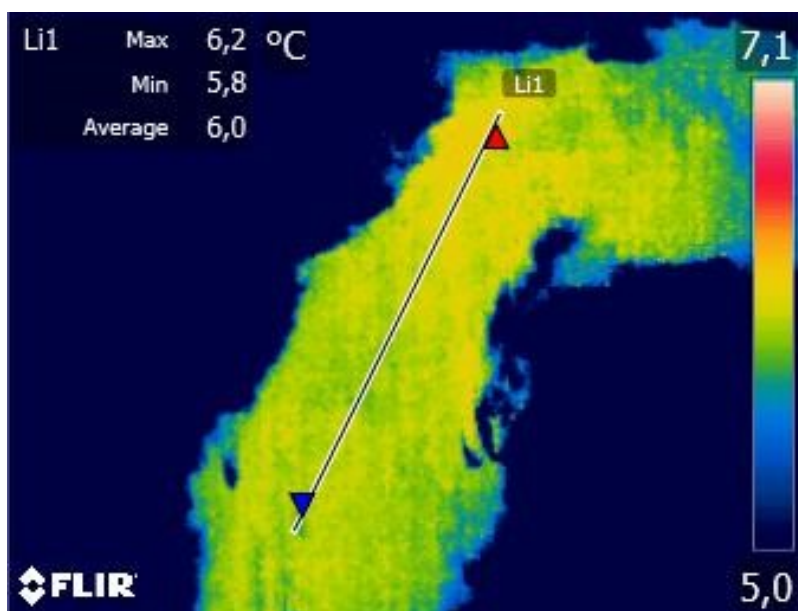


Figure 4b: DS survey 1, section 1 acquired at 30m, 2m/s

### 3.1.2.2 Section 2

Figure 5a and 5b shows the same part of section 2 from different flights. Both display marginally cold and hot zones, but at conflicting locations. The warm artifact in the bottom right is a drainpipe.

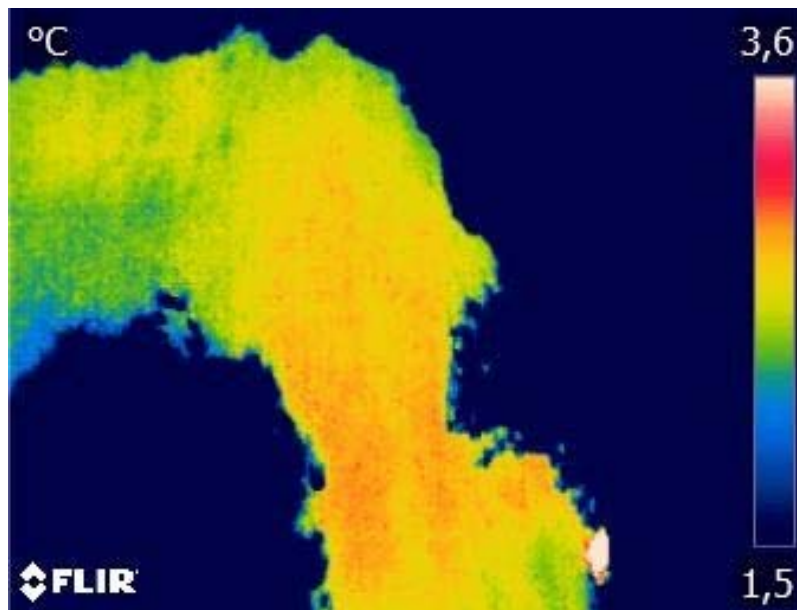


Figure 5a: DS survey 1, section 2, acquired at 40m, 4 m/s

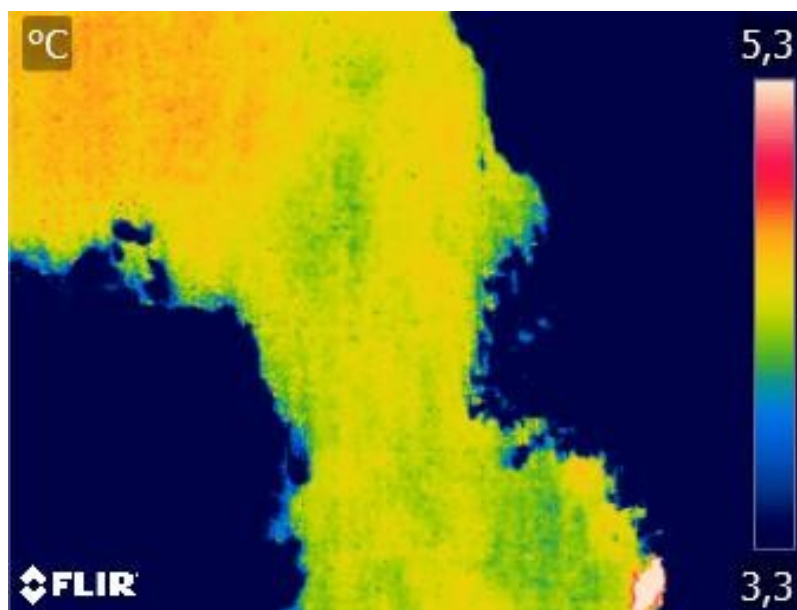


Figure 5b: DS survey 1, section 2, acquired at 30m, 2m/s

In Figure 6a and 6b, the drone has moved downstream, and rotated approximately 90° CCW. Again, marginally cold and hot zones, but at conflicting locations.

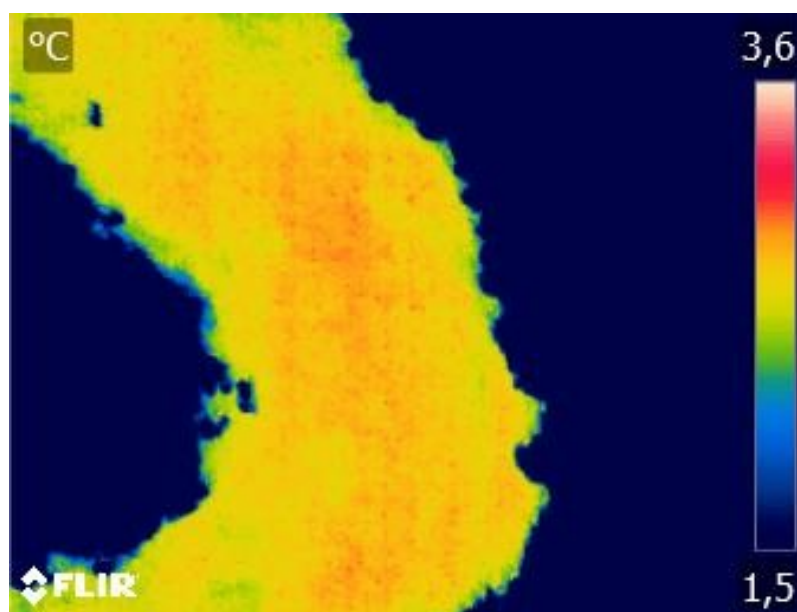


Figure 6a: DS survey 1, section 2, acquired at 40m, 4 m/s

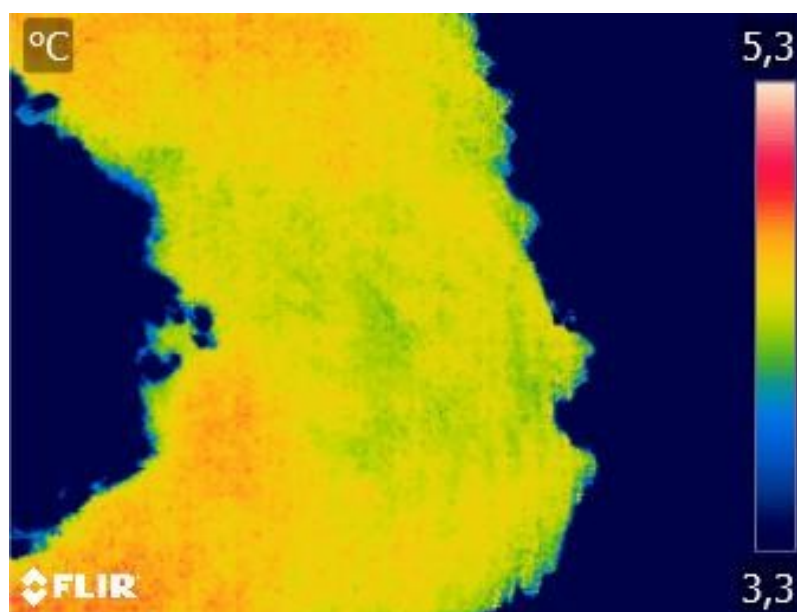


Figure 6b: DS survey 1, section 2, acquired at 30m, 2m/s

### 3.1.2.3 Section 3

At section 3, the images show similar characteristics.

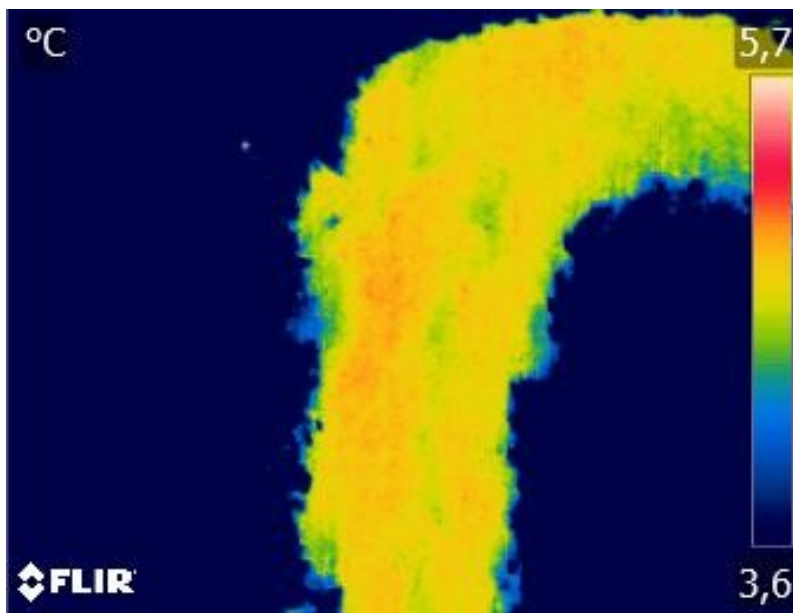


Figure 7a: DS survey 1, section 3, acquired at 40m, 4 m/s

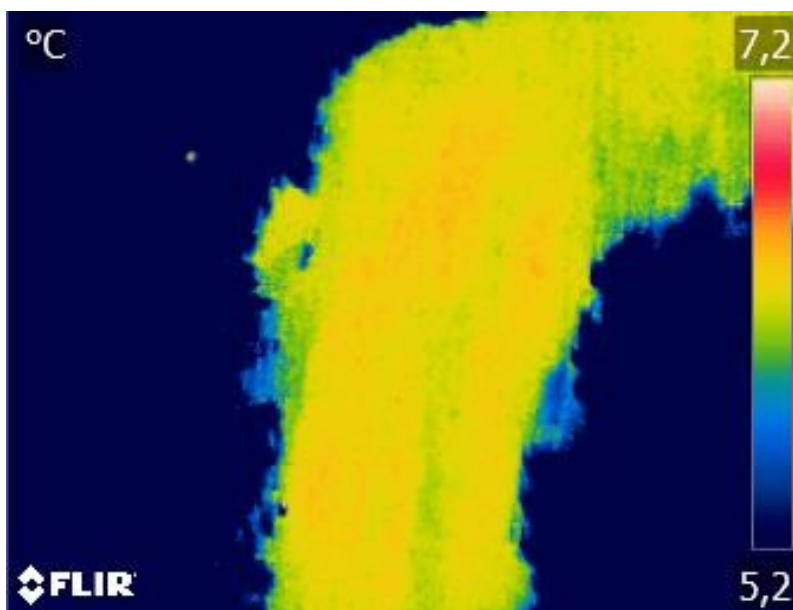


Figure 7b: DS survey 1, section 3, acquired at 30m, 2m/s

On figure 8a and 8b, the drone has moved downstream and rotated approximately 45° CW. There is a marginal tendency for a warm zone after the bend.

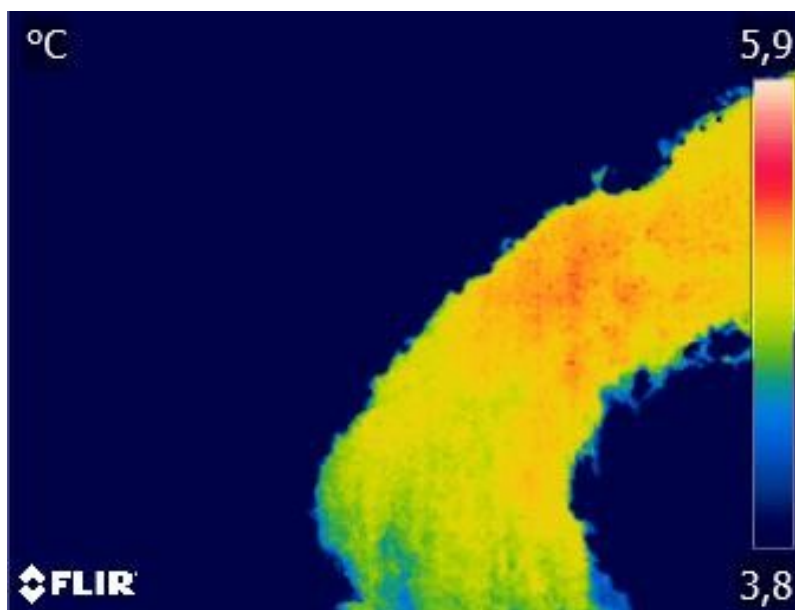


Figure 8a: DS survey 1, section 3, acquired at 40m, 4 m/s

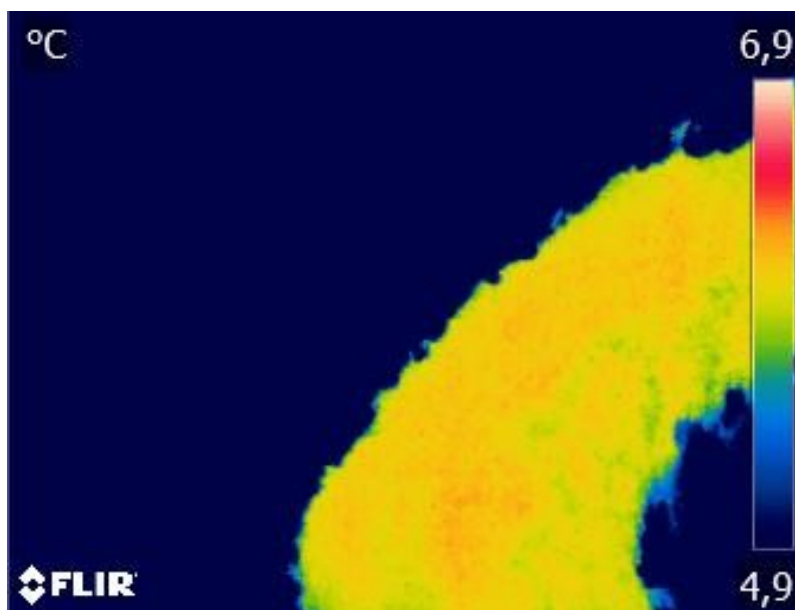


Figure 8b: DS survey 1, section 3, acquired at 30m, 2m/s

### 3.1.3 Observations

The following observations are based on all collected data from Survey #1:

- The different velocities and altitudes did not have a noticeable impact on the quality/precision of data acquisition
- The delta temperatures are very low, and therefore there is a high level of uncertainty
- An altitude of 30 m yields a higher resolution, but the larger field of view provided by higher altitudes provides the possibility to identify tendencies at a larger scale

## 3.2 Survey #2

### 3.2.1 Overview

The main purpose was to gather a second dataset from the same zones covered in survey #1 in order to provide the means to compare acquisition from different dates. In survey #2 data acquisition was performed both using flight routes, and by hovering at fixed points. Hovering over a fixed point while continuously performing data acquisition provides a large amount of data from the same point, thus providing the means to perform an averaging algorithm.



Figure 9: Survey #1 flight routes (red) and hovering points (yellow)

### 3.2.2 Results

#### 3.2.2.1 Section 1

Similar to Survey #1, there seems to be a marginal tendency for a warm zone in the top near the bend, then a cold zone below, followed by yet a warm zone at the bottom.

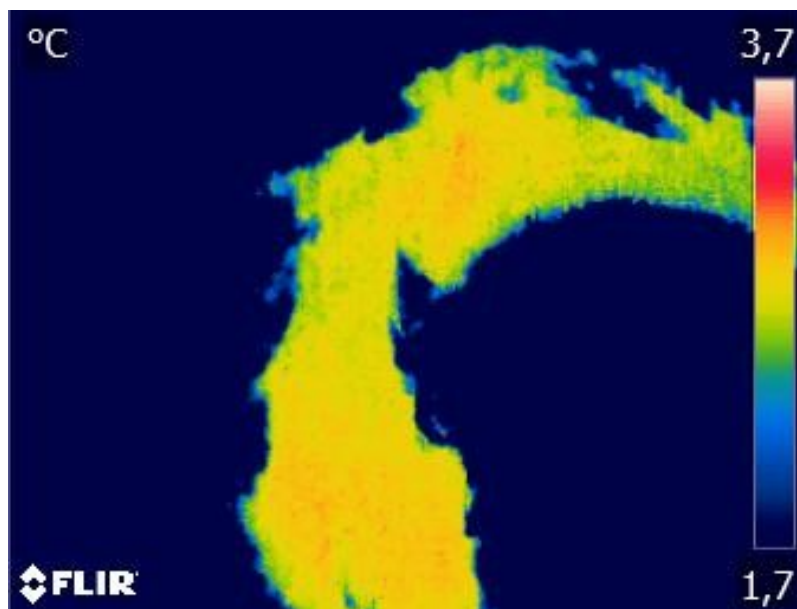


Figure 10: DS survey 2, section 1, acquired at 60m, 4 m/s

#### 3.2.2.2 Section 2

No tendency to highlight at section 2.



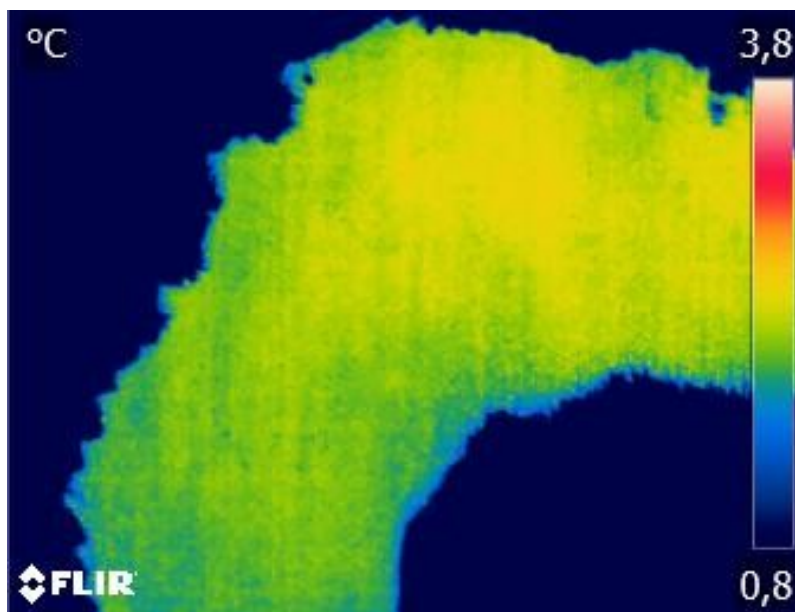


Figure 11: DS survey 2, section 2, acquired at 60m, 0 m/s

### 3.2.2.3 Section 3

Data from section 3 shows conflicting results.

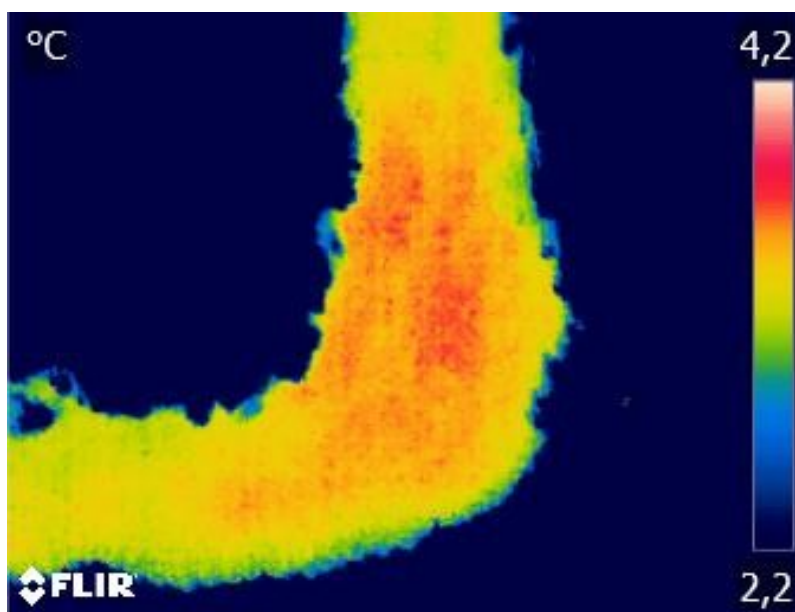


Figure 12: DS survey 2, section 3, acquired at 60m, 0 m/s

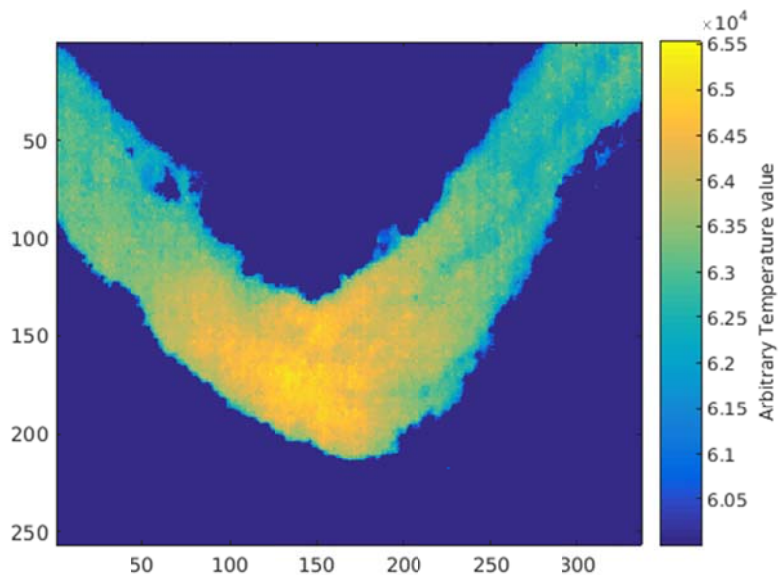


Figure 13: DS survey 2, section 3, acquired at 60m. Single frame from stationary acquisition

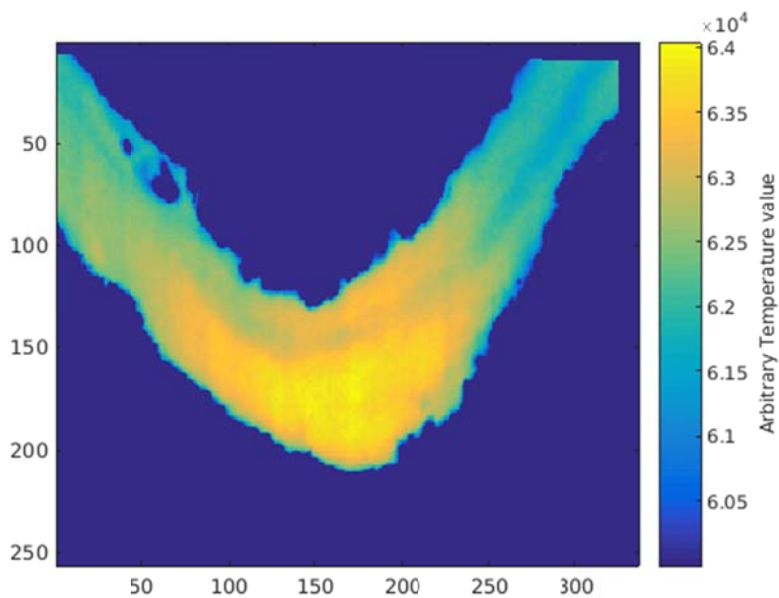


Figure 14: DS survey 2, section 3, acquired at 60m. An image produced from averaging a set of frames

### 3.2.3 Observations

The following observations are based on all collected data from Survey #2:

- Comparing data between Survey #1 and #2 provides collaborative results in some cases, conflicting results in others
- Tendency for a warm zone in the middle of the frame, indicating the source is equipment/calibration, highlighted by the narrow temperature stretch
- Averaging frames does remove/even out noise, but equipment induced inaccuracies are not alleviated



### 3.3 Survey #3

#### 3.3.1 Overview

In Survey #3 the main purpose was to cover a larger section of the stream, as illustrated below.

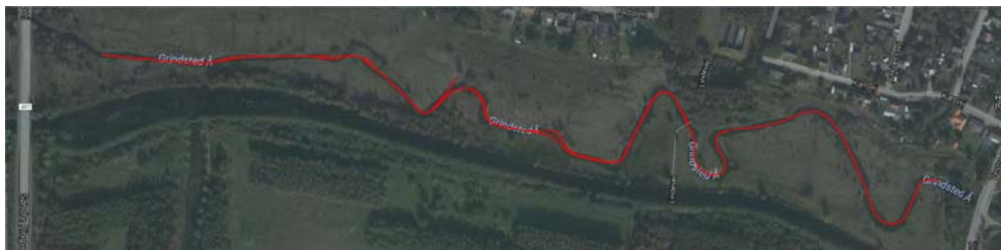


Figure 15: Survey #3 flight routes

#### 3.3.2 Results

Images for the three sections are included below. The marginally hotter zones in the images are suspected to be caused by equipment/calibration.

##### 3.3.2.1 Section 1

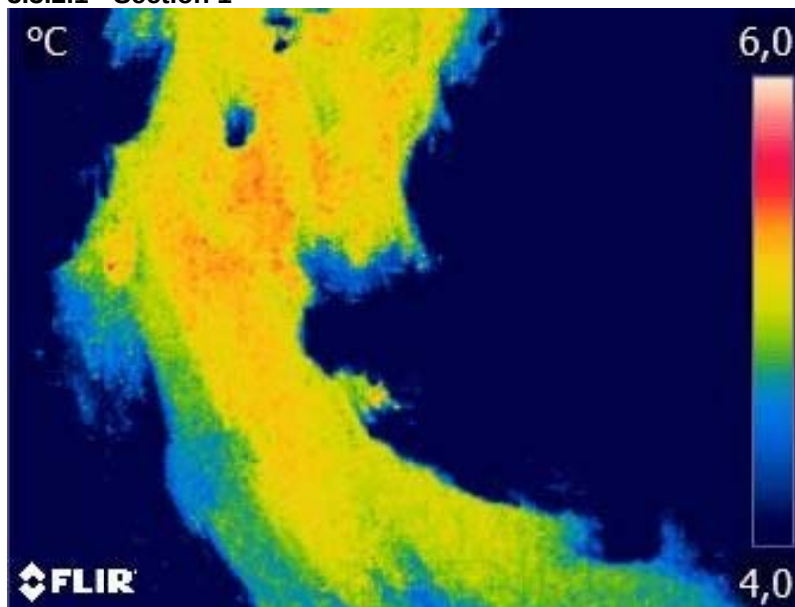


Figure 16: DS survey 3, section 1, acquired at 50m, 4 m/s

### 3.3.2.2 Section 2

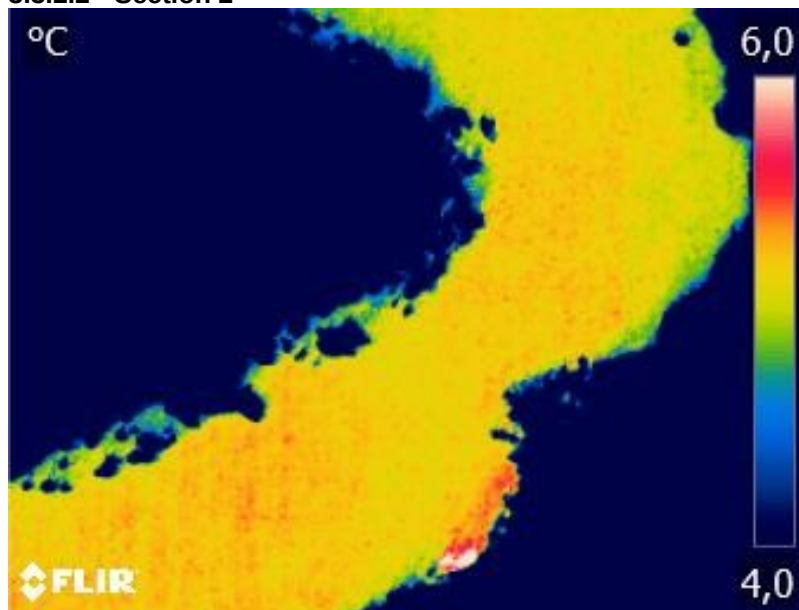


Figure 17: DS survey 3, section 2, acquired at 50m, 4 m/s

### 3.3.2.3 Section 3

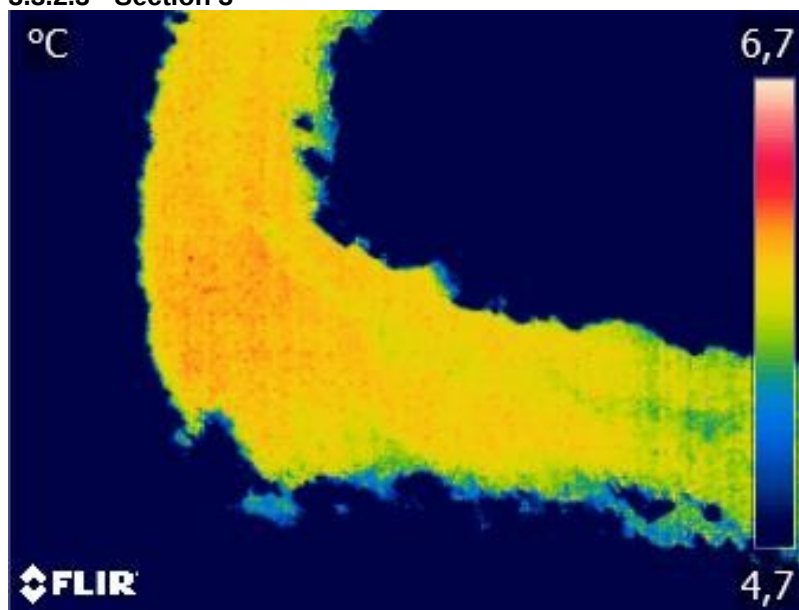


Figure 18: DS survey 3, section 3, acquired at 50m, 4 m/s

### 3.3.3 Observations

Analyzing all the thermal data from Survey #3, while considering possible equipment artifacts, has not yielded a legible source (apart from the pipe in section 2).

### 3.4 Conclusions

When reviewing/screening large sets of thermal data, video is ideal compared to images. The amount of images quickly becomes overwhelming and moving thermal video provides the means to identify potential sources, in a low delta temperature scene. It was possible to identify temperature anomalies/zones that remained in the same location of the stream while the drone was moving along the flight route. Artifacts caused by the sensor/lens cannot explain these zones. Such artifacts will appear fixed in relation to the frame.

However, the delta temperature is marginal and the same zones could not be identified across different data sets. As a result, the observed zones cannot be considered as confirmed.

An issue, concerning comparing data between flights, is the temperature drift exhibited by the sensor. This behavior makes comparison of data between flights difficult.

To illustrate this, Figure 19 shows a frame immediately before a FFC, and Figure 20 shows the first frame after the same FFC. The relative temperature for a chosen point changes from 6.8° C to 5.1° C.

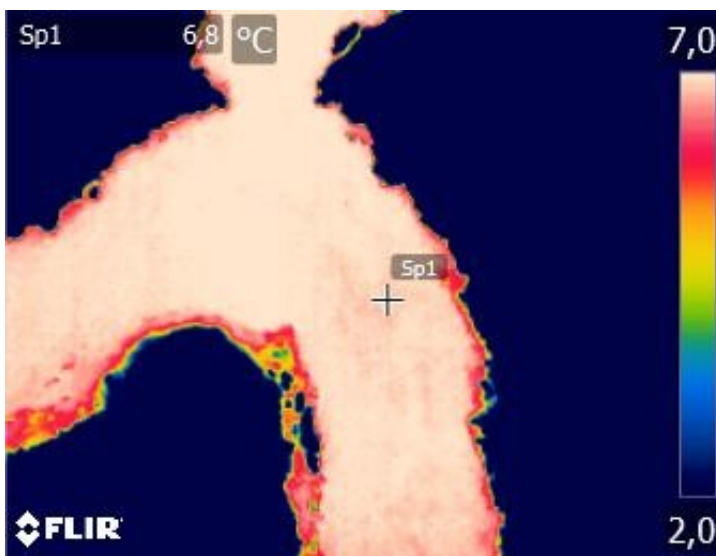


Figure 19: Frame prior to FFC

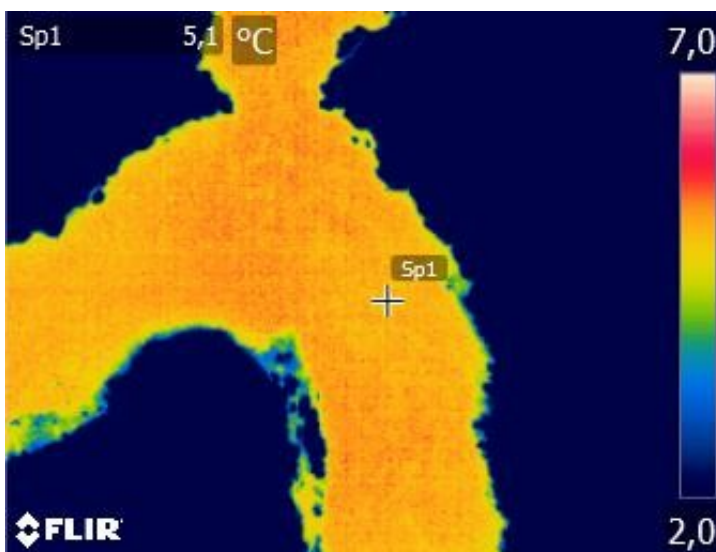


Figure 20: Frame after FFC

The delta temperatures in the collected data are very small. This induces a high degree of uncertainty in regards to interpretation. In addition, it highlights artifacts caused by the sensor/lens which to some extent can be mitigated with advanced calibration. Most of the observed temperature abnormalities can be attributed to artifacts caused by the sensor/lens.

Whether detecting zones is performed at a small scale or from a larger scale perspective, the detection is made based on temperature differences. Therefore, relative temperatures are considered equally applicable to absolute temperatures.

An altitude of 40 - 50 m seems to be a reasonable compromise between resolution and field of view, while supporting a flight velocity of at least 4 m/s without a noticeable impact the quality of data acquisition. A flight of 20 minutes duration would then promote a coverage of 2.0 – 2.5 km (considering takeoff, roundtrip and landing).

Data acquisition at 9 Hz while moving allows for employing averaging algorithms on a large set of thermal frames, which to some extent should compensate for inaccuracies caused by equipment.

Processing acquired thermal data into a thermographic mosaic may establish the means to identify small deviances over large areas. A challenge is to obtain uniformity in the data. This can be achieved by executing frequent FFC, by performing linear correction to compensate for temperature drift, or a combination.

After Survey #3, it was decided that DS sensor/lens should be calibrated at DTU facilities, and both DS platform and DTU platform should be used simultaneously the remaining two surveys. Furthermore, the surveys should be held in the summer, in order to gather data under different (opposite) conditions.

## 4. Summer Surveys

### 4.1 Field Procedures

This chapter provides an overview of field procedures used in the Grindsted Å surveys in August 2016.

#### 4.1.1 Flight plan

In total 12 flights were conducted over the three selected sections along Grindsted stream on 18<sup>th</sup> August 2016. The table below provides an overview of flight details. Each section was covered by four flights: two in the afternoon (16:30 until 18:00), one with DTU equipment and the second with DS equipment. During the afternoon flights, there was heavy cloud cover. The evening flights were conducted in the same manner between 20:30 and 22:00. Cloud cover was patchy and no direct sun radiation was incident on the stream.

Each flight consisted of 13 to 16 waypoints over the section of interest with a hover time of 20s per waypoint. Flight altitude was 30 m above ground for the DTU drone and 45 m above ground for the DS drone. All four flights at one location followed the exact same waypoint coordinates. During the afternoon flights digital photos, multispectral photos and thermal images were acquired from the DTU drone, during the evening flights, DTU drone only collected thermal images. DS drone only acquired thermal images.

| Flight ID | Section | System | Time                      | Cloud cover        | Flight height (m) | Payload* |
|-----------|---------|--------|---------------------------|--------------------|-------------------|----------|
| A         | 1       | DTU    | 18. AUG 16<br>16:30-18:00 | Heavy cloud cover  | 30                | RGB,MS,T |
| B         | 1       | DTU    | 18 AUG 16<br>20:30-22:00  | Patchy cloud cover | 30                | T        |
| C         | 1       | DS     | 18 AUG 16<br>16:30-18:00  | Heavy cloud cover  | 45                | T        |
| D         | 1       | DS     | 18 AUG 16<br>20:30-22:00  | Patchy cloud cover | 45                | T        |
| E         | 2       | DTU    | 18 AUG 16<br>16:30-18:00  | Heavy cloud cover  | 30                | RGB,MS,T |
| F         | 2       | DTU    | 18 AUG 16<br>20:30-22:00  | Patchy cloud cover | 30                | T        |
| G         | 2       | DS     | 18 AUG 16<br>16:30-18:00  | Heavy cloud cover  | 45                | T        |
| H         | 2       | DS     | 18 AUG 16<br>20:30-22:00  | Patchy cloud cover | 45                | T        |
| I         | 3       | DTU    | 18 AUG 16<br>16:30-18:00  | Heavy cloud cover  | 30                | RGB,MS,T |
| J         | 3       | DTU    | 18 AUG 16<br>20:30-22:00  | Patchy cloud cover | 30                | T        |
| K         | 3       | DS     | 18 AUG 16<br>16:30-18:00  | Heavy cloud cover  | 45                | T        |
| L         | 3       | DS     | 18 AUG 16<br>20:30-22:00  | Patchy cloud cover | 45                | T        |

\* RGB: digital photographic camera; MS: multi-spectral camera; T: thermal camera

#### 4.1.2 DTU airborne thermal imaging system

The DTU imaging system consists of a DJI Spreading Wings 900 hexacopter which is equipped with the following payloads: a thermal camera, a multispectral camera, a Red-Green-Blue (RGB) sensor photo camera and a GPS system. The thermal camera is a Tau 2 from FLIR. It is an uncooled camera core with a resolution of  $324 \times 256$  pixels, which have a pitch of  $25 \mu\text{m}$  and the camera captures electromagnetic radiation in the infrared range with a spectral band from  $7.5 \mu\text{m}$  to  $13.5 \mu\text{m}$ . The camera's scene temperature range is  $-25^\circ\text{C}$  to  $135^\circ\text{C}$  in high gain setting and  $-40^\circ\text{C}$  to  $550^\circ\text{C}$  in low gain setting. A lens with a focal length of  $9 \text{ mm}$  is mounted on the camera, which yields a field of view (FOV) of  $48.5^\circ \times 39.1^\circ$ . The camera can store snapshots in a compressed format with a bit depth of 14 bits at an acquisition rate of  $0.22 \text{ images s}^{-1}$ .

The multispectral camera is a Tetracam Miniature Multiple Camera Array (Mini-MCA). It consists of an array of 6 cameras, of which each has a different band pass filter between lens and sensor. Each camera has a lens with a focal length of  $9.6 \text{ mm}$  and a monochromatic sensor with a resolution of  $1280 \times 1024$  pixels. The FOV angles are  $38.3^\circ \times 32^\circ$ . The band pass filter wavelengths range from blue to near infrared with the following wavelengths:  $470 \text{ nm}$ ,  $530 \text{ nm}$ ,  $570 \text{ nm}$ ,  $670 \text{ nm}$ ,  $710 \text{ nm}$  and  $800 \text{ nm}$ .

The digital RGB photo camera is a Sony RX-100 compact camera. It has a relatively large sensor ( $13.2 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$ ) with a resolution of  $5472 \times 3648$  pixels. The lens has an adjustable focal length of  $10.4 \text{ mm}$  to  $37.1 \text{ mm}$ , which yields FOV angles from  $64.8^\circ \times 45.9^\circ$  to  $20.2^\circ \times 13.5^\circ$ . The shutter speed is adjustable from  $0.5 \text{ ms}$  to  $30 \text{ s}$  and the camera has a manual focus option. When taking images in a loss-less raw image format, the maximum image frequency is ca  $0.8 \text{ images s}^{-1}$ .

The GPS receiver is a EVK-6 module from UBlox, connected to an UBlox ANN-MS active GPS antenna. It sends the current position through a serial RS232 connection every second. The nominal horizontal precision is  $2.5 \text{ m}$ .

A BeagleBone Black (BBB) low-power single-board computer is used to trigger the RGB and multispectral cameras, to collect the data from the GPS unit and to control and collect data from the thermal camera.

For technical details on the DTU imaging system, please consult the MSc thesis by Köppl, 2016.

#### 4.1.3 Drone Systems airborne thermal imaging system

The DS imaging system is described in "Rapport.MST-792-00136, section 3". The DS thermal sensor is very similar to the one used by DTU and is equipped with the same lens. The differences between the two thermal sensors is the sensor size and the resolution. The DS sensor has a pixel pitch of  $17 \mu\text{m}$  (compared to  $25 \mu\text{m}$  for DTU), which results in a smaller field of view. The DS sensor has a resolution of  $336 \times 256$  (compared to  $324 \times 256$  for DTU). In order to obtain similar ground resolution and coverage for both cameras, the DS sensor was flown at higher altitude ( $45 \text{ m}$  as compared to  $30 \text{ m}$  for DTU). Drone Systems records 14-bit digital video output from the camera at a frame rate of  $9 \text{ Hz}$ .

#### 4.1.4 Ground control points for orthorectification

All three sections were equipped with ground control points, which were visible in both the optical and the thermal imagery. For the thermal imagery, metal sheets were used, which are clearly visible both during daylight and night-time conditions. Coordinates of ground control points were recorded using a DGPS rover system linked up to the Danish permanent base station network GPSnet. The accuracy of the acquired coordinates is on the sub-cm level for x and y and around  $1\text{-}2 \text{ cm}$  for z.

#### 4.1.5 In-situ temperature measurements

Four submersible temperature divers were used to measure the true water temperature at four different positions at section 2. The divers were suspended from a string crossing the river, so

they were only submerged a few centimeters below the river surface, recording the river surface temperature every 10 seconds.

## 4.2 Data Processing

This chapter details data processing for the Grindsted Å survey in August 2016.

### 4.2.1 Camera calibration

FLIR supplies a non-linear factory calibration relationship between the radiation flux measured by the camera (in digital numbers, DN) and the brightness temperature. The parameters of the factory calibration relationship are uniform over the entire image. According to FLIR, application of the factory calibration relationship provides brightness temperature accuracy better than 5K. Köppl, 2016 showed that brightness temperature accuracies of about 1K can be achieved with the FLIR camera using a modified calibration relationship:

- Calibration parameters are allowed to vary for each pixel in the thermal image
- A correction term for the camera core temperature is introduced

Calibration parameters for the DTU and the DS camera were derived in the laboratory using a black body source with a variable brightness temperature. Due to lack of time and resources, the correction term for core temperature could only be determined for the DTU camera. Details of the laboratory procedures and calibration results can be found in Köppl, 2016.

All thermal images obtained in this survey were converted to temperature using the pixel-wise calibration determined in the laboratory. The calibration includes a correction term for camera core temperature for the DTU camera, whereas the DS camera calibration is independent of core temperature.

### 4.2.2 Orthorectification and mosaicking

The digital photos and ground control points were used to construct a digital elevation model (DEM) for each section of interest. The software package Agisoft Photoscan was used for this purpose. Subsequently, the DEM was used as an orthorectification base for all thermal images. For a detailed description of this workflow, please see Köppl, 2016.

When projecting the thermal images onto the DEM, only images from one UAV position were used for each output map, in order to avoid temperature jumps in the output map, caused by sensor core temperature drifts over time. For the DTU sensor, 3 to 6 thermal images were averaged, whereas for the DS sensor only one thermal image was chosen for each position, which is the third frame after a flat-field correction (FFC).

### 4.2.3 Conversion from brightness temperature to radiometric temperature

Brightness temperature, as measured by thermal cameras, is different from the true temperature of the target because of two principal effects:

- Most surfaces are not ideal black body emitters. Their emissivity for the thermal range is thus less than 1, i.e. they emit less energy as an ideal black body with the same temperature. Emissivity of open water surfaces in the thermal band is relatively close to 1 and a default value of 0.98 is used here.
- The camera will record both the thermal emission of the surface but also reflections of any incoming thermal radiation from the sky. Incoming thermal radiation depends on cloud cover, air humidity and air temperature. An approach by Brutsaert, 1975 is used here to estimate incoming thermal radiation, using air temperature and actual atmospheric water vapour pressure. Weather input data are obtained from Billund weather station which is located approximately 15 km from the flight location.

Both effects are acting in opposite directions: Due to the emissivity effect, real temperature is expected to be higher than brightness temperature, due to incoming longwave radiation, real temperature is expected to be lower than brightness temperature.

## 4.3 Results

This chapter presents results from the Grindsted Å survey in August 2016.

### 4.3.1 Brightness temperature

The following figures show one brightness temperature map generated from images acquired from one single waypoint for each flight. The temperature is displayed in °C and the temperature stretch of each map is given in the figures. At section 2, the average temperature measurements of the divers during the time of the flight are displayed as well.

The results support the following main findings:

- Spatial patterns of temperature are consistent between the two imaging systems and between different waypoints.
- Absolute temperature values are not consistent between the two systems.
- Absolute temperature values are not consistent between waypoints using the same system.
- Absolute temperatures mapped by the DTU system are consistent with in-situ data, while those mapped by the DS system are not.
- The water surface generally has very homogeneous temperature. No significant temperature anomalies are observed on the water surface at the local scale from any of the waypoints using any of the two systems.
- Imagery indicates that river surface temperature is consistently decreasing in the downstream direction, which is consistent with infiltration of cooler groundwater. Section 1 appears warmer than section 2 and section 2 warmer than section 3. However, these temperature changes are small compared to the significant uncertainty on absolute temperatures recorded by the sensors.

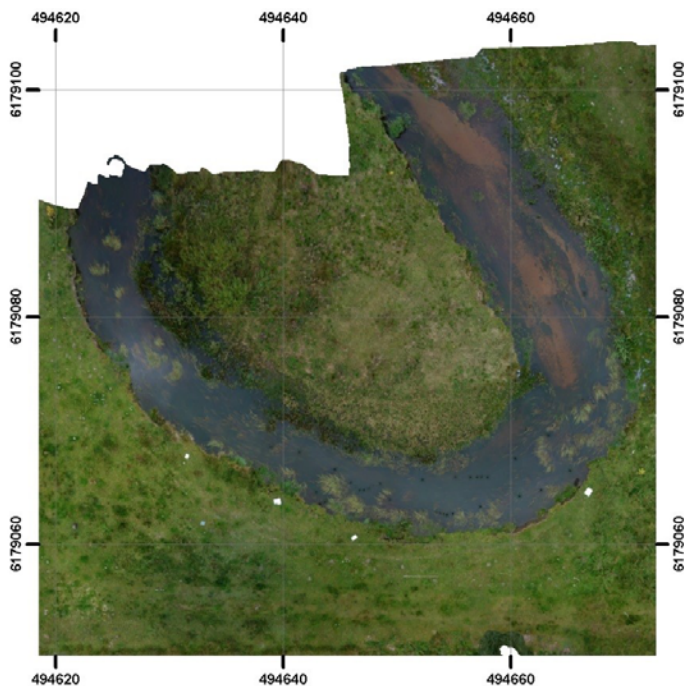


Figure 21: Ortho-mosaic of section 1, generated from the RGB images acquired in flight A



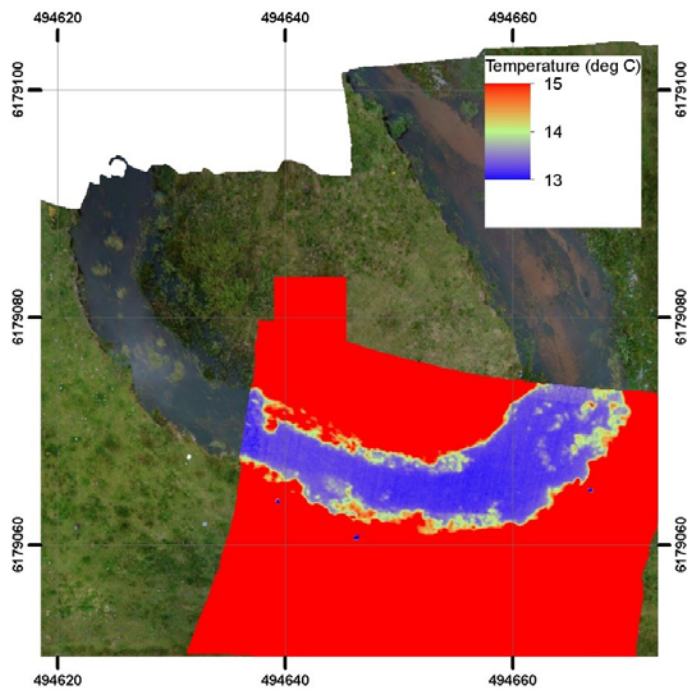


Figure 22: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight A

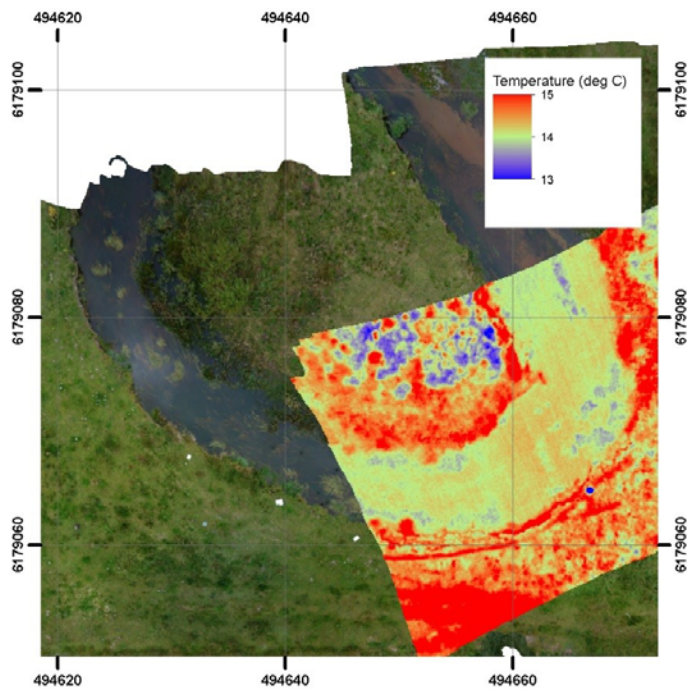


Figure 23: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight B

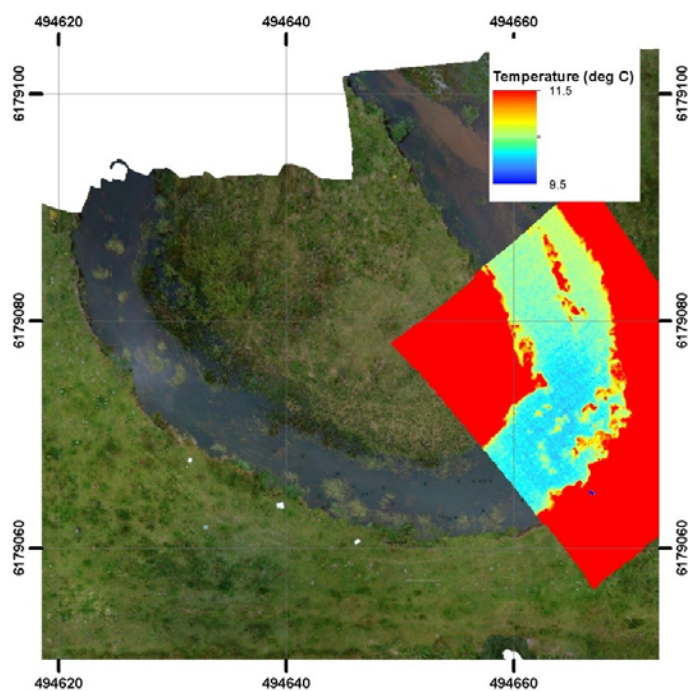


Figure 24: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight C

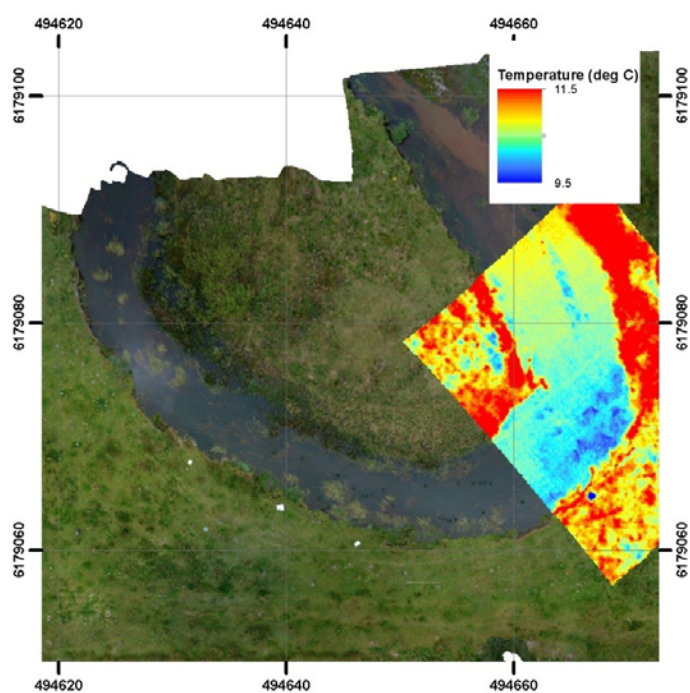


Figure 25: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight D

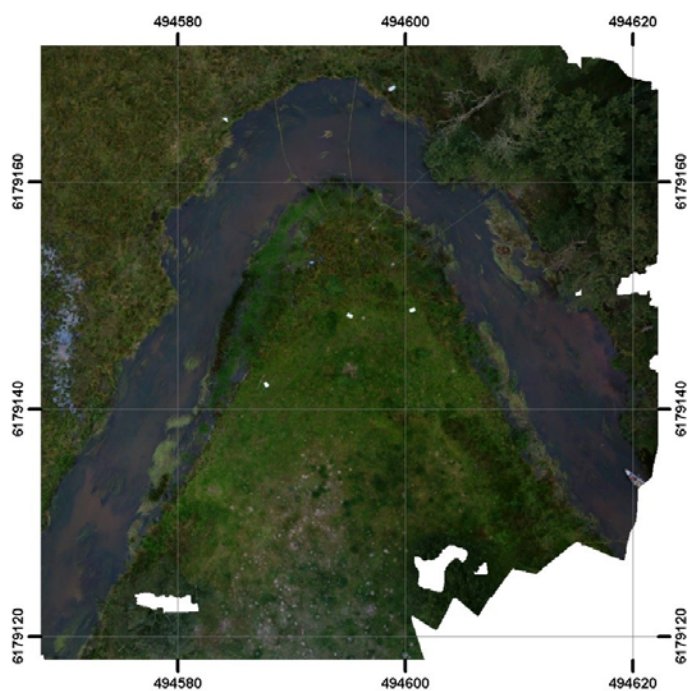


Figure 26: Ortho-mosaic of section 2, generated from the RGB images acquired in flight E.

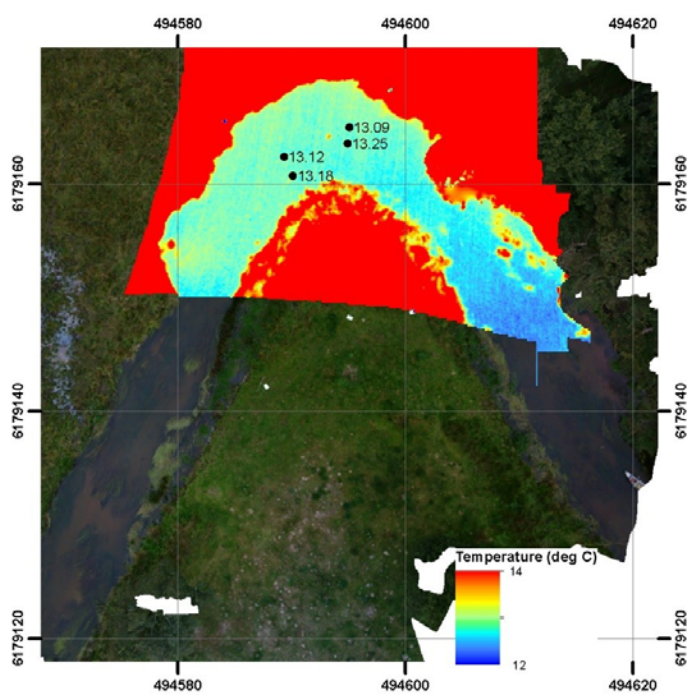


Figure 27: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight E



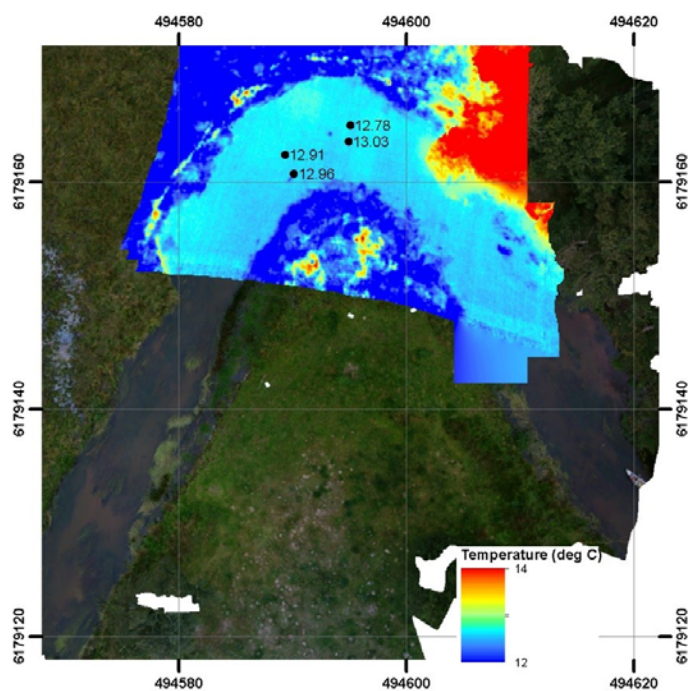


Figure 28: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight F

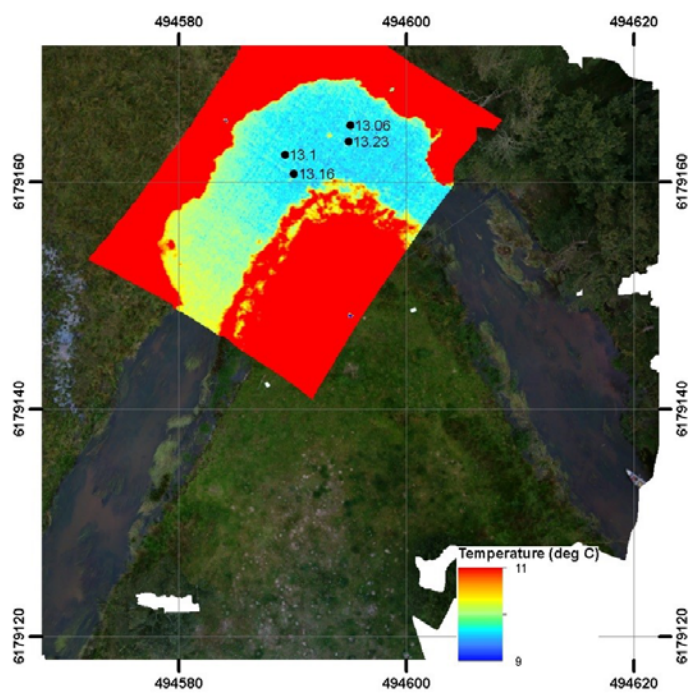


Figure 29: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight G

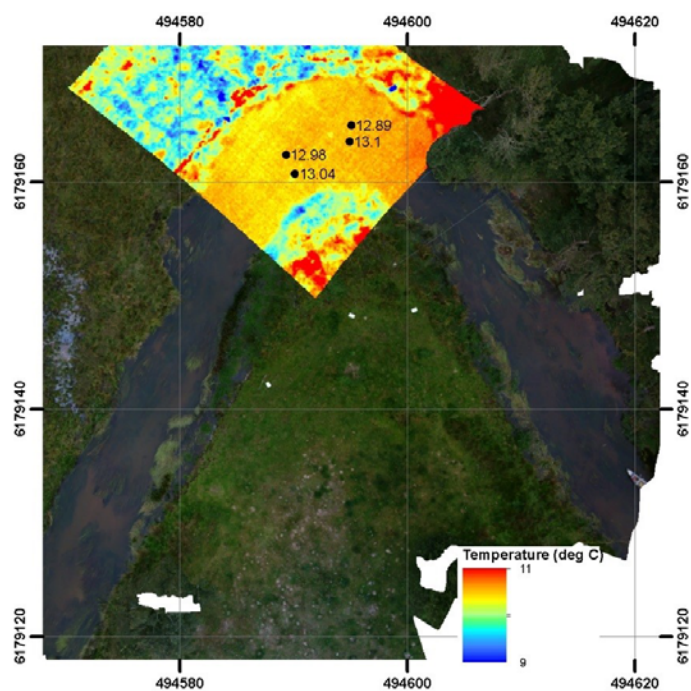


Figure 30: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight H

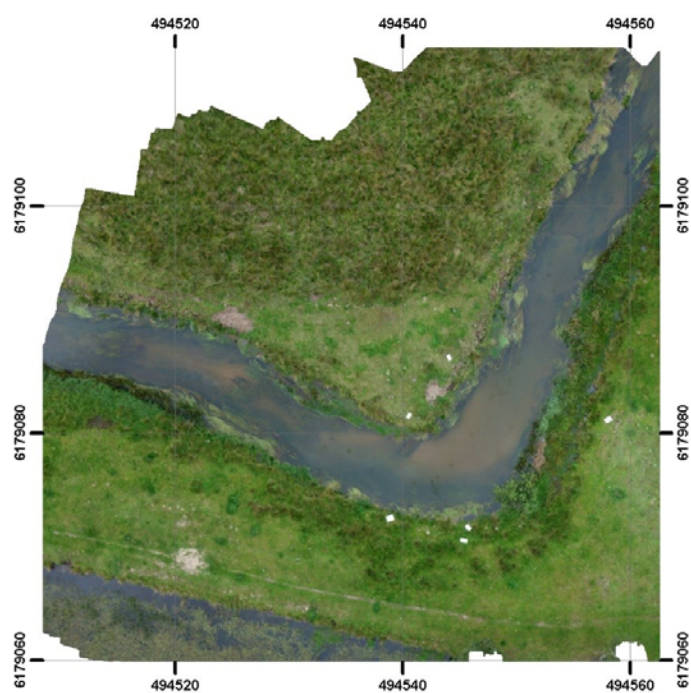


Figure 31: Ortho-mosaic of section 3, generated from the RGB images acquired in flight I

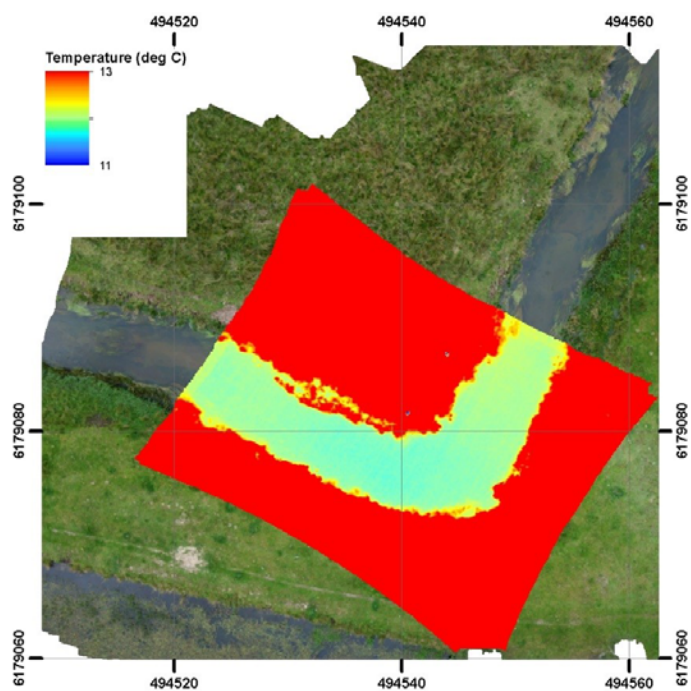


Figure 32: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight I

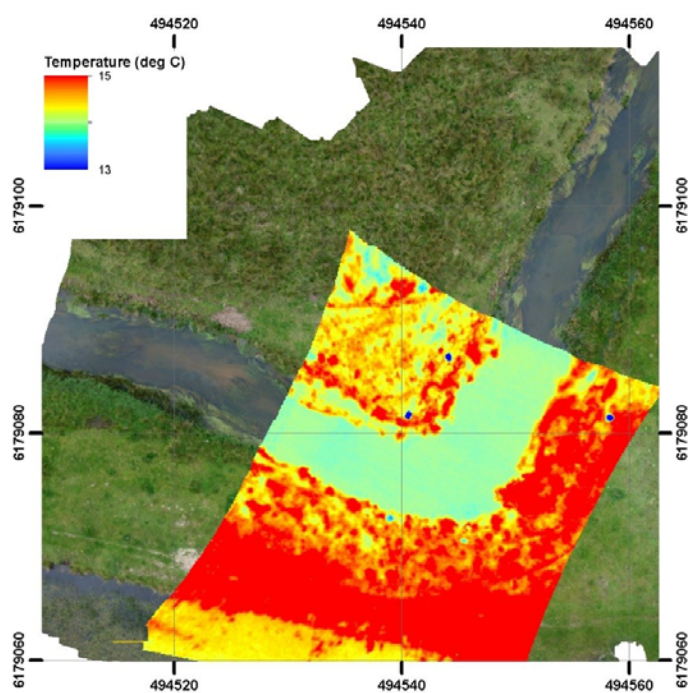


Figure 33: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight J



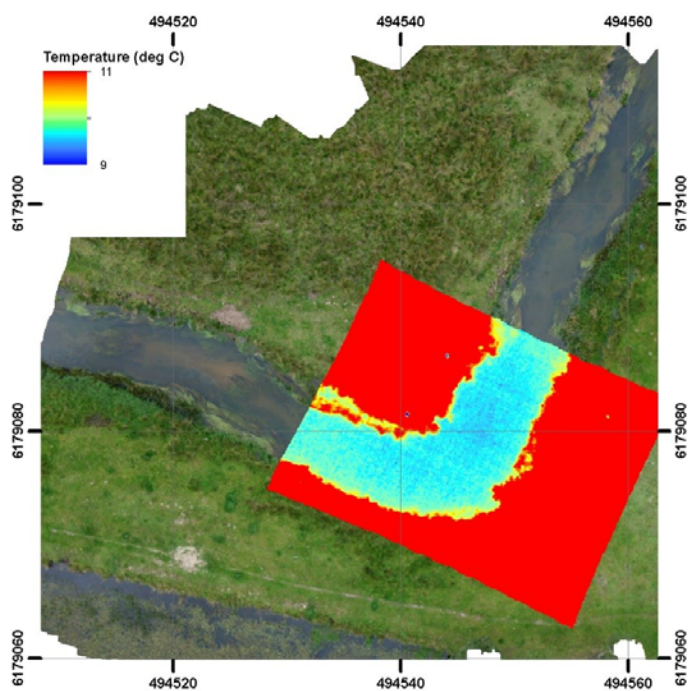


Figure 34: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight K

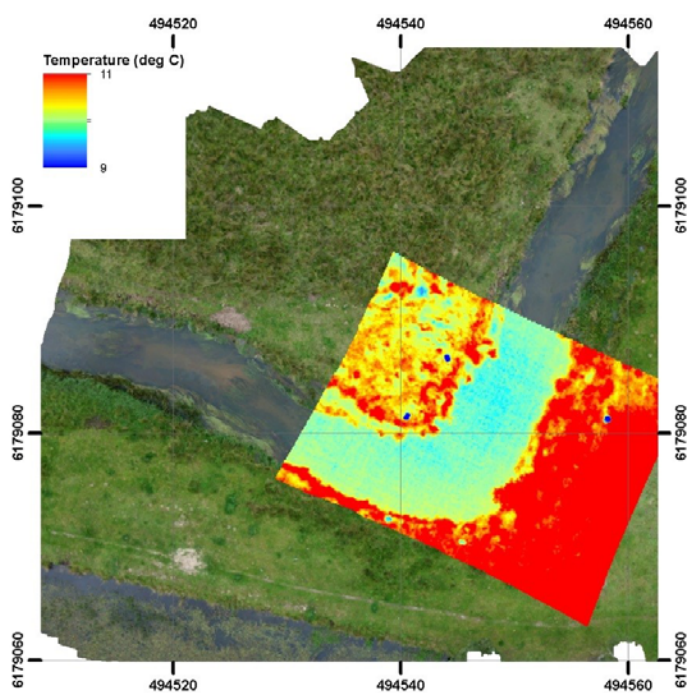


Figure 35: Brightness temperature map obtained from a selected waypoint of flight L

### 4.3.2 Radiometric temperature

On the day of the flights, cloud cover was heavy at the survey site. Due to the high incoming longwave radiation at the time of the flights (ca. 350 to 380 Wm<sup>-2</sup>) the difference between brightness temperature and radiometric temperature of the water surface is very small (ca. - 0.05K during the day and ca. 0.02K during night). Examples for day and night conditions are shown in Figure 36 and Figure 37. These differences are small compared to the accuracy of the thermal camera. The thermal imagery was therefore not systematically converted to radiometric temperature.

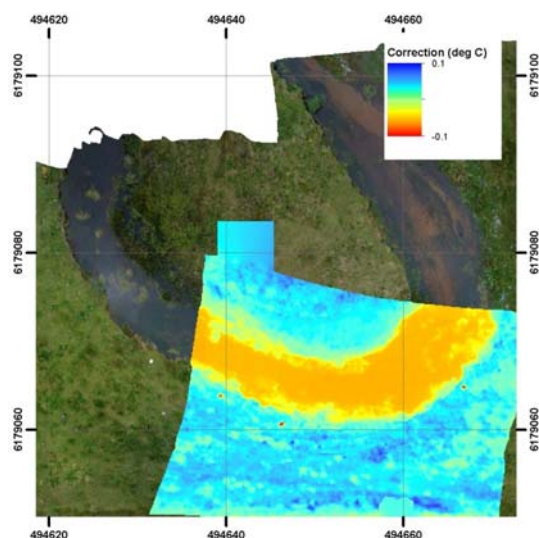


Figure 36: Difference between radiometric temperature and brightness temperature for flight A

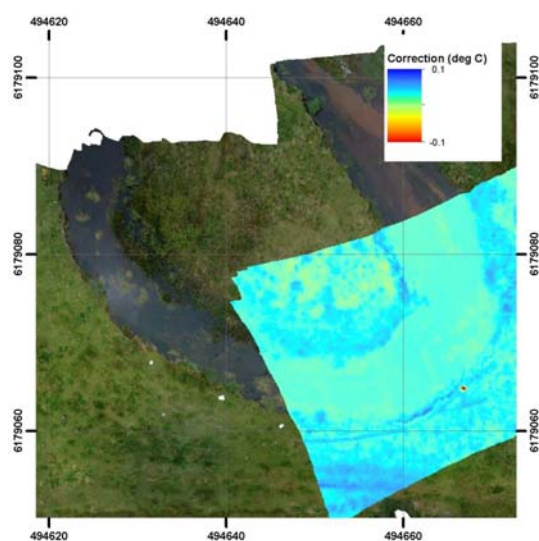


Figure 37: Difference between radiometric temperature and brightness temperature for flight B

## 4.4 Discussion

In general, water surface temperature in Grindsted Å is very homogeneous. None of the acquired imagery shows temperature signals which are clearly above the noise level.

The thermal images show no confirmed signs of temperature implications from groundwater infiltration at the local scale. The measured brightness temperature of the river surface is very



homogeneous. Visible temperature signals of the river surface are too small to be significant and do not occur in several images, which means that they are not consistent throughout the surveys and even not from different acquisition points during the same mission. Also the divers in section 2 only show small temperature differences. From the August flights, some spatially sharp defined hot spots during the day and cold spots during the night can be observed on the river surface. They are caused by vegetation in the river, reaching the river surface. These places can also be identified in the multispectral imagery. This indicates that groundwater infiltration to the river is too small relative to the total flow in the river to generate temperature changes at the local scale that are significant compared to the noise level of the cameras.

In situ groundwater temperature measurements from another DTU Environment research group, conducted one day before the August flights, showed temperatures between 9°C and 10°C. The river surface temperature is ca. 13°C. This temperature difference is relatively small, and conditions were therefore not ideal for using temperature as a tracer for groundwater infiltration.

Due to the diffuse distribution of groundwater inflow and its small magnitude relative to river flow, temperature changes are expected to occur gradually over larger spatial scales. The acquired imagery shows temperature decreases in the downstream direction, between sections 1, 2 and 3. An example for flights A, E and I is shown in Figure 38. This result is however not very consistent between flights, because changes are small and uncertainty on absolute temperatures recorded by the cameras is high, as can be seen in Figure 39 for the DTU system and Figure 40 for the DS system. Clearly, absolute temperature values between images/waypoints are not consistent despite the advanced calibration. The result is better for the DTU system because of the core temperature correction that is applied in the calibration and because of the fact that several images are averaged per waypoint. Still, absolute temperature shifts of several tenths of degrees are observed between acquisitions from two different waypoints. While this accuracy is insufficient for Danish conditions, in different conditions, e.g. in the case presented in Loinaz et al., 2013, the accuracy may already be sufficient to map temperature differences between reaches.

In order to effectively map the small and gradual temperature changes expected from groundwater infiltration in Danish conditions, thermal imaging at the reach scale is required. This requires technological progress on the platform front and also on the payload front:

- A platform is required that can effectively cover larger areas and, at the same time, hover over places of interest for detailed surveying. The SmartUAV platform, a combined fixed wing/rotary wing platform developed under a HTF contract at SkyWatch/DTU is expected to provide these capabilities.
- Thermal cameras are required which provide more accurate readings of absolute temperature. Cooled core cameras which can do this are on the market, but are presently too heavy to be flown by a lightweight UAV. However, rapid technological progress is also expected on this front.

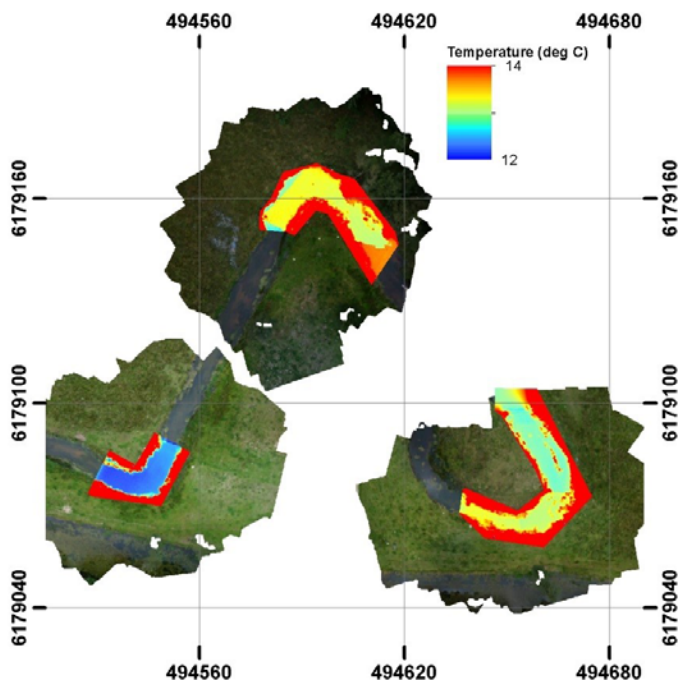


Figure 38: Mosaic of all thermal images acquired in flights A, E and I

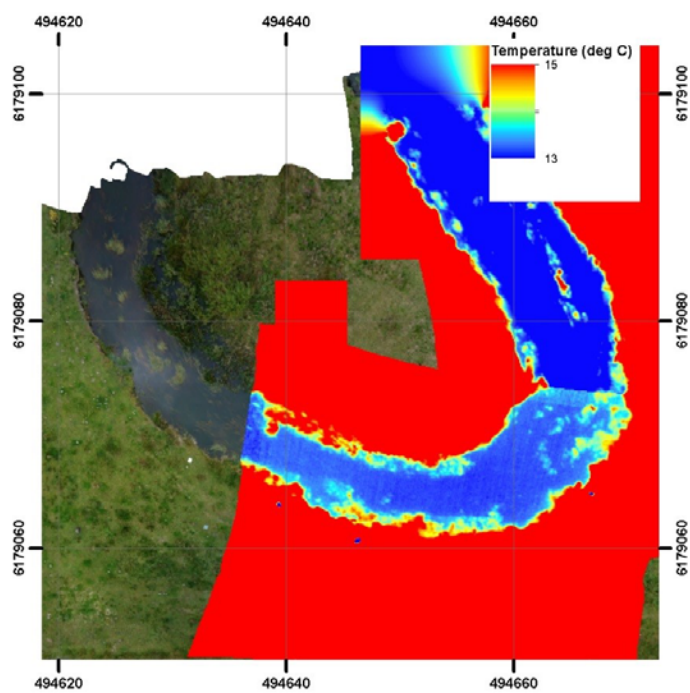


Figure 39: Mosaic of brightness temperature images obtained from different waypoints of flight A

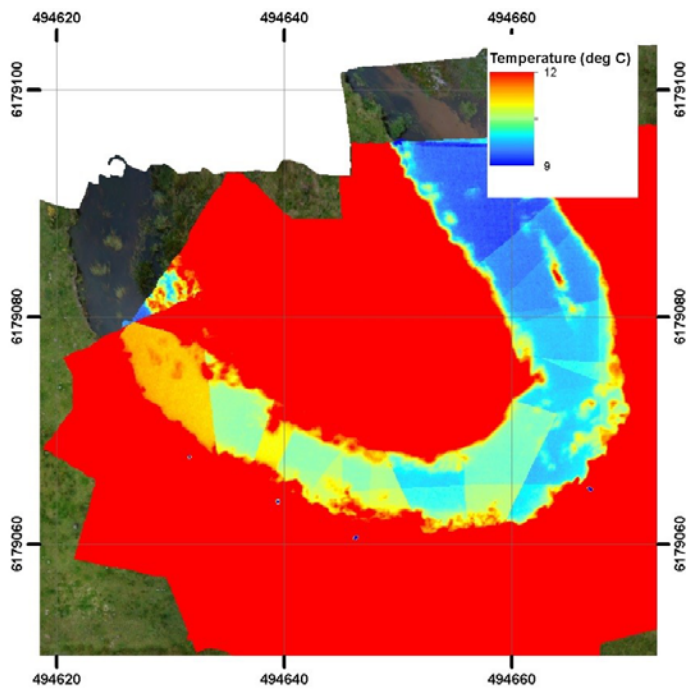


Figure 40: Mosaic of brightness temperature images obtained from different waypoints of flight C

## 4.5 Conclusions

The results presented in this report support a number of important conclusions:

- Spatial patterns of temperature variations at the local scale are consistent between two different Tau 2 thermal imaging systems and between different acquisition waypoints.
- Absolute temperature values are not consistent between the two systems and also not between waypoints, even when an advanced calibration approach is used.
- Groundwater influx to river at this site is insufficient to change water surface temperature beyond the signal-to-noise ratio of the mapping system. This is expected to be the case generally in Danish conditions.
- Temperature variations due to groundwater-surface water interaction are expected to occur at the reach scale or between different reaches. Mapping such differences would be very interesting but would require new technology in terms of platform and thermal payload.

## References

- Brutsaert, W., 1975. Derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resour. Res.* 11, 742–744. doi:10.1029/WR011i005p00742
- Köppl, C.J., 2016. Thermal Imaging from Unmanned Airborne Vehicles. Technical University of Denmark.
- Loinaz, M.C., Davidsen, H.K., Butts, M., Bauer-Gottwein, P., 2013. Integrated flow and temperature modeling at the catchment scale. *J. Hydrol.* 495, 238–251. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.04.039
- Rasmussen, J.J., McKnight, U.S., Sonne, A.T., Wiberg-Larsen, P., Bjerg, P.L., 2016. Legacy of a Chemical Factory Site: Contaminated Groundwater Impacts Stream Macroinvertebrates. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 70, 219–230. doi:10.1007/s00244-015-0211-2





Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)