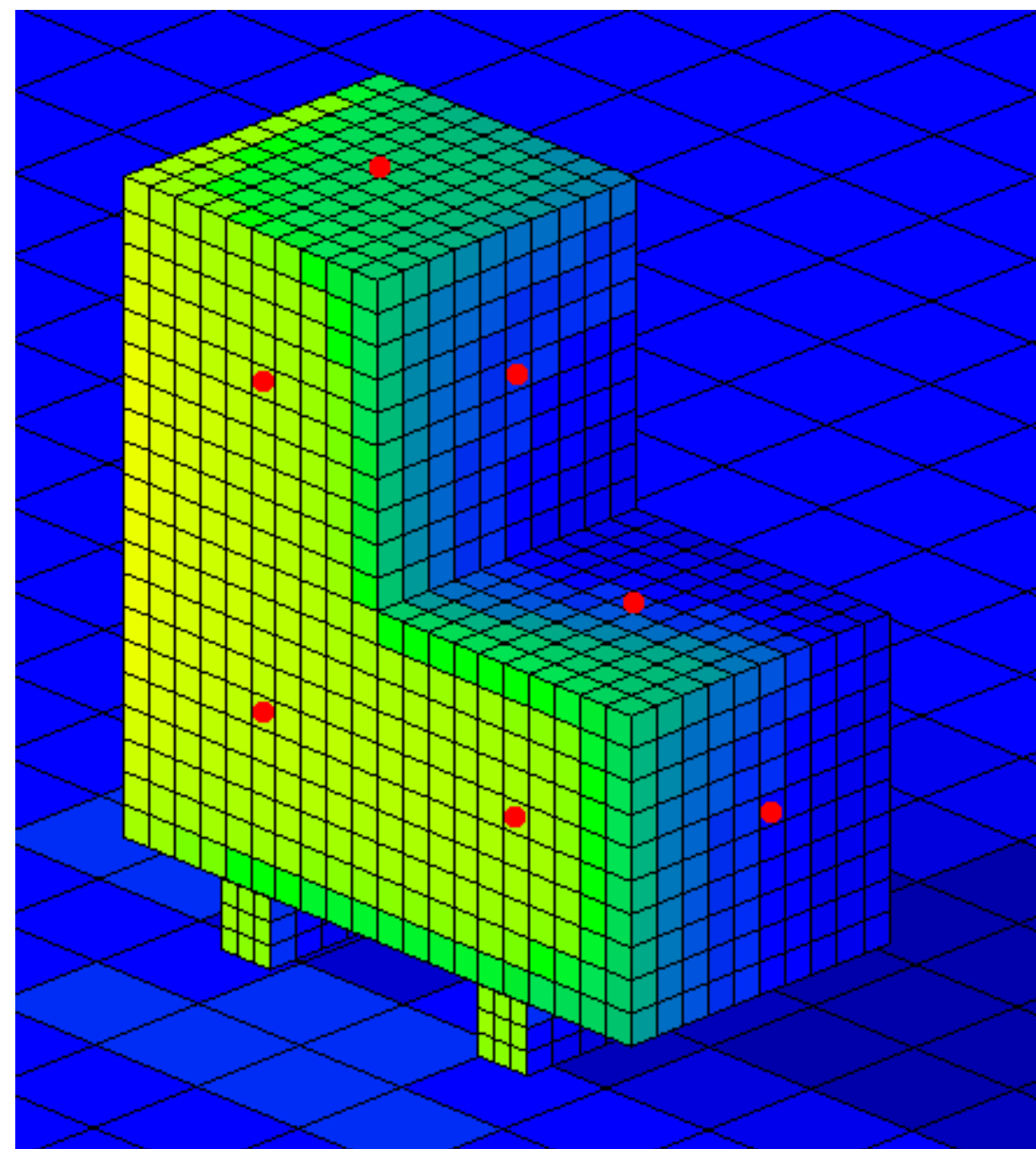


JAN FAGERSTRÖM, ANNICA HJELM,
NILS KARLSSON, ROLAND LINDELL OCH JONAS RAHM



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Jan Fagerström, Annica Hjelm, Nils Karlsson,
Roland Lindell och Jonas Rahm

Termiska beräkningar på två varianter av referensobjekt CUBI

Känslighetsanalys och jämförande mätningar

Titel	Termiska beräkningar på två varianter av referensobjekt CUBI. Känslighetsanalys och jämförande mätningar
Title	Thermal calculations of two versions reference object CUBI. Parameter test and measurements
Rapportnr/Report no	FOI-R--3268--SE
Rapporttyp/ Report Type	Teknisk rapport
Sidor/Pages	77 p
Månad/Month	Oktober
Utgivningsår/Year	2011
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Projektnr/Project no	E53349
Godkänd av/Approved by	Lars Bohman

FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Informationssystem	Information Systems
Box 1165	Box 1165
581 11 Linköping	SE-581 11 Linköping

Sammanfattning

Som ett led i utvecklingen av modellerings och simuleringsverksamheten har vi utfört termiska beräkningar och mätningar på referensobjektet CUBI. Vi vill öka förståelsen för hur ett objekt påverkas termiskt utifrån dess geometri, materialparametrar och omgivning samt öka förståelsen för hur modelleringsverktyg hanterar och beräknar IR-scenen utifrån dess inparametrar. Detta innebär också en validering av den använda programvaran RadThermIR.

Mätningar har utförts både sommaren 2009 och hösten 2010 på ett referensobjekt CUBI. CUBI har en enkel och väldefinierad konstruktion avseende geometri och materialegenskaper. I rapporten behandlas främst data från 2010 men även data från 2009 används. Vi mätte fysisk ytemperatur med Pt100-givare och IR-bilder registrerades samtidigt som väderdata mättes. Den scen som IR kamerorna ser domineras av CUBI. Mätdata används sedan som referens till de genom simuleringar framtagna temperaturdata.

Scenen är noggrant modellerad och vi har gjort beräkningar med mjukvaran RadThermIR. I stort följer beräknad temperatur de trender och nivåer som den uppmätta temperaturen har. För vissa tidpunkter och ytor, främst på de lodräta sidorna, är det relativt stora temperatur avvikelser på upp mot 10 grader.

För att öka förståelsen av vilka parametrar som är kritiska för temperaturberäkningen har ett stort antal programkörningar utförts där man varierat olika material, konvektion och väderparametrar. Detta ger en god förståelse av parametrarnas påverkan av temperaturen på CUBI och sammantaget ger de ett ökat förtroende till mjukvaran då man kan se en tydlig koppling mellan en parameterändring och förväntat resultat. En ändring av konvektionsparametern påverkar temperaturen på de olika sidorna av CUBI olika, vilket särskiljer denna parameter. Genom att anpassa denna för ytor med olika orientering fås en bättre överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta temperaturer.

Detta ställer ett antal frågor: Vad är möjligt eller rimligt att modellera och hur noggrant måste man specificera parametrar och anpassa modeller? Vid en mer allmän modellering finns det oftast ytor som är varken horisontella eller vertikala. Vad är då rimligt att uppnå för överensstämmelse med mätdata?

I rapporten finns referenser till andra forskargrupper jämförande mätningar och beräkningar på CUBI.

Nyckelord: Termisk beräkning, IR-modellering, temperaturmätning, LWIR, SWIR, CUBI, RadThermIR

Summary

We have performed thermal calculations and measurements of a reference object, CUBI. The work is done to give a better understanding how different parameters influence the thermal behaviour of an object but also how these parameters is treated by the software RadThermIR. This investigation is also a validation of RadThermIR software.

CUBI is a well defined object concerning its geometry and material. Measurements are made of its surface temperature by the use of Pt100 elements. IR-images are recorded in a scene dominated by the CUBI. Relevant weather data is collected during the measurements. The measured data is used as reference to the result of calculated data.

The results from the calculations roughly follow the same trends and levels as the measured temperature. At some surfaces and moments the temperature differences are almost 10 degrees. This is the case for vertically oriented surfaces only.

To further increase the understanding of which parameters that are most critical for the thermal computation a great number of executions of the software is made. Parameters of the CUBI material, weather and convection coefficients are varied. One result of the parameter test is that the convection parameter is particularly important. A change of this parameter has a large influence on the temperatures of the CUBI surfaces. Adjusting this parameter to differently oriented surfaces gives a better compliance between measured and calculated data.

The result of this report results in some questions: What is possible or reasonable to simulate with a good accuracy? What compliance is reasonably to achieve in a complex scene?

Keywords: Thermal calculation, IR-modelling, temperature measurements, LWIR, SWIR, CUBI, RadThermIR

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	CUBI	8
3	Mätningar	10
3.1	Mätningar med väderstation	10
3.2	Mätningar av ytemperatur och radians hos CUBI.....	12
3.2.1	Systemkorrigeringar och kalibrering av AGEMA-systemet.....	16
3.2.2	Extern kalibrering i Matlab	17
3.2.3	Kalibreringsverktyg och visualiseringsverktyg, kortfattad manual	18
4	Beräkningar	19
4.1	RadThermIR-modell.....	19
4.1.1	Geometri	19
4.1.2	Materialegenskaper	21
4.1.3	Markegenskaper	21
4.1.4	Väder.....	22
4.2	Känslighetsanalys	23
5	Resultat	24
5.1	Dygnet 2010-10-21	24
5.2	Dygnet 2010-10-26	31
6	Slutsatser	35
7	Referenser	36
8	Appendix	37
8.1	Känslighetsberäkningar för dygnet 2010-10-21	40
8.2	Känslighetsberäkningar för dygnet 2010-10-26.....	58

1 Inledning

Vi har utfört mätningar och beräkningar av temperaturen på ett referensobjekt. Arbetet har gjorts som ett led i utvecklingen av modellerings och simuleringsverksamheten inom IR-området. Syftet var att öka förståelsen om hur ett objekt påverkas termiskt utifrån dess geometri, materialparametrar och omgivning samt validering av beräkningar med mjukvaran RadThermIR. Metoden är att utifrån mätningar och beräkningar på en väldefinierad scen göra jämförelser mellan uppmätta och beräknade data. Scenen domineras av ett väldefinierat objekt, CUBI, på vilket vi har gjort noggranna temperaturmätningar och registrerat IR-bilder samtidigt som vi mätt och dokumenterat väderdata. CUBI är ett geometriskt enkelt objekt som ändå är tillräckligt komplext för att ge utmaningar för IR-beräkningar.

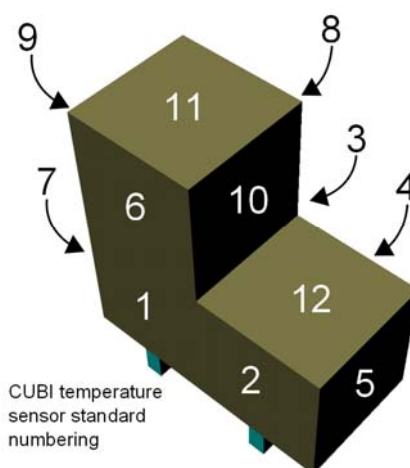
Sommaren 2009 utfördes samma typ av mätningar och även då gjordes jämförande beräkningar med programmen RadThermIR och Cameosim [Fagerström 2009]. Vid mättillfället 2009 var det ett ovanligt stabilt väder. Ytterligare mätningar motiverades av att vi ville utöka mätdataunderlaget med bl.a. olika väderfall. För att ytterligare variera indata försågs CUBI med en inre värmekälla.

Jämförelse av modellerat resultat och mätvärden 2009 visade på skillnader som vi önskade att utreda vidare. Ett uttalat mål var därför nu att försöka uppnå bättre resultat med bättre överensstämmelse mellan mätningar och beräkningar. För att utröna vilka parametrar som är kritiska utfördes en känslighetsanalys. Under arbetet ställdes även frågan vad som kan anses vara god överensstämmelse mellan mätdata och modellering. Internationellt finns jämförelser av modellerade och uppmätta resultat på CUBI utförda av andra forskargrupper som kan studeras i referenser [Malaplate 2007], [Schwenger 2009], [Bushlin 2006], [Reinov 2006].

2 CUBI

Noggrann termisk modellering kräver validering av modell och använda program. För grundläggande utvärdering av termiska beräkningar har en generisk modell kallad CUBI tagits fram. Tanken är att CUBI ska ha en enkel geometri, men ändå ha en karakteristik som kan liknas vid ett markfordon. Tanken är att generera mätdata för temperaturfördelningen på objektets sidor som funktion av varierande väder och andra omgivningsbetingelser. Dessa data kan då användas som en jämförelse med beräknade värden. CUBI togs fram som ett initiativ under ITBM&S-konferensen i Ettlingen 2005. Det har även bildats ett CUBI-forum för utbyte av mätdata och modelleringsresultat [CUBIforum].

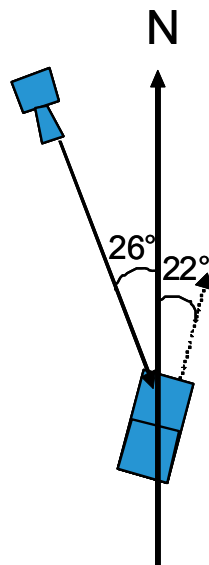
Geometriskt kan CUBI ses som tre kuber med sida 0,5 m som gemensamt formar en L-formad geometri, se Figur 1. Det bör noteras att den inte är byggd av separata kuber utan svetsats samman av två L-formade plåtar och ett antal rektangulära plåtar utan några inre mellanväggar. Den är tillverkad av 4 mm stålplåt och har ett 20 mm tjockt lager isolering på insidan. Temperaturgivare är monterade i centrum på ytan av varje kub och är numrerade enligt markeringar i Figur 1. Temperaturgivarna är av Pt100 typ och är infrästa i plåten från insidan och ligger ca 1 mm från utsidan.



Figur 1 CUBI med temperaturgivarnas placering markerad.

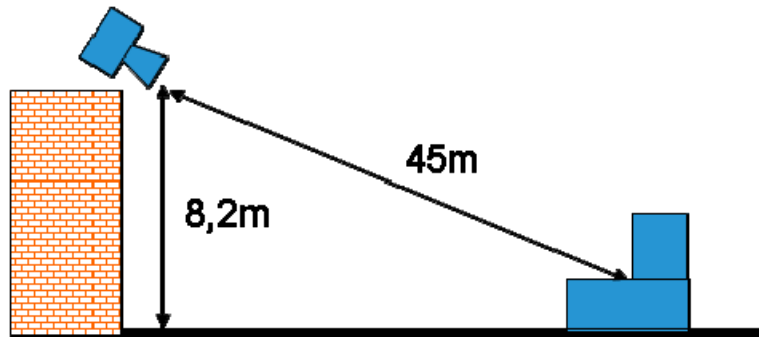
Den CUBI som FOI har är dessutom utrustad med temperaturgivare som mäter lufttemperaturen inuti CUBI. De temperaturgivare som används är av typen Pt-100. Då man önskar en inre värmekälla finns ett värmeelement på 60 W i CUBI. Detta är placerat på mitten av bottenplattan.

Som isoleringsmaterial har FOI använt (Alveolit®). Dess densitet är 25 kg/m^3 och den specifika värmekapacititeten är mellan $2100\text{--}2800 \text{ J/kgK}$. Konduktiviteten varierar något med dess temperatur och är vid 10°C $0,034 \text{ W/mK}$ och vid 40°C $0,038 \text{ W/mK}$.



Figur 2 Orientering av CUBI relativt norr samt kamerornas riktning relativt CUBI och norr. Den högre delen av CUBI är orienterad längst åt söder.

Vid mätningarna var CUBI placerad enligt figur 2 och 3. Dess riktning relativt norr var 22° . Dess högre del är i bildens nedre del. IR-kamerornas placering är även indikerad i figuren. De var placerade 8,2m över marken på taket av ett hus. Avståndet mellan CUBI och kamerorna var 45m. Vid mätningarna var CUBI placerad på 1dm tjocka och breda rätblock av markisoleringsmaterial.



Figur 3 IR-kamerornas placering relativt CUBI, sett i en vy från sidan.

3 Mätningar

Under oktober månad 2010 utfördes ytemperatur- och radiansmätningar på objektet CUBI. Dessutom mättes väderförhållandena med en väderstation. Syftet med mätningarna var att utnyttja mätdata som en referens vid valideringen av beräkningskoder. Liknande mätningar utfördes under juni månad 2009 på samma objekt, se referens [Fagerström 2009].

3.1 Mätningar med väderstation

En väderstation VAISALA Milos 500 (se Figur 4) används för att mäta upp relevanta väderparametrar för att användas som indata till ytemperaturberäkningarna på CUBI. De väderparametrar som mäts upp är:

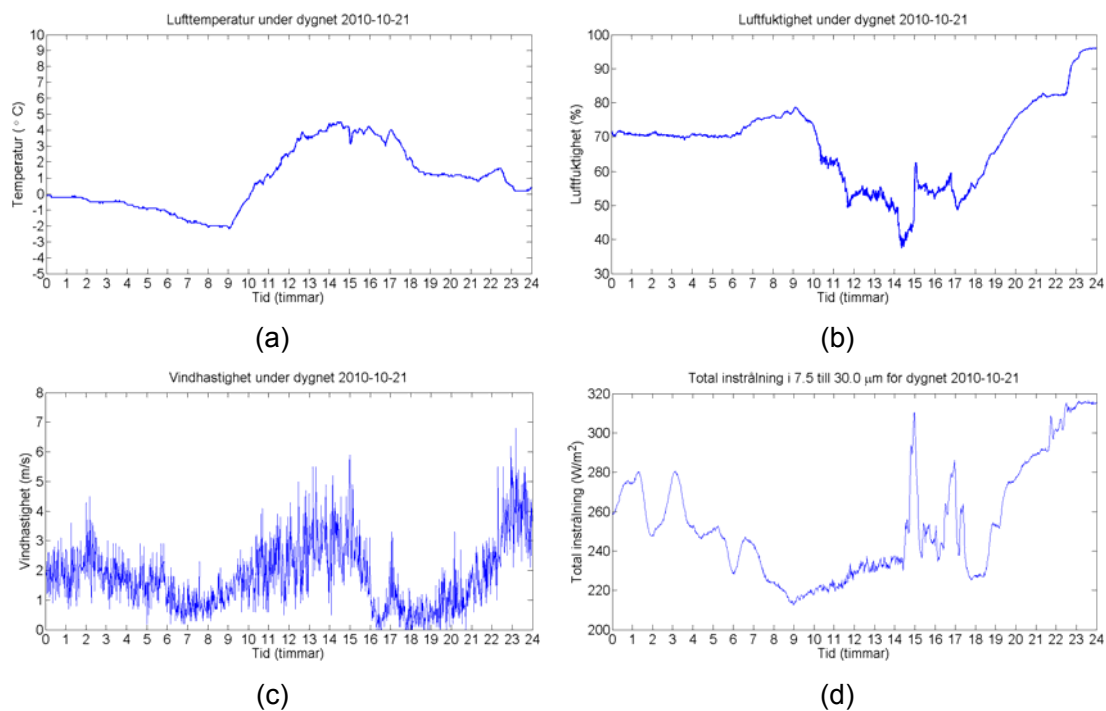
- Vindriktning
- Vindhastighet
- Lufttemperatur
- Luftfuktighet
- Sikt
- Nederbörd
- Solinstrålning 305-2800 nm
- Markstrålning 305-2800 nm
- Himmelstrålning 3,5-50 μm
- Markstrålning 3,5-50 μm
- Marktemperatur

Dessutom kompletterades väderstationen med ytterligare en solinstrålningssensor (Delta-T SPN1). Denna sensor mäter den totala samt den diffusa delen av solinstrålningen inom våglängdsområdet 305-2800 nm.



Figur 4 Väderstation VAISALA Milos 500. Den vita tuben mitt i bilden är en kommunikationsantenn som används för trådlös överföring av alla väderdata till datainsamlingsdatorn. Till vänster i bilden ses ett antal solinstrålningssensorer.

Data loggas varje minut och sparas på ASCII-format. Generellt rådde typiskt svenskt höstväder under hela mätperioden (2010-10-19 till 2010-10-29) med temperaturen liggande runt 0 grader dock utan nederbörd. Figur 5 visar uppmätt lufttemperatur, direkt solinstrålning, vindhastighet och termisk himmelsinstrålning för dygnet 2010-10-21.



Figur 5 Uppmätt väderdata för dygnet 2010-10-21: (a) lufttemperatur, (b) luftfuktighet, (c) vindhastighet och (d) total himmelsinstrålning (direkt + diffus) i 3,5 – 30 μm området.

3.2 Mätningar av ytemperatur och radians hos CUBI

För att mäta (den emitterade) radiansen på CUBI så användes Agema Thermovision System 900. Detta system består av två skannande värmekameror, Agema 900SW och Agema 900LW, se Figur 6, och en datainsamlingsenhet Agema 900 system controller. Agema 900SW mäter inom 2,8-5,0 μm och Agema 900LW mäter inom 7,5-14 μm . Det emitterade våglängdsspektrumet från solen i kombination med atmosfärens transmissionsegenskaper visar att det finns våglängder inom området 2,8 – 3,4 μm som ”när” ner till jordytan, se referens [Zissis 1993]. Dessa våglängder kan i sin tur reflekteras mot t ex CUBI-ytorna och mätas in med SW-kameran. Man får därav en komponent i radiansbilderna som härrör från direkt- och/eller reflekterad strålning från solen. För att förhindra detta och så lång som möjligt mäta den emitterade radiansen från CUBI, använder vi ett bandpass filter på Agema 900SW-kameran. Filtret släpper igenom våglängder i området 3,4 – 5,0 μm . Bildstorleken för dessa kameror är 272x136 pixlar med ett bilddjup 12 bitar. Vid mättillfällen användes linser med 5x2,5° öppning.



Figur 6 Placering av värmekameror på taket av FOI-huset. Den vita tuben är en kommunikationsantenn som används för att ta emot väderdata från väderstationen och ytemperaturdata från CUBI.

Kamerorna är placerade på taket på FOI-byggnaden C2 och tittar ner på CUBI. Det direkta avståndet till CUBI är 45 meter och höjden från mark till kamerorna är 8,2 meter. Sett från CUBI så är kamerorna riktade 334° och CUBI 22° mot norr. Figur 7 visar fotografier tagna dels mot CUBI och väderstationen från IR-kamerornas position och dels vice versa.



Figur 7 Till vänster visas ett foto på CUBI-uppställningen sedd från värmekamerornas position. Till höger visas ett inzoomat foto av IR-kamerorna sett från CUBIn.

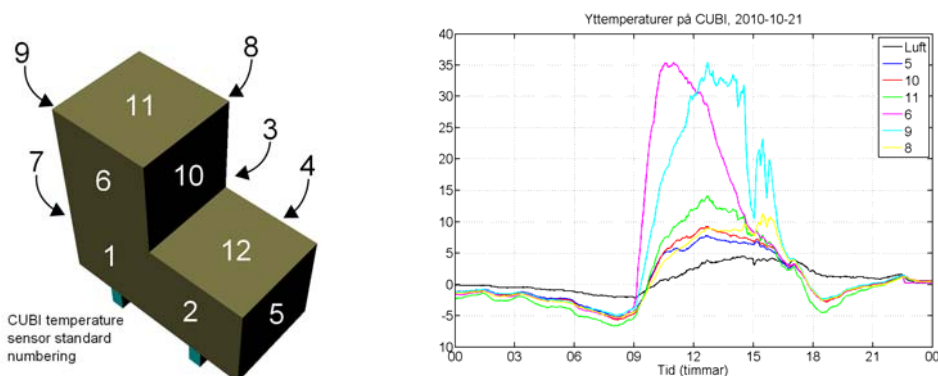
De temperaturgivare (Pt100) som är infrästa och pålimmade från insidan på CUBI loggas tillsammans med temperaturen på en svart och en vit skiva som används som referensobjekt i värmebilderna, se Figur 8. I figuren ses även en tratt som används för att ha möjlighet att kalibrera kamerabilderna i efterhand. I trattens avslutning har en temperaturgivare monterats. Temperaturen i trattavslutningen loggas varje minut. Trattan är riktad så att kamerorna tittar rakt in i trattan och ”ser” trattens avslutning. Trattan kan betraktas som en ”svart kropp” och därmed användas för att kalibrera kamerabilderna.



Figur 8 En närbild av CUBI med de två referensplattorna liggande till höger. CUBI är placerad på två klossar av isoleringsmaterial (typen frigolit). Trattan till vänster om CUBI används som kalibreringsobjekt. En temperaturgivare är monterad i trattens avslutning och läses av varje minut. Trattan är riktad mot kamerorna så att kamerorna ”ser” trattens avslutning.

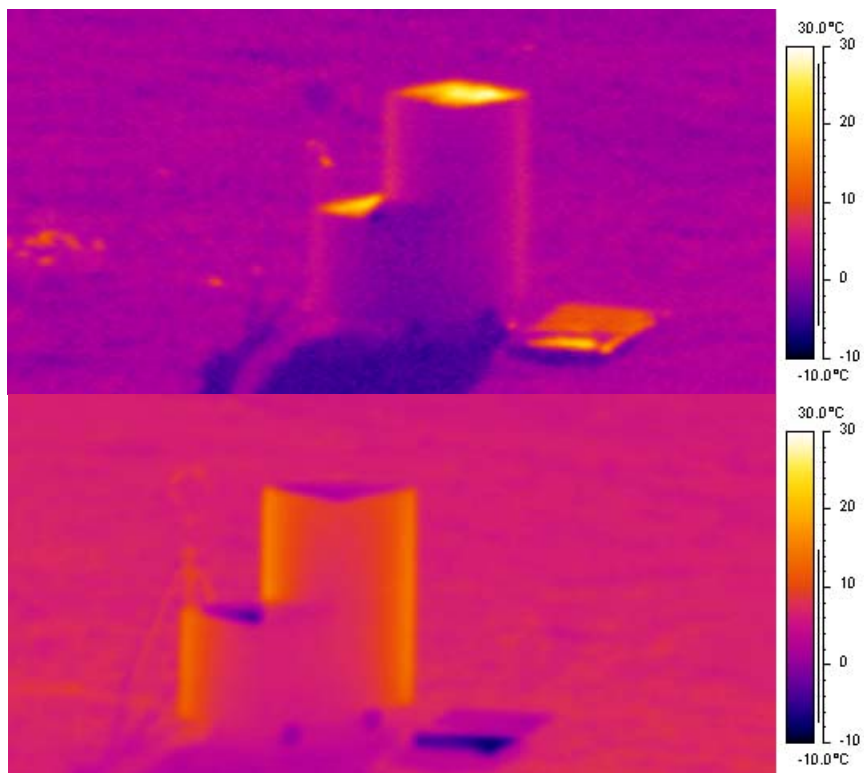
Ytemperaturgivarna är placerade på varje kvadratisk metall platta som CUBI består av, dvs totalt 12 st. En mer detaljerad beskrivning på färgegenskaper samt CUBI konstruktionen finns att läsa i referenserna [Fagerström 2009] [CUBI Forum]. Nytt till denna mätning var dock att ett värmeelement (60 Watt) samt två temperaturgivare placerades inne i CUBI. Den ena temperaturgivaren placerades i centrum av topp ”kuben” och den andra i centrum av nedre ”kuben” som vetter mot kameran i Figur 7. Värmeelementet monterades på bottenplattan inne i CUBI. Inga övriga förändringar eller modifikationer gjordes. Under den första delen av mätperioden var värmeelementet avslaget medan det i den senare delen var påslaget.

Figur 9 visar några exempel på hur yttemperaturen på några av CUBI-ytorna varierar under ett dygn.



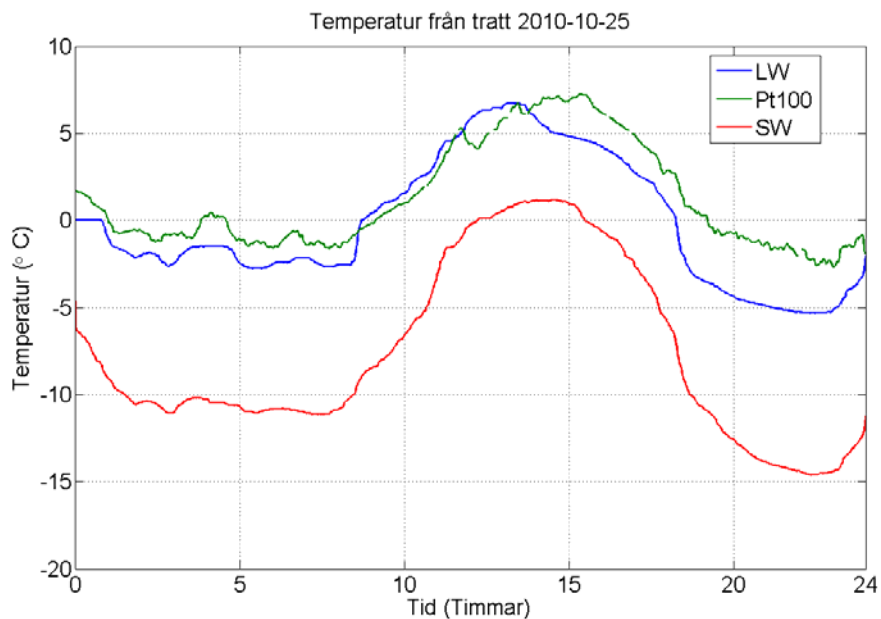
Figur 9. Till vänster visas var temperaturgivarna sitter på CUBI. Till höger visas yttemperaturerna som funktion av tiden på CUBI under ett dygn (2010-10-21). Värmeelementet var för detta dygn avslaget. Den svarta linjen visar lufttemperaturen från väderstationen.

Figur 10 visar två okalibrerade radiansbilder vid 2,8-5,0 μm respektive 7,5-14 μm . Bilderna visar den okalibrerade skenbara temperaturen av CUBI ytorna. Bilderna är tagna kl 12:00 den 21 oktober 2010. För att erhålla kalibrerade skenbara temperaturbilder används temperatur informationen som är uppmätt vid trattens avslutning med en temperaturgivare (PT100 element) samt pixeltemperaturen vid trattavslutningen i radiansbilderna från respektive kamera. Genom att anta att tratten har en emissionsfaktor som är nära 1, dvs nära svartkropp, kan bildtemperaturerna justeras mot absoluttemperaturen vid trattens avslutning. Denna kalibrering utförs och beskrivs i nästa kapitel. Figurerna 11-13 visar ett diagram hur pixeltemperaturerna vid trattavslutningen från respektive kamera förhåller sig till absoluttemperaturen vid samma position.

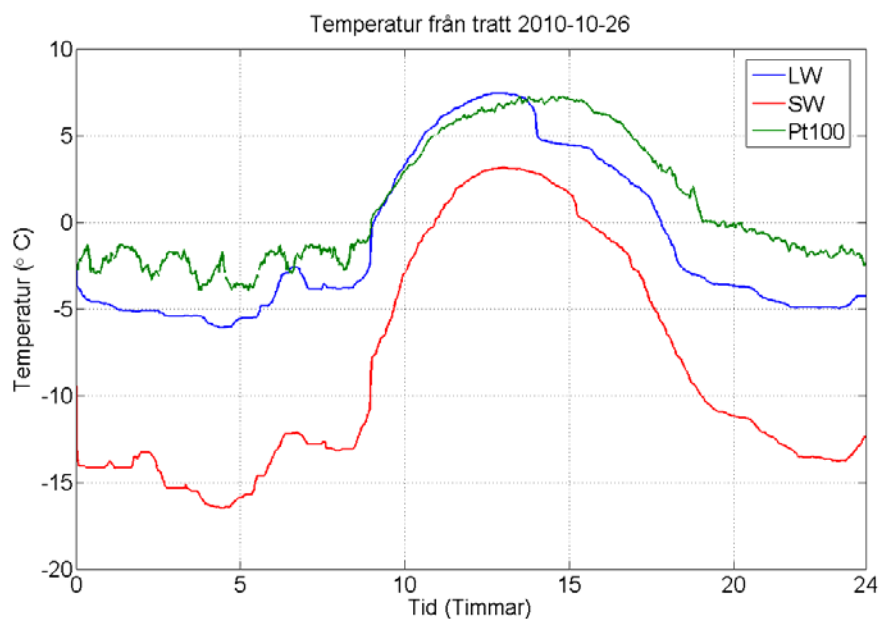


Figur 10 Radiansbilder tagna vid samma tidpunkt, dvs 2010-10-21 kl 12:00. Övre bilden är tagen med Agema 900SW (2,8-5,0 μm) och den undre med Agema 900LW (7,5-14 μm). Bilderna visar okalibrerade och skenbara temperaturer. I bilderna ses CUBI, de två referensplattorna samt kalibreringstratten med stativ, se Figur 8.

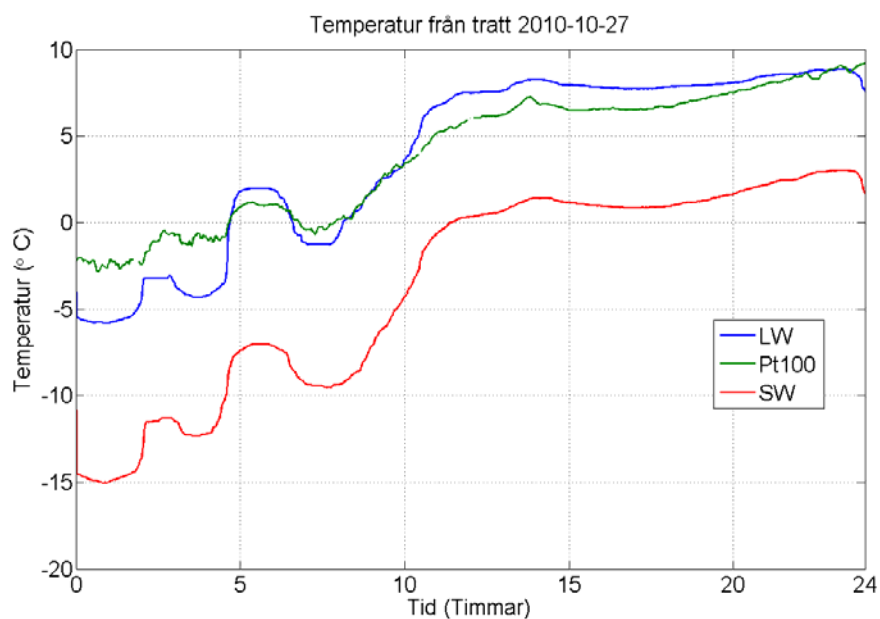
Temperaturerna från de pixlar som täcker svartkroppstratten, dvs 3*3 st, i de okalibrerade IR-bilderna från dygnet 25-27 oktober 2010 visas i Figur 11-13. De är framräknade med hjälp av kalibreringsfunktionen (1).



Figur 11 Temperatur från trätt för dygnet 2010-10-25



Figur 12 Temperatur från trätt för dygnet 2010-10-26.



Figur 13 Temperatur från trätt för dygnet 2010-10-27.

3.2.1 Systemkorrigeringar och kalibrering av AGEMA-systemet

De systemkorrigeringar och kalibreringar som utförs i Thermovision 900:s infraröda skanners innefattar [Nelson 1999]:

1. Korrigering för självemission från kamerorna.
2. Linjärisering av detektorsignalen
3. Korrigering för objektemissiviteten och atmosfärsabsorptionen
4. Beräkning av temperatur

Korrigerig för självemission, är gjord i kamerorna och parametrar för denna korrigerig är fabrikssatta.

Korrigerig för olinjäritet i detektorresponsen görs internt i systemet genom att använda en fabrikssatt korrigeringsfunktion.

Systemet har också möjlighet att korrigera för objektemissivitet och atmosfärsabsorption. Denna funktion användes dock inte vid detta tillfälle.

För att omvandla uppmätt strålningsintensitet, som här kallas gråskalenivå, till objekttemperatur, T , har Agema-systemet en inbyggd transformeringsfunktion. Vid fabrikskalibrering mäts ett antal svartkroppskällor med olika temperaturer av skannern. Ett kurvanpassningsprogram används för att räkna ut konstanterna R , B och F som passar bäst för den matematiska funktionen som beskriver relationen mellan gråskalenivån (som sensorn mäter) och temperaturen, se ekvation (1). Funktionen som används av Agema är:

$$T = B / (\ln((R/X) + F)) \quad (1)$$

där

T = Objekttemperatur (K)

X = Gråskalevärde i IR-bilden

R = Responsfaktor

B = Spektral faktor

F = Shapefaktor

Funktionen uttrycker den icke linjära relationen mellan svartkroppstemperaturen och utsignalen från skannern. Konstanterna (R , B , F) för dessa funktioner är fabrikssatta och lagras i skannern och systemet väljer automatiskt de rätta konstanterna för den aktuella kombinationen av vilka linser, filter och temperaturintervall som används.

3.2.2 Extern kalibrering i Matlab

För att transformeringsfunktionen, se ekvation (1), i AGEMA-systemet ska gälla krävs att systemet fabrikskalibreras med jämna mellanrum. Tyvärr har detta inte utförts på senare tid varför vi har valt att utföra en externkalibrering (tilläggskalibrering) genom att mäta på en tratt med temperaturgivare i trattens avslutning, se Figur 8. Den externa kalibreringen utgår från ekvation (1) och går ut på att ta fram ett beräknat värde på gråskalevärdet X utifrån den uppmätta temperaturen i trattens avslutning. Därefter tas kvoten mellan det beräknade X -värdet och det uppmätta X -värdet från kamerorna i tratten. Det uppmätta gråskalevärdet har tagits fram genom att ta ett medelvärde av 3*3 pixlar som täcker trattmynningen i bilderna. Kvotvärdet multipliceras sedan till alla pixlar i bilden. Ekvationerna (2) – (4) sammanfattar den externa kalibreringsprocessen.

$$X_{Pt100} = R e^{(F - B/T_{Pt100})} \quad (2)$$

$$P = X_{Pt100} / X_{tratt \text{ uppmätt}} \quad (3)$$

$$X_{ny \text{ helbild}} = P X_{gammal \text{ helbild}} \quad (4)$$

där R, B och F är de fabriksatta parametrarna som beskrivs ovan, T_{PT100} är temperaturen vid trattavslutningen och där X är gråskalevärdet. Denna kalibrering utförs för varje minut.

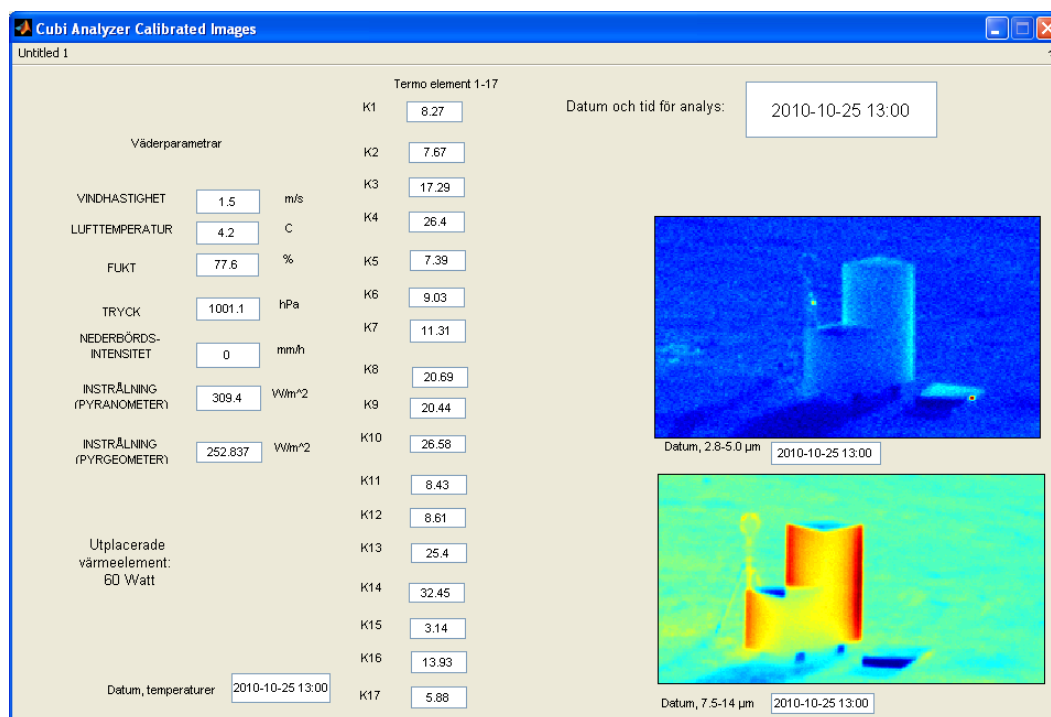
3.2.3 Kalibreringsverktyg och visualiseringsverktyg, kortfattad manual

För att få fram gråskalevärdena ($X_{\text{tratt uppmätt}}$) till kalibreringsfunktionen för de pixlar (3×3 st) som täcker kalibreringstratten från IR-bilderna används en funktion som heter Grayscale_values_PT100. Som indata behövs en ursprunglig .SEQ-fil för det aktuella dygnet från skannern och utdata blir en vektor med gråskalevärden.

För att göra en vektor med kalibreringskonstanter (P) och få ut de kalibrerade IR-bilderna utvecklades funktionen Calibrated_intensity_images_SW_dygn_2 för de kortvågiga bilderna och Calibrated_intensity_images_LW_dygn_2 för de långvågiga bilderna. Som indata till dessa funktioner behövs vektorn med gråskalevärden från tratten, en vektor med PT100-temperaturer och de okalibrerade IR-bilderna. Som utdata fås de kalibrerade bilderna samt en kalibreringskonstant för varje tidpunkt. En kalibreringskonstant för tidpunkt t multipliceras över varje IR-bild för samma tidpunkt t. Bilderna är tagna en gång per minut så det blir 1440 olika konstanter per dygn.

Ett nytt GUI, Cubi_Analyzer_Calibrated_images, har utvecklats, se Figur 14. Det visar väderparametrar från väderstationen för aktuell bild, alla temperaturgivare samt de kalibrerade IR-bilderna för dygnet from 25- 27/10 2010. I detta nya GUI skiljer sig inläsningen av alla ursprungsbilder från den äldre versionen av Cubi_Analyzer. Här öppnas en Matlab-fil för varje dygn med alla inlästa bilder i. Detta tar längre tid än som det var förut, men har fördelen att det blir lättare att kontrollera och hålla reda på att rätt bild visas.

Ett image tool verktyg visas också där man kan titta på pixelvärden, spara bilder mm.



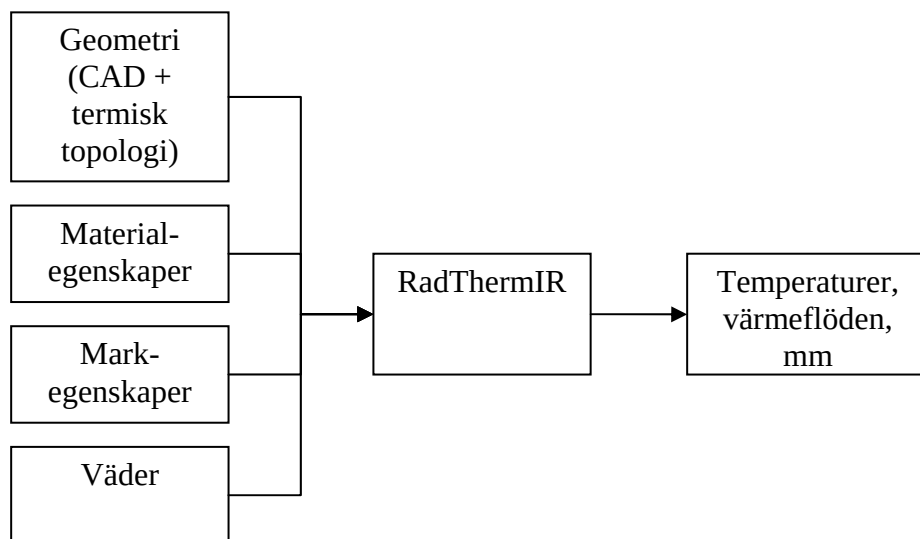
Figur 14. Det grafiska användargränssnittet Cubi_Analyzer Calibrated Images.

4 Beräkningar

Vi har analyserat de termiska egenskaperna hos CUBI med simuleringar. Genom att beräkna temperaturerna på CUBI-ytorna och temperaturen i den inneslutna luftvolymen, och jämföra med motsvarande uppmätta temperaturerna, har vi fått en detaljerad förståelse av de termiska egenskaperna hos CUBI. Syftet med analysen är att bygga upp erfarenhet om modellering och analys av de termiska egenskaperna och IR-signaturen hos objekt i naturliga miljöer. Det är också en validering av mjukvaran RadThermIR [RadThermIR 2011]. Vi har också gjort ett antal känslighetsanalyser genom att studera hur de beräknade temperaturerna påverkas av små förändringar av olika modellparametrar. Detta ger en uppfattning om vikten av olika fysikaliska parametrar för de termiska egenskaperna hos CUBI. Beräkningarna har utförts för dygnet 2010-10-21 och 2010-10-26.

4.1 RadThermIR-modell

RadThermIR [RadThermIR 2011] är en mjukvara för modellering av termiska egenskaper och IR-egenskaper. Programmet är mycket generellt och kan hantera generella CAD-geometrier, gasvolym, luftströmmar, värmekällor (som till exempel motorer), artificiella och naturliga omgivningar (via väderfiler), olika sensortyper, med mera. Beräkningarna i RadThermIR bygger på strålgångsoptik och finita differensmetoden. En detaljerad beskrivning av metoden återfinns i [RadThermIR 2011] och [RadTherm]. CUBI-modellen som vi har byggt i RadThermIR beskrivs schematiskt i Figur 15, och de olika delarna av modellen specificeras i följande avsnitt.

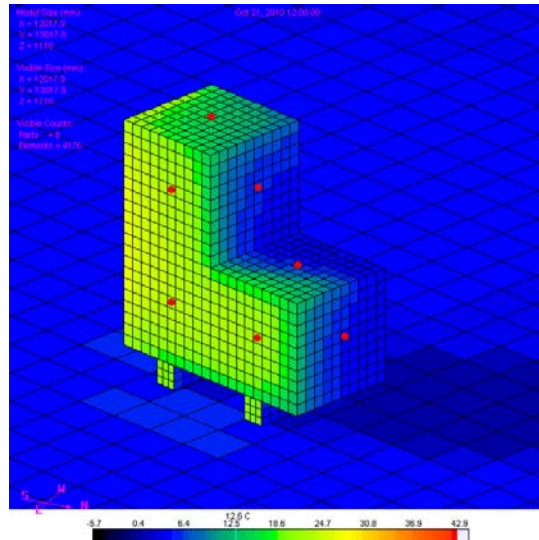


Figur 15 Schematisk beskrivning av RadThermIR-modellen av CUBI.

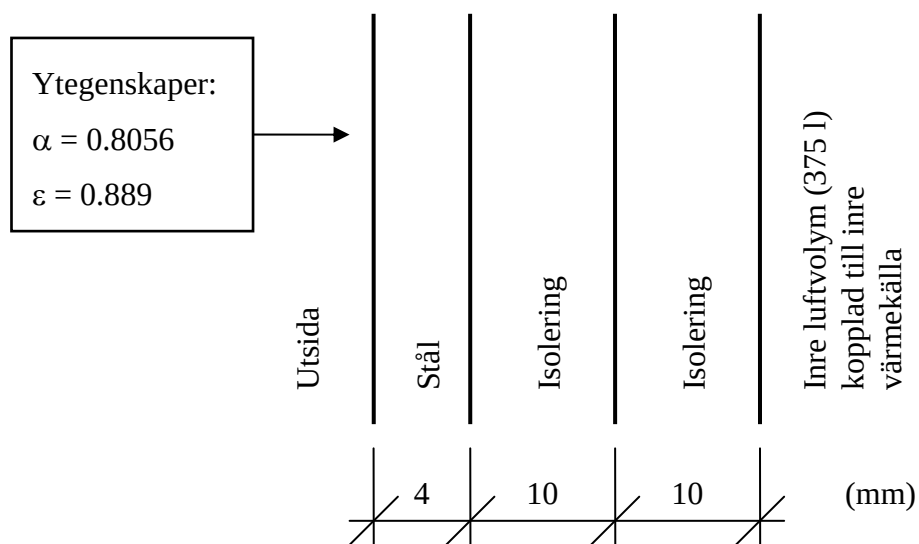
4.1.1 Geometri

Den geometriska RadThermIR-modellen av CUBI visas i Figur 16. Kantlängden på ytelementen är 5 cm på CUBI och 20 cm på markplanet. De beräknade temperaturerna är yttemperaturerna för element (markerade med röda punkter i Figur 16) vid centrum på varje kvadratisk delyta av CUBI. CUBI är placerad på två termiskt isolerande block (markisoleringsmaterial). Väggarna av CUBI är modellerade enligt Figur 17, och materialegenskaperna för de olika materialen i CUBI-modellen sammanfattas i Tabell 1. Den interna värmekällan modelleras som ett 60 W effekttillskott till den interna

luftvolymen. Värmekällan är avslagen under dygnet 2010-10-21 och påslagen under dygnet 2010-10-26.



Figur 16. Geometrisk modell av CUBI som använts i RadThermIR-simuleringarna. Färgerna motsvarar temperaturfördelningen på ytan 2010-10-21 kl 12:00. De simulerade ytemperaturerna har tagits från de element som är markerade med röda punkter (och från motsvarande element på de skydda sidorna).



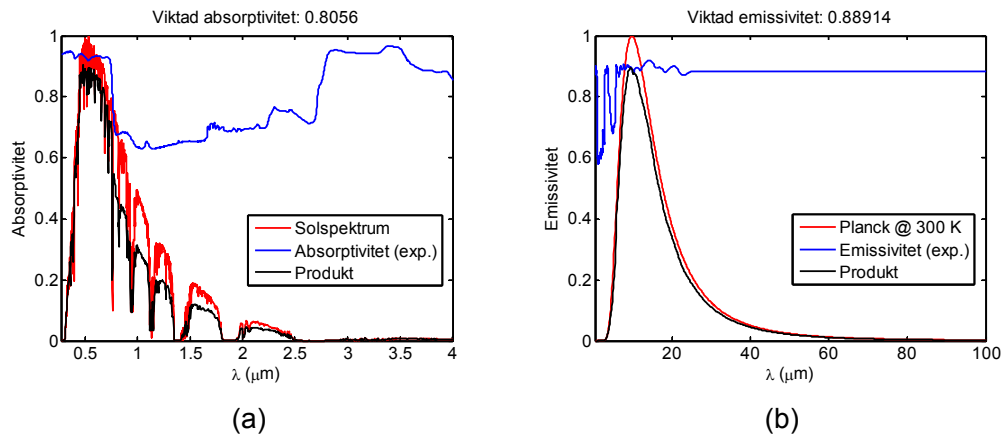
Figur 17. RadThermIR-modell av CUBI-väggarna. De simulerade temperaturerna är beräknade på utsidan av stålskalet.

4.1.2 Materialegenskaper

CUBI är uppbyggd av målad stålplåt (4 mm) med 20 mm isolering på insidan, enligt Figur 17. Material- och ytegenskaperna definieras i Tabell 1. Färgens solabsorptivitet är beräknad som medelvärdet i våglängdsbandet 0.25—4 μm , av färgens uppmätta absorptivitet viktad med ett standard solspektrum vid marken, se Figur 18. På liknande sätt är färgens termiska emissivitet beräknad som medelvärdet i våglängdsbandet 0.25—100 μm , av färgens uppmätta emissivitet viktad med spektrumet för en svartkropp vid 300 K, se Figur 18. Den uppmätta spektrala absorptiviteten och emissiviteten är framtagna ur uppmätt DHR ("directional hemispherical reflectivity") för färgytan [Fagerström et al. 2009].

Tabell 1. Material- och ytegenskaper för CUBI-modellen i RadThermIR.

Material	Densitet (kg/m ³)	Specifik värmekapacitet (J/kg K)	Värme-konduktivitet (W/m K)
Stål	7850	480	58
Isolering	25	2450	0.036
Yta	Sol-absorptivitet	Termisk emissivitet	
CUBI-färg	0.8056	0.889	



Figur 18. (a) Solabsorptivitet och (b) termisk emissivitet för CUBI-färgen. Se diskussion i texten.

4.1.3 Markegenskaper

Egenskaperna för markplanet, och den allmänna bakgrunden, modelleras internt i RadThermIR utifrån ett antal parametrar, se Tabell 2.

Tabell 2. Parametrar för markmodellen i RadThermIR.

Parameter i RadThermIR	Parametervärde	Förklaring
Type	Foliage	Övergripande bakgrundstyp
Foliage Type	Grass, Short	Bladtyp
Growth Factor	Growing	Växande gräs
Solar Absorptivity	Modelled	Markytans absorptivitet
Cover Factor	Intermediate	Medelgod marktäckning av gräs
Core Temperature (°C)	0.9	Temperatur på djupet i markmodellen
Surface Moisture	Default	Normal ytfukt
Bulk Moisture	Default	Normal markfukt
Surface Condition	CUBI.ground2010	Yta med Termisk emissivitet 0.9

4.1.4 Väder

Vädret specificerade i en RadThermIR ”extended weather format” (XWA) fil. Följande väderdata angavs i filen: Datum, tid, vindhastighet, vindriktning, lufttemperatur, relativ luftfuktighet, lufttryck, total (direkt + diffus) solinstrålning (irradians på horisontell yta), diffus solinstrålning, effektiv himmelstemperatur, molntäcke, nederbördsmängd, regntemperatur. Alla parametrar utom regntemperaturen och den effektiva himmelstemperaturen mättes med Vaisala väderstationen och DeltaT SPN1 solinstrålningssensorn (se avsnitt 3). Regntemperaturen sattes lika med lufttemperaturen. Eftersom det endast är lite nederbörd de sista timmarna av dygnet 2010-10-21, så påverkar inte detta simuleringarna nämnvärt. Den effektiva himmelstemperaturen T_{eff} beräknas utifrån den uppmätta långvågiga himmelsstrålningen. En svartkropp med temperaturen T_{eff} emitterar samma totala intensitet som den faktiska totala, bredbandiga (0.1—100 μm) intensiteten för himmelsstrålningen. Eftersom vi inte har mätt den bredbandiga himmelsstrålningen, så beräknas T_{eff} implicit med Plancks strålningslag, med hjälp av sambandet

$$I_{mät} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{kT_{eff}\lambda}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (5)$$

där $I_{mät}$ är den uppmätta långvågiga himmelsstrålningen på våglängdsbandet $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$, c är ljushastigheten i vakuum, h är Plancks konstant, k är Boltzmanns konstant och λ är våglängden. Vi har antagit våglängdsbandet 4—50 μm för sensorn för himmelsstrålning på Vaisala väderstationen när vi har beräknat T_{eff} som användes i simuleringarna.

Vinden påverkar resultatet genom konvektionen. Vi har använt ett enkelt linjärt samband (default-modellen i RadThermIR) för att beräkna konvektionskoefficienten för alla ytor:

$$h = C1 + C2 \cdot v \quad (6)$$

där h [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$] är konvektionskoefficienten, $C1 = 5.7 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ och $C2 = 3.8 \text{ W s}/\text{m}^3\text{K}$ är konstanter och v [m/s] är vindhastigheten.

4.2 Känslighetsanalys

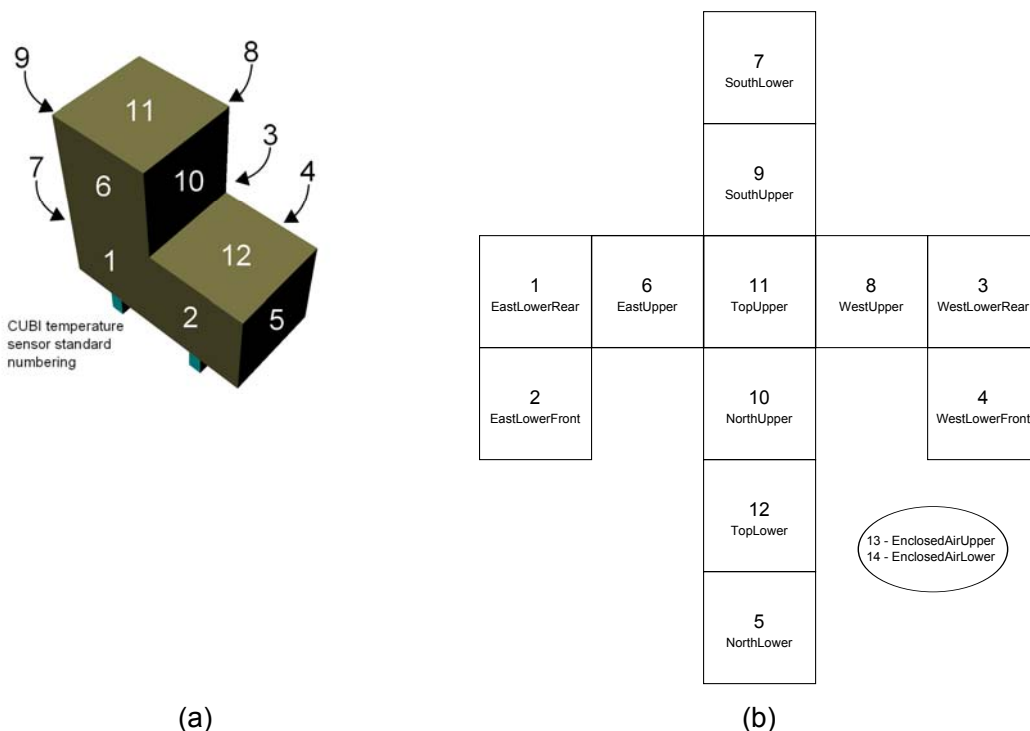
För att studera hur olika modellparametrar påverkar de beräknade temperaturerna på CUBI-modellen så har vi genomfört en känslighetsanalys för några av parametrarna. Analysen utfördes genom att studera hur en liten konstant ökning ΔX av en parameter gav upphov till en förändring ΔT hos de beräknade temperaturerna. Känsligheten hos en viss beräknad temperatur definierades sedan vid varje tidpunkt som $\Delta T/\Delta X$. De parametrar som varierades var: Färgens solabsorptivitet, färgens termiska emissivitet, plåtskalets specifika värmekapacitet, lufttemperaturen, vindhastigheten, konvektionsparametern $C2$, totala solinstrålningen, diffusa solinstrålningen, den effektiva himmelstemperaturen, effekten hos den inre värmekällan samt konvektionskoefficient. Notera att materialparametrarna är konstanta under simuleringarna, medan väderparametrarna varierar i varje tidssteg. När vi har studerat variationer hos väderparametrarna så har en liten konstant adderats till parametern vid varje tidssteg. Analysen av väderparametrarna visar alltså känsligheten för ett systematiskt fel hos väderparametrarna, medan analysen av materialparametrarna visar på känsligheten för variation av en enda parameter. Variationerna specificeras i Tabell 3.

Tabell 3. Variation av parametrar i känslighetsanalysen.

Parameter	Normalvärde	Förändring (ΔX)
Färgens solabsorptivitet	0.8056	+0.02
Färgens termiska emissivitet	0.889	+0.02
Plåtskalets specifika värmekapacitet	480 (J/kg K)	+2 J/kg K
Lufttemperaturen	—	+2 K
Vindhastigheten	—	+0.2 m/s
Konvektionsparametern $C2$	3.8 W s/ m^3 K	+0.1 W s/ m^3 K
Totala solinstrålningen	—	+2 W/ m^2
Diffusa solinstrålningen	—	+2 W/ m^2
Effektiva himmelstemperaturen	—	+2 K
Effekten hos den inre värmekällan	60 W	+1 W

5 Resultat

Vi presenterar resultaten separat för de två dygnet. För att hänvisa till de olika temperatursensorerna och de olika sidorna på CUBI använder vi sensorernas nummer samt tillhörande etiketter som talar om var ytan sitter på CUBI, och vilket väderstreck ytan var riktad mot, se Figur 19.



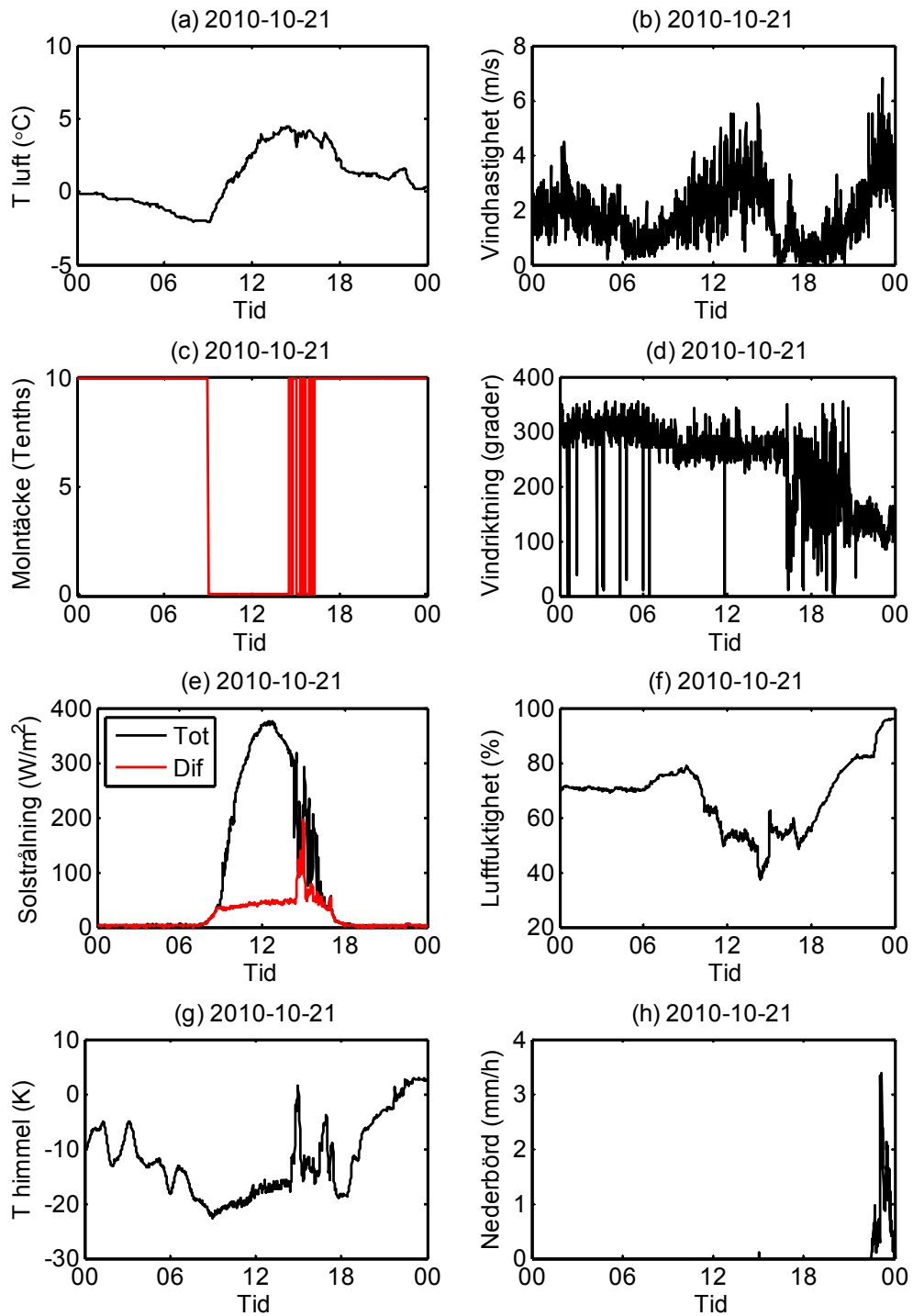
Figur 19 (a) Numrering av temperatursensorerna på CUBI. Till varje sensor/sida hör en etikett enligt figur (b).

Följande färgkodning används i samtliga grafer med resultat:

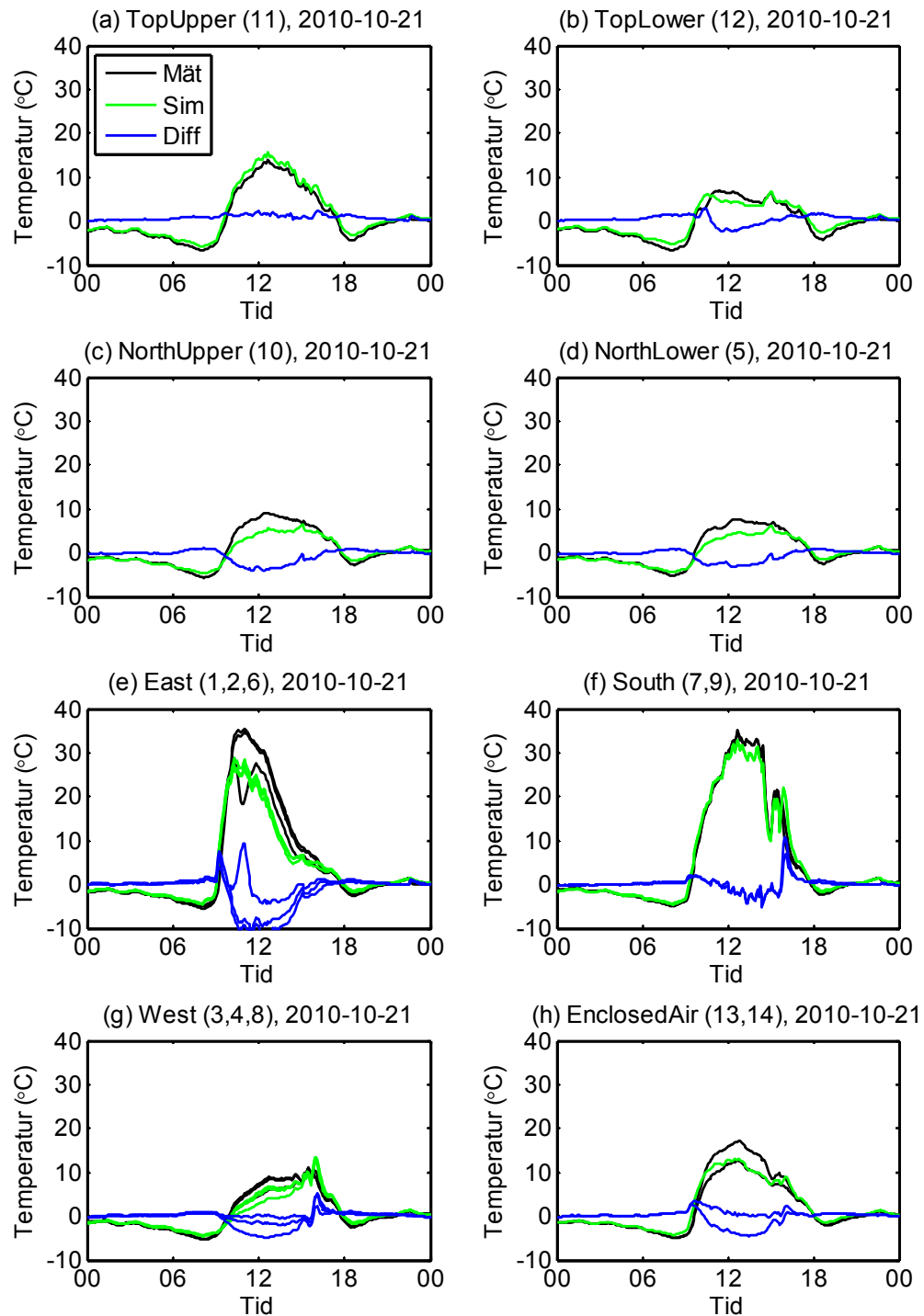
$\Delta T/\Delta X$ (känslighet)	—————
Mätningar	·····
Beräkningar	·····
Differens	—————

5.1 Dygnet 2010-10-21

Väderparametrarna för dygnet 2010-10-21 visas i Figur 20 och de simulerade temperaturerna för dygnet 2010-10-21 visas i Figur 21. Temperatursensorerna på varje hel sida (till exempel "East", "South", "West") presenteras i gemensamma grafer i Figur 21. Statistisk information om avvikelsen mellan simulerad och uppmätt temperatur, taget över hela dygnet, presenteras i Tabell 4. De statistiska mått som används är minimal och maximal temperaturavvikelse, medelvärde av temperaturavvikelsen och RMSD ("Root Mean Square Deviation", dvs roten ur medelvärde av kvadraten på temperaturavvikelsen), alla mått beräknade under varje dygn för sig.



Figur 20. Uppmätta väderdata som använts i simuleringarna för dygnet 2010-10-21.



Figur 21. Temperaturer på CUBI-ytorna för dygnet 2010-10-21: Beräknade temperaturer (gröna kurvor), uppmätta temperaturer (svarta kurvor), differensen mellan beräknade och uppmätta temperaturer (blå kurvor). Varje graf gäller en hel sida av CUBI som indikeras i rubriken för varje graf.

Tabell 4. Statistisk information om *avvikelsen* $T_{\text{sim}} - T_{\text{mät}}$ mellan de simulerade och de uppmätta temperaturerna för de två olika dygnen. RMSD står för "Root Mean Square Deviation" (kvadratroten av medelvärde av kvadraten på temperaturavvikelsen). Medelvärde och RMSD är beräknade för varje dygn för sig.

$T_{\text{sim}} - T_{\text{mät}}$	2010-10-21				2010-10-26			
Sensor	Min	Max	Medel	RMSD	Min	Max	Medel	RMSD
TopUpper (11)	0.02	2.40	0.84	1.00	0.55	9.73	3.53	3.97
TopLower (12)	-2.36	2.98	0.44	1.09	-2.70	7.55	1.30	2.51
NorthUpper (10)	-4.06	1.05	-0.56	1.53	-3.62	5.81	1.24	2.75
NorthLower (5)	-3.17	0.96	-0.47	1.25	-2.98	4.61	1.08	2.42
EastUpper (6)	-10.87	3.77	-1.42	3.86	-9.84	11.88	0.34	4.50
EastLowerFront (2)	-6.14	7.44	-0.32	2.12	-5.43	13.98	1.13	3.16
EastLowerRear (1)	-9.51	8.19	-0.91	3.31	-8.98	17.51	0.68	4.38
SouthUpper (9)	-5.14	6.67	-0.04	1.34	-3.37	12.85	2.00	3.06
SouthLower (7)	-5.13	11.12	0.23	1.74	-3.33	17.57	2.37	3.73
WestUpper (8)	-2.37	3.29	-0.08	1.04	-1.90	5.65	1.71	2.54
WestLowerFront (4)	-2.08	3.84	-0.09	1.01	-2.25	6.24	1.25	2.23
WestLowerRear (3)	-2.39	5.08	0.02	1.17	-2.07	7.79	1.74	2.63
EnclosedAirUpper (13)	-4.49	2.70	-0.39	1.63	0.95	10.09	3.51	3.85
EnclosedAirLower (14)	-0.29	3.43	0.60	0.96	-6.20	3.73	-2.81	3.21

Överensstämmelsen varierar mellan de olika sidorna på CUBI, se Figur 21. De båda toppytorna "TopUpper" och "TopLower", samt västsidan ("West") visar relativt god överensstämmelse mellan simulerade och uppmätta temperaturer. RMSD-värdet för avvikelsen för dessa sensorer ligger mellan 1.00°C och 1.17°C, se Tabell 4. Den simulerade temperaturen på den inneslutna luften stämmer också väl överens med den ena ("EnclosedAirLower") av de inre temperatursensorerna, men mindre bra med den andra ("EnclosedAirUpper"). Notera att i simuleringarna har den inre luftvolymen ingen geometri, utan simuleras enbart som en termisk nod (termiskt homogen kropp) som består av 375 liter luft i RadThermIR. Simuleringsmodellen skiljer alltså inte mellan olika delar av den inneslutna luftvolymen. Klart sämst är överensstämmelsen för de östra sensorerna ("East" i Figur 21) med RMSD-värden $>3^{\circ}\text{C}$, och stor temperaturskillnad -10.87°C . Även södra ytan ("SouthLower") har en stor temperaturskillnad $+11.12^{\circ}\text{C}$, men RMSD är betydligt lägre 1.74°C. För "SouthLower" beror den stora max-avvikelsen på mycket branta flanker hos temperaturkurvan där små tidsförskjutningar mellan den beräknade och den uppmätta temperaturen ger stora avvikelser på enskilda tidpunkter. Fallet "East" har också branta flanker, men där är avvikelsen generellt stor under lång tid även mitt på dagen, därav det högre RMSD-värdet. Det finns en stor "dip" i mätdata för sensorn "EastLowerFront". Det är en artefakt som beror på att kalibreringstratten (se avsnitt 3.2) skuggade just denna sensor, ungefär kl 11:30 varje dag.

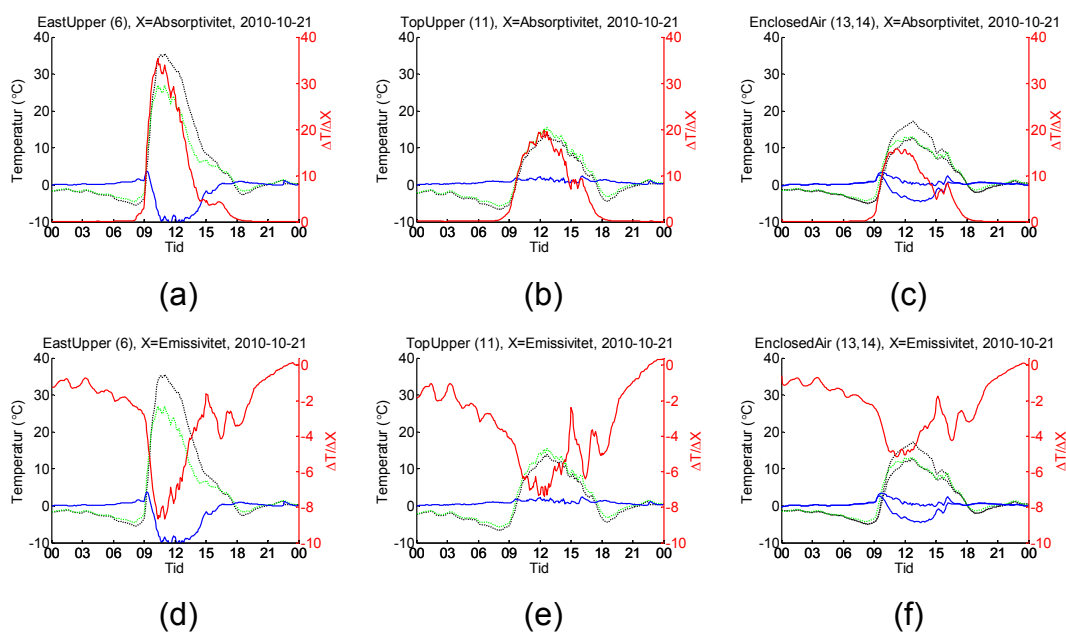
Det är oklart varför de simulerade temperaturerna skiljer så mycket från de uppmätta värdena för vissa av sidorna. Ett antagande är att det finns felaktigheter i indataparametrarna, eller att den valda markmodellen måste korrigeras.

Temperaturskillnaderna i Figur 21 antyder att simuleringarna underskattar temperaturerna särskilt när ytorna befinner sig i skugga ("TopLower", "West" på förmiddagen, "East" på eftermiddagen, "NorthUpper" och "NorthLower" hela dagen). Vi har undersökt om en

ökning av den diffusa solstrålningen eller en ökning av effektiva himmelsstrålningen förbättrar överensstämmelsen, utan att lyckas. Vi har även undersökt en alternativ markmodell, där marken modelleras som en svartkropp med en effektiv temperatur som beräknas ur den uppmätta markstrålningen. Beräkningen av den effektiva temperaturen för marken utfördes på samma sätt som beräkningen av den effektiva himmelsstrålningen. Resultaten visar att denna markmodell ger i stort sett identiska resultat som den använda interna markmodellen i RadThermIR. En modell av CUBI som utvecklats inom FOI ("PolSig", se referens [Rahm 2010]) som baseras på mätningar av CUBI utförda 2009 med samma mätutrustning och väderstation som föreliggande studie, ger mycket god överensstämmelse mellan simulerade och uppmätta ytemperaturer på CUBI. Det tyder på att väder- och temperaturdata är tillförlitliga. PolSig-modellen av CUBI baseras dock på ett delvis annat urval av väderparametrar, och använder sig av en modifierad konvektionsmodell jämfört med föreliggande studie.

En systematisk analys av modellens känslighet för flera olika parametrar har genomförts, som beskrivs i avsnitt 4.2. Känslighetsberäkningarna av alla olika parametrar, se Tabell 3, ger upphov till ett stort antal grafer (en för varje parameter, temperatursensor och dygn). Alla grafer presenteras i Appendix. Här kommenterar vi några representativa resultat.

Inverkan av färgens absorptivitet och emissivitet visas i Figur 22. Svarta streckade kurvor visar uppmätta temperaturer, gröna streckade kurvor visar beräknade temperaturer och blå kurvor visar skillnaden (felet) mellan beräknade och uppmätta temperaturer. Temperaturskalan för dessa tre kurvor finns på den vänstra y-axeln. De röda kurvorna visar känsligheten $\Delta T/\Delta X$ och avläses på högra y-axeln. Känsligheten för förändringar i exempelvis färgens absorptivitet (röda kurvor i Figur 22a—c) tolkas på följande sätt. Eftersom känsligheten är positiv ($\Delta T/\Delta X > 0$) så skulle en ökning av absorptiviteten leda till ökad temperatur på ytan av CUBI; ju högre känslighet desto större temperaturökning. Emissiviteten (se Figur 22d—f) illustrerar det omvända sambandet: känsligheten för en ökning av emissiviteten är negativ ($\Delta T/\Delta X < 0$) vilket innebär att en ökning av emissiviteten skulle leda till minskad temperatur på ytan av CUBI.

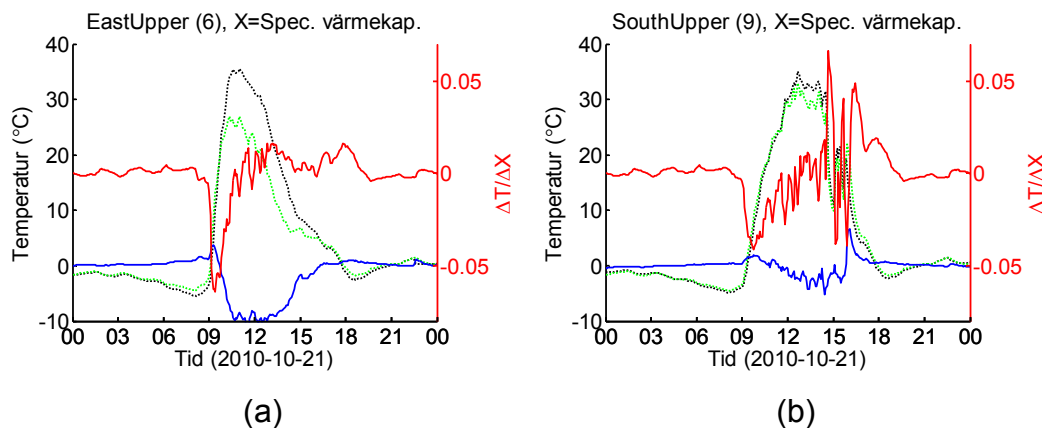


Figur 22 Temperaturens känslighet för variation av absorptivitet (a—c) respektive emissivitet (d—f) under dygnet 2010-10-21. Känsligheten representeras av den röda kurvan, med skala på den högra y-axeln. Svarta och gröna streckade kurvor visar uppmätta respektive beräknade temperaturer; blå kurvor visar felet (skillnaden mellan beräknade och uppmätta temperaturer).

Resultaten i Figur 22 är förväntade, nämligen att ökad absorptivitet (emissivitet) tenderar att öka (minska) ytornas temperatur. Absorptiviteten är direkt kopplad till intensiteten på

solinstrålningen, medan emissiviteten är kopplad till temperaturskillnaden mellan CUBI-ytorna och omgivningen och har en effekt under hela dygnet. Om man jämför med felet i de beräknade temperaturerna (blå kurvor) så verkar det inte finnas någon direkt koppling mellan känsligheten för absorptivitet eller emissivitet och storleken på felet. Temperaturen är kraftigt underskattad av beräkningarna för "EastUpper"-sensorn (Figur 22a och d), och något överskattad för "TopUpper"-sensorn (Figur 22b och e). En förändring av absorptiviteten eller emissiviteten påverkar dock temperaturen i samma riktning för båda ytorna.

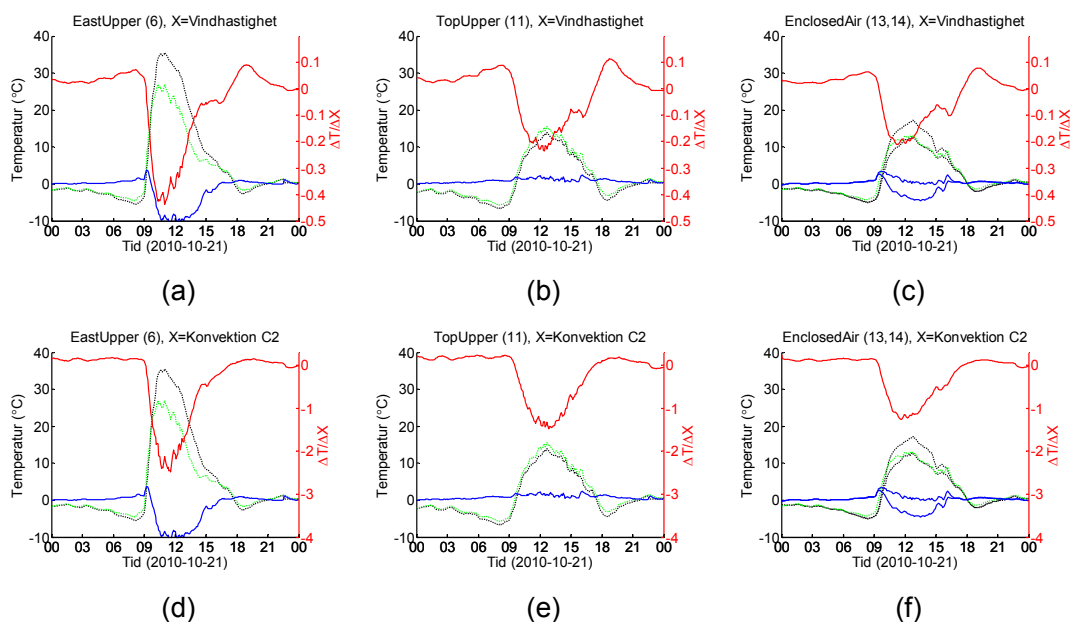
Temperaturens känslighet för variation av plåtskalets specifika värmekapacitet visas i Figur 23. Värmekapaciteten ger upphov till en tröghet i temperaturen, och har därför stor effekt då temperaturen förändras mycket. Effekten av hög värmekapacitet är att motverka temperaturförändringar, vilket syns särskilt vid de branta temperaturflankerna för "EastUpper"- och "SouthUpper"-sensorerna (Figur 23a och b).



Figur 23. Temperaturens känslighet för variation av plåtskalets specifika värmekapacitet. (a) "EastUpper"-sensorn, (b) "SouthUpper"-sensorn.

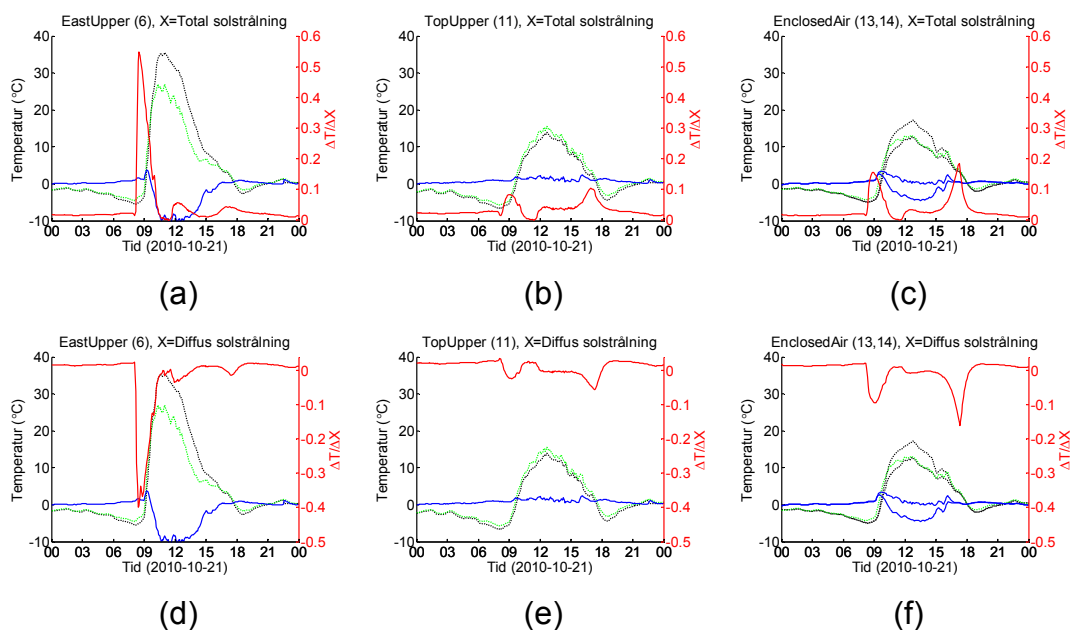
Känsligheten för lufttemperaturen är i stort sett konstant ($\Delta T/\Delta X \approx 0.8$) under dygnet, se kurvor i Appendix.

Temperaturens känslighet för förändringar av vindhastigheten illustreras i Figur 24a—c, och känsligheten för variation av konvektionsparametern $C2$ i Figur 24d—f. Vindhastigheten har en stor kylande eller värmande effekt på ytornas temperatur, och är starkt kopplad till temperaturskillnaden mellan luften och ytorna (notera att känsligheten är både positiv och negativ beroende på om lufttemperaturen är högre eller lägre än CUBI-ytornas temperatur). Konvektionsparametern $C2$ påverkar på ett liknande sätt som vindhastigheten. Konvektionsmodellen som används lyder $h = C1 + C2 \cdot v$, där h är konvektionskoefficienten för samtliga ytor i modellen, $C1 = 5.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ och $C2 = 3.8 \text{ W/s}^3 \cdot \text{K}$ är konstanter och v är vindhastigheten. Koefficienten $C2$ och vindhastigheten kommer alltså in i modellen på liknande sätt. Det finns en möjlighet att förbättra överensstämmelsen mellan beräknade och simulerade temperaturer genom att anpassa $C2$. Det finns en tendens att överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta temperaturer är bättre för de horisontella ytorna ("TopUpper" och "TopLower") än för de vertikala ytorna, se Figur 21. Det är också rimligt att konvektionen skiljer mellan horisontella och vertikala ytor. Detta skulle kunna modelleras genom att använda olika $C2$ -koefficienter i konvektionsmodellen för vertikala respektive horisontella ytor. En utveckling av detta vore att ta fram en konvektionsmodell som beror på ytornas lutning. Detta bör studeras parallellt med en mer exakt numerisk modellering av konvektionen via CFD ("Computational Fluid Dynamics").



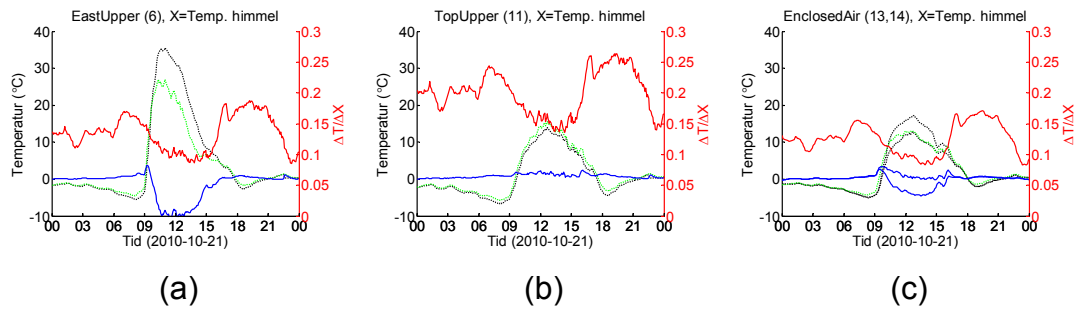
Figur 24 Temperaturens känslighet för variation av vindhastigheten (a—c) respektive konvektionsparametern C2 (d—f).

Temperaturens känslighet för förändringar av total och diffus solinstrålning illustreras i Figur 25. Känsligheten för variation av den totala solstrålningen respektive den diffusa solstrålningen är i stort sett varandras spegelbild. Det beror helt enkelt på att dessa storheter beror av varandra – förändringar i den diffusa strålningen adderas till den totala strålningen. Känsligheten för en viss yta är också starkt geometriberoende, dvs känsligheten beror på om ytan är belyst eller inte. Den beror också på ytans temperatur: känsligheten är högre då ytans temperatur är lägre. Känsligheten är lägre för den horisontella toppytan ("TopUpper", Figur 25b och e) än för den östra ytan ("East", Figur 25a och d) eftersom solstrålningen har ett flackare infall mot toppytan. Den inneslutna lufttemperaturen ("EnclosedAir", Figur 25c och f) är mest känslig då de stora sidoytorna är belysta på morgonen respektive eftermiddagen.



Figur 25 Temperaturernas känslighet för variation av totala solinstrålningen (a—c) respektive diffusa delen av solinstrålningen (d—f).

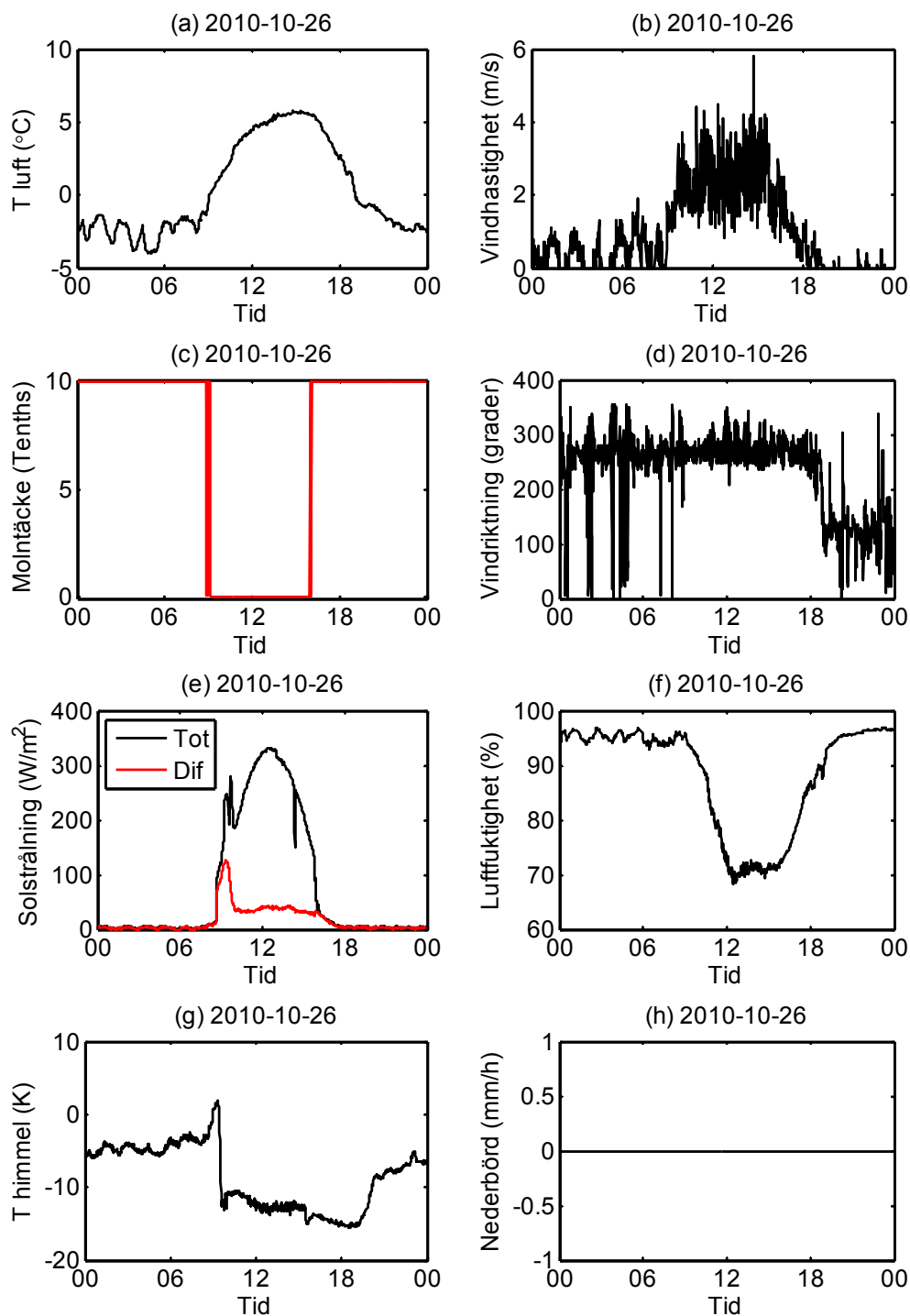
Temperaturens känslighet för förändringar av effektiv himmelstemperatur illustreras i Figur 26. Himmelstemperaturen motsvarar den långvågiga bakgrundsstrålningen och har en effekt under hela dygnet, på ett mycket likartat sätt för alla sidor. Känsligheten är något högre för de horisontella ytorna än för de vertikala och den inneslutna luften (jämför Figur 26b "TopUpper" med a "EastUpper" och c "EnclosedAir").



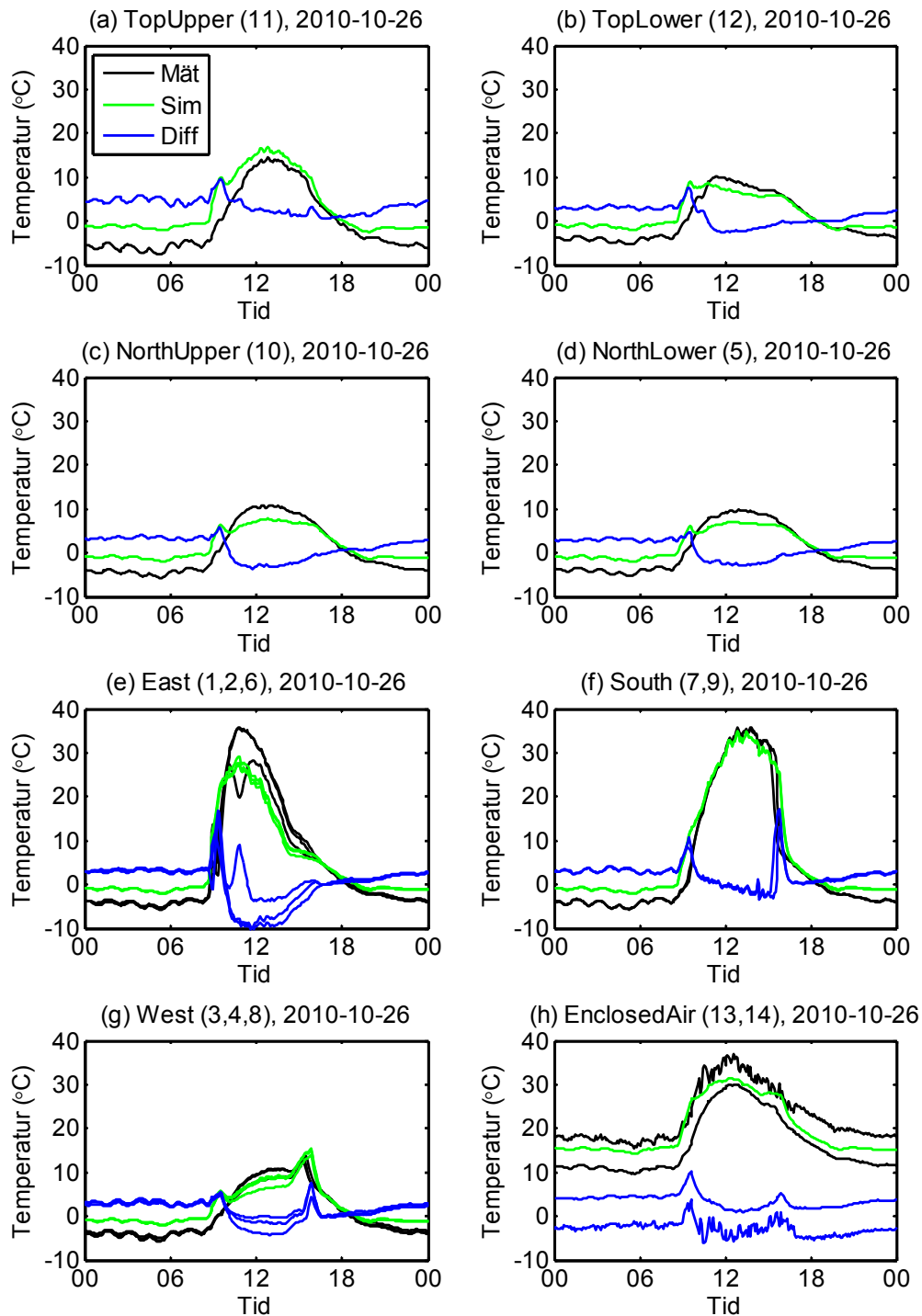
Figur 26. Temperaturernas känslighet för variation av den effektiva himmelstemperaturen.

5.2 Dygnet 2010-10-26

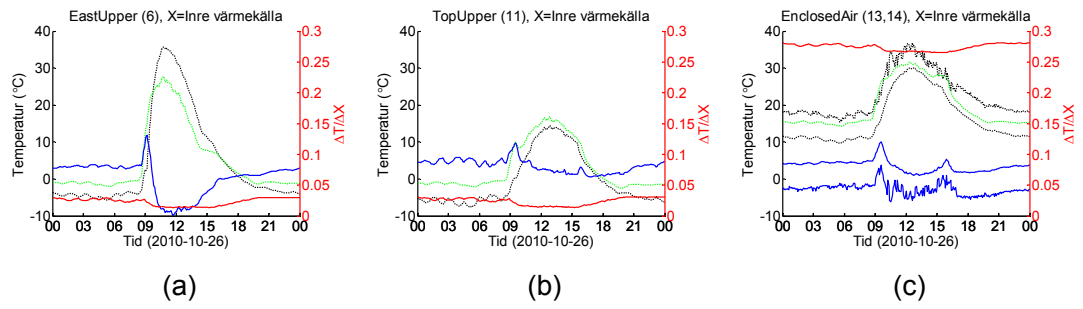
Uppmätta väderdata för dygnet 2010-10-26 visas i Figur 27. Uppmätta och beräknade temperaturer, samt felkurvor för samtliga sensorer illustreras i Figur 28. Detta dygn fanns en 60 W värmekälla inuti CUBI. De beräknade temperaturerna är genomgående för höga nattetid. För övrigt påminner temperaturkurvorna om dygnet 2010-10-21, och det gäller även känslighetskurvorna för de olika modellparametrarna (se Appendix), bortsett från den inneslutna luften. Temperaturen på den inneslutna luften ("EnclosedAir", Figur 28h) är högre på grund av den inre värmekällan. Känsligheten för variation av effekten hos den inre värmekällan illustreras i Figur 29. Känsligheten är som väntat störst för sensorn i den inneslutna luften (Figur 29c). Den felaktigt beräknade (för höga) temperaturen nattetid beror inte enbart på värmeelementet. En kontrollberäkning utan intern värmekälla visar att de beräknade temperaturerna är ca 2°C för höga även i detta fall. Det är oklart vad avvikelser beror på.



Figur 27. Uppmätta väderdata som använts i simuleringarna för dygnet 2010-10-26.



Figur 28. Temperaturer på CUBI-ytorna för dygnet 2010-10-26: Beräknade temperaturer (gröna kurvor), uppmätta temperaturer (svarta kurvor), differensen mellan beräknade och uppmätta temperaturer (blå kurvor). Varje graf gäller en hel sida av CUBI som indikeras i rubriken för varje graf.



Figur 29. Temperaturernas känslighet för variation av effekten hos den inre värmekällan, dygnet 2010-10-26.

6 Slutsatser

Vi har genomfört en noggrann termisk analys av två olika varianter av referensobjekt CUBI, med respektive utan inre värmekälla. Studier av CUBI med inre värmekälla har inte tidigare publicerats. (Liknande studier av CUBI utan värmekälla har dock gjorts tidigare, se referenserna [Bushlin 2006], [Reinov 2008], [Schwenger 2009].) Arbetet innehåller en stor mängd mätningar och beräkningar, jämförelser av beräkningar med mätningar, samt analys av beräkningsmodellens känslighet för olika modellparametrar.

Arbetet ger stor insikt i hur material-, väder- och modellparametrar påverkar resultatet av de termiska beräkningarna, och vilka parametrar som är av särskilt stor vikt. Analysen ger också en uppfattning om vilken noggrannhet man kan förvänta sig av denna typ av simuleringar.

Överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta ytemperaturer varierar för de olika ytorna på CUBI. Avvikelse beror inte på en enskild parameter utan på flera samverkande faktorer. Känsligheten för en viss parameter är ofta beroende av andra parametrar i modellen, och av geometriska faktorer (skuggade eller solbelysta ytor, till exempel).

Vi noterar att resultaten för horisontella ytor stämmer bättre med mätningar jämfört med vertikala ytor. Detta pekar på betydelsen att modellera konvektion noggrant, vilket är en egenskap som normalt varierar mellan olika delar av ett objekt. I denna studie har vi använt en enkel, linjär konvektionsmodell, samma för alla ytor. Denna bör utvecklas till att ta hänsyn till objektets geometriska form och riktning. Vi planerar att utveckla den enkla analytiska konvektionsmodellen, och även gör jämförande studier med numeriska beräkningsmetoder för konvektion.

Vi planerar också att gå vidare med denna studie och analysera de uppmätta radiansbilderna av CUBI.

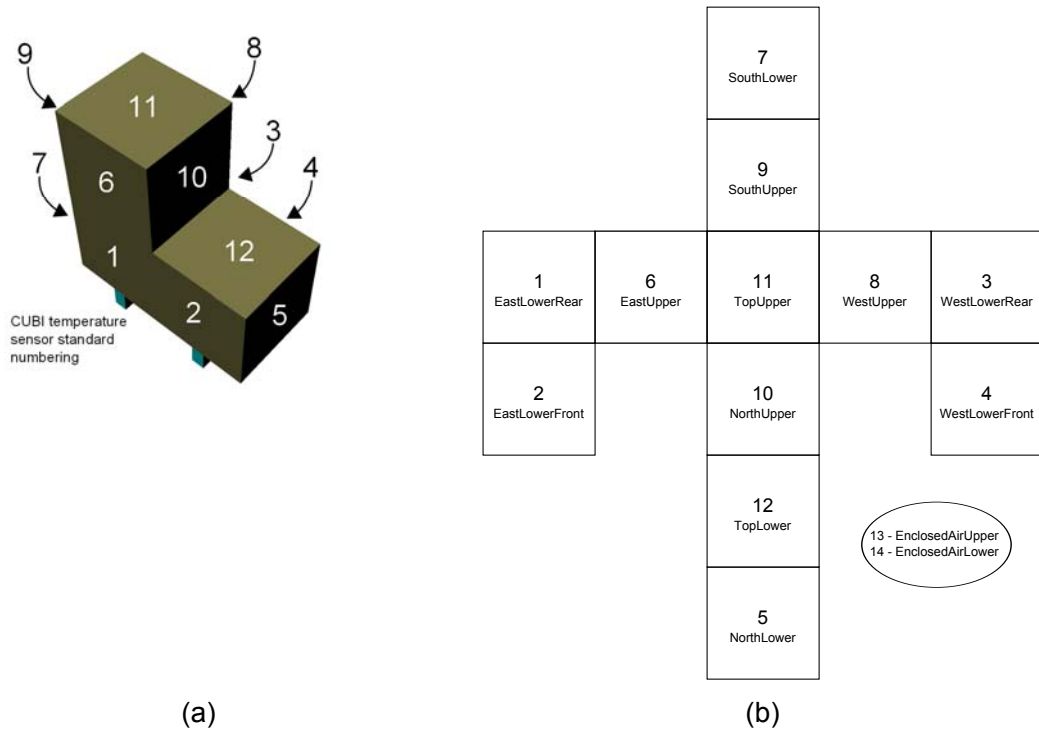
7 Referenser

- [Bushlin 2006]. Y. Bushlin, A. Lessin, A. Reinov, "Comparison of thermal modelling and experimental results of a generic model for ground vehicle", Proceedings of SPIE Vol. 6239, April 2006, Orlando , Florida, USA.
- [CUBI-forum] CUBI forum, <http://www.iard.co.il/cubi/>
- [Fagerström 2009] J. Fagerström, T. Hallberg, A. Hjelm, N. Karlsson, R. Lindell, A. Persson", IR-analys av ett generiskt markobjekt "CUBI" konstruktion, mätningar och simuleringar", FOI-R—2888—SE, 2009.
- [Malaplate 2007] A. Malaplate, P. Grossman, F Schwenger," CUBI – a testbody for thermal object model validation", Infrared imaging systems design, analysis, modelling, and testing XVIII, Proc. of SPIE Vol. 6543, 654305, 2007.
- [Nelsson 1999] Claes Nelsson and Pär Nilsson "Measurement Equipment at the Department of IR Systems, Division of Sensor Technology", FOA-R—99-01111-615—SE, 1999
- [RadTherm] RadTherm Technical Documentation, ThermoAnalytics, Inc.
- [RadThermIR 2011] "RadThermIR Version 10.1. User Manual", Manual för RadThermIR, revision 20110419, ThermoAnalytics, Inc., (2011). Web-sida: <http://www.thermoanalytics.com>
- [Rahm 2010] Jonas Rahm, Magnus Herberthson, Magnus Gustafsson, Erik Zdansky, Anders Örbom, Annica Hjelm, Jan Fagerström, Nils Karlsson, Andreas Persson, Stefan Björkert och Roland Lindell, "Slutrapport – Signaturmodellering, 2008—2010", FOI-rapport FOI-R--3117--SE, 2010.
- [Reinov 2008] A. Reinov, Y. Bushlin, A. Lessin, D. Clement, "Dew, dust and wind influencing thermal signature of objects", Proceedings of SPIE Vol. 6941, March 2008, Orlando, Florida, USA.
- [Schwenger 2009] F Schwenger, P. Grossman, A. Malaplate", Validation of the thermal code of RadThermIR, IR-Workbench and F-TOM", Infrared imaging systems design, analysis, modelling, and testing XX, Proc. of SPIE Vol. 7300, 73000J, 2009.
- [Zissis 1993] George J. Zissis *editor* "Source of Radiation", SPIE PRESS, 1993

8 Appendix

Detta appendix innehåller samtliga data som hör till känslighetsanalysen av olika parametrar i CUBI-modellerna dygnen 2010-10-21 och 2010-10-26.

Figur A1 beskriver CUBI-geometrin och temperatursensorernas placering och numrering. Till varje temperatursensor/yta hör en etikett, t ex "South" eller "WestUpper" för att hålla reda på åt vilket håll respektive CUBI-yta är riktad. Dessa förklaras också i Figur A1.

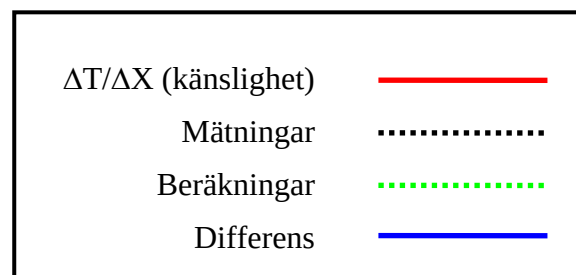


Figur A1. (a) Numrering av temperatursensorerna på CUBI. Till varje sensor/yta hör en etikett enligt figur (b).

Avsnitt 8.1 innehåller grafer som visar differenserna mellan beräknade och uppmätta temperaturer, samt de beräknade temperaturernas känslighet för variationer av några olika modell och väderparametrar.

Avsnitt 8.2, med underavsnitten innehåller motsvarande resultat för dygnet 2010-10-26.

Varje graf med fel- och känslighetsresultat innehåller fyra kurvor, med följande betydelse:



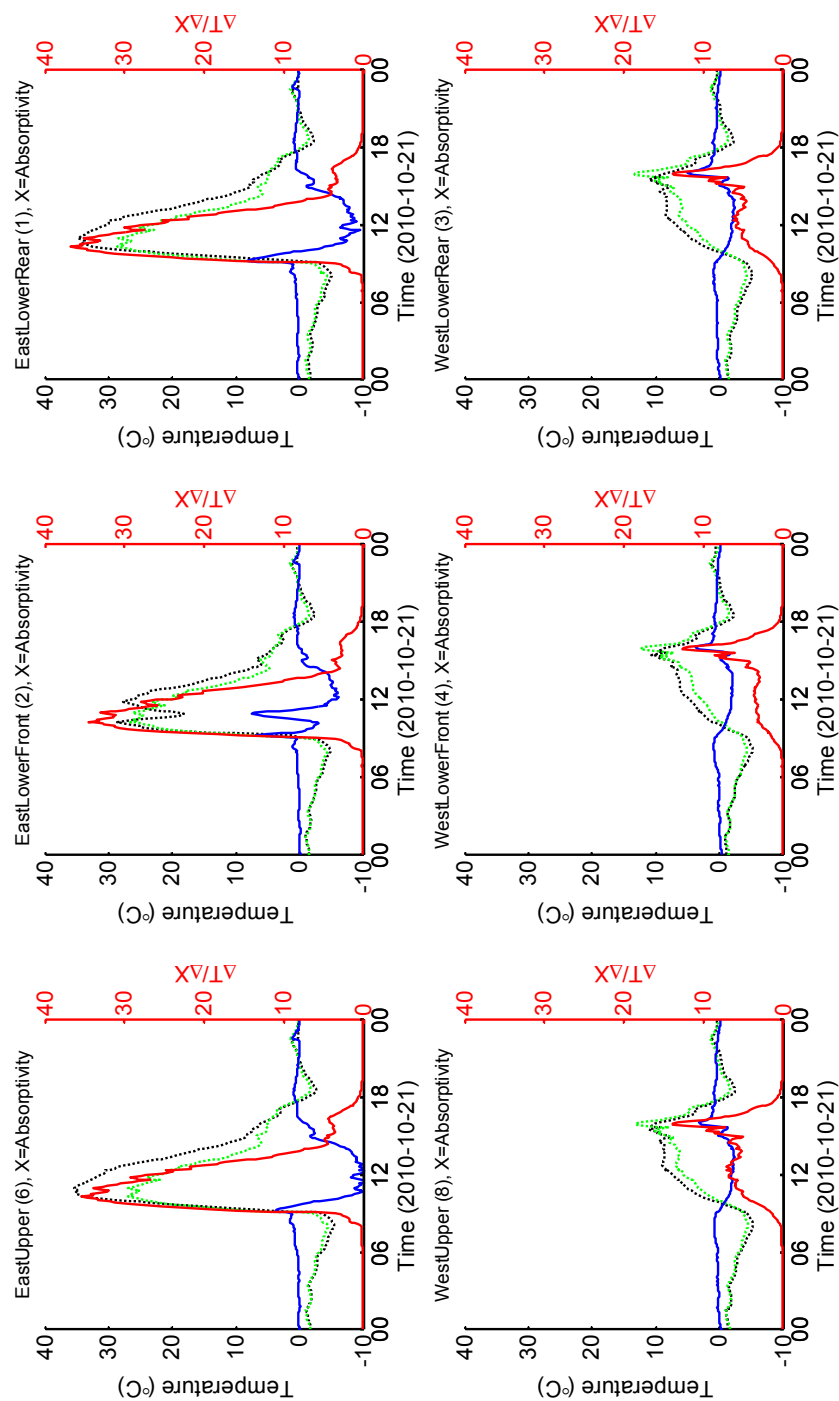
där "X" är den parameter vars känslighet undersökts. De fall som presenteras i detta Appendix sammanfattas i Tabell A1.

Tabell A1 Sammanfattning av känslighetsanalyser som presenteras i detta Appendix.

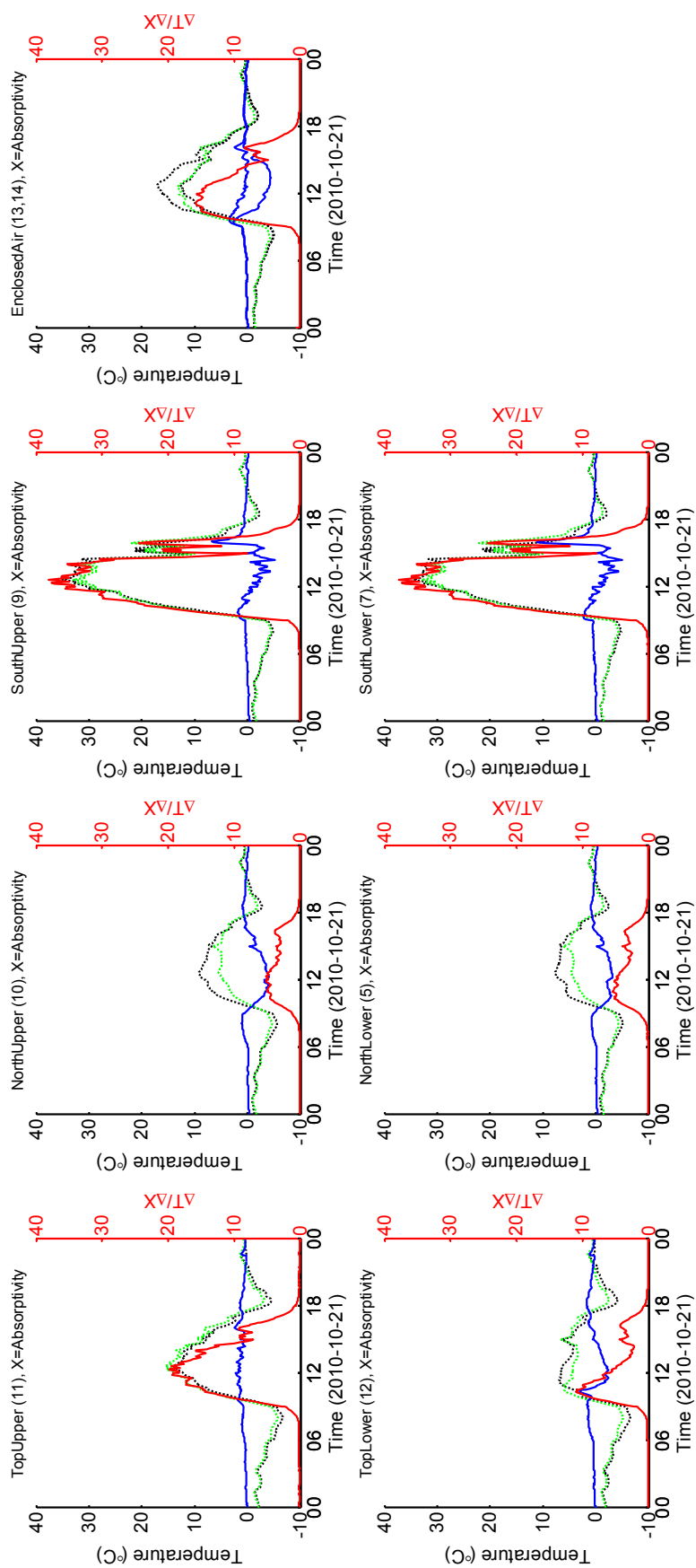
	2010-10-21		2010-10-26	
Parameter	Figur	Sida	Figur	Sida
Färgens solabsorptivitet	A2, A3	40, 41	A20, A21	58, 59
Färgens termiska emissivitet	A4, A5	42, 43	A22, A23	60, 61
Plåtskalets specifika värmekapacitet	A6, A7	44, 45	A24, A25	62, 63
Lufttemperaturen	A8, A9	46, 47	A26, A27	64, 65
Vindhastigheten	A10, A11	48, 49	A28, A29	66, 67
Konvektionsparametern C2	A12, A13	50, 51	A30, A31	68, 69
Totala solinstrålningen	A14, A15	52, 53	A32, A33	70, 71
Diffusa solinstrålningen	A16, A17	54, 55	A34, A35	72, 73
Effektiva himmelstemperaturen	A18, A19	56, 57	A36, A37	74, 75
Effekten hos den inre värmekällan	—	—	A38, A39	76, 77

Denna sida har avsiktligt lämnats tom.

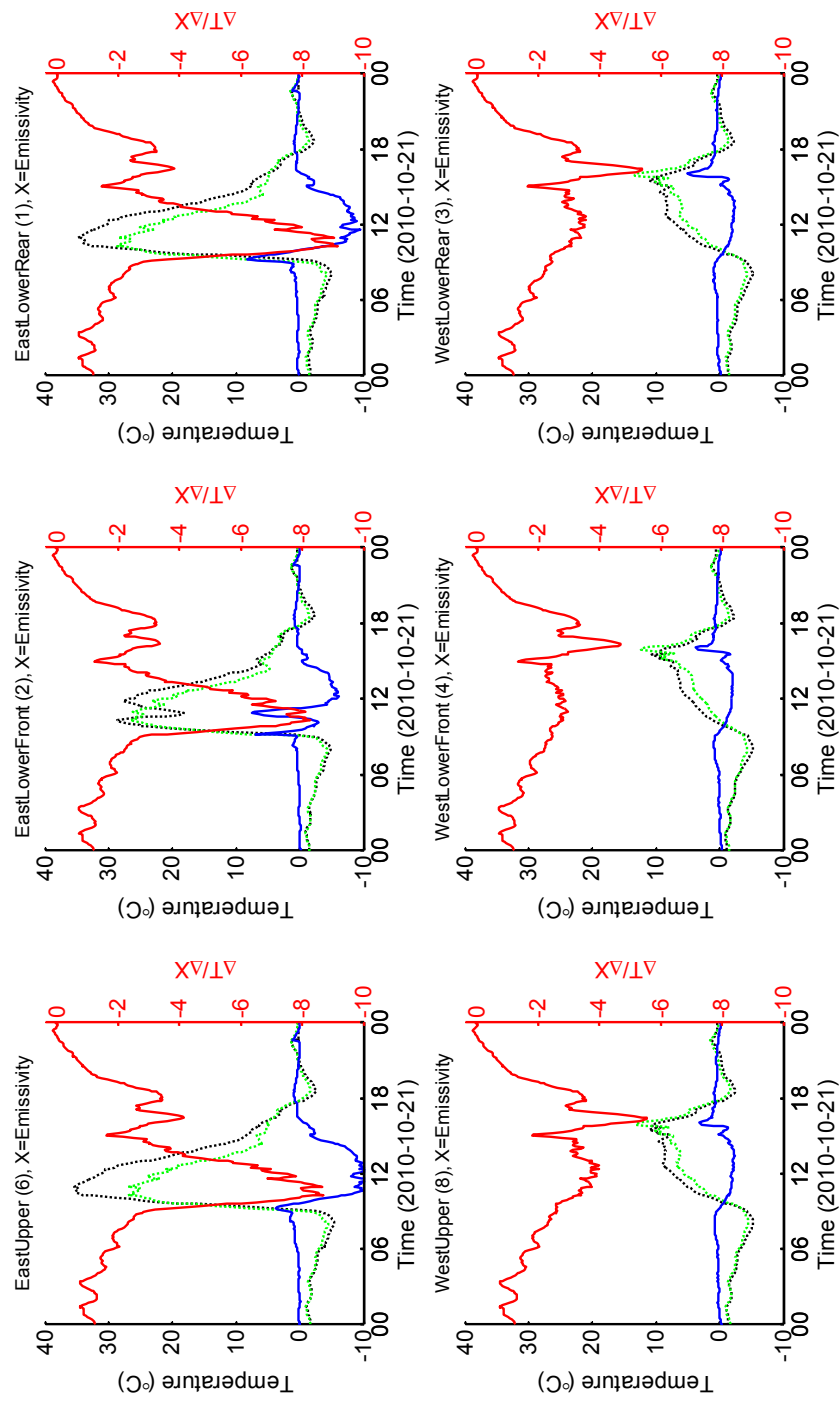
8.1 Känslighetsberäkningar för dygnet 2010-10-21



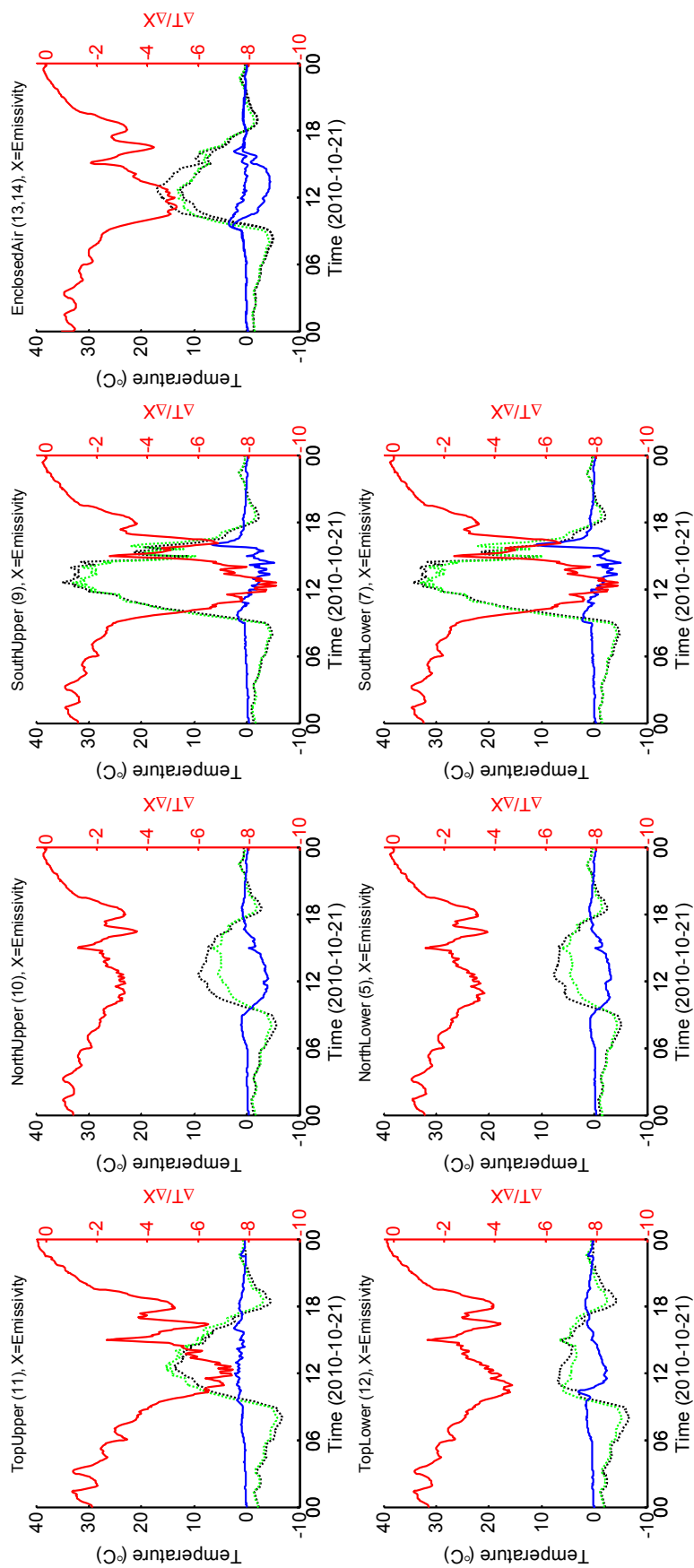
Figur A2. Känslighet för färgens absorptivitet, 2010-10-21.



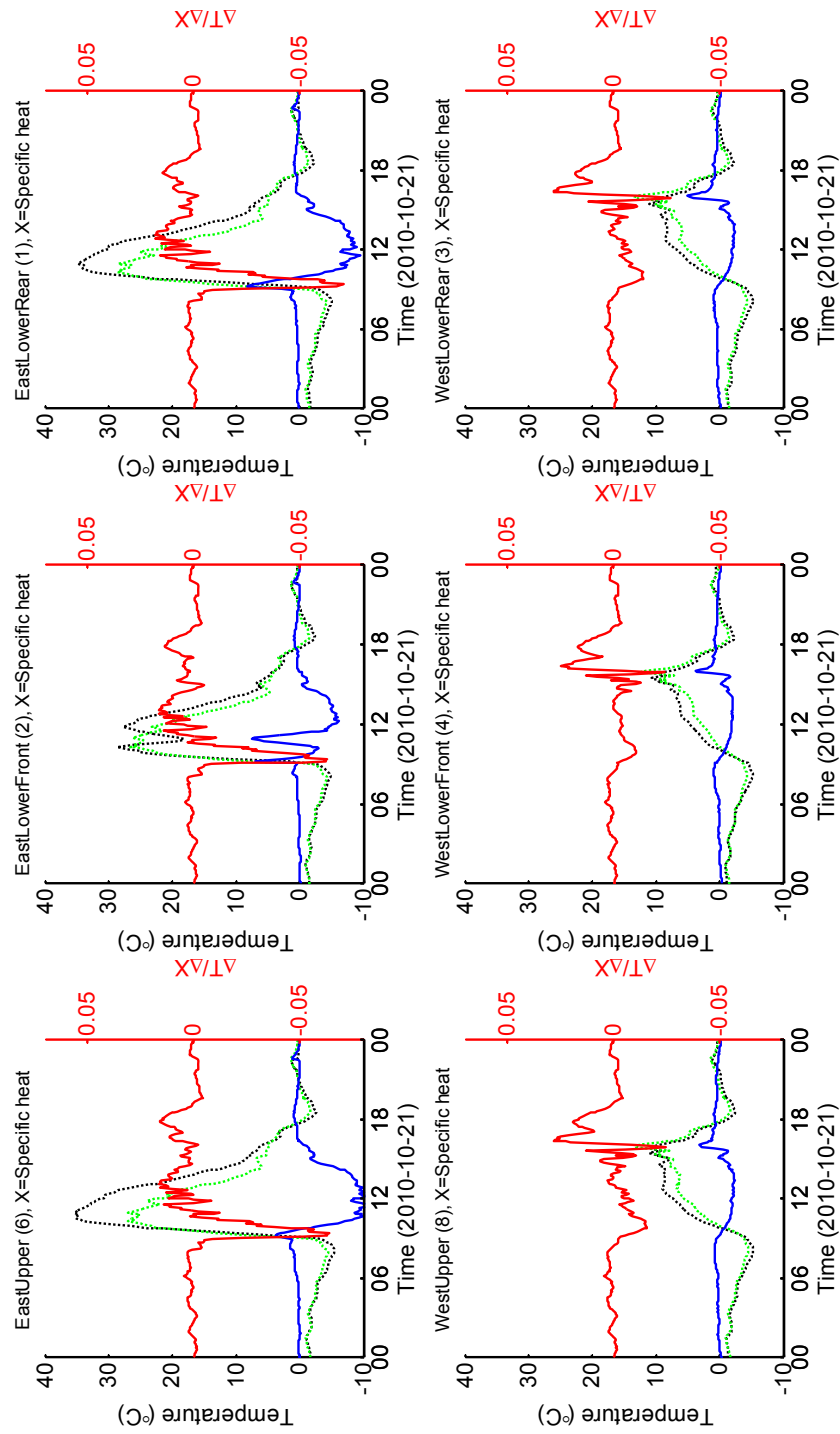
Figur A3. Känslighet för färgens absorptivitet, 2010-10-21.



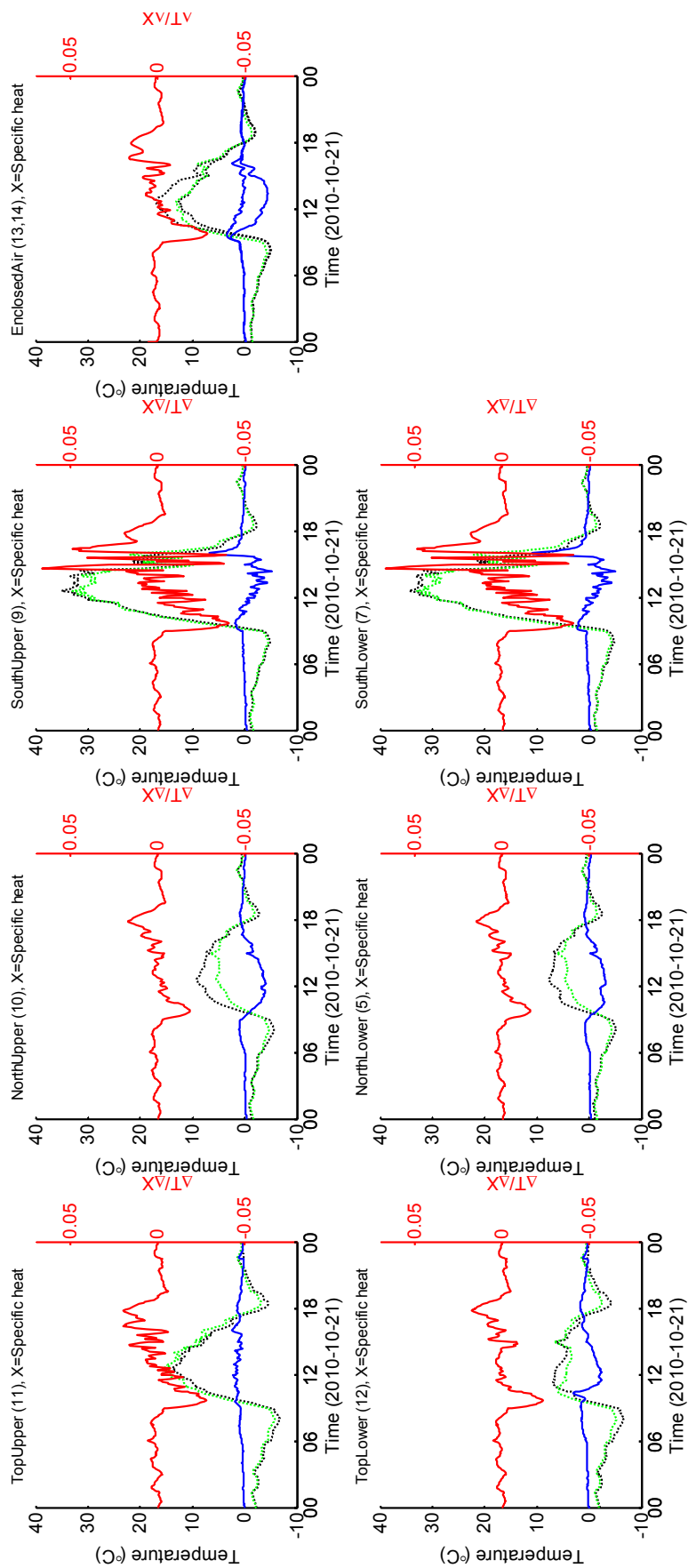
Figur A4. Känslighet för färgens emissivitet, 2010-10-21.



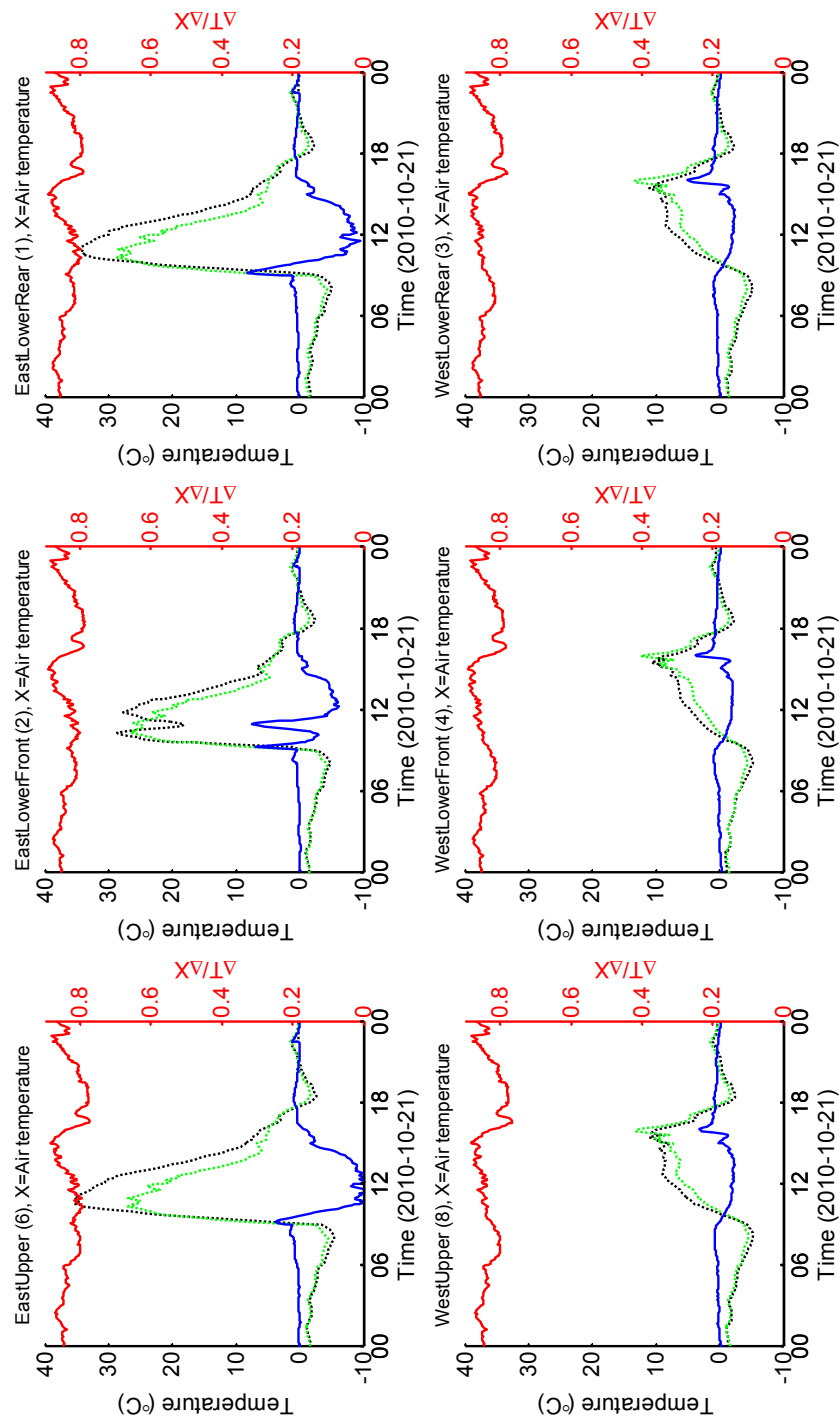
Figur A5. Känslighet för färgens emissivitet, 2010-10-21.



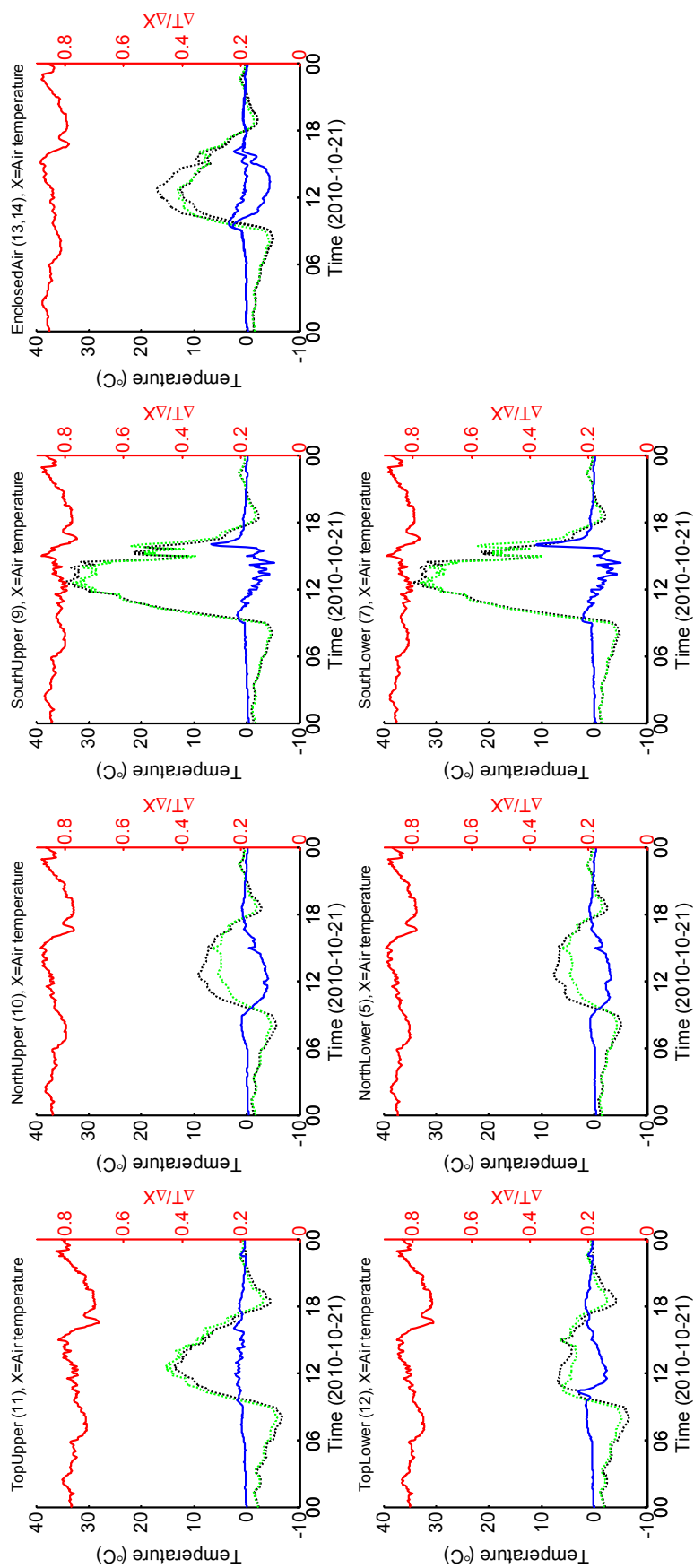
Figur A6. Känslighet för plåtskalets specifika värmekapacitet, 2010-10-21.



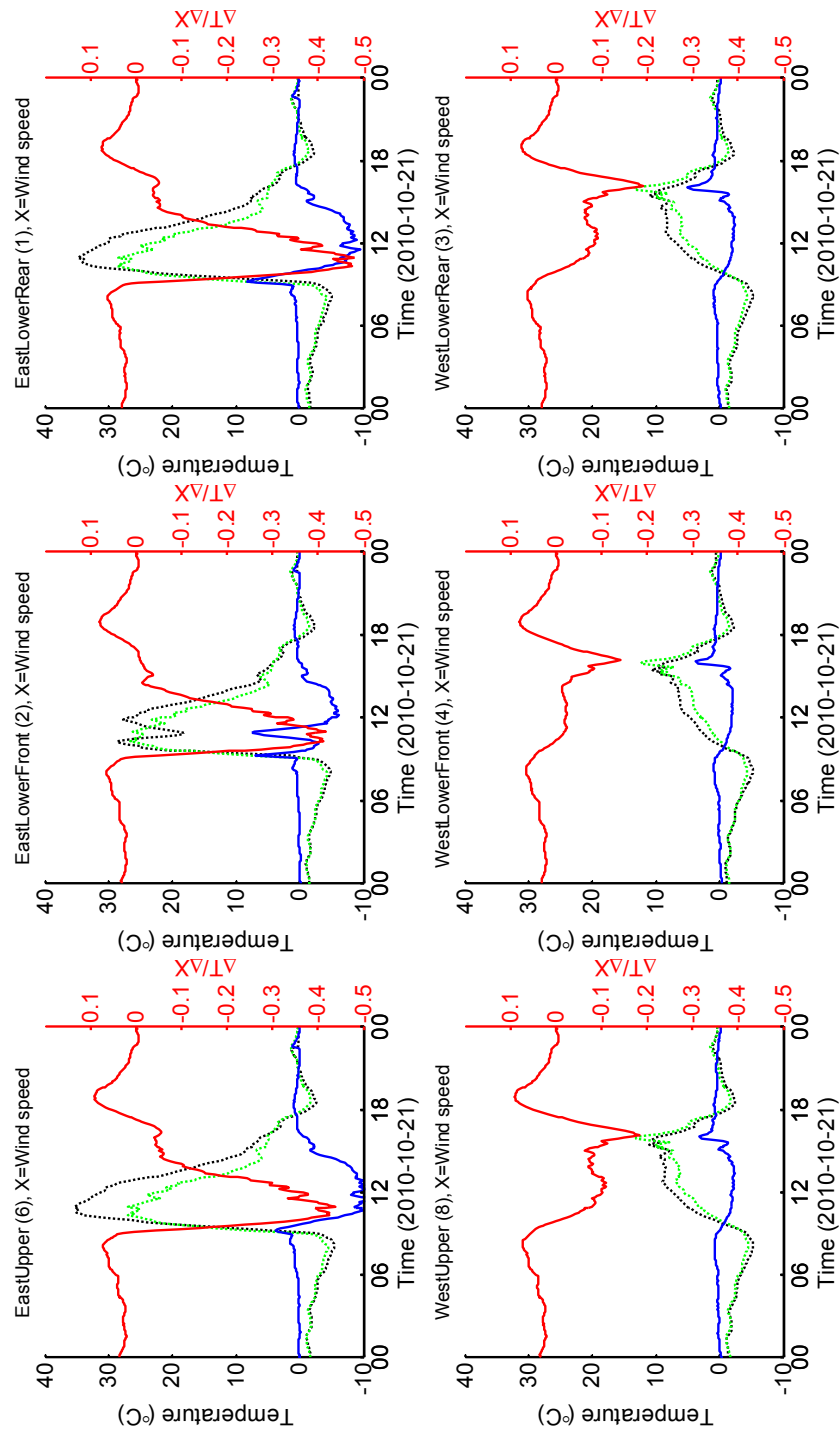
Figur A7. Känslighet för plåtskalets specifika värmekapacitet, 2010-10-21.



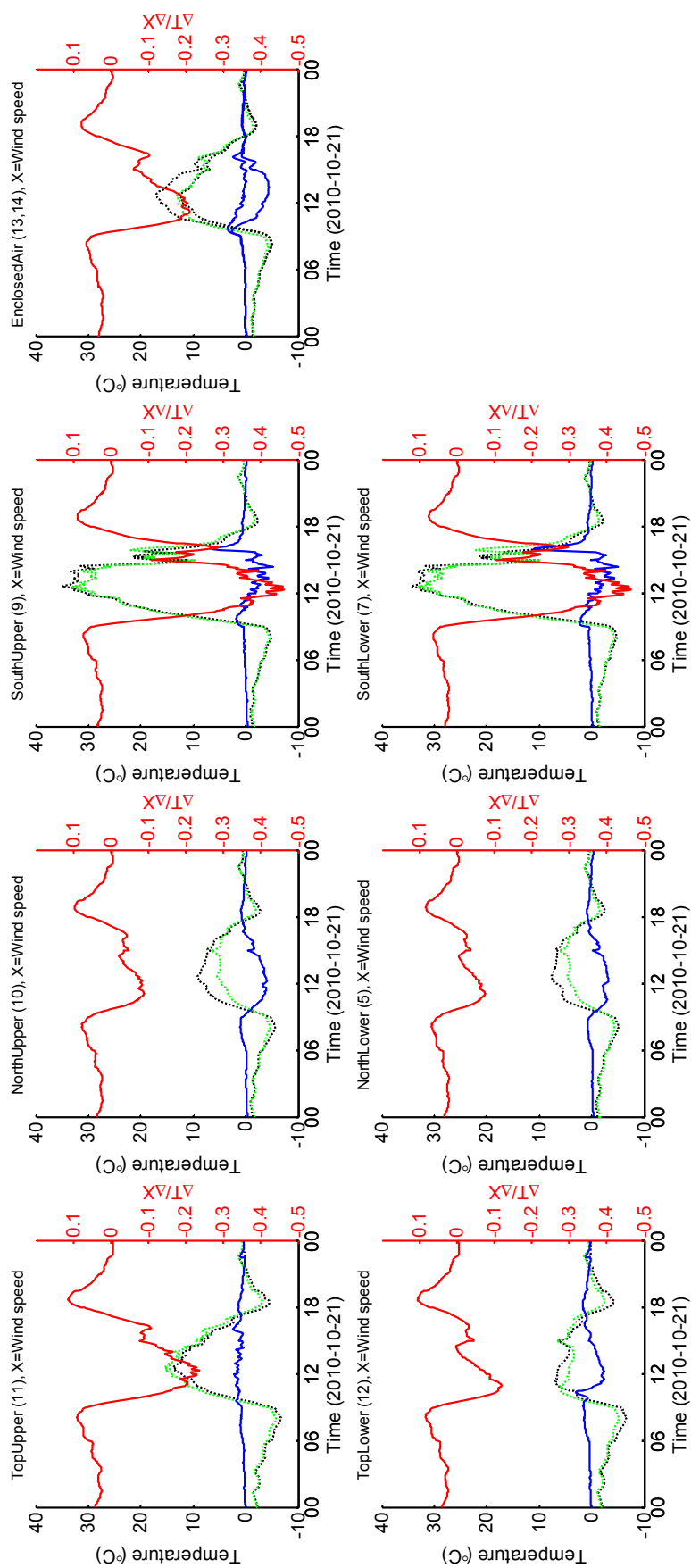
Figur A8. Känslighet för luftens temperatur, 2010-10-21.



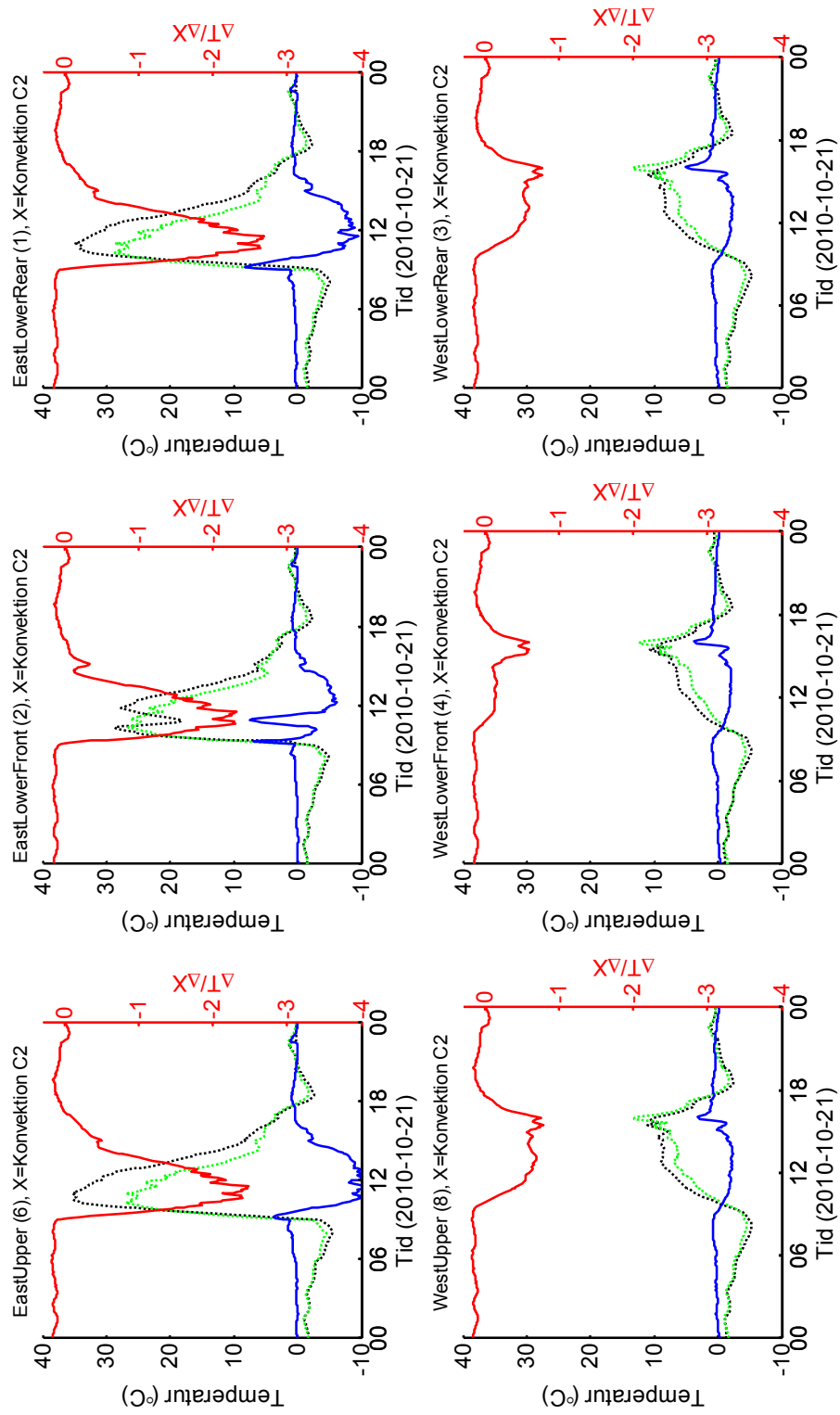
Figur A9. Känslighet för luftens temperatur, 2010-10-21.



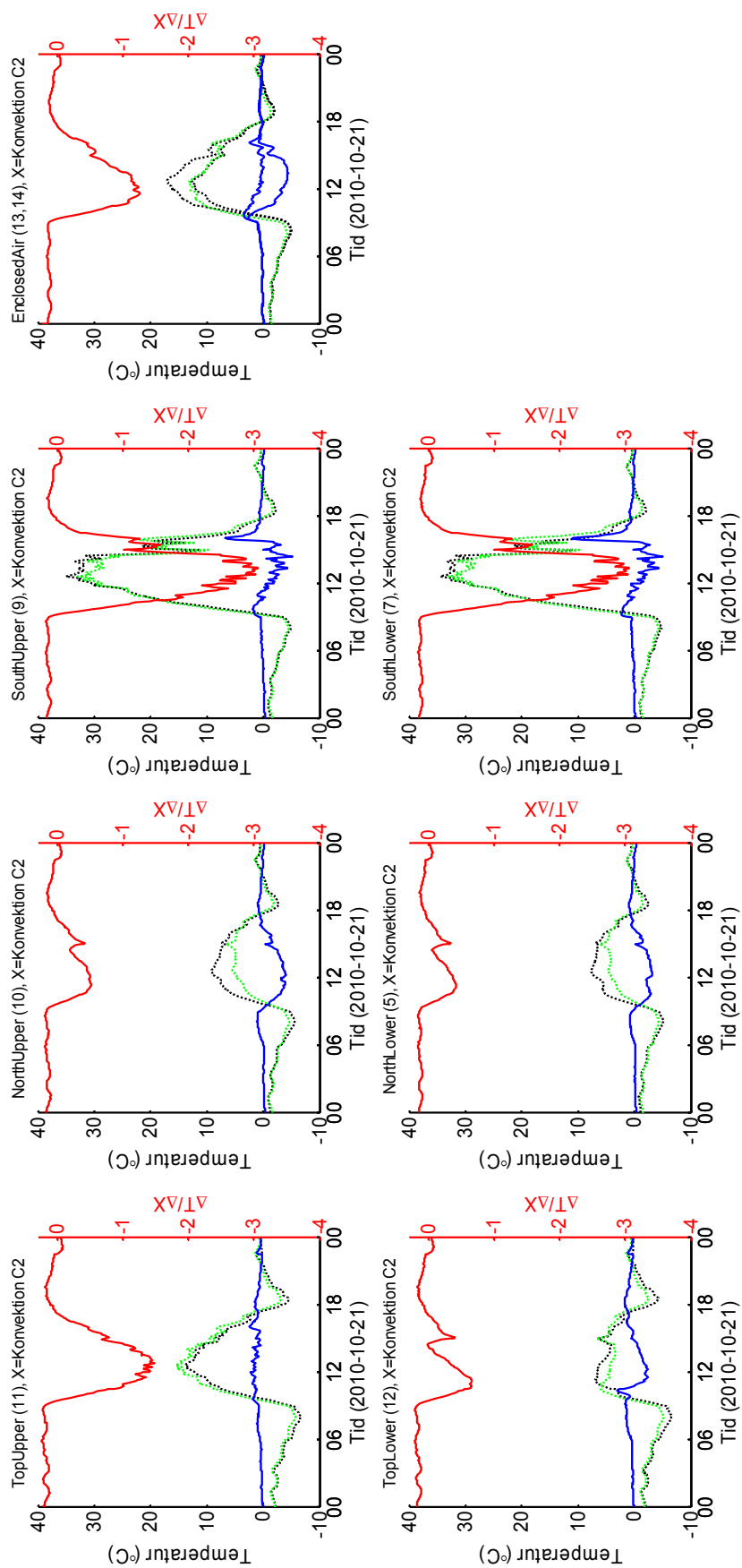
Figur A10. Känslighet för vindhastigheten, 2010-10-21.



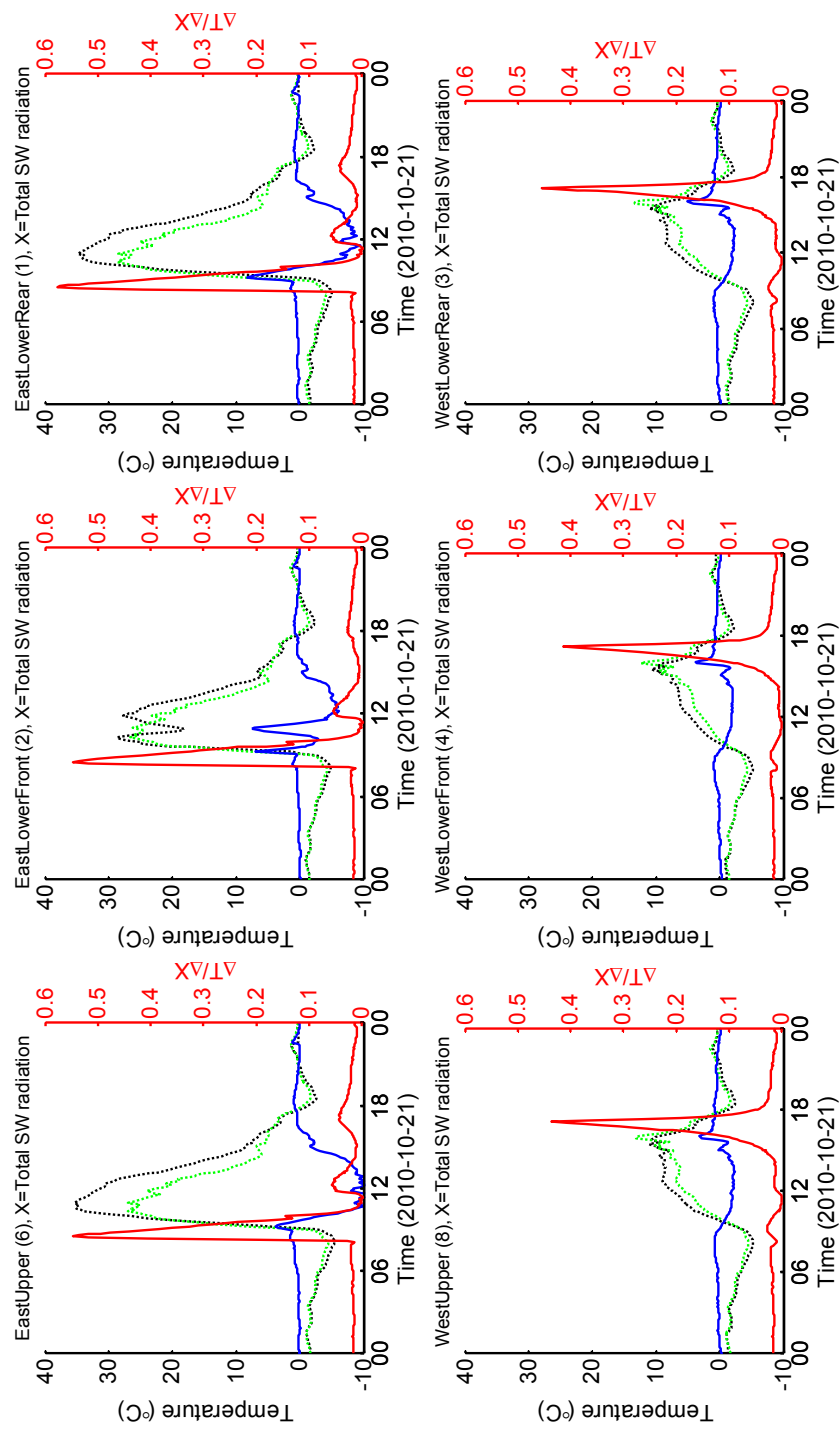
Figur A11. Känslighet för vindhastigheten, 2010-10-21.



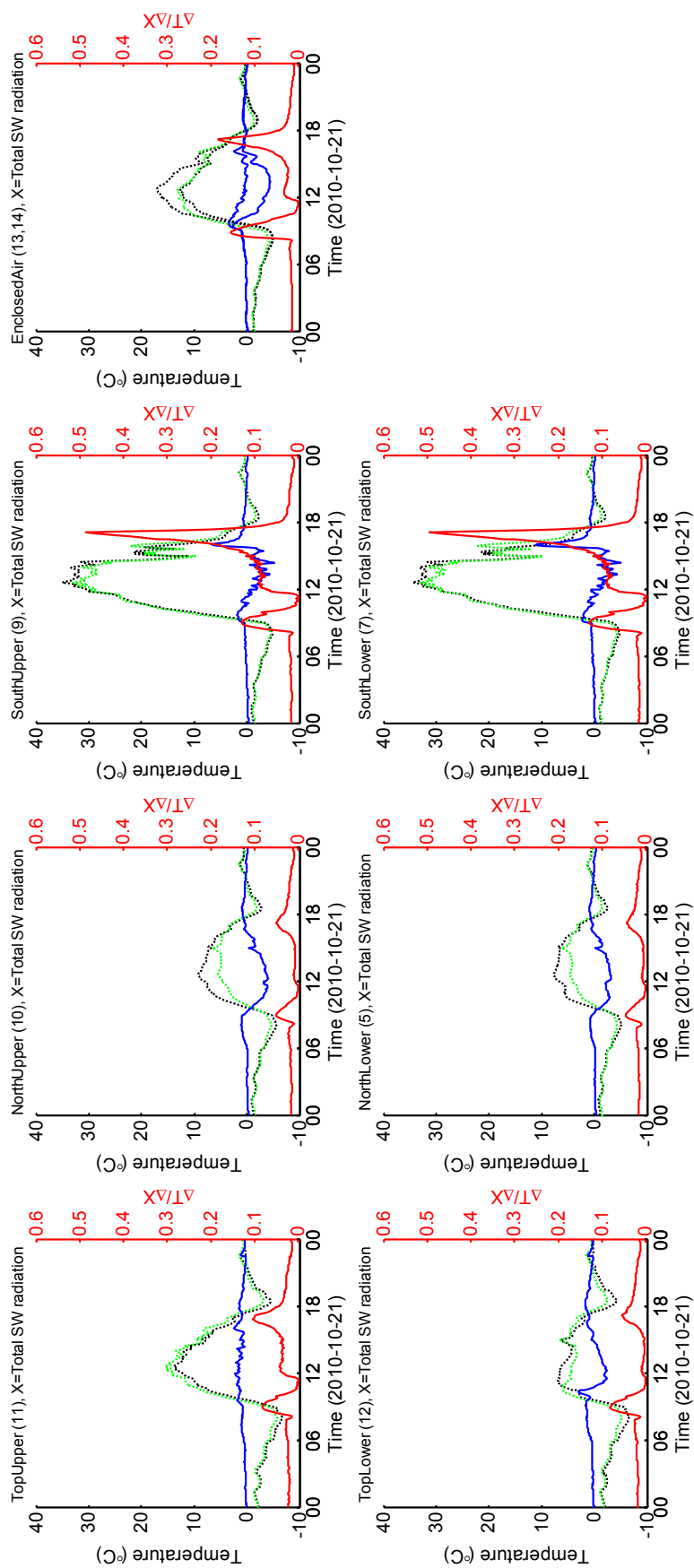
Figur A12. Känslighet för konvektionskoefficient C2, 2010-10-21.



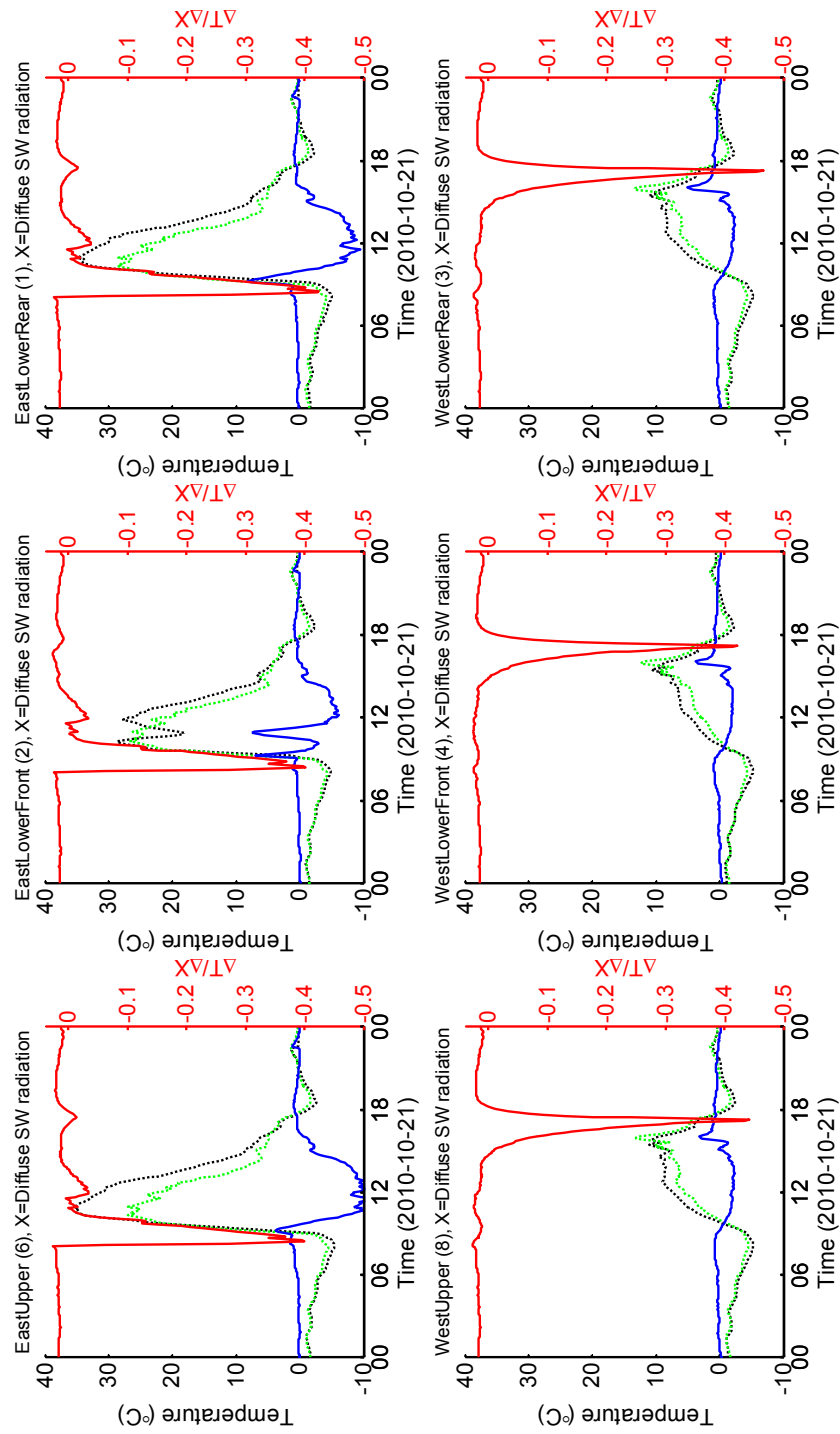
Figur A13. Känslighet för konvektionskoefficient C2, 2010-10-21.



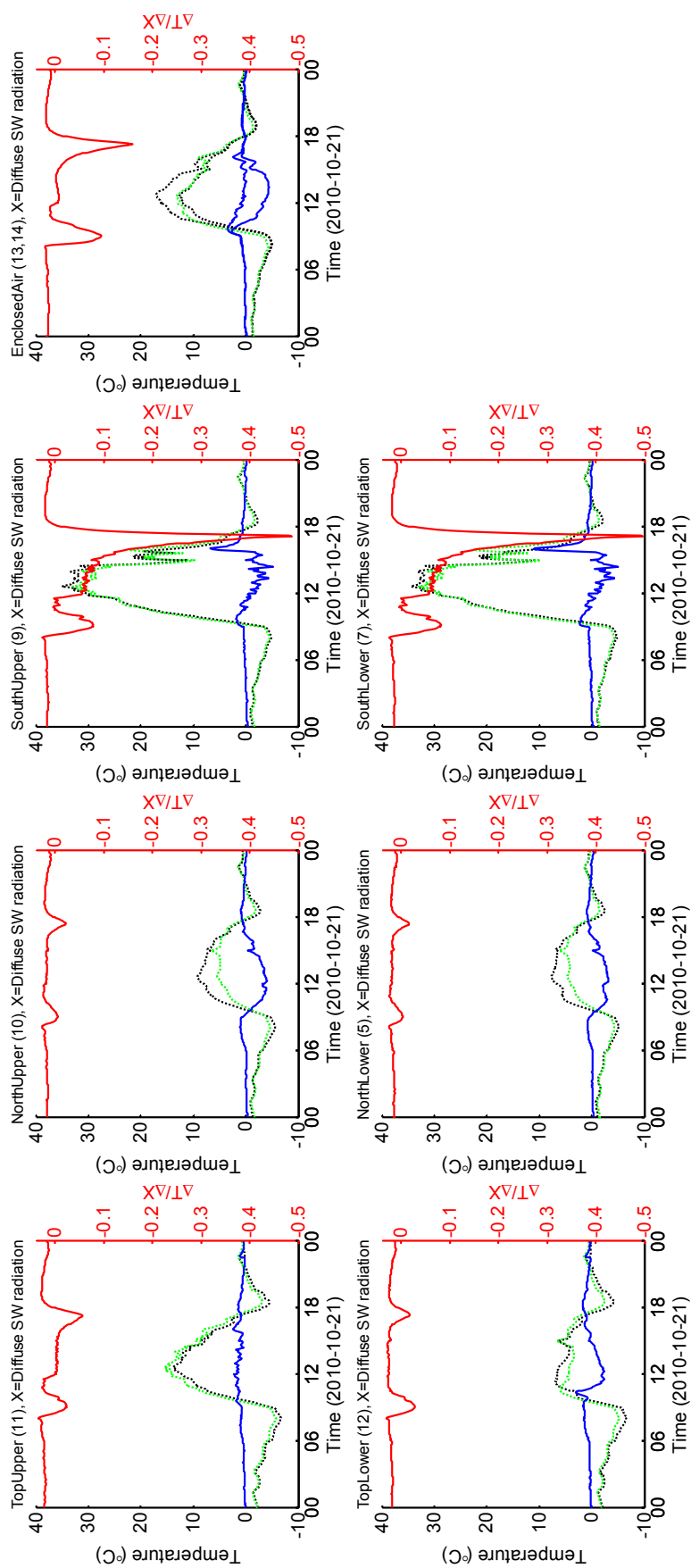
Figur A14. Känslighet för totala solinstrålningen (kortvågig IR), 2010-10-21.



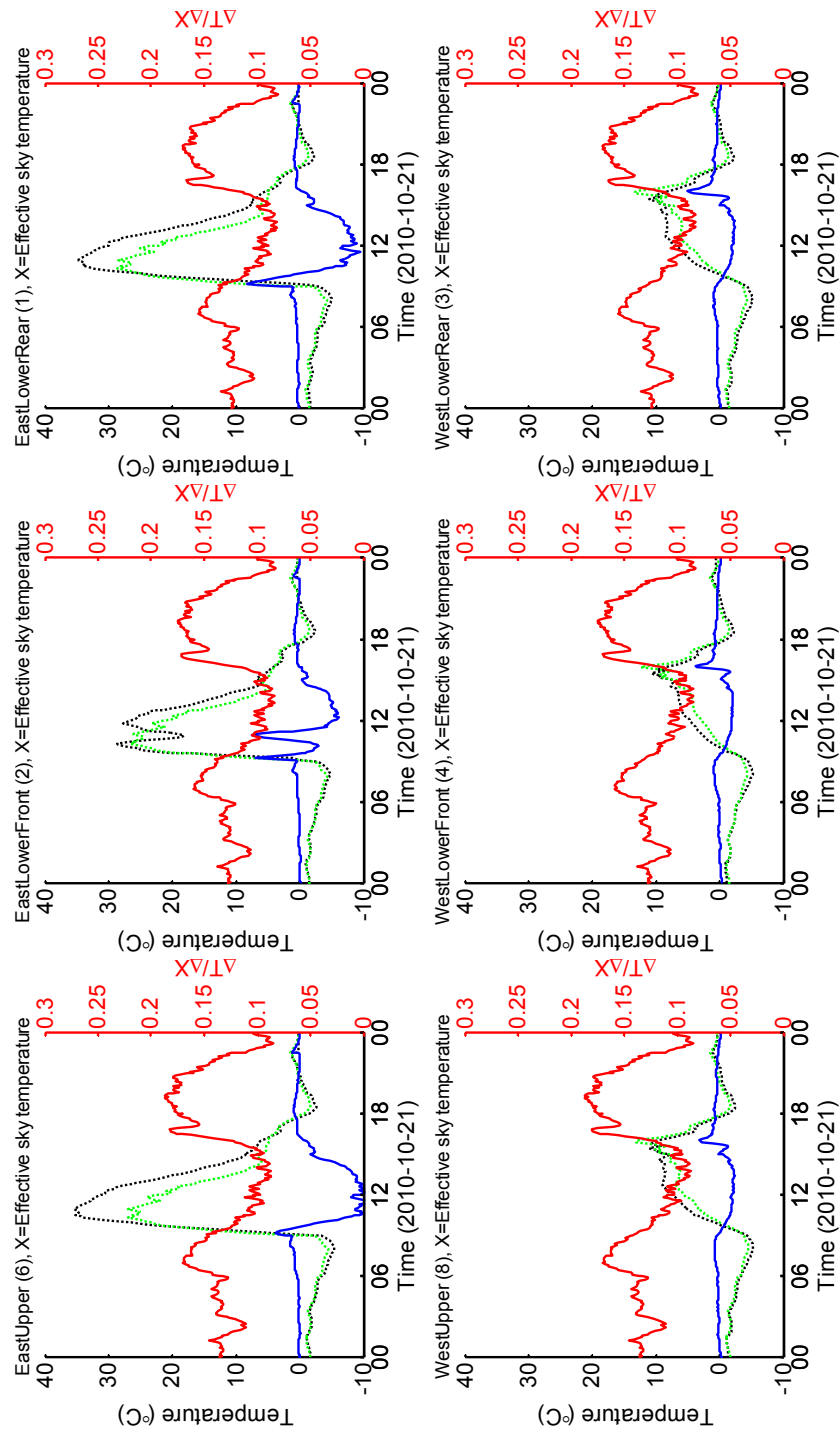
Figur A15. Känslighet för totala solinstrålningen (kortvågig IR), 2010-10-21.



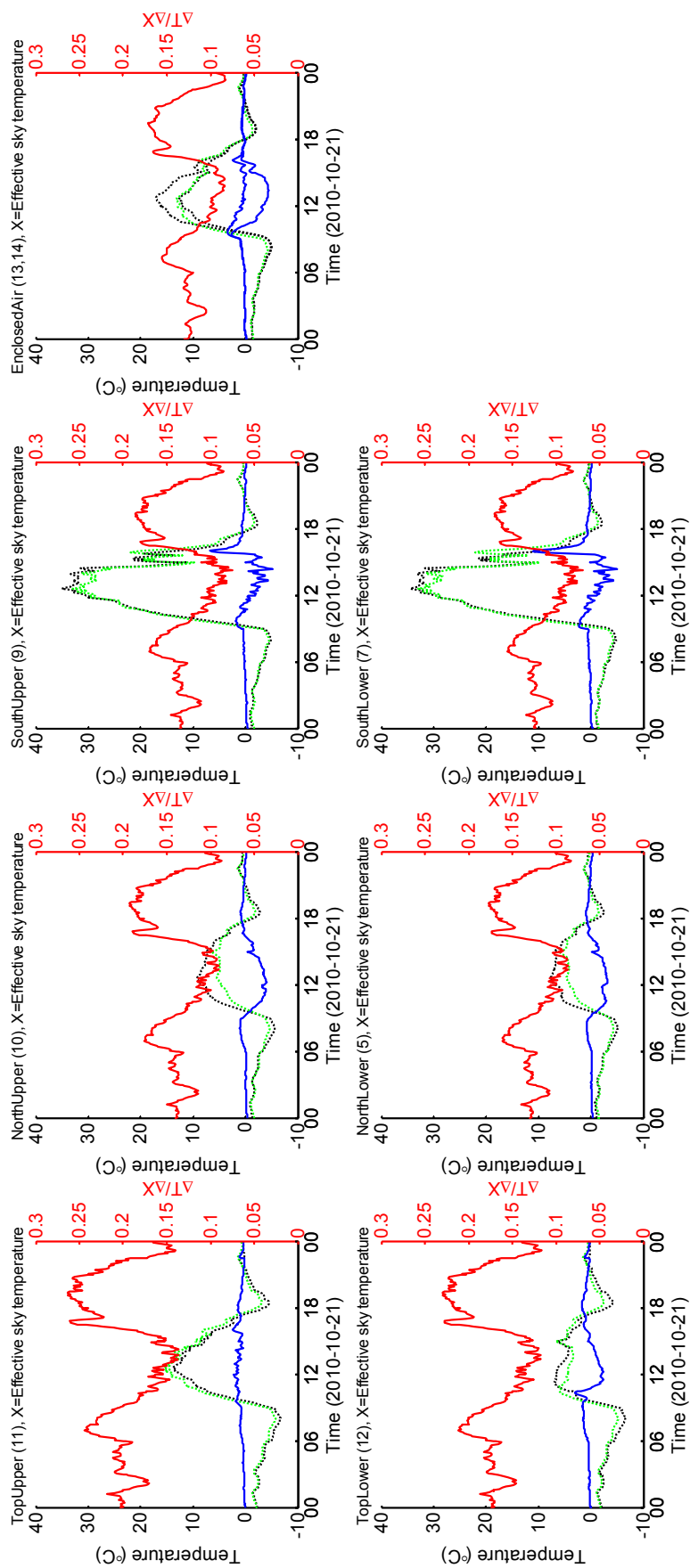
Figur A16 Känslighet för diffusa solinstrålningen (kortvågig IR), 2010-10-21.



Figur A17. Känslighet för diffusa solinstrålningen (kortvågig IR), 2010-10-21.

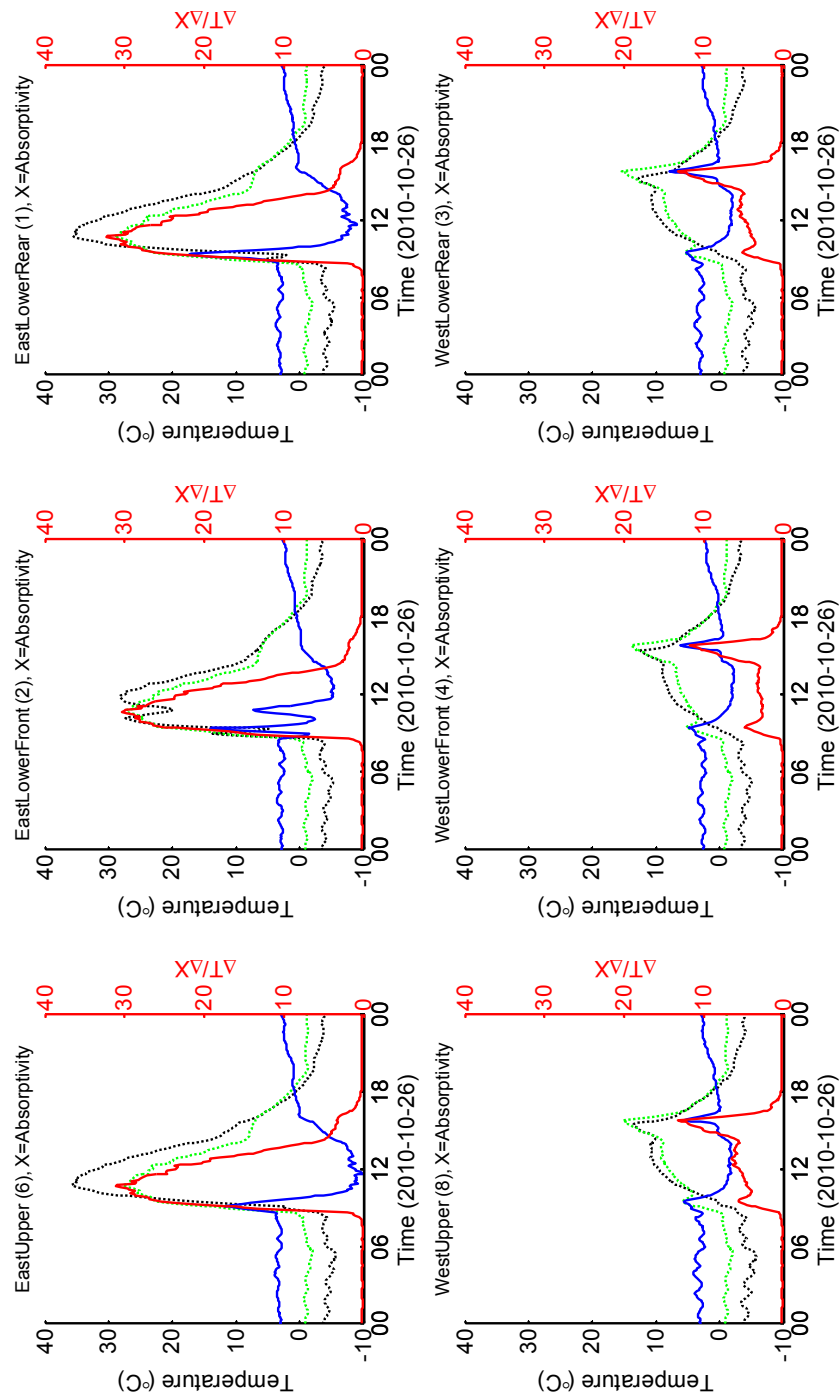


Figur A18. Känslighet för effektiva himmelstemperaturen (långvågig IR), 2010-10-21.

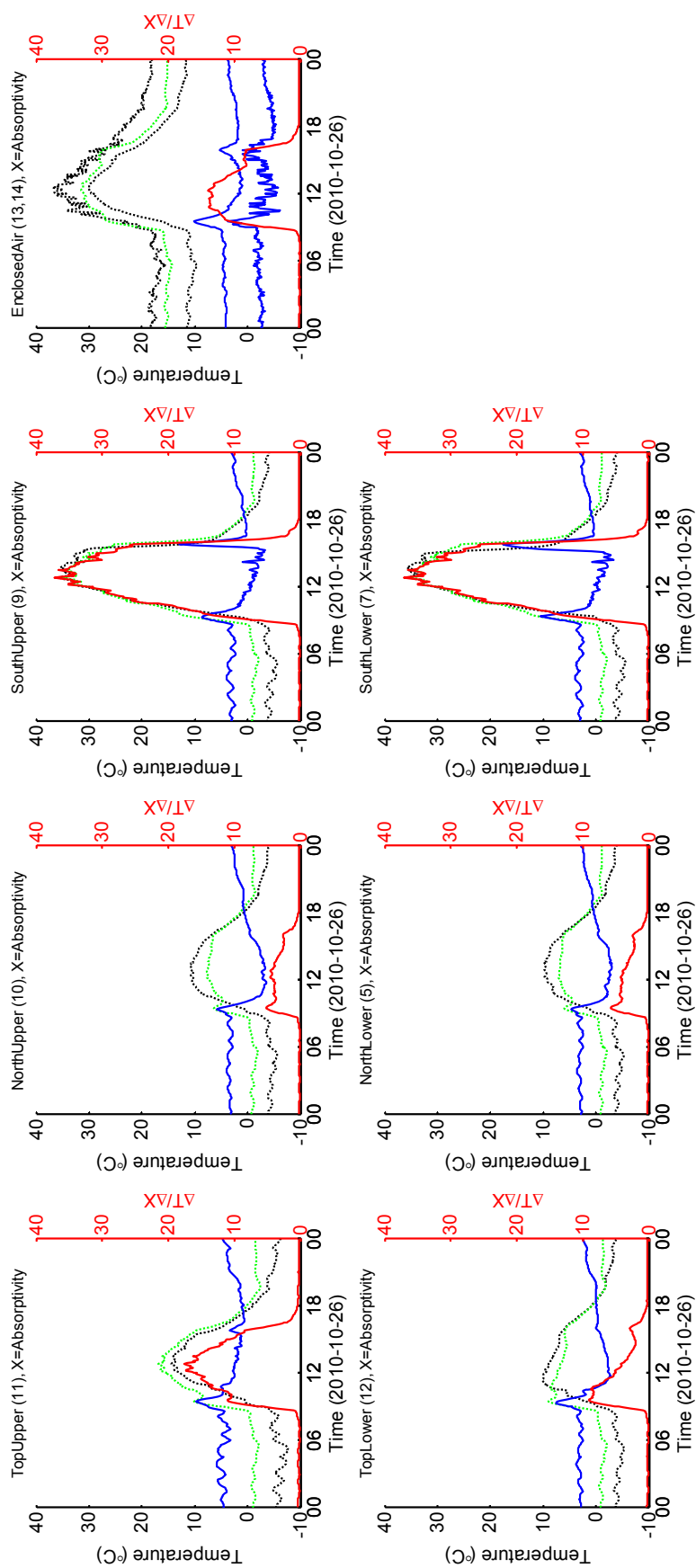


Figur A19. Känslighet för effektiva himmelstemperaturen (långvågig IR), 2010-10-21.

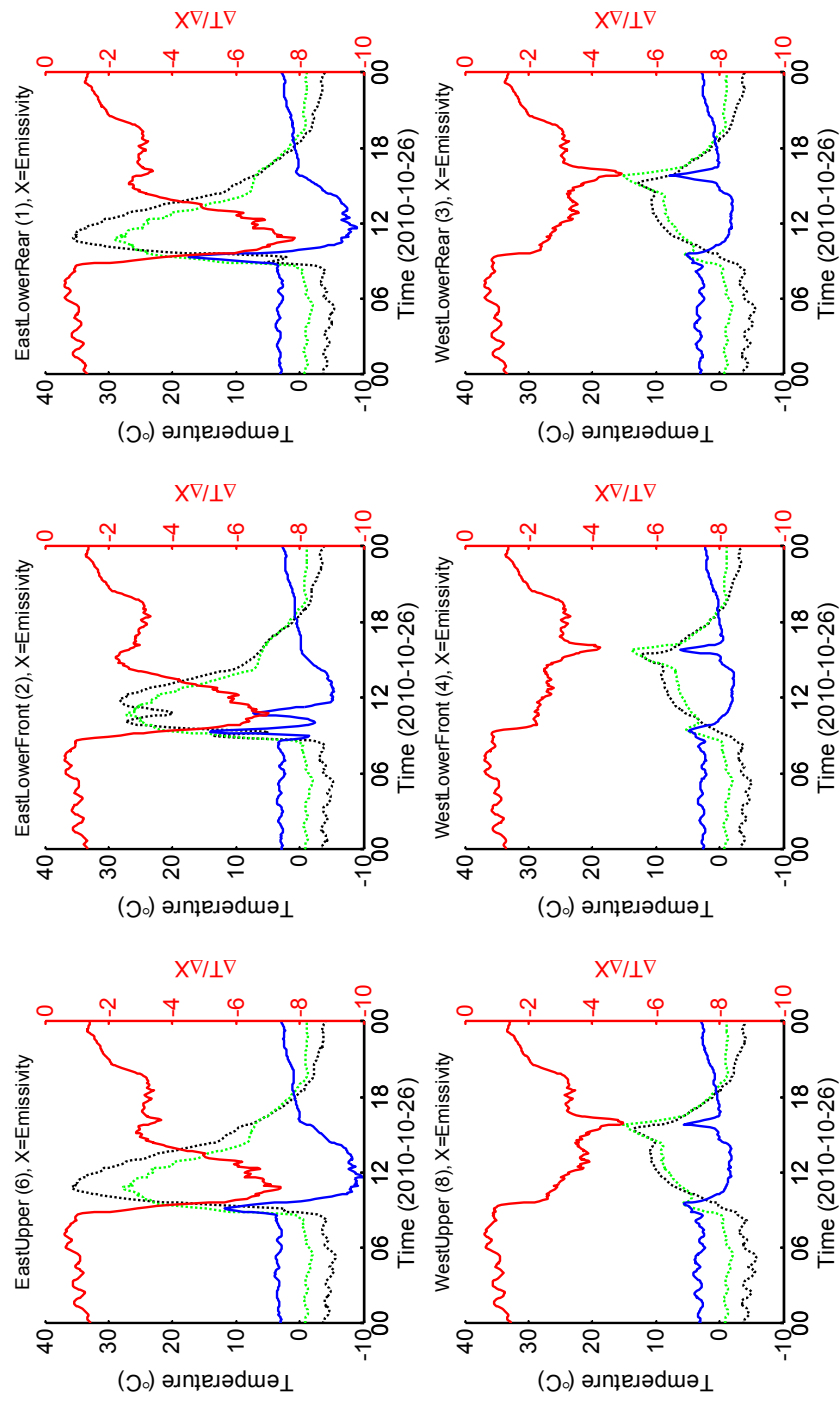
8.2 Känslighetsberäkningar för dygnet 2010-10-26



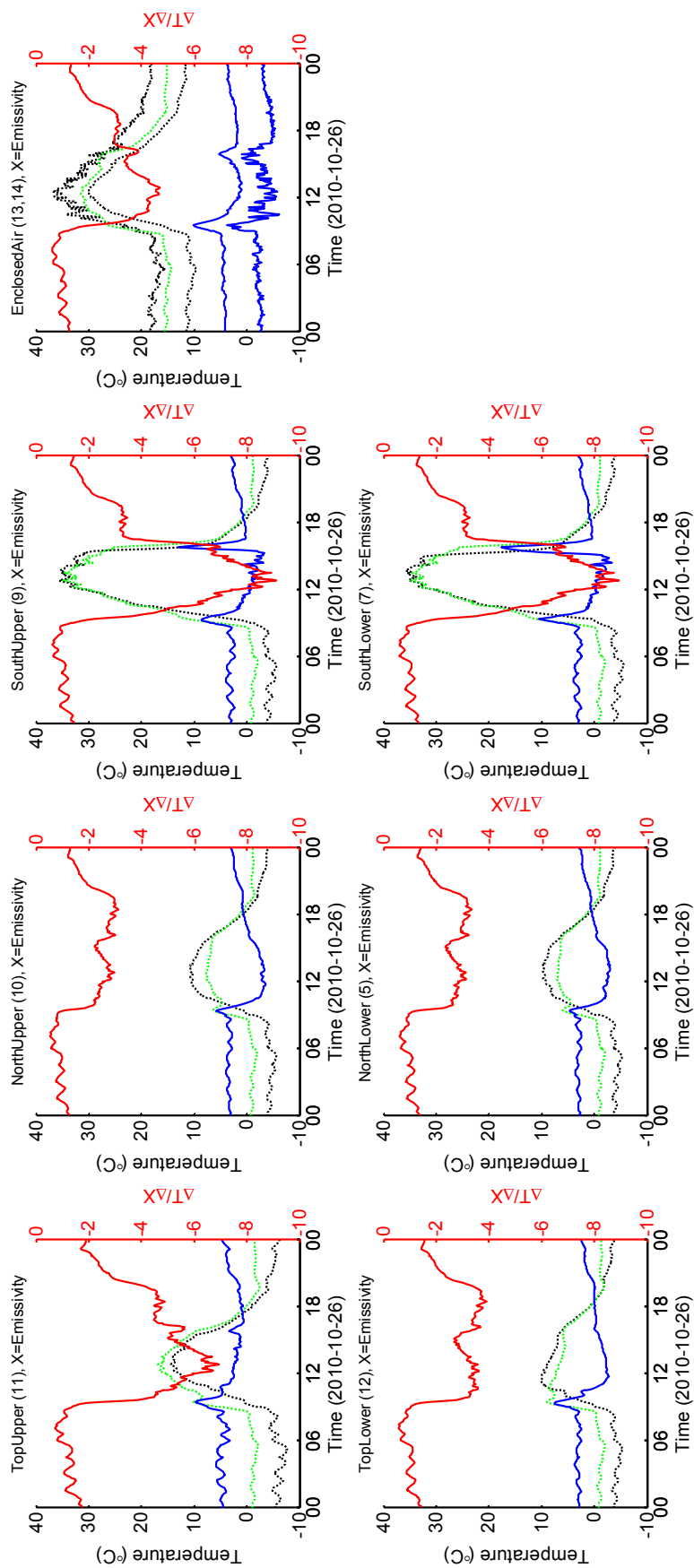
Figur A20. Känslighet för färgens absorptivitet, 2010-10-26.



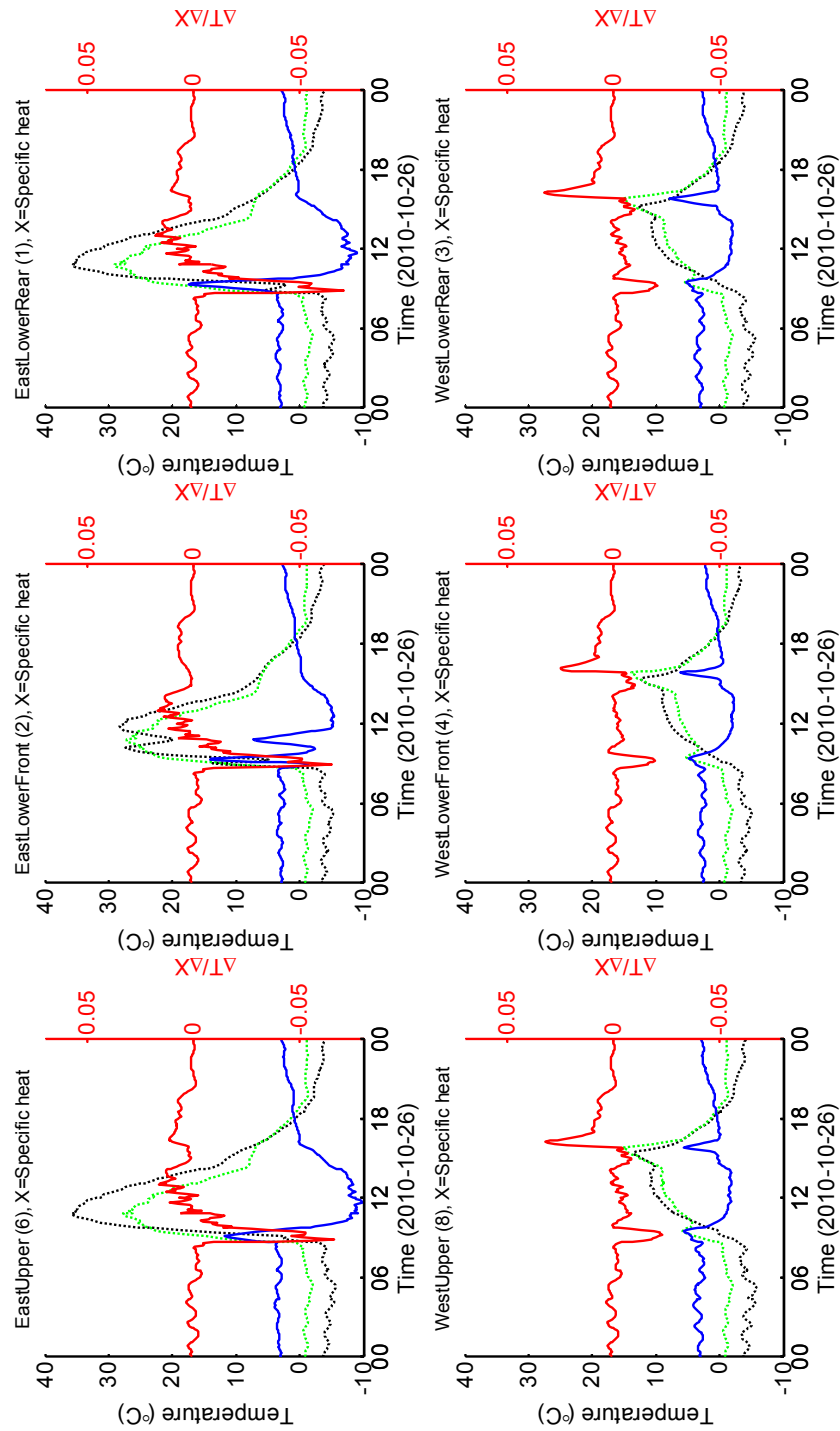
Figur A21. Känslighet för färgens absorptivitet, 2010-10-26.



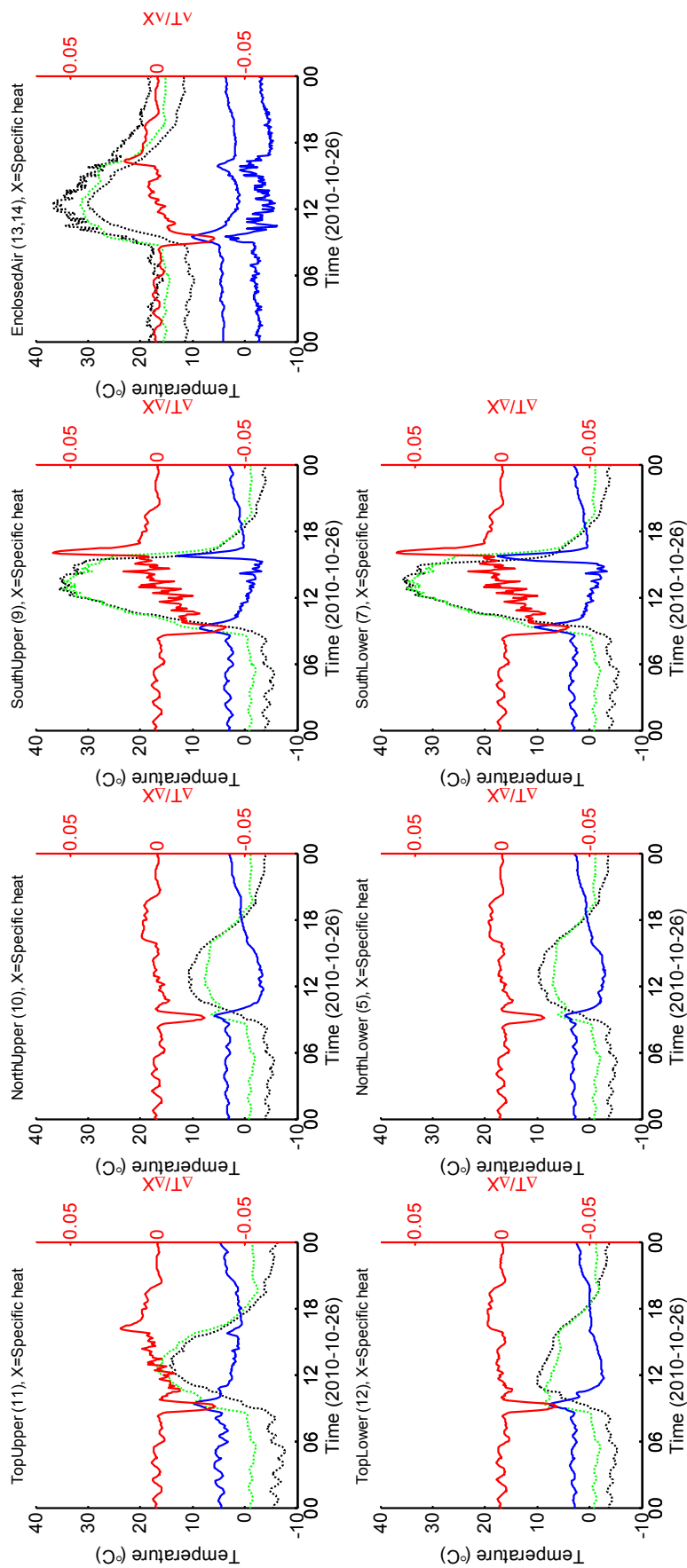
Figur A22. Känslighet för färgens emissivitet, 2010-10-26.



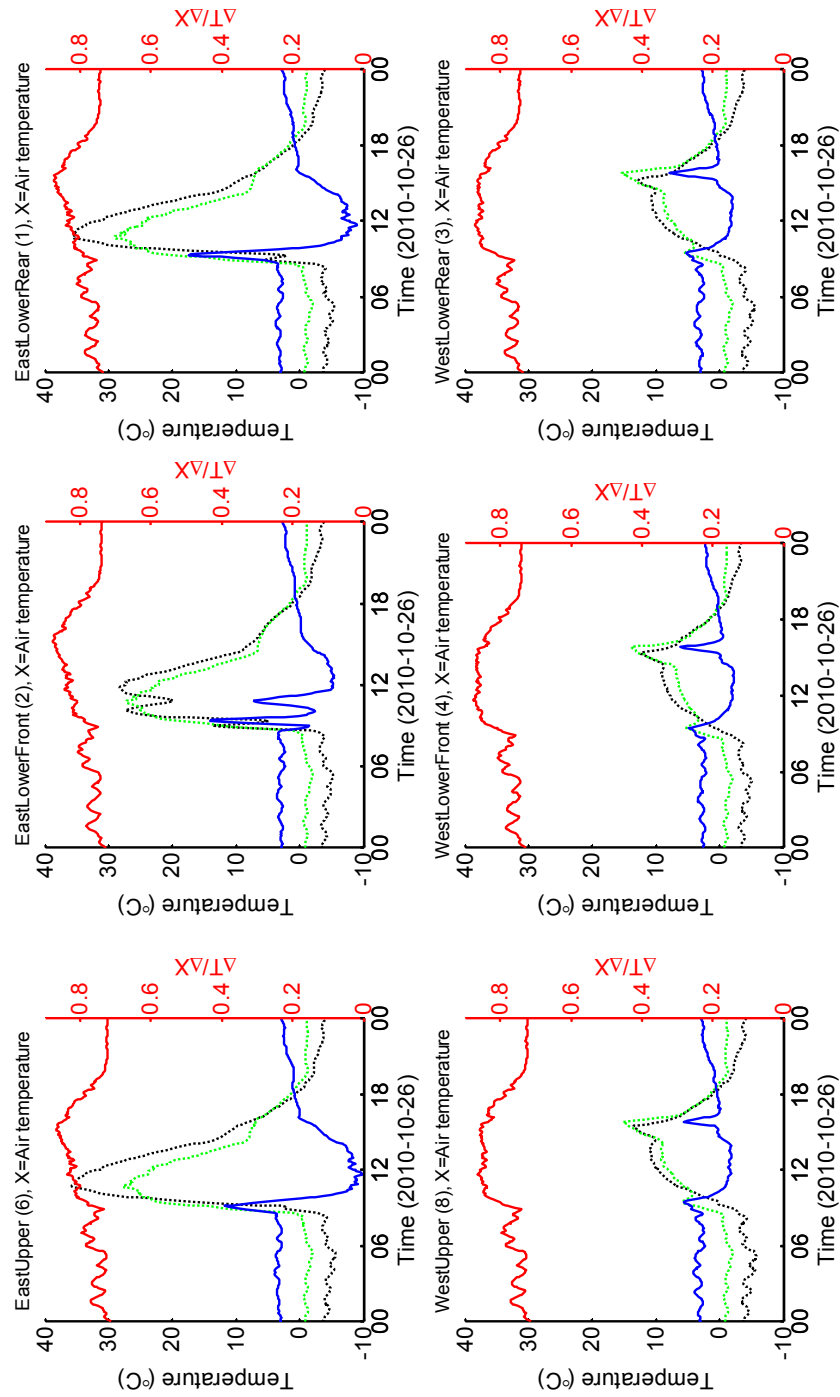
Figur A23. Känslighet för färgens emissivitet, 2010-10-26.



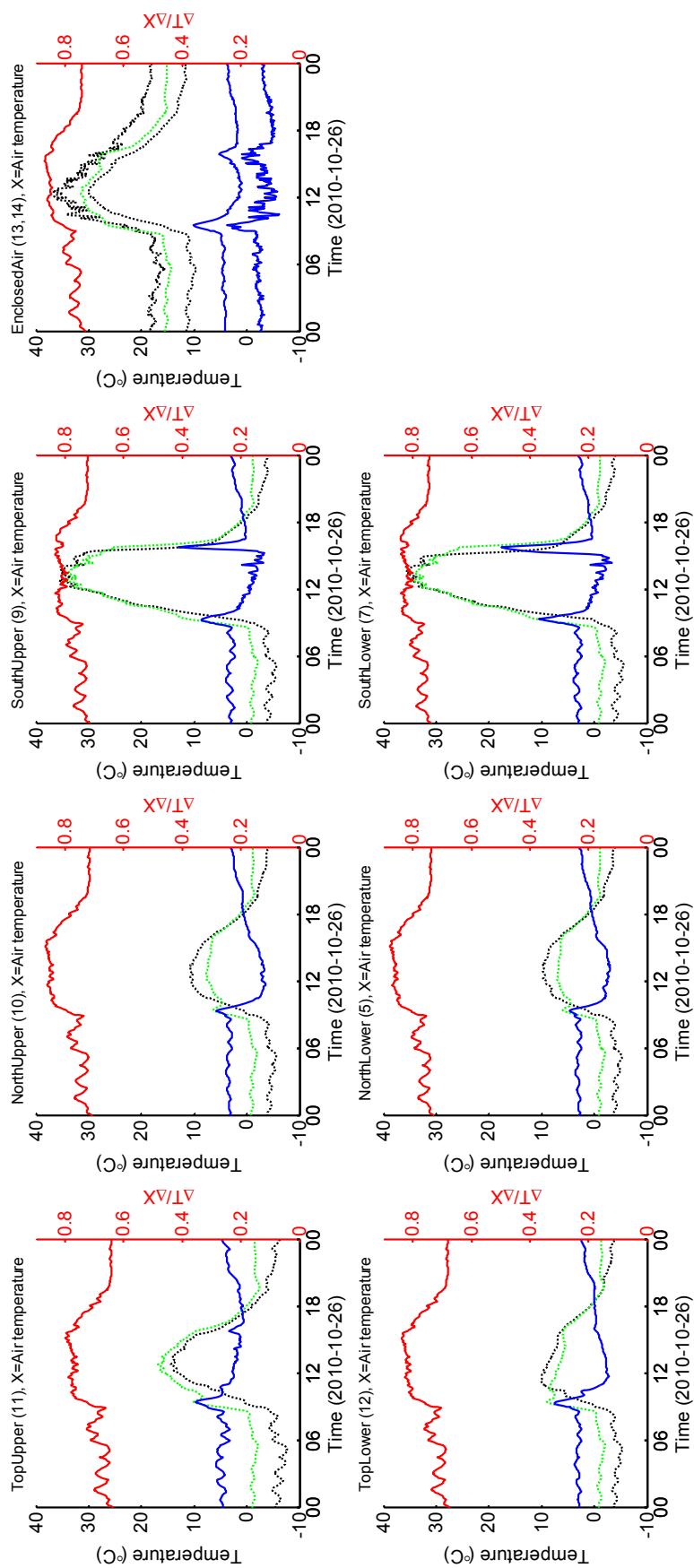
Figur A24. Känslighet för plåtskalets specifika värmekapacitet, 2010-10-26.



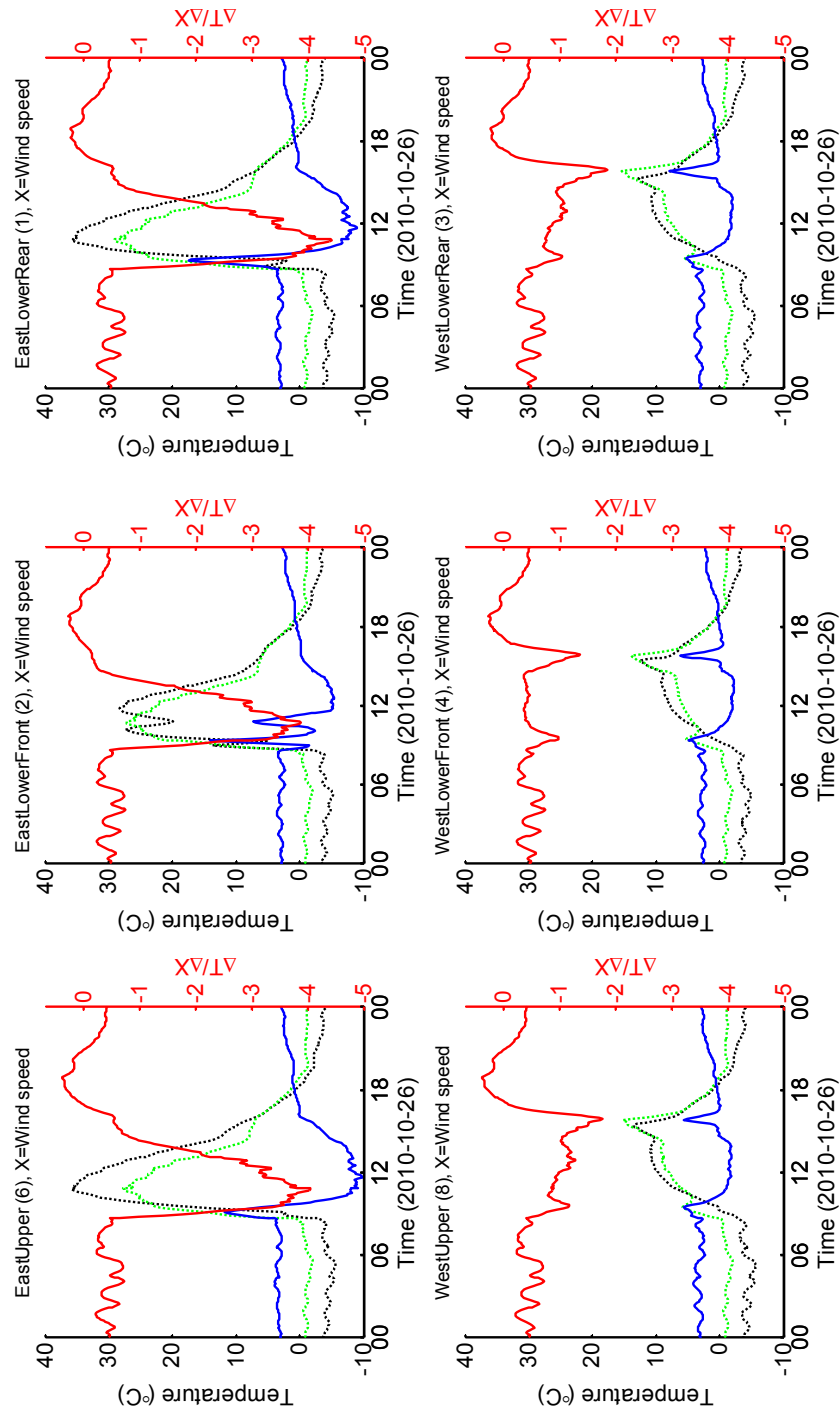
Figur A25. Känslighet för plåtskalets specifika värmekapacitet, 2010-10-26.



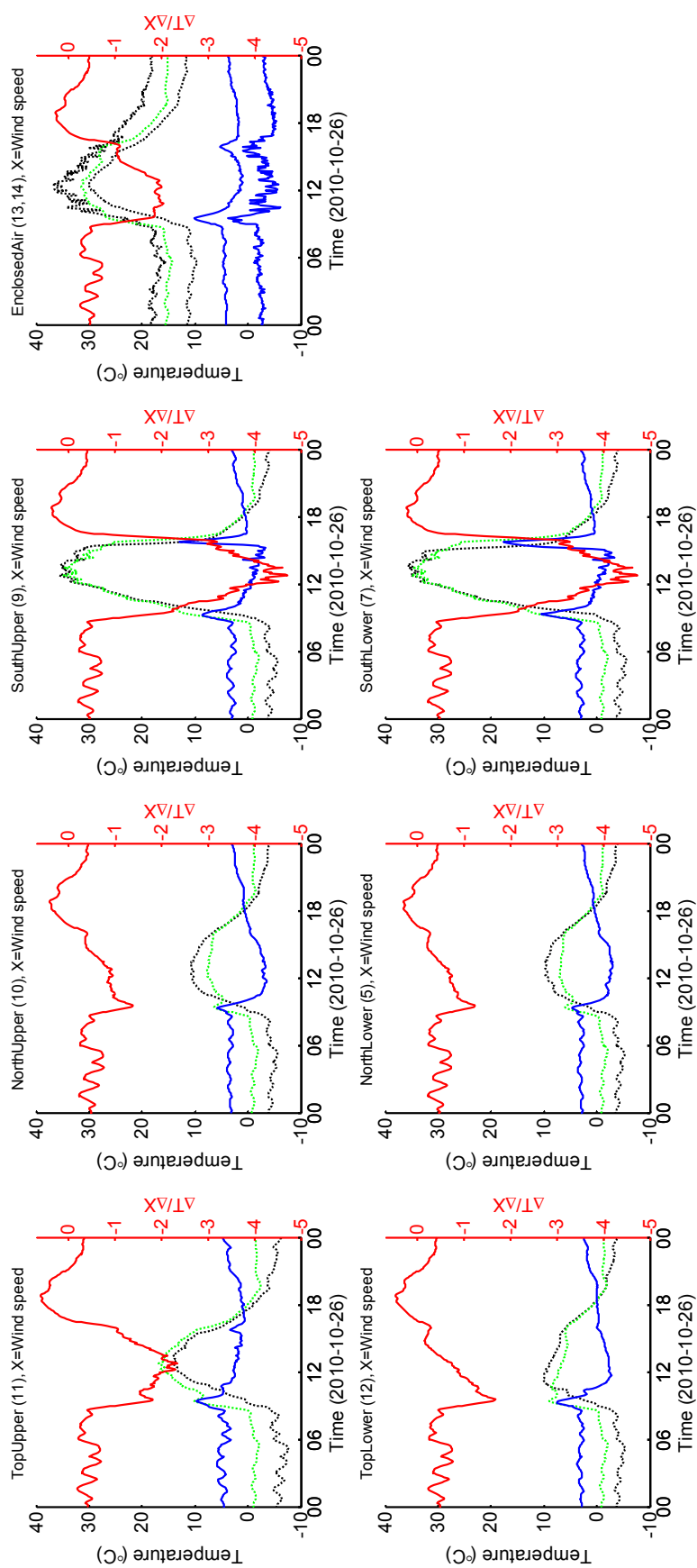
Figur A26. Känslighet för luftens temperatur, 2010-10-26.



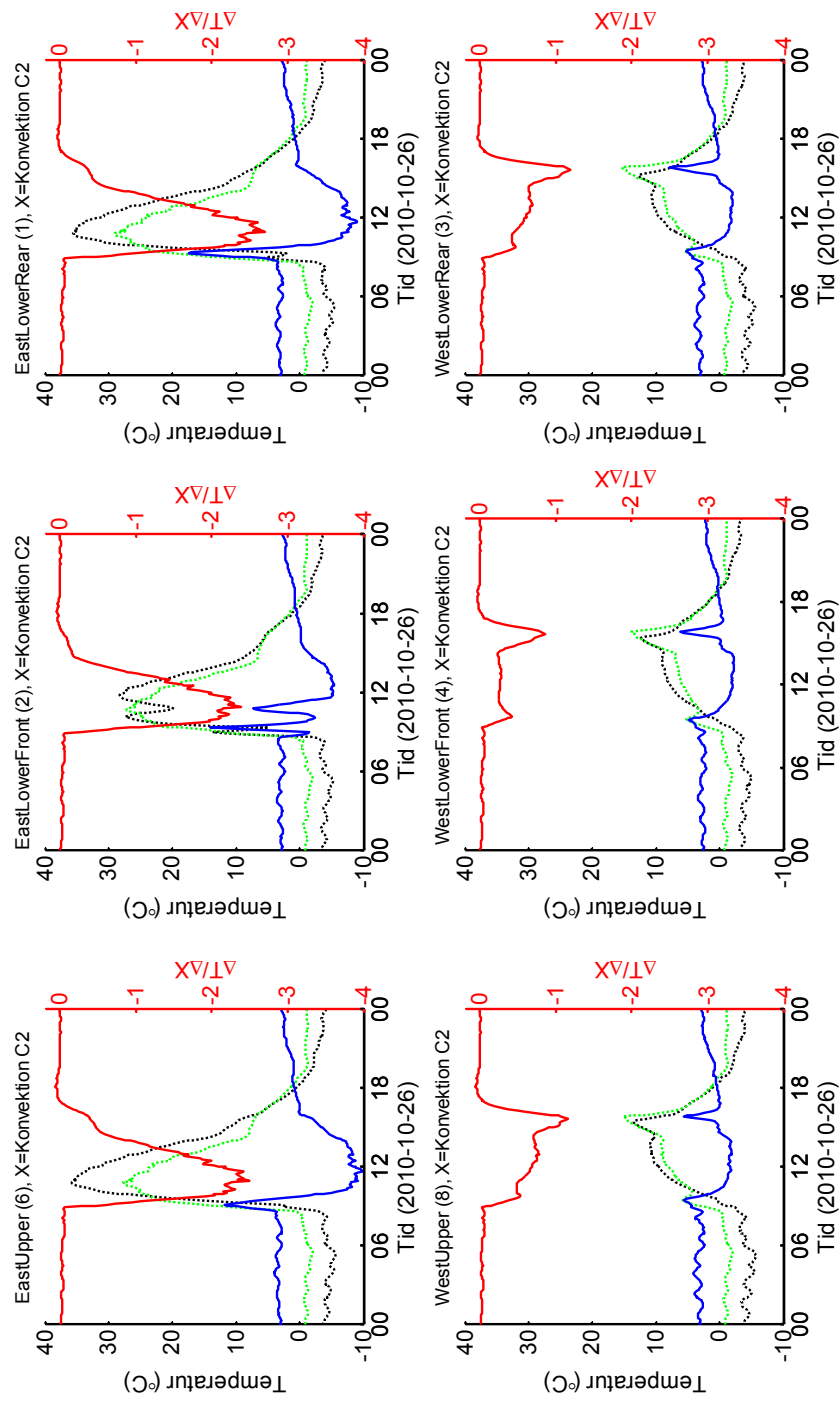
Figur A27. Känslighet för luftens temperatur, 2010-10-26.



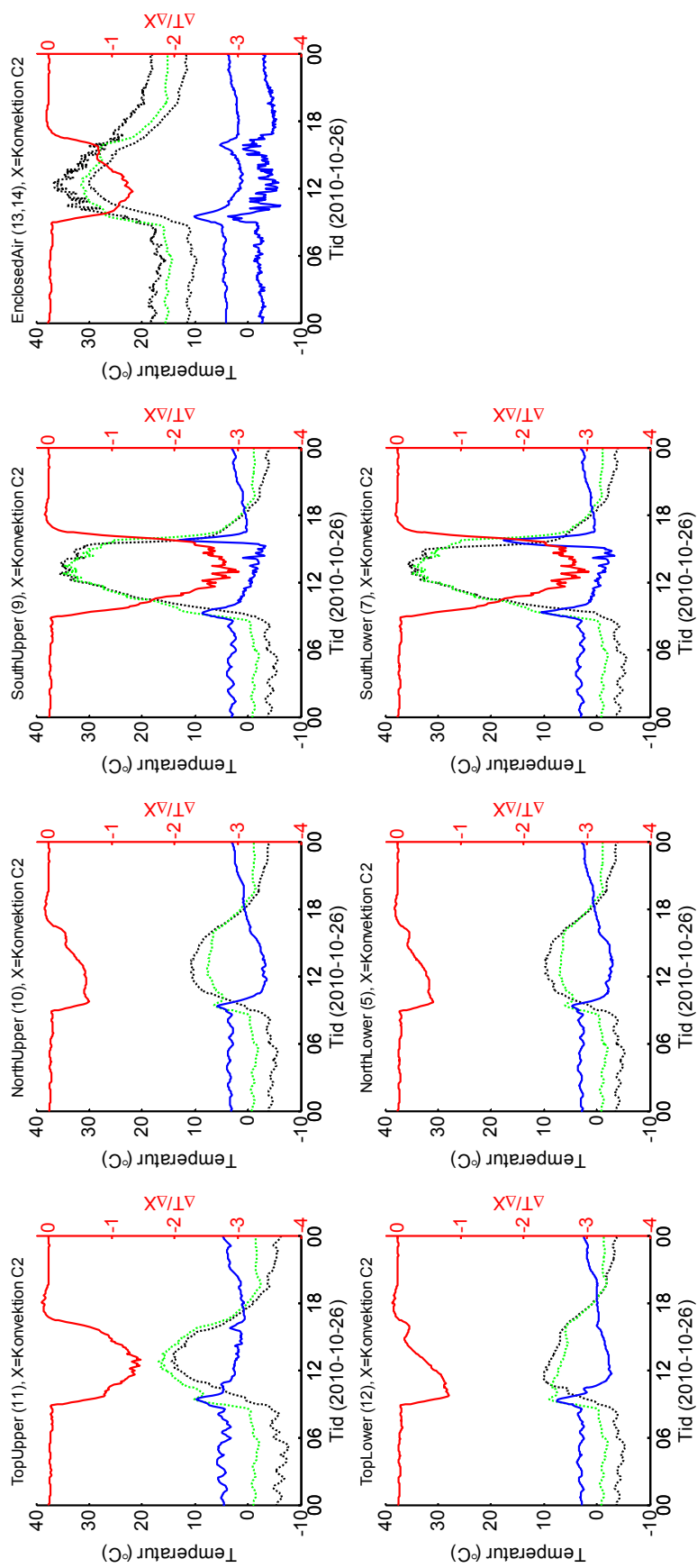
Figur A28. Känslighet för vindhastigheten, 2010-10-26.



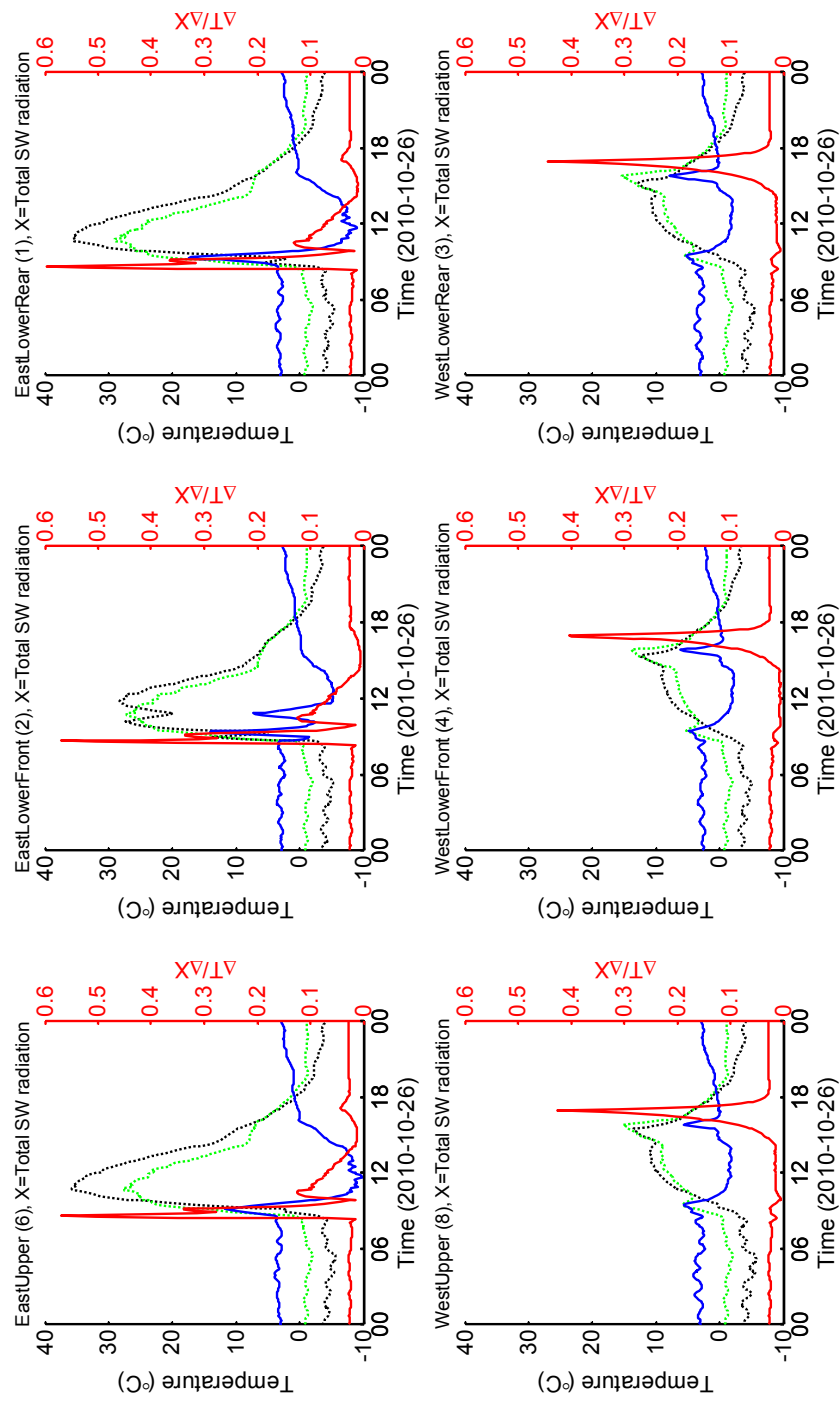
Figur A29. Känslighet för vindhastigheten, 2010-10-26.



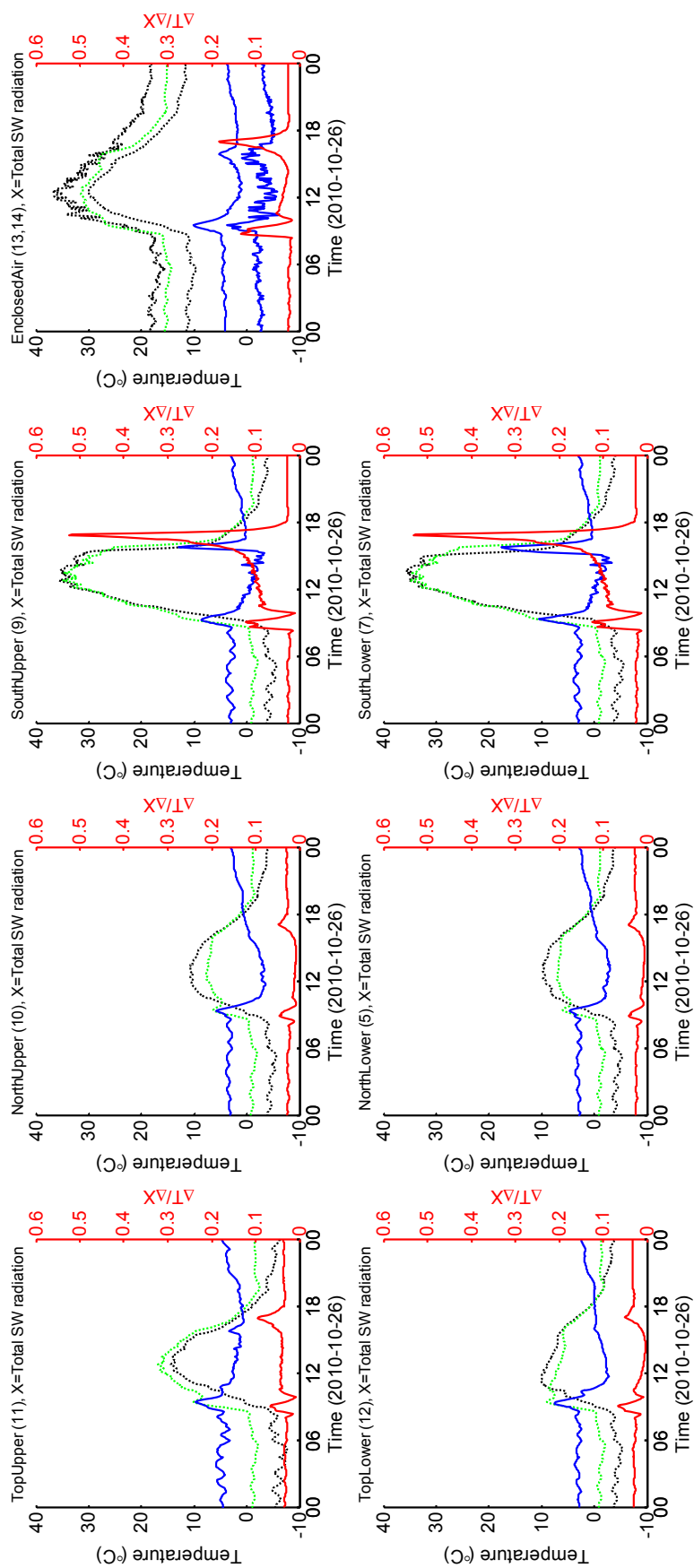
Figur A30. Känslighet för konvektionsparametern C2, 2010-10-26.



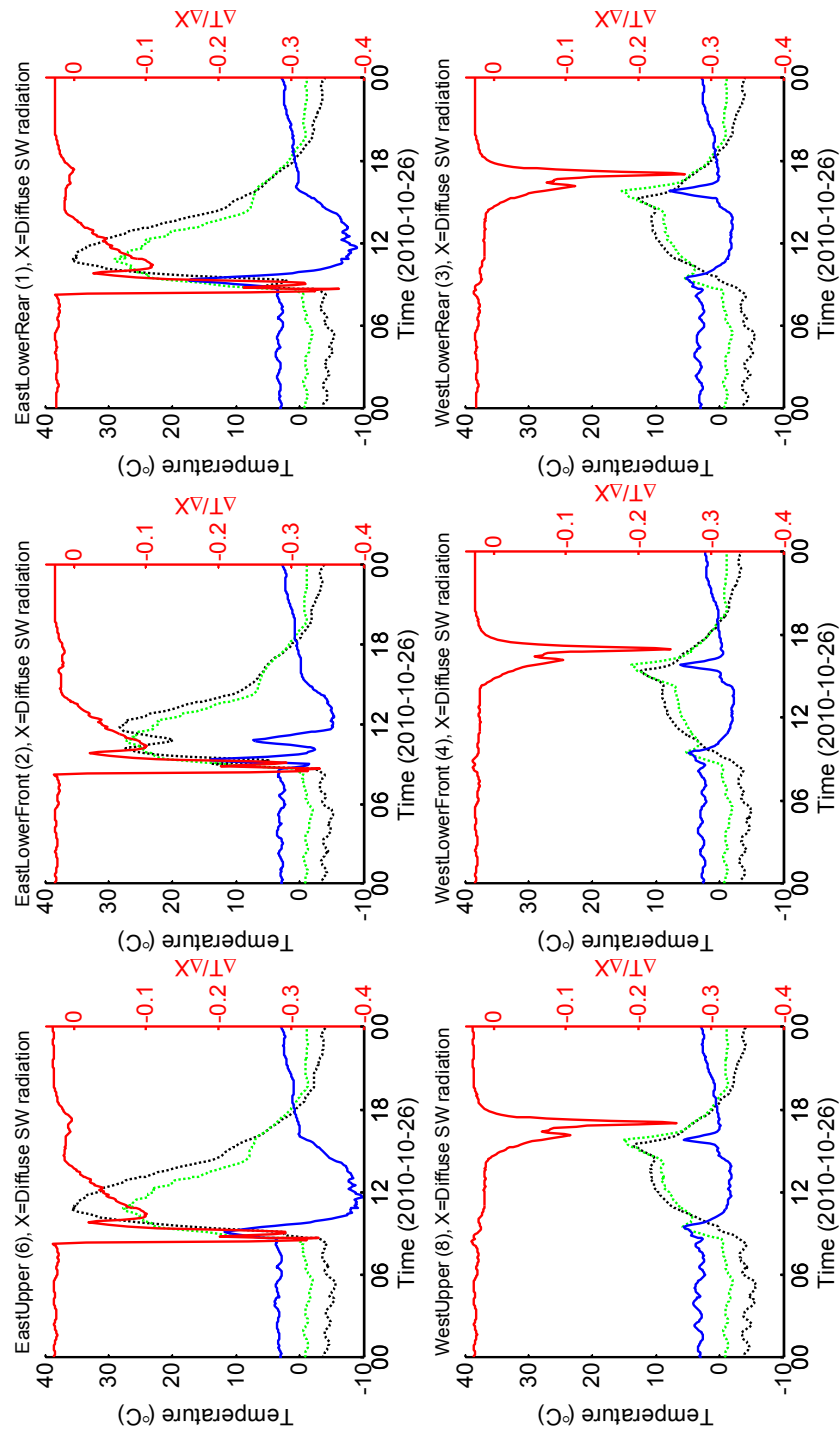
Figur A31. Känslighet för konvektionsparametern C2, 2010-10-26.



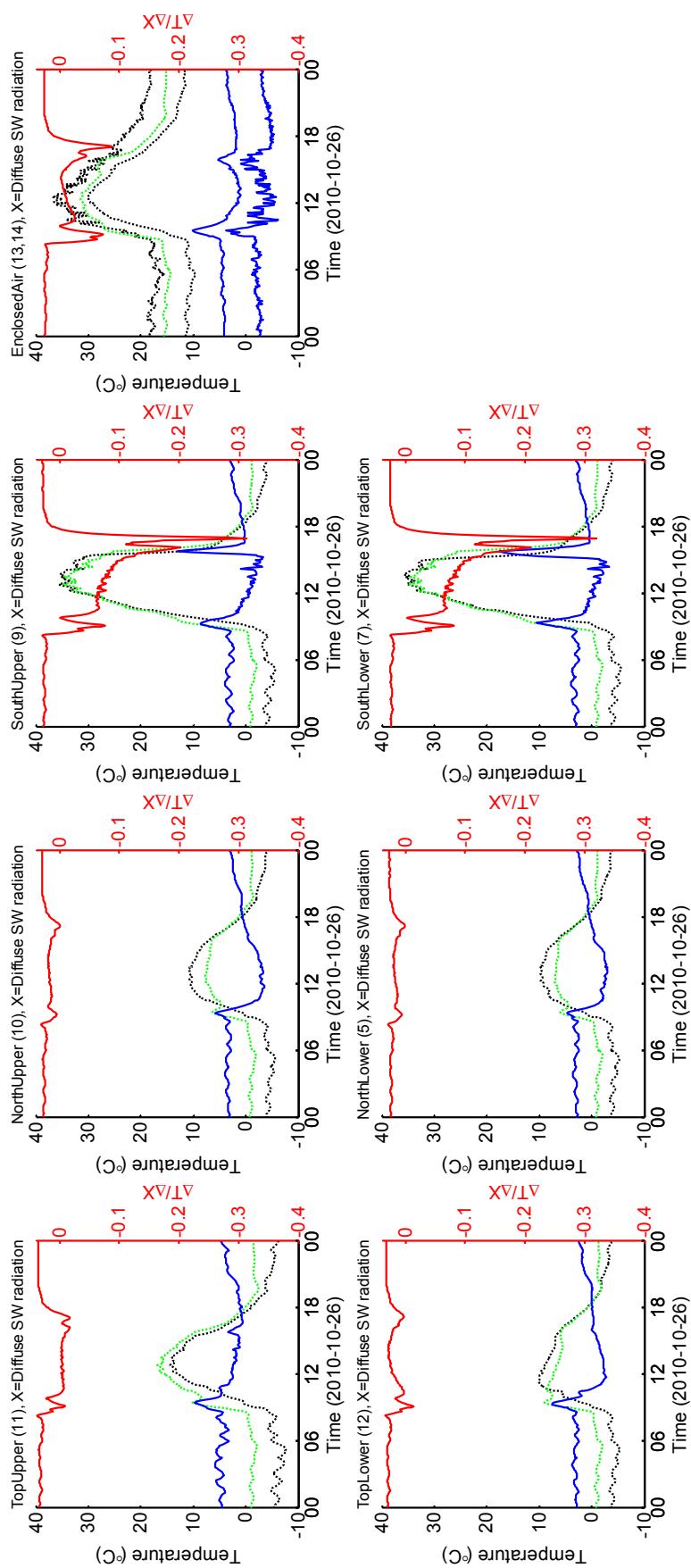
Figur A32. Känslighet för totala solinstrålningen (kortvågig IR), 2010-10-26.



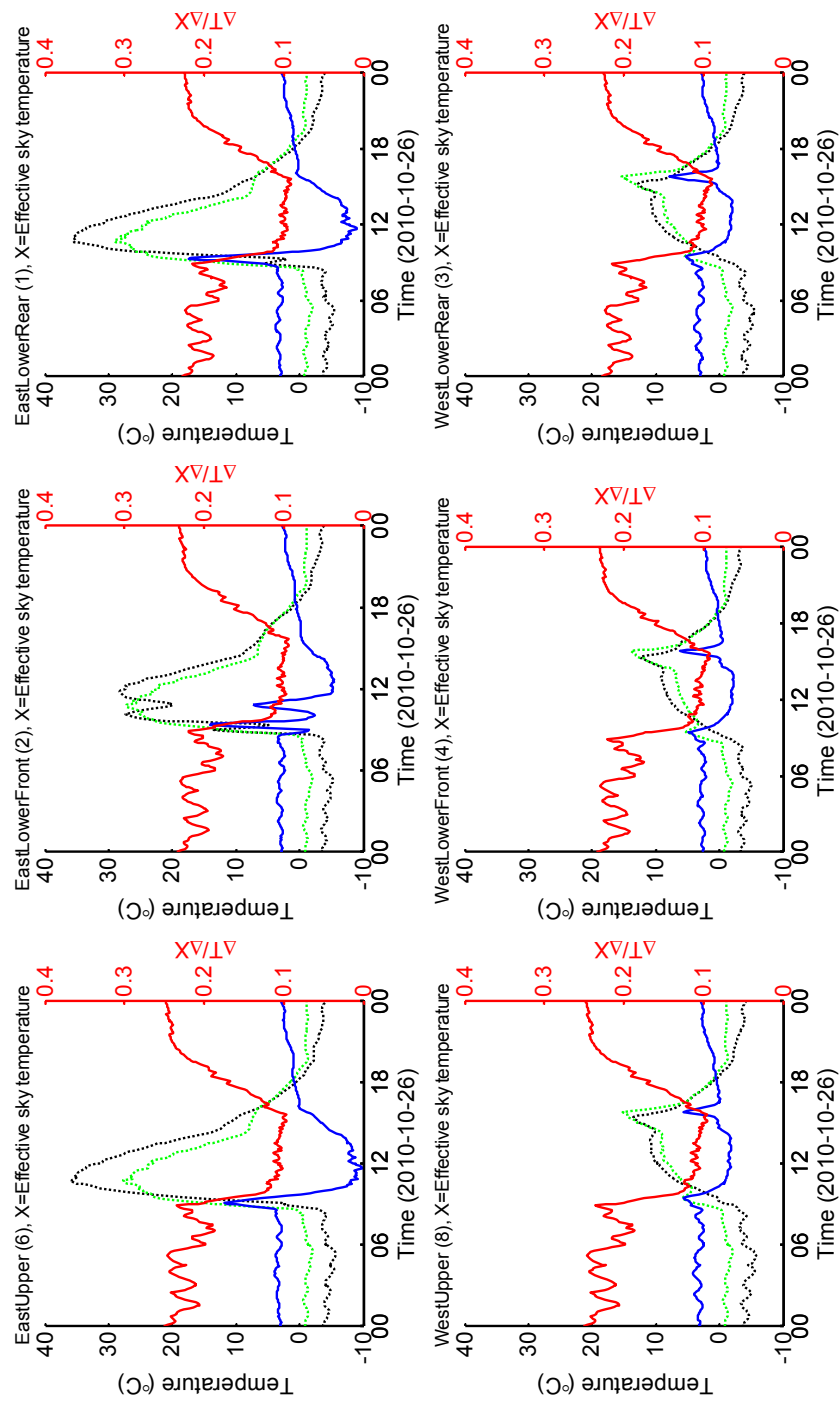
Figur A33. Känslighet för totala solinstrålningen (kortvågig IR), 2010-10-26.



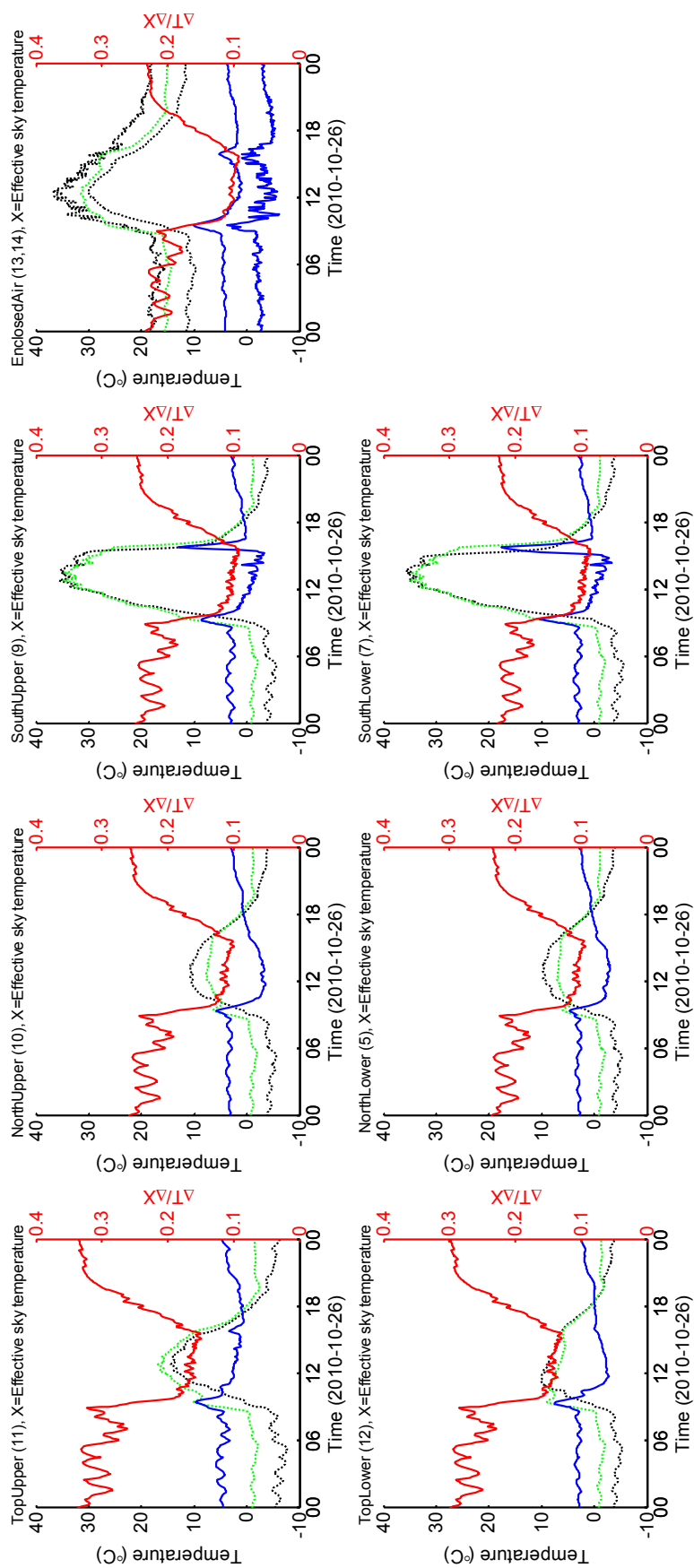
Figur A34 Känslighet för diffusa solinstrålningen (kortvägig IR), 2010-10-26.



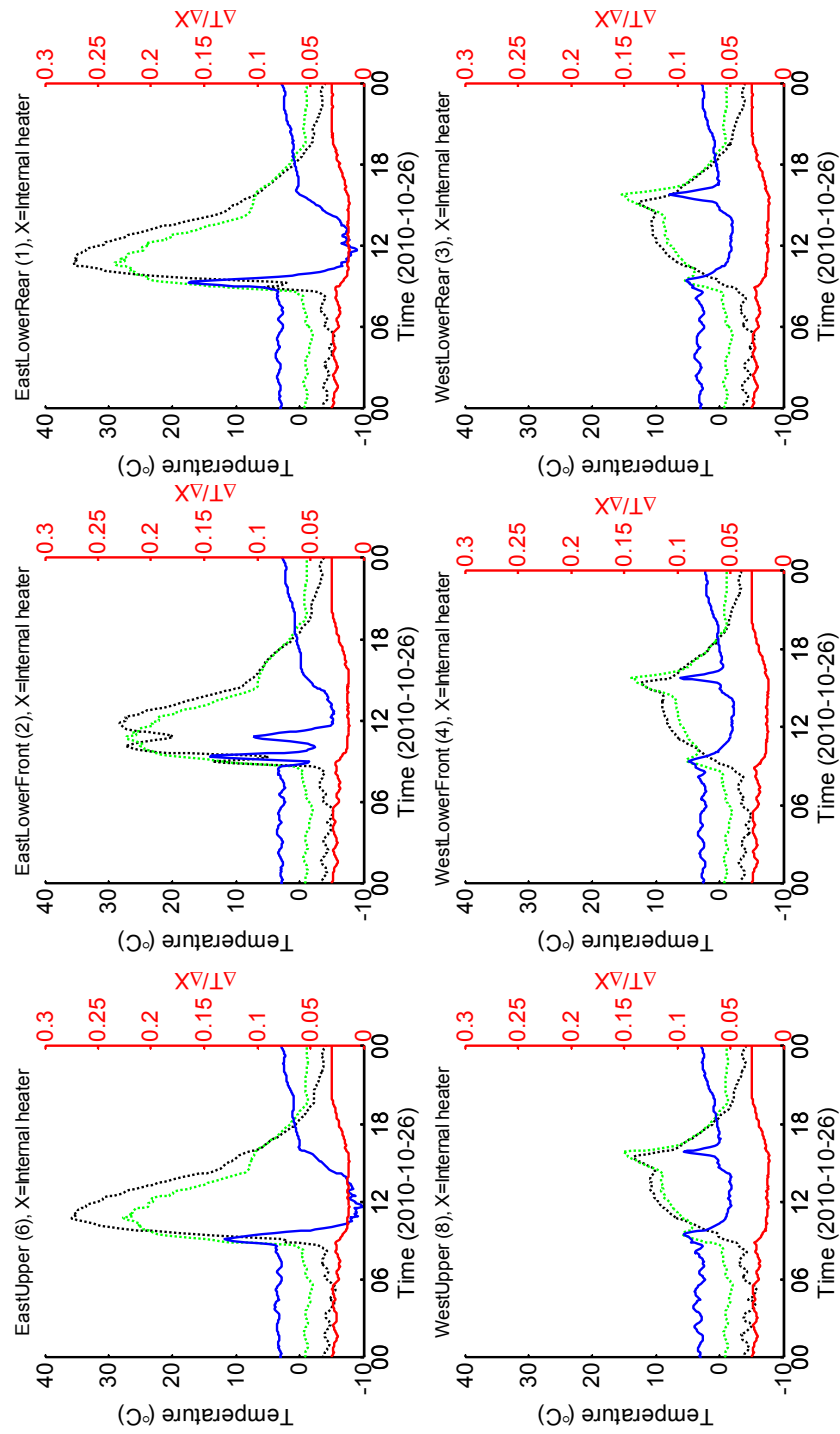
Figur A35. Känslighet för diffusa solinstrålningen (kortvågig IR), 2010-10-26.



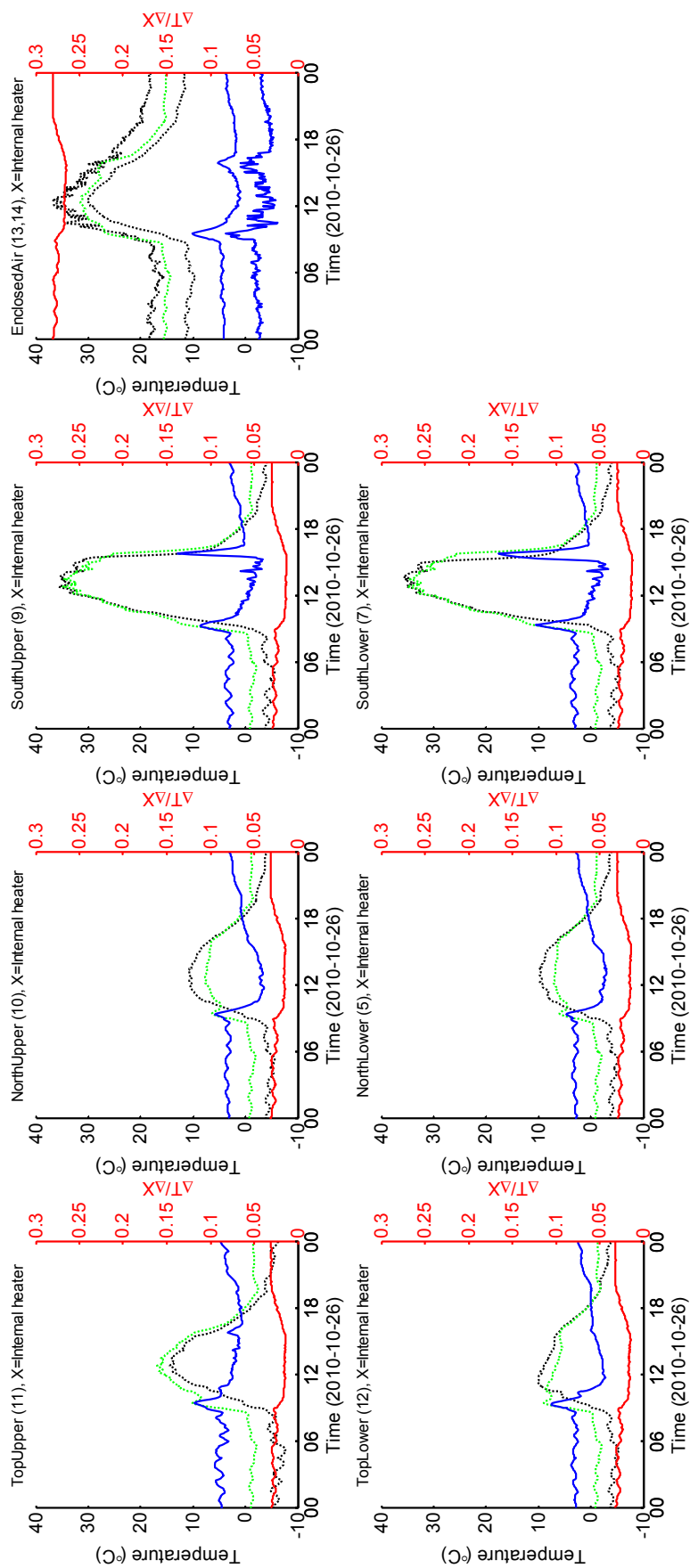
Figur A36. Känslighet för effektiva himmelstemperaturen (långvågig IR), 2010-10-26.



Figur A37. Känslighet för effektiva himmelstemperaturen (långvågig IR), 2010-10-26.



Figur A38. Känslighet för inre värmekälla, 2010-10-26.



Figur A39. Känslighet för inre värmekälla, 2010-10-26.