

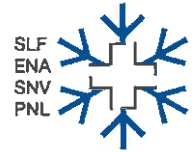
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca
Istituto federal da controlla da material e da retschertgas
Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

EMPA
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
Tel. +41-1-823 55 11
Fax +41-1-821 62 44

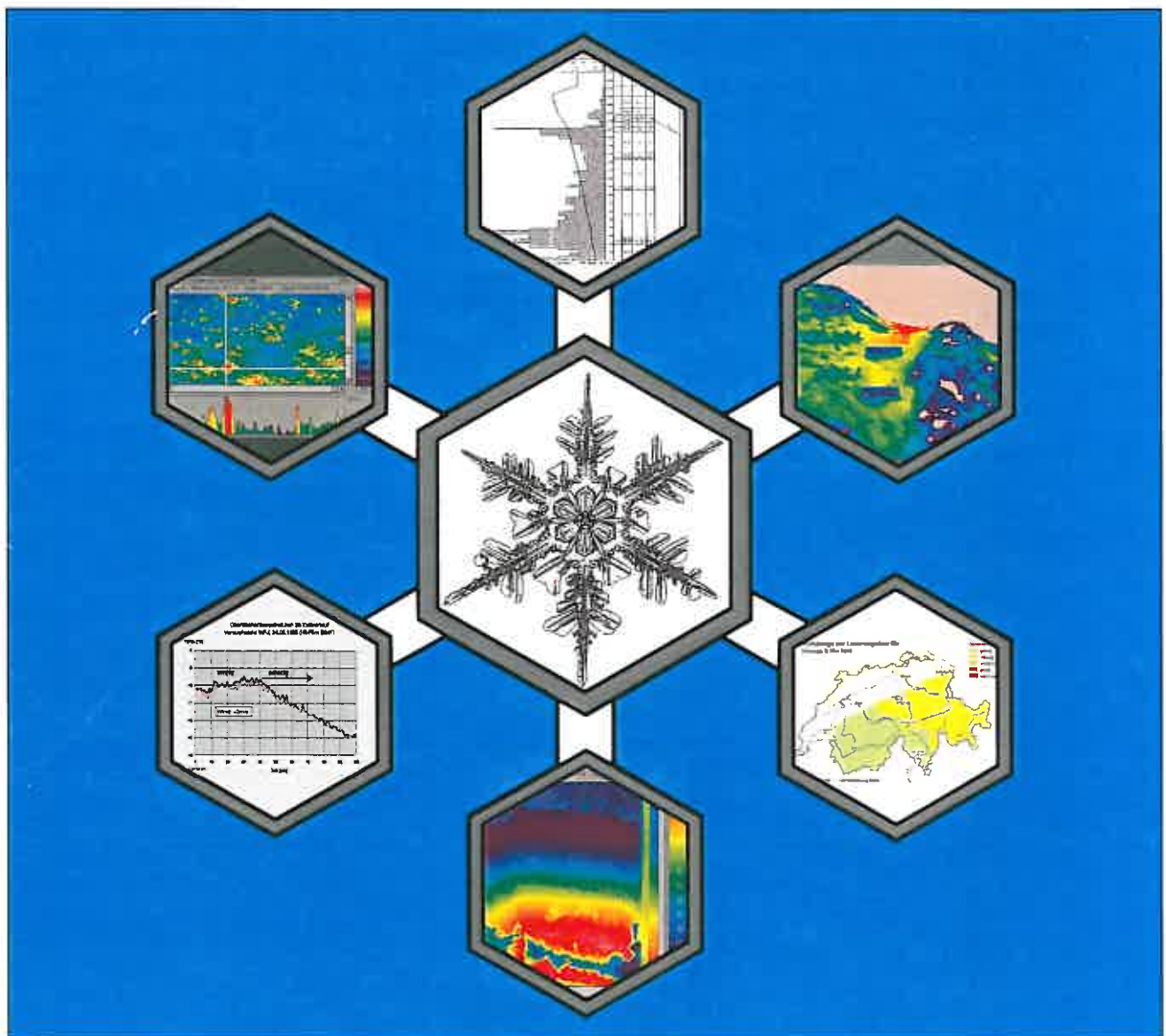


Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung
Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches
Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe
Istituto Federal per la Perscrutaziun da la Naiv e da las Lavinias
Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research

SLF
Flüelastrasse 11
CH - 7260 Davos Dorf
Tel. +41 81 417 01 11
Fax: +41 81 417 01 10



Einsatzmöglichkeiten der Thermografie im Gebirge



Bericht vom Weiterbildungsaufenthalt von Christoph Tanner,
EMPA Abteilung Bauphysik, am Eidgenössischen Institut für
Schnee- und Lawinenforschung Davos. Januar - Juli 1998

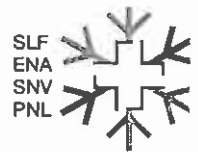
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca
Istituto federal da controlla da material e da retschertgas
Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

EMPA
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
Tel. +41-1-823 55 11
Fax +41-1-821 62 44



Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung
Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches
Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe
Istituto Federal per la Perscrutaziun da la Naiv e da las Lavinias
Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research

SLF
Flüelastrasse 11
CH - 7260 Davos Dorf
Tel. +41 81 417 01 11
Fax: +41 81 417 01 10



Einsatzmöglichkeiten der Thermografie im Gebirge

**Gemeinschaftsprojekt
EMPA / SLF**

EMPA internes Projekt Nr. 170 805

**Bericht vom Weiterbildungsaufenthalt von Christoph Tanner,
EMPA Abteilung Bauphysik, am Eidgenössischen Institut für
Schnee- und Lawinenforschung Davos. Januar - Juli 1998**

Autor
Druck
1. Auflage
Druckkosten
Copyright

Christoph Tanner, EMPA Bauphysik
EMPA Dübendorf
Sepl. 1998 60 / d
CHF 50.- / Stk.
© by EMPA ct und SLF Fö

Inhalt

	Seite
1. Zusammenfassung / Summary	5
2. Vorwort zum meinem Weiterbildungsaufenthalt am SLF	6
3. Thermografie-Aufnahmen im Gebirge	8
4. Übersicht der geleisteten IR-Einsätze	9
5. Resultate der Einsätze 01 bis 16	10
6. Weiteres Vorgehen	56
Anhang	57

Im Bericht verwendete Abkürzungen:

Dok	Dokumentation zum Bericht (Ordner mit allen Arbeitsunterlagen wie Fotos, Skizzen, Diagramme, Beschreibungen etc. Je ein Exemplar bei SLF/Fö und EMPA/ct)
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf
ENET	Ergänzungsnetz (Station für Wetterdaten der SMA)
Film [B 0 ...]	IR-Bilderserie als „Film“, max. Bildfrequenzen 1 Bild/ Sek. Diese Filmsequenzen sind im Speicher des Aufnahmegerätes sowie in den Akten auf Video und CD.
IMIS	Interkantonales Mess- und Informationssystem (für die Lawinenwarnung)
IR-Bild	Infrarot (= Thermografie = Wärmebild)
MFH	Mehrfamilienhaus
MST	SLF-Messstation: Meteo, Setzung, Temperatur
SLF	Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos
WFJ	Weissfluhjoch (Station und SLF Gebäude: 2670 m, Versuchsfeld: 2540 m)
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf

Dank

Es ist für mich nicht selbstverständlich, dass in der heutigen Zeit, wo die Mittel immer knapper werden und der Erfolgsdruck für jede Stufe im Betrieb ständig steigt, jemand einen halbjährigen Weiterbildungsaufenthalt absolvieren darf.

Ich möchte mich deshalb ganz herzlich bei allen bedanken, die meinen Aufenthalt in Davos ermöglichten und/oder mich dabei tatkräftig unterstützten. Speziellen Dank dafür gilt:

RCK	EMPA, Bewilligungsinstanz
Thomas Frank	EMPA, Abteilungsleiter Bauphysik
Dr. Hans Simmler	EMPA, Leiter Bauphysiklabor

Dr. Walter Ammann	SLF, Institutsleiter
Dr. Paul Föhn	SLF, Leiter Sektion I

1. Zusammenfassung

Im Winter 1997/1998 testete Christoph Tanner, EMPA Abteilung Bauphysik, im Rahmen eines Weiterbildungsaufenthaltes am SLF, ob Thermografie Aufnahmen im Schnee sinnvoll sind und neue Erkenntnisse über das thermische Verhalten der Schneedecke bringen können.

Eingesetzt wurde eine mobile Anlage (Nec) die im Infrarotbereich 8-13 μm arbeitet und eine Auflösung von 256 x 207 Bildpunkten hat. (Detailangaben zur IR-Kamera: Anhang 1 - 3)

Die Resultate der Aufnahmen sind erstaunlich. So konnte z.B. aufgezeigt werden, dass die Oberflächentemperatur der Schneedecke nicht ein „fixer Wert“ ist, sondern dass sie je nach Zeitintervall und Oberflächenstruktur einen Mittelwert aus verschiedenen Temperaturen darstellt. Dies sind zwar keine grundlegend neuen physikalischen Erkenntnisse, aber sie konnten bisher weder quantitativ erfasst, noch zweidimensional visualisiert werden.

Eine weitere Neuheit sind IR-Bilder von Schneeprofilen. Sie liefern je nach Distanz zur Profilwand Temperaturangaben in Millimeter Abständen und das noch im Sekundenintervall, so dass thermische Veränderungen sofort erkennbar werden. Solche Daten können von Hand, vor allem in den oberflächennahen Schichten, gar nicht zuverlässig gemessen werden.

Verschiedene Beiträge erklären, warum die Themen Einstrahlung, Abstrahlung, Absorption und Reflexion so wichtig sind für das Entstehen der Oberflächentemperatur und damit auch für die Interpretation von IR-Bildern.

Schliesslich wurden mehrere Einsätze, auch solche ohne Schnee, zu Gunsten von SLF und WSL Projekten (z.T. Dissertationen) geleistet.

Dieser Bericht ist ein Arbeitsrapport, der chronologisch geordnet ist. Er erhebt nicht den Anspruch wissenschaftlich vollständig zu sein, sondern er soll einige Möglichkeiten und Grenzen für den IR-Einsatz im Gebirge aufzeigen und zu weiteren Arbeiten animieren.

Summary

During the winter 1997/1998 Christoph Tanner, the author of this report, tested as a research fellow at the SLF the possibilities of thermography measurements in snow. The intention was to find out if and how useful these techniques would be to clarify the thermal behaviour of a snowcover.

The main instrument consisted of a mobile thermal scanner (Nec), covering the range of 8–13 μm and having a resolution of 256 x 207 pixels. The details of these infrared instrument (IR) are given in appendix 1 - 3.

The results of the tests are astonishing. The surface temperature of a snowcover is not a firm value, neither in time nor in space. According to the measurement intervals and the surface structure this temperature fluctuates quite a bit. Of course these findings are not new in a physical sense but they could not be visualized and quantified until now.

A novelty are also the produced IR pictures of snowprofiles. They yield according to the chosen resolution, the temperature distribution within a few millimeters and within a few seconds. So the thermal changes are clearly visible. Such kind of data may not be gained by using traditional thermometers.

In various chapters examples are presented, which have been evaluated in snow, show why components as incoming radiation, outgoing radiation, absorption and reflection are so important when looking at the surface temperature results.

Finally also a few campaigns are described, which are carried out in other fields (e.g. permafrost or forest fires) and which are sometimes also evaluated in favour of ongoing thesis works.

This report is a chronological record of our work. From a scientific point of view it is not complete. But it shall show up some possibilities to use IR technology in mountain areas and it shall encourage the future use.

2. Vorwort zum meinem Weiterbildungsaufenthalt am SLF

2.1 Ziel und Zweck

Nach meiner 10-jährigen Tätigkeit in der EMPA, Abteilung Bauphysik, erlaubte ich mir, einen Weiterbildungsaufenthalt am Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos, das Teil der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf ist, zu beantragen. Die Wahl für diese persönliche Horizonterweiterung ans SLF zu gehen, erfolgte, weil interessante Arbeitsthemen, ein neues Umfeld (eine anderer Forschungsplatz), die Zusammenarbeit mit bekannten Schneeforschern (Physikern) und ein phantastischer Ort, beste Voraussetzungen für motiviertes Arbeiten boten. Der Zeitpunkt für das erste Halbjahr 1998 entstand aus „schneetechnischen“- und nicht zuletzt auch aus familiären Gründen, denn ein halbjähriger Umzug von Winterthur nach Davos ist einfacher, wenn die Kinder noch nicht zur Schule gehen. Der ganze Aufenthalt wurde sowieso nur möglich, weil meine Familie (Frau mit zwei kleinen Kindern) mit nach Davos kommen konnten, wo wir an der Dischmastrasse 20 für ein halbes Jahr eine 3½-Zimmer Wohnung beziehen konnten.

Auch für die EMPA ist die Destination SLF Davos interessant, da die interdisziplinäre Zusammenarbeit und damit das Nutzen von Synergien zwischen Institutionen des Bundes wichtig und notwendig ist. Es war zudem die erklärte Absicht im Pflichtenheft für meinen Aufenthalt, die praxisorientierte Forschung zu fördern, und Kontakte für weitere Gemeinschaftsprojekte zu knüpfen.

2.2 Finanzierung

Da das SLF von meinem Einsatz ebenfalls profitierte, wurde folgende Finanzierung vereinbart: Lohnzahlung für die ganze Aufenthaltsdauer durch die EMPA (bezahlter Urlaub), sämtliche Spesen und Nebenkosten (Dienstreisen, Wohnungskosten etc.) wurden vom SLF getragen.

2.3 Der gemeinsame Nenner von Bauphysik und Schneeforschung (oder: "wie kommt ein Architekt zum SLF ...")

Der folgende Laufbahnbeschrieb zeigt die Gründe, die mich motivierten einen Weiterbildungsaufenthalt am SLF zu beantragen:

Meine berufliche Laufbahn führte mich nach dem Architekturstudium am Technikum Winterthur (Abschluss 1982) durch verschiedene Architekturbüros in Winterthur, wobei ich mir im Planungs-, Konstruktions- und Bauleitungsbereich die notwendigen Praxiserfahrungen aneignete.

1987 erfolgte dann mein Einstieg bei der EMPA in die Abteilung Bauphysik, wo ich heute verschiedene Prüfungen rund um die Gebäudehülle durchführe. Eines der Schwergewichte liegt bei Untersuchungen des Wärmedurchgangs (k-Wert). Dies können Messungen im Labor oder vor Ort sein, wobei öfters auch die Infrarot-Anlage zum Einsatz kommt. Ferner bearbeite und analysiere ich auch Baumängel und -schäden, vor allem im wärmetechnischen Bereich, und/oder erstelle Expertisen. Im wissenschaftlichen Sektor führe ich praxisorientierte Forschungsarbeiten durch (Bsp. hinterlüftete Fassaden, Wärmebrücken) und gebe die Kenntnisse an Schulen und Baupraktiker weiter.

Als Hobby betreibe ich den Berg- und Skisport und bin Wintertourenchef der Sektion Winterthur des Schweizerischen Alpenclubs SAC. Ich kenne daher das SLF, seine Aufgabenbereiche und speziell seine Dienstleistungen schon seit langer Zeit.

Dazu kommt, dass ich einige der bekannten Lawinen- und Schneeforscher (Föhn, Salm, Good) aus der Militärzeit kenne, da Sie mich dort zum Lawinenoffizier ausgebildet haben.

Aber auch auf rein privater Basis erstellte ich schon diverse Studien und Papiere zu verschiedenen Aspekten der Lawinenbeurteilung und diskutierte diese mit SLF Mitarbeitern.

Mit diesen kombinierten Kenntnissen war mir schon seit längerem klar, dass die physikalischen Problemstellungen betreffend der Gebäudehülle sehr ähnlich denjenigen in der Schneedecke sind (Wärmedurchgang, Temperaturgradient, Wasserhaushalt, Diffusion, instationäres Verhalten etc.). Es folgte der Gedanke, einmal detaillierter die von den Schneeforschern eingesetzten Messgeräte und -methoden kennen zu lernen und mit den unsern (EMPA Bauphysiklabor) zu vergleichen. Nach ersten Abklärungen zeigte sich dann, dass auch die SLF-Forscher starkes Interesse an unserer Infrastruktur bekundeten, dies speziell im Bezug auf die Infrarot-Anlage, welche dank dem neuen, mobilen Modell (Nec TH 3101, 1996) und meinen praktischen Erfahrungen „schneetauglich“ ist.

2.4 Weitere Arbeitsthemen

Aus bauphysikalischer Sicht ist die Landschaft Davos mit einer Höhe von ca. 1550 m.ü.M. wegen des strengen Klimas eine Besonderheit. Die im Winter über lange Zeit liegende, dicke Schneedecke und die kalten Temperaturen wirken sich hier für den Wärmedurchgang durch die Gebäudehülle viel stärker aus, als im Schweizerischen Mittelland. Bis heute gibt es aber kaum Messdaten, die aufzeigen, welche wärmetechnische Auswirkung eine Schneedecke auf eine Dachkonstruktion hat. Ein Messprojekt an einem nicht durchlüfteten Flachdach in Davos soll Auskunft darüber geben.

Im didaktischen Bereich der Lawinenkunde interessiert mich seit langem die Frage der Beurteilungskriterien für die Lawinengefahr, speziell für den Skitouristen und den Skifahrer. In den letzten Jahren zeigte sich, leider aus Unfallereignissen, dass einige der bisherigen Entscheidungshilfen für die Praxis nicht genügen. Neue Methoden für eine Risikoabschätzung wurden vorgeschlagen (Buch „3 x 3 Lawinen“, 1997), werden aber zur Zeit in Fachkreisen noch heftig diskutiert und müssen auf ihre Praxistauglichkeit überprüft werden. Zu diesem, für die Ausbildung sehr wichtigen Bereich, lege ich kritische Gedanken vor und werfe einige eigenen Ideen in die Diskussion.

Davos-Dorf, 10.07.1998

Der Verfasser:



Christoph Tanner

3. Thermografie-Aufnahmen im Gebirge

Der Begriff „Thermografie-Aufnahme“ bedeutet das selbe wie „Infrarot-Bild“ (IR), „Wärmebild“, oder „Thermogramm“. Detaillierte Angaben über die IR-Kamera siehe Anhang 1 - 3

Bei den Vorbesprechungen für den Weiterbildungsaufenthalt war klar, dass die Thermografie-Anlage der EMPA eines der interessantesten Messgeräte für den Einsatz im Schnee sein wird. So meldeten denn auch mehrere SLF-Forscher schon im Vorfeld Bedarf für IR-Einsätze an. Die IR-Anlage der Abteilung Bauphysik (Nec, Typ TH 3101) ist vor allem deshalb von Interesse, weil sie mobil und rucksacktauglich ist, was eine unbedingte Voraussetzung für Einsätze im Schnee ist.

Obwohl in der Forschung heute mehr und mehr Aufwand im Bereich Simulation betrieben wird - das ist bei der Schneeforschung nicht anders als in der Bauphysik - so werden doch all diese Modelle einer komplexen Materie wie dem Schnee, nur zum Teil gerecht. Es wird auch in Zukunft immer Messverfahren brauchen, welche diese Computermodelle verifizieren. Die Infrarot-Kamera kann das im Bereich der Temperaturbestimmung nicht nur problemlos bieten, sondern sie kann mit der 2-dimensionalen, hochauflösenden und schnellen Temperaturmessung Vorgänge visualisieren, die zumindest vorläufig keinem Modell zugänglich sind.

Aus diesem Grund bin ich der Ansicht, dass die zukünftige Schneeforschung mehr und mehr mit der Thermografie wird arbeiten müssen und wollen. Die Resultate meiner Einsätze haben genügend interessante Erkenntnisse gebracht und bereits weitere Möglichkeiten dieser „neuen Dimension“ aufgezeigt. Nicht zuletzt weil heutige IR-Anlagen feldtauglich und erschwinglich geworden sind, wird dieser Bericht nicht das letzte IR-Kapitel für das SLF sein ...

Meine Erfahrung im Umgang mit der IR-Anlage stammt natürlich aus der Bauphysik resp. aus der Anwendung in der Baupraxis. Der grosse Unterschied bei Einsätzen im Schnee ist der, dass vorwiegend kurzzeitig-instationäre Zustände beobachtet werden. Die relevanten Änderungen treten dabei im Bereich von Sekunden und Minuten auf, was bedeutet, dass für die Visualisierung eines Problems meist IR-Filmsequenzen aufgenommen werden müssen.

Was hingegen gleich ist wie bei der Bauthermografie, ist die Tatsache, dass oftmals die Temperaturdifferenzen und nicht unbedingt die absoluten Temperaturen von Interesse sind. Diese Differenzwerte sind aus den IR-Bildern sehr genau zu ermitteln (bis $1/10$ °C), sofern die Vergleichsflächen nicht unterschiedliche Emissionswerte haben oder Reflexionen zeigen.

Für eine IR-Bildinterpretation ist es wichtig, dass man die Oberflächeneigenschaften des Objektes kennt, denn durch die Absorptions-, Emissions- und Reflexionswerte sowie allenfalls Veränderungen des Blickwinkels, kann das Bild erheblich beeinflusst werden. Sind einzelne Werte nicht genau bekannt (wie z.B. bei Nassschnee), so besteht ein entsprechender Interpretations-Spielraum.

Während meines Aufenthaltes in Davos erzeugte ich ca. 1500 IR-Bilder (z.T. in Filmsequenzen). Da die detaillierte Auswertung dieser Aufnahmen mittels der IRIS Software (= IR Auswerteprogramm) auch für mich Neuland war und viel Zeit in Anspruch nahm, wurde darauf verzichtet, weitere Messgeräte im Schnee zu testen (λ -Wert Messsonde, Wärmeflussmesser, Feuchtigkeitsmessgeräte u.a.).

Das Potential für zukünftige (Mess)Projekte der EMPA Abteilung Bauphysik mit dem SLF ist gross. Einige weitere wünschenswerte IR-Einsätze sind in Kapitel 6 formuliert.

Das selbe gilt auch für die Zusammenarbeit mit der WSL (in Birmensdorf), wo neben dem Waldbrandversuch (Einsatz 15, ausgeführt als Bundesauftrag) bereits weitere Zusammenarbeiten vorgesehen sind.

Für alle Interessenten an dieser Technologie gilt es zu bedenken, dass sich die Wärmebildtechnik, genau wie die Computertechnik, rasant entwickelt, und damit die hier präsentierten Möglichkeiten, von einer Kamera mit Jahrgang 1996, schon in wenigen Jahren „Schnee von gestern“ sein werden!

Der vorliegende Bericht ist ein Arbeitsrapport. Die Kapitel sind deshalb chronologisch geordnet, so dass Aspekte einzelner Themen in mehreren Kapiteln abgehandelt werden.

4. Übersicht der geleisteten IR-Einsätze:

Kapitel	Datum	Ort	Objekt / Thema
5.01	08.01.1998	Versuchsfeld WFJ	Schafläger NE-Hang, Mittelgrat S-Hang, Sonne-Schatten, Vergleiche mit SLF IR-Fühlern, Wind auf dem Versuchsfeld, mit Dr. Paul Föhn
5.02	09.01.1998	Labor D SLF Davos	Heizplatte für Schneenumwandlung Aufnahmen für Dr. Martin Schneebeli, SLF
5.03	09.01.1998	Versuchsfeld WFJ	Schneeprofil mit Temperaturverlauf, mit Dr. Paul Föhn
5.04	14.01.1998 21.01.1998	Büro B112 SLF Davos	Dorfberg SE-Hang, nach Schneefällen
5.05	14.01.1998	Kältelabor SLF Davos	Schneeblock und Schale mit Schnee-Wassergemisch, Vergleichstemperaturen mit Thermoelementen
5.06	15.01.1998	Passstrasse, Flüelapass	Flop: Lawinenhunde-Uebung, dafür: Landschaft, Berge, Hänge
5.07	20.01.1998 21.01.1998	Garten SLF Davos	Temperaturvergleiche, Abstrahlung, verschiedene Blickwinkel auf Versuchsfeld
5.08	23.01.1998	Seewiesenstr. Davos	Hauswand MFH (Nordfassade) aus verschiedenen Distanzen
5.09	26.01.1998	Schafberg Pontresina	Projekt „Lawinerverbauungen im Permafrost“ Aufnahmen für Patrik Thalparpan und Marcia Phillips, SLF Versuchshang und diverse Landschaften (Helikopter)
5.10	27.01.1998	vor Mattawald Davos	Makro: Schneeoberflächen mit Reif, verschiedene Distanzen, Schneeprofil mit Temperaturverlauf
5.11	02.03.1998	Flüelastr. 5 Davos	„Wärmeflussmessungen an einem Flachdach, Projekt von Christoph Tanner, EMPA Wärmebrücken-Check auf Wohnungsdecke
5.12	10.03.1998 13.03.1998	Garten SLF Davos	Projekt „Schneeinterzeption an Bäumen“ Aufnahmen für Rolf Pfister, SLF
5.13	17.03.1998	NE-Hang „Wäng“ Pische	Projekt „ABS Rucksäcke“ (Avelanche Ballon System) Aufnahmen für Martin Kern, SLF Beobachtung eines Lawinenabgangs (mit Sprengung)
5.14	24.03.1998	Versuchsfeld WFJ	Strahlungseinflüsse auf Versuchsfeld und Umgebung, Schneeprofil mit Temperaturverlauf (Wind !)
5.15	27.03.1998 28.03.1998	Vigana, Tessin Gemeinde St' Antonio	Projekt „Feuerexperiment“, ein kontrollierter Waldbrand im Tessin, Vorbereitungen am SLF, Aufnahmen für Marco Conedera, WSL
5.16	22.06.1998	Flüelapass	Kalibrierung der Kamera, Emissionswert von feuchtem Schnee, Reflexionen im Wasser und im Schnee

5. Resultate der Einsätze 01 bis 15

Alle mit Dok und Film [...] bezeichneten Dokumente sind bei den Akten. Je ein Exemplar ist beim SLF (Fö) und bei der EMPA (ct,176).

Einsatz 01:

Ziel: Erster Feldversuch, Erfahrungen sammeln, Schneetauglichkeit testen, Vergleichsmessungen, Zusammenarbeit mit Dr. Paul Föhn, SLF

Datum: 08.01.1998	Ort: Versuchsfeld WFJ	Objekt / Thema: Schafläger NE-Hang, Mittelgrat S-Hang, Sonne-Schatten, Vergleiche mit SLF IR-Fühlern, Wind auf dem Versuchsfeld u.a.
-----------------------------	---------------------------------	--

Wetter: Für alle Aufnahmen dieses Einsatzes: schönes, kaltes Winterwetter, Wind bis ca. 1 m/s.

5.01.1 Vergleich von Schnee-Oberflächentemperaturen zwischen IR-Fühlern des SLF und IR-Bildern der EMPA Kamera auf dem Versuchsfeld WFJ

Resultate:

Messgerät	Messwert:	Datenerfassung	Messfläche vgl. Bilder nebenan	Höhe über Schnee- oberfläche
Aus IR-Bild EMPA	ca. - 21.8 °C (mit E = 0.98)	im Sekundenintervall	1 Pixel: ca. 4.5 cm ²	Distanz: ca. 7.5 m Blickwinkel: ca. 20 °
Mit MST IR- Fühler SLF	ca. - 24.0 °C	½ Std. Werte, Mittel aus 1 min. Intervallen	ca. 310 cm ²	ca. 1 m
Mit Meteo-IR- Fühler SLF	ca. - 26.5 °C	½ Std. Werte, Mittel aus 1 min. Intervallen	ca. 2830 cm ²	ca. 3 m
Mit ENET IR- Fühler SLF	ca. - 23.5 °C	1 Std. Werte, Einzelmesswerte	ca. 1960 cm ²	ca. 2.5 m

Bilder zu Tabelle siehe Seite nebenan sowie Dok 1.8 ff. und Film [B 031]

Wichtige Zusatzinformationen für Vergleiche:

- Wellenlängenbereiche: IR-Kamera: 8 - 13 µm, SLF IR-Fühler: 6.5 - 14 µm
- Im Gegensatz zu den SLF IR-Fühlern hatte die IR-Kamera einen schrägen Blickwinkel (ca. 20°) auf die Vergleichsfläche (vgl. Tabelle). → Winkelabhängigkeiten siehe Kap. 5.07
- Sinnvoll ist nur ein Vergleich der Werte vom IR-Bild und dem MST IR-Fühler, da nur hier der gleiche Punkt des Versuchsfeldes beobachtet wurde (Die folgenden Kapitel 5.01.2 bis 5.01.4 begründen das). Siehe auch Dok 1.9.d und 1.8
- Ein Vergleich mit dem ENET IR-Fühler (mit Stundenwerten) ist sehr problematisch, da die IR-Bilder zeigen, dass die Oberflächentemperatur mit Schwankungen im Sek. Bereich reagiert.

Mögliche Gründe für Differenzen zwischen MST IR-Fühler und IR-Bildern:

- IR-Kamera Blickwinkel zu Oberfläche (muss noch getestet werden, erfahrungsgemäss hat der Winkel jedoch bei hoher Emission (Epsilon) praktisch keinen Einfluss (vgl. Kap. 5.05 und 5.07)
- Epsilon Einstellungen (Literatur- und Erfahrungswerte SLF für trockenen Schnee: ca. 0.98)
- leicht unterschiedlicher Spektralbereich (→ grössere Bandbreite der SLF IR-Fühler)
- Geräte-Offset

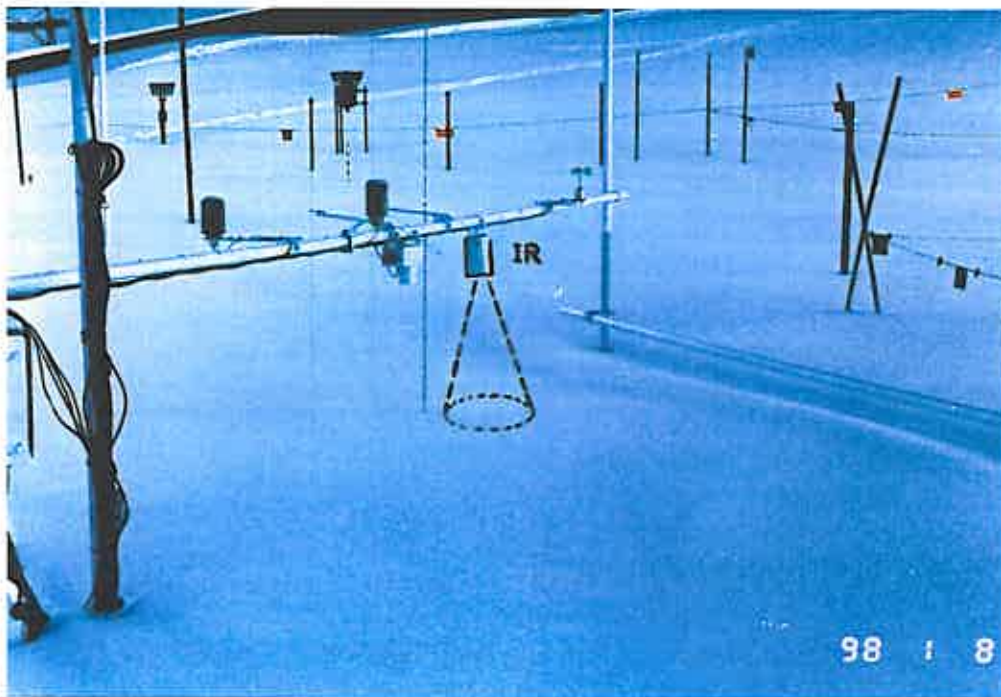


Bild oben:
Normalfoto vom Versuchsfeld WFJ, bei der MST Station (mit MST IR-Fühler in Bildmitte)

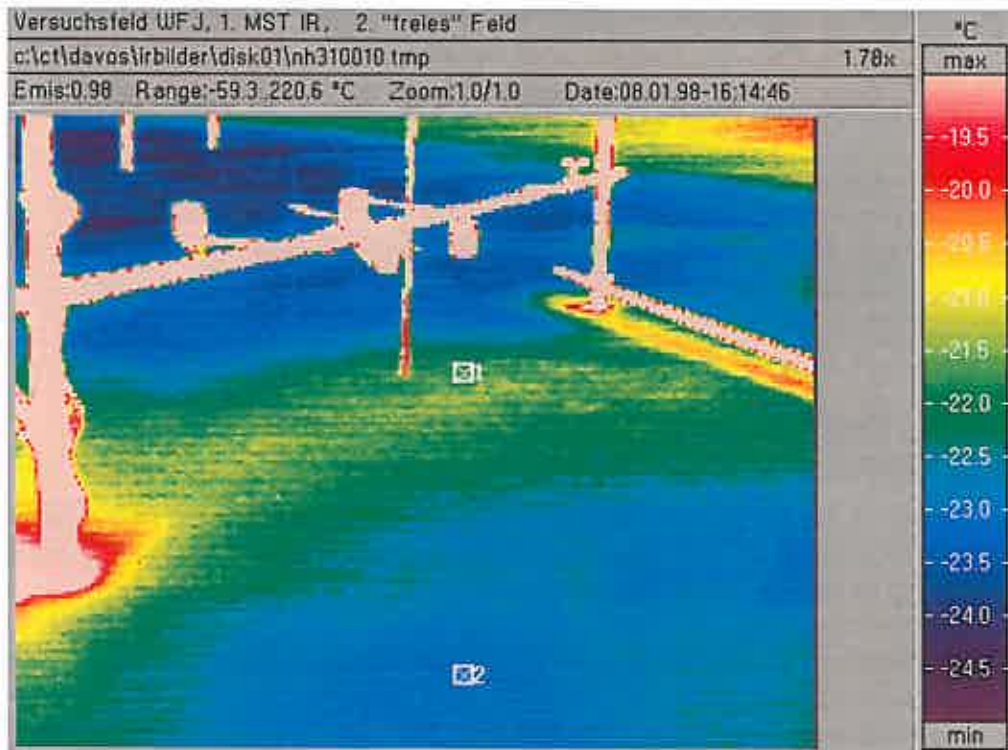


Bild oben:
IR-Bild von der Situation oben (Normalfoto). Klar zu erkennen ist die stark verminderte Abstrahlung unter der horizontalen Stange rechts (ca. 10 cm über der Schneeoberfläche). Eine diffuse Auswirkung zeigt sich als grünes Band, unter der langen Stange links, mit dem MST IR-Fühler (ca. 1 m ü.O.).
Weniger Abstrahlung = höhere Oberflächentemperatur.
weitere Info zum Bild: Kap. 5.01.2 auf folgender Seite

- 1 Messzone des MST IR-Fühlers → Datenpunkte für Diagramm auf folgender Seite
- 2 „ungestörte“ Oberfläche

5.01.2 MST IR-Temperatur ist nicht repräsentativ

Die MST IR-Temperatur entspricht bei Strahlungswetter und geringem Wind mit der vorhandenen Installation nicht der repräsentativen Oberflächentemperatur auf dem Versuchsfeld! *Sie ist ca. 1 °C zu hoch!*

Grund: Der MST IR-Fühler hängt an einer Querstange (ca. 1 m über dem Schnee), die eine volle Abstrahlung der Schnee-Oberfläche verhindert.

Dokumentation:

- IR-Bild vorhergehende Seite: Ein breites „warmes“ Band ist unter der Stange auf der Schneeoberfläche zu erkennen.
- Deutlich erkennbar vor allem in den IR-Bildern auf Film [B 031]. Zusätzlich: Mit einem „Subtraktionsfilm“ [B 031] entfällt das diffuse Band und es sind nur noch die Windauswirkungen auf der Oberfläche sichtbar.
- Weiteres Daten- und Bildmaterial: Dok 1.7 bis 1.9

5.01.3 Windeinfluss auf Oberflächentemperatur

Bei Strahlungswetter haben auch geringe Windgeschwindigkeiten resp. Schwankungen der Luftgeschwindigkeit eine sofortige und deutliche Auswirkung auf die Oberflächentemperatur. „Luftpakete“ ziehen über die Oberfläche und beeinflussen innert Sekunden die Temperatur.

Beobachtete Differenzen innerhalb von 5 Min. mit v Luft 0.5 - 1 m/s (= wenig): ca. 1.5 °C

Folglich ist die Schnee-Oberflächentemperatur nicht ein fixer Wert (wie wahrscheinlich viele meinen), sondern sie ist stets eine Mittelwertangabe, mit erheblichen Differenzen.

Eine zusätzliche Bestätigung dieser Aussage ergibt sich aus Makroaufnahmen, jedoch aus anderen Gründen (siehe Kap. 5.10.1)!

Dokumentation:

- Diagramm nebenan und IR-Bilder (unten)
- IR-Bilder (mit Subtraktion) in Kap. 5.09.1
- Film [B 031], oder besser Subtraktionen im Film [B 031] damit das Phänomen der verminderten Abstrahlung durch die Querstange eliminiert wird.
- Weiteres Daten- und Bildmaterial: Dok 1.7 bis 1.9

5.01.4 Unterschiedliche Oberflächentemperaturen innerhalb des Versuchsfeldes WFJ

Die lokalen Temperaturunterschiede (im Bereich einige m²) auf der Oberfläche des Versuchsfeldes (oder ganz allgemein) sind abhängig von folgenden Randbedingungen und können je nach Situation *mehrere* °C für einen beliebigen Zeitpunkt betragen:

- Wind, resp. Wetter allgemein, siehe Kap. 5.01.3
- Der Ab- und Einstrahlungsraum ist nicht für jeden Ort gleich gross (Horizontlage).
- Neigungswinkel der Fläche, siehe Kap. 5.01.5a
- Die Einstrahlung wirkt mit zeitlichen Unterschieden auf die Oberfläche (wandernde Schattengrenzen).
- unterschiedlicher Schneedeckenaufbau (Oberflächenbeschaffenheit, Höhe, Struktur, etc.)
- lokale Störungen durch Felsen, Wald, Gebäude etc. (durch Strahlung oder Konvektion)

Dokumentation:

- siehe Bilder in Kap. 5.14.1
- Film [B 041] mit Versuchsfeld WFJ, Blick ab grosser Baracke, mit Box Vergleichen
- Weiteres Daten- und Bildmaterial: Dok 1.7 bis 1.9, und 14.1.ff.

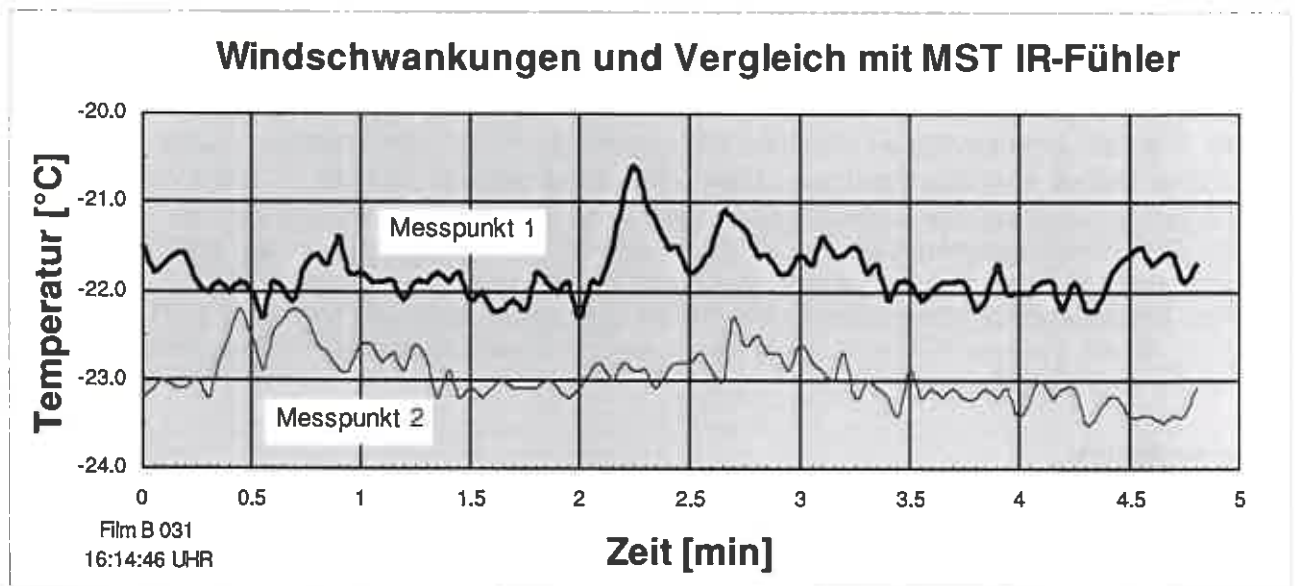
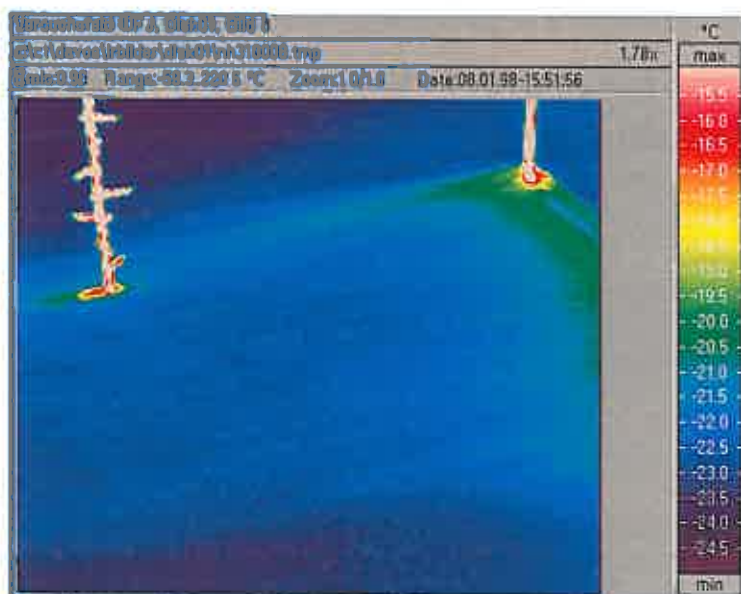
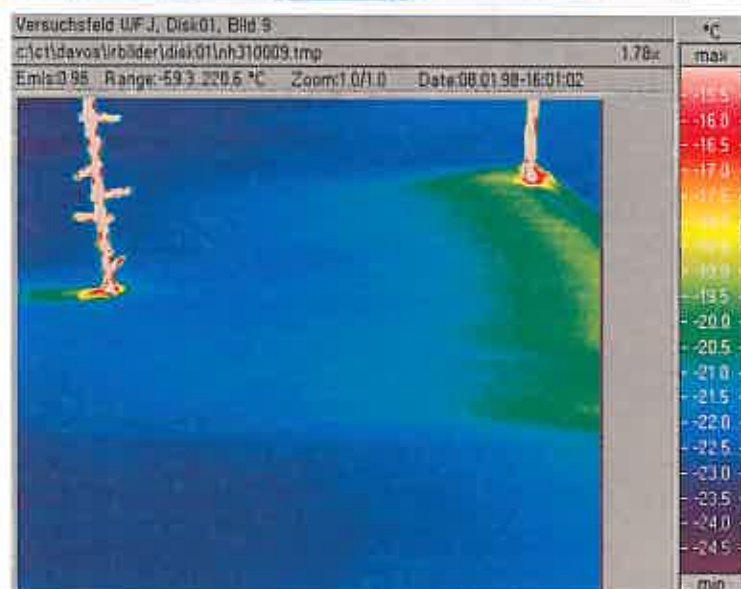


Diagramm: Temperaturen der 2 Punkte (aus IR-Bild vorhergehende Seite) im Verlauf der Zeit.
— ☒ 1 Messzone des MST IR-Fühlers (wärmer!) --- ☒ 2 „freie“ Oberfl. (= mehr Abstrahlung)



Bilder links:

Auf dem Versuchsfeld WFJ.
Je nach Windstärke ändert sich die Oberflächentemperatur lokal sehr schnell. In den Bildern ist sogar eine leicht unterschiedliche Windrichtung zu erkennen.
(links: Schneepegel mit Temperaturmessfühlern an der Spitze, je 20 cm Höhenabstand)



5.01.5a Langwellige Abstrahlung (ohne direkte Sonneneinwirkung): Die Oberflächentemperaturen sind abhängig von der Hangneigung

(Die Ueberlegungen gelten nur für einen Strahlungstag, d.h. einen Tag ohne Wolken.)

Da der Abstrahlungsraumwinkel für einen Oberflächenpunkt mit zunehmender Steilheit des Hanges immer kleiner wird (ein Steilhang „sieht“ tendenziell weniger Himmel → Horizont), haben in *schattigem* (l) Gelände die steileren Hänge wärmere Oberflächentemperaturen als die flachen Hänge. Die Strahlungsbilanz einer Oberfläche wird aber auch bestimmt von der atmosphärischen Gegenstrahlung, welche richtungsabhängig ist und die geringste Wirkung im Zenit hat.

Am Bsp. Blockgletscher Muragl beträgt die Differenz zwischen flach und steil ca: 2.5 °C (siehe Bild nebenan, oben). Weitere Faktoren die einen Einfluss auf die effektive Oberflächentemperatur haben: siehe Kap. 5.01.4

Dokumentation:

Obwohl sich meistens viele Faktoren überlagern, ist das Phänomen der Hangneigungs-Abhängigkeit der Oberfläche in einigen Fällen klar visualisierbar:

- Bilder nebenan, oben und Skizze mitte links
- Dok 3.4, gekrümmte Oberfläche über Schneeprofil
- Dok 9.10, Gletscherplateau unterhalb Piz Muragl

Frage: Gilt das selbe auch für Makroaufnahmen der Schneedecke? Siehe Thema Oberflächenreif, Lage der Reifkristalle, Kap. 5.10.1

5.01.5b Kurzwellige Einstrahlung (von der Sonne) Die Oberflächentemperaturen sind stark abhängig vom Einstrahlwinkel

(Die Ueberlegungen gelten nur für einen Strahlungstag, d.h. ein Tag ohne Wolken)

Je steiler der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf die Schnee-Oberfläche, desto höher die Oberflächentemperatur (zunehmende Intensität). Das stimmt allerdings nur für eine bestimmte Region, da die Intensitäten (bei gleichem Einstrahlwinkel) u.a. von der Höhenlage abhängig sind .

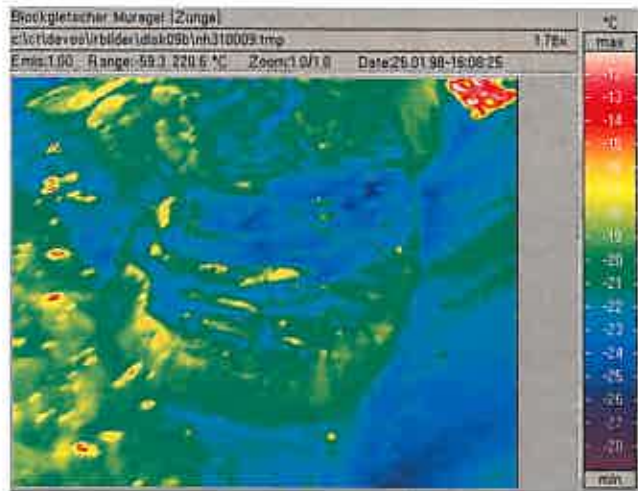
Weitere Faktoren welche den Einfallswinkel bestimmen:

- Hangneigung
- Hangexposition
- Jahreszeit (max./min. Sonnenstand)
- Uhrzeit

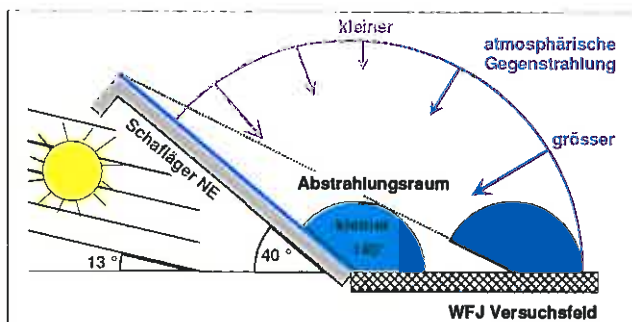
Auf dem Versuchsfeldes WFJ ist aus diesen Gründen am Bsp. vom 08.01.1998 um 14:53 Uhr die Strahlungsintensität am Südhang des Mittelgrates um ca. 290 % höher als auf der Ebene des Versuchsfeldes, was eine Temperaturdifferenz von > 10°C ergibt. (siehe Bild nebenan, unten und Skizze mitte rechts) Weitere Faktoren die einen Einfluss auf die effektive Oberflächentemperatur haben: analog Kap. 5.01.4

Dokumentation:

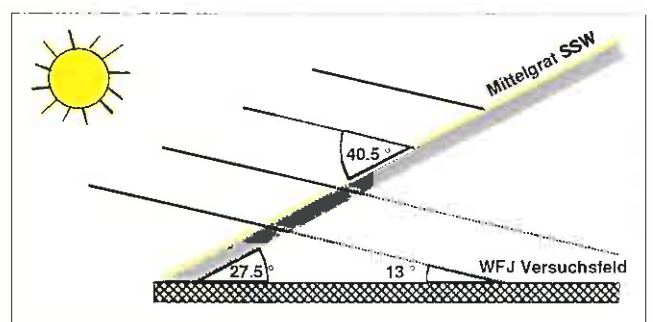
- Bilder und Skizzen nebenan
- Dok 1.6, 6.4, 9.9



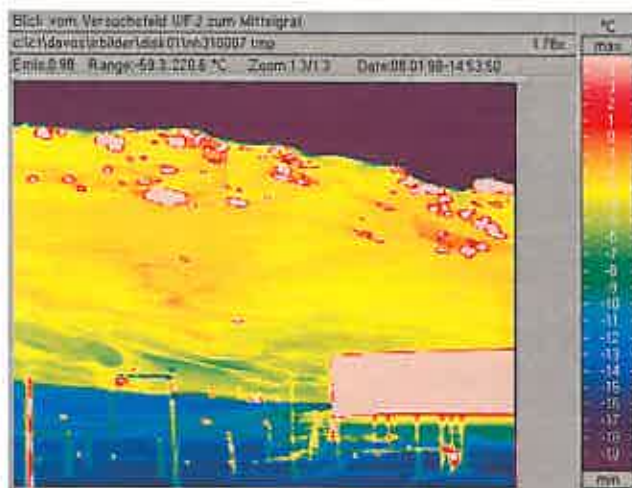
Bilder oben: Blick aus dem Heli auf die Zunge des Blockgletschers Muragl (Pontresina). Das ganze Gebiet liegt seit einigen Stunden im Schatten. Temp. Differenz steil-flach: ca. 2.5 °C.



Skizze: Je steiler der Hang, desto weniger Oberflächenunterkühlung durch Abstrahlung.



Skizze: Je steiler der Einstrahlwinkel, desto wärmer die Oberfl. (13° = 100%, 40.5° = 290%)



Bilder oben: Blick von der kleinen Baracke aus über das Versuchsfeld WFJ, Richtung Mittelgrat SSW-Hang (ca. 27.5° steil). Temperaturunterschied zwischen Ebene und Sonnenhang > 10 °C!

5.01.6 Schnee ist kälter

Die Schneeoberfläche ist praktisch immer kälter als andere Materialien in der Umgebung (Fels, Wald, Gebäude etc.). Dies sowohl bei Strahlungs- oder Wolkenwetter als auch bei sehr tiefen oder hohen Lufttemperaturen (über Null = logisch).

Zwei von vielen Gründen:

- Der Schnee reflektiert sehr viel Strahlung im kurzwelligen Bereich (Albedo \rightarrow 1). Er absorbiert demzufolge weniger Wärme als andere, vor allem dunkle Materialien (= wenig Umwandlung in Wärme).
- Sichtbare Gesteine (u.a. feste Materialien) sind wärmer, weil Ihre Masse gegenüber Wind und Strahlung träge reagiert. Sie haben zudem eine bessere Wärmeleitfähigkeit als Schnee (bis weit in den Boden hinein), so dass der geothermische Wärmestrom sich bis zur Oberfläche auswirken kann. Die Schneedecke wirkt dagegen wie eine Isolation.

Bsp.: schattiger NE-Hang (Schafläger): Fels ca. -6°C Schnee ca. -16°C
 besonnener Südhang (Mittelgrat): Fels ca. $+20^{\circ}\text{C}$ Schnee ca. -3°C

Dokumentation:

- siehe Bilder nebenan und vorhergehende Seite
- Dok 1.4, 4.1, 6, 9

5 01.7 Sonnen - Schattengrenze

Die Herkunft der starken Temperaturunterschiede zwischen besonnten und schattigen Oberflächen wurde in Kap. 5.01.4 und 5.01.5 aufgezeigt.

Das Diagramm nebenan zeigt in feiner Auflösung einen Temperaturgradienten über eine scharfe Sonnen-Schatten Grenze auf der Schnee-Oberfläche.

Dokumentation:

IR-Bild zum Diagramm nebenan Dok 1.1

5.01.8 Erkennen von dicken Schneedeckenteilen

In gewissen IR-Geländebildern (schattige Steilhänge) sind einige speziell kalte und eher kleine Zonen zu erkennen. Da diese nicht klar den bisher aufgezeigten Effekten zugeordnet werden können, liegt die Vermutung nahe, dass speziell dicke Schneesichten, z.B. durch Verwehungen gefüllte Mulden, sich mit kälteren Oberflächentemperaturen abzeichnen. Dies kann erklärt werden mit den normalen Gesetzmässigkeiten des Wärmedurchganges, wonach bei zunehmender Dicke einer Isolationsschicht (hier Schnee) die äussere Oberflächentemperatur absinkt (siehe Bild nebenan, unten).

Denkbar ist jedoch auch, dass lokal unterschiedliche Oberflächenstrukturen (z.B. Reif, Windharsch o.a.) solche Effekte ergeben können oder dass Permafrostzonen im Untergrund vorhanden sind. Möglich ist aber auch eine Kombination von verschiedenen Faktoren.

Bei keinem der nachstehend erwähnten Bildern konnte eine solche Stelle im Gelände überprüft und begangen werden.

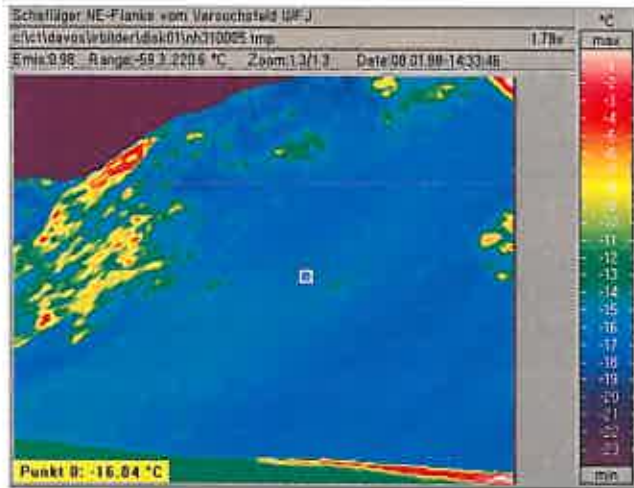
Die Ueberprüfung der ersten Vermutung kann im Sommer durchgeführt werden, wenn bei der Ausaperung beobachtet wird, wo die letzten Schneeflecken liegen.

Weitere Versuche, die unterschiedlichen Schneehöhen zu erfassen: siehe Kap. 5.09.1

Nachtrag vom 22.06.1998: Die Überprüfung im Sommer verlief negativ, d.h. die letzten Schneeflecken sind *nicht* identisch mit den speziell dunklen Zonen! (Die Aussage kann aber trotzdem stimmen)

Dokumentation von „dunklen Zonen“:

- siehe Bilder nebenan (unten)
- Dok 1.4, 6.6



Bilder oben: Vom Versuchsfeld WFJ Richtung Schaffläger NE-Hang. Schnee ist immer am kältesten, sei es besontt oder wie hier in permanentem Schattengebiet.

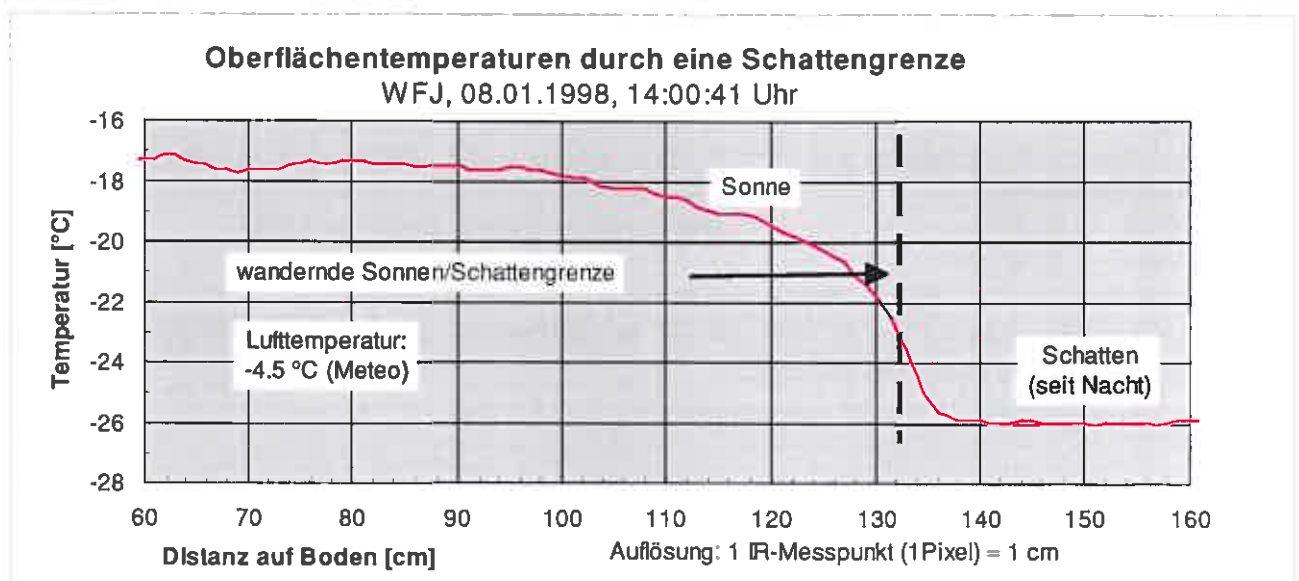
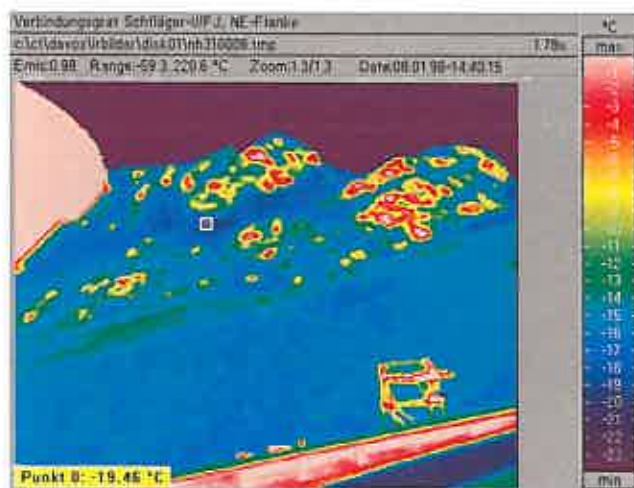


Diagramm: Temperaturgradient auf der Schnee-Oberfläche durch eine Sonnen-Schatten Grenze.



Bilder oben: Vom Versuchsfeld WFJ Richtung Verbindungsgrat Schaffläger - WFJ. Speziell dunkle (kalte) Zonen könnten Indiz für extreme Schneehöhen sein.

Einsatz 02:

Ziel: Dienstleistung, IR-Aufnahmen für Dr. Martin Schneebeli, SLF

Datum:	Ort:	Objekt / Thema:
09.01.1998	Labor D SLF Davos	Temperaturverteilung auf Heizplatte aufzeigen (für Schneenumwandlung)

5.02 Kontrolle einer Heizplatte

Dr. M. Schneebeli erstellte im Rahmen eines SLF Projekts eine Versuchsanlage mit einer Heizplatte (50 x 120 cm), die auf eine bestimmte Temperatur erwärmt werden kann. Im Versuchsfall wird darauf eine Schneesicht gesetzt, die so mit dem Raumklima einem ganz bestimmten Temperaturgradienten ausgesetzt werden kann, womit eine Umwandlung (Metamorphose) der Schneekristalle provoziert wird.

Mit den IR-Bildern wurde nun nachgewiesen, dass die Temperaturverteilung auf der Heizplatte genügend gut ist, resp. dass die gewünschte Solltemperatur bis auf einige 1/10 °C innerhalb der Platte eingehalten werden kann.

Resultate:

- Temperaturen der Heizplatte auf dem IR-Bild nebenan (mit Werten aus der Box 1, mit ca. 10'500 Bildpunkten):
- Max. Wert: 28.8° C (Raumtemperaturen Labor: ca. 19 °C)
- Min. Wert: 27.8° C
- Durchschnitt: 28.4° C (ganze Platte, ausser ca. 3 - 5 cm Randbereich)
- Das Original-Bildmaterial wurde alles an Dr. M. Schneebeli übergeben, es findet hier keine weitere Auswertung statt. (siehe Dok 2.1)

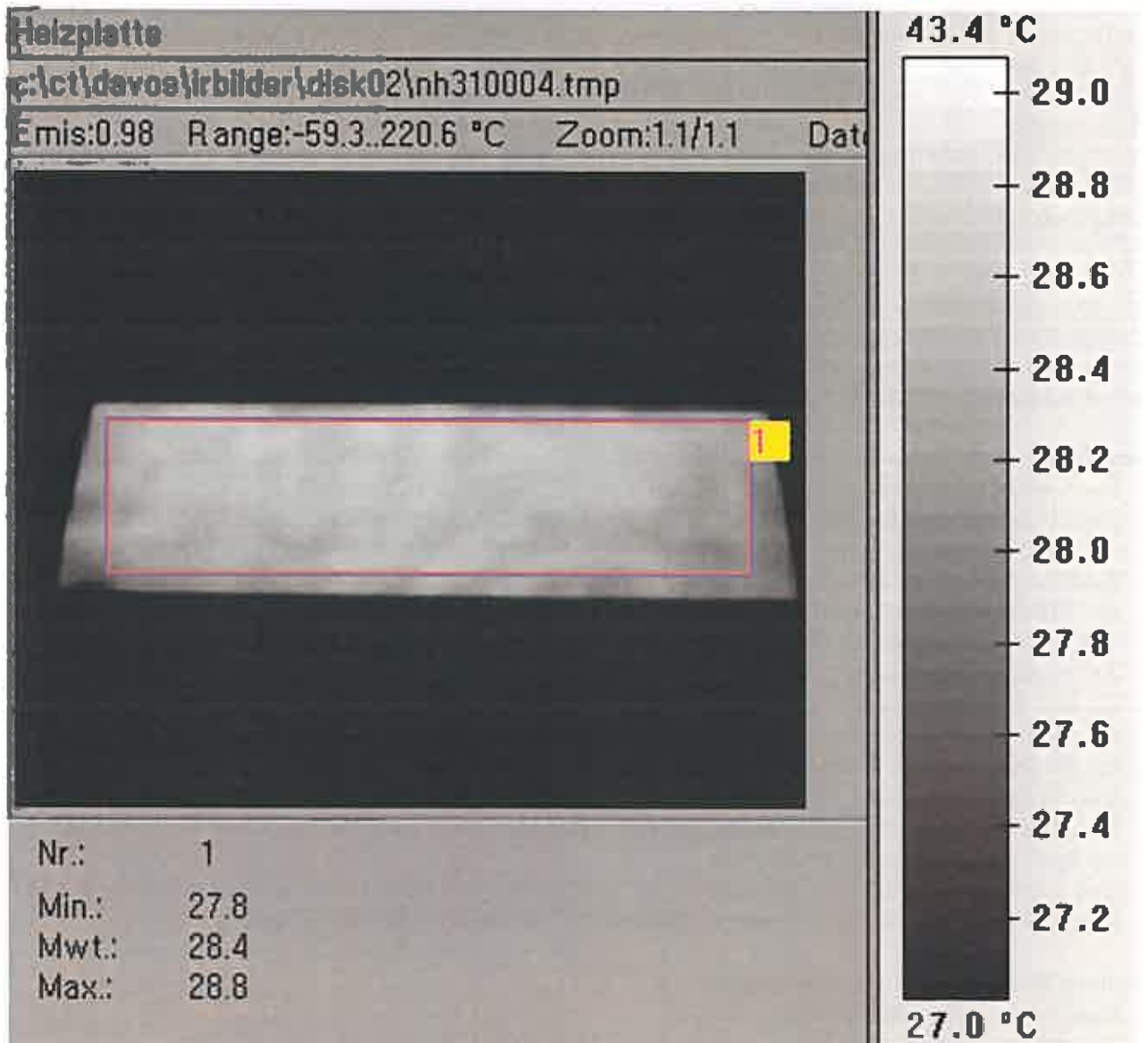
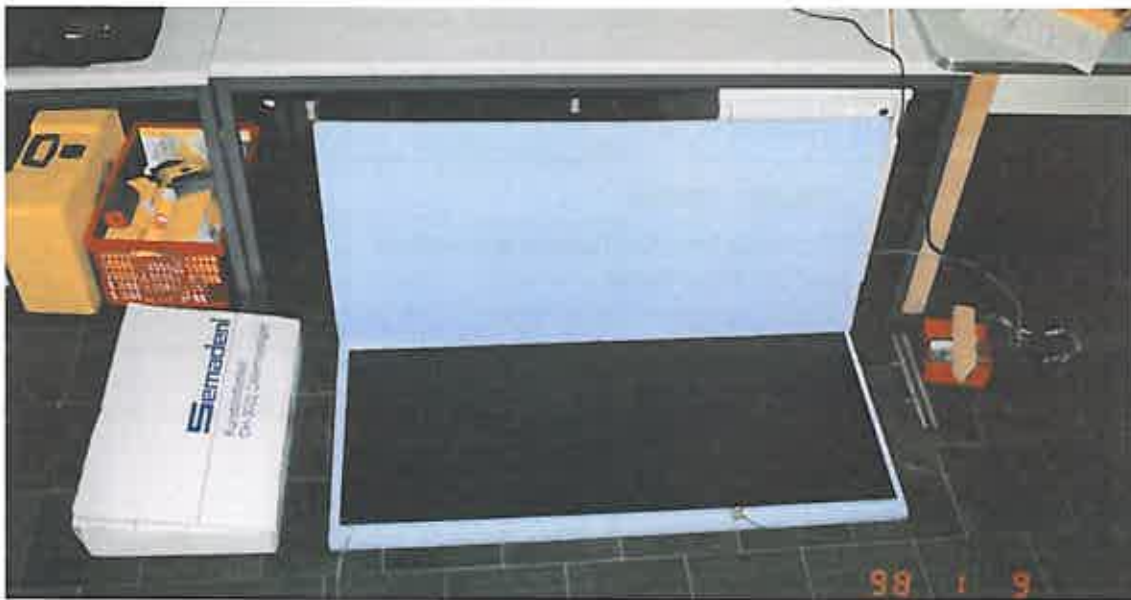


Bild oben: Schwarz/weiss IR-Bild der 50 x 120 cm grossen Heizplatte im aufgewärmten Zustand Box 1 (Rechteck): In dieser Zone werden die Min. / Mwt. / Max. Werte berechnet.

Einsatz 03:

Ziel: Schneeprofil-Aufnahme: Optische, 2-dimensionale Wiedergabe der Temperaturverhältnisse in der Schneedecke, mit sehr feiner Auflösung. Gute Darstellung des oberflächennahen Bereiches, der mit konventionellen Messfühlern schwierig bis unmöglich zu messen ist.

Datum:	Ort:	Objekt / Thema:
09.01.1998	Versuchsfeld WFJ	Schneeprofil mit Temperaturverlauf, mit Dr. Paul Föhn

Wetter: Für alle Aufnahmen dieses Einsatzes: schönes Winterwetter = grosser Temperaturgradient in der Schneedecke, wenig Wind.

5.03 Infrarot-Darstellung eines Schneeprofiles**Vorbemerkung: Die Bedeutung des Temperaturgradienten in der Schneedecke**

Im Hochwinter sinken infolge kalter Lufttemperaturen und starker Abstrahlung (bei klarem Himmel) die Oberflächentemperaturen der Schneedecke weit unter den Gefrierpunkt. Die Bodentemperatur hingegen stellt sich wegen des geothermischen Wärmeflusses und der Schmelztemperatur des Schnees meist bei 0 °C ein. Je nach Dicke der Schneedecke ergibt sich daraus ein mehr oder weniger grosser Temperaturgradient, der „Motor“ für die Dampfdiffusion, den Wärmefluss und die Metamorphose ist (ähnlich wie bei den bauphysikalischen Vorgängen in einer Aussenwand).

Es ist deshalb sehr bedeutend, dass die Temperaturverhältnisse in einer Schneedecke mit möglichst guter Auflösung gemessen werden können. Dazu käme als nächste Stufe eine genaue Temperaturinformation im Verlauf der Zeit, so dass das dynamische Verhalten der einzelnen Schichten besser bekannt wird.

Ein abgestochenes Schneeprofil bietet einen „Einblick“ in diese inneren Zustände, aber es verändert sich relativ rasch, da die kalten Luftmassen nach dem Graben plötzlich bis zu den warmen, bodennahen Schichten gelangen. Die Frage ist nun, wie schnell sich messbare Veränderungen an der Profilwand ergeben, resp. ob die 1. Aufnahme die wahren Temperaturverhältnisse in der Schneedecke zu Zeitpunkt x aufzeigen kann.

Resultate:

- Der Temperaturgradient lässt sich an einem Profil ausgezeichnet darstellen. Im vorliegenden Fall sind innerhalb der Profilwand ca. 115 Pixel des IR-Bildes, was bei einer Profilhöhe von 1.30 m einer Pixelhöhe von ca. 11 mm entspricht (= Auflösung des Bildes) siehe Bilder nebenan.
- Zwecks Vergleichswerten wurden vor den IR-Aufnahmen von Dr. P. Föhn Handmesswerte mit der Stechsonde USA (CRREL) aufgenommen. (Bilder: Dok 3.1 bis 3.3)
- 1. Film-Versuch: Mit 15 Sek. Bildabständen die Veränderung der Profilwand-Temperaturen im Zeitverlauf darzustellen.
- Da der 15 Sek. Zeitabstand die schnell eintretenden Veränderungen zu wenig rasch erfasst, wurde ein 2. Film-Versuch mit 2 Sek. Intervallen durchgeführt. Allerdings dauerte es auch hier ca. 20 Sek., bis das Profil ganz abgestochen war, siehe Bilder nebenan.
- Der Temperaturverlauf im oberflächennahen Bereich lässt sich, wie vermutet, bei günstigen Randbedingungen sehr gut darstellen. Mit konventionellen Messgeräten ist das immer problematisch, siehe Diagramm nebenan.
- Das zweidimensionale Bild zeigt auch die Temperaturverteilung in der x-Richtung sehr klar auf. Im vorliegenden Beispiel sind keine unerwarteten Abweichungen festzustellen.

Weitere Schneeprofil-Darstellungen:

- Kap. 5.10 (bestes Beispiel) und 5.14
- Oberflächenbereich mit einem einzigen Schaufelabstich: Bilder Dok 1.1 und 1.2

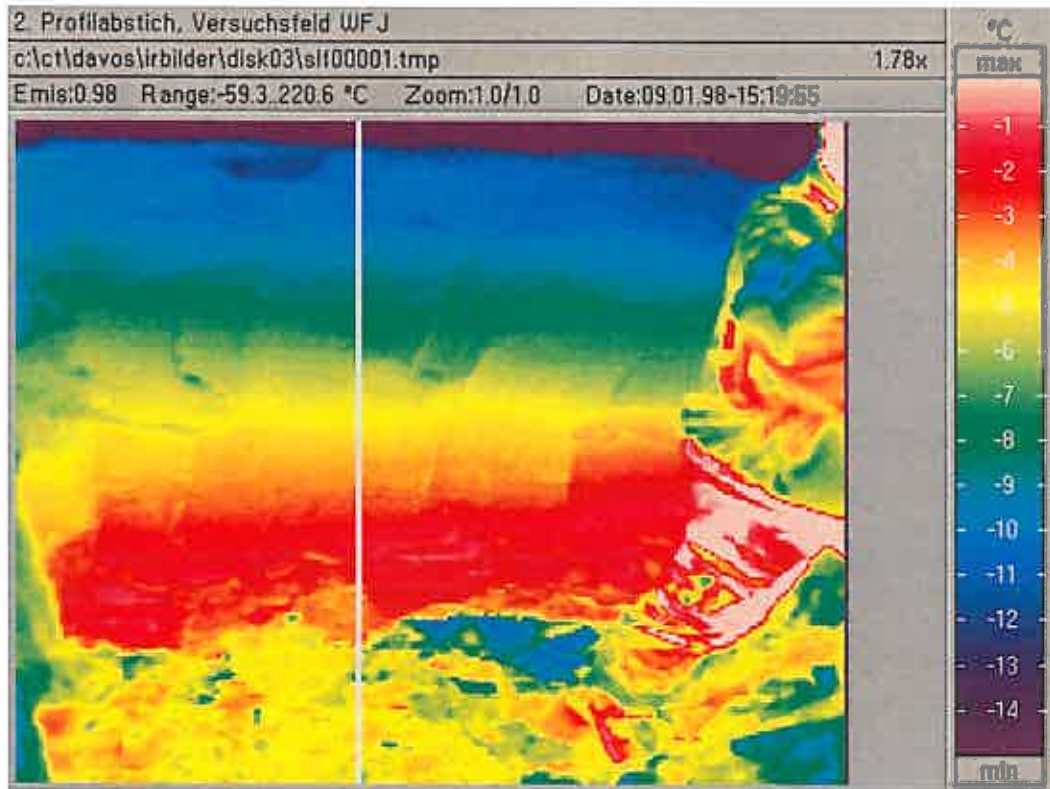


Bild oben: Schneeprofil neben der kl. Baracke auf dem Versuchsfeld WFJ. Die 125 cm hohe Schneedecke wurde soeben frisch abgestochen (Mann entfernt sich rechts im Bild). y-Schnittlinie: Für die „20 Sek.“-Temperaturen im Bild unten.

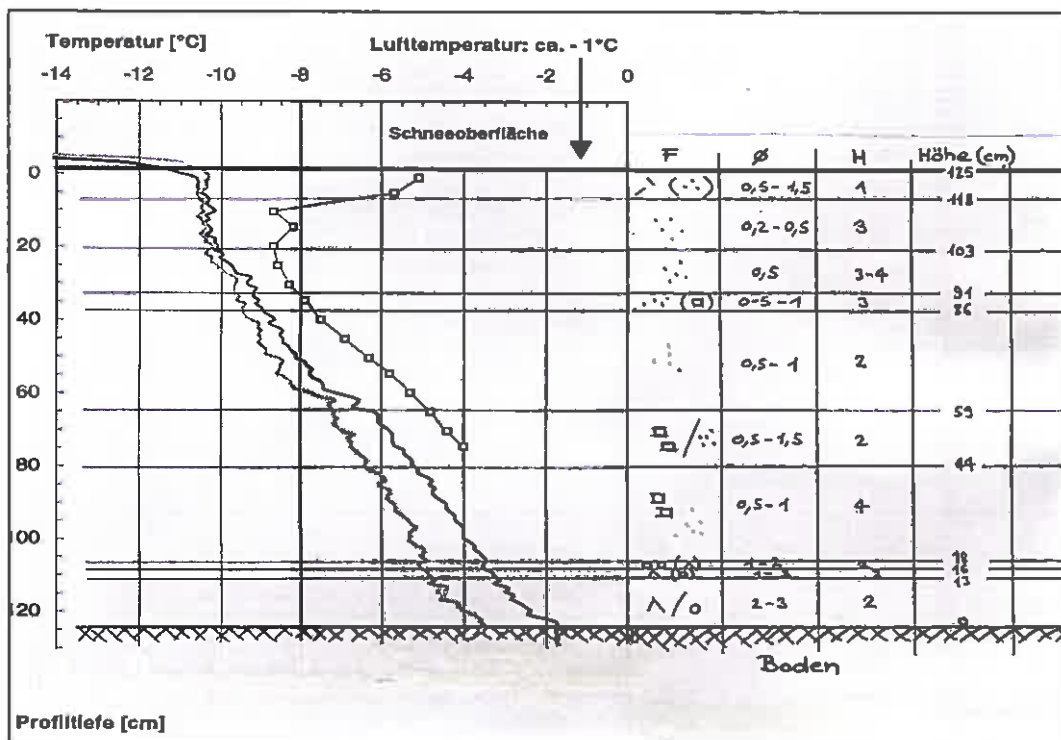


Bild oben: Kombination von IR-Temperaturwerten mit einem Handprofil.
 IR: ca. 115 Einzelwerte im Profil, d.h. 1 Temp. für 11 mm Höhe
 — IR-Werte ca. 20 Sek. nach dem Abstich.
 — IR-Werte ca. 212 Sek. nach dem Abstich.
 — □ — Handmesswerte mit USA Stechsonde (CRREL), ca. 1 Stunde vorher.

Einsatz 04:

Ziel: Betreffend erkennen von Schneedicken (Kap. 5.01.8) soll nach jedem grösseren Schneefall die Situation am Dorfberg beobachtet werden.

Datum: 14.01.1998 21.01.1998	Ort: Büro B112 SLF Davos	Objekt / Thema: Dorfberg SE-Hang, nach Schneefällen
---	---------------------------------------	---

Wetter: unterschiedlich bedeckt

5.04 Neuschnee am Dorfberg

Nach zwei Beobachtungstagen wurden die Messungen gestoppt und das Thema abgeschlossen. Gründe:

- Die Auswertung ist schwierig. Für Subtraktionsbilder sind nur Aufnahmen geeignet, die eine exakte Überlagerung des Bildausschnittes erlauben (hier schwierig wegen mehrmaligem Kamera aufstellen).
- Unterschiedliches Strahlungswetter macht Vergleiche wenig sinnvoll.
- Im Jan. / Feb. 1998 hatte es wenig markante Schneefälle.



Bilder oben: Blick von SLF zum Dorfberg, nach einem nächtlichen Schneefall (14.01.1998). Links im Bild das Observatorium von Davos-Dorf (dunkel = warm = schlecht wärmegeämmt, im Vergleich zu den Gebäuden im Vordergrund).

Einsatz 05:

Ziel: Wie genau sind die Messwerte der Infrarot-Aufnahmen ?
Weiterer Kalibrierversuch (siehe auch Kap. 5.01.1).

Datum: 14.01.1998	Ort: Kältelabor SLF Davos	Objekt / Thema: Schneeblock und Schale mit Schnee-Wassergemisch, Vergleichstemperaturen mit Thermoelementen
-----------------------------	--	--

5.05 Kalibrierung der IR-Messwerte im Kältelabor

Einzelfragen:

Frage 1: Wie ist der Temperaturvergleich IR / Thermoelemente an einem Schneeblock, der im Kältelabor (SLF Flüelastrasse) bei -20°C gelagert ist?

Resultate:

- Eine Aussage ist nur bedingt möglich! Erst die „Nebenprodukte“ der Messungen zeigten, dass die Kühlanlage der Kältekammer ca. alle 12 min. die Temperatur in der Kammer regelt, wobei Temperaturdifferenzen von ca. 3.5 K auftreten. Da die Schneetemperatur sofort auf diese Veränderungen reagiert (vgl. Thema Wind in Kap. 5.01.3), ist ein Vergleich zwischen IR-Bild und Thermoelementen (verzögerte und gedämpfte Reaktion) schwierig.
- Bsp. von gemittelten Werten:

Schneeblock Mittelwert im IR-Bild	ca. -21 °C	(Emission Einstellung: 0.98)
Schneeblock Mittelwert mit Thermoelementen	ca. -20 °C	
- Bilder und Daten siehe Dok 5.1, a + b

Frage 2: Wie gross ist der Emissionswert für ein Schnee-Wasser-Gemisch? Die Solltemperatur ist dann bei 0°C (Versuch in Kunststoffschale ca. 50 x 40 cm).

Resultate: Messwerte aus zwei Boxen der IR-Bilder (siehe Bilder nebenan)

	bei Emission	IR-Mittelwert	IR-Max. Wert	IR-Min. Wert
Schnee(Eis)-Wasser-Gemisch	0.98	+ 1.3 °C	+ 1.8 °C *)	+ 0.3 °C *)
Schnee(Eis)-Wasser-Gemisch	0.94	0.0 °C	+ 0.5 °C *)	- 0.7 °C *)

*) Da auf der Messfläche kleine Wasserlachen neben reinem Schneematsch sichtbar waren (die haben ein unterschiedliches Epsilon), sind die Max./Min. Werte der Box relativ gross.
Bilder siehe Dok 5.2, Literaturwerte über Epsilon siehe Dok 5.2.a + b (→ Wasser: 0.92 - 0.95 ...)

Frage 3: Driften die IR-Messwerte der Kamera infolge Kälteeinwirkung (min. Betriebstemp. -10°C)?

Resultat:

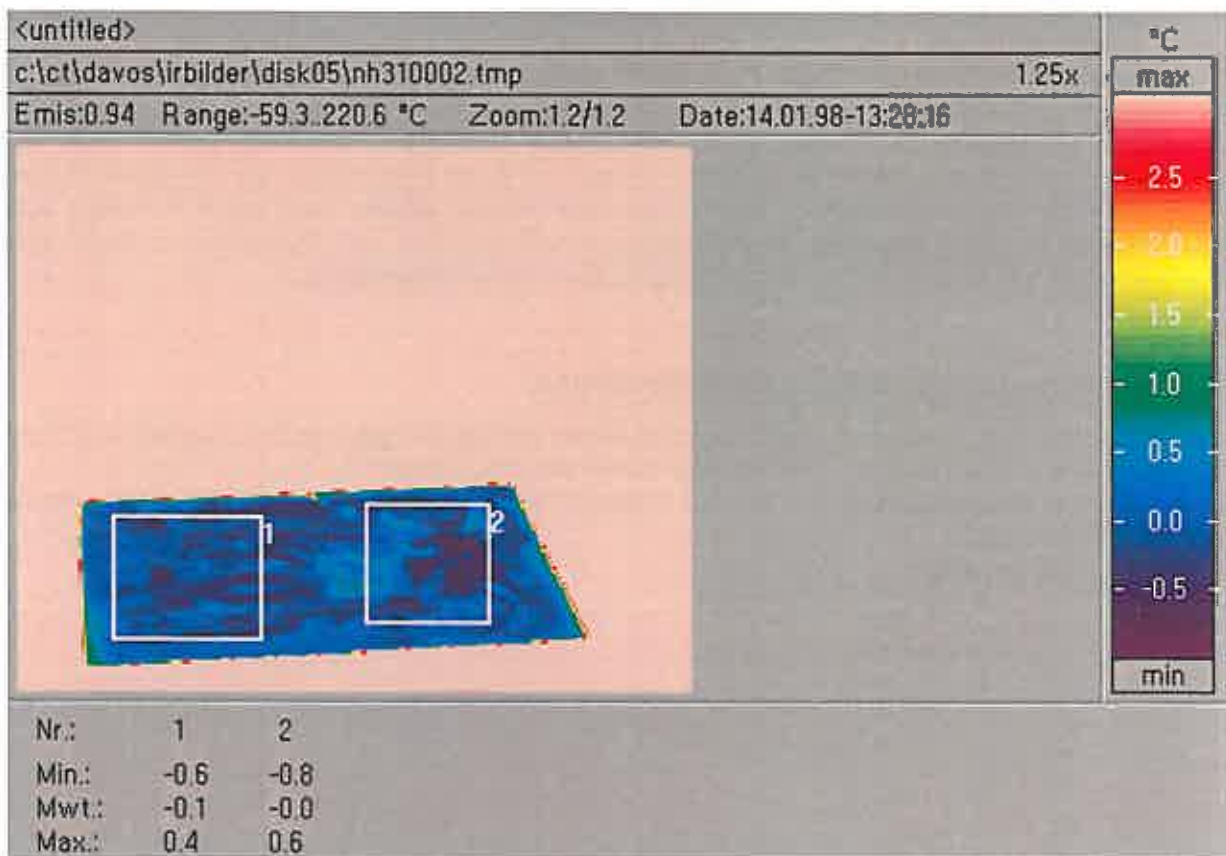
Schluss aus Diagramm Dok 5.3 und 5.1.b: Kein Drift der IR Kamera.
(Vergleich der IR-Kamera Gehäusetemperatur mit IR-Schneeoberflächen im Verlauf der Zeit)

Frage 4: Ergeben verschiedene Blickwinkel auf die Oberfläche unterschiedliche Messwerte?

Resultat:

Keine Aussage möglich. Da nur ein Schneeblock zur Verfügung stand, konnte aufgrund der rel. starken Raumtemperaturschwankungen (vgl. Frage 1) keine Aussage gemacht werden (verschiedene Blickwinkel entstanden zu verschiedenen Zeitpunkten t1, t2, t3 etc.).

Weiterbehandlung der Fragen 1 und 4 siehe Kapitel 5.07! Frage 2: Kapitel 5.16.2



Bilder oben: SLF Labor: Kunststoffschaale mit Schnee-Wassergemisch.

Die Mittelwerte der Boxen müssen 0 °C sein, → also: Emissionswert suchen und anpassen!

Mit diesem Schnee-Wassergemisch ergibt sich ein Epsilon von 0.94.

Nachtrag: Erkenntnis aus Kapitel 5.16.3 : Bei tiefem Epsilon sind die Reflexionen zu berücksichtigen ! Für Wasserflächen sind diese direkt-spiegelnd, bei Schneematsch diffus, aus dem Raum.

Einsatz 06:

Ziel: Eine Gruppe aus dem Aargau machte an der Flüelapassstrasse Suchübungen mit Lawinenhunden, bei denen lebende Personen im Schnee eingegraben wurden. Ist ein IR-Einsatz möglich ? Sieht man die versteckten Wärmequellen ?		
Datum: 15.01.1998	Ort: Passstrasse - Flüelapass	Objekt / Thema: Flop: Lawinenhunde-Uebung, dafür: Landschaft, Berge, Hänge
Wetter: Morgen bewölkt, am Mittag Übergang zu klarem Himmel		

5.06.1 Beobachten einer Lawinenhunde-Uebung

Die Hoffnung, dass im Uebungsgelände der Lawinenhunde interessante IR-Bilder entstehen könnten, wurde bald zerstreut. Es war unter den gegebenen Umständen absolut unmöglich!

Gründe:

1. Die Schneedecke war relativ dünn, so dass am Vortag Schneehöhlen gegraben wurden, in denen man die Personen erst kurz vor der Uebung versteckte. (d.h. kein natürlicher Temperaturgradient, Schneehöhlen wie Schneehütten, ganzes Gelände mit tiefen Fussspuren total zerstampelt etc.)
2. Wetter: zeitweise bewölkt, z.T. sonnig (= starke Unterschiede infolge Strahlung)
3. IR-Kamera-Standort so, dass nur ein sehr flacher Blick über das Uebungsgelände möglich war. Demzufolge entstand nur 1 wertloses IR-Bild: Dok 6.5

Damit und *mit den Erkenntnissen aus Kapitel 01* sowie mit den EMPA-Erfahrungen im Bereich Wärmedurchgang ist klar geworden, dass eine Personenortung im Schnee, mit Infrarot, praktisch unmöglich ist. Vor allem für tiefliegende "Wärmequellen" (empirisch: mehr als 20 cm unter der Oberfläche), ist die Chance mit IR erkannt zu werden praktisch gleich Null. Bei Objekten die unmittelbar unter der Oberfläche liegen, besteht bei sehr kaltem Wetter theoretisch trotzdem eine Möglichkeit diese zu orten, allerdings ist im Bezug auf den Aufwand und die Erfolgschance für diese Gegebenheiten der Lawinenhund diskussionslos die bessere Alternative.

5.06.2 Landschaftsaufnahmen am Flüelapass

Nach dem Flop mit der Lawinenhundeübung machte ich in der Umgebung der Flüelapassstrasse diverse weitere IR-Bilder, nach dem Motto „mal sehen wie das aussieht“.

Als Dokumentationsmaterial (Dok 6.1 bis 6.7) dienen diese Aufnahmen für diverse behandelte Themen (z.B. Kap. 5.01).

Ein Bsp: Siehe Bild nebenan.

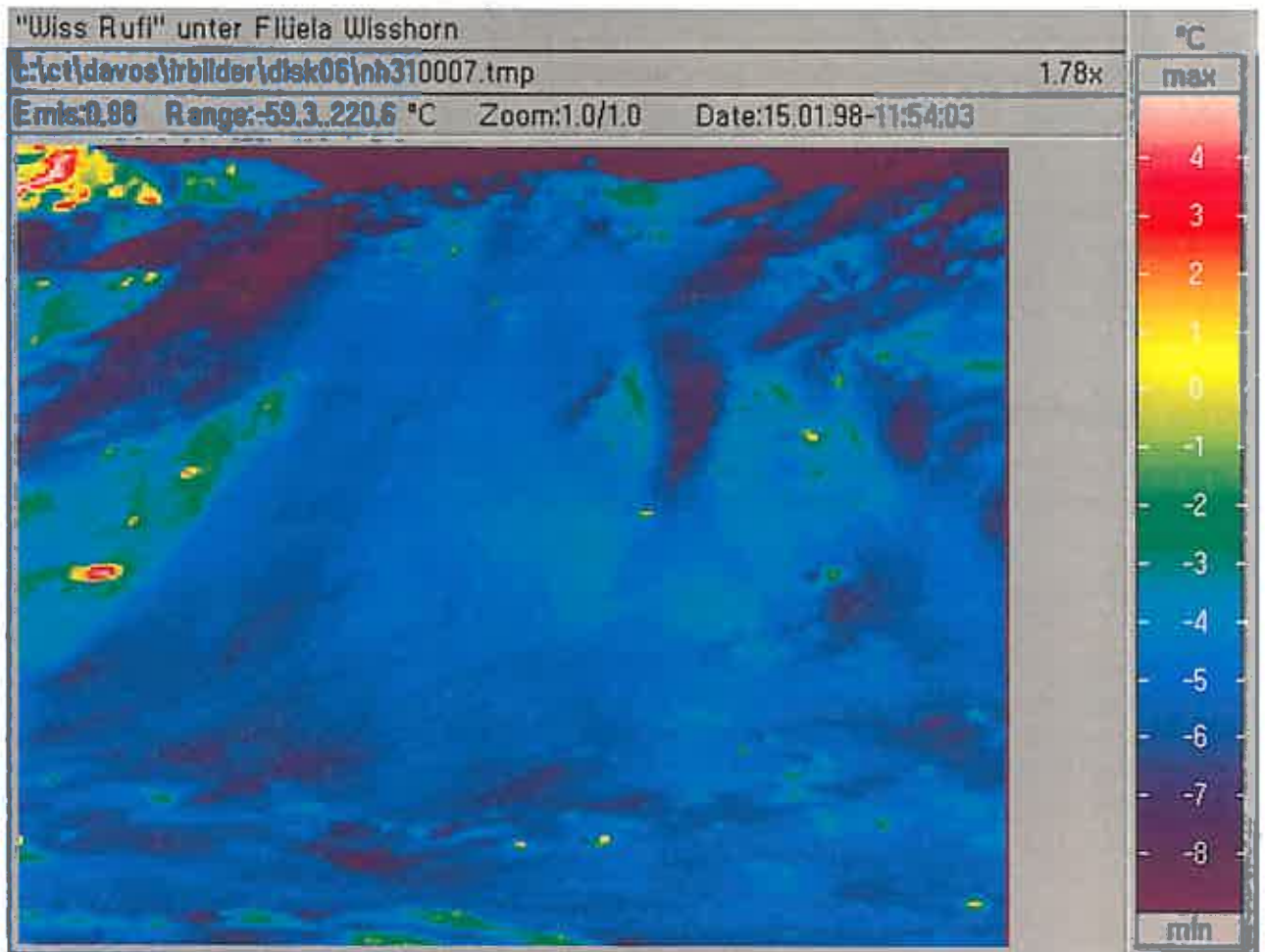


Bild: „Wiss Ruff“ unter dem Flüela Wisshorn. Die Sonne scheint von rechts oben (quasi parallel zum Hang), so dass der leicht konvexe Hang auf der linken Seite einen etwas geringeren Einstrahlwinkel hat und damit dort minim kälter ist. (vgl. Kap. 5.01.5b)

Einsatz 07:

Ziel: Neuer Versuch, die Genauigkeit der IR-Bilder zu ermitteln.		
Datum: 20.01.1998 21.01.1998	Ort: Garten SLF Davos	Objekt / Thema: Temperaturvergleiche, Abstrahlung, verschiedene Blickwinkel auf Versuchsfeld
Wetter: bedeckt und leichter Schneefall mit Wind (2-3 m/s), Nacht und Morgen: z.T. Aufhellungen mit diffus sichtbarem Mond (leider!).		

5.07.1 Vergleichsmessungen der Schnee-Oberflächentemperaturen

Da mit den Versuchen in Kap. 5.05 keine zufriedenstellenden Resultate entstanden, wurde folgender Versuch im Freien, hinter dem SLF Gebäude C (Ostseite) aufgebaut:

Versuchsfeld 2 x 2 m, das aus verschiedenen Winkeln betrachtet werden kann. Für die Oberflächentemperatur-Vergleichsmessungen war vorgesehen, die Messungen in der Nacht, bei bedecktem Himmel und leichtem Schneefall durchzuführen. Dann sollten Luft- und Oberflächentemperaturen gleich- und über eine gewisse Zeit stabil sein.

– **Resultate:**

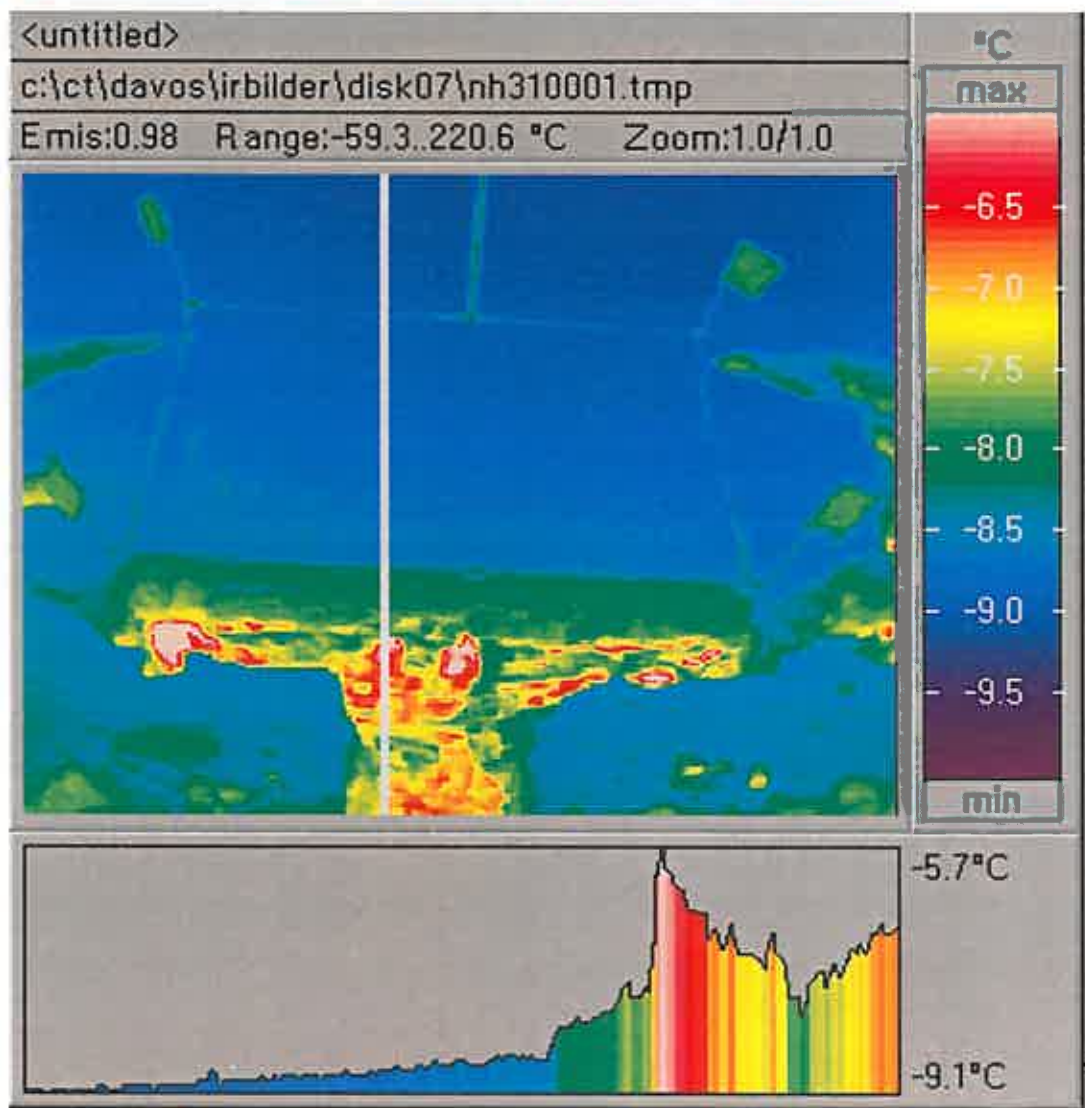
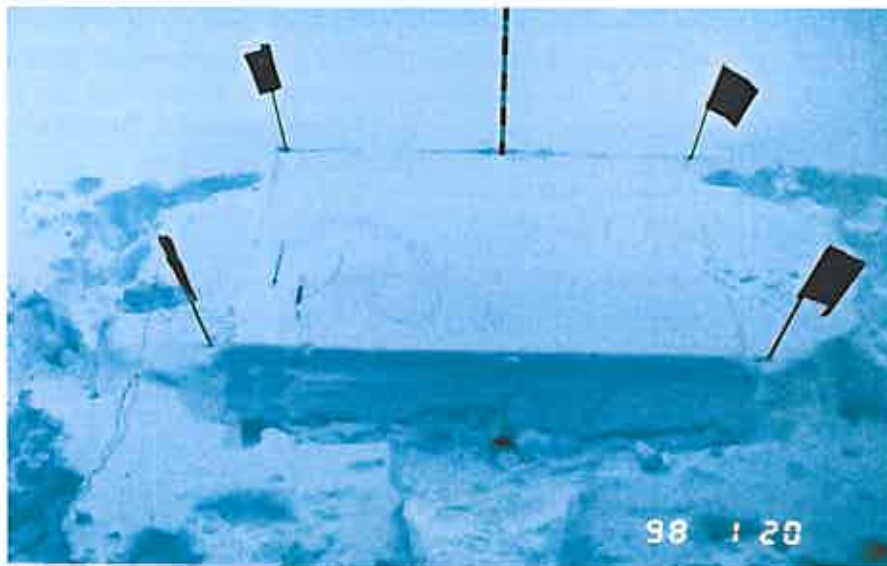
- Tendenziell sind die IR-Messresultate der Schnee-Oberfläche (bei $E = 0.98$) ca. 1.5 K tiefer als diejenigen der konventionellen Messmittel (Thermoelemente, Quecksilberthermometer u.a.). D.h. aber nicht, dass die IR-Messungen falsch sind, denn konventionelle Messungen von Oberflächentemperaturen sind immer problematisch (Strahlung, Wärme-Querleitung etc.)!
- Die Anlage des Versuchsfeldes ist nicht optimal. Durch die Wärmestrahlung des ca. 5 m entfernten Gebäudes C entsteht auf der Oberfläche ein leichtes Temperaturgefälle (siehe Bilder nebenan).
- Weitere Bilder: Dok 7.1, Diagramme und Handmesswerte: Dok 7.2. bis 7.2.d
- Am Morgen des folgenden Tages wollte ich die Messungen zwecks Vergleichswerten wiederholen. Kleine diffuse Aufhellungen sorgten jedoch für zeitweise erhöhte Abstrahlung, so dass ein Vergleich zwecklos war.

5.07.2 Auswirkungen des Blickwinkels

Wie oben beschrieben, konnte das 2 x 2 m grosse Versuchsfeld mit verschiedenen Winkelpositionen beobachtet werden. Es waren dies 12°, 40° und 65° (65° vom Dach des Gebäudes C).

Resultate:

- Aus Dok 7.2.c geht hervor, dass von diesen 3 verschiedenen Winkel-Messungen Differenzen von nur 0.8 C entstanden (Box Mittelwerte: -8.2 °C, -8.8 °C, -8.0 °C). Da die Einzelwerte nicht in einer logischen Reihe stehen, kann der Schluss gezogen werden, dass eine Winkelveränderung im gemessenen Bereich kaum einen relevanten Einfluss auf die Messwerte hat.
- Beachte jedoch: Veränderungen infolge Wind u. a. (10 min. zwischen den 3 Aufnahmen) sind nicht bekannt, ebenso ist noch unklar, ob eine andere Oberflächenstruktur als der beobachtete Neuschnee doch noch eine Winkelabhängigkeit ergeben könnte (siehe Kap. 5.10.1)!



Bilder oben: Das 2 x 2 m grosse Versuchsfeld hinter dem Gebäude C des SLF. Betrachtungswinkel: ca. 40°. Unterer Bildteil: y-Schnitt durch das Versuchsfeld (2 m zwischen den Pfeilen). Das Temp. Gefälle zeigt die Auswirkung der Gebäudestrahlung (SLF, Block C ist in ca. 5 m Distanz).

Einsatz 08:

Ziel: Aufgrund der strahlungstechnischen Gegebenheiten (IR-Wellenlängenbereich atmosphärisches Fenster etc.) stellt sich die Frage, ob die Temperaturangaben im IR-Bild von der Distanz abhängig sind, resp. ob eine grosse Luftmasse zwischen der Kamera und dem Objekt einen Einfluss auf die Messwerte hat. Der folgende Versuch soll Auskunft darüber geben.

Datum: 23.01.1998	Ort: Seewiesenstr. Davos	Objekt / Thema: Hauswand MFH (Nordfassade) aus verschiedenen Distanzen
-----------------------------	---------------------------------------	--

Wetter: Für alle Aufnahmen dieses Einsatzes: schönes, kaltes Winterwetter, Wind bis ca. 1 m/s.

5.08 IR-Messwerte über verschiedene Distanzen

Für den Versuch ist eine grosse Fläche gesucht, die eine möglichst stabile Temperatur hat und eine homogene Temperaturverteilung aufweist. Im Hochwinter eignet sich dazu eine fensterlose, grosse Hauswand in Nordexposition, die auch aus verschiedenen Distanzen betrachtet werden kann. Diese wurde gefunden an der Seewiesenstrasse in Davos Dorf.

Trotz den guten Randbedingungen sind die Aufnahmen aus verschiedenen Distanzen in möglichst kurzen Zeitabständen zu machen, da sich die Strahlungseinflüsse im Verlauf der Tageszeit ändern. Ergeben sich Differenzen ?

Resultate / Dokumentation: (siehe Bilder nebenan)

	Mittelwert (Box)	Max. Wert	Min. Wert
Distanz 20 m	- 4.1 °C	- 2.6 °C	- 6.0 °C
Distanz 100 m	- 3.5 °C	- 1.9 °C	- 4.8 °C
Distanz 100 m, mit Zoom	- 3.9 °C	- 2.1 °C	- 5.5 °C

Die gemessenen Differenzen auf die verschiedenen Distanzen (Mittelwerte einer Box) liegen lediglich im Bereich von einigen Zentelgrad. Ein klarer Trend ist nicht erkennbar. Weitere Messwerte siehe Dok 8.1 ff.

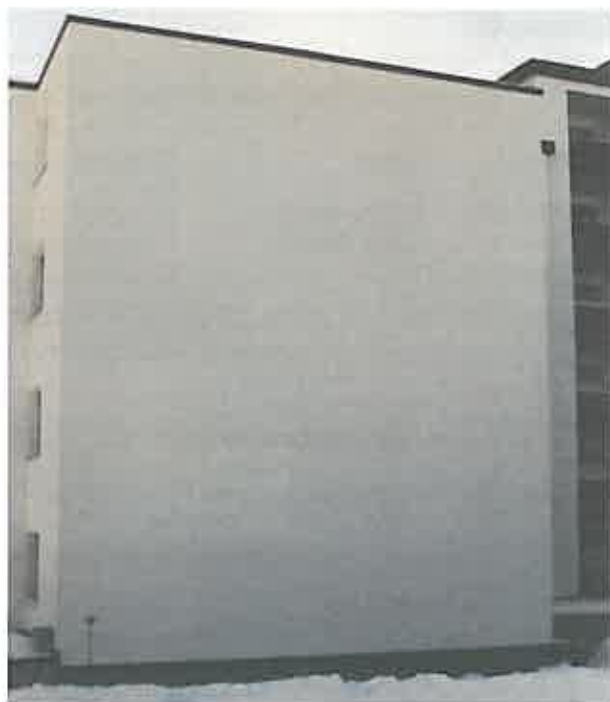
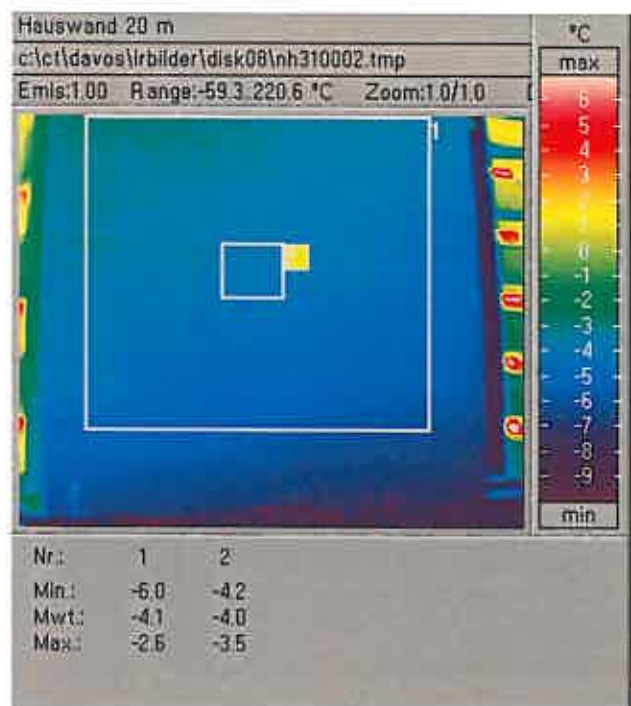
Kommentar:

Diese Aussagen sind nur gültig für die gehaltenen Wetterbedingungen (siehe Dok 8.4). Für die verschiedenen Landschaftsaufnahmen, vor allem in Dok 1, 4, 6 und 9, dürften daher die Messwerte (immer entstanden bei kaltem Winterwetter) relativ zuverlässig sein.

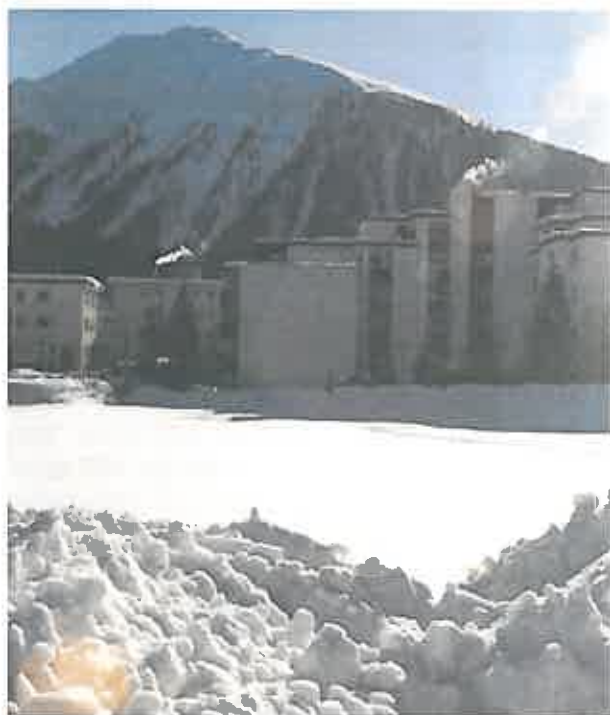
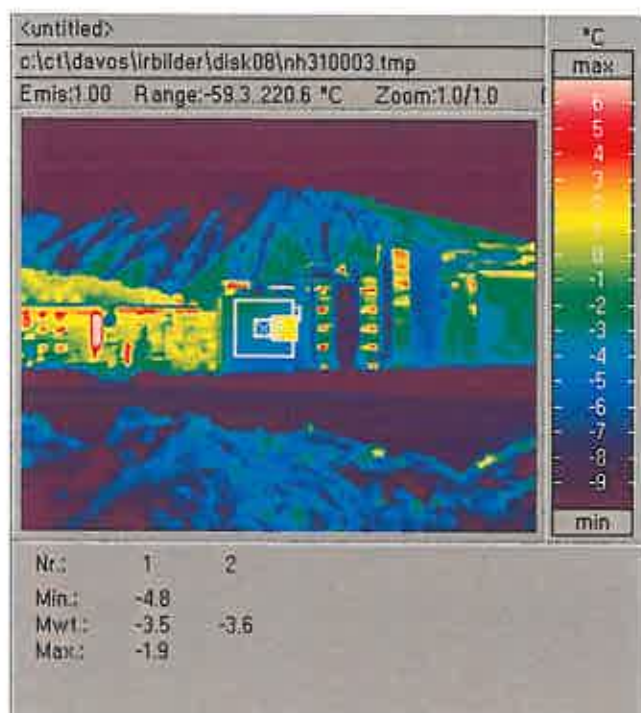
Leider gingen weitere Bilder mit den Distanzen 260 m, 710 m und 2200 m verloren (Disketten-Defekt).

Im Sommer, mit viel grösseren Wasserdampf- und Ozonmengen in der Luft, kann das Resultat anders sein.

Nachtrag 22.06.1998: Es ist anders! Siehe Erkenntnisse aus Kap. 5.16.4. Weitere Versuche wären interessant → wünschenswerte Arbeiten Kap. 6.6.



Bilder oben: Fensterlose Hauswand eines MFH an der Seewiesenstrasse in Davos Dorf aus 20 m Distanz. Effektive Fläche einer IR-Pixelgrösse = 4.1 x 4.8 cm, Box 1 = ca. 28'000 Pixel.



Bilder oben: Gleiche Hauswand wie oben, an der Seewiesenstrasse in Davos Dorf aus 100 m Distanz. Effektive Fläche einer IR-Pixelgrösse = 20 x 24 cm, Box 1 = ca. 840 Pixel.

Einsatz 09:

Ziel: Dienstleistung für Patrik Thalparpan, SLF und Marcia Phillips (Dissertation), SLF		
Datum: 26.01.1998	Ort: Schafberg Pontresina	Objekt / Thema: Projekt „Lawinenverbauungen im Permafrost“ Versuchshang und diverse Landschaften (z.T. aus Helikopter)
Wetter: Für alle Aufnahmen dieses Einsatzes: schönes, sehr kaltes Winterwetter, wenig Wind		

5.09.1 Lawinenverbauungen im Permafrost

Können die 2-dimensionalen IR-Bilder folgende Fragen beantworten:

1. Warum haben zwei 20 m tiefe Bohrlöcher im Versuchshang einen Temp.-Unterschied von 1°C?
2. Welche Temperaturdifferenzen zeigt die Schneedecke auf dem Versuchsgelände ? Ist eine Ableitung auf die Schneehöhen möglich (analog Kap. 5.01.8)?
3. Ist u.U. eine lokale Bereichsgrenze des Permafrostes zu erkennen?
Die Antworten soll ein „try and error“ Versuch liefern.

Resultate:

- Mit dem Bildmaterial kann konkret noch keine der Fragen beantwortet werden. Die Aufnahmen bestätigen jedoch viele der in Kapitel 5.01 behandelten Themen (z.B. Wind- und Strahlungseffekte).
- Für die IR-Bildanalyse der Schneedecke (Frage 2), wurden am Nachmittag im Versuchshang auf einer horizontalen und vertikalen Linie Schneehöhenmessungen durchgeführt (siehe Dok 9.13+14). Die Resultate zeigten allerdings, dass wegen der allgemein geringen Schneehöhe (70 - 110 cm) keiner der erhofften Effekte (unterschiedliche Schneehöhe = unterschiedliche Oberflächentemperaturen) zu erkennen war (vgl. Kap. 5.01.8).
- Die Frage 3 (erkennen von Permafrostzonen möglich?) wird, wenn überhaupt, erst im Sommer nach der Ausaperung des Versuchsgeländes angegangen werden können.
- Die Bilder nebeneinander bestätigen lediglich die Wind-Erkenntnisse aus Kap. 5.01.3
- Weiteres Bildmaterial: Dok 9.1.ff

5.09.2 Landschaftsaufnahmen der Engadiner Berge

Analog Kap. 5.06.2 machte ich vom Versuchsgelände aus auch einige „langdistanz“ IR-Aufnahmen der umliegenden Berge. Mit dem Heli-Rückflug nach Pontresina entstanden schlussendlich noch einige Flugaufnahmen (Blockgletscher Muragel).

Resultate / Kommentar:

- Die Aufnahmen bestätigen viele der bereits besprochenen Bildanalysen (Blockgletscher Muragel siehe Kap. 5.01.5a).

Nachtrag vom 25. und 26. August 1998:

Während ca. 16 Stunden (über Nacht) wurde der Blockgletscher Muragl (= klar definierte Permafrostzone) bei Strahlungswetter mit der IR-Kamera beobachtet. Am Morgen des 26.8.98 wurden zudem auch Vergleichsaufnahmen vom Versuchshang "Schafberg" mit den Lawinenverbauungen gemacht (vgl. Kap. 5.09.1). Das Bild und Datenmaterial befindet sich in Dok 17. Als erstes Auswertungsergebnis steht fest, dass mit der gegebenen Wittersituation, mit der IR-Kamera keine Permafrostzonen zu erkennen sind, dafür konnte aber interessantes Datenmaterial über die Oberflächentemperatur-Veränderungen von Gebirgslandschaften gewonnen werden.

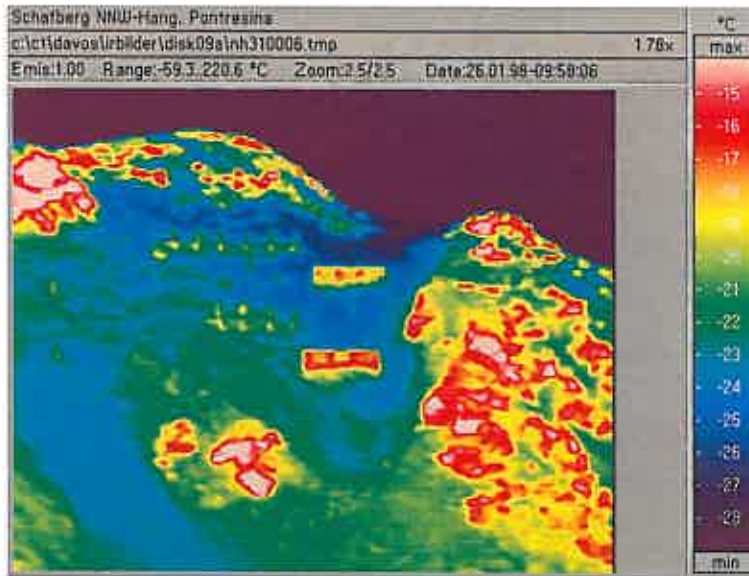


Bild links:

Versuchsgelände für Lawinenverbauungen am Schafberg oberhalb von Pontresina (ca. 2900 m). Bildmitte: 2 Stahlverbauungen, je 10 m lang, links davon 2 Netzwerke.

Aufnahme: 09:58:06 Uhr
(Schattenhang!)

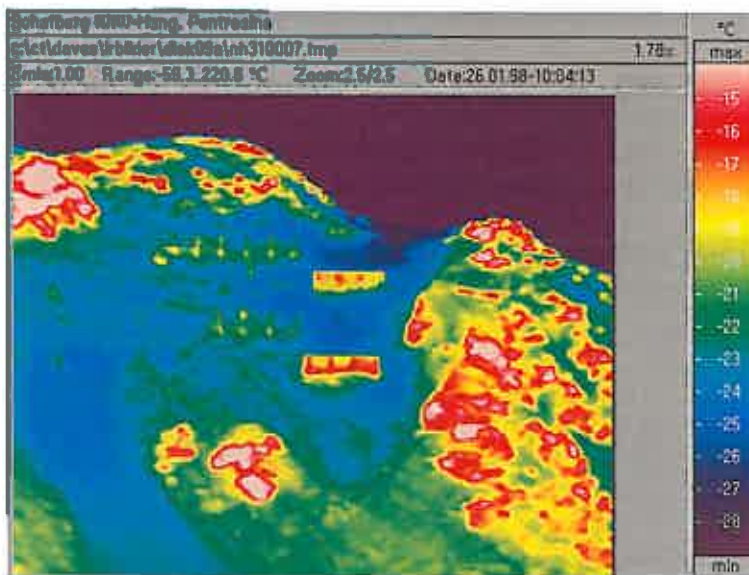


Bild links:

wie oben

Aufnahme: 10:04:13 Uhr

Die Schnee-Oberflächentemperaturen haben sich in der Zwischenzeit infolge lokaler Winde verändert, trotzdem der Hang im Schatten liegt und strahlungsmässig praktisch keine Veränderung eingetreten ist.

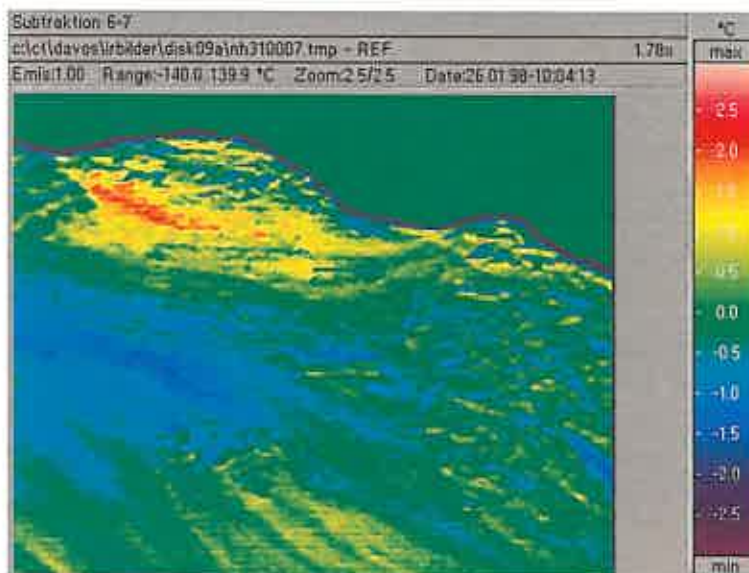


Bild links:

Subtraktion der beiden Bilder oben. Das Resultat ist ein Differenzbild, das die Veränderung zwischen den beiden Aufnahmen darstellt (mit neuer Skala). Daraus wird ersichtlich, dass die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen nicht eine statische Ursache haben (z.B. unterschiedliche Schneehöhen), sondern durch den Windeinfluss lokal und schnell verändert werden. Feste, träge reagierende Materialien verändern ihre Temperatur in diesem kurzen Zeitraum kaum (Fels, Verbauungen), sie werden auf Null wegsabtrahiert (vgl. Kap. 5.01.3).

Einsatz 10:

Ziel: Was zeigt sich im IR-Bild bei einer Makro-Betrachtung der Schnee-Oberfläche resp. eines Oberflächenreif? Ist die Schnee-Oberflächentemperatur homogen?		
Datum: 27.01.1998	Ort: vor Mattawald Davos	Objekt / Thema: Makro: Schneeoberflächen mit Reif, verschiedene Distanzen, dazu: weiterer Versuch mit Schneeprofil und Temperaturverlauf
Wetter: Für alle Aufnahmen dieses Einsatzes: schönes, kaltes Winterwetter, wenig Wind.		

5.10.1 Oberflächentemperaturen mit Oberflächenreif

Für die Aufnahmen wurde gemäss den Erkenntnissen aus Kap. 5.01 ein dauerhaft schattiger Platz (die Ebene vor dem Mattawald) und schönes Strahlungswetter ausgesucht. Der Oberflächenreif war eher Stäbchen- als Plättchenartig. Grösse bis ca. 10 mm, Normalfoto siehe Dok 10.2 (leider schlechte Qualität), Meteo-Daten der Station Davos siehe Dok 10.10

Resultate / Darstellungen:

1. Vorversuche 23. 01.1998 bei Seewiesenstr.: Bilder auf Disk 02, nicht weiter ausgewertet.
2. Erste Feststellung mit einer Makroaufnahme (Bild ca. 20 x 20 cm, IR-Pixelgrösse ca. 1 x 1 mm): Die Oberflächentemperatur präsentiert sich *nicht homogen*, sondern ist (den Reifkristallgrössen entsprechend?) strukturiert (siehe Bild nebenan). Die sichtbaren, „punktförmigen“ Differenzen betragen z.T. *mehr als 4 °C*.
3. *Grundsatz:* Je grösser die Entfernung zur Oberfläche, desto kleiner werden diese Differenzen = „Distanz-Effekt“ (Die Pixelfläche wird grösser und geht mehr Richtung Durchschnittswert, vgl. Kap 5.12, und Doc 10.6 .
Heisst das für den vorliegenden Fall auch: Noch näher ergäbe noch grössere Differenzen?
4. Durch die nahe der Oberfläche positionierte IR-Kamera kann die Versuchsfläche plötzlich weniger abstrahlen (wie wenn eine Wolke aufzieht). Dadurch steigt die Oberflächentemperatur, siehe Bilder Doc 10.1 und 10.2 (Windeinfluss in diesem Zeitabschnitt: sehr gering).

Begründungen / Fragen:

- Zeigen die Temperaturdifferenzen verschiedene Lagen oder Arten von Reifkristallen?
- Sind die Temperaturdifferenzen eine Abbildung von obersten und unteren Teilen (Spitzen und Mulden) auf der Oberfläche (Im Makroschnitt ist die Oberfläche keine gerade Linie mehr)?
- Welche Auswirkung (Gewichtung) haben Konvektion (Wind), Abstrahlung und Blickwinkel?

Skizzen zu folgenden Erklärungsvarianten siehe Doc 10.7.a bis 10.7.d

- Möglichkeit 1: (10.7.a) Konvektion stärker als Abstrahlung → warme Teile oben
- Möglichkeit 2: (10.7.b) Abstrahlung stärker als Konvektion → kalte Teile oben
- Möglichkeit 3: (10.7.c) Abstrahlung ist dominant, und analog Kap. 5.01.5a winkelabhängig, kalte und warme Teile sind dann an oberster Lage gemischt.
- Sind allenfalls Teilflächen mit tieferem Epsilon und demzufolge Reflexionen vorhanden ?

Weitere physikalisch wichtige Faktoren für die beobachteten IR-Temperaturwerte sind natürlich die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der obersten Schneekristalle.

Je nach Zutreffen einer der oben erwähnten Möglichkeiten, ergäbe sich eine Winkelabhängigkeit bei der IR-Betrachtung dieser Schnee-Oberfläche (Dok 10.7.d). Dies kann allerdings mit keiner der bisher gemachten Aufnahmen nachgewiesen werden.

Für eine Neuschnee-Oberfläche zeigte sich in Kap. 5.07.2 keine Winkelabhängigkeit.

Eine klare Folge aus den Erkenntnissen oben (und Kap. 5.01.3): Die Schnee-Oberflächentemperatur ist nicht ein fixer Wert (wie wahrscheinlich viele meinen), sondern sie ist stets ein Mittelwert aus verschiedenen Temperaturen, die abhängen vom Zeitintervall der Betrachtung und der gegebenen Oberflächenstruktur (Geometrie, Kornform).

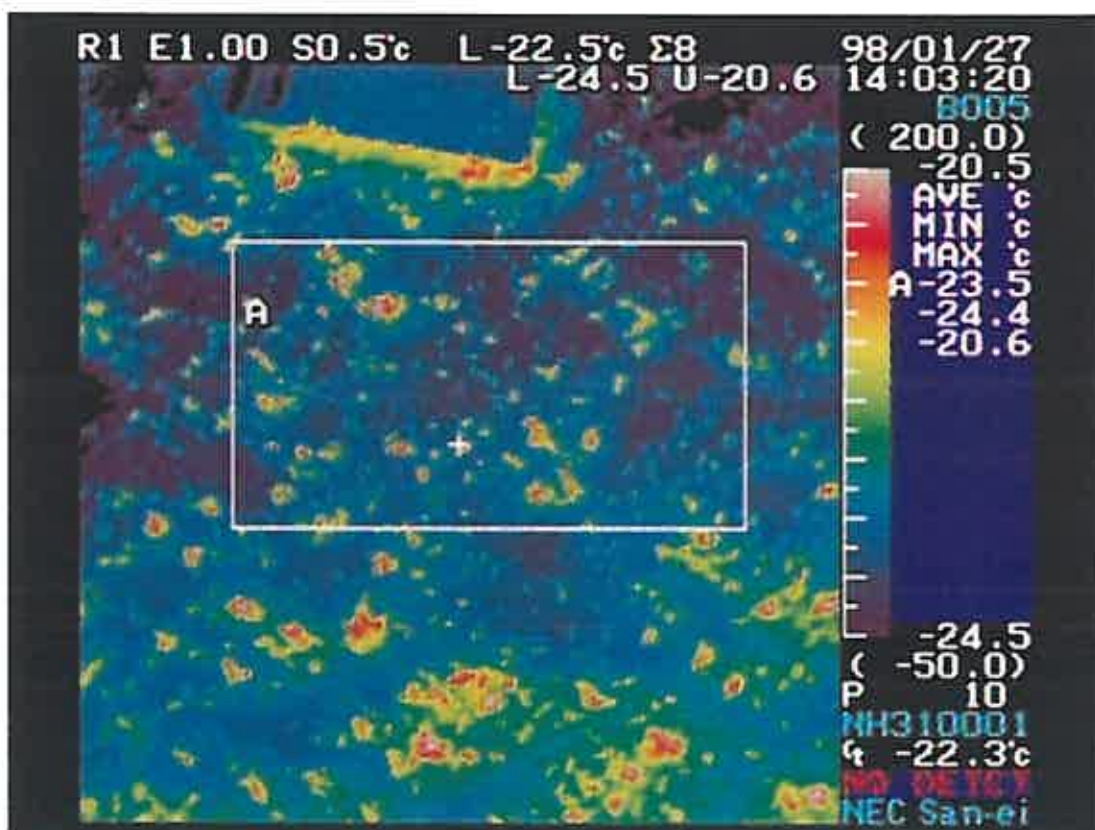


Bild oben: IR-Bild von Oberflächenreif. Bildausschnitt ca. 20 x 20 cm Effektive Fläche eines IR-Pixels: ca. 1 x 1 mm (Werte aus Box A: rechts neben Farbkeil)

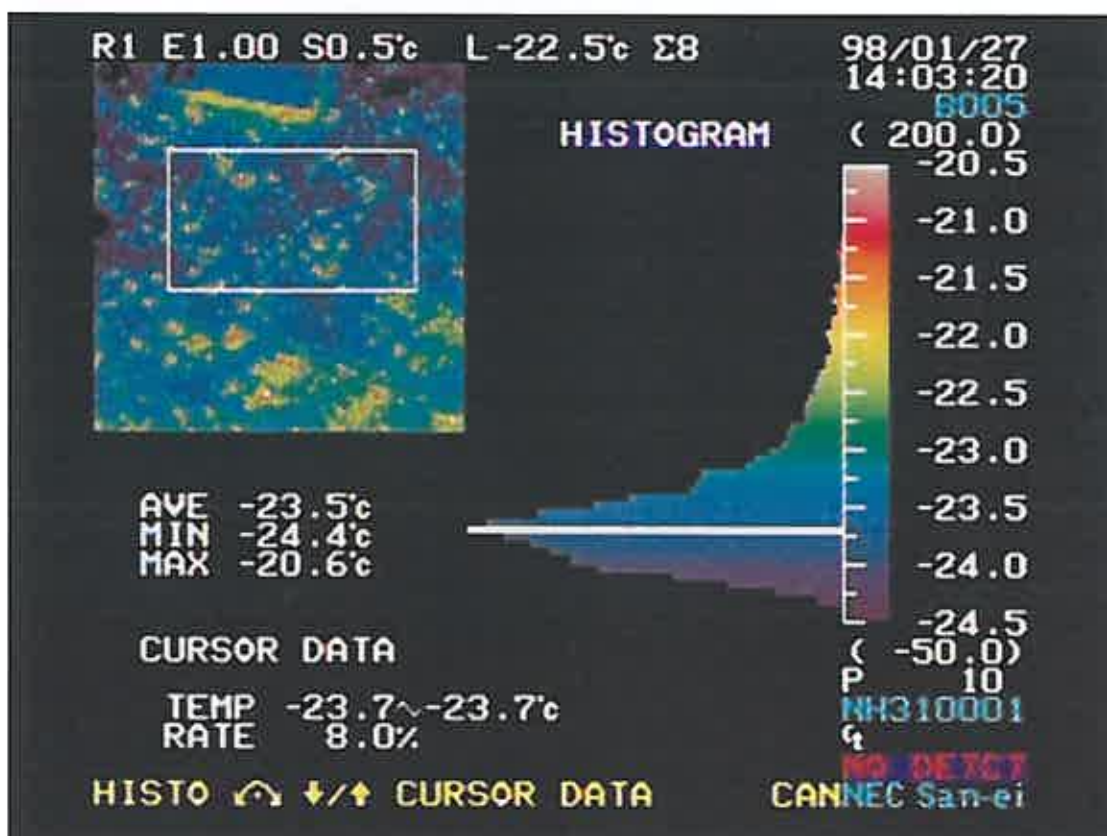


Bild oben: IR-Bild wie oben. Vom Boxausschnitt A ist ein Histogramm dargestellt. Es zeigt, dass die warmen Punkte nur in geringem Mass vertreten sind. Grund?

5.10.2 IR-Darstellung eines Schneeprofiles

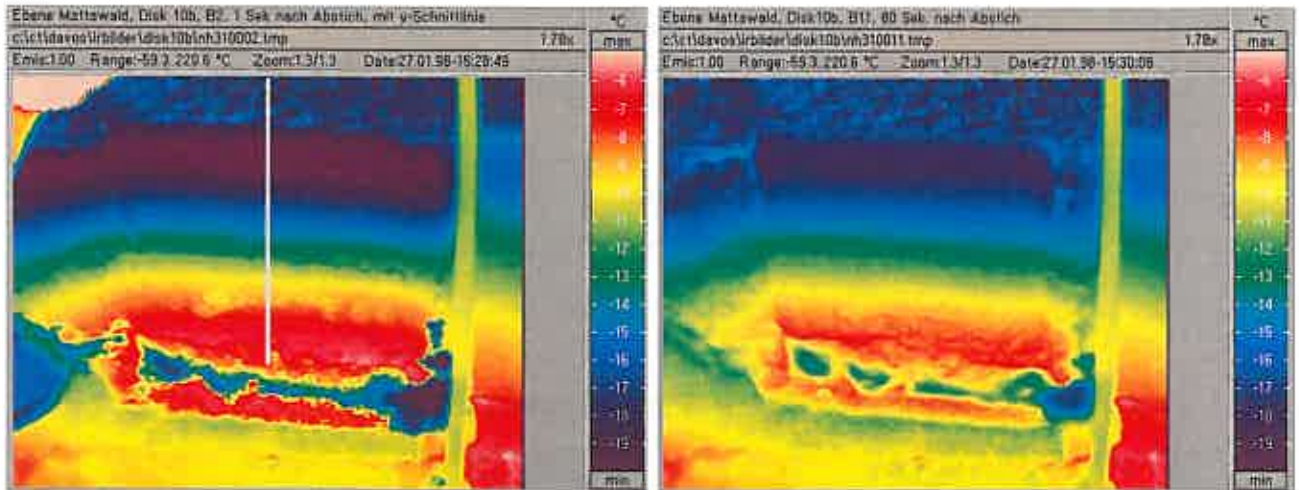
Dank schönem, kaltem Winterwetter und permanenter Schattenzone (Ebene vor dem Mattawald), herrschten optimale Bedingungen für eine weitere Schneeprofil-Darstellung analog Kap. 5.03 und Kap 5.14. Zum Temperaturgradient: siehe Vorbemerkung in Kap. 5.03.

Resultat / Darstellungen:

- Profil 1: Schneehöhe bis Boden ca. 70 cm, ideale Bilddarstellungen: Dok 10.8.ff.
- Profil 2: Schaufelabstich nur über die obersten 30 cm, dafür so schnell, dass nach 1 Sek. das erste IR-Bild gemacht werden konnte. Weitere Aufnahmen folgten im Sekunden-Intervall [Film B 037]. Aus diversen y-Schnittlinien dieses Films entstand das Diagramm nebenan, das die Temperaturänderung im Zeitverlauf zeigt.
- Auf der Profilwand steigt innerhalb von 80 Sek nach dem frischen Abstechen die Temperatur maximal um ca. 3 °C an.

Kommentar:

Solche Aufnahmen könnten als Test für Schneedecken-Simulationsprogramme dienen. Diese dynamischen Temperaturveränderungen mit klar definierten Randbedingungen (Lufttemperatur + Wind) sowie mit der gegebenen Schneestruktur, können wohl kaum auf eine bessere Art ausgemessen und visualisiert werden.



Bilder oben: Die obersten 30 cm eines Schneeprofiles, auf der Ebene vor dem Mattawald, Davos. Totale Schneehöhe: ca. 70 cm, 1 vertikales IR-Pixel entspricht ca. 2.4 mm

Bild links: 1 Sek. nach dem Abstechen
(mit y- Linie für Werte im Diagramm unten)

Bild rechts: 80 Sek. nach dem Abstechen
(mit genau gleicher Bildeinstellung)

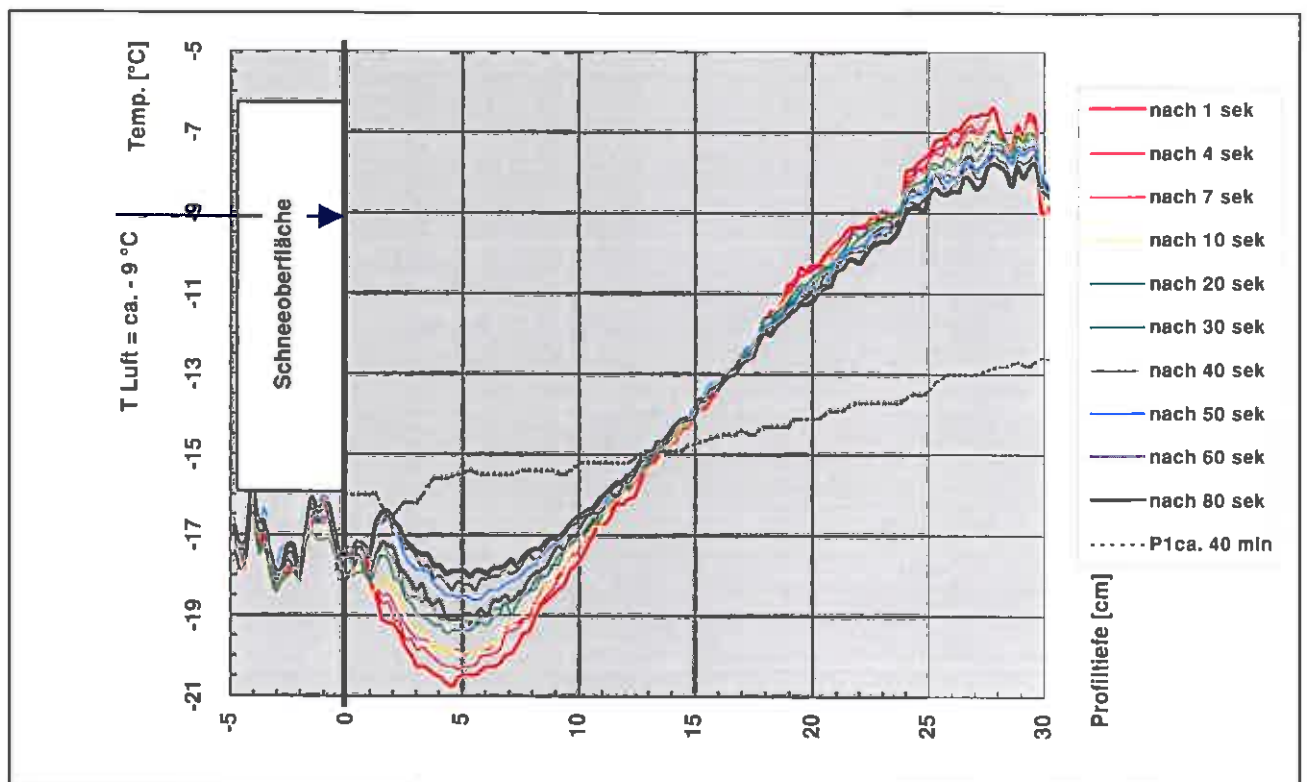


Diagramm oben: 27.01.1998, ca. 15:30 Uhr, Ebene nördlich Mattawald.

Ein Temperaturprofil im Zeitverlauf. Es entstand aus verschiedenen Aufnahmen des Films [B 037], aus dem auch die zwei IR-Bilder oben stammen.

Die „1-Sek.-Kurve“ kann praktisch als wahre Temperaturkurve für diese Schneedecke angenommen werden. Der Bogen bei 5 cm Tiefe stellt sich ein, weil am Tag die Oberflächentemperatur ansteigt und damit den nächtlichen Temperaturgradienten, bei dem Oberflächentemperaturen von unter -30 °C erreicht werden, stark zurückbiegt (vgl. Meteo-Daten Dok 10.10).

Einsatz 11:

Ziel: Kurzeinsatz für das Projekt „Wärmeflussmessungen an einem Flachdach“ von Christoph Tanner, EMPA Bauphysik.		
Datum: 02.03.1998	Ort: Flüelastrasse 5 Davos-Dorf	Objekt / Thema: Wärmebrücken-Check auf Wohnungsdecke

5.11 Wärmebrücken-Check auf Wohnungsdecke

Bevor auf dem Flachdach Wärmeflussmesser und Thermoelemente montiert wurden, musste geprüft werden, ob nicht irgendwo Wärmebrücken in der Dachkonstruktion vorhanden sind. Würde ein Wärmeflussmesser bei einer Wärmebrücke installiert, wäre das Resultat nicht repräsentativ und ergebe ein völlig falsches Bild der tatsächlichen Gesamtsituation.

Die IR-Bilder in Dok 11.1 - 11.3 zeigen verschiedene Deckenteile der Dachwohnung „Mathis“.

Auswertungen zu den Messungen am Flachdach folgen später an der EMPA in Dübendorf.

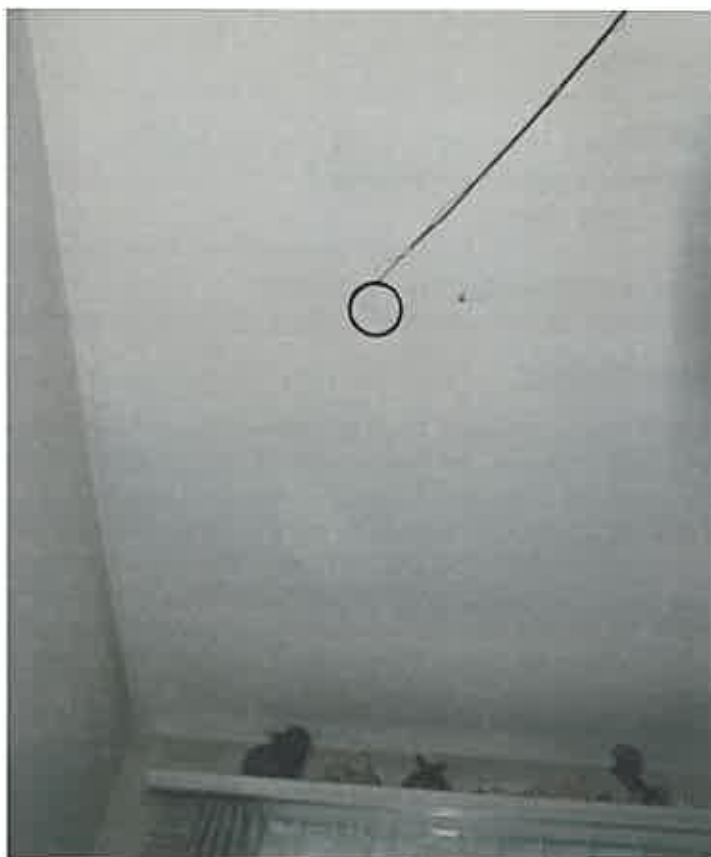
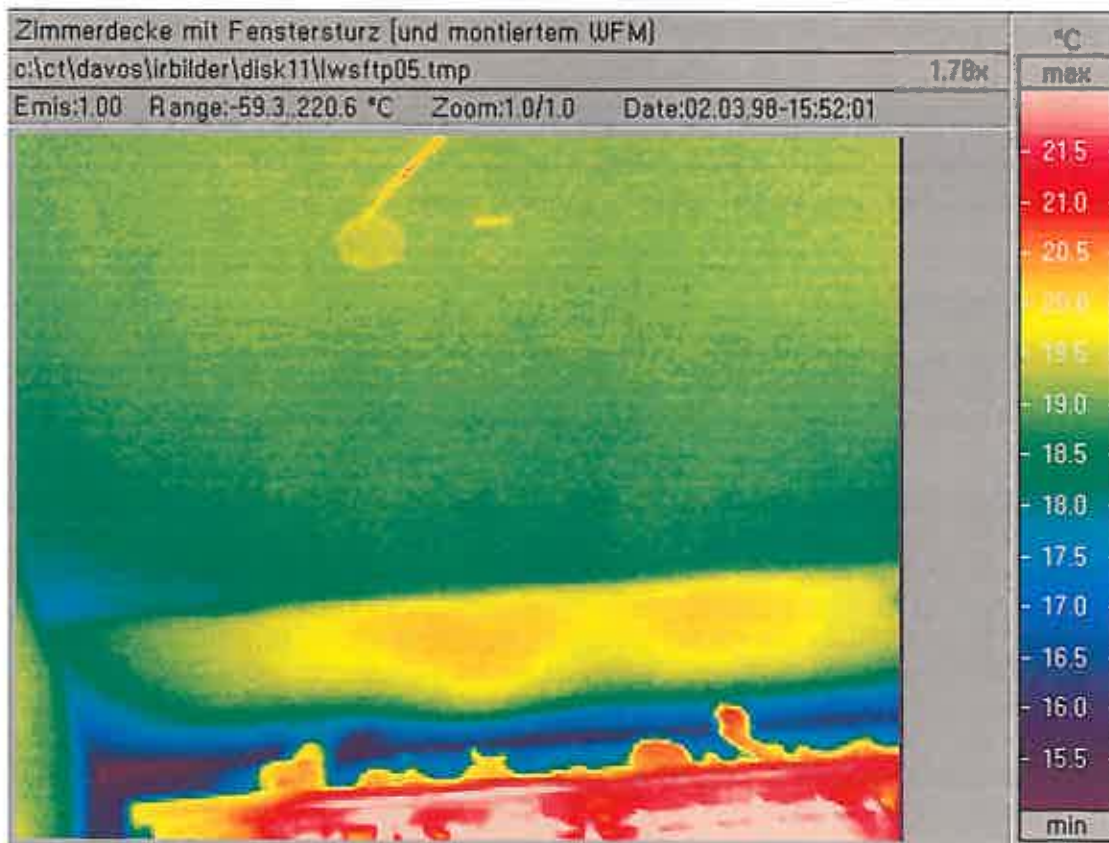


Bild links:

Eine Zimmerdecke im MFH, an der Flüelastrasse 5, in Davos.
Die runde Scheibe oben im Bild ist der Wärmeflussmesser (Ø 10 cm), welcher den Wärmestrom in W/m^2 misst.
Am unteren Bildrand: Der Fenstersturz mit Vorhangbrett.

Bild unten:

IR-Bild der Situation oben.
Deutlich erkennbar wird hier, dass im Deckenrandbereich über dem Fenster ein Dämmstoffstreifen eingelegt ist (gelbe Zone).



Einsatz 12:

Ziel: Dienstleistung für Rolf Pfister, SLF (Dissertation)		
Datum: 10.03.1998 13.03.1998	Ort: Garten SLF Davos	Objekt / Thema: Projekt „Schneeinterzeption an Bäumen“ (Interzeption → abfangen...)
Wetter: beide Daten: mässig kalt, schön, mit vorüberziehenden Wolkenfeldern		

5.12. Temperaturverteilungen an einer Fichte

Die Aufnahmen dienen R. Pfister für seine Dissertation mit dem Thema: „Messung und Modellierung der Schneeinterzeption und Strahlung im Gebirgswald“. Im Garten des SLF Geländes steht zu diesem Zweck für verschiedene Messungen eine ca. 8 m hohe Fichte.

Im Temperatur Bereich interessiert vor allem, wie gross die Unterschiede innerhalb eines Baumes, resp. auf den einzelnen Ästen sind. Da auch hier (wie im Schnee) dynamische Prozesse ablaufen, stellt sich die Frage, wie schnell sich infolge Wind (Konvektion), Sonne (Strahlung) und evtl. Schnee, Veränderungen der Temperaturverhältnisse einstellen. Zu Vergleichszwecken mit den IR-Bildern wurde am Stamm der Fichte, ca. 1 mm unter der Borke, ein Thermoelement eingebaut, welches die Daten im 5 (und z.T. im 1) Min. Intervall erfasste (Logger: Squirrel).

Resultate / Darstellungen:

- Diverse IR-Aufnahmen aus ca. 12 m Distanz (ganzer Baum) und mit Zoom im Detail (Einzelast) zeigen die Temperaturverteilung zu verschiedenen Zeiten (Dok 12.1 ff.).
- Film auf [B 038], 100 Bilder von einem Einzelast, mit 5 Sek. Intervallen.
- Film auf [B 039], 81 Bilder „Ein Tag im Leben der Fichte“, mit 10 Min. Intervallen (Bild Bsp. nebenan)
- Alle Aufnahmen wurden mit dem Emissionswert 0.98 gemacht. Das entspricht dunklem, nicht glänzendem Material. Dies trifft sicher zu für den Baumstamm und die Äste. Ob die Emission für die Nadeln ebenfalls so hoch liegt, muss noch abgeklärt werden.
- Vergleich der Squirrel-Daten mit den IR-Bildern: siehe Diagramm nebenan

Kommentar:

1. Das IR-Bildmaterial ist optisch gut.
2. Subtraktionsdarstellungen (zeigen die Veränderung zwischen zwei Aufnahmen z.B. infolge Einstrahlungsabnahme wegen Wolken) von einzelnen Bildern sind problematisch, da während den Aufnahmen praktisch immer ein kleiner Wind wehte, der das Messobjekt (Ast / ganzer Baum) in Bewegung hielt.
3. Eine richtige Ableitung von Temperatur-Einzelwerten (z.B. max./min. Werte) aus den Bildern ist abhängig vom Objekt: Ein Baum resp. seine Äste bestehen aus einer sehr feingliedrigen Struktur. Die Nadeln haben einen Durchmesser von ca. 1 mm. Das bedeutet, dass eine genaue Temperaturangabe für eine Nadel nur dann gemessen werden kann, wenn die IR-Bildauflösung, resp. 1 Pixel des IR-Bildes eine Fläche erfasst, die kleiner als die Nadel ist. Ist die Pixelfläche (viel) grösser, so wird die ermittelte IR-Temperatur für diesen Bildpunkt zum Mittelwert von dem, was auf die Pixelfläche strahlt. Dies wirkt sich bei einer Nadel (mit z.B. effektiven + 3 °C) mit klarem Himmel als Hintergrund (mit z.B. - 50 °C) extrem stark aus! Selbst wenn kein „Hintergrund“ auf die Pixelfläche fällt (z.B. dichtes Nadelgewirr), so ergibt sich ein Mittelwert aus besonnten und schattigen Nadeln. (vgl. Distanz-Effekt analog Kap. 5.10.1)
4. Diagramm nebenan: Ein Vergleich von Infrarot Einzelmesswerten mit Squirrel Messdaten (Logger). Die Übereinstimmung von morgens 7 Uhr bis abends 17 Uhr ist sehr gut, in den folgenden 4 Stunden sind die IR-Messdaten um ca. 2 °C tiefer als die Squirrel- Werte. Grund: *unklar!* ?

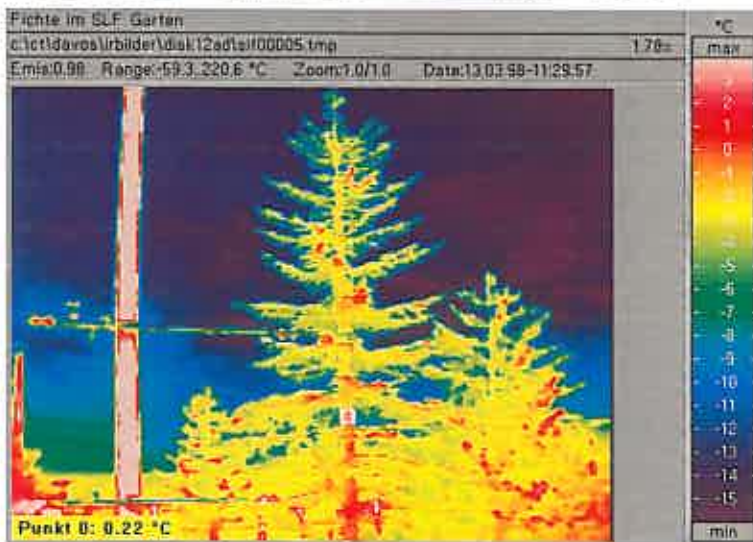


Bilder links:

Die für die Messungen präparierte Fichte im Garten des SLF.

IR-Bild aus der Bildserie „Ein Tag im Leben der Fichte“.

Die Punktmarkierung im IR-Bild zeigt die Stelle am Stamm, wo mit einem Thermoelement die Oberflächen-temperatur des Stammes erfasst wurde (für das Diagramm unten).



Vergleich Infrarot - Squirrel Messdaten

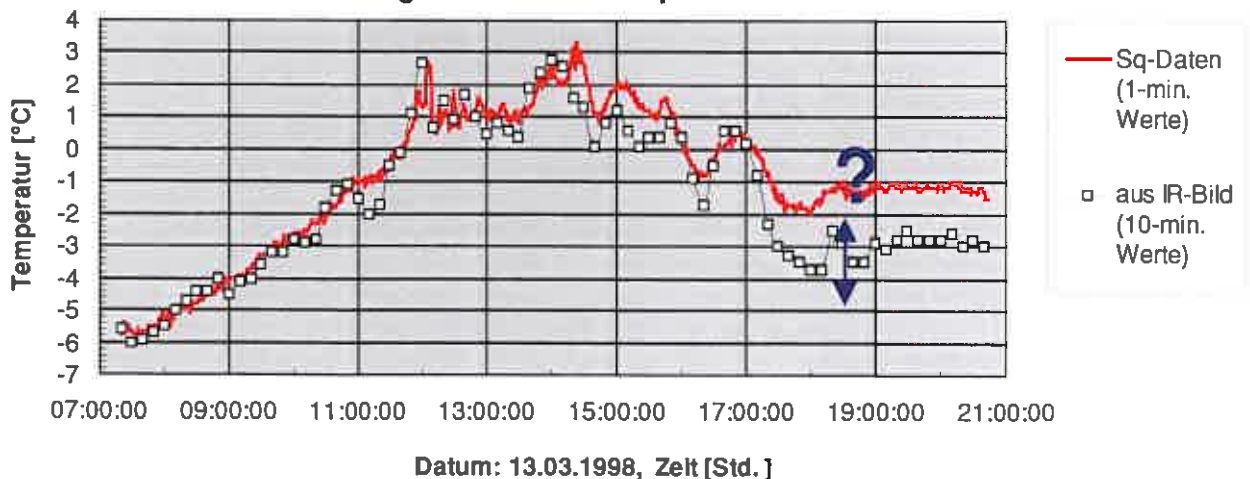


Diagramm oben: Vergleich der IR-Messdaten (10 Min. Intervalle) mit dem Thermoelement (1 Min. Intervalle, Fühler: Cu Co).

Einsatz 13:

Ziel: Dienstleistung für Martin Kern, SLF (Dissertation)		
Datum: 17.03.1998	Ort: NE-Hang „Wäng“, Pischa	Objekt / Thema: Projekt „ABS-Rucksäcke“ (Avalanche Balloon System). Beobachtung eines Lawinenabgangs (mit Sprengung)
Wetter: leichter Schneefall, mässig-starker Wind, Sichtweite bis ca. 50 m		

5.13. Lawinensprengung auf Pischa

Die IR-Aufnahmen sollen nicht nur Martin Kern für seine Dissertation dienen, sondern ganz allgemein erstmalige IR-Bilder (Film) sein, die einen Lawinenabgang zeigen.

Idealvorstellung war, dass aus günstiger Position, parallel zur IR-Kamera mit einem Video ein Lawinenabgang beobachtet wird. Die Bilder könnten dann Aufschluss geben über die Temperaturverteilung in der Gleitfläche und im Stauchwall sowie Veränderungen im Verlauf der Zeit oder infolge von Reibung aufzeigen.

Während der Versuchsdurchführung waren jedoch die Wetterbedingungen dermassen schlecht, dass weder ein guter Standort noch akzeptable Sichtbedingungen vorhanden waren. Dem entsprechend sind die Aufnahmen schlecht bis unbrauchbar und werden nicht weiter ausgewertet. Bildsequenzen in Dok. 13.1 bis 13.3, vgl. weiteres Vorgehen, Kap 6.1 !

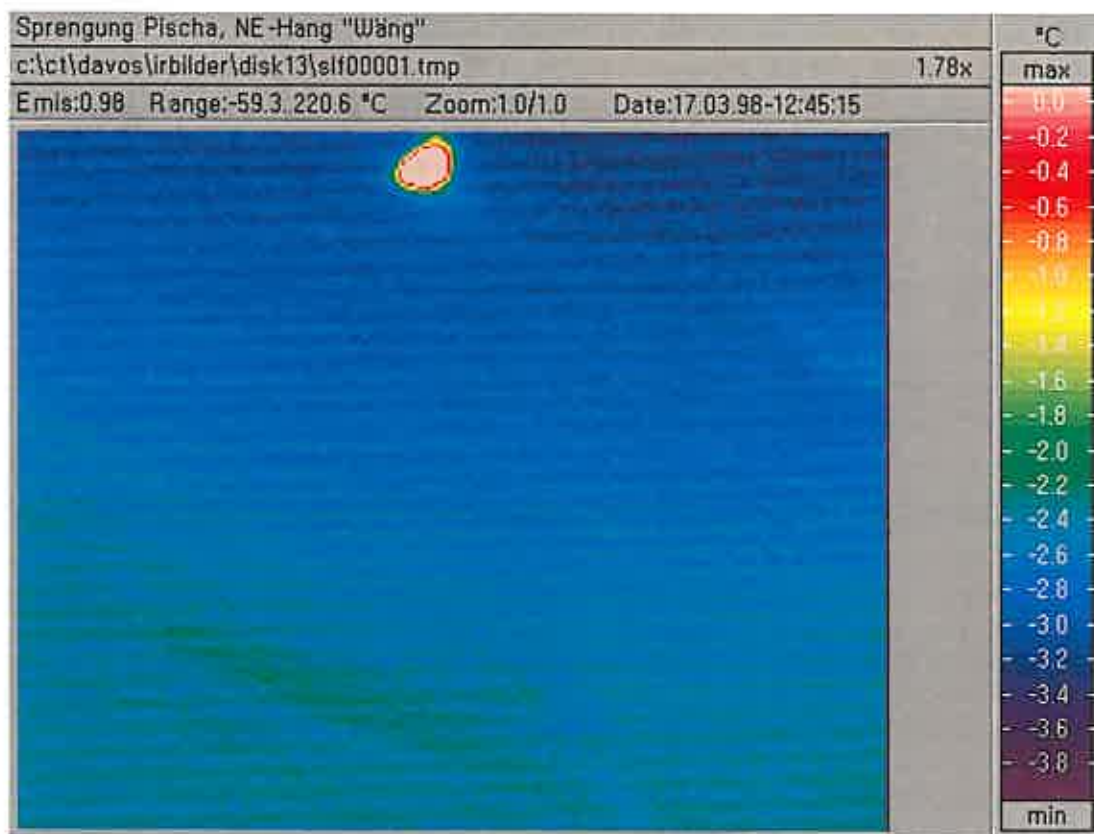


Bild:
Blick zum Sprengpunkt im Lawinengang „Wäng“ auf der Pilscha.
Vor einigen Sekundenbruchteilen ist die Ladung detoniert. Was übrig bleibt ist eine Warmluftwolke, die in Windrichtung über die Schneeoberfläche abzieht (oben Mitte).

Einsatz 14:

Ziel: IR-Aufnahmen im Schnee, einmal unter ungünstigen Bedingungen, d.h. mit wechselhafter Strahlung und grösseren Windgeschwindigkeiten als bisher.
Hand-Vergleichsmessungen: Dr. Jürg Schweizer und Christian Camponovo

Datum:	Ort:	Objekt / Thema:
24.03.1998	Versuchsfeld WFJ	Strahlungseinflüsse auf Versuchsfeld und Umgebung, Schneeprofil mit Temperaturverlauf (mit Wind !)

Wetter: kalt, Windstärke bis 4 m/s, mit schnell wechselnder Bewölkung

5.14.1 Wechselhafter Strahlungseinfluss auf die Schnee-Oberfläche

Zitat aus Kap. 5.01.3:

Bei Strahlungswetter haben auch geringe Windgeschwindigkeiten resp. Schwankungen der Luftgeschwindigkeit eine sofortige und deutliche Auswirkung auf die Oberflächentemperatur „Luftpakete“ ziehen über die Oberfläche und beeinflussen die Temperatur (Erwärmung).

Neben dem Wind erzeugt aber auch die wechselnde Strahlung (zeitweise Bewölkung) starke Veränderungen, im vorliegenden Fall trotz relativ hohen Windgeschwindigkeiten.

Resultate / Dokumentation:

Blick mit der IR-Kamera vom grossen Barackendach auf das Versuchsfeld WFJ :

- Zwischen Sonne und Schatten sinkt die Oberflächentemperatur in 1 Min. im Mittel um ca. 3 °C.
- Die Bandbreite (Max. - Min.) der Einzelwerte aus einem ca. 6 x 6 m grossen Feld (Box A) beträgt 1.5 °C, siehe Diagramm und Bilder nebenan.
- 1. Film: [B 041], 100 Bilder im 1Sek. Intervall über das Versuchsfeld (Daten für Diagramm)
- 2. Film: [B 042], 100 Bilder im 2 Sek. Intervall, Blick vom grossen Barackendach gegen WFJ Gipfel (SE-Hang). Veränderungen durch Wind und Strahlung (→ Sub-Film!). Bilder: Dok 14.5

5.14.2 IR-Darstellung eines Schneeprofiles

Ziel: Eine weitere Schneeprofil-Darstellung analog Kap. 5.03 und Kap 5.10.2 Die Randbedingungen sind diesmal anders: wechselnde Bewölkung und Wind bis 4 m/s, Ort: Versuchsfeld WFJ. Zum Temperaturgradient: Siehe Vorbemerkung in Kap. 5.03.

Resultate / Darstellungen:

- Es wurden 3 verschiedene Profilabstiche, von der Oberfläche bis zu ca. 70 cm Tiefe gemacht. Bilder: Dok 14.5 bis 14.7
- Film vom 1. frischen Abstich auf [B 043], 39 Bilder im 1 Sek. Intervall.
- Später: 2 weitere frische Abstiche, Bilder: Dok 14.8

Erkenntnisse:

1. Die Vergleichstemperaturen (Handmessungen von Dr. J. Schweizer) liegen im Bereich von ± 1 bis 2 °C über und unter den IR-Werten (Diagramm Dok 14.9).
2. Der starke Wind „verwischt“ die Temperaturen der Profiloberfläche in Sekundenbruchteilen. Mit der 1 Sek. Abtastrate der IR-Kamera ist man immer zu spät für die effektiven Profilttemperaturen! Diese starke und schnelle Windbeeinflussung zeigt sich auch in einem rel. unregelmässigen Oberflächenbild: Da die Profilwand nicht glatt („geschliffen“) ist, sondern kleine Unebenheiten (Krümel, Klumpen) aufweist, werden solche hervorstehenden Teile durch den Wind schneller beeinflusst als der Rest der Profilwand (Bilder: Dok 14.5 bis 14.7).



Bild links:

Normalfoto vom Versuchsfeld WFJ, ab dem Dach der grossen Baracke.

Zeit ca. 11:27:58 Uhr, die ganze Oberfläche ist (noch) besonnt.

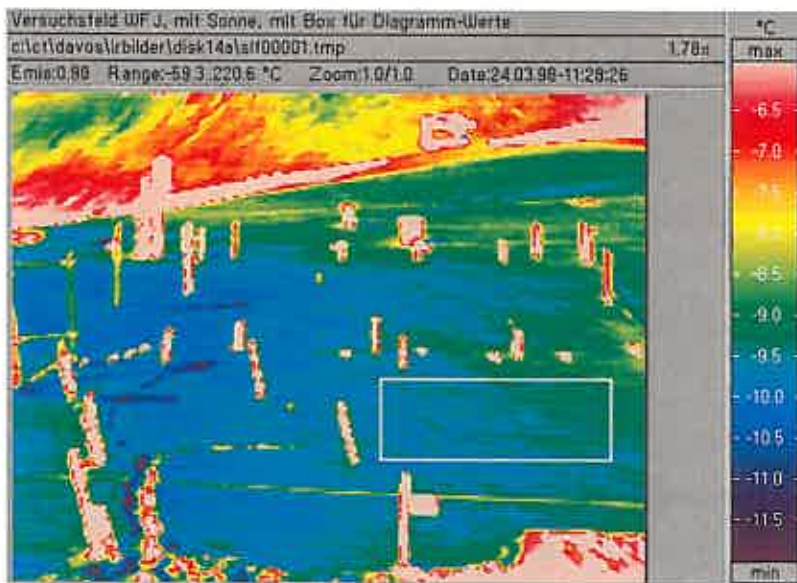


Bild links:

IR-Bild analog dem Bild oben.

Zeit: 11:28:26 Uhr, genau in diesem Moment überzieht ein Schatten, von links nach rechts, die ganze Oberfläche (Wolke).

Das Rechteck markiert die Box A, (ca. 6 x 6 m) aus welcher die Daten für das Diagramm unten stammen.

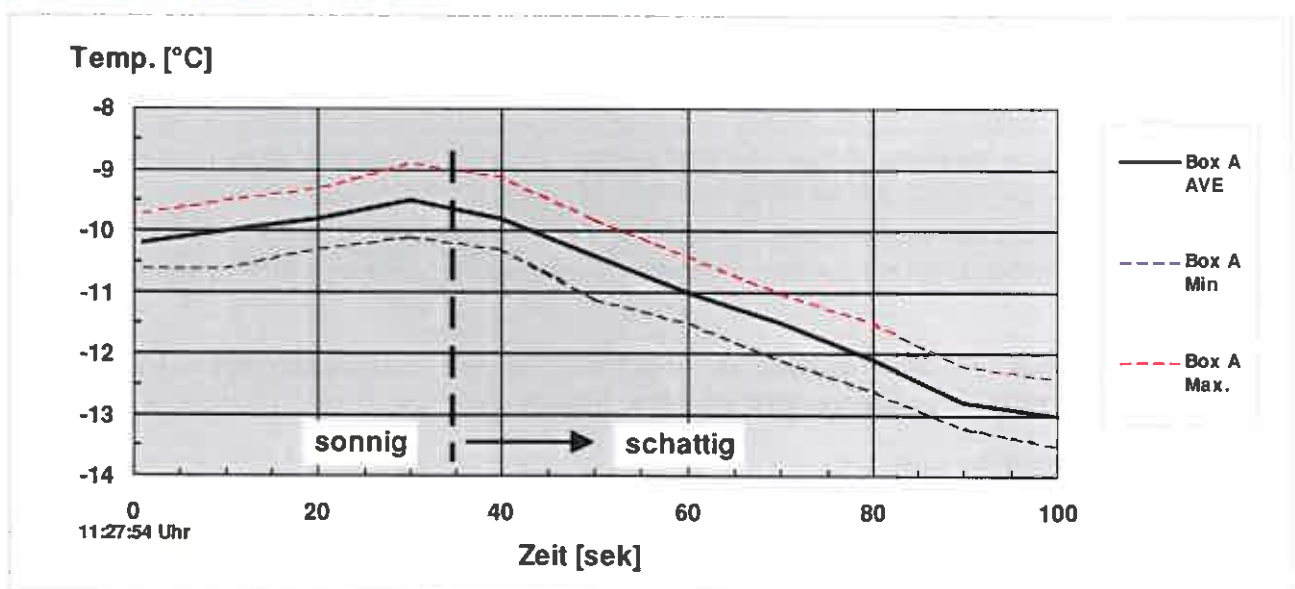


Diagramm oben: Oberflächentemperaturen der Box A im Zeitverlauf über 100 Sekunden mit Mittelwert (AVE), Min. und Max. Werten. Ab ca. 35 Sek. wird die Oberfläche schattig (Wolke).

Einsatz 15:

Ziel: Verfolgen eines kontrollierten Waldbrandes mit der Infrarot-Kamera. Dienstleistung für Marco Conedera, und z.T. für Dr. Perry Bartelt, WSL (= Bundesauftrag für EMPA Abt. Bauphysik, Dossier Nr. 173 254)		
Datum: 27.03.1998 28.03.1998	Ort: Vigana, Tessin Gemeinde St'Antonio	Objekt / Thema: Projekt „Feuerexperiment“, ein kontrollierter Waldbrand im Tessin, mit Vorbereitungen am SLF
Wetter: Am Versuchstag schön, warm, wenig Wind, am Nachmittag zunehmende Dunstschicht		

5.15 Feuerexperiment: Waldbrand

Das vom WSL organisierte Feuerexperiment dient nicht nur der Waldwissenschaft sondern wird von Biologen, Zoologen u.a. Forschergruppen begleitet und ausgewertet.

Um möglichst viele Informationen zu erhalten, wurde neben der IR-Kamera der EMPA auch eine IR-Kamera des Militärs (auf einem Helikopter installiert) eingesetzt:

einige Unterschiede:

	IR-Kamera EMPA	Flir 2000, auf Helikopter
Zuständig:	Ch. Tanner, EMPA Bauphysik, Tel 01 823 55 11	Oberst Brun, Tel. 01 823 25 08
Kamera:	8 - 13 µm, Stickstoffgekühlt	8 - 13 µm, Stickstoffgekühlt
Bilder:	max. 1 / Sek. digital, diverse Auswertungen von jedem Einzelbild möglich (farbig, s/w, Schnitte etc.)	ca. 50 / Sek. Bilder (s/w) auf Video keine Temperaturangaben, nur hell = warm, dunkel = kalt
Standort:	Boden fixer Ausschnitt im Versuchsgelände	Luft ganzes Versuchsgelände
Einsatzdauer	ganzer Versuchstag	2 Sequenzen (Morgen und Mittag)

Der Vorteil der EMPA IR-Kamera liegt vor allem darin, dass nachträgliche Bildauswertungen gemacht werden können. Jedes der IR-Bilder enthält die genaue Temperaturinformation von 53'000 einzelnen Bildpunkten womit über den Verlauf der Zeit beliebig viele Diagramme mit jeder gewünschten Information (Flächen, Linien, Punkte) erstellt werden können. Bilder: siehe folgende Seiten.

Da das Thema „Feuer“ für mich Neuland war, machte ich in der Montagehalle des SLF einen Vorversuch, um die notwendigen Kameraeinstellungen (Range) zu testen (Film [B 028], Dok 15.1).

Anmerkung zum Waldbrand:

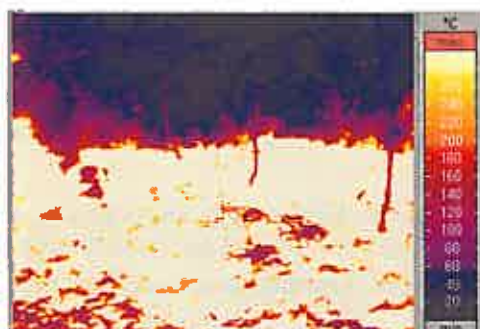
Dieser Waldbrand in einem Tessiner Kastanienwald war kein Kronenbrand (mit riesigen Flammen), sondern ein Flächenbrand, wie er auf der Alpensüdseite im Winter üblich ist. Dieser frisst sich in kurzer Zeit, mit ca. 1 m hohen Flammen über den Waldboden (Lauffeuer). Dabei verbrennt vor allem Laub, Äste, Gras und anders Kleinmaterial. Bäume mit mehr als 10 cm Ø überstehen das kurze Feuer meist problemlos.

Wesentliche Erkenntnisse aus dem Waldbrand-Experiment:

1. Der Range 2, mit Temperaturwerten von 0 bis 800 °C, reicht gerade aus, um Feuer und Glut mit Distanzen von ca. 10 m gut darstellen zu können (d.h. mit Max. und Min. Werten). Pixelgrösse: 2 x 2.4 cm
2. Achtung, auch bei Feuer, das kleinräumig, dynamisch und sehr inhomogen ist, spielt der „Distanz-Effekt“ stark mit (vgl. Kap. 5.10.1 und 5.12 (3)), d.h. je weiter entfernt die Feuerfläche ist, desto tiefere Max.-Temperaturen werden registriert (→ Mittelwerte).
3. Der während des Feuers entstandene weisse Rauch ist im IR-Bereich durchsichtig, im optischen Bereich nicht ! Wie weit, oder ob überhaupt, die Rauchgase die Temperaturangabe des Hintergrundes verfälschen ist (noch) nicht bekannt.
4. Die Flammen (ein Gas) sind teilweise IR-durchlässig. Ihre im Bild wiedergegebene Temperatur ist viel zu tief.
5. Die Emissionswerte der Glut sind unbekannt und sollten noch überprüft / abgeklärt werden. Trotzdem scheinen die Gluttemperaturen im richtigen Bereich zu sein.
6. Für Versuche am Brandtisch (in der WSL), wo Erkenntnisse für die Modellierung von Bränden gewonnen werden, wäre die IR-Kamera der EMPA meiner Ansicht nach bestens geeignet, um die tatsächlichen Temperaturverläufe der Bodenstruktur 2-dimensional und im Verlauf der Zeit darzustellen.
7. Bei IR-Bild Darstellungen mit Feuer muss mehr als bei andern Aufnahmen der Verwendungszweck des Bildes bekannt sein. Ist jemand an den Oberflächen-Temperaturen der Materialien interessiert, unmittelbar bevor die Feuerfront kommt (Strahlungshitze), so ist der Farb-Temperaturkeil für die Bilddarstellung im Bereich unter 100 °C zu wählen. Will hingegen jemand Gluttemperaturen und Feuerinseln sehen, so sind Bildeinstellungen bis 800 °C sinnvoll. Das bedeutet, dass je nach Verwendungszweck die gleichen Aufnahmen mehrfach dargestellt werden müssen.



09:45:31 h



09:48:01 h



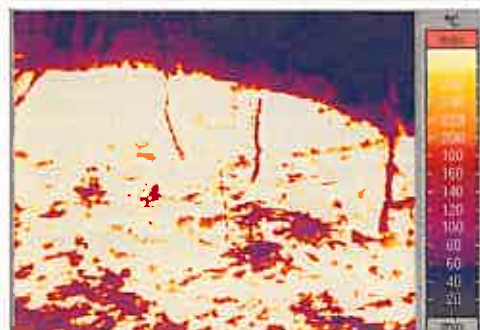
09:46:01 h



09:48:31 h



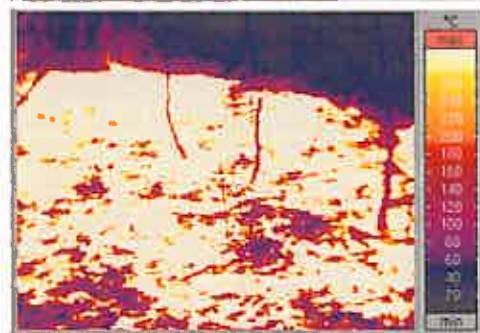
09:46:31 h



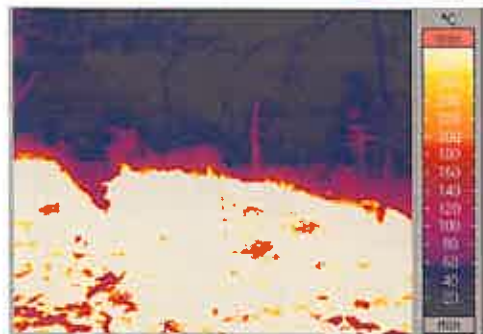
09:49:01 h



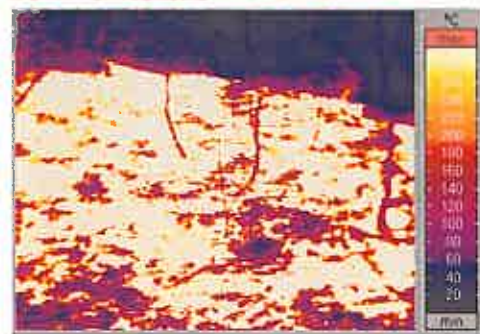
09:47:01 h



09:49:31 h



09:47:31 h



09:50:01 h

Bilder oben: Sequenz mit 30 Sek. Intervallen, während der sich die Feuerfront im IR-Blickfeld den Hang hinauf frisst. Bildbreite unterer Bildrand: ca. 6 m , oben ca. 19 m (Perspektive!). Länge des Blickfeldes (Bildhöhe): ca. 27 m, Hangneigung im Schnitt ca. 28 Grad.



09:46:30 h



09:48:00 h



09:51:00 h

Bilder links:

Normalfoto-Serie der Feuerfront vom gleichen Standort wie die IR-Kamera (7 m über dem Boden, über der Grundlinie wo das Feuer gestartet wurde).

Die Genauigkeit der Zeitangaben ist allerdings nur $\pm \frac{1}{2}$ Min.

Im sichtbaren Bereich ist der Rauch für den Mensch - im Gegensatz zur IR-Kamera - undurchsichtig.

Bild unten:

Gleicher Ausschnitt, nach dem Feuer. Für verschiedene Bodenuntersuchungen wurde das Gebiet in Sektoren unterteilt.



16:00:00 h



Bild oben:

Flugaufnahme des ca. 50 x 70 m grossen Versuchsgeländes. Koordinaten: 720 050 / 112 150
----- Blickfeld der EMPA IR-Kamera: ca. 340 m² (auf Baum montiert, ca. 7 m über dem Boden)

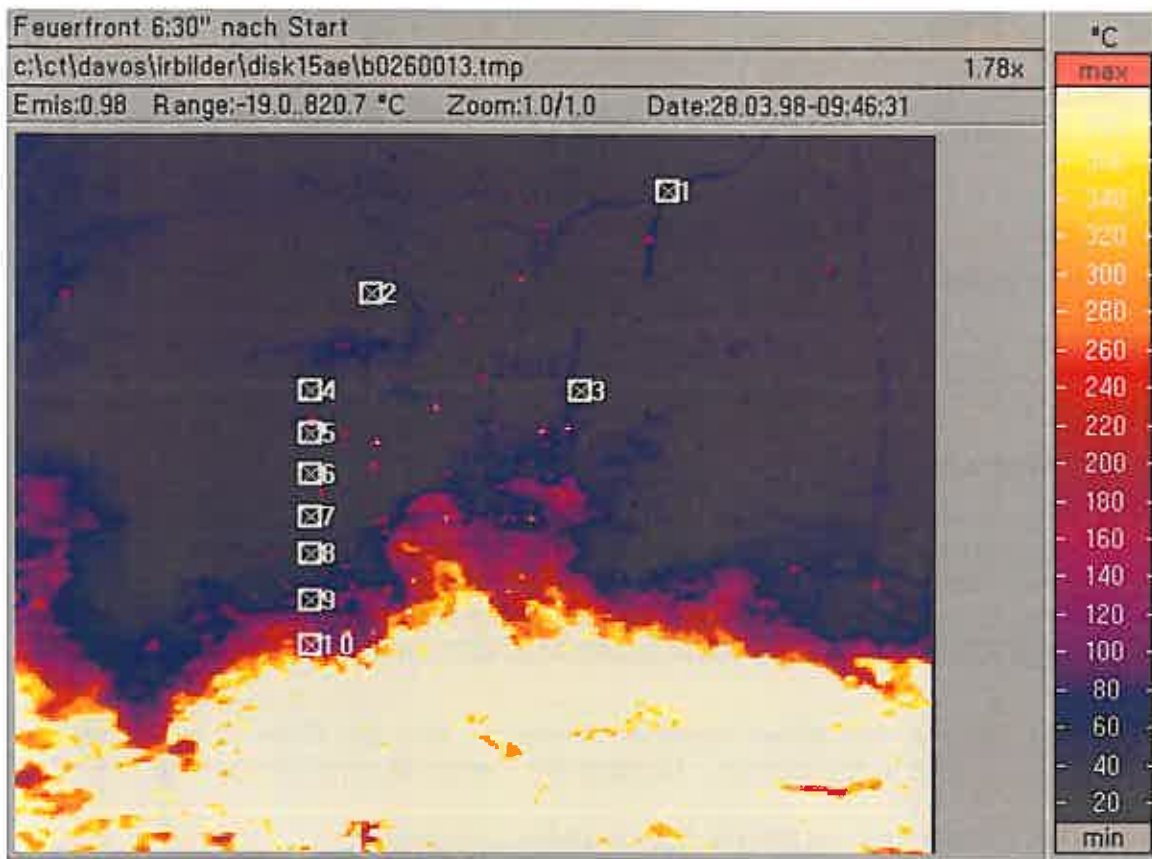


Bild oben: Fixierung von 10 Einzelmesspunkten vor der Feuerfront. Mit diesen Daten und dem Verlauf der Zeit entstand das Diagramm unten (MP 1 auf hochliegendem Ast).

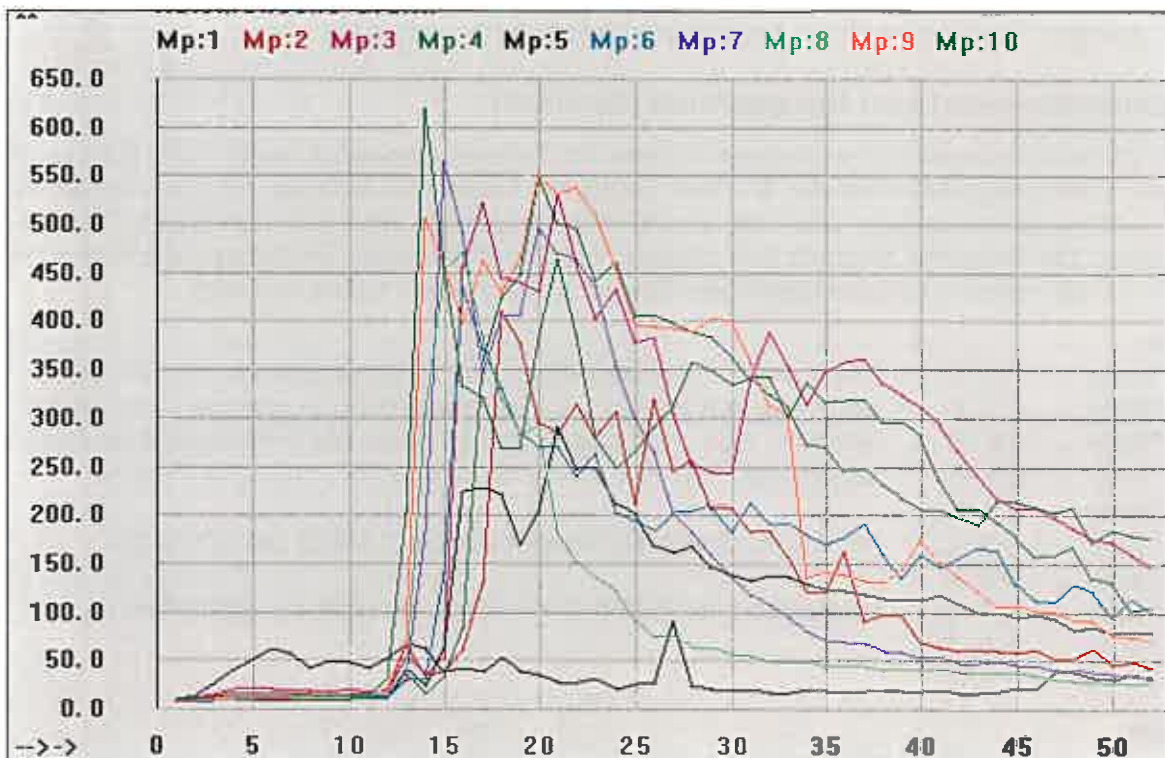


Bild oben: y- Achse: Temperatur [°C] x- Achse: Zeit [in 1/2 Min. → 10 = 5 Min.].

Die Linien der 10 Einzelpunkte (vgl. IR-Bild oben) zeigen, mit welchen Temperaturen die Punkte vom Feuer „überrollt“ wurden. Die entfernteren Punkte liefern tiefere Temperaturen wegen dem „Distanz-Effekt“. MP 1 (Ast) zeigt, dass vor der Feuerfront in der Höhe mehr Strahlungshitze wirkt als am Boden, weil mehr Feuerfläche sichtbar ist.

Einsatz 16:

Ziel: Bei warmem Sommerwetter, wenn die Schneedecke schmilzt, muss die Temperatur im Schnee überall 0 °C sein (ideale Referenz!). Was zeigt die IR-Kamera? Bei welcher Emission stimmen die Werte?

Datum: 22.06.1998	Ort: Flüelapass	Objekt / Thema: Kalibrierung der Kamera, Emissionswert von feuchtem Schnee, Reflexionen im Wasser und im Schnee
-----------------------------	---------------------------	---

Wetter: warm! mässig bis starker Wind, zuerst zeitweise, dann stark bewölkt.

5.16.1 Isothermes Schneeprofil

Der 22.06.1998 war ein warmer Sommertag. Auf dem Flüelapass (2380 m) lag die Lufttemperatur am Nachmittag zwischen 12 und 13 °C. Es war wechselnd, aber zunehmend bewölkt. Die Oberflächentemp. der in der Umgebung noch sichtbaren Schneeflecken musste bei diesen Bedingungen überall 0 °C sein. Beim IR-Kamera Standort auf dem Pass war die ganze Schneedecke isotherm (bei 0 °C). Diese Situation muss in den IR-Bildern dargestellt werden können.

Resultate:

- Isotherme Bilder: Dok 16 und Bilder nebenan. Allerdings sind die Bilder vom Schneeprofil (oben) mit Epsilon = 0.98 aufgenommen, so dass die Temperaturangaben um ca. 0.7 °C zu hoch sind (vgl. Kap. 5.16.2).
- Die Bandbreite der Differenzen im Bild beträgt nur einige Zehntelgrad.
- In der Bildserie Film [B 044] wird das Profil frisch abgestochen. Auch daraus resultiert keine messbare Veränderung (→ die Schneedecke *ist* isotherm).
- Lediglich die unterschiedlich wechselnde Strahlung erzeugt in einigen Bildern dieser Serie, bei *einigen wenigen Pixeln*, eine Reflexionswirkung (Vermutung, nicht gesichert).

5.16.2 Emissionswert von Nassschnee (Epsilon)

Bei den IR-Winteraufnahmen mit trockenem Schnee, im Temperaturbereich (weit) unter Null, wurde gemäss den Erfahrungswerten von Dr. P. Föhn (SLF) ein Epsilon für Schnee von 0.98 eingesetzt. In Kapitel 5.05 wurde aufgezeigt, dass bei einem Wasser-Schnee Gemisch der Epsilon-Wert auf ca. 0.94 sinkt. Der folgende Versuch soll zeigen, welche Differenzen entstehen, wenn feuchter Schnee (0 °C) mit mehreren unterschiedlichen Epsilon Einstellungen betrachtet wird.

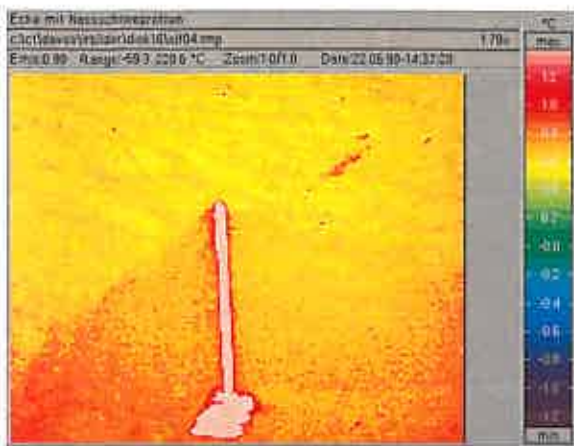
Resultate:

E = 0.91: Temp. = - 1.4 °C	Bilder siehe nebenan (Mitte). Die Temperaturwerte sind die Mittelwerte aus den Boxen 1 + 2 welche genau die gleichen Mittelwerte lieferten! Box 1 für eine saubere Fläche (Schneeoberfläche 5 cm abgetragen, Box 2 für eine verschmutzte (natürliche) Fläche.
E = 0.92: Temp. = - 1.0 °C	
E = 0.93: Temp. = - 0.8 °C	
E = 0.94: Temp. = - 0.4 °C	
E = 0.95: Temp. = 0.0 °C	
E = 0.96: Temp. = + 0.2 °C	Im Schnitt nimmt die Temperatur pro 1/100 E um 0.3 °C zu.
E = 0.97: Temp. = + 0.5 °C	
E = 0.98: Temp. = + 0.7 °C	Pixelgrösse im IR-Bild: 2 x 1.7 mm, pro Box ca. 5800 Pixel
E = 0.99: Temp. = + 1.0 °C	
E = 1.00: Temp. = + 1.0 °C	

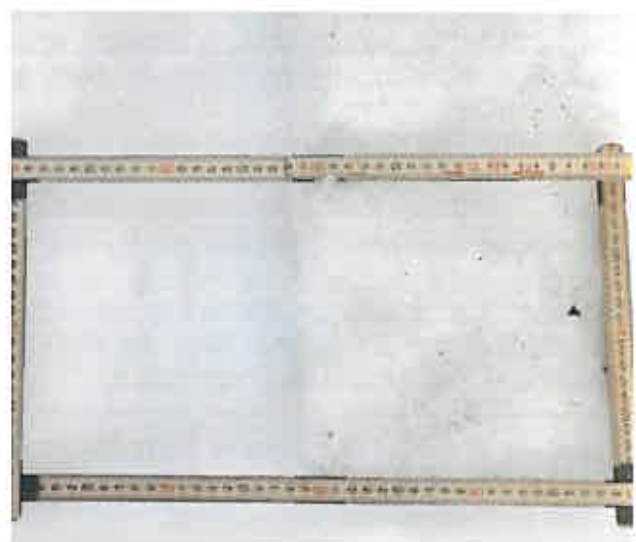
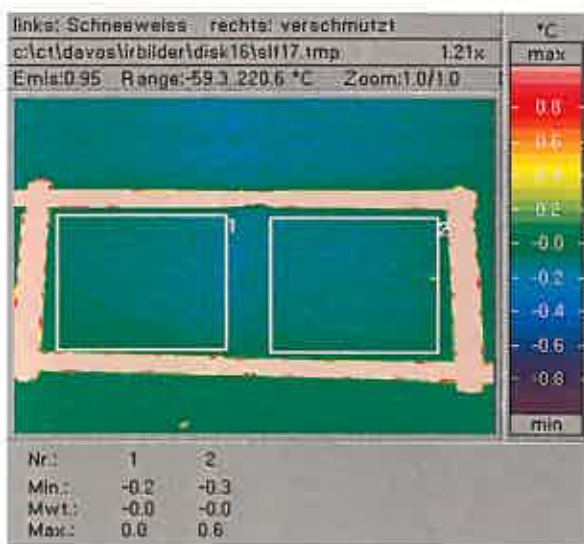
Kommentar:

Mit sinkendem Epsilon steigt die Reflexion. Da zum Zeitpunkt der Aufnahmen der Himmel mit Wolken bedeckt war (Strahlungstemperaturen 0 bis 10 °C) ist in den vorliegenden Resultaten ein gewisser Reflexionsanteil der Wolkentemperatur enthalten, welcher für eine exakte Bestimmung des Nassschnee-Emissionswertes berücksichtigt (Umrechnung) werden müsste.

Je tiefer das Epsilon eines Materials, desto schwieriger ist die absolute Temperaturbestimmung!



Bilder oben: Flüelapass, Nassschnee-Winkelprofil. Linke Seite besont, Blickwinkel ca. 30°, rechts schattig, Blickwinkel ca. 75°. In der Ecke ein Doppelmeter (h = 1 m), die untersten 10 cm davon stehen in einer Wasserlache. Pixelgrösse am Profil ca. 8 x 7.5 mm. Differenzen: max. 1/2 °C



Bilder oben: Flüelapass. Die mit einem Doppelmeter umrahmte Fläche für die Emissionsversuche. Links (Box 1): Schnee unverschmutzt, rechts (Box 2): verschmutzt (natürlich), je ca. 20 x 20 cm

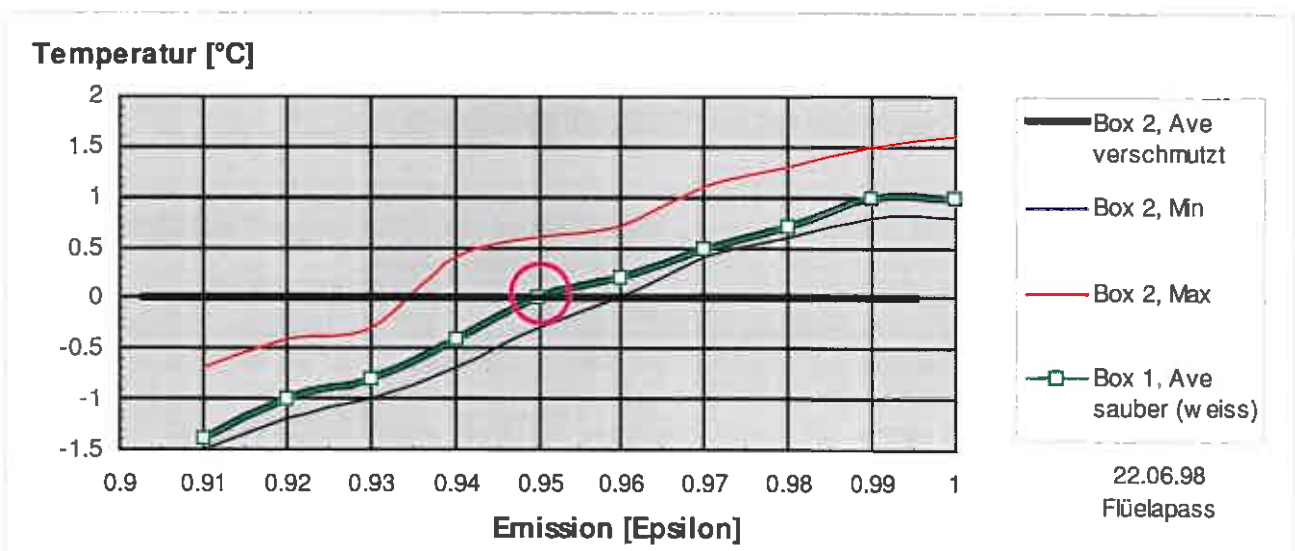


Diagramm oben: Aus IR-Messwerten: Nassschnee mit verschiedenen Epsilon-Einstellungen. Bei E = 0.95 ist der Mittelwert 0 °C und damit beim Sollwert. Aber beachte: Kommentar zu Kap. 5.16.2

5.16.3 Sinkende Emission = höhere Reflexionen

In den Laborversuchen von Kap. 5.05 zeigte sich bereits, dass Wasser (0 °C) und Schneematsch im IR-Bild unterschiedlich erscheinen. Ist das Epsilon von Wasser tiefer als das von Schneematsch oder sind es andere Gründe?

Ein Naturbeispiel für diese Situation liefert der auftauende Schottensee auf dem Flüelapass, mit teilweiser Bedeckung durch Schneematsch und Eisplatten. Es zeigt sich deutlich, dass die IR-Bild-Interpretation um so schwieriger wird, je tiefer das Epsilon einer Oberfläche ist, da gleichzeitig der Anteil der Reflexion steigt ($1 - E = R$).

Resultate:

- Siehe Bilder nebenan (oben) und Dok 16
- Auf den Wasser- und Schneematschflächen ergeben sich unterschiedliche Reflexionen (Spiegelungen). Dies ist im sichtbaren, wie auch im IR-Bereich erkennbar. Je nach Oberflächenart zeigen sich im IR-Bereich starke Temperaturdifferenzen.
- Temperaturen mit Handmessung: Schnee/Eis im Wasser: 0 °C, Wasseroberflächen: 2 - 3 °C.

Begründung der unterschiedlichen Reflexionen:

Bei einer ruhigen Wasserfläche entsteht eine klare Spiegelung, weil die Winkel für die ankommende- und die abgehende Strahlung gleich gross sind und die Reflexionsfläche wie beim Spiegel sehr eben ist.

Wird jedoch die Oberfläche gewellt oder wie im Fall Schnee kugelförmig (= vereinfachte Form für Schmelzkörner) so ändert der sich reflektierende Raum, d.h. bei gleichem Blickwinkel wird nicht mehr wie z.B. beim ruhenden Wasser der Berg vom Hintergrund gespiegelt, sondern ein gewisses Segment des Himmels. Skizzen und Beispiele dazu siehe Dok 16.

Betreffend Intensität und Auswirkung dieser diffusen, verzerrten Spiegelung spielt es auch eine Rolle, ob die Schnee/Eis-Körner tatsächlich mit einem dünnen Wasserfilm überzogen sind, denn nur dann ist der Emissions- resp. der Reflexionswert aller Stoffe auf der ganzen Seeoberfläche gleich und die Auswirkung vergleichbar.

Wenn eine IR-Kamera genaue Temperaturangaben von einer Oberfläche mit tiefem Emissionswert liefern muss, so steht sie vor dem gleichen Problem wie Mensch, der sagen muss, welche Farbe ein Spiegel hat.

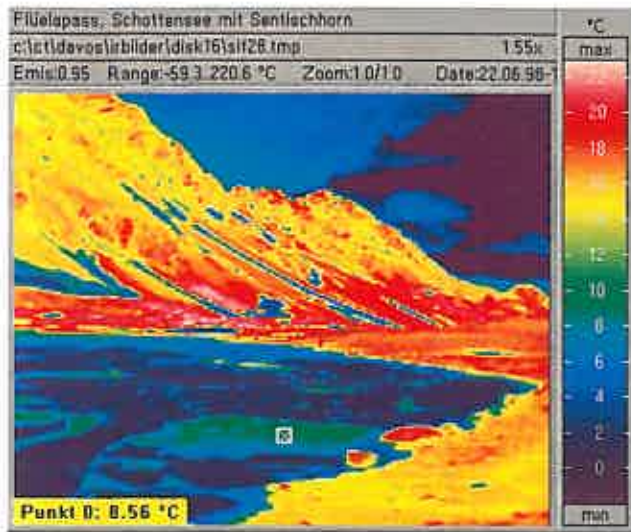
5.16.4 Veränderungen mit zunehmender Entfernung

Mit den herrschenden Wetterbedingungen vom 22.06.1998 auf dem Flüelapass müssten die noch vorhandenen Schneehänge bis zu den Gipfeln eine Oberflächentemperatur von 0°C haben.

Sind diese isothermen Schneehänge mit den IR-Bildern nachzuweisen?

Resultate:

- Ja, aber ... Wie die Bilder nebenan zeigen, ist die Temperaturverteilung auf dem Schnee lokal (einige m²) homogen, verändert sich aber mit zunehmender Distanz.
- Grund: Die mit der Distanz aufsummierte Luftfeuchtigkeit (+ weitere Gase?) beeinflusst die IR-Temperaturangabe (Die Feuchtigkeit in der Luft, T = ca. 12 °C, strahlt auch auf den IR-Detektor). Dies im Gegensatz zur Situation im Winter (vgl. Kap. 5.08), wo der absolute Feuchtegehalt der Luft sehr viel kleiner war.
- Auch der Wind ändert nichts an dieser Situation, lediglich unterschiedliche Reflexionen von vorüberziehenden Wolkenfeldern bringen kleine Veränderungen. Siehe Film [B 044] und Dok 16

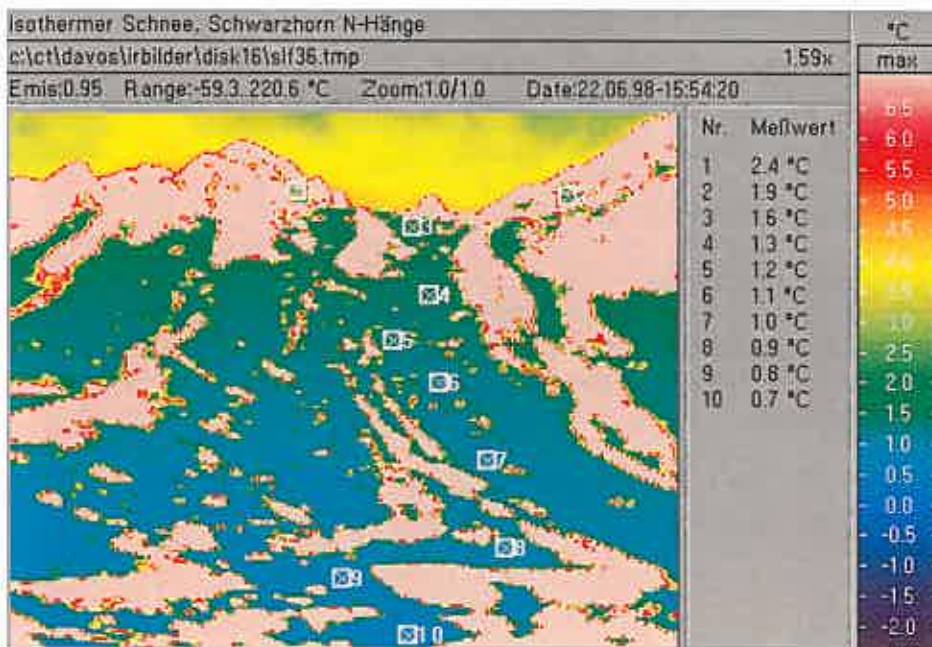


Bilder oben:

Flüelapass, Schottensee
Die Temperaturen auf dem IR-Bild sind wegen Reflexionen z.T. viel zu hoch. Schneematsch, gewelltes- und ebenes Wasser spiegeln unterschiedliche Raumteile!

Bilder Mitte und unten:

Blick vom Flüelapass zum Schwarzhorn.
Die effektive Schneetemperatur ist überall 0 °C. Auf dem IR-Bild zeigt sich aber mit zunehmender Distanz eine höhere Temperatur, weil die aufsummierte, warme Luftfeuchtigkeit (und verschiedene andere Gase) auch auf den IR-Detektor strahlen.



6. Weiteres Vorgehen:

Während meinen IR-Einsätzen tauchten bei verschiedenen Themen immer wieder Fragen und Ideen auf, was man noch tun müsste, um genauere Erkenntnisse über gewisse thermische Prozesse zu erlangen oder wo weitere potentielle Gebiete für den Einsatz der Thermografie liegen. Bevor man jedoch an operative IR-Einsätze denkt, wären als „Anwendungserfahrungen“ für die Schneeforschung aus meiner Sicht noch folgende Versuche sinnvoll:

1. Live-Beobachtung einer Schneebrettlawine

(Fortsetzung aus Kap. 5.13) Bei kaltem Wetter, mit grossem Temperaturgradient

Ziel / Fragen:

Ist die Visualisierung der Temperatur in der Schneedecke, resp. auf der Gleitfläche möglich? Sind grosse Unterschiede innerhalb der Gleitfläche (Inhomogenitätsbereiche der Schneedecke sichtbar, Reibungswärme)? Wie ist die Temp.-Verteilung im Ablagerungsbereich? Wie lange dauert es, bis sich die Temperaturen stabilisieren?

2. Beobachtung des WFJ-Versuchsfeldes über 24 Std.

Mit Strahlungswetter, möglichst ohne Wind. Dies mit Bildintervallen von 5 - 10 min.

Ziel:

Oberflächen-Differenzen im Versuchsfeld und in seiner Umgebung über den Tag/Nacht Zyklus verfolgen. Aufheiz- und Abkühlvorgänge infolge Sonneneinstrahlung visualisieren und quantifizieren.

3. Feldversuch: Besonnte Fläche abschatten

Eine Fläche mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen präparieren (z.B. natürlich, verdichtet, befeuchtet), nach einer (Sonnen) Bestrahlung für eine bestimmte Zeit abschatten. Beobachten der Oberflächentemperaturen im Zeitverlauf (Fortsetzung aus „Punkt“ 2).

Ziel:

Basisdaten erstellen für den Vergleich mit der praktischen Situation, wo bei wechselhafter Bewölkung der selbe Vorgang viel dynamischer abläuft. Testwerte liefern für Simulationsprogramme.

4. Kalibrierung der IR-Kamera im Kältelabor

Ziel / Fragen: Wie genau sind die Temperaturwerte?

Welche Emissionswerte gelten für welche Schneearten? Ist das Epsilon von feuchtem Schnee unterschiedlich gegenüber 0 ° - Wasser? Gibt es Unterschiede bei verschiedenen Blickwinkeln zur Oberfläche? Gibt es bei Spiegelblankem Eis Reflexionen? etc.

5. Kombinationsmessung Infrarot - Penetrometer

Datenerhebung mit Penetrometer und danach an Ort und Stelle ein Profil graben für IR-Bilder. Auswertung: Überlagerung der Darstellungen.

Ziel / Fragen:

Sind „Temperatursprünge“ innerhalb von gewissen Schichten zu erkennen?

6. IR-Messwerte über verschiedene Distanzen

In Kap. 5.08 wurde der Nachweis erbracht, dass verschiedene Distanzen bei kaltem Winterwetter (trockene Luft) praktisch keinen Einfluss auf die Messwerte haben (Vorbehalten bleibt der Distanz-Effekt betreffend Pixelgrösse, siehe Kap. 5.12). Bei den Sommer-Aufnahmen in Kap.5.16.4 zeigen sich jedoch schon erhebliche Differenzen.

Ziel / Fragen:

Wie stark ist der Effekt abhängig von der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur? Spielen weitere Gase eine Rolle (Ozon)? Könnte man mit den aktuellen Wetterdaten eine Korrektur berechnen?

Die IR-Kamera der EMPA Abteilung Bauphysik

Anhang 1

Beim Thermografie-Aufnahme-Verfahren werden die unterschiedlichen Wärmeabstrahlungen eines Objektes im Infrarotbereich sichtbar gemacht. Durch das Einstellen der Empfindlichkeit und einer bestimmten Basistemperatur erreicht man, dass in einem Bild grössere oder kleinere Temperaturdifferenzen aufgezeigt werden können.

Das Aufnahmegerät kann somit vom gleichen Objekt Bilder mit verschiedener optischer Wirkung wiedergeben (vgl. Beispiel Anhang 3).

Die Infrarotbilder zeigen die unterschiedlichen Temperaturbereiche mit verschiedenen Farben an. Normalerweise sind die Blau-Grün-Töne eher kalt, die Rot-Gelb-Töne eher warm. (Man beachte in jedem Fall die eingestellte Temperatur-Farbskala!)

Interpretationen von Infrarotbildern müssen vom Fachmann gemacht werden, da verschiedene Materialien (resp. deren Oberflächen) verschiedene Absorptions- und Emissionswerte haben, und zudem Reflexionen von der Umgebung entstehen können.

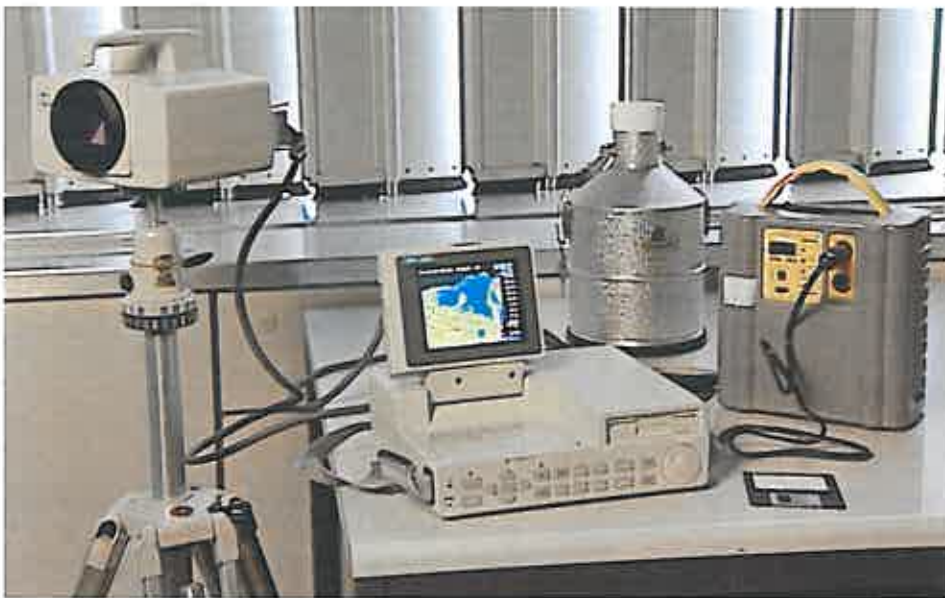


Bild links:

Die Komponenten der IR-Kamera v.l.n.r.:

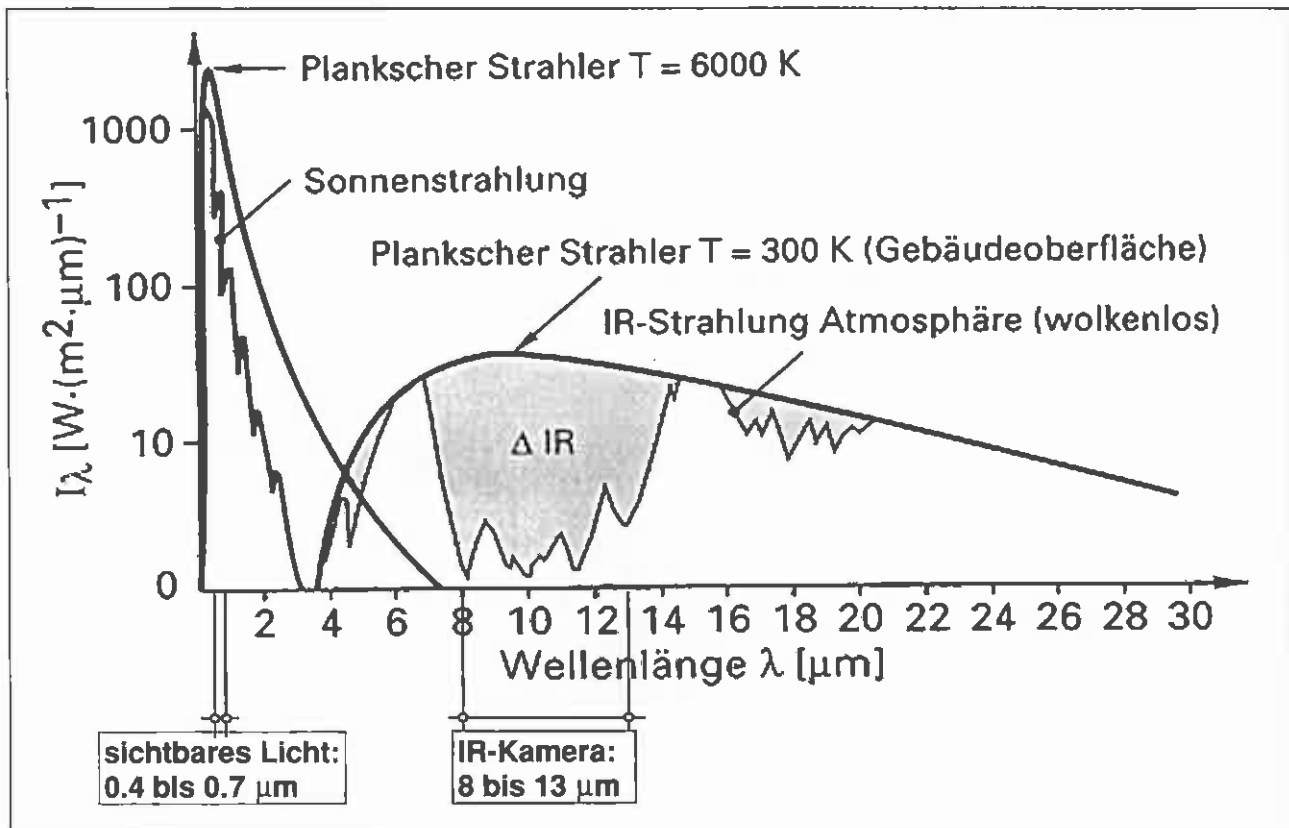
- Detector (Kamerakopf) auf Stativ
- Control Unit, mit kleinem LCD Bildschirm
- Behälter für Flüssigstickstoff
- 12 Volt Akku mit 11 Ah, (für ca. 1 Std.)

Kennwerte der EMPA Infrarot-Anlage „Nec TH 3101“ (Abt. 176, Log. Nr. 1.6.03, Dat: 1996)

Control Unit Typ	TH 31 - 110
Hard Disk Kapazität	5000 Bilder
Floppy Disk	13 Bilder (à 107 KB)
Bildgrösse	107 KB
Detector Unit Typ	TH 3101 MR
IR-Bereich (Wellenlänge)	8 bis 13 μm
Detector	Hg Ce Te
Kühlung	flüssig Stickstoff (- 195.7 °C)
normaler Aufnahmewinkel	30° horizontal x 28.5° vertikal
max. Zoom (optisch)	x: 5.0 y: 5.0
Bildpunkte (Pixel)	256 (horizontal) x 207 (vertikal) = 53'000 Punkte
Abtastraten (Scanner)	1 Bild/sek. oder $\Sigma 4$, $\Sigma 8$, $\Sigma 16$
Range	1: - 50 bis 200 °C 2: 0 bis 800 °C 3: 200 bis 2000 °C
Noise equivalent (rauschen)	0.08 °C 0.2 °C 1.0 °C
Auswerte Software für PC	PicWin-IRIS 9501, Version 3.02

Der Wellenlängenbereich der IR-Kamera

Anhang 2



Grafik oben:

Spektralverteilung der kurzwelligen Sonnenstrahlung (links) und der langwelligen Infrarotstrahlung von Materialien mit Umgebungstemperatur (rechts). 300 Kelvin = ca. + 27 °C.

Genau im IR-Kamera Bereich liegt das atmosphärische Fenster (graue Zone), womit die Luft „IR-durchsichtig“ wird. Als Infrarot gilt der Wellenlängenbereich von 0.8 bis 100 μm .

Beispiel einer Bildinterpretation

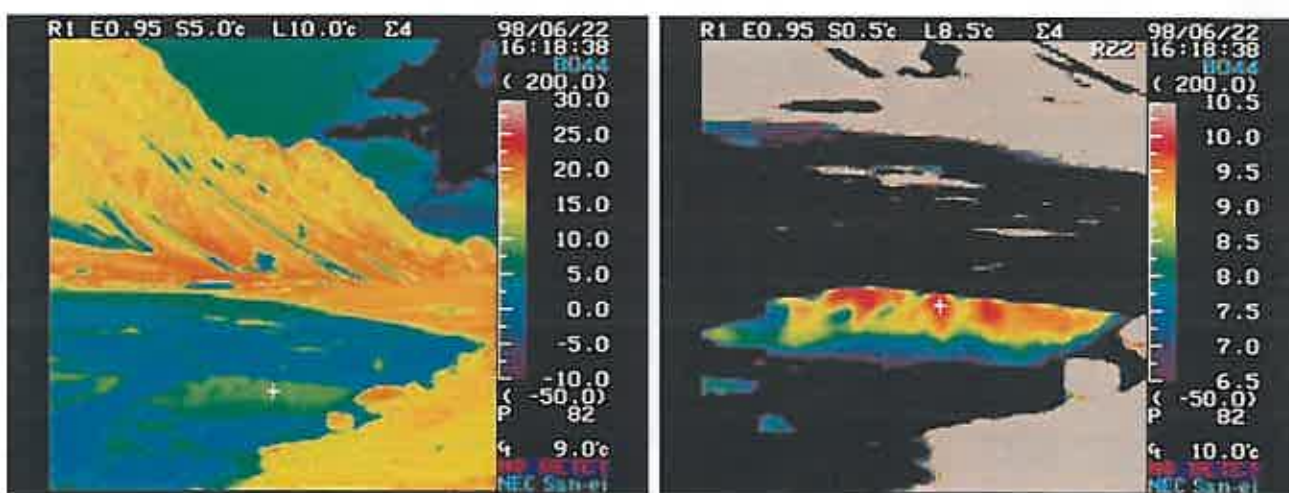
Anhang 3

IR-Bildlegende:

R1	Range 1 (von -50 bis + 200 °C)
E0.95	Emissionswert-Einstellung
S5.0°C	Sensitivity, Empfindlichkeit (max 1/10 °C möglich)
L10.0°C	Level, mittlere Temperatur im Farbkeil
Σ4	Abtastrate, das Bild entsteht aus 4 Scannedurchgängen
98/06/22	Jahr / Monat / Tag
16:18:38	Zeit, (Std / Min / Sek)
B044	Bild auf Hard Disk Platz: Block Nr. 44
P 82	Bild Nr. 82 (in Block Nr. 44)
°†	Cursor Temperatur (Punkttemperatur bei Fadenkreuz)

Sensitivity und *Level* ergeben die Bandbreite der mit dem Farbkeil dargestellten Temperaturen.

Bei kleinem S ist die Bandbreite klein, so dass hohe und tiefe Temperaturen im Bild u.U. nicht mehr angezeigt werden können (Beispiel unten).



Bilder oben: Flüelapass, auftauender Schottensee mit Eisplatten und Spiegelungen. Dargestellt ist die *gleiche* Aufnahme mit unterschiedlichen Einstellungen für die Bilddarstellung.

Links: grosse Bandbreite, fast alle Temperaturwerte im Blickfeld sind innerhalb des Farbkeils. Rechts: Zoomausschnitt (rechnerisch = nachträglich!) von der Wasserfläche im See, mit detaillierter Auflösung der Spiegelungen.

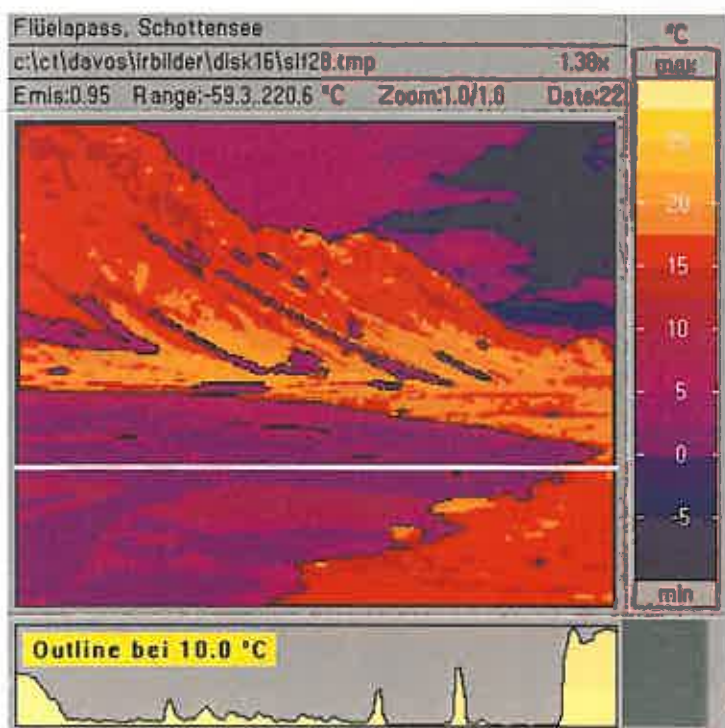


Bild links:

Gleiches Bild, gleiche Bandbreite wie oben links.

Dieses Bild wurde jedoch mit der PicWin-IRIS Software nachbearbeitet, wobei den Temperaturwerten einen anderen Farbkeil zugeordnet wurde.

Zudem sind mit der Beschränkung auf 16 Farben isotherme Zonen (Zonen gleicher Temperatur, je 2.5 °C) dargestellt.

Als Umrisslinie oder einzelne Isotherme ist auch die + 10 °C Grenze hervorgehoben.

Das x-Schnittprofil unten entstand aus den 256 Einzelwerten von der Bildbreite beim weissen Querstrich.

Das Schnee- und Lawinenforschungszentrum SLF

Anhang 4



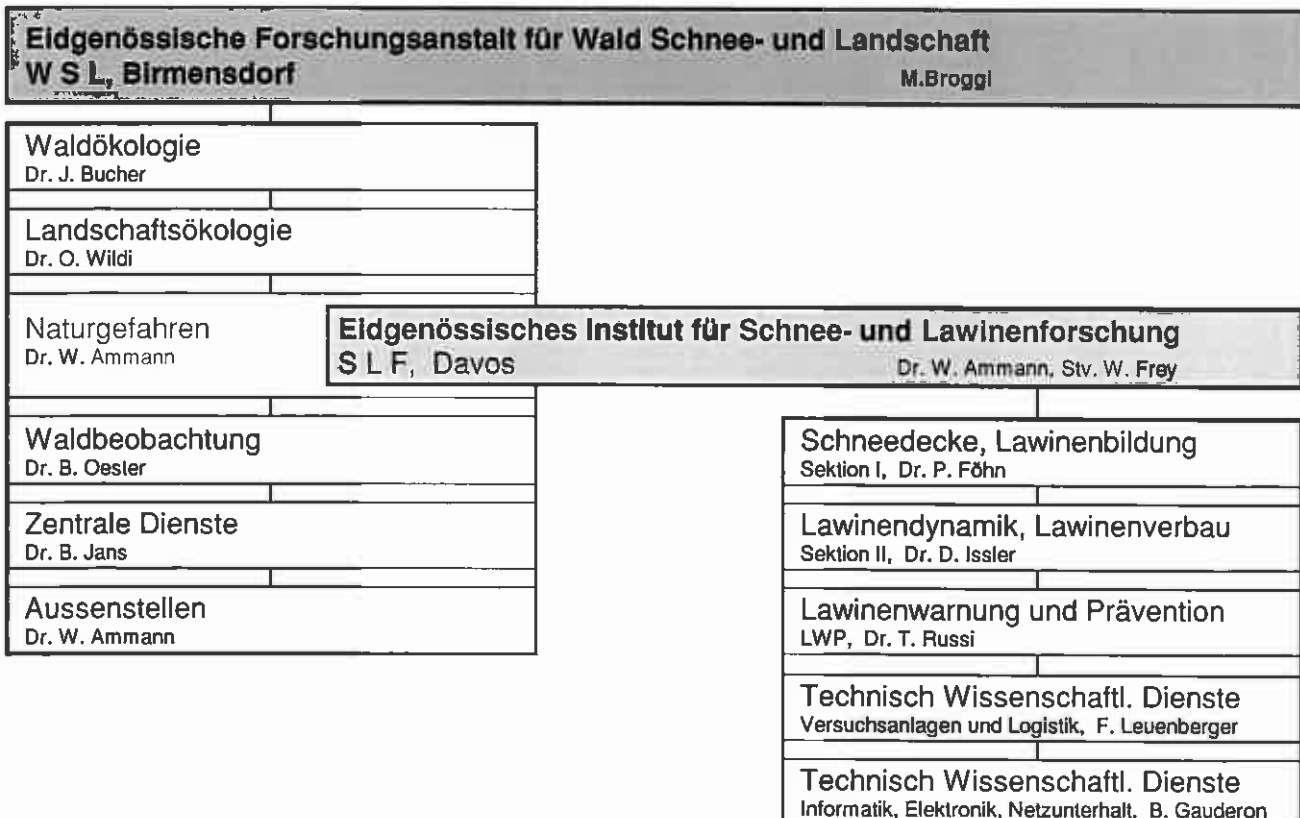
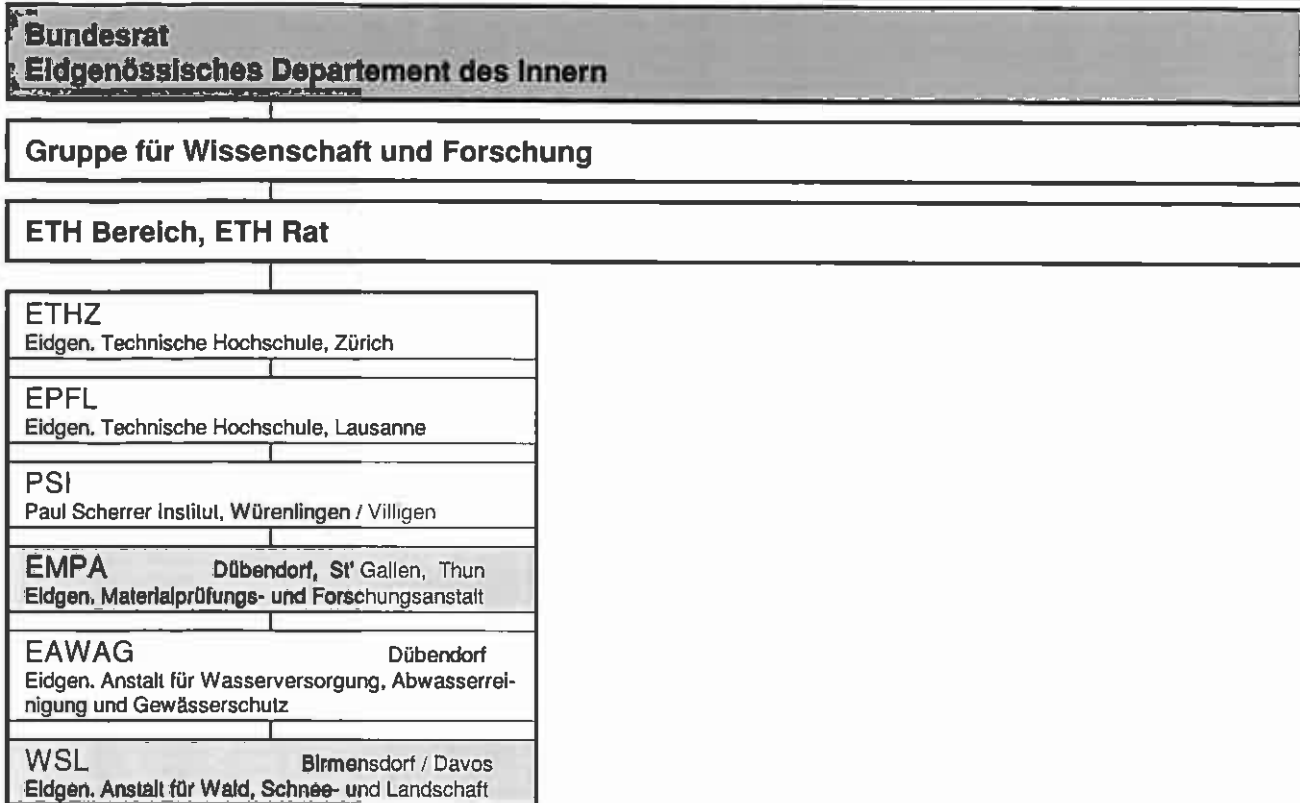
Bild oben: Das „alte“ Forschungsgebäude auf dem Weissfluhjoch auf 2670 m (Gebäude rechts).



Bild oben: Das neue Forschungsgebäude an der Flüelastrasse 11 in Davos Dorf.

Organigramm von der EMPA bis zum SLF

Anhang 5



Schlusspunkt:

Düringers Kupferstich von 1754,
... frisch aufgemotzt ... !

