



Abschlussbericht

TOTAL

**Eine geophysikalische Studie zur seismogenen Kopplung in
Subduktionszonen, Subduktionserosion und Fluidfluss**

**Ergebnisse der Wärmestromdichtemessungen
auf der Forschungsfahrt SO 195
mit FS SONNE**

Förderkennzeichen 03G0195B

H. Villinger und N. Kaul
Fachbereich Geowissenschaften
Universität Bremen

November 2009

Zusammenfassung

Im Rahmen der Expedition SO195 mit dem Forschungsschiff FS SONNE wurden im Bereich der Subduktion des Louisville-Rückens insgesamt 53 Wärmestromdichtemessungen durchgeführt, von denen 25 verwertbare Ergebnisse lieferten. Das Vorhaben hatte zum Ziel, zusammen mit den seismologischen und geodynamischen Untersuchungen, durch die Vermessung des Wärmestromes den thermischen Einfluss der Subduktion des Louisville-Rückens zu erfassen. Das größte Problem der Wärmestromdichtemessungen bestand darin, dass sehr wahrscheinlich vulkanoklastische Ablagerungen das Eindringen der Sonde erschwert bzw. in vielen Fällen unmöglich gemacht haben. Ein Nord-Süd-Profil entlang des Grabens über die Subduktion des Louisville-Rückens hinweg zeigt Variationen im Wärmestrom zwischen 20 und 65 mW/m² aber keine interpretierbaren Änderungen. Ähnlich verhält es sich bei einem Ost-West-Profil über den Tonga-Graben mit Variationen von 15 – 70 mW/m². Eine Aussage darüber, ob die Subduktion des Louisville-Rückens eine messbare Störung des Temperaturfeldes verursacht, ist aufgrund der Datenlage nicht möglich.

I. Einleitung und Zielsetzung

Im Südwest-Pazifik wird in der Subduktionszone von Tonga der neben der Hawaii Kette prominenteste Hotspot-Rücken subduziert: der Louisville-Rücken (Abb. 1). Ein besonderes Charakteristikum der Subduktion des Louisville-Rückens ist eine markante seismische Lücke in dem Gebiet, wo der Rücken subduziert wird. Diese Lücke deutet darauf hin, dass der Inselbogen und die hereinkommende Platte miteinander gekoppelt sind und als potentielle Quellregion für ein großes bis sehr großes Überschiebungserdbeben angesehen werden kann. Besonders interessant ist, dass der gekoppelte Bereich („Asperity“) um ein Vielfaches breiter ist als der typische Durchmesser der Kuppen des Louisville-Rückens. Das bedeutet, dass die ‚Asperity‘ nicht nur durch die Vulkankegel selbst definiert wird, sondern u. U. auch durch den die Vulkane umgebenden Schuttflächen und die Hotspotschwelle bzw. die durch die Auflast der Vulkane elastisch deformierte Lithosphäre. Darüber hinaus zeigen geologische Hinweise, dass die Subduktion des Louisville Rückens zur Erosion des Inselbogens beiträgt (Clift & MacLeod, 1999). Inwieweit die Vulkankegel selber erodiert werden ist bislang wenig untersucht und verstanden. Des Weiteren ist zu erwarten, dass die tektonische Interaktion zwischen den Guyots des Louisville-Rückens und dem Kontinentalhang vor allem lateral zu Änderungen im hydrogeologischen System führen wird, da sich die Kollisionsfront zwischen Tonga-Graben und Louisville-Rücken systematisch nach Süden verschiebt und somit unterschiedliche Stadien der Interaktion entlang der Subduktionszone auftreten.

Dieser Rahmen macht die Region zu einem idealen Untersuchungsgebiet um folgende Ziele zu verfolgen und Thesen zu testen; Details zu den ersten drei Thesen sind im TOTAL-Hauptantrag von Grevemeyer et al. zu finden:

- Definition des „Asperity“ der seismischen Lücke im Zuge der Subduktion des Louisville Hotspot Rückens
- Aufbau der Louisville Kette und Louisville Hotspot Schwelle / mechanische Eigenschaften von Guyots
- Interaktion zwischen Tonga Inselbogen und Louisville Rücken – Erosion des Inselbogens oder Erosion der Vulkankegel?
- Einflussnahme der Subduktion des Louisville Rückens auf den Fluidfluss durch den Forearc des Tonga Inselbogens

Die Interaktion zwischen den subduzierenden Guyots und der Oberplatte verändert die physikalischen Eigenschaften des Forarcs, allen voran die Porosität und die Permeabilität. Änderungen in der Porosität sollen durch seismische Methoden abgebildet werden. Änderungen in der Durchlässigkeit des Forarcs für Fluide führen zu charakteristischen Änderungen im hydrogeologischen Regime und somit im Wärmestrom durch den Inselbogen. Änderungen im Wärmestrom bedingt durch advektive Prozesse sollten durch geothermische Messungen abgebildet (z. B. Villinger et al., 2002; Grevemeyer et al., 2004) und mit unterschiedlichen Stadien der Subduktionserosion in Verbindung gesetzt werden können.

Das Vorhaben hatte das Ziel, durch geothermische Messungen in der unmittelbaren Nähe des Zusammentreffens von Louisville-Rückens und Tonga-Grabens den Einfluss der Subduktion des Rückens auf das Temperaturfeld zu erfassen und eventuell vorhandene, durch Fluide erzeugte Störungen des Temperaturfeldes zu kartieren.

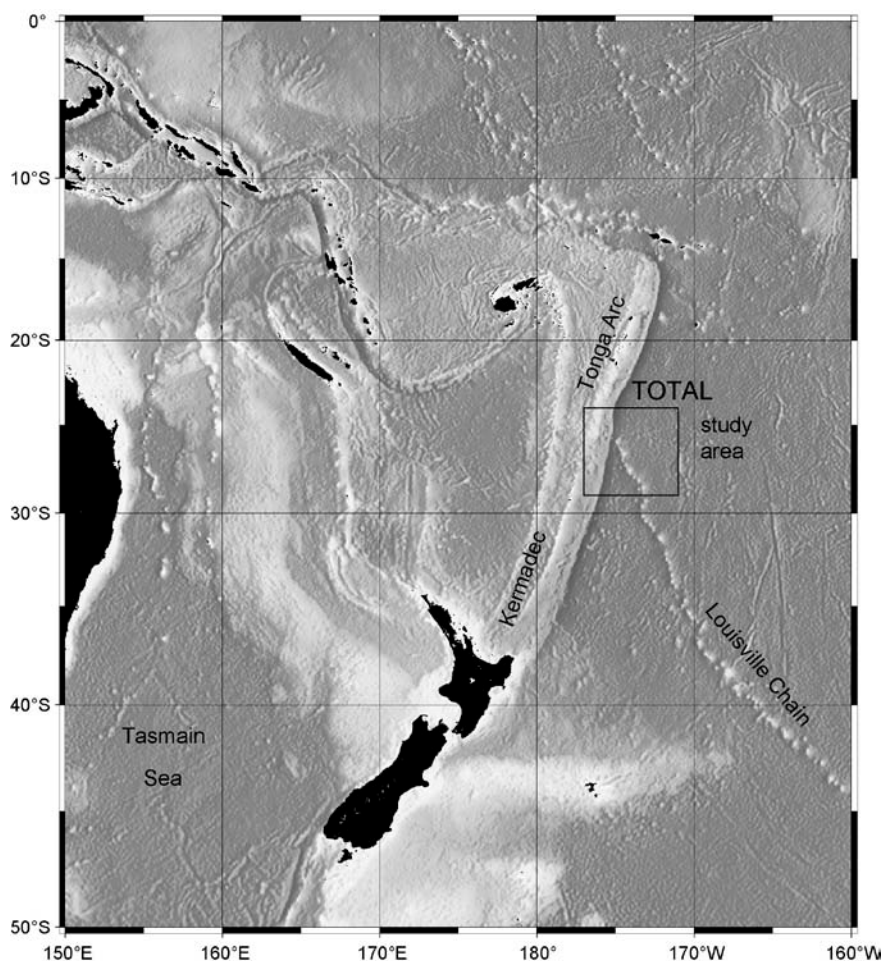


Abbildung 1: Lagekarte der geplanten Untersuchungen

II. Untersuchungsgebiet und bisherige Ergebnisse

In einer Untersuchung (von Herzen et al., 2001) wird von amerikanischen Wissenschaftlern der Versuch unternommen, durch Wärmestromdichtemessungen die Größen-

ordnung der Scherspannungen an der Tonga-Kermadec-Subduktionszone einzugrenzen. Die Untersuchungen fanden 1993 statt, wobei von den 153 Messungen 84 verwertbare Ergebnisse lieferten. Die Hypothese ist dabei, dass durch die Reibung zwischen Ober- und Unterplatte Wärme erzeugt wird, deren Beitrag sich, sollte er signifikant sein, im Wärmestrom abbilden müsste. In Abbildung 2 ist die Lage der damals vermessenen Profile dargestellt. Alle liegen südlich der Kollision von Louisville-Rücken und Kermadec-Graben, da von Herzen et al. (2001) explizit in seiner Arbeit betont, dass man die Komplikationen im Wärmestrom durch diese rezente Subduktion einer Seamountkette vermeiden wollte.

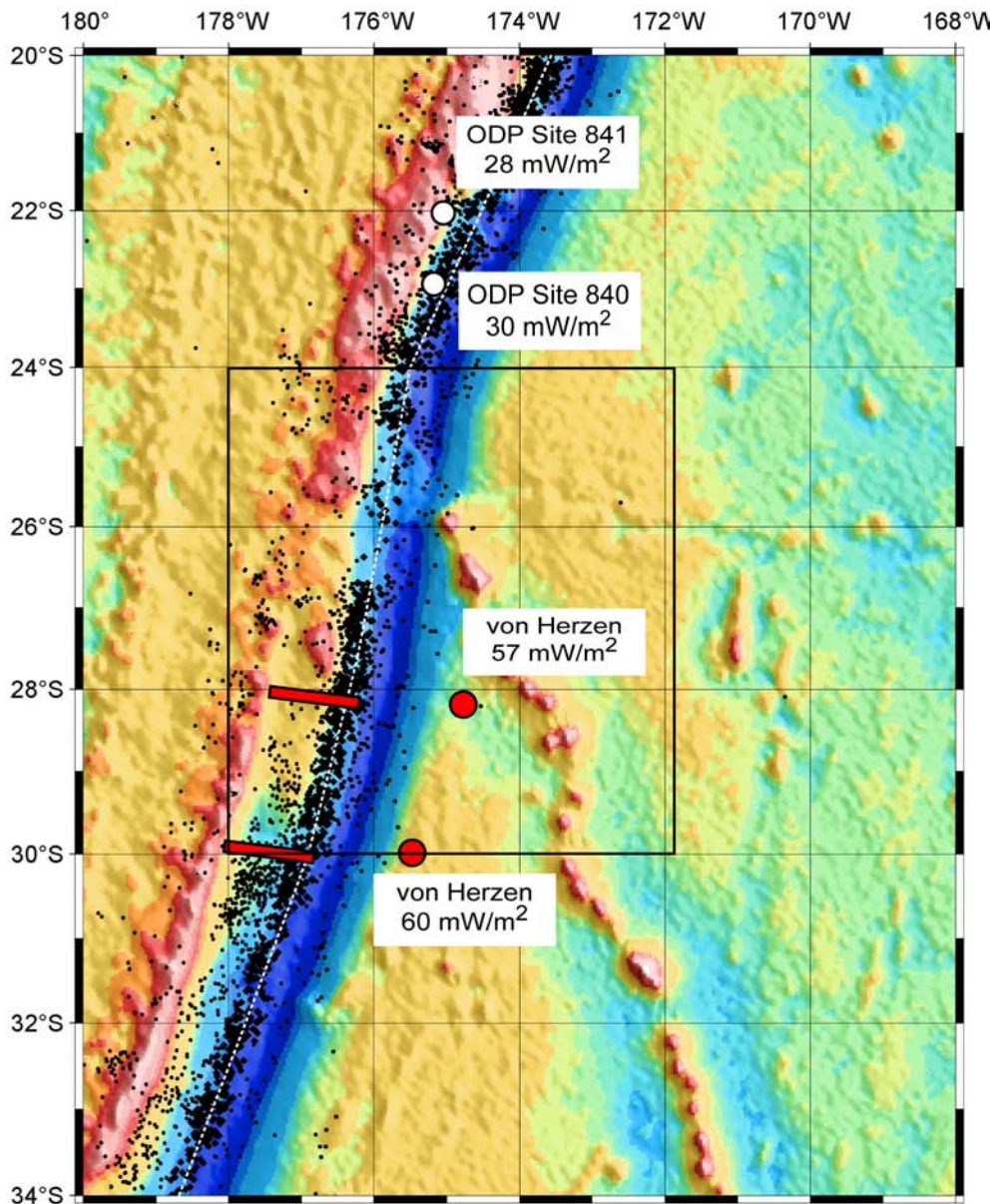


Abbildung 2: Das Schwerefeld der Erde (Freiluftanomalie abgeleitet aus der Satelliten-Altimetrie) im Untersuchungsgebiet und die globale Seismizität in der Region (Engdahl & Villasenor, 2002). Markant ist die seismische Lücke in der Region, wo der Louisville-Rücken subduziert wird. Die eingetragenen Wärmestromdichten auf der Pazifischen Platte und die eingezeichneten Profile (rot) über den Forearc stammen aus von Herzen et al. (2001). Die Werte an den ODP-Sites 840 und 841 stammen aus Parson et al., 1992.

Die Referenzmessungen auf der pazifischen Platte sind bei einem angenommenen Plattenalter von ca. 100 Ma mit Mittelwerten von ca. 60 und 57 mW/m^2 nur leicht höher als die von einem konduktiven Abkühlungsmodell der Lithosphäre zu erwartenden. Die Wärmestromdichtemessungen, insbesondere auf dem südlichen, aber auch auf dem nördlichen Profil wurden dadurch erschwert, dass verfestigte vulkanogene Sedimente das Eindringen der Sonde erschwerten. Dazu kamen noch technische Probleme, die die Qualität der Messungen beeinträchtigten. Eine signifikante zeitliche Variation der Temperatur im Bodenwasser führt darüber hinaus zu einer deutlichen Störung des Temperaturfeldes in den obersten Metern des Sedimentes. Die Ergebnisse des nördlichen Profils sind in Abbildung 3 dargestellt. Man kann sehr deutlich sehen, dass auf einem Hintergrundwert von ca. 30 mW/m^2 Variationen des Wärmestromes um ca. $\pm 10 \text{ mW/m}^2$ überlagert sind, die nach von Herzen et al. von Fluidbewegungen verursacht werden, welche eventuell von Magmenintrusionen angeregt worden sind. Leider sind in von Herzen et al. (2001) die von den Autoren erwähnten seismischen Daten nicht dargestellt, die eventuell eine Korrelation der in Abb. 3 beobachtbaren Variationen mit Störungszonen oder lokalen starken Änderungen der Sedimentmächtigkeiten nicht möglich ist. Messungen an ODP-Sites 840 und 841 (Abb. 3) ergeben Werte westlich der Deformationsfront von 28 und 30 mW/m^2 (Parson et al., 1992).

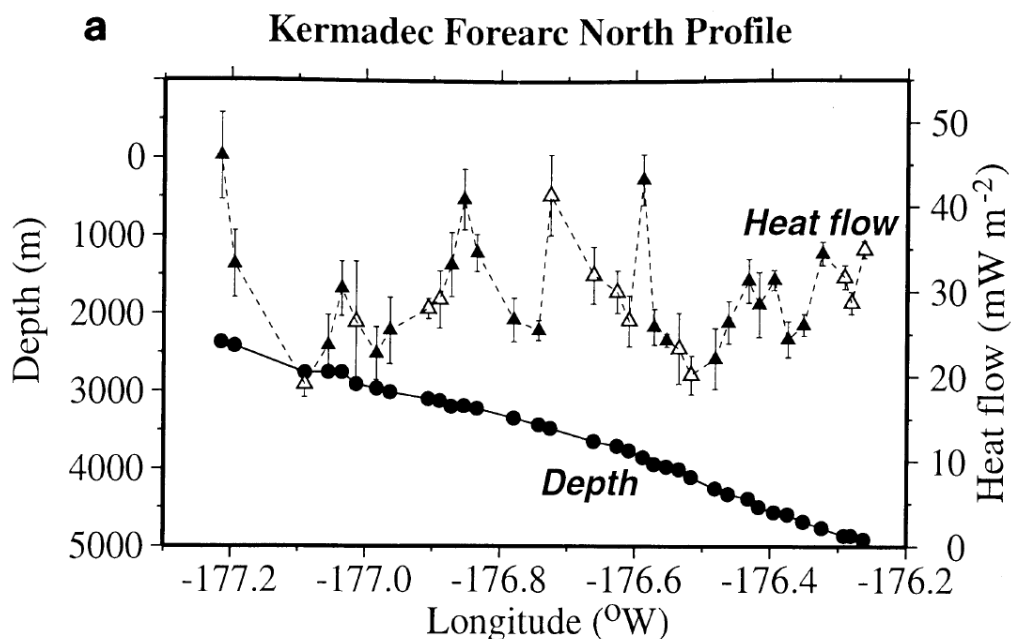


Abbildung 3: Wärmestromdichte auf dem in Abb. 2 dargestellten nördlichen Profil von von Herzen et al. (2001).

III. Ergebnisse der Wärmestromdichtemessungen von SO195

III.1 Methode der Wärmestromdichtemessungen

Während der Expedition SO195 wurden zwei verschiedene Wärmestromdichtesonden der Universität Bremen eingesetzt: eine 3 m lange (3m-HF) und eine 6 m lange (6 m-HF) Sonde. Die Benutzung der langen Sonde hatte zum Ziel, die von von Herzen et al. (2001) berichteten Störungen der oberflächennahen Temperaturverhältnisse durch Bodenwassertemperaturänderungen möglichst durch eine große Eindringtiefe zu vermeiden. Beide Sonden sind als klassische ‚Violinenbogensonden‘ (Hyndman et al.,

1979; Lister, 1970); siehe Abb. 4) konstruiert. Das Sensorrohr enthält in äquidistanten Abständen Temperaturfühler, mit denen in situ die Temperaturen im Sediment gemessen werden können. In diesem Rohr ist außerdem ein Heizdraht untergebracht, mit dem ein kalibrierter Wärmeimpuls erzeugt werden kann. Das Abklingen dieses Wärmepulses wird beobachtet und zur Ermittlung der in situ Wärmeleitfähigkeit herangezogen (Lister, 1979). Zusätzlich werden der Druck, die Neigung und die Bodenwassertemperatur gemessen. Beide Sonden werden mit derselben Elektronik betrieben. Abb. 4 zeigt die Komponenten des gesamten Systems, wie auch ein Bild der 6 m-langen Sonde beim Aussetzen an Bord von FS Sonne. In Tabelle 1 sind die technischen Spezifikationen beider Systeme dargestellt.

Tabelle 1: Technische Spezifikationen der Wärmestromsonden

		3m-HF	6m-HF
aktive Länge	[m]	3.00	6.00
Gewicht	[kg]	600	1400
max. Einsatztiefe	[m]	6000	6000
on-line Datenübertragung		ja	ja
autonomer Betrieb		ja	ja
Anzahl der Temperaturfühler		11	22
Distanz zwischen Fühlern	[m]	0.30	0.27
Temperaturbereich	[°C]	-2 – 59	-2 – 59
Temperaturaufösung	[K]	0.001	0.001
in situ Wärmeleitfähigkeit		ja	ja

Wärmestromstationen bestehen im Allgemeinen aus einzelnen Messungen („Penetrations“), die entlang eines Profils („Station“) angeordnet sind und deren Abstand abhängig von der wissenschaftlichen Fragestellung ist. Beide Sonden können im sogenannten „pogo-Stil“ eingesetzt werden, d. h. sie werden nach einer erfolgten Messung ca. 200 m über Grund gehievt, und dann versetzt das Schiff langsam zur nächsten ausgewählten Position. Insgesamt rechnet man bei einem solchen Vorgehen bei Abständen zwischen den Messpunkten von ca. 1 km einen Zeitbedarf von 1 bis 1½ Stunden pro Wärmestromdichtewert.

In Abb. 5 sind die Rohdaten einer Messung dargestellt. Durch das Eindringen des Fühlerrohres in das Sediment wird Reibungswärme erzeugt, welche langsam abklingt. Danach wird ein kalibrierter Wärmeimpuls von 20 Sekunden im Sensorrohr erzeugt, dessen Abklingverhalten ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Sedimentes ist. Beide Abklingvorgänge werden im Prinzip mit demselben Algorithmus ausgewertet (Hyndman et al., 1979; Lister, 1979, Villinger and Davis, 1987; Hartmann und Villinger, 2002). Die Auswertung aller Messungen erfolgt in Anlehnung an das Verfahren, das in Hyndman et al. (1979) und Villinger and Davis (1987) beschrieben ist.

Das Ergebnis der Auswertung der Messung von Abb. 5 ist in Abb. 6 zu sehen; Abb. 6a (links) zeigt die relativen Temperaturen in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe. Aus diesen Werten wird der vertikale Temperaturgradient berechnet. Die Temperaturen der nicht in das Sediment eingedrungenen Temperaturfühler spiegeln das isotherme Bodenwasser wieder. Abb. 6b (Mitte) zeigt die ermittelte in situ Wärmeleitfähigkeit während Abb. 6c (rechts) im sogenannten Bullardplot (Bullard, 1939) das Ergebnis präsentiert. Die Temperaturen in den obersten 2 m des Sedimentes sind durch zeitliche Variationen der Bodenwassertemperatur stark gestört, was angesichts der Wassertiefe von ca. 4500

m, bei der diese Messung durchgeführt wurde, aus ozeanographischen Gründen bemerkenswert ist.

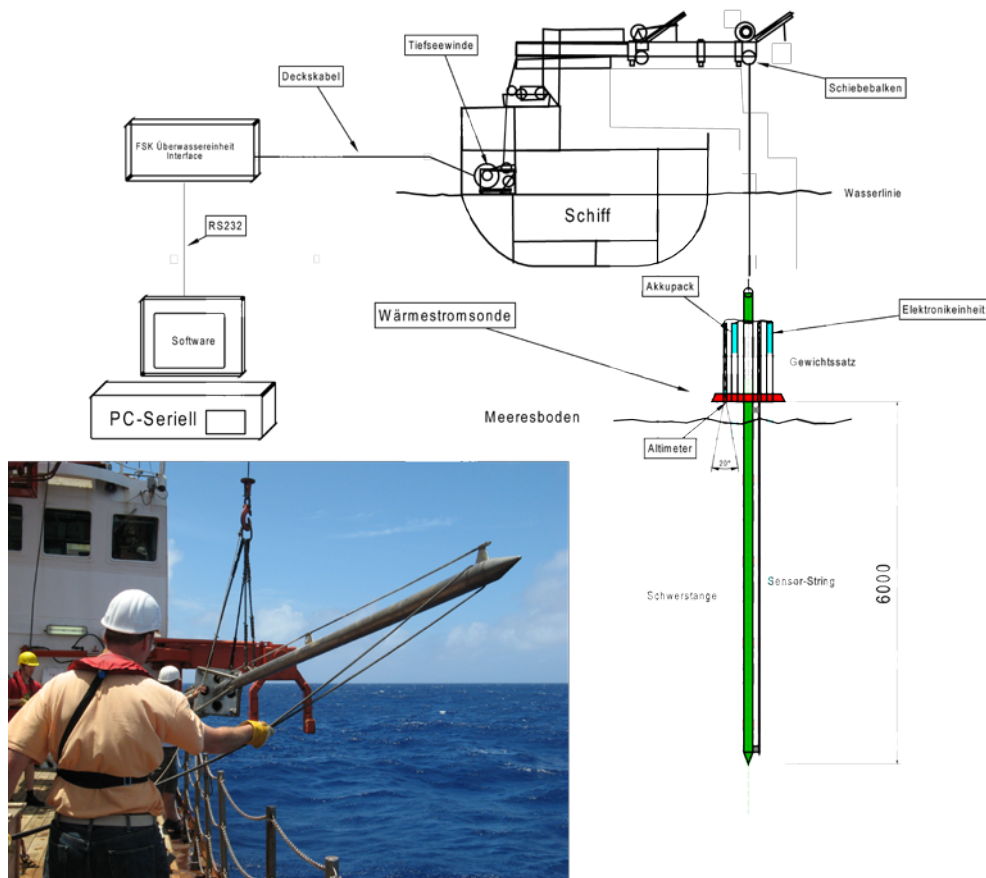


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Komponenten des gesamten Systems zur Messung des Wärmestromes und die Bremer Wärmestromsonde kurz vor dem Aussetzen.

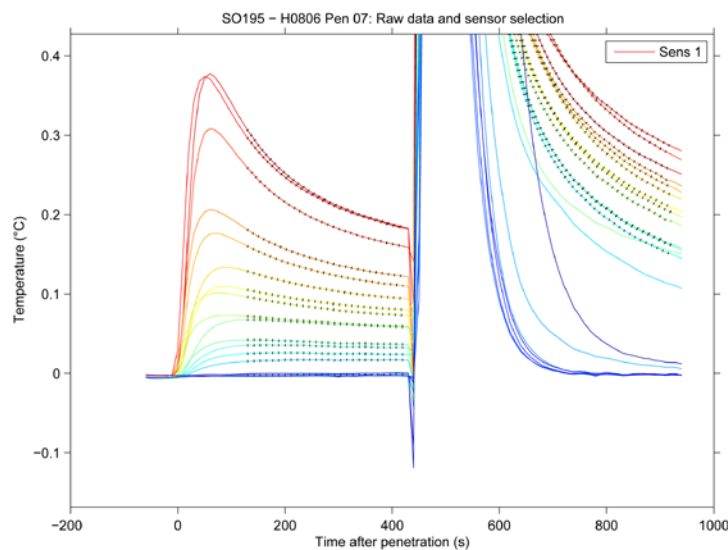


Abbildung 5: Rohdaten einer Wärmestromdichtemessung. Der erste starke Temperaturanstieg wird durch Reibungswärme beim Eindringen des Sensorrohrs in das Sedi-

ment verursacht, der zweite Temperaturimpuls rührt von einem kalibrierten 20 Sekunden langen Wärmepuls her, der zur Messung der in situ Wärmeleitfähigkeit benutzt wird.

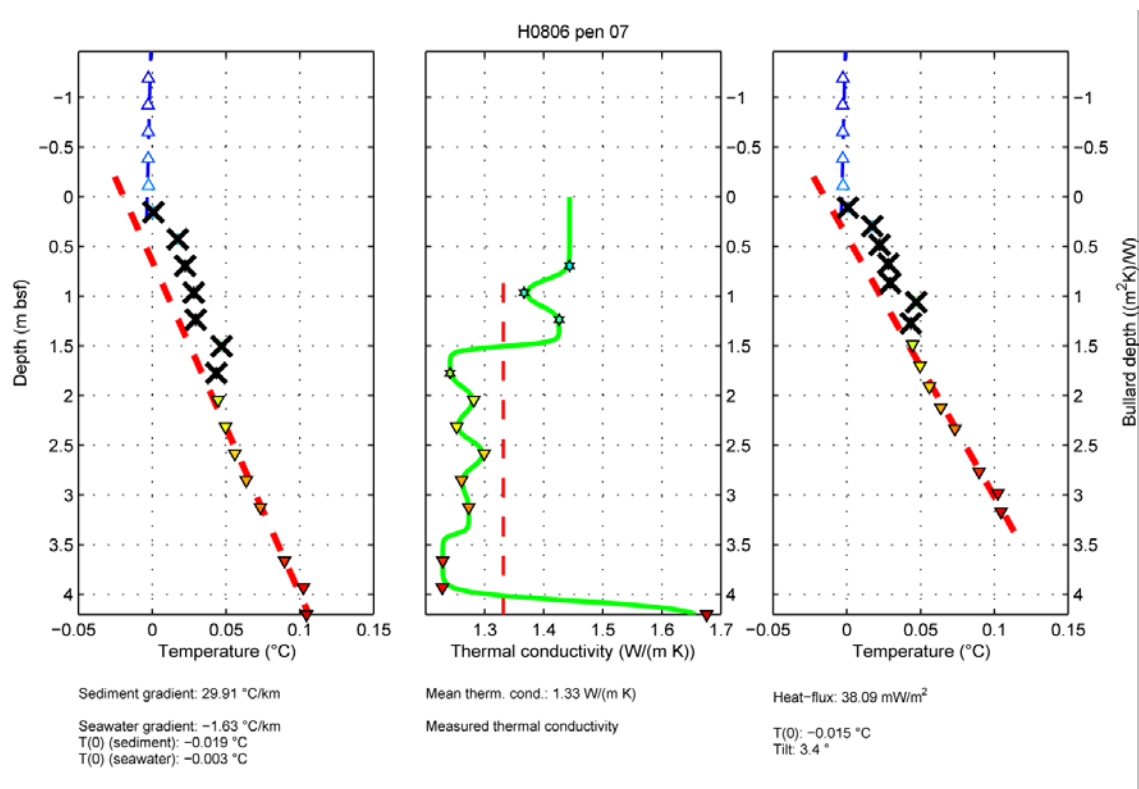


Abbildung 6: Ergebnis der in Abb. 5 dargestellten Messung. Links: Relative Temperaturänderung mit der Tiefe; die blauen Symbole repräsentieren Temperaturfühler, die nicht in das Sediment eingedrungen sind. Die durchkreuzten Punkte repräsentieren oberflächennahe Temperaturen, die durch Variationen der Bodenwassertemperatur gestört sind. Daher werden sie nicht zur Berechnung des geothermischen Gradienten herangezogen. Die gestrichelte rote Linie ist der vertikale Temperaturgradient. Mitte: In situ Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe. Der sehr hohe Wert ist möglicherweise gestört, kann aber auch auf eine sehr kompetente Schicht hinweisen, die ein weiteres Eindringen der Sonde verhindert hat. Rechts: Thermischer Widerstand in Abhängigkeit von der Tiefe (Bullard-Plot). Auch hier werden nur die ungestörten Temperaturwerte zur Berechnung des Wärmestromes berücksichtigt, der aus der Steigung der linearen Regression von thermischem Widerstand über der Temperatur berechnet wird.

III.2 Ergebnisse der Wärmestromdichtemessungen

Während der Expedition SO195 (25. Januar – 14. Februar 2008) wurden auf 9 Profilen insgesamt 53 Wärmestromdichtemessungen gemacht, von denen 25 auswertbare Ergebnisse lieferten. In Abb. 7 sind alle in der Region vorhandenen Messungen eingetragen, zum anderen sind die während SO195 vermessenen Profile eingezeichnet. Die Ergebnisse aller Messungen sind im Detail einer Tabelle im Anhang zu entnehmen. Dort befinden sich auch die Detailkarten der 9 einzelnen Profile. Alle Rohdaten und die Auswertung jeder einzelnen Messung sind des Weiteren dem Anhang zu entnehmen. Die durchgeführten Messungen wurden in drei Qualitätskategorien eingeteilt, wobei die Kategorie ‚schlecht‘ sowohl ein nicht auswertbares Temperaturprofil wie auch ein extrem unrealistisches Ergebnis (extrem hoher, extrem niedriger Wärmestrom) bedeuten können. Ein Nichteindringen der Sonde ist gesondert gekennzeichnet.

Eine große Zahl der gemessenen Temperaturprofile zeigt im oberen Bereich einen gekrümmten Verlauf, was auf zeitliche Variationen der Temperatur des Bodenwassers zurückzuführen ist. Dies wird auch in von Herzen et al. (2001) berichtet. Diese Variationen sind zurückzuführen auf zeitliche variable grabenparallele Strömung in einem Tiefenbereich von ca. 2500 bis 4000m, die zu Temperaturänderungen von bis zu 0.1°C im Bodenwasser führen. Abb. 6 zeigt ein Beispiel dafür. Durch die Verwendung der 6m-langen Sonde konnte aber dieser gestörte Bereich sicher identifiziert und somit von der Berechnung des Gradienten ausgeschlossen werden.

Die gemessenen in situ Wärmeleitfähigkeiten liegen seewärts (östlich) der Subduktionszone auf der pazifischen Platte bei Werten um 1 W/m K während die Werte westlich der Subduktionszone signifikant höher liegen. Dies kann ein Indiz dafür sein, dass in dieser Region der Anteil an vulkanoklastischem (sandigem) Material in den Sedimenten deutlich höher ist und daher ein Eindringen der Sonde erheblich erschwert wird.

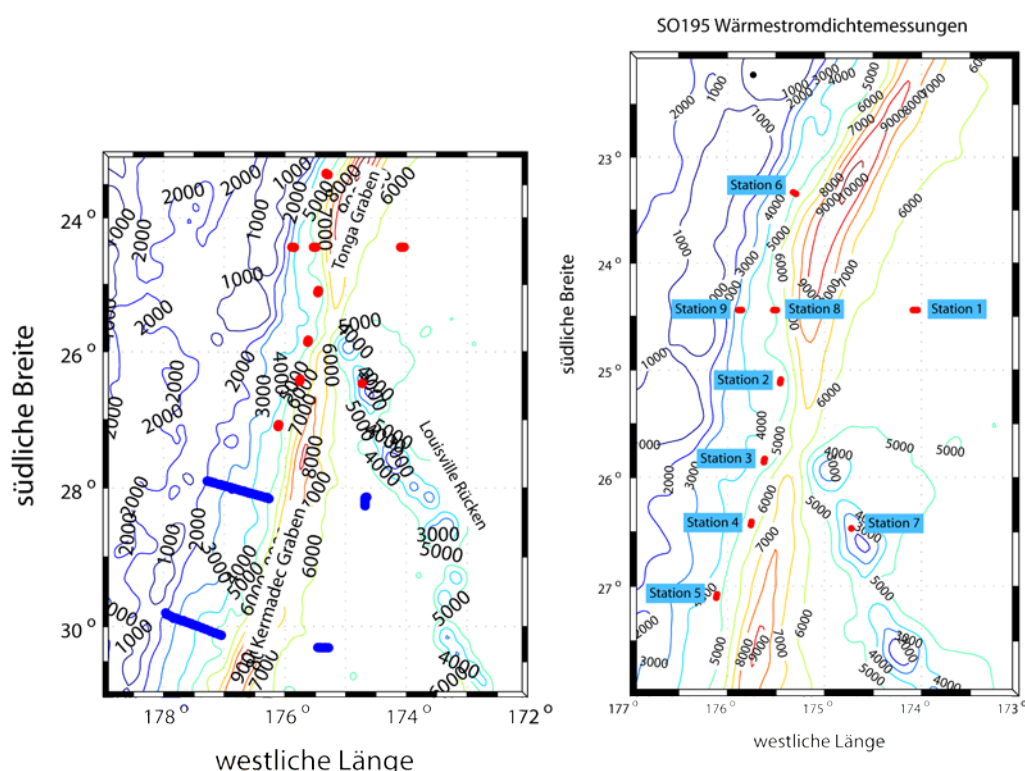


Abbildung 7: Überblick über die am Kermadec- und Tonga-Graben vorhandenen Wärmestromdichtemessungen. Links: Wärmestromdichtemessungen von von Herzen et al. (2001) – blaue ausgefüllte Kreise – und Messungen von SO195 – rote ausgefüllte Kreise. Rechts: Bezeichnungen der geothermischen Profile (Stationen), die während SO195 vermessen wurden.

Mit Hilfe der vorhandenen Messungen kann man zwei längere Wärmestromdichteprofile erzeugen: zum einen ein Nord-Süd-Profil, bestehend aus den Stationen 8, 5, 4, 3 und 2 (siehe Abb. 7), das entlang des Grabens über die Subduktion des Louisville-Rückens vom Kermadec-Graben bis in den Tonga-Graben reicht, und ein Ost-West-Profil, bestehend aus den Stationen 1, 8 und 9, das sich quer über den Tonga-Graben erstreckt. Die Profile sind in Abb. 8 dargestellt. Das Nord-Süd-Profil zeigt Variationen im Wärmestrom zwischen 20 und 65 mW/m² das Ost-West-Profil Variationen von 15 – 70 mW/m². Auf dem Nord-Süd-Profil wurden reflexionsseismische Messungen im Rahmen des aktiven OBS-Experimentes durchgeführt, jedoch sind die Daten von sehr schlechter Qualität und

nicht verwertbar (Grevemeyer et al., 2008). In beiden Wärmestromprofilen (Abb. 8) sind keine kohärente und signifikante Variationen zu erkennen, die aufgrund der Datenlage in irgendeiner Weise mit den großräumigen Strukturen wie der Subduktion des Louisville-Rückens in Verbindung gebracht werden können.

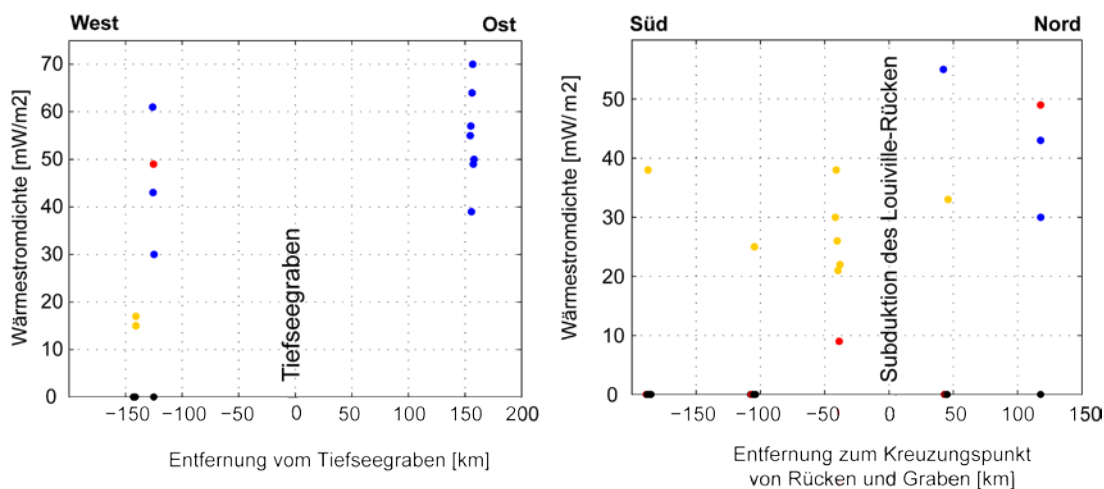


Abbildung 8: Wärmestromprofile. Links: Ost-West-Profil der Wärmestromdichte über den Tonga-Graben hinweg. Rechts: Nord-Süd-Profil der Wärmestromdichte entlang des Grabens über die Subduktion des Louisville-Rückens hinweg. Die Farben der Datenpunkte spiegeln die Qualität der Messung wider; blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung. Erfolgreiche Messungen sind auf der Nulllinie vermerkt.

Bemerkenswert ist die große laterale Streuung des Wärmestromes zwischen Werten von 35 bis 70 mW/m² an Station 1, seewärts der Deformationsfront auf pazifischer Platte. Aufgrund des Alters der ozeanischen Kruste an Station 1 von ca. 100 Millionen Jahren ist, basierend auf einem konduktiven Abkühlungsmodell der Lithosphäre, ein Wärmestrom im Bereich von ca. 55 mW/m² zu erwarten. Der Mittelwert aller gemessenen Werte von Station 1 ergibt 54.9 mW/m², wobei diese sehr gute Übereinstimmung wohl eher zufällig ist, die Größenordnung des Mittelwertes aber sehr wohl gut passt. Bei dem Alter der Kruste würde man erwarten, dass laterale Änderungen des Wärmestromes klein sind, da die hydrothermale Zirkulation in der oberen Kruste nach gängiger Meinung zum Erliegen gekommen ist. Daher ist diese große Streuung auffällig aber mangels seismischer Daten nicht erklärbar.

Versuche, an der ODP-Site 840 (Station 6, Abb. 7) den Wärmestrom zu messen, waren nicht erfolgreich, da trotz mehrfacher Versuche die Sonde nicht eingedrungen ist. Die erbohrten Sedimente bestehen laut Parson et al. (1992) aus einer Wechsellagerung von ‚nannofossil ooze‘ und Vulkanoklastika bis hin zu grobkörnigem Sand, was die Fehlversuche erklärbar macht. Der Versuch, direkt an einem Seamount am Louisville-Rücken zu messen (Station 7) scheiterte wahrscheinlich aus demselben Grund.

IV. Diskussion und Schlussfolgerungen

Das größte Problem der Wärmestromdichtemessungen während SO195 bestand darin, dass sehr wahrscheinlich vulkanoklastische Ablagerungen das Eindringen der Sonde erschwert bzw. in vielen Fällen unmöglich gemacht haben. Vermutlich verhindern die grabenparallelen Strömungen die Ablagerung von feinkörnigem Material, so dass es an

der Sedimentoberfläche zu einer Anreicherung von sandigen Bestandteilen kommt. Dies erschwert zusätzlich das Eindringen.

Insgesamt ist die Ausbeute an verwertbaren Daten, die auf der Expedition gewonnen wurden, klein (ca. 47% Erfolgsrate) und die Datenqualität im Mittel mäßig. Ähnliche Erfahrungen berichtet von Herzen et al. (2001) aus dem weiter südlich gelegenen Untersuchungsgebiet mit einer Erfolgsquote von 54%. Die auf SO195 gemessenen Werte sind von ihrer Größenordnung her gesehen in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Herzen et al. (2001), sie erlauben jedoch keine Aussage darüber, inwieweit die Subduktion des Louisville-Rückens das Temperaturfeld im Untergrund beeinflusst und zu hydrothermalen Prozessen führt. Angesichts der auf der Expedition zur Verfügung stehenden Zeit für Wärmestromdichtemessungen von ca. 5 Tagen und der räumlichen Dimension des Untersuchungsgebietes war es auch nicht möglich, an weiteren Stellen Messungen zu versuchen. Außerdem führten die Fehlversuche zu zahlreichen mechanischen Ausfällen der Sonde, so dass am Schluss das vorhandene Ersatzmaterial erschöpft war. Es ist zu vermuten, dass in tieferen Bereichen des Grabens mit weniger Vulkanoklastika zu rechnen ist, da dort die Strömungen nicht so stark sind, doch konnte dies auf Grund der Begrenzung des Einsatzbereiches der Sonde von 6000 m nicht erkundet werden. Eine beantragte Aufrüstung der Sonde auf einen Einsatzbereich bis 8000 m Wassertiefe war beantragt aber nicht bewilligt worden.

Eine eigenständige Publikation der Daten ist angesichts der Ergebnisse nicht möglich. Die verwertbaren Daten werden zusammen mit den Ergebnissen der Seismik und Seismologie veröffentlicht werden.

Aufbauend auf den Erfahrungen dieser Expedition muss man vor einem weiteren Wärmestromdichte-Programm an dieser Subduktionszone eine sehr sorgfältige Auswahl der Lokationen treffen. Das bedeutet, dass in einer separaten Expedition mit einer hochauflösenden reflexionsseismischen Kartierung verbunden mit einer Probennahme geeignete Lokationen erkundet werden müssen, bevor man einen neuen Versuch beginnt, den Einfluss der Subduktion des Louisville-Rückens auf das Temperaturfeld zu untersuchen.

V. Literatur

- Clift, P.D., MacLeod, C.J. (1999) Slow rates of subduction erosion estimated from subsidence and tilting of the Tonga forearc, *Geology*, 27, 411-414.
- Engdahl, E.R., Villasenor, A. (2002) Global seismicity: 1900-1999, *International Handbook of Earthquake and Engineering seismology*, 81A, 665-690.
- Herzen, von R., Ruppel, C., Molnar, P., Nettles, M., Nagihara, S. and G. Ekström (2001) A constraint on the shear stress at the Pacific-Australian plate boundary from heat flow and seismicity at the Kermadec forearc. *J. Geophys. Res.*, (106), 6817-6833.
- Grevemeyer, I. et al. (2004) Fluid flow through active mud dome Mound Culebra offshore Nicoya Peninsula, Costa Rica : evidence from heat flow surveying, *Mar. Geol.*, 207, 145-157.
- Grevemeyer et al., (2008). FS SONNE Fahrtbericht TOTAL. IFM-GEOMAR Report, no 14.
- Parson, L., Hawkins, J., Allen, J. et al., (1992). *Proc. ODP, Init. Repts.*, 135: College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Villinger, H., Grevemeyer, I., Kaul, N., Hauschild, J., Pfender, M. (2002) Hydrothermal heat flux through aged oceanic crust: where does the heat escape? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 202, 159-170.
- Bullard, E.C. (1954) The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean, *Proc. R. Soc. London, A*, 222, 408-425.
- Bullard, E.C. (1939) Heat flow in South Africa, *Proc. R. Soc. London, A*, 173, 474-502.
- Hartmann, A., Villinger, H. (2002) Inversion of heat flow measurements by expansion of the temperature decay function. *Geophys. J. Int.* 148, 628-636.

- Hyndman, R.D., Davis, E.E., Wright, J.A. (1979) The measurement of marine geothermal heat flow by a multipenetration probe with digital acoustic telemetry and in situ thermal conductivity, *Mar. Geophys. Res.*, 4, 181–205.
- Lister, C.R.B. (1970) Measurement of in situ sediment conductivity by means of a Bullard-type probe, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 19, 521–532.
- Lister, C.R.B. (1979) The pulse-probe method of conductivity measurement, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 57, 451–461.
- Villinger, H., Davis, E.E. (1987) A new reduction algorithm for marine heat flow measurements, *J. geophys. Res.*, 92, 12 846–12 856.

Anhang

Ergebnisse der Wärmestromdichtemessungen auf der Forschungsfahrt SO195 mit FS SONNE

Förderkennzeichen 03G0195B

Prof. Dr. H. Villinger
Dr. N. Kaul
Fachbereich Geowissenschaften
Universität Bremen
Postfach 330 440
D-28334 Bremen

November 2009

SO 195 Heat Flux

Name	Depth [m]	Date	Latitude (south) DDD	Longitude (west) DDD	Penetration depth [m]	no of sensors used	Temperature Gradient [mK/m]	Mean Thermal conductivity [W/m ² K]	Heat Flow [mW/m ²]	Quality	
Station 01											
H0801P01	5599	29.01.2008	-24	26.476	-174	2.486	1.62	48	1.07	50	good
H0801P02	5608	29.01.2008	-24	26.501	-174	3.000	1.62	47	1.09	49	good
H0801P03	5607	29.01.2008	-24	26.498	-174	3.502	2.43	60	1.21	70	good
H0801P04	5609	29.01.2008	-24	26.505	-174	3.998	2.97	59	1.08	64	good
H0801P05	5606	29.01.2008	-24	26.496	-174	4.508	1.62	36	1.08	39	good
H0801P06	5604	29.01.2008	-24	26.495	-174	5.001	1.35	53	1.08	57	good
H0801P07	5604	29.01.2008	-24	26.508	-174	5.487	2.97	51	1.09	55	good
Station 02											
H0802P01	4229	31.01.2008	-25	7.368	-175	27.400	1.89	43	1.27	55	good
H0802P02	4174	31.01.2008	-25	6.973	-175	27.321	3.24	n/a	n/a	n/a	bad
H0802P03	4168	31.01.2008	-25	6.582	-175	27.225	0.00	n/p	n/p	n/p	n/p
H0802P04	4148	31.01.2008	-25	6.175	-175	27.141	0.81	161	n/a	n/a	bad
H0802P05	4148	31.01.2008	-25	5.782	-175	27.058	0.00	n/p	n/p	n/a	n/p
H0802P06	4170	31.01.2008	-25	5.391	-175	26.958	2.16	26	1.27	33	fair
Station 03											
H0803P01	4042	01.02.2008	-25	51.506	-175	37.487	3.24	22	1.35	30	fair
H0803P02	4073	01.02.2008	-25	51.111	-175	37.403	0.81	28	1.35	38	fair
H0803P03	4145	01.02.2008	-25	50.707	-175	37.328	1.62	19	1.32	26	fair
H0803P04	4233	01.02.2008	-25	50.312	-175	37.241	1.89	15	1.33	21	fair
H0803P05	4310	01.02.2008	-25	49.878	-175	37.164	1.89	6	1.48	9	bad
H0803P06	4309	01.02.2008	-25	49.546	-175	36.992	1.62	17	1.35	22	fair
in situ											
assumed											
n/a											
n/p											

thermal conductivity measured in situ
thermal conductivity assumed
not available
no penetration

SO 195 Heat Flux

Name	Depth [m]	Date	Latitude (south) DDD MM.SS	Longitude (west) DDD MM.SS	Penetration depth [m]	no of sensors used	Temperature Gradient [mK/m]	Mean Thermal conductivity [W/m*K]	Heat Flow [mW/m ²]	Quality
Station 04										
H0804P01	5707	01.02.2008	-26 26.332	-175 45.432	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0804P02	5695	01.02.2008	-26 25.940	-175 45.346	1.35	2	2	n/a	n/a	bad
H0804P03	5732	01.02.2008	-26 25.548	-175 45.250	0.54	2	23	n/a	n/a	bad
H0804P04	5734	01.02.2008	-26 25.149	-175 45.158	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0804P05	5701	01.02.2008	-26 24.761	-175 45.050	1.62	3	19	1.3 assumed	25	fair
H0804P06	5662	01.02.2008	-26 24.355	-175 44.936	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
Station 05										
H0805P01	4463	02.02.2008	-27 6.298	-176 6.842	0.81	2	n/a	n/a	n/a	bad
H0805P02	4435	02.02.2008	-27 5.895	-176 6.737	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0805P03	4476	02.02.2008	-27 5.520	-176 6.640	1.08	3	28	1.34 in situ	38	fair
H0805P04	4563	02.02.2008	-27 5.106	-176 6.516	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0805P05	4480	02.02.2008	-27 4.769	-176 6.465	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0805P06	4470	02.02.2008	-27 4.317	-176 6.326	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
Station 06										
H0806P01	4850	07.02.2008	-23 20.963	-175 17.508	3.51	7	15	1.32 in situ	19	good
H0806P02	4850	07.02.2008	-23 20.935	-175 17.475	1.89	6	22	1.3 assumed	29	good
H0806P03	4850	07.02.2008	-23 20.943	-175 17.491	3.24	9	15	1.29 in situ	19	good
H0806P04	4820	07.02.2008	-23 20.746	-175 17.870	1.89	8	21	1.3 assumed	27	good
H0806P05	4802	07.02.2008	-23 20.538	-175 18.260	1.08	3	65	1.3 assumed	85	bad
H0806P06	4650	07.02.2008	-23 20.321	-175 18.671	1.62	3	27	1.43 in situ	39	fair
H0806P07	4547	07.02.2008	-23 20.142	-175 19.009	4.05	8	30	1.33 in situ	38	good
H0806P08	4543	07.02.2008	-23 19.941	-175 19.384	4.05	12	20	1.48 in situ	29	good

in situ thermal conductivity measured in situ
 assumed thermal conductivity assumed
 n/a not available
 n/p no penetration

SO 195 Heat Flux

Name	Depth [m]	Date	Latitude (south) DDD MM.SS	Longitude (west) DDD MM.SS	Penetration depth [m]	no of sensors used	Temperature Gradient [mK/m]	Mean Thermal conductivity [W/m*K]	Heat Flow [mW/m ²]	Quality
Station 07										
H0807P01	1788	11.02.2008	-26 28.054	-174 43.462	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0807P02	1793	11.02.2008	-26 28.066	-174 43.459	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0807P03	1807	11.02.2008	-26 28.175	-174 43.460	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
Station 08										
H0808P01	5332	11.02.2008	-24 26.448	-175 29.435	1.80	6	24	1.25	30	good
H0808P02	5245	12.02.2008	-24 26.492	-175 30.008	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0808P03	5111	12.02.2008	-24 26.494	-175 30.553	0.30	2	39	1.25	49	bad
H0808P04	5038	12.02.2008	-24 26.490	-175 31.099	2.10	6	34	1.25	43	good
H0808P05	4956	12.02.2008	-24 26.495	-175 31.644	1.20	5	45	1.25	61	good
Station 09										
H0809P01	3516	12.02.2008	-24 26.525	-175 50.978	1.50	3	13	1.13	15	fair
H0809P02	3531	12.02.2008	-24 26.530	-175 50.983	2.10	3	14	1.21	17	fair
H0809P03	3531	12.02.2008	-24 26.501	-175 51.555	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0809P04	3529	12.02.2008	-24 26.505	-175 52.105	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0809P05	3633	12.02.2008	-24 26.502	-175 52.665	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p
H0809P06	3627	12.02.2008	-24 26.508	-175 53.227	0.00	0	n/p	n/p	n/p	n/p

in situ thermal conductivity measured in situ
 assumed thermal conductivity assumed
 n/a not available
 n/p no penetration

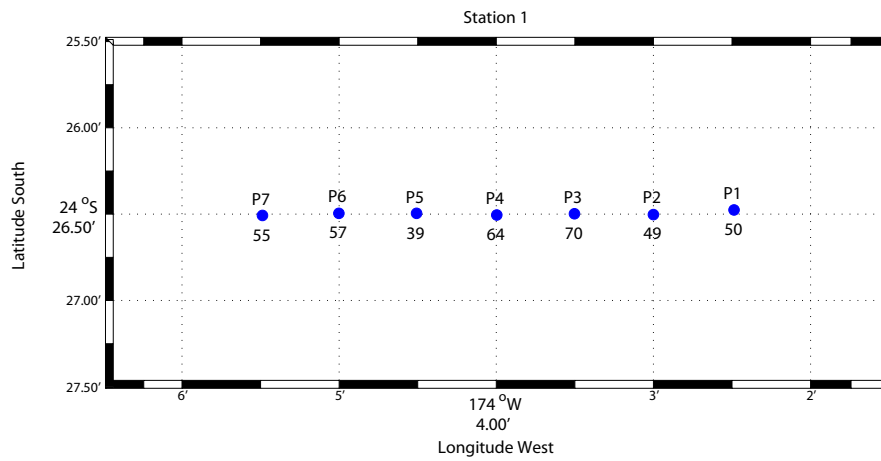


Abbildung 1: Station und Messpunkte der Station H0801. Die Nummer der Messung steht über der Position, die Zahl darunter ist der Wärmestrom in mW/m^2 . Die Qualität der Messungen wird durch die Farbgebung repräsentiert: blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung.

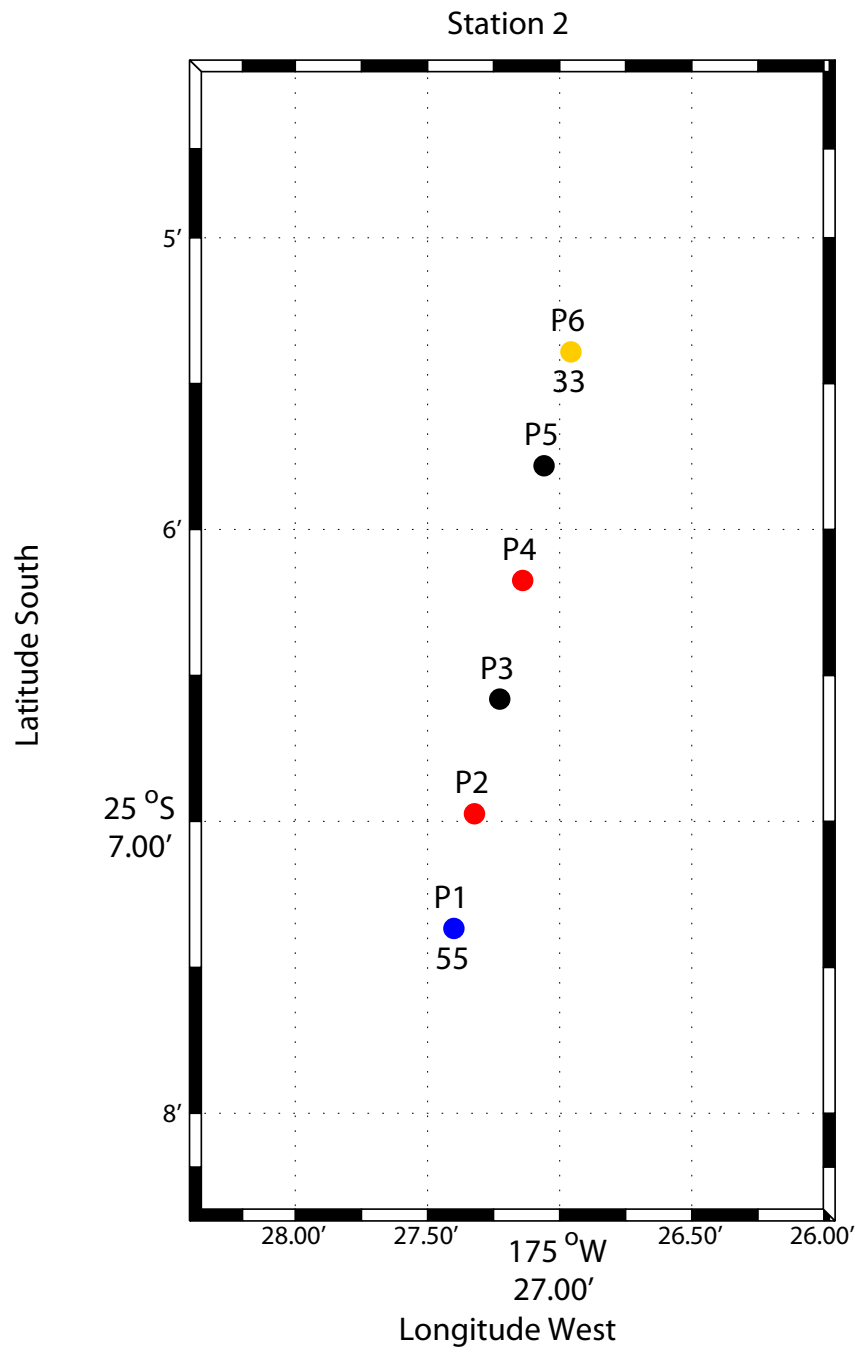


Abbildung 2: Station und Messpunkte der Station H0802. Die Nummer der Messung steht über der Position, die Zahl darunter ist der Wärmestrom in mW/m^2 . Die Qualität der Messungen wird durch die Farbgebung repräsentiert: blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung.

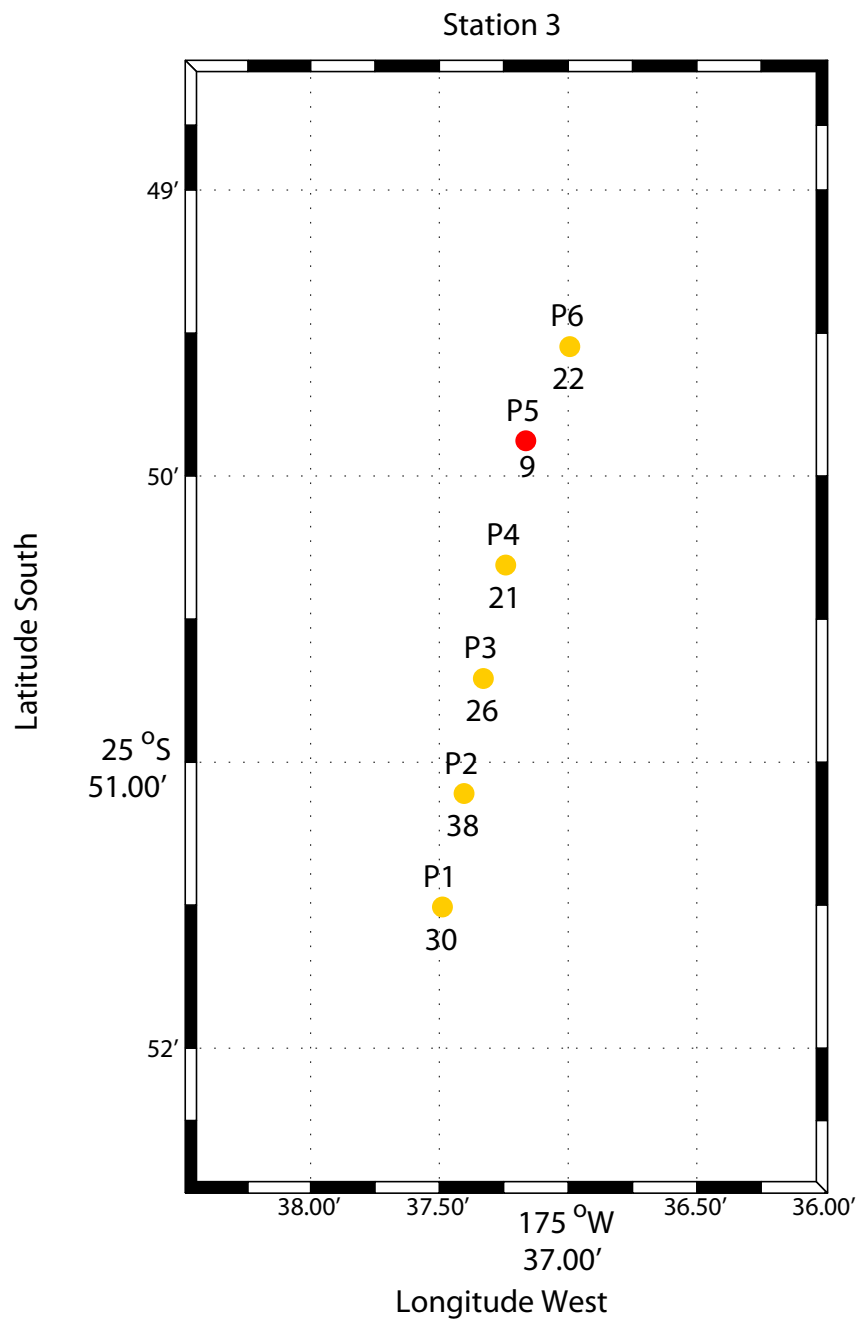


Abbildung 3: Station und Messpunkte der Station H0803. Die Nummer der Messung steht über der Position, die Zahl darunter ist der Wärmestrom in mW/m^2 . Die Qualität der Messungen wird durch die Farbgebung repräsentiert: blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung.

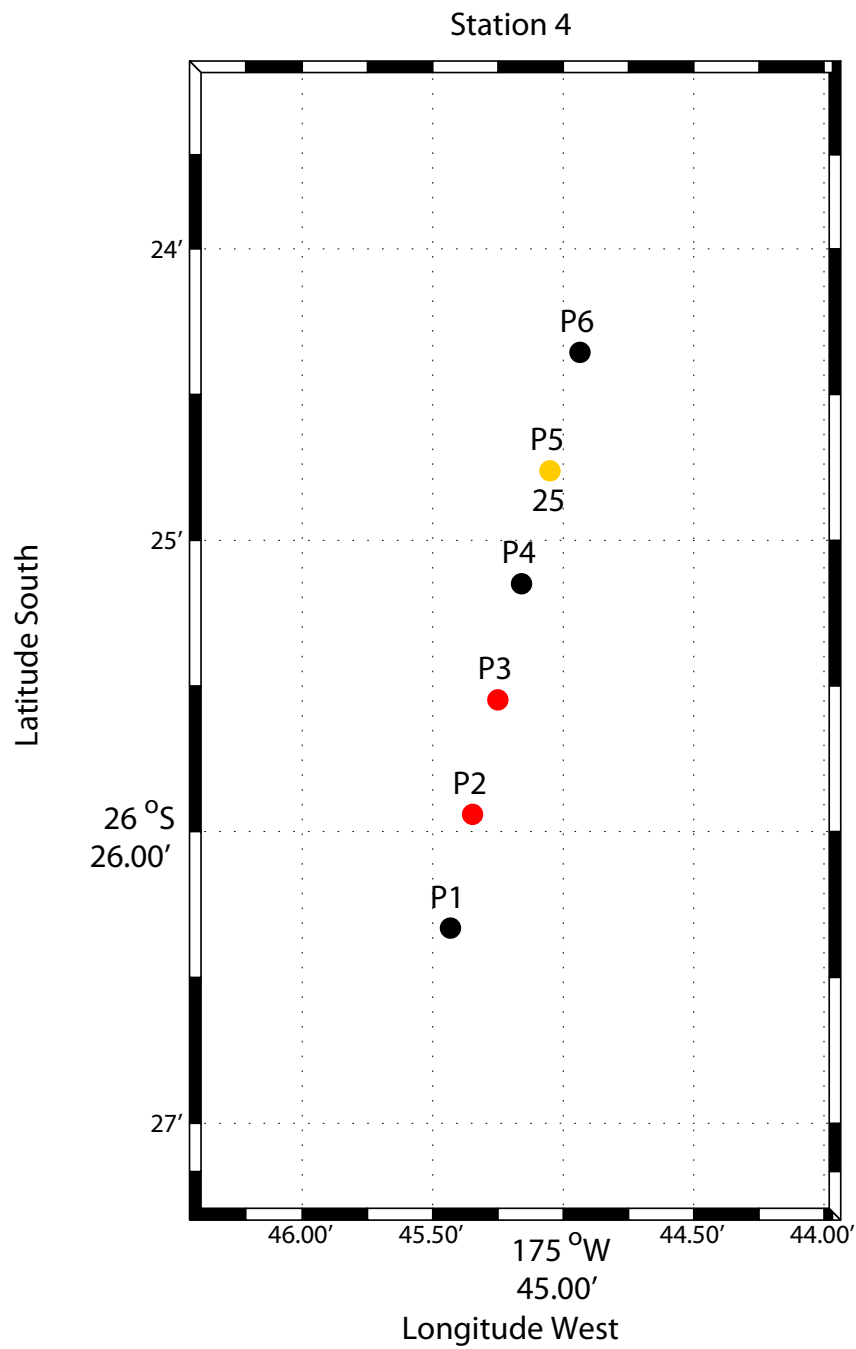


Abbildung 4: Station und Messpunkte der Station H0804. Die Nummer der Messung steht über der Position, die Zahl darunter ist der Wärmestrom in mW/m^2 . Die Qualität der Messungen wird durch die Farbgebung repräsentiert: blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung.

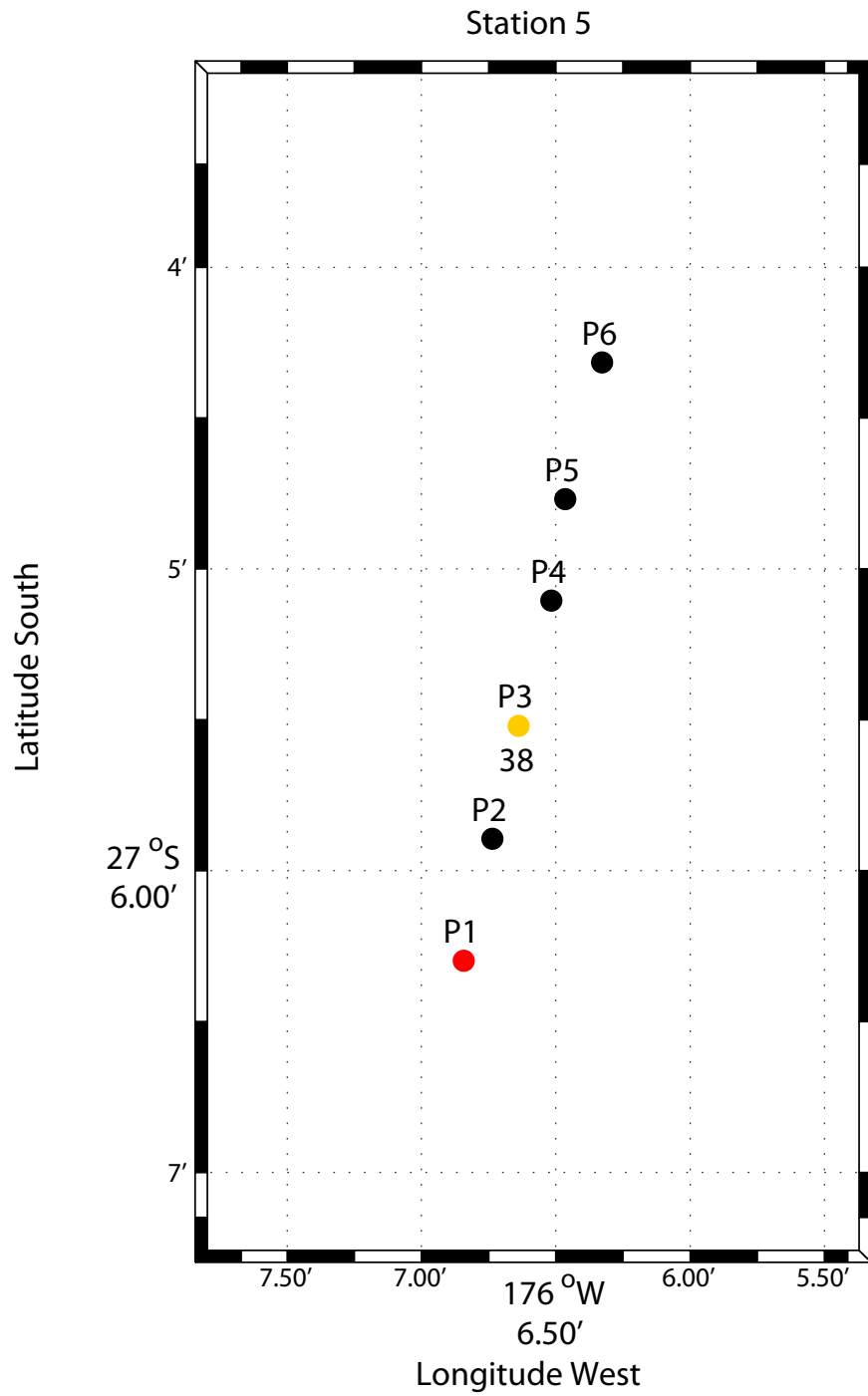


Abbildung 5: Station und Messpunkte der Station H0805. Die Nummer der Messung steht über der Position, die Zahl darunter ist der Wärmestrom in mW/m^2 . Die Qualität der Messungen wird durch die Farbgebung repräsentiert: blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung.

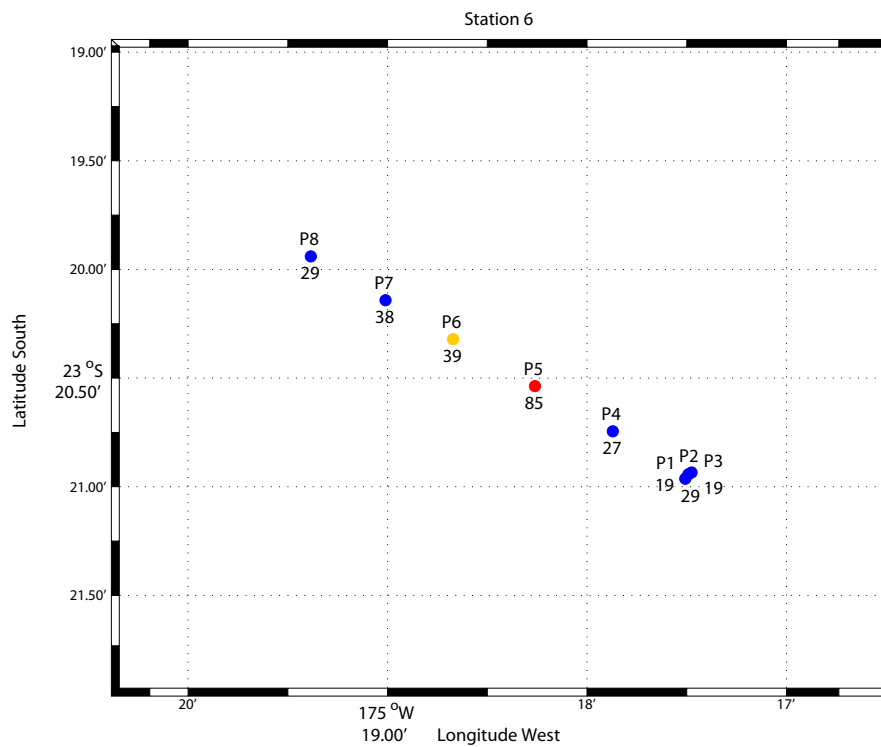


Abbildung 6: Station und Messpunkte der Station H0806. Die Nummer der Messung steht über der Position, die Zahl darunter ist der Wärmestrom in mW/m^2 . Die Qualität der Messungen wird durch die Farbgebung repräsentiert: blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung.

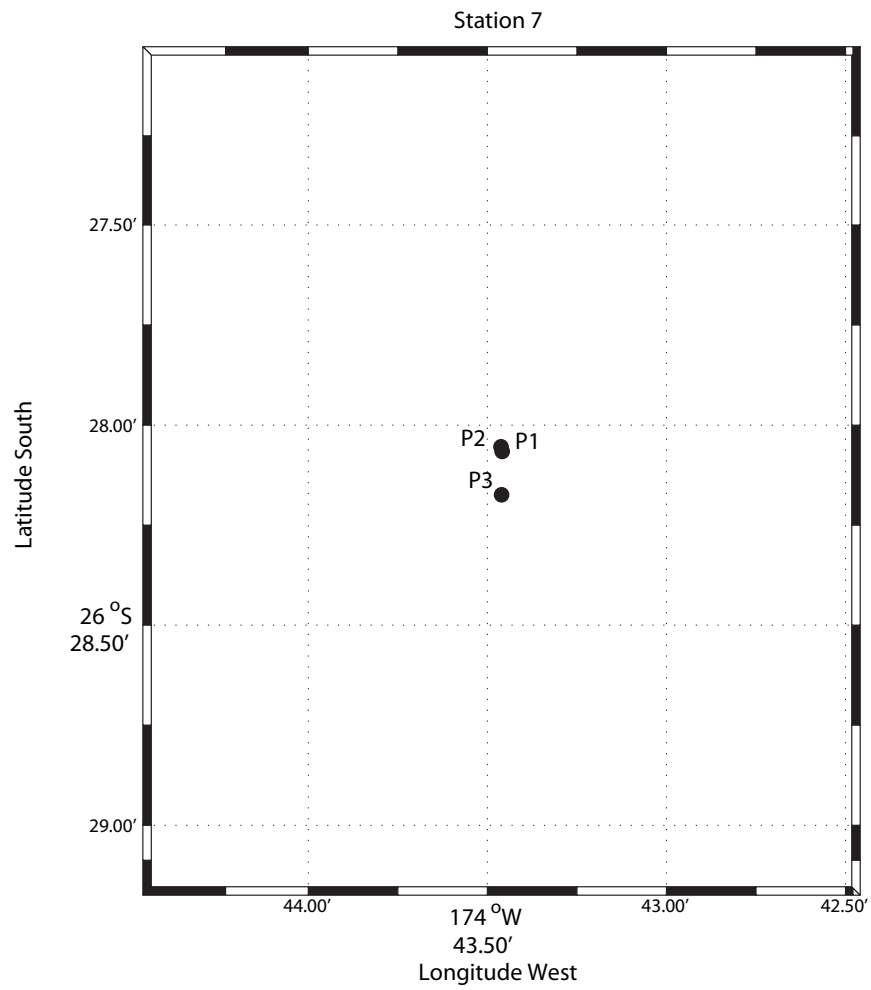


Abbildung 7: Station und Messpunkte der Station H0807. Die Nummer der Messung steht über der Position, die Zahl darunter ist der Wärmestrom in mW/m^2 . Die Qualität der Messungen wird durch die Farbgebung repräsentiert: blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung.

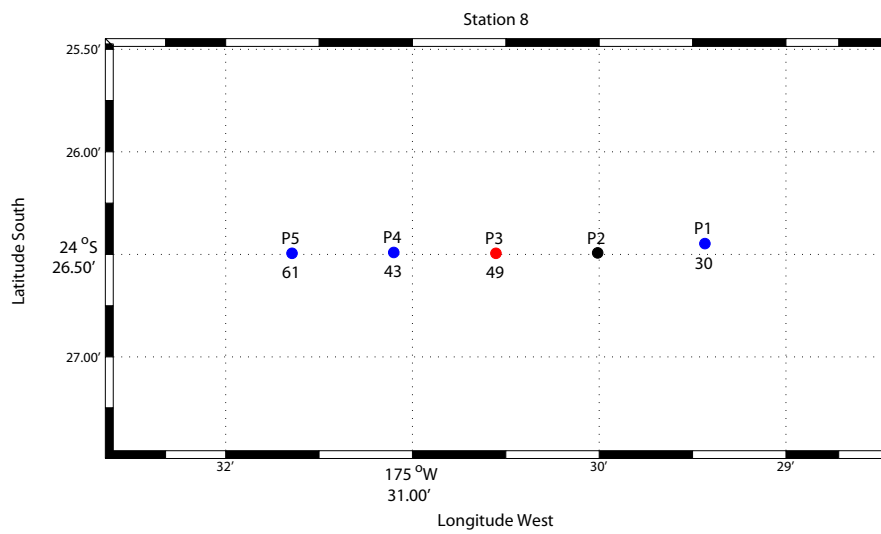


Abbildung 8: Station und Messpunkte der Station H0808. Die Nummer der Messung steht über der Position, die Zahl darunter ist der Wärmestrom in mW/m^2 . Die Qualität der Messungen wird durch die Farbgebung repräsentiert: blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung.

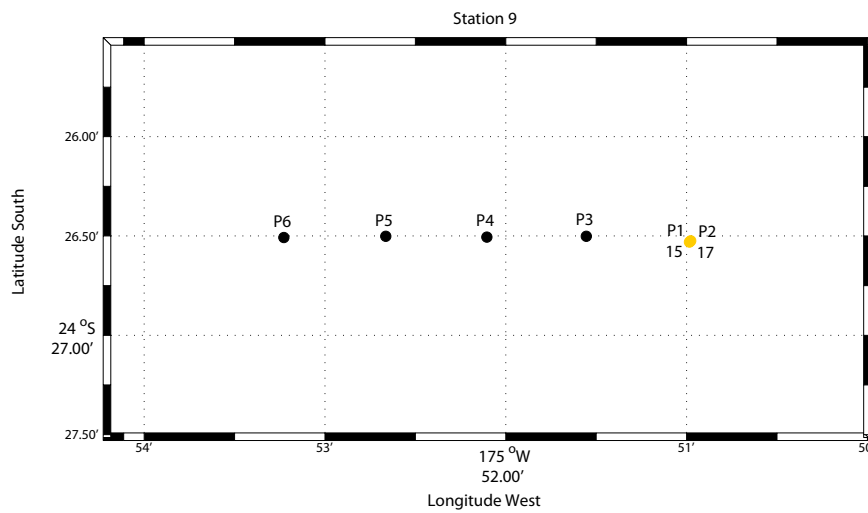


Abbildung 9: Station und Messpunkte der Station H0809. Die Nummer der Messung steht über der Position, die Zahl darunter ist der Wärmestrom in mW/m^2 . Die Qualität der Messungen wird durch die Farbgebung repräsentiert: blau: gut, orange: mäßig, rot: schlecht, schwarz: keine Eindringung.

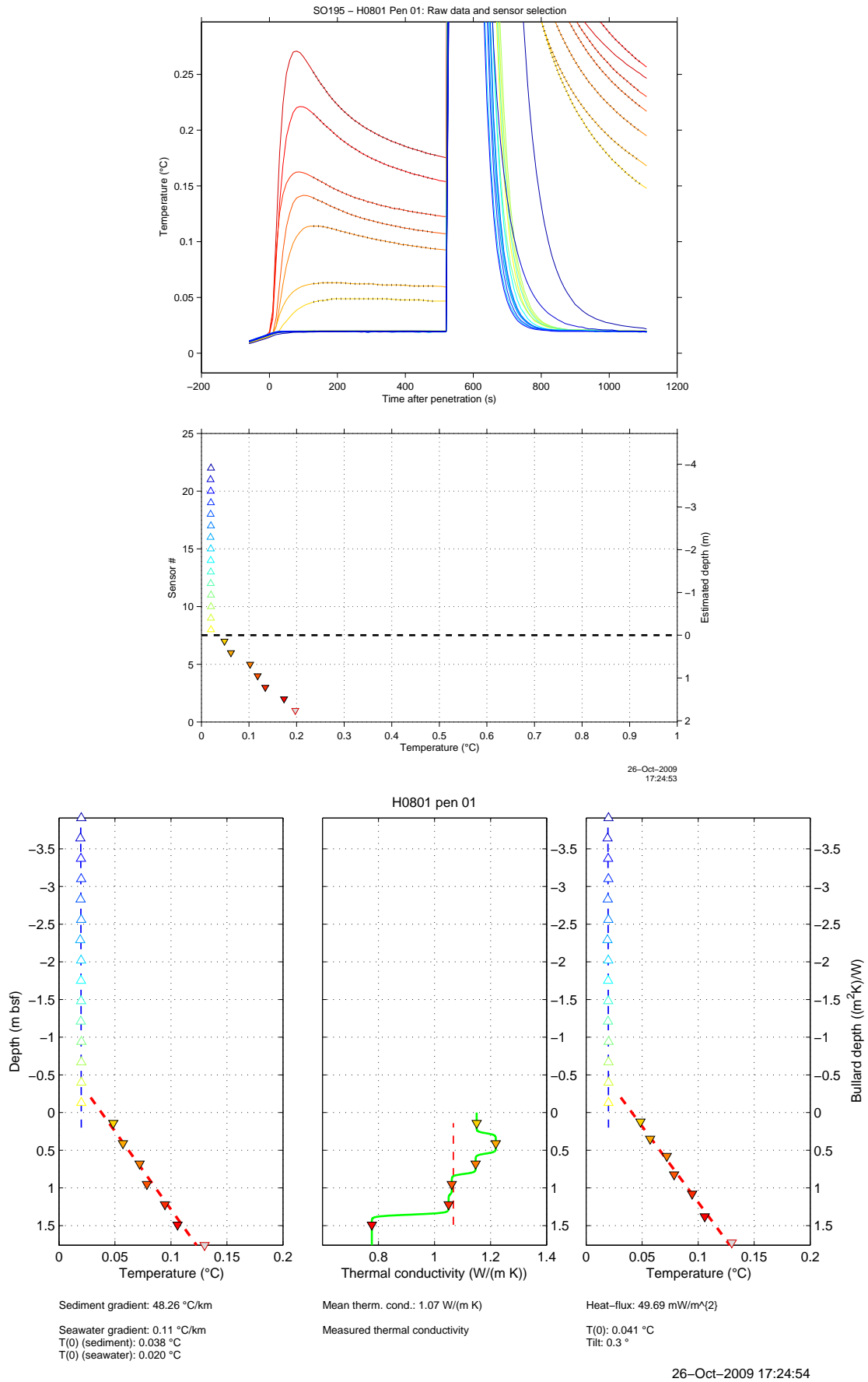


Abbildung 10: TOTAL - Station und Messpunkt: H0801p01. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

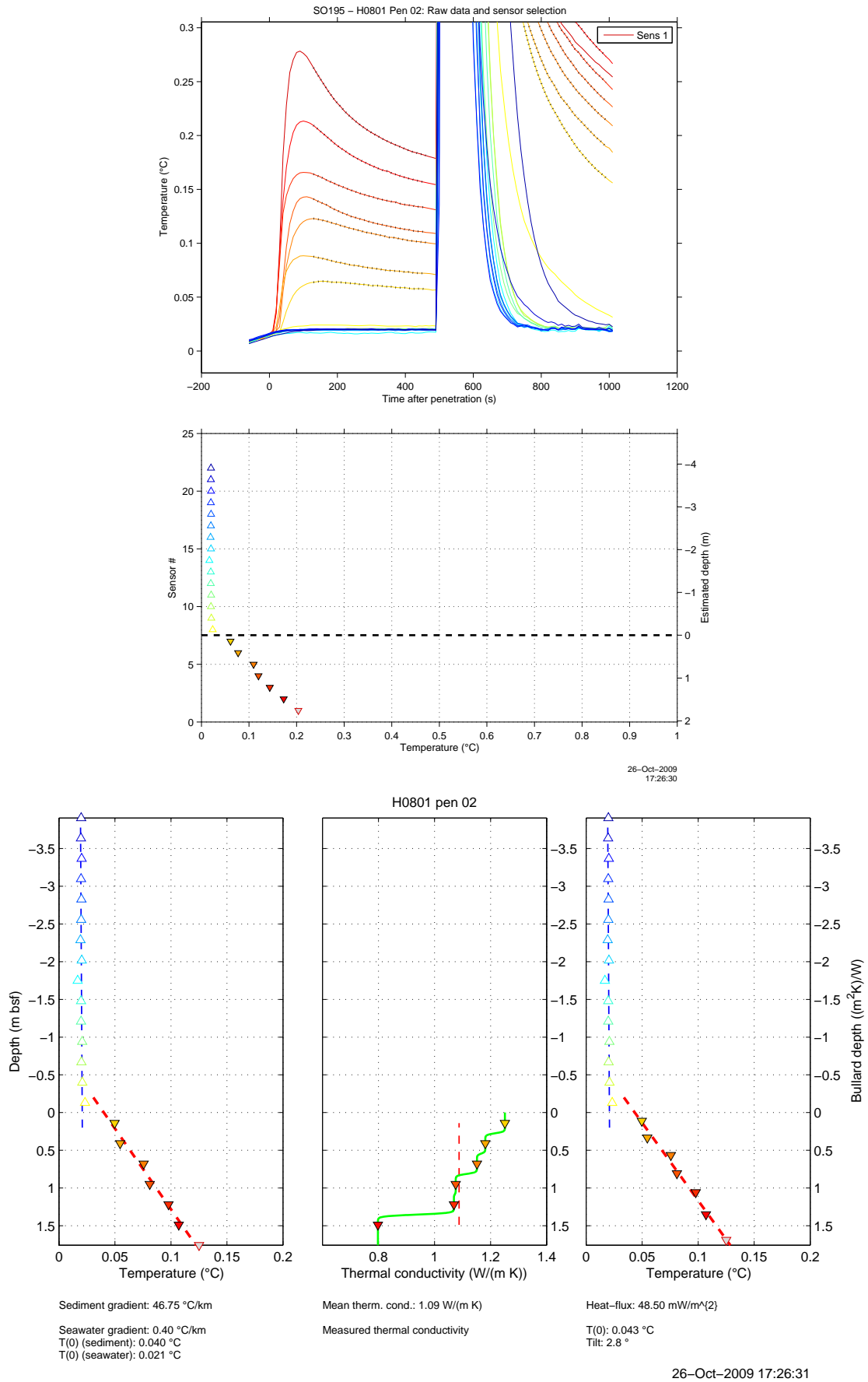


Abbildung 11: TOTAL - Station und Messpunkt: H0801p02. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

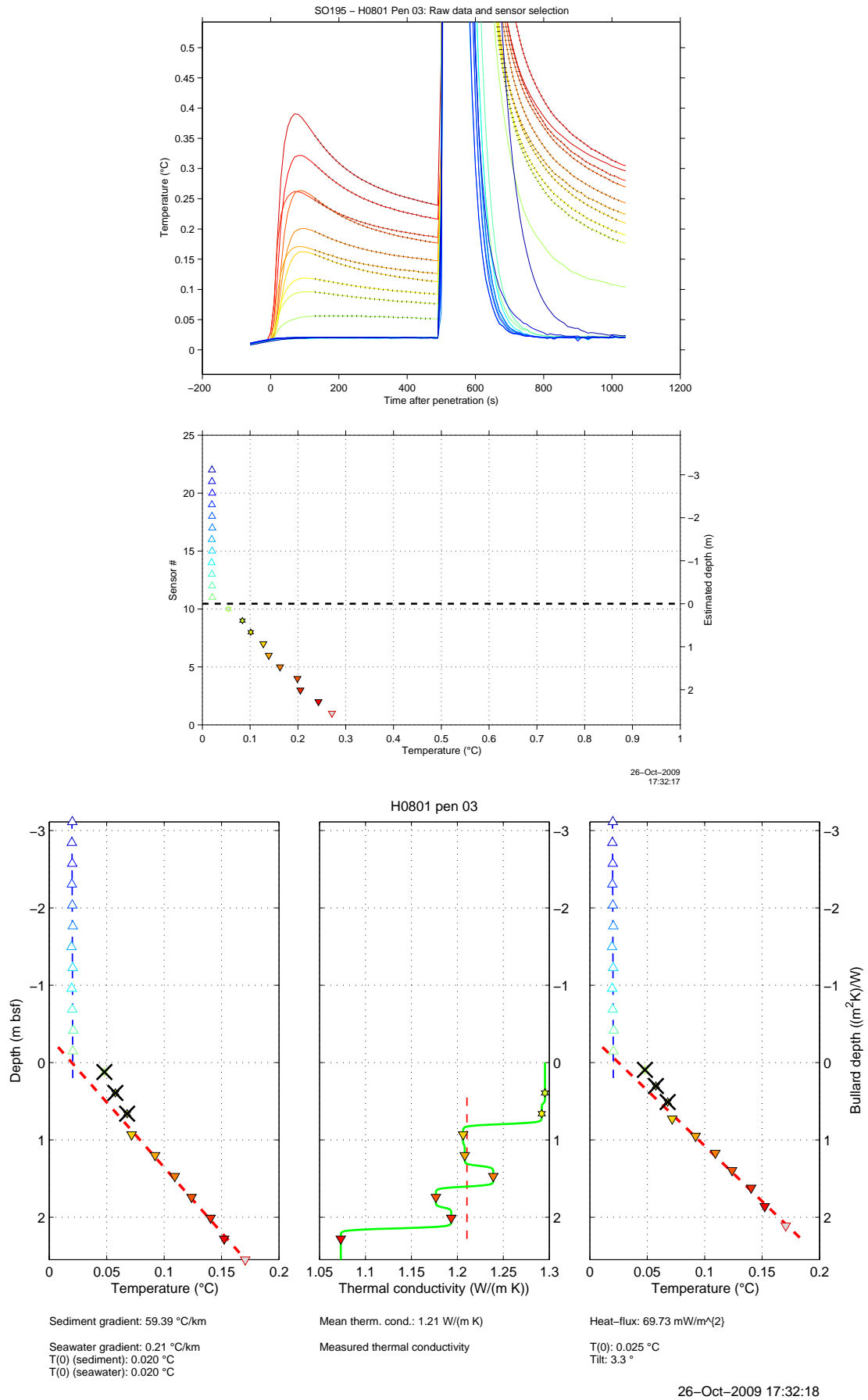


Abbildung 12: TOTAL - Station und Messpunkt: H0801p03. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

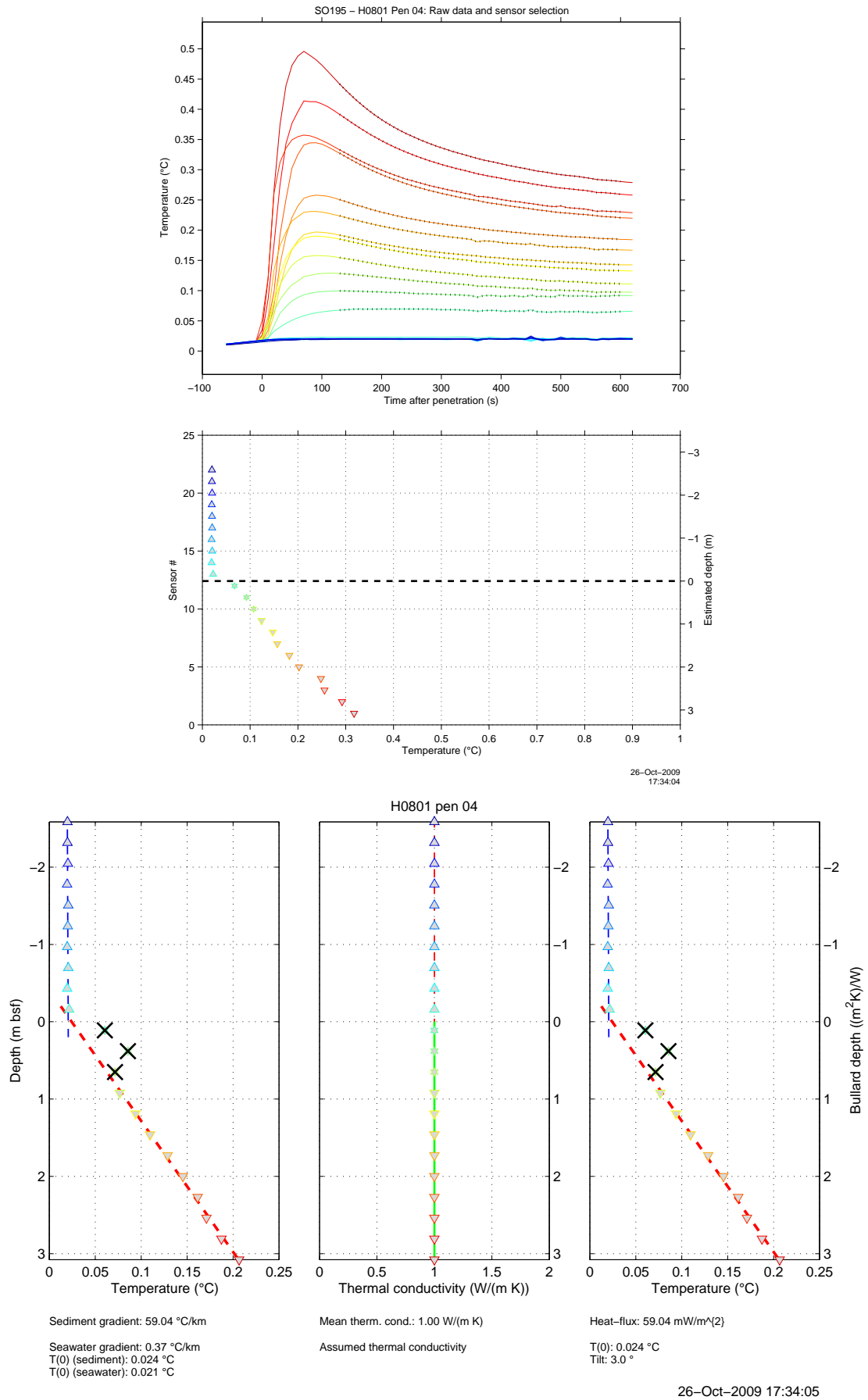


Abbildung 13: TOTAL - Station und Messpunkt: H0801p04. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

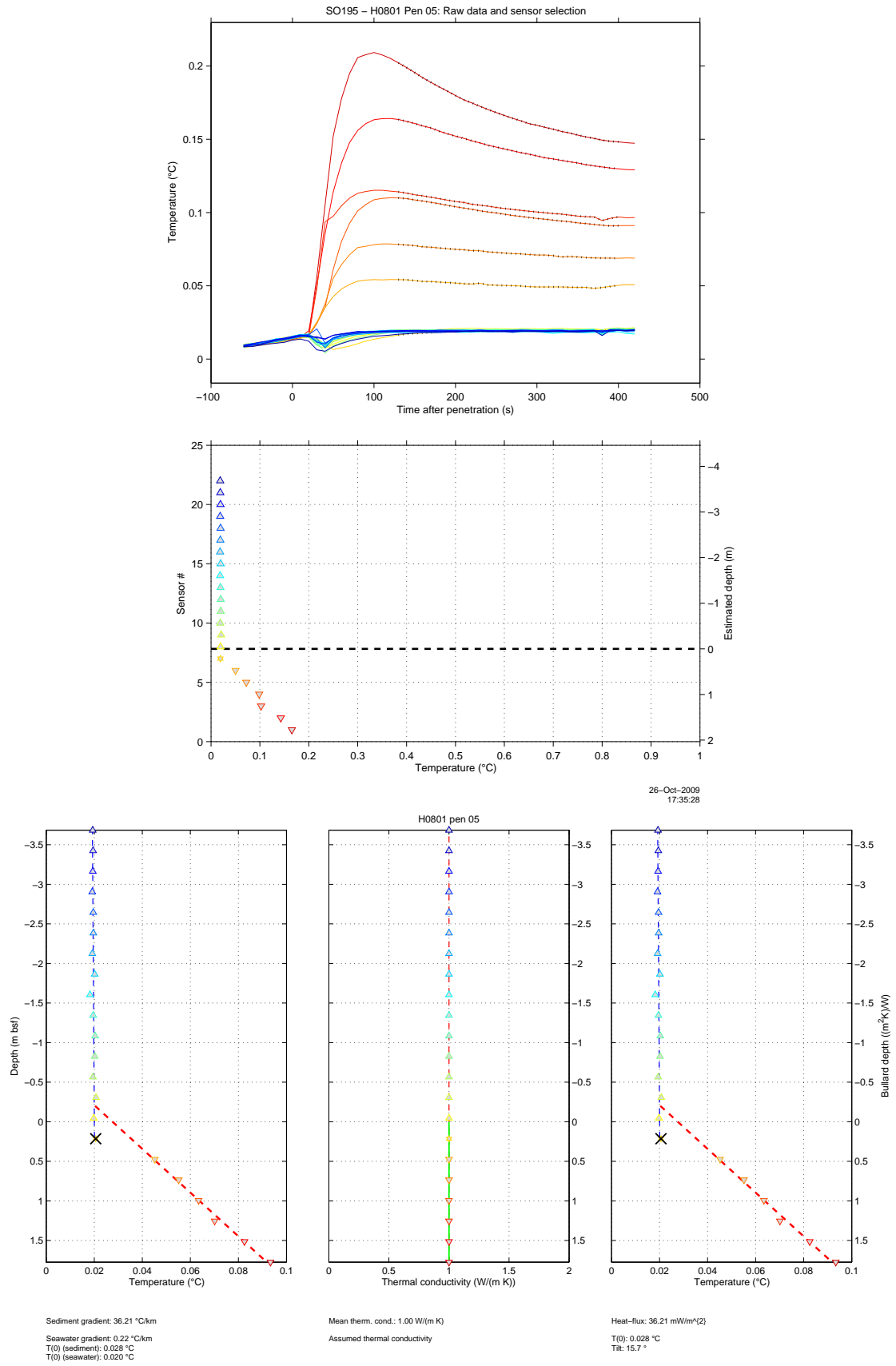


Abbildung 14: TOTAL - Station und Messpunkt: H0801p05. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

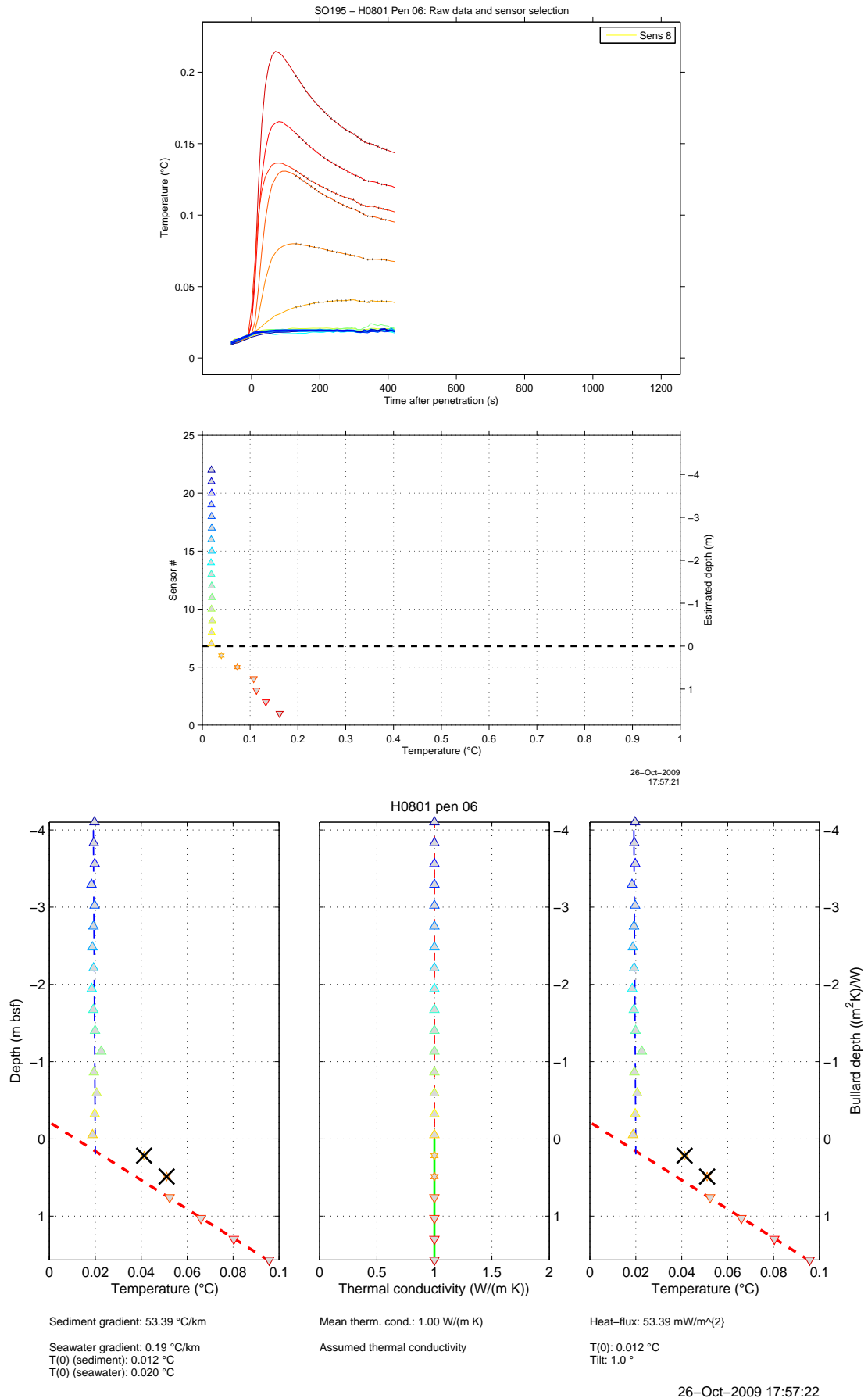


Abbildung 15: TOTAL - Station und Messpunkt: H0801p06. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

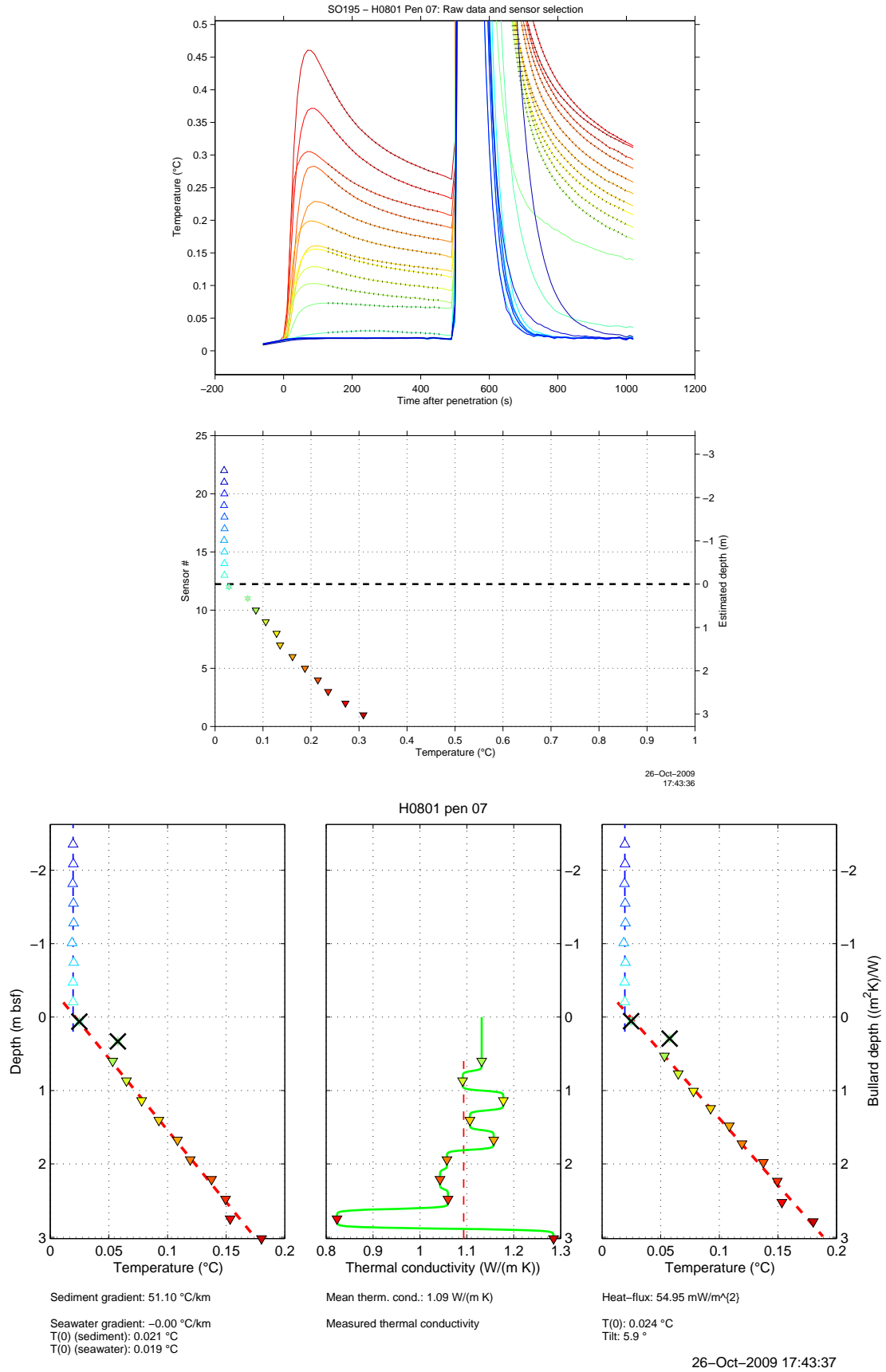


Abbildung 16: TOTAL - Station und Messpunkt: H0801p07. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

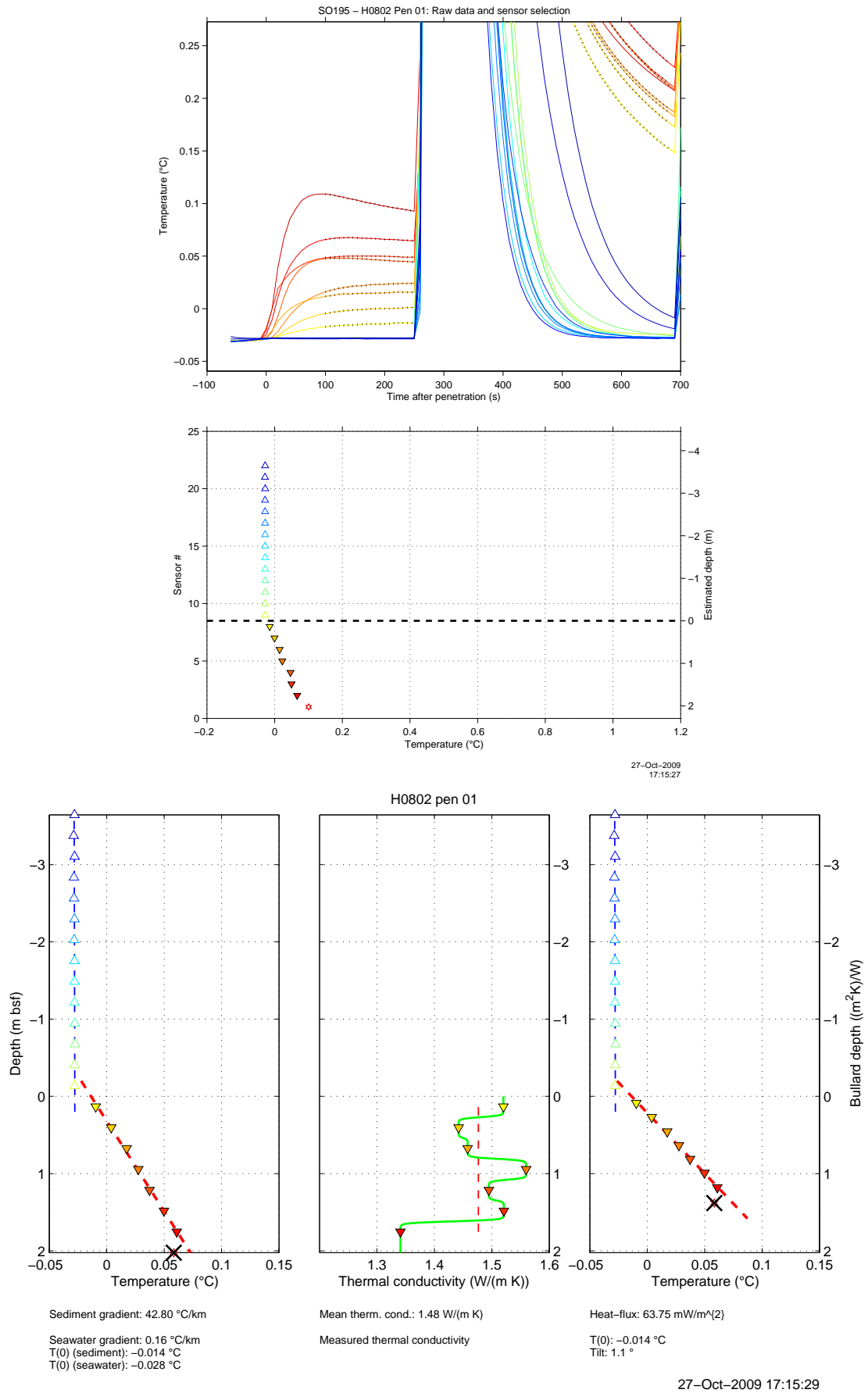


Abbildung 17: TOTAL - Station und Messpunkt: H0802p01. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

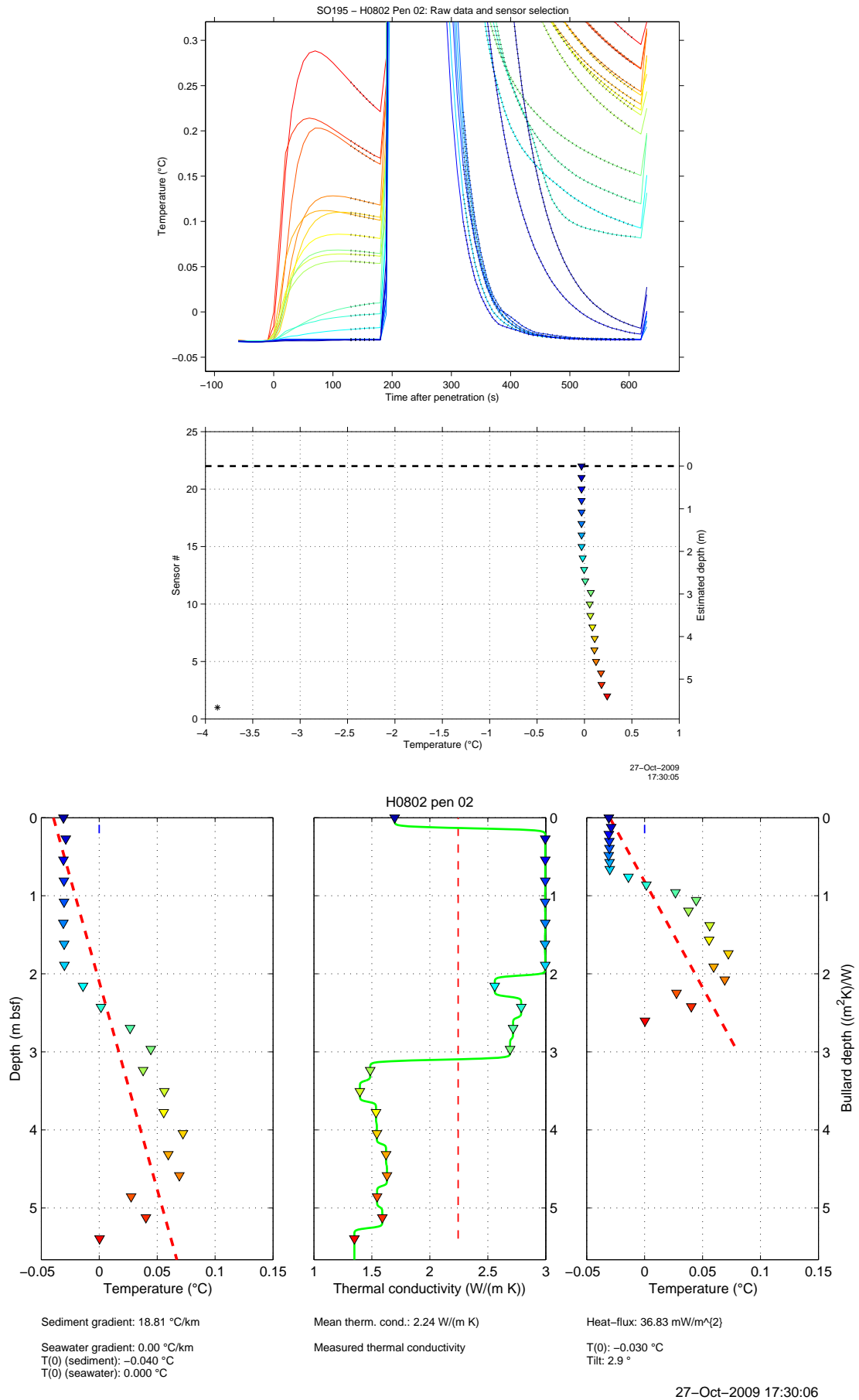


Abbildung 18: TOTAL - Station und Messpunkt: H0802n02. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

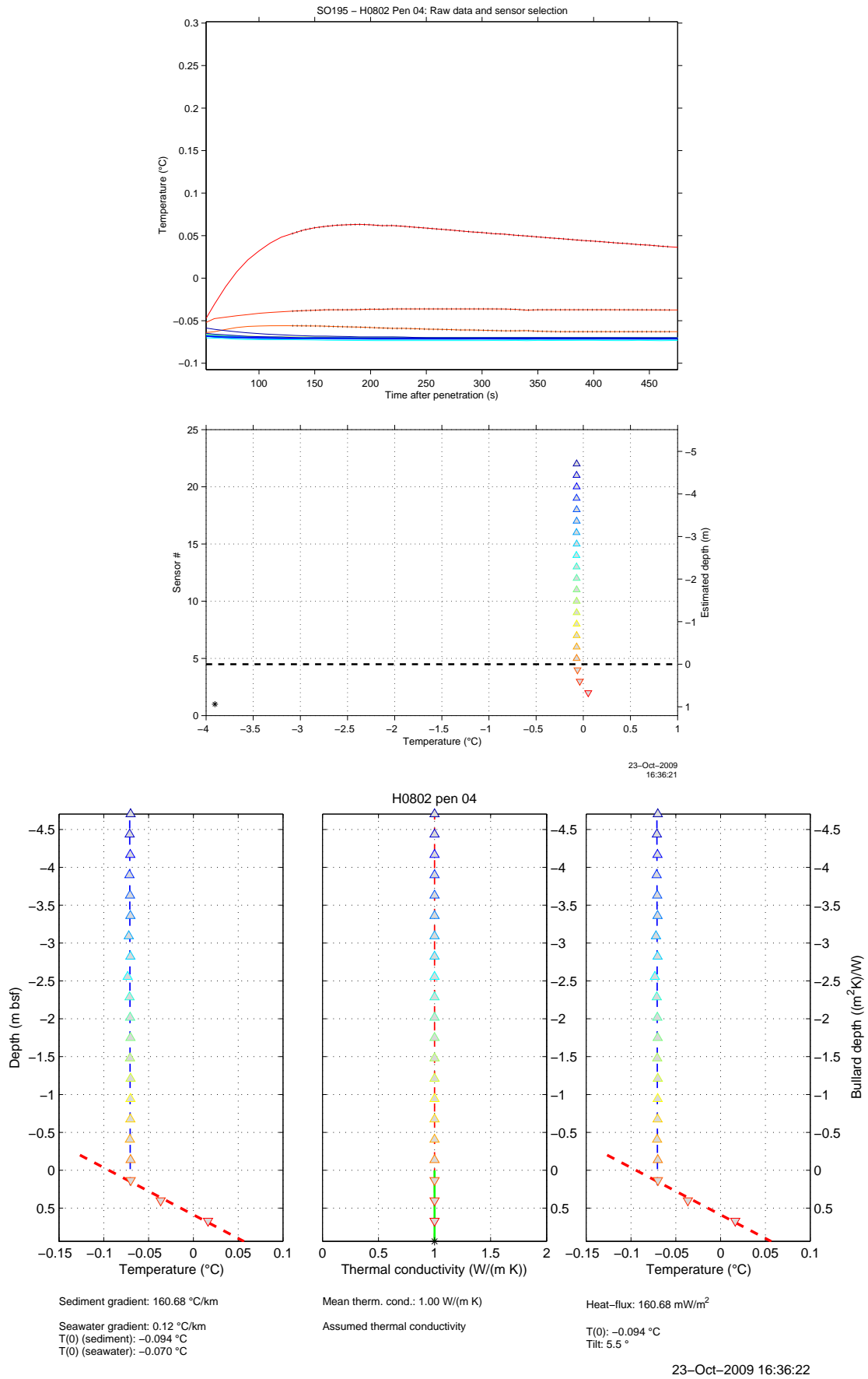


Abbildung 19: TOTAL - Station und Messpunkt: H0802p04. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

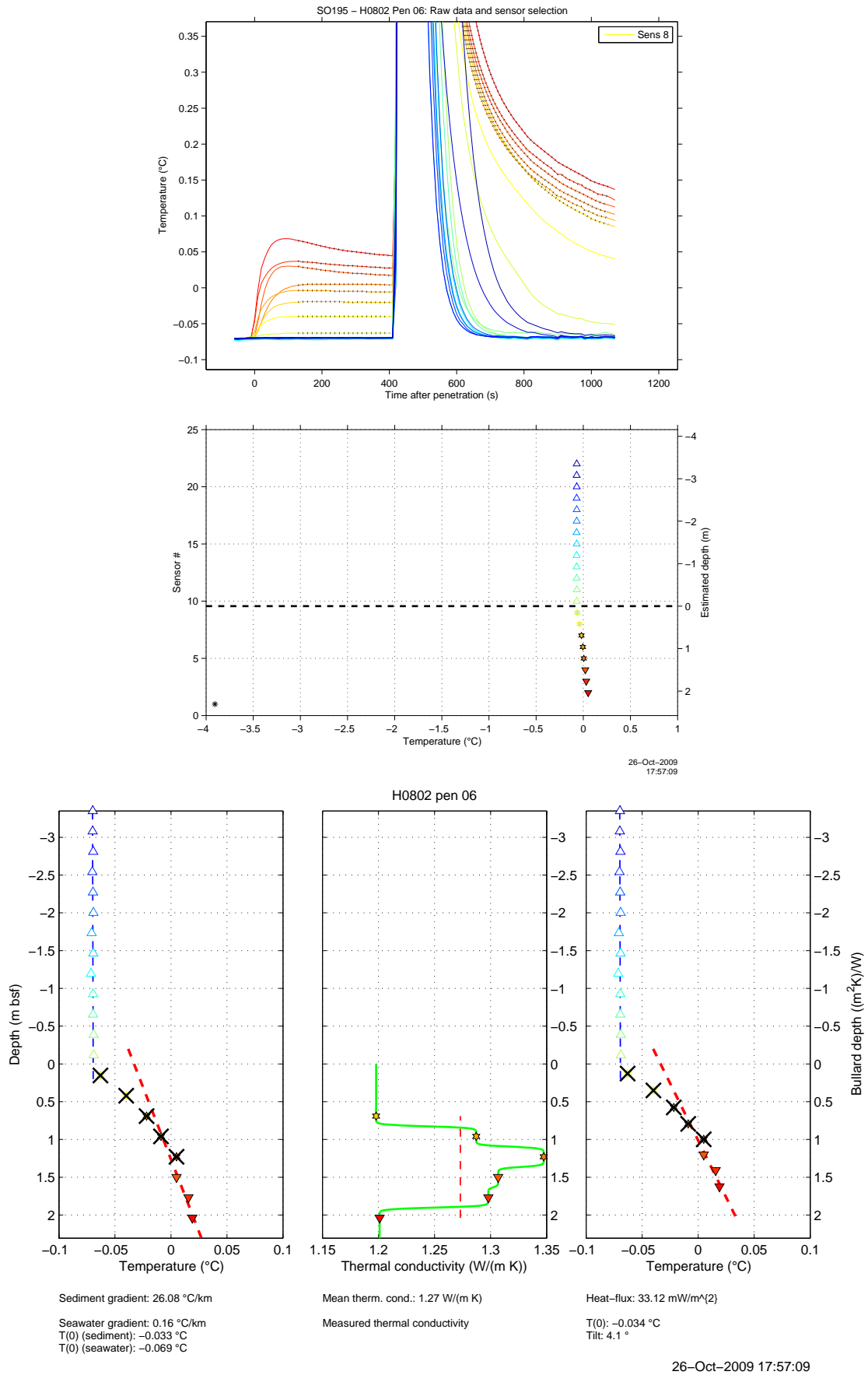
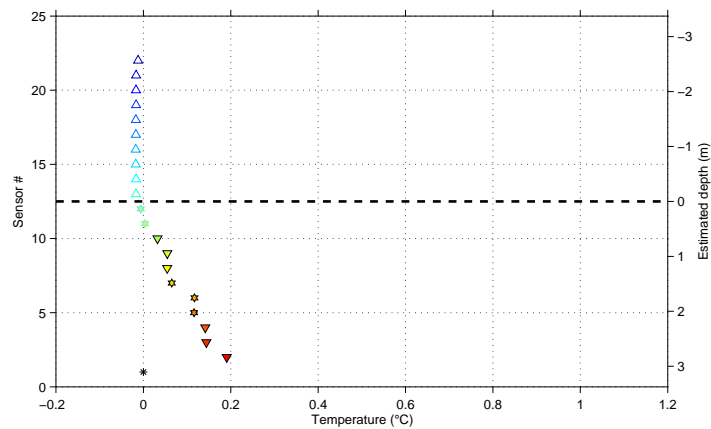
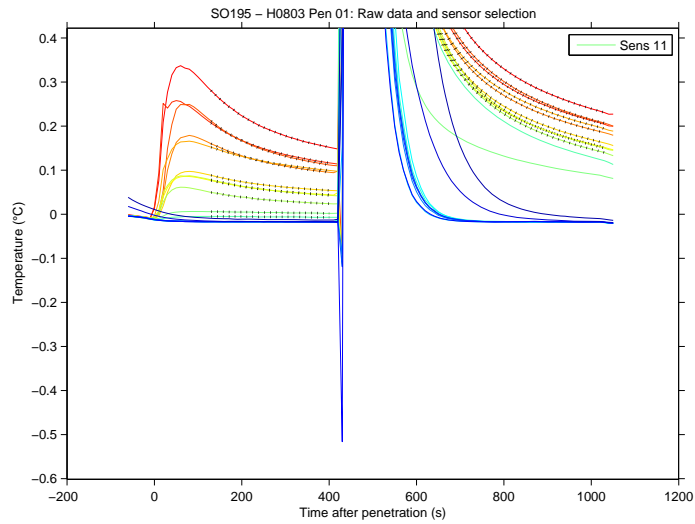
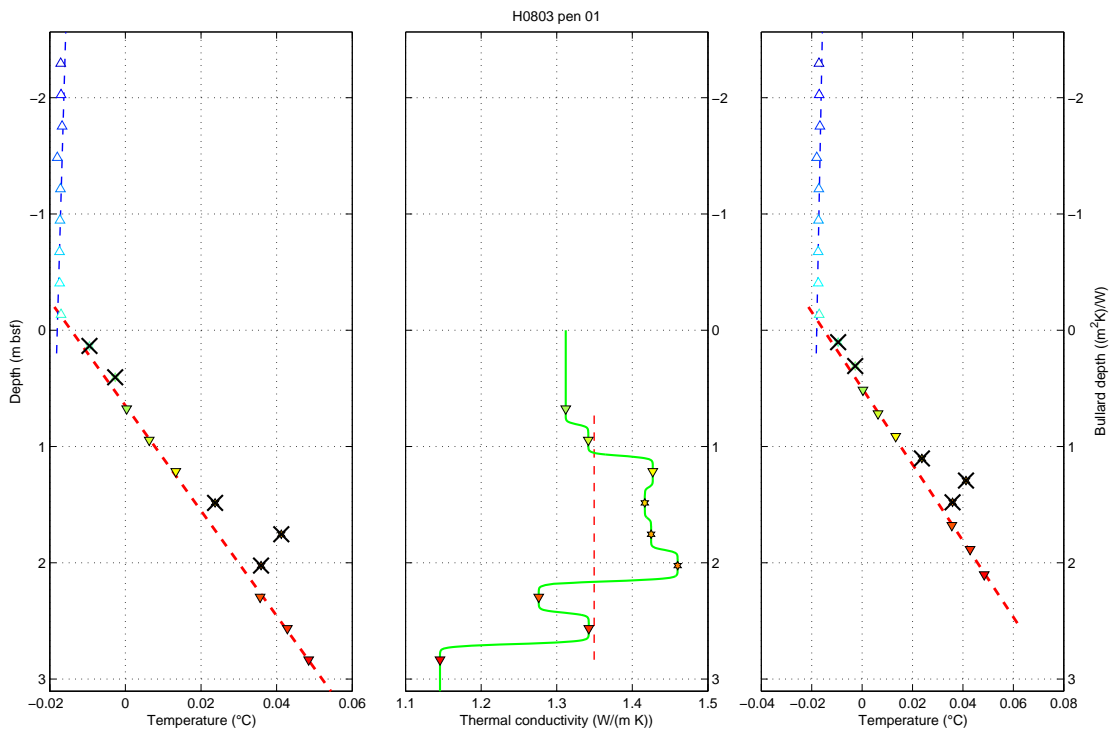


Abbildung 20: TOTAL - Station und Messpunkt: H0802p06. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.



26-Oct-2009
18:12:14



Sediment gradient: 22.14 °C/km
Seawater gradient: -0.88 °C/km
T(0) (sediment): -0.014 °C
T(0) (seawater): -0.018 °C

Mean therm. cond.: 1.35 W/(m K)
Measured thermal conductivity

Heat-flux: 30.46 mW/m²
T(0): -0.015 °C
Tilt: 1.0 °

Abbildung 21: TOTAL - Station und Messpunkt: H0803p01. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

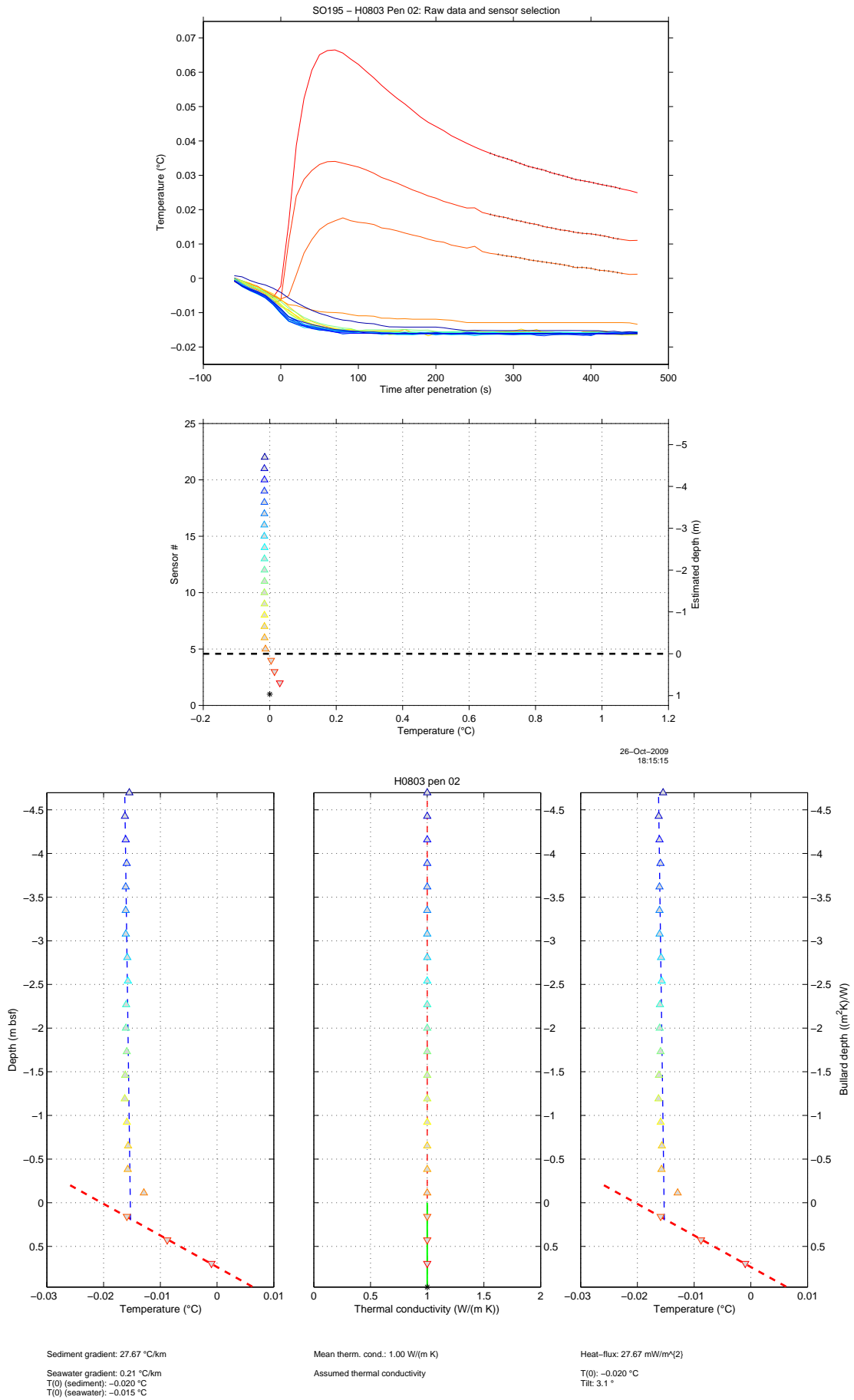


Abbildung 22: TOTAL - Station und Messpunkt: H0803p02. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

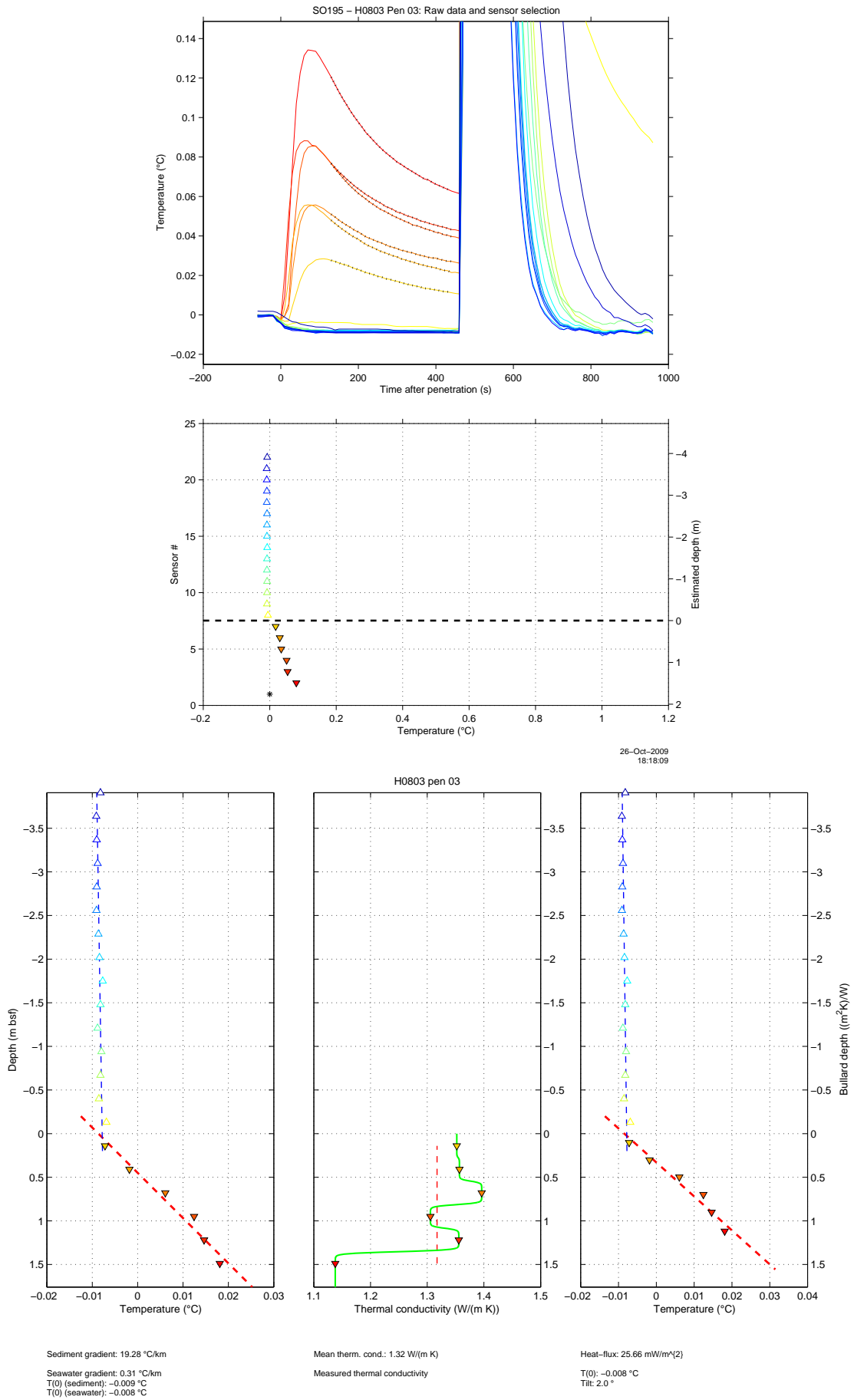


Abbildung 23: TOTAL - Station und Messpunkt: H0803p03. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

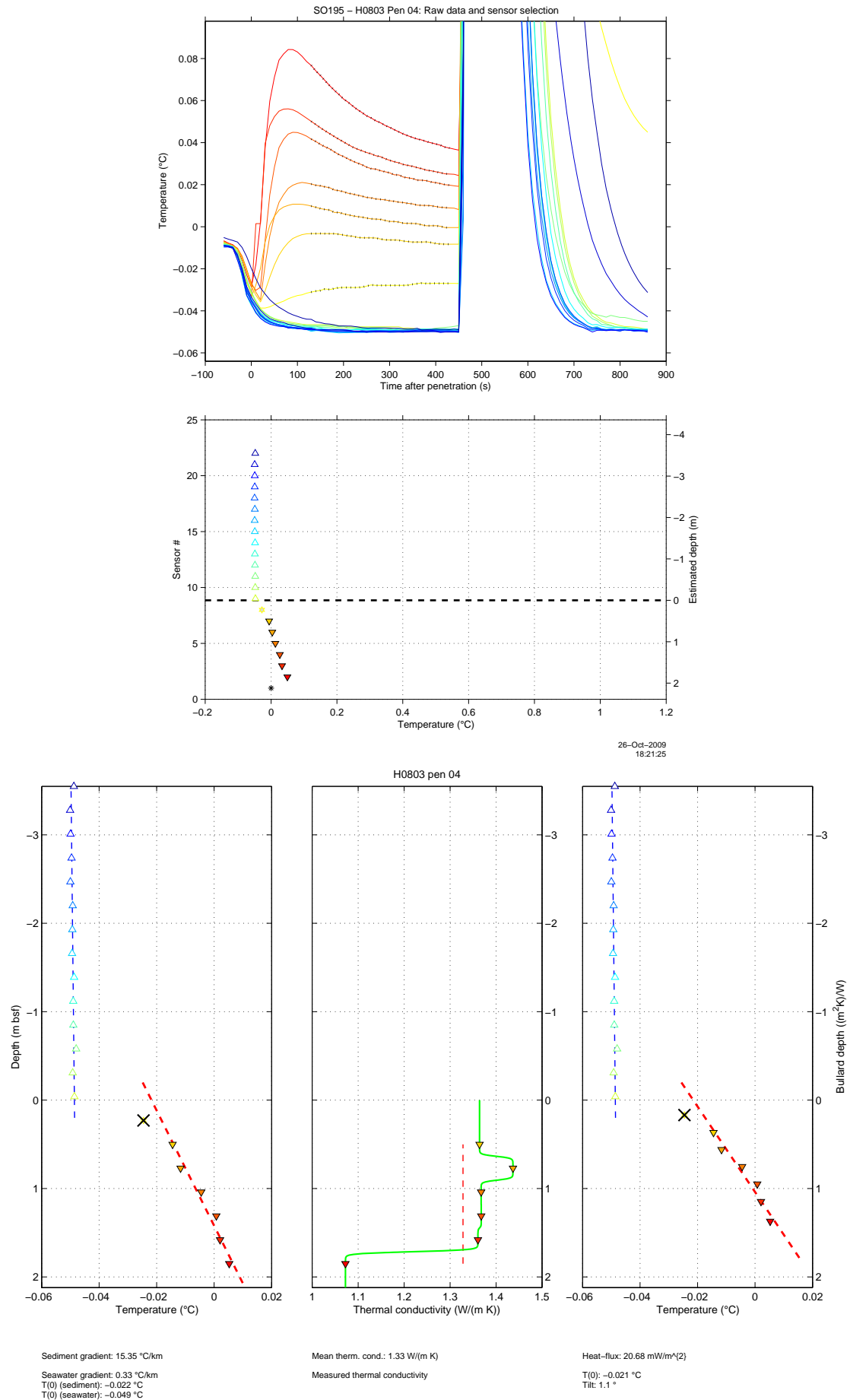


Abbildung 24: TOTAL - Station und Messpunkt: H0803p04. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

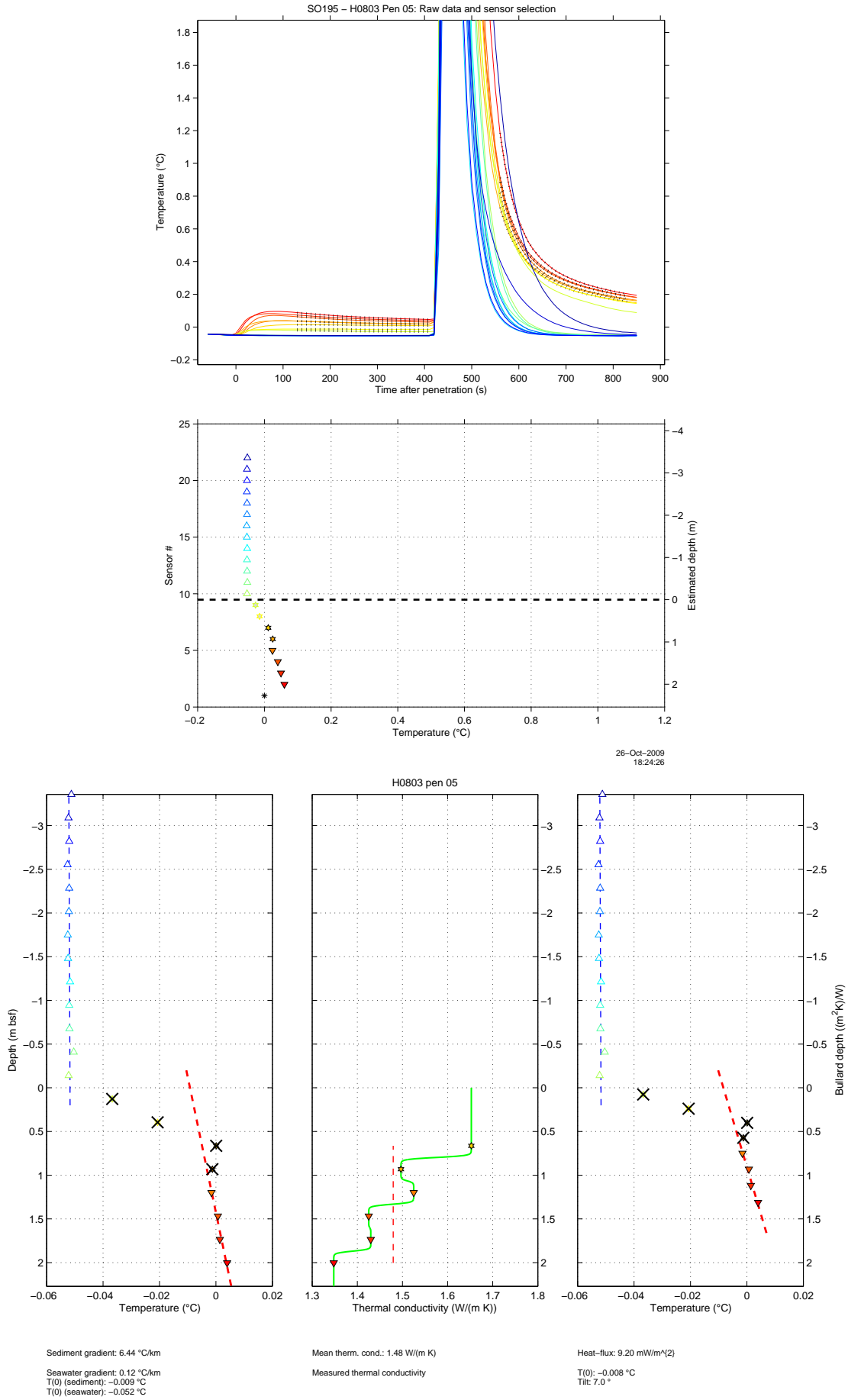


Abbildung 25: TOTAL - Station und Messpunkt: H0803p05. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

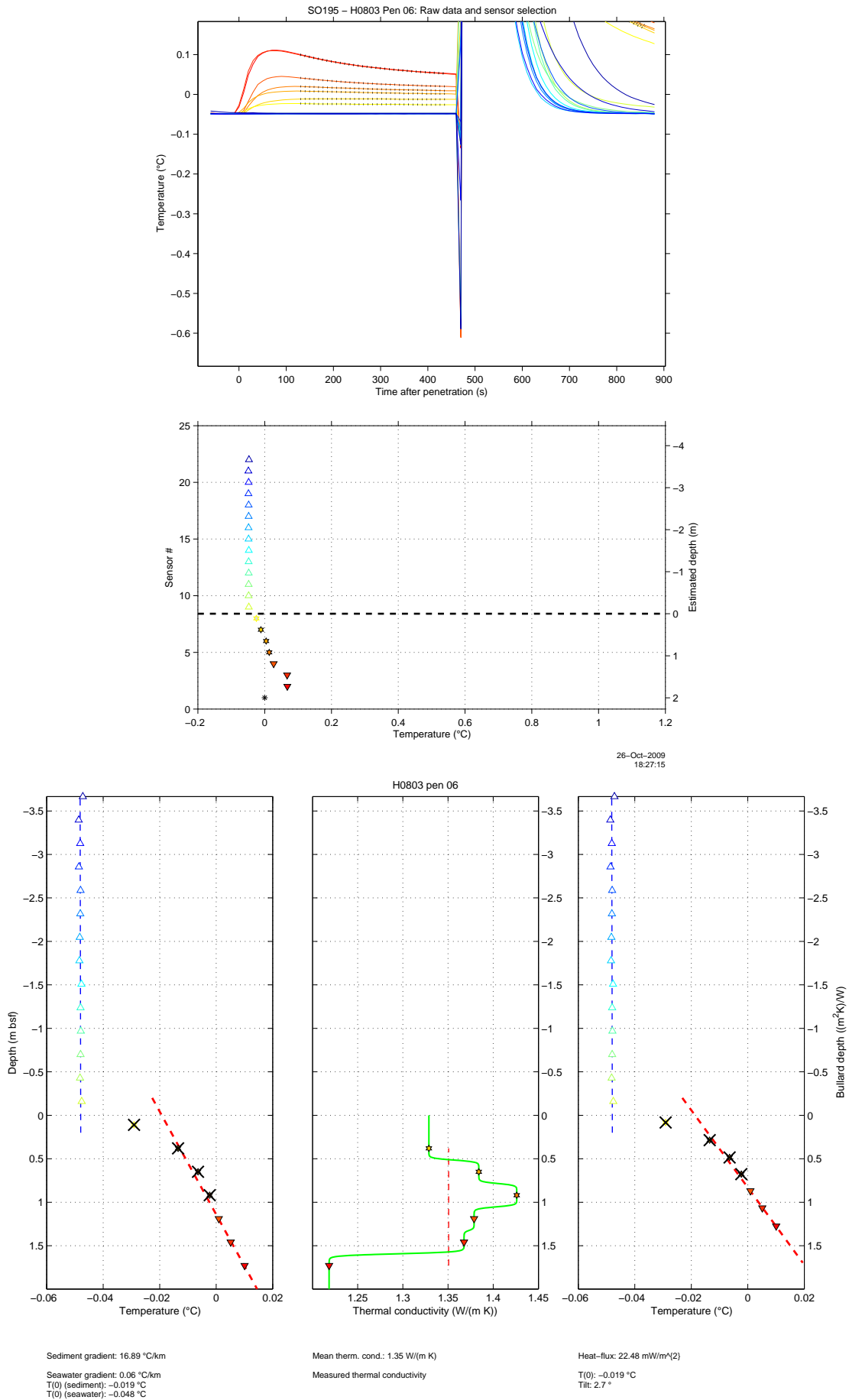


Abbildung 26: TOTAL - Station und Messpunkt: H0803p06. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

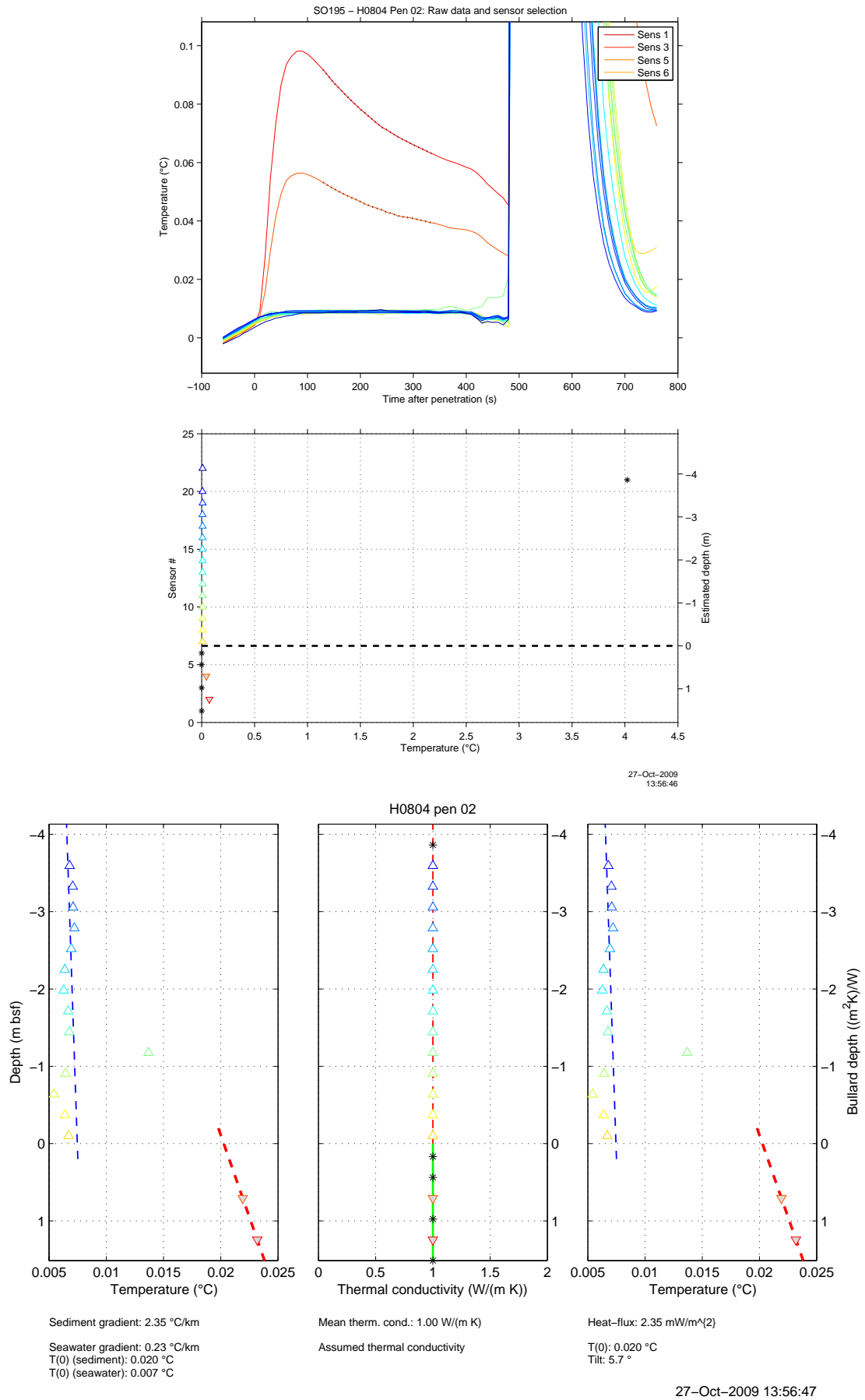


Abbildung 27: TOTAL - Station und Messpunkt: H0804p02. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

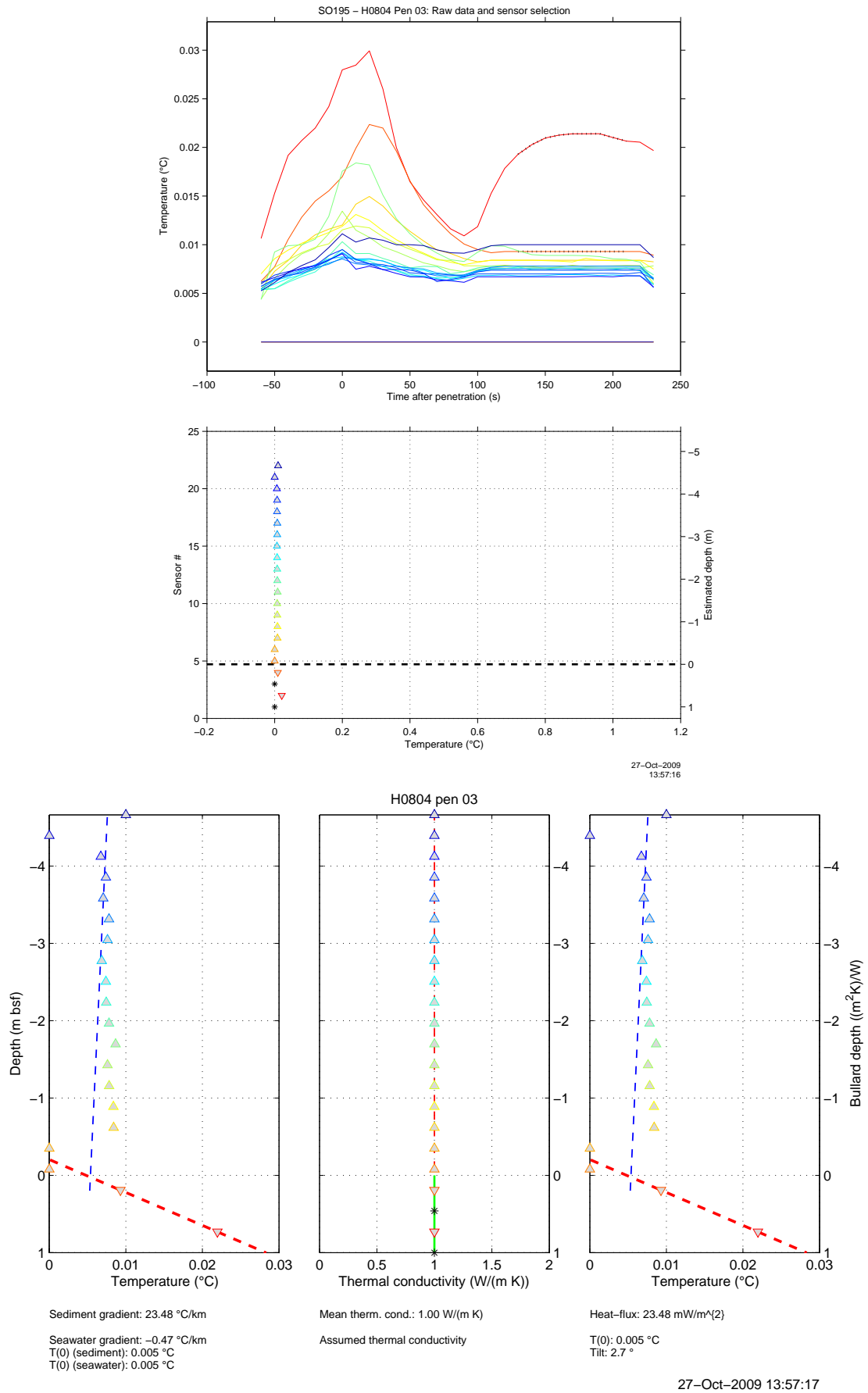


Abbildung 28: TOTAL - Station und Messpunkt: H0804p03. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

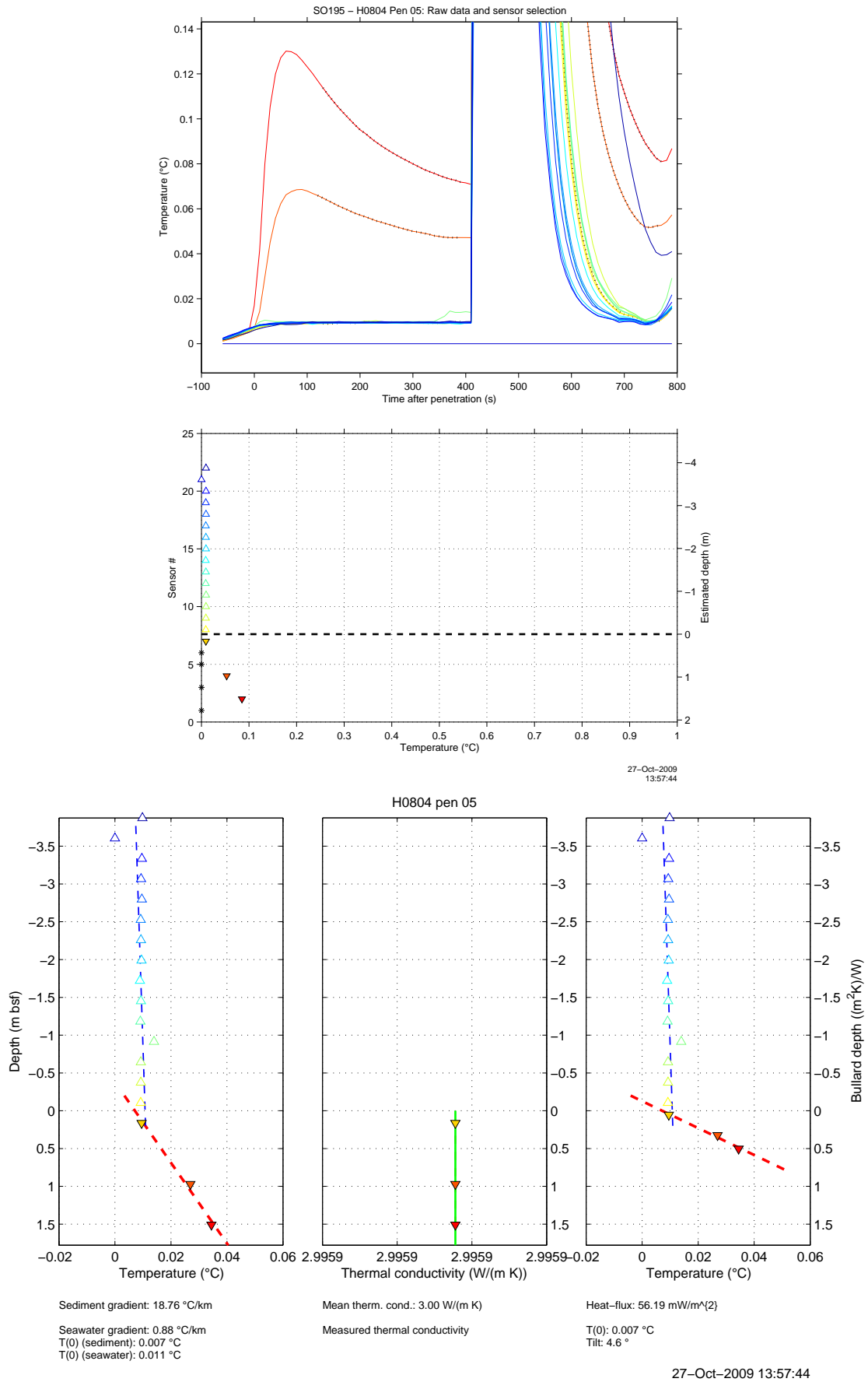


Abbildung 29: TOTAL - Station und Messpunkt: H0804p05. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

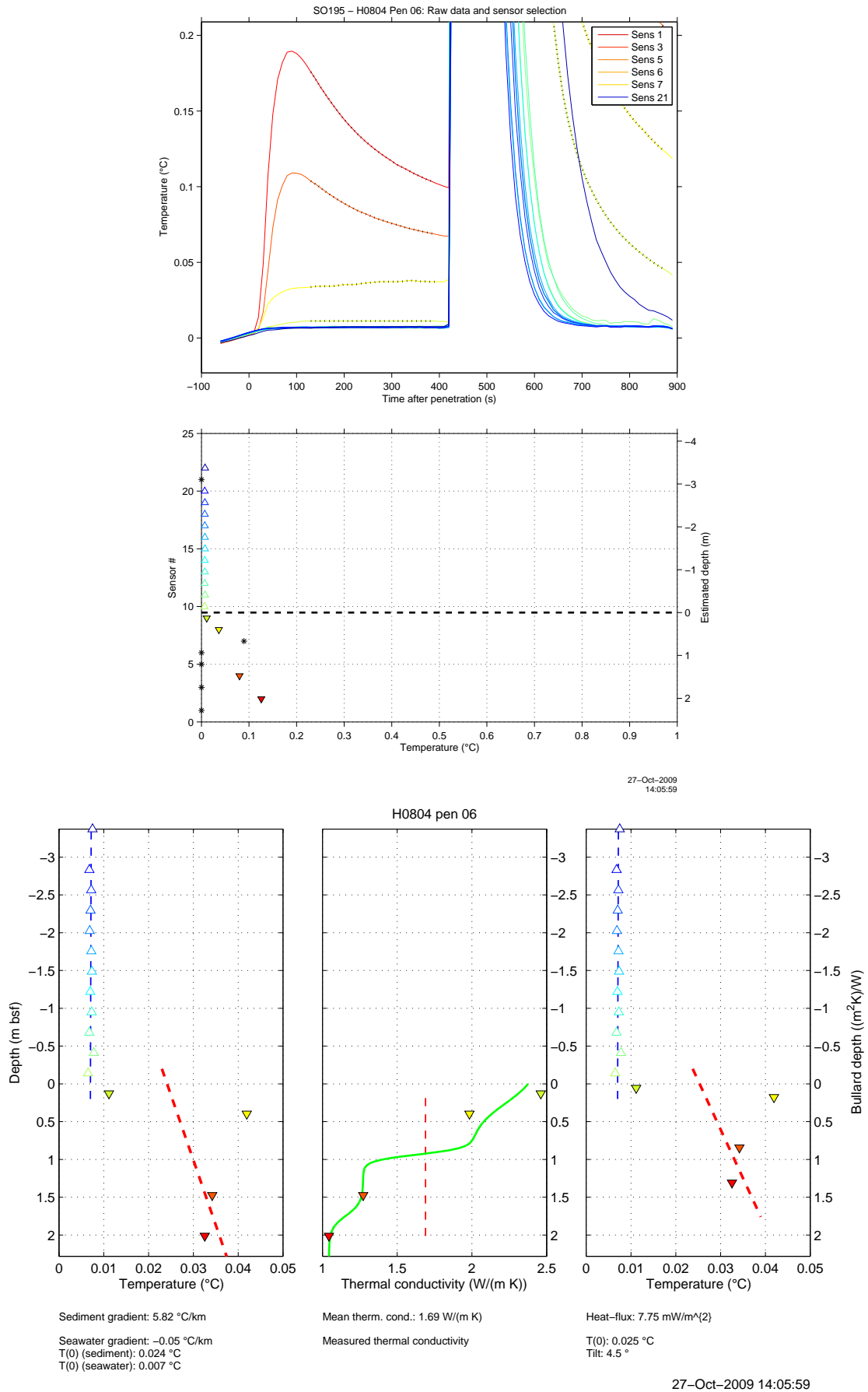


Abbildung 30: TOTAL - Station und Messpunkt: H0804p06. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

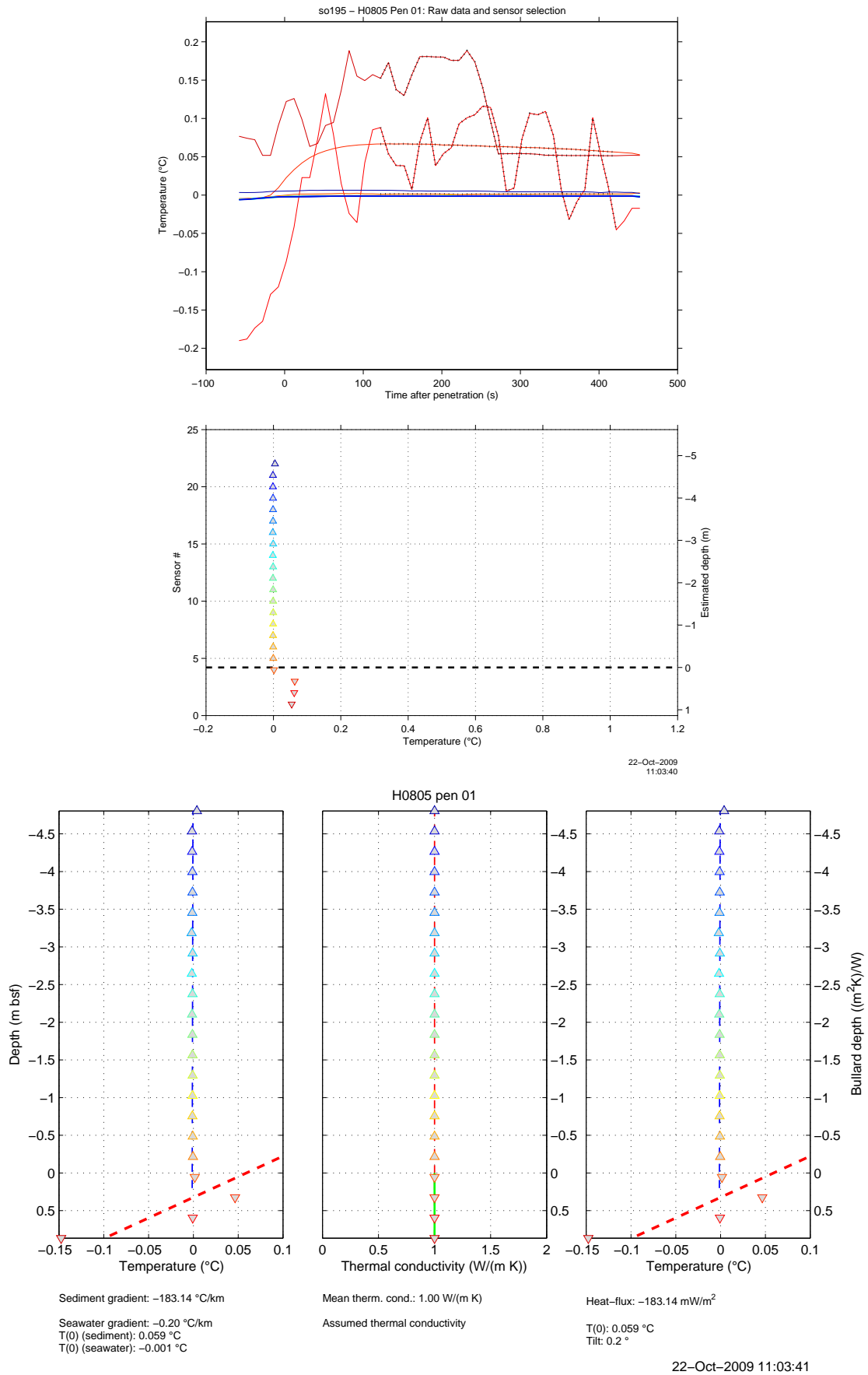


Abbildung 31: TOTAL - Station und Messpunkt: H0805p01. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

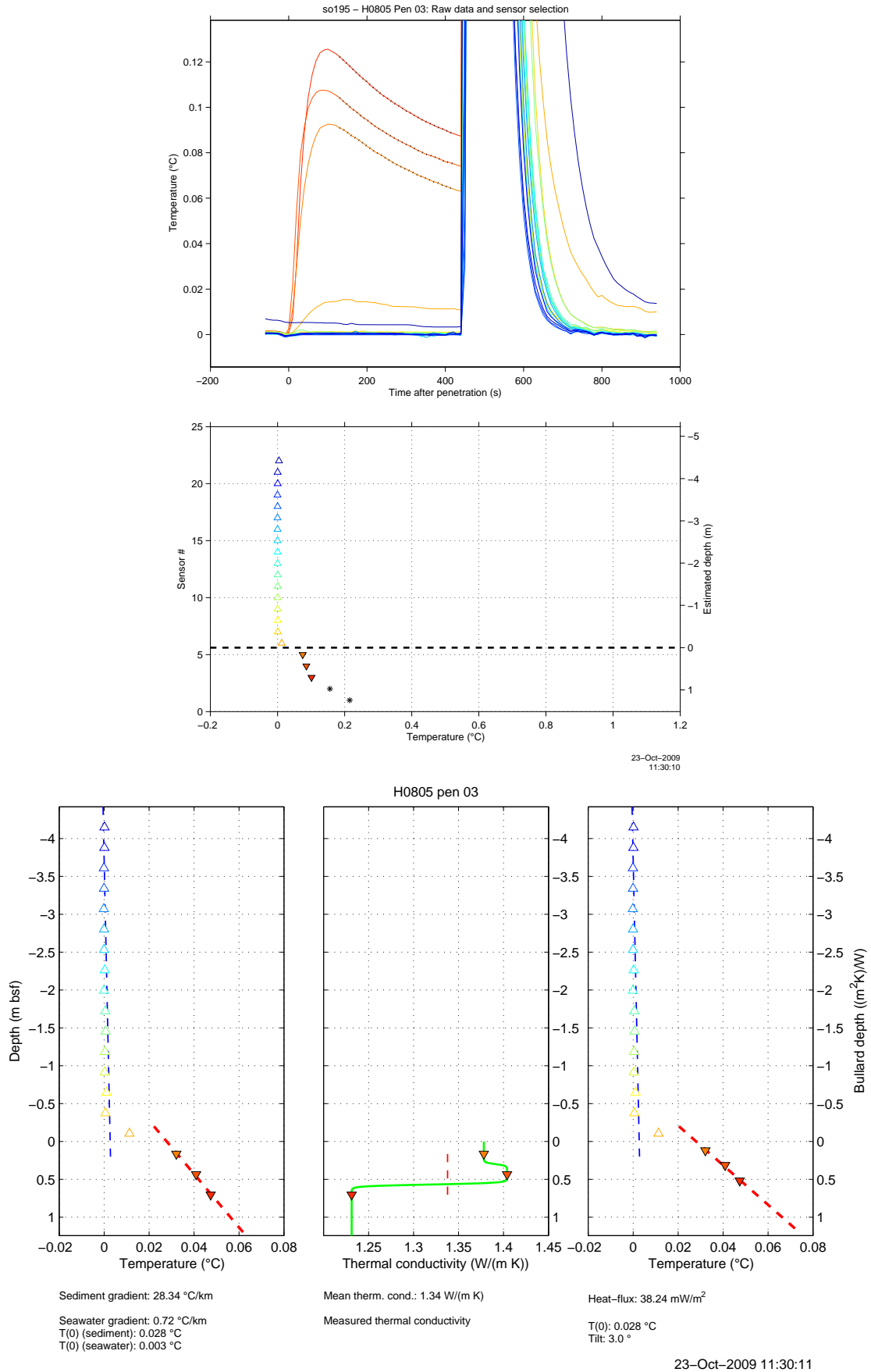


Abbildung 32: TOTAL - Station und Messpunkt: H0805p03. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

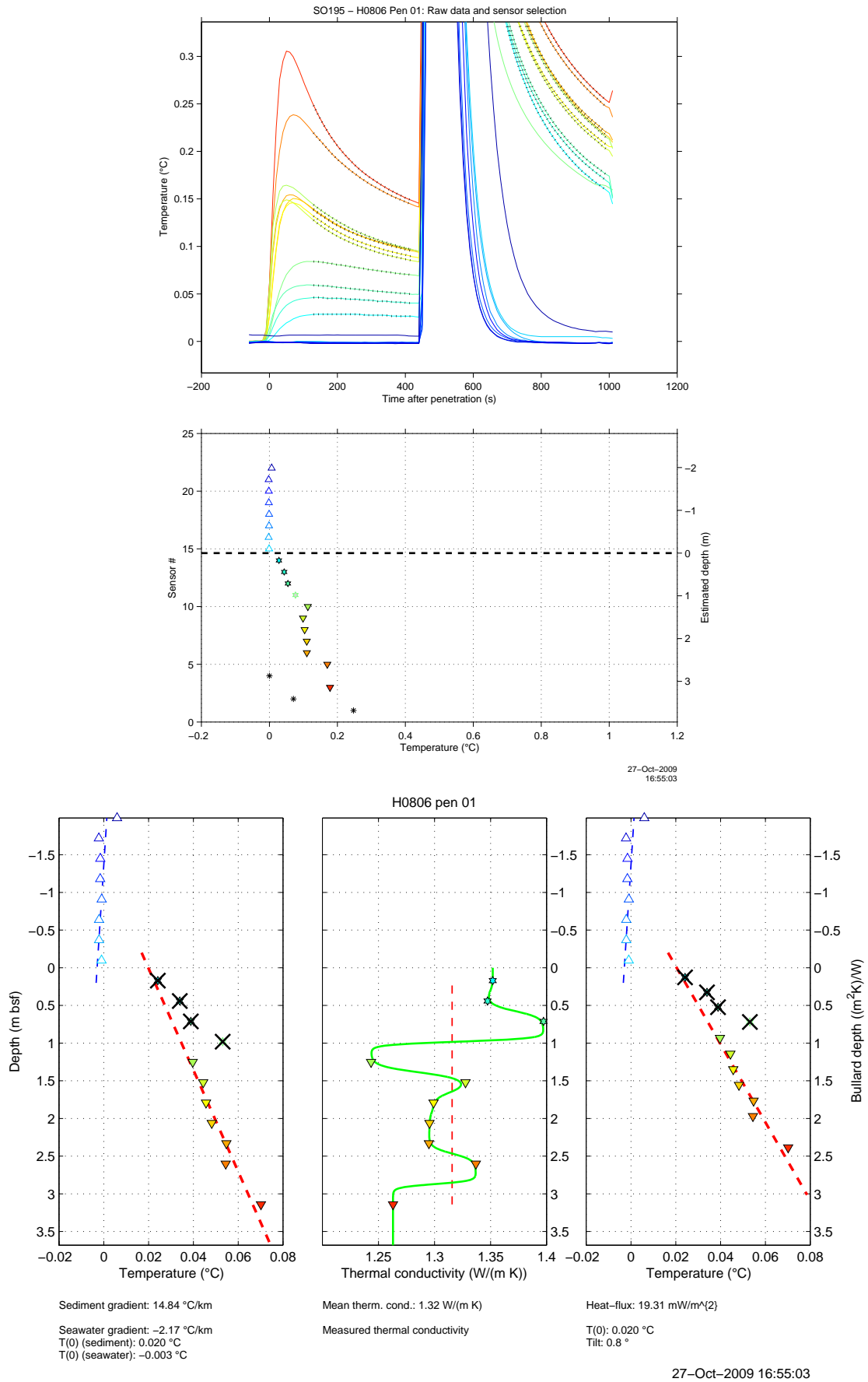


Abbildung 33: TOTAL - Station und Messpunkt: H0806p01. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

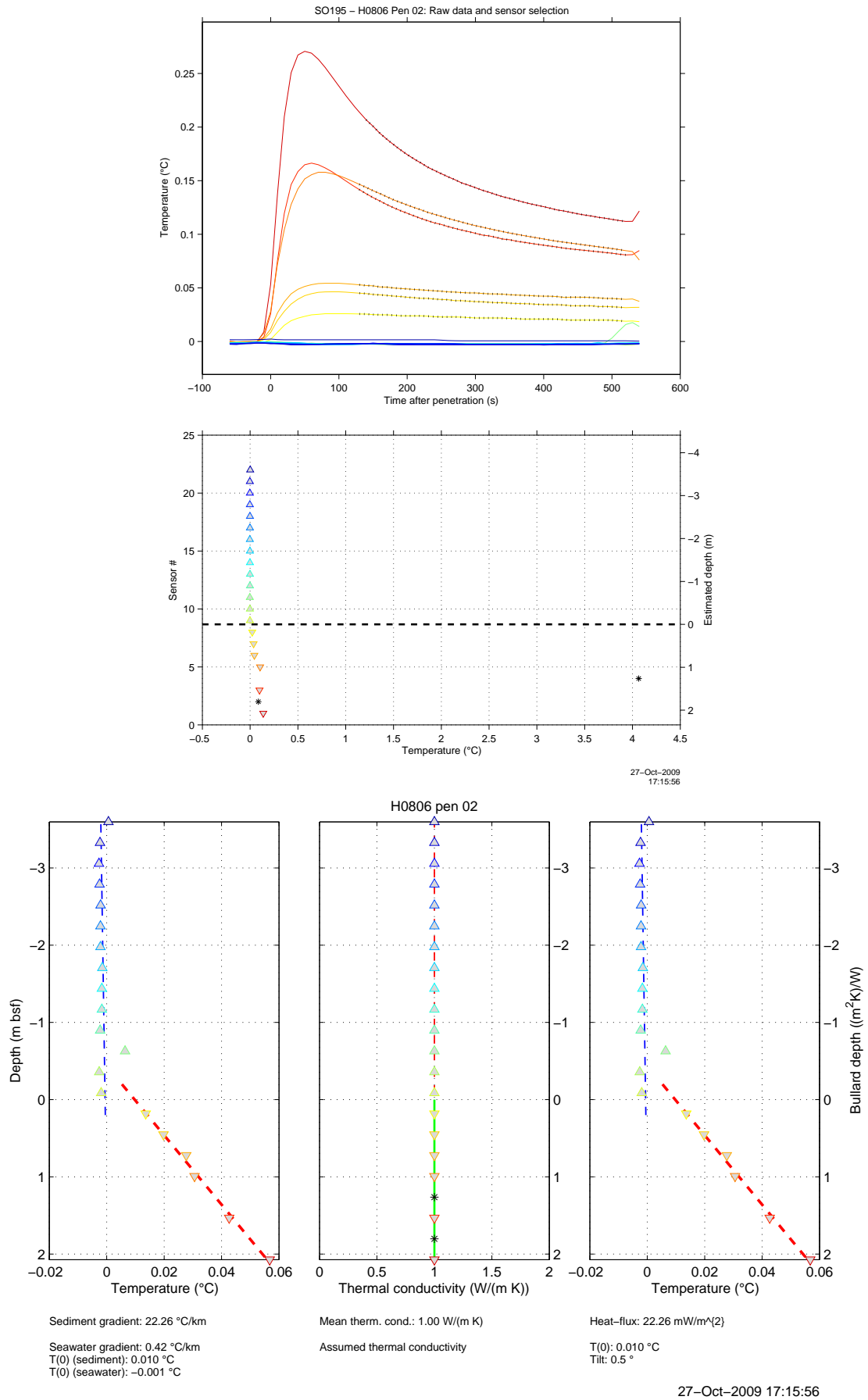


Abbildung 34: TOTAL - Station und Messpunkt: H0806p02. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

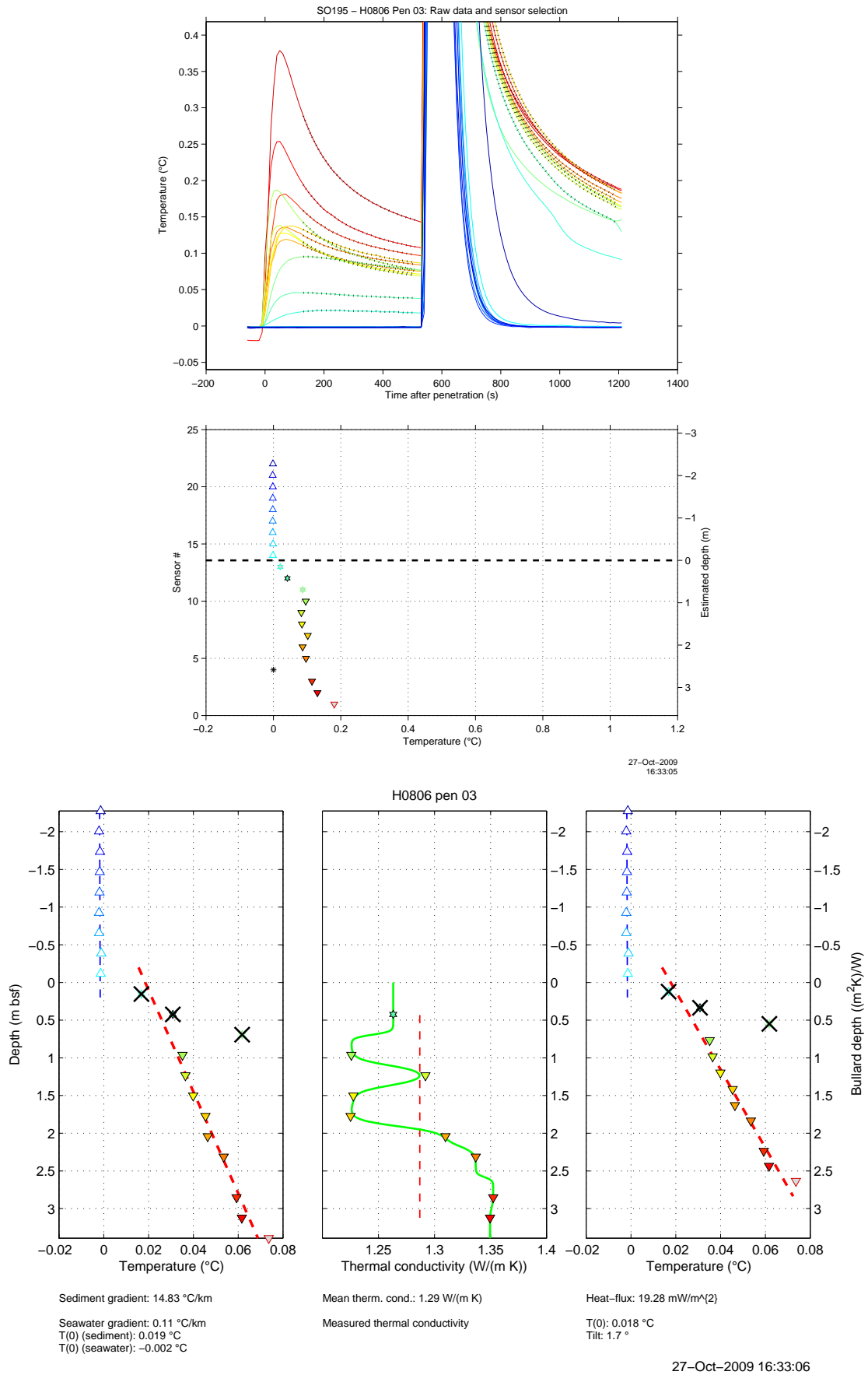


Abbildung 35: TOTAL - Station und Messpunkt: H0806p03. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

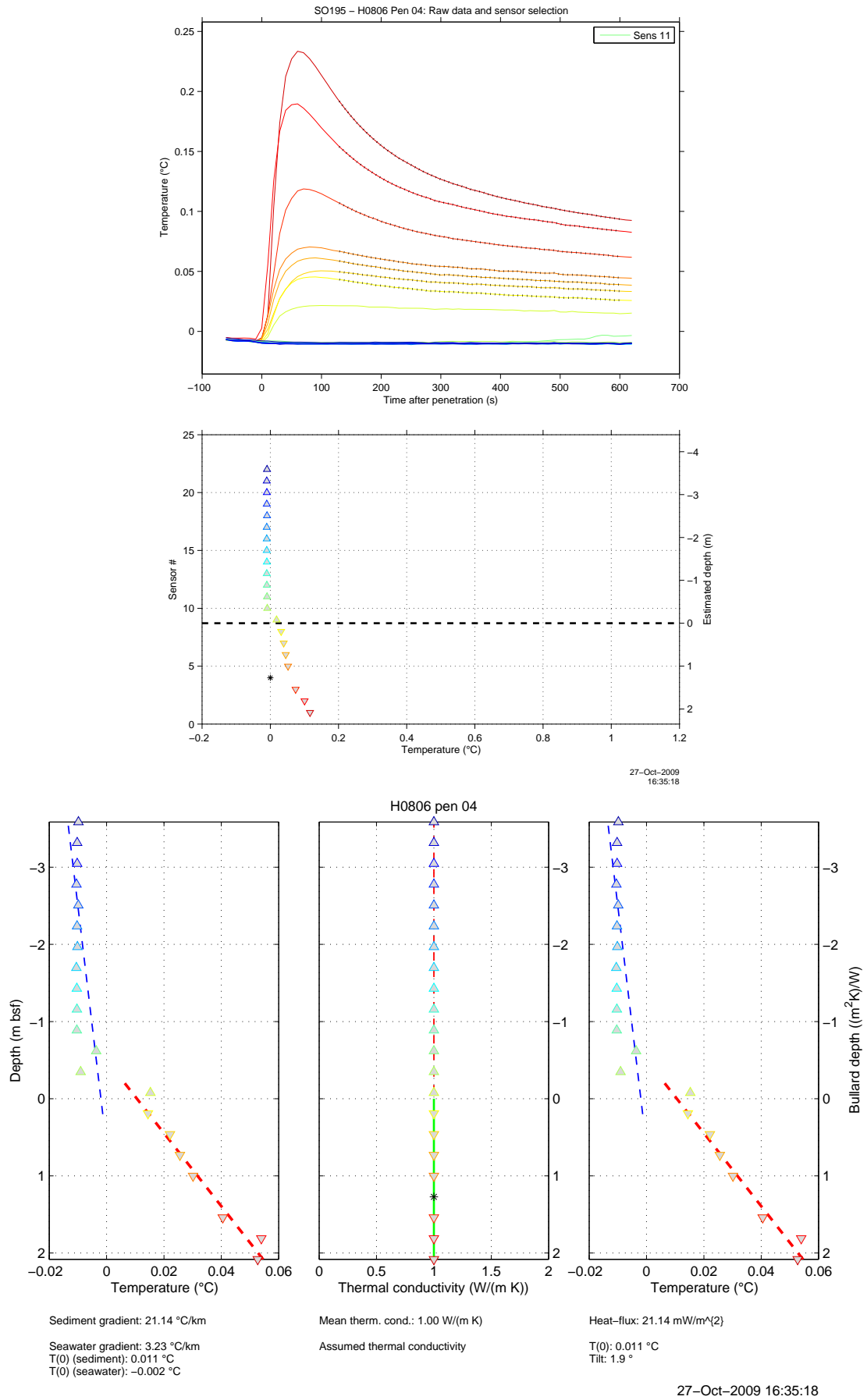


Abbildung 36: TOTAL - Station und Messpunkt: H0806p04. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

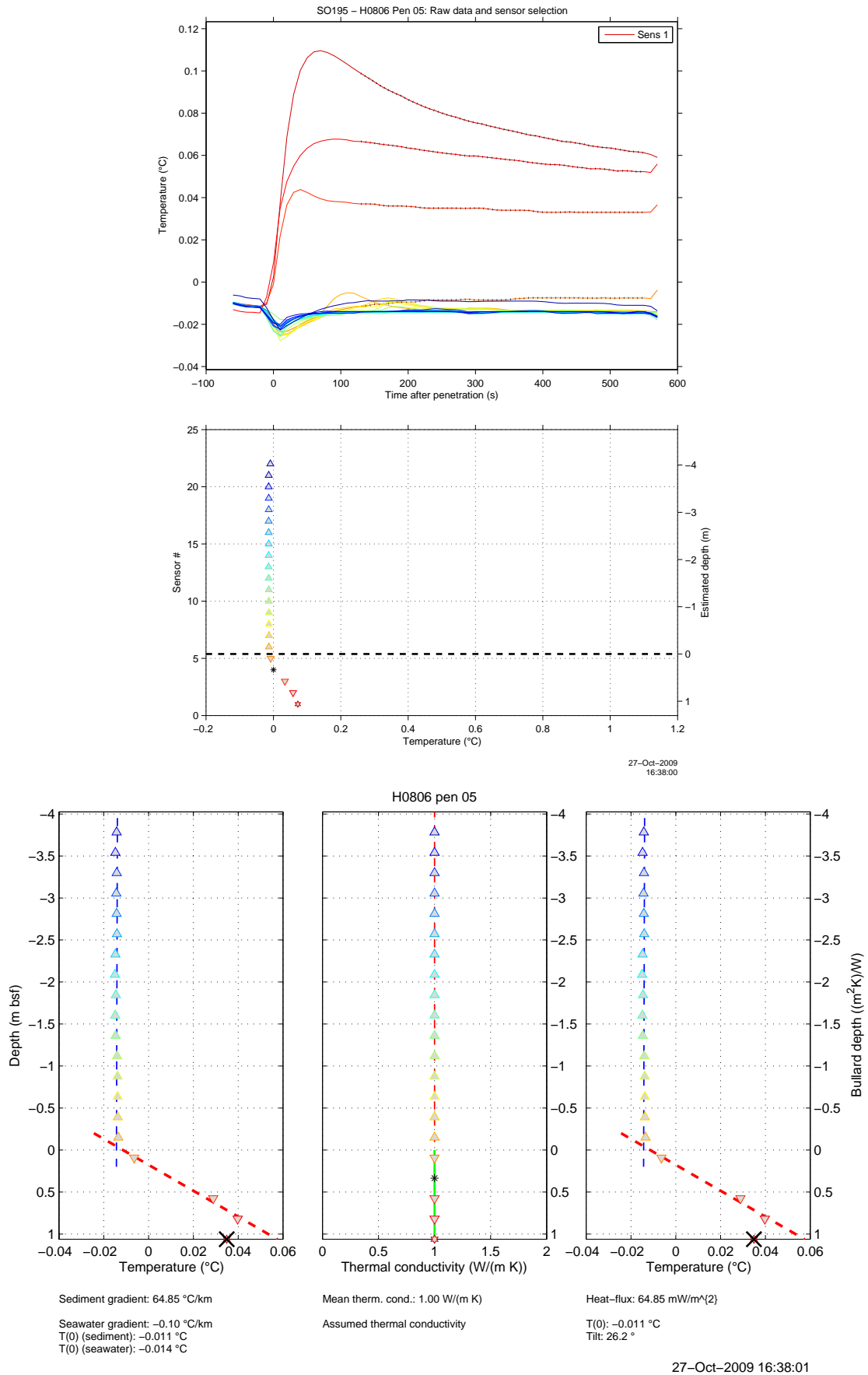


Abbildung 37: TOTAL - Station und Messpunkt: H0806p05. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

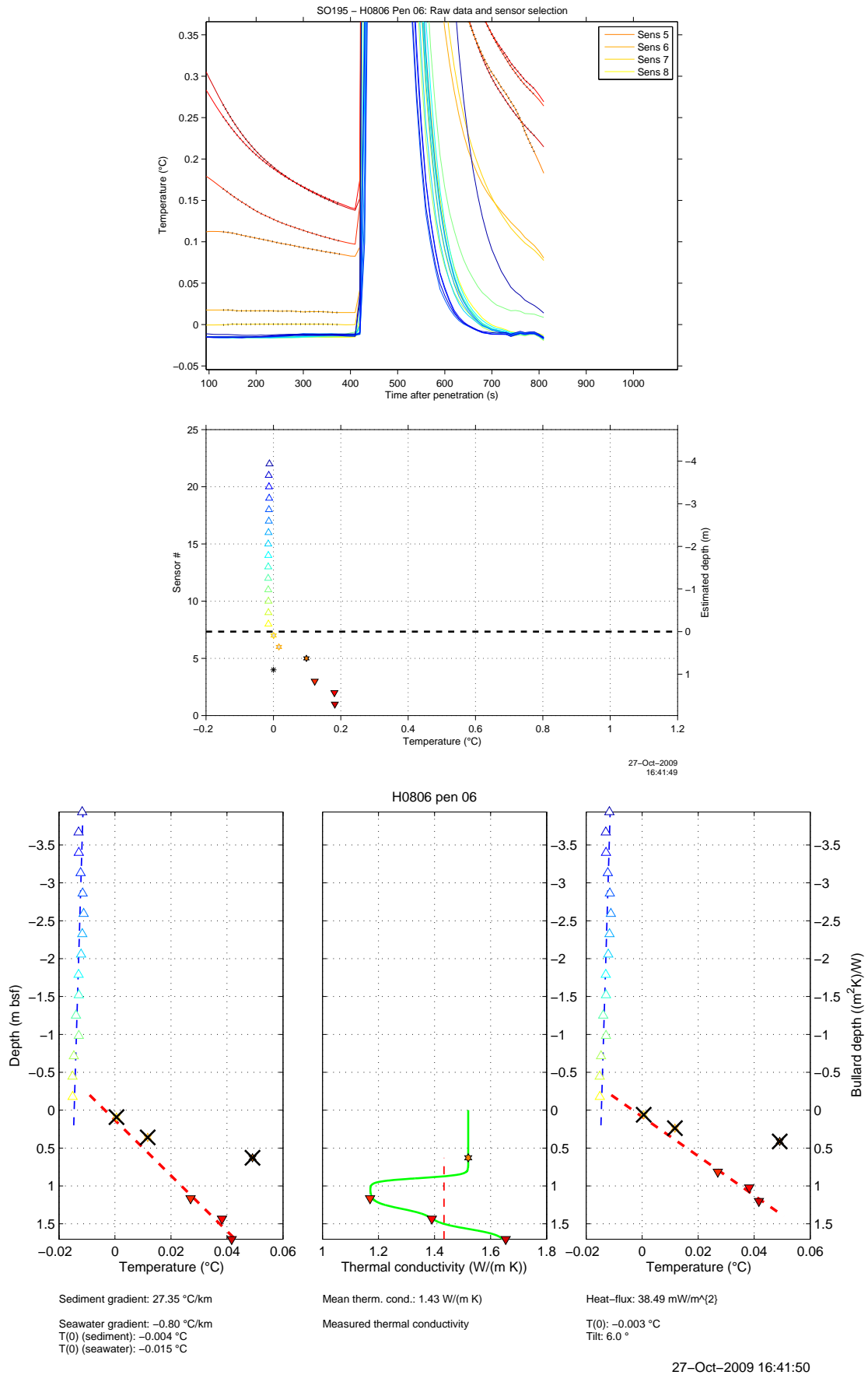


Abbildung 38: TOTAL - Station und Messpunkt: H0806p06. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

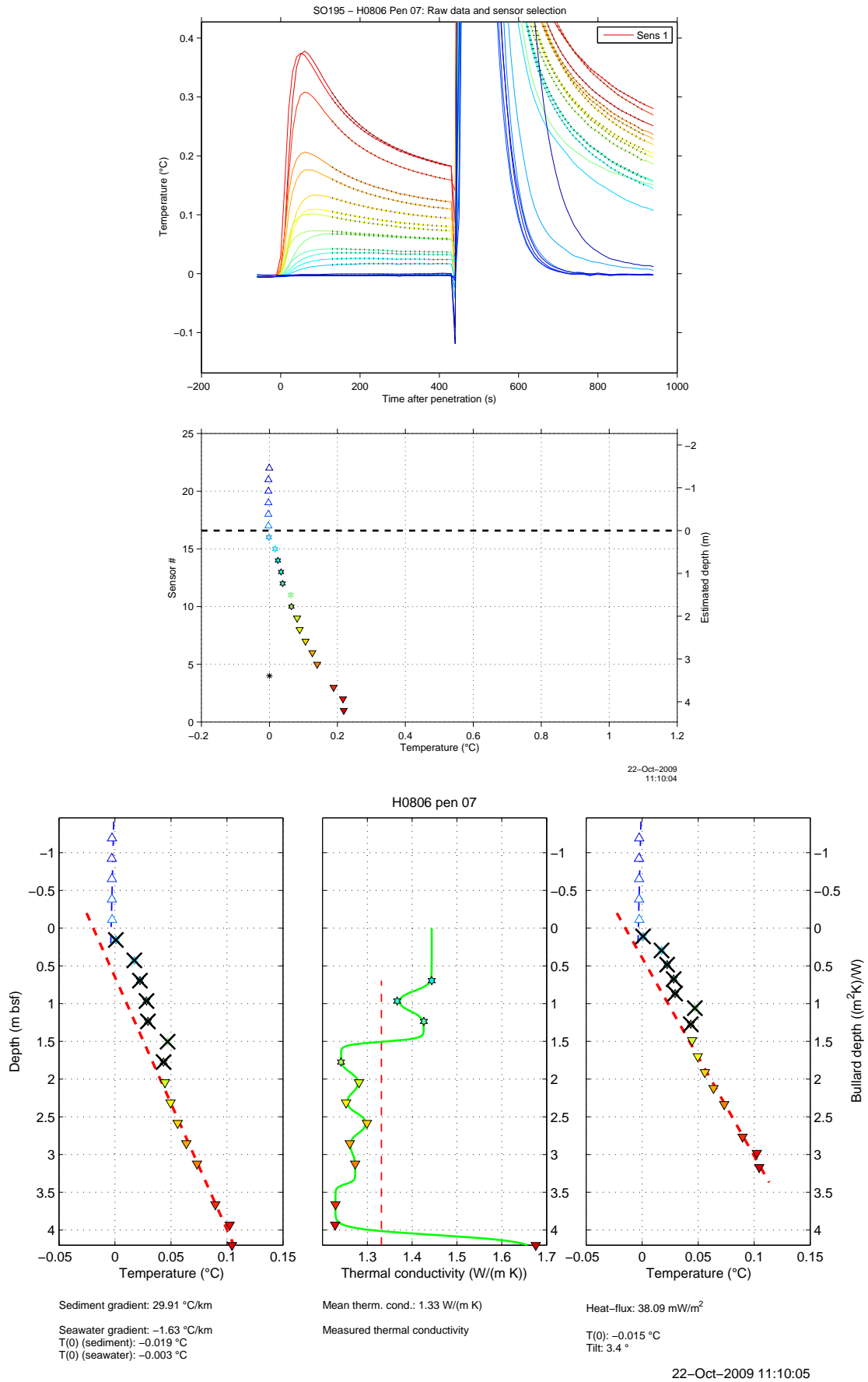


Abbildung 39: TOTAL - Station und Messpunkt: H0806p07. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

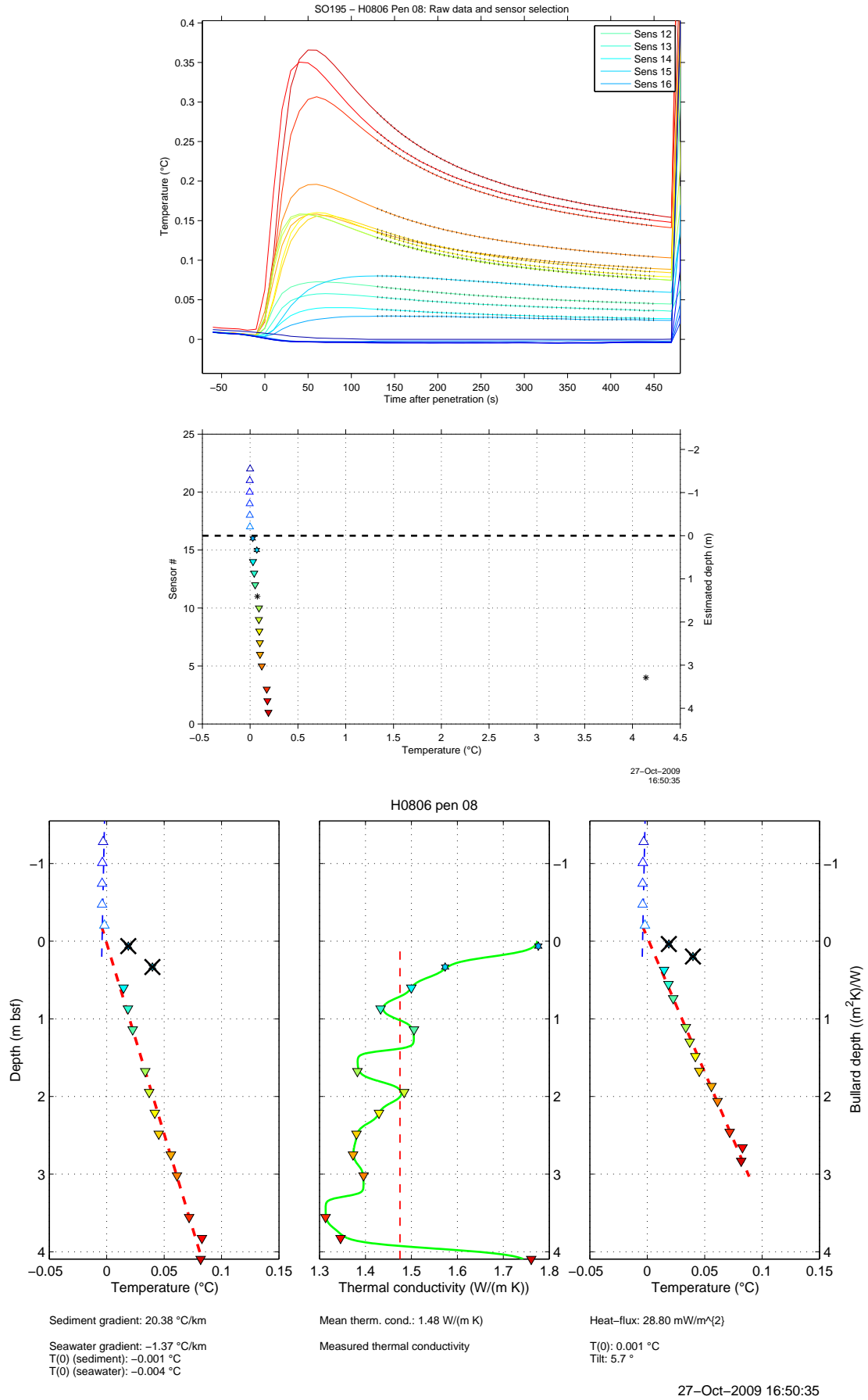


Abbildung 40: TOTAL - Station und Messpunkt: H0806p08. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

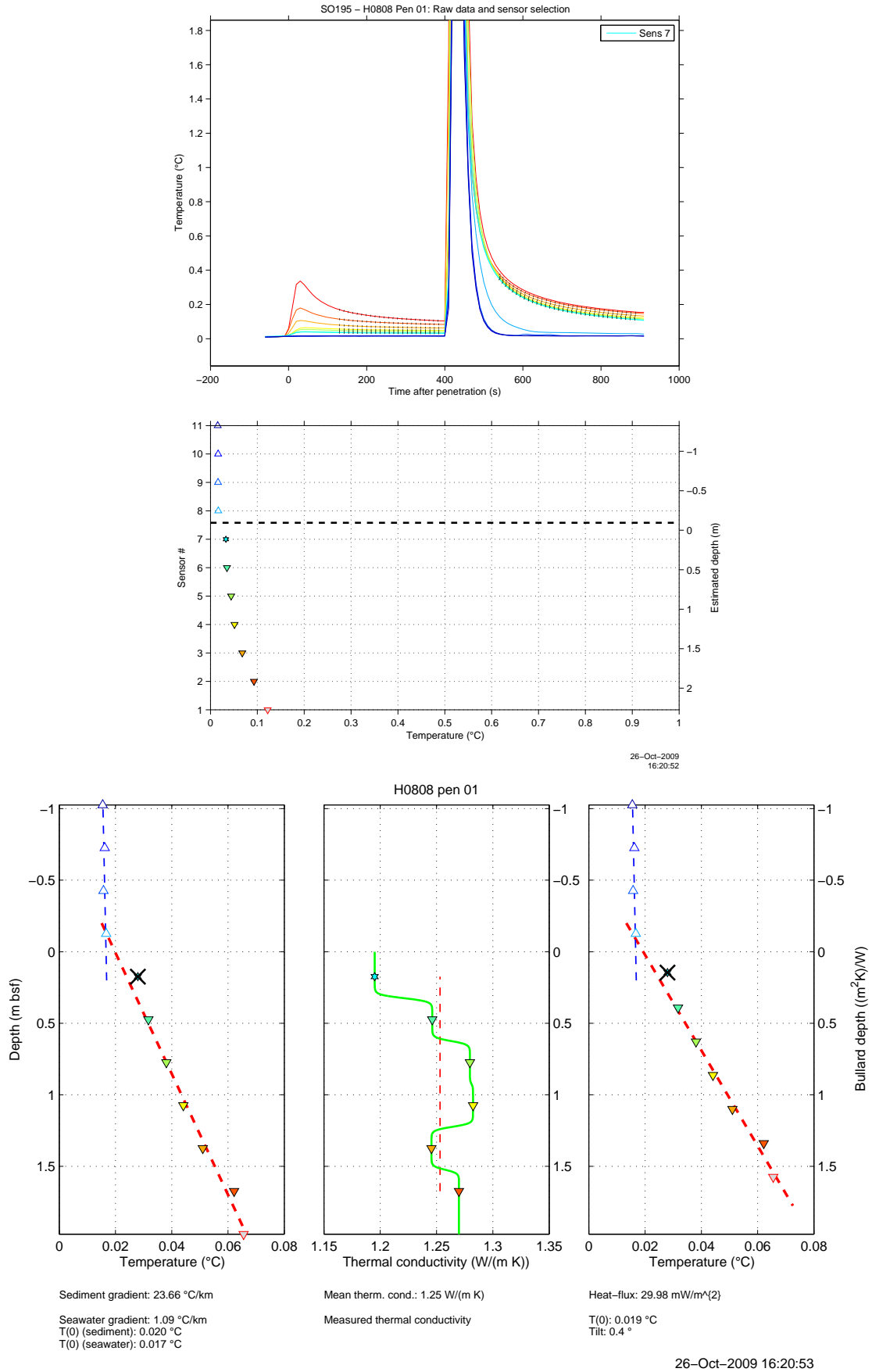


Abbildung 41: TOTAL - Station und Messpunkt: H0808p01. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

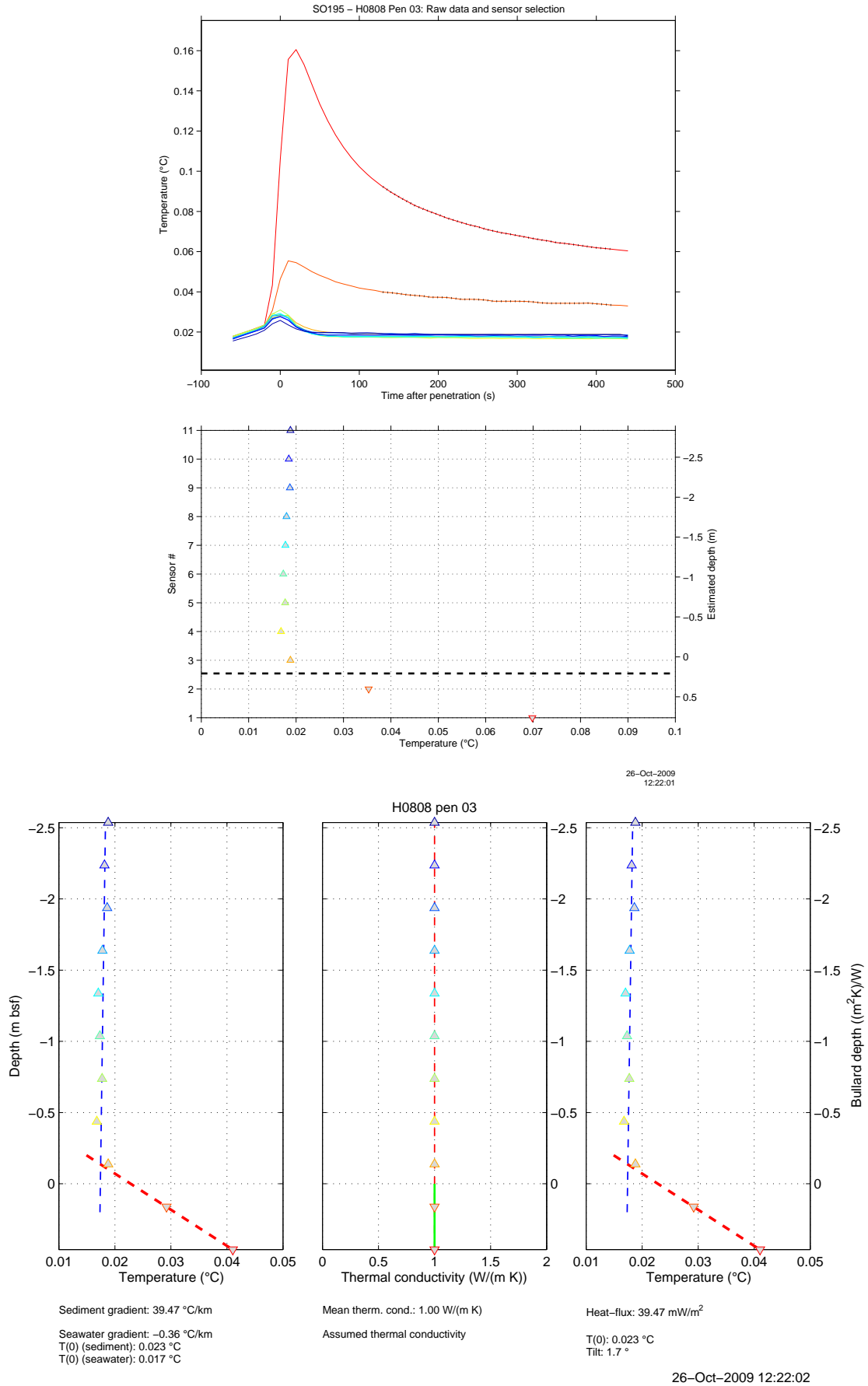


Abbildung 42: TOTAL - Station und Messpunkt: H0808p03. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

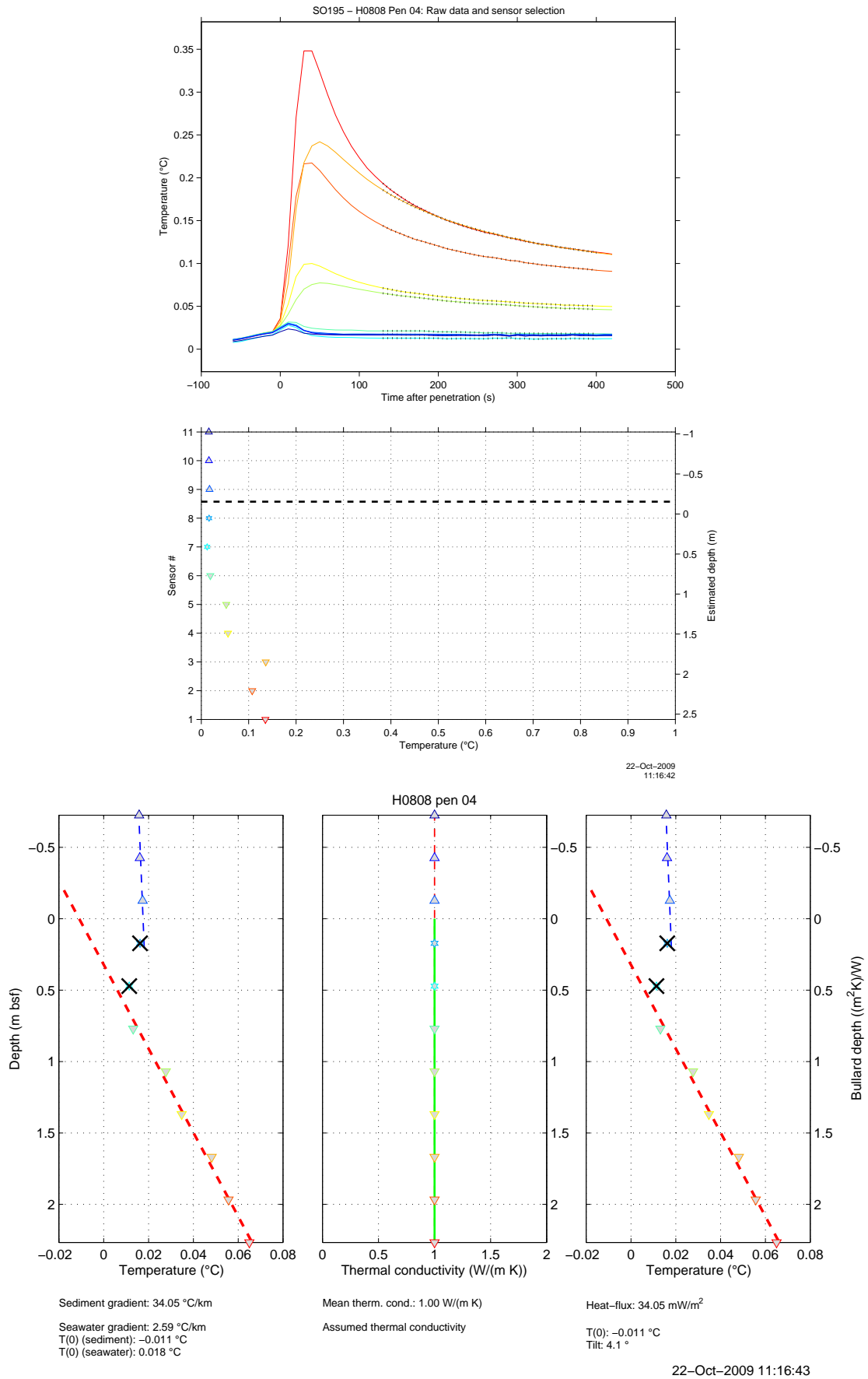


Abbildung 43: TOTAL - Station und Messpunkt: H0808p04. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

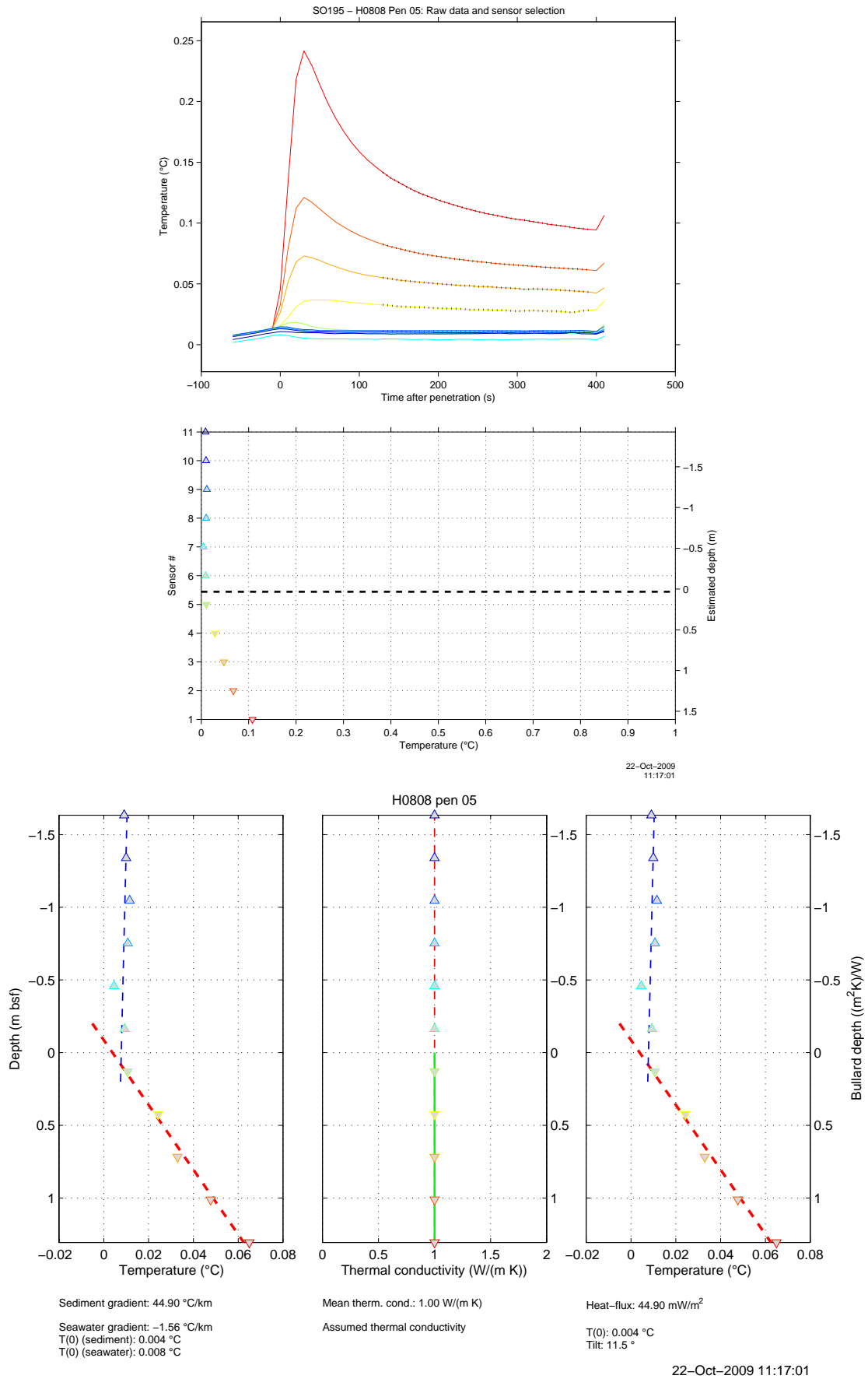


Abbildung 44: TOTAL - Station und Messpunkt: H0808p05. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

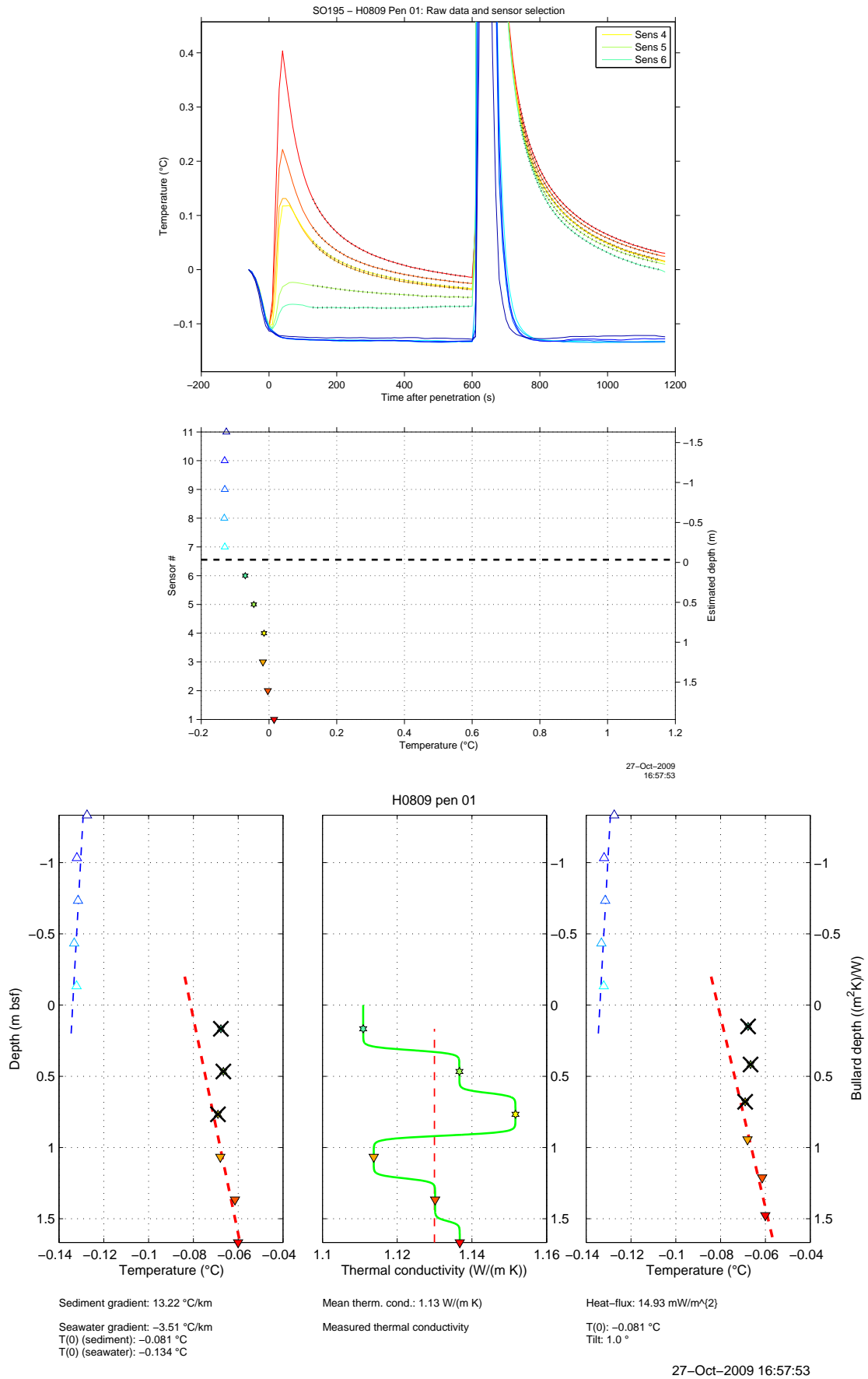


Abbildung 45: TOTAL - Station und Messpunkt: H0809p01. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.

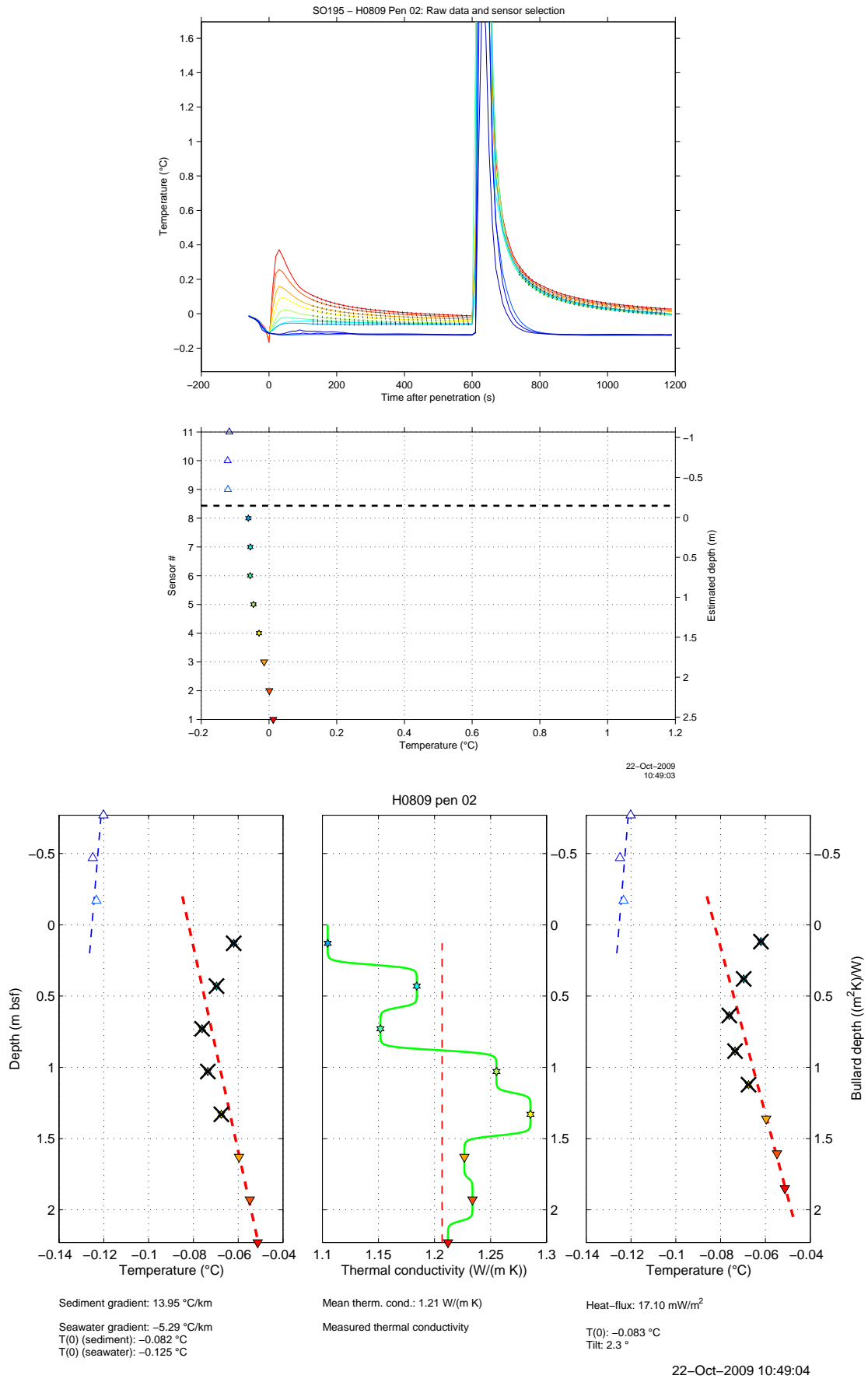


Abbildung 46: TOTAL - Station und Messpunkt: H0809p02. Erläuterungen der Abbildungen siehe Bericht.