

Thermische Energienutzung von Oberflächengewässern

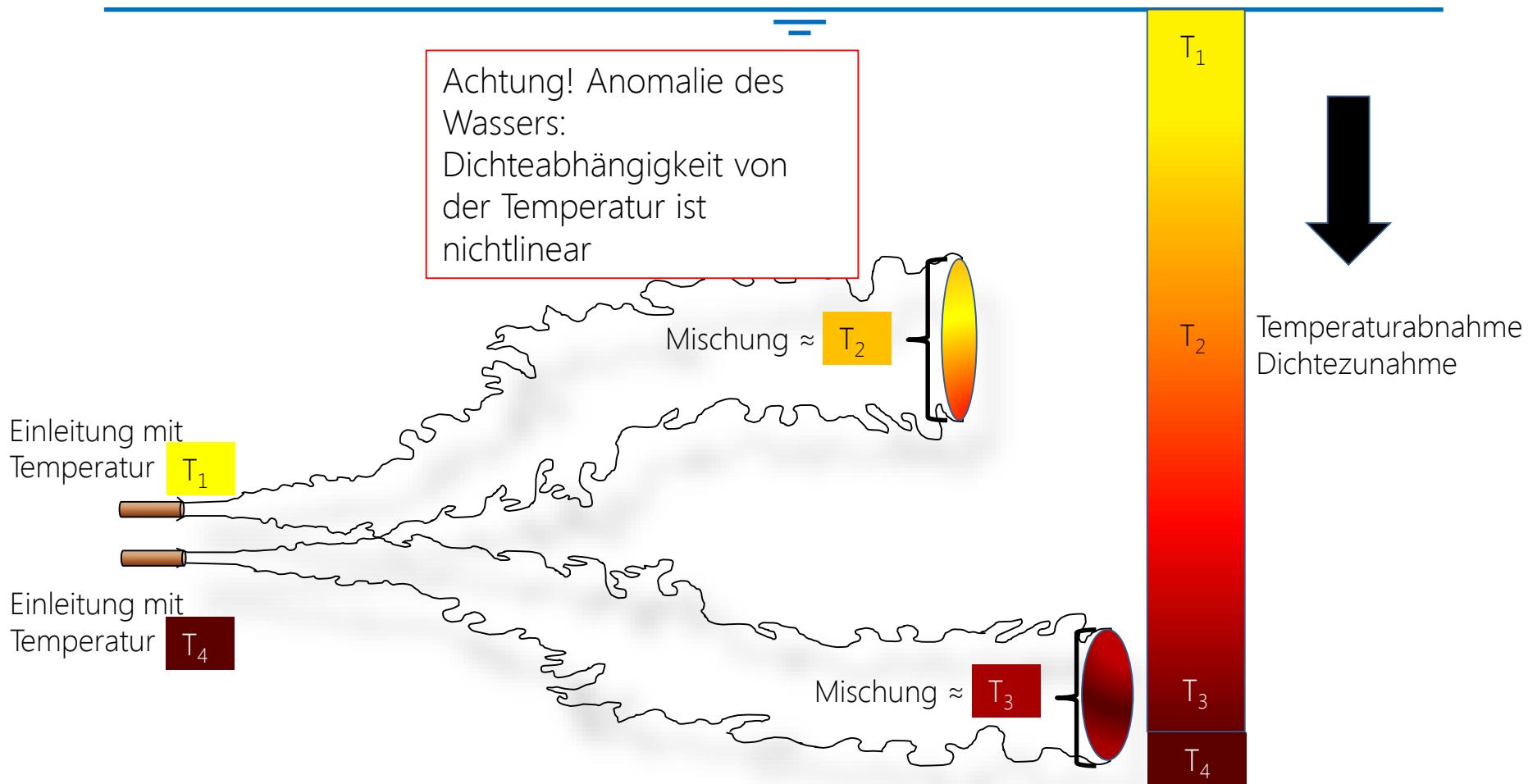
Hydrodynamische Modellierung der Fassung und Rückgabe von Nutzwasser

Nachweis zur Einhaltung der
ökologischen Randbedingungen

24. Oktober 2018 / Albrecht von Boetticher

Rückgabe von Nutzwasser und temperaturabhängige Einschichtung

- Zufuhr von warmem Wasser in kälteren Seeschichten
→ bei $T > 4^{\circ}\text{C}$: aufsteigender Strahl



Temperaturdurchmischung: Warum Einschichtung?

- Warmwassereinleitung lässt nährstoffreiche phosphathaltige Wasserschichten vom Grund aufsteigen → Algenwuchs



Algenpest verursachende Einleitung
bei Fort Lauderdale, Florida, USA
(Bild: Rick Loomis, Los Angeles Times)

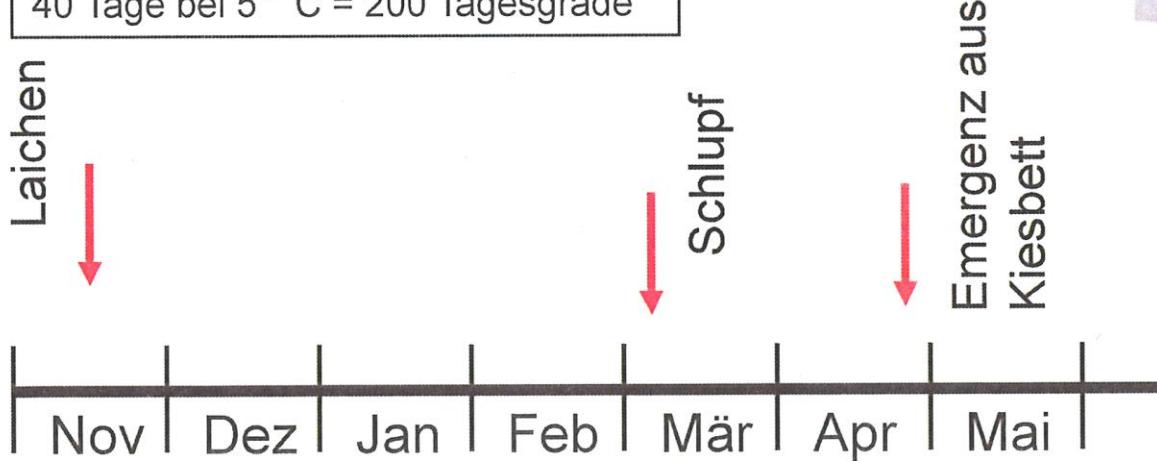
Temperaturdurchmischung: Warum Einschichtung?

- Die Einleitung verursacht kalte Wasserlinsen am Grund
→ verspätetes Ausschlüpfen von Laich

Bsp. Eientwicklung Forelle

$$\begin{aligned}80 \text{ Tage bei } 3^\circ \text{ C} &= 240 \text{ Tagesgrade} \\40 \text{ Tage bei } 5^\circ \text{ C} &= 200 \text{ Tagesgrade}\end{aligned}$$

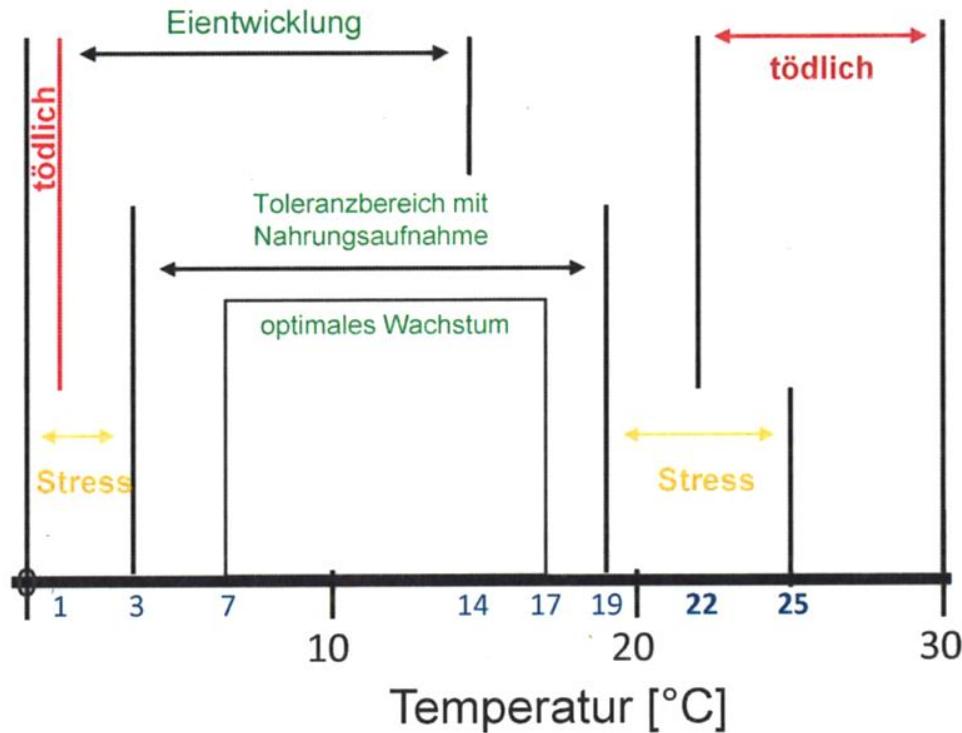
$$\begin{aligned}50 \text{ Tage bei } 8^\circ \text{ C} &= 400 \text{ Tagesgrade}\end{aligned}$$



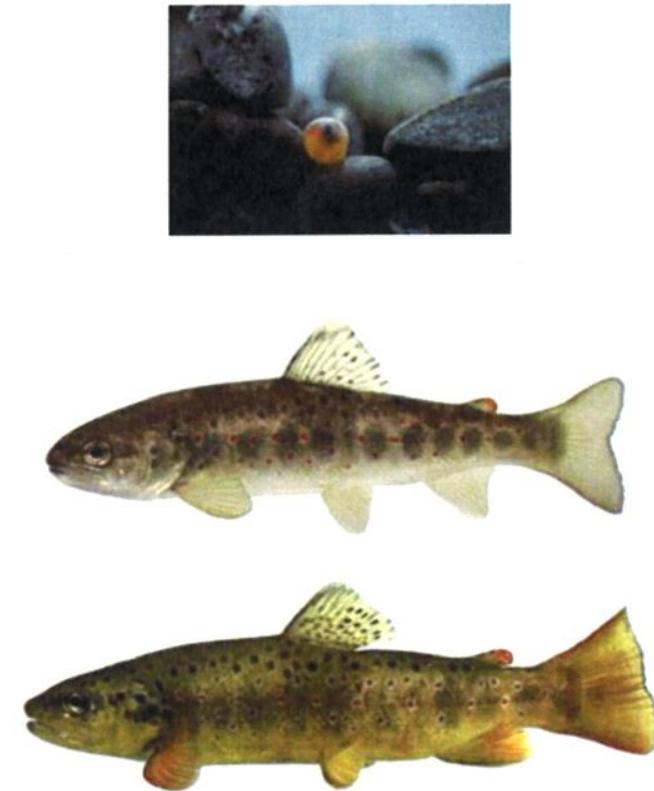
Aus: Gewässerschutzgesetzgebung & Thermische Nutzung, Relevanz und Rahmenbedingungen
B. Lundsgaard-Hansen & R. Muralt

Temperaturdurchmischung: Warum Einschichtung?

- Die Einleitung verursacht Temperaturgradienten
→ Schäden an Fischbeständen durch Temperaturschocks



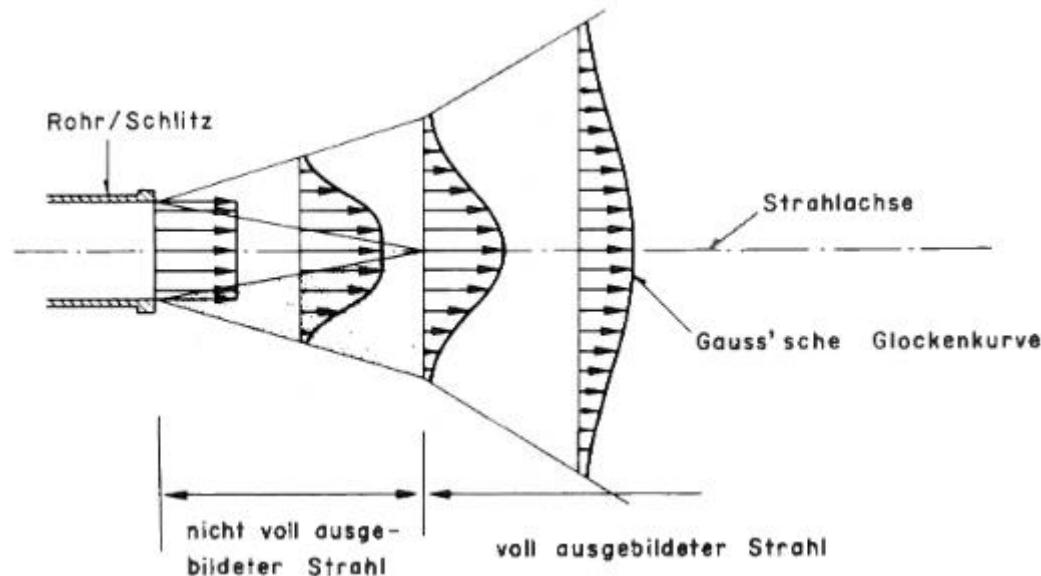
verändert nach Elliott, 1994, Fotos M. Roggo



Aus: Gewässerschutzgesetzgebung & Thermische Nutzung, Relevanz und Rahmenbedingungen
B. Lundsgaard-Hansen & R. Muralt

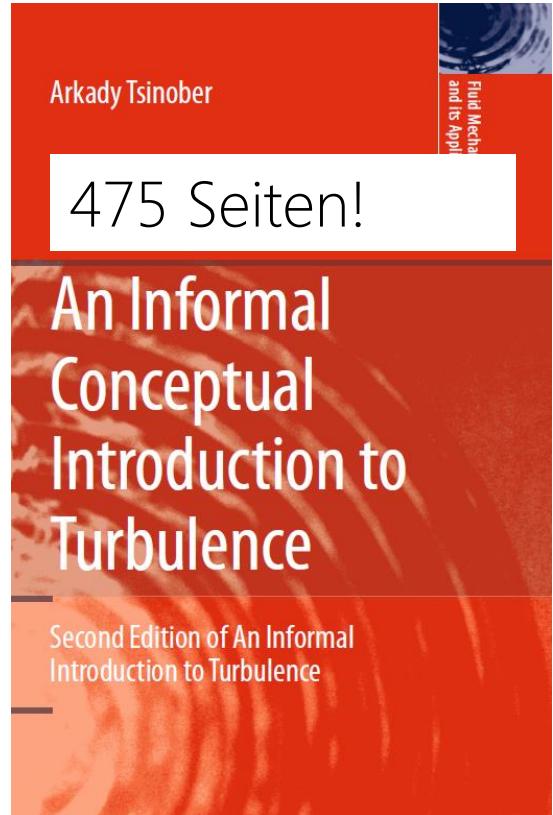
Praxisansätze

- 1976: *Die Einleitung von Abwasser in Seen*, D. Vischer, VAW, Sonderdruck in Gas, Wasser Abwasser Nr. 7
- => runde horizontale Einleitung ohne Seegrundeinfluss oder Seeströmung mit konstantem Dichtegradienten:
 - 1) Dichteausgleich durch turbulente Durchmischung bestimmt die Einschichthöhe
 - 2) Ansatz: Alle Größen sind über die Strahlbreite normalverteilt => Gauss'sche Glockenkurve mit angenommener turbulenter Wirbeldiffusivität
- Die Einschichtungslage wird basierend auf Rohrdurchmesser, Austrittsgeschwindigkeit, Seewasserdichte, Einleitwasserdichte und Dichtegradienten im Seewasser bestimmt.
- 1978: *Freistrahlen im homogenen und stratifizierten Medium Ihre Theorie und deren Vergleich mit dem Experiment*, K. Hutter & K. Hofer, VAW Mitteilung Nr. 27 => Grundlage für IGKB

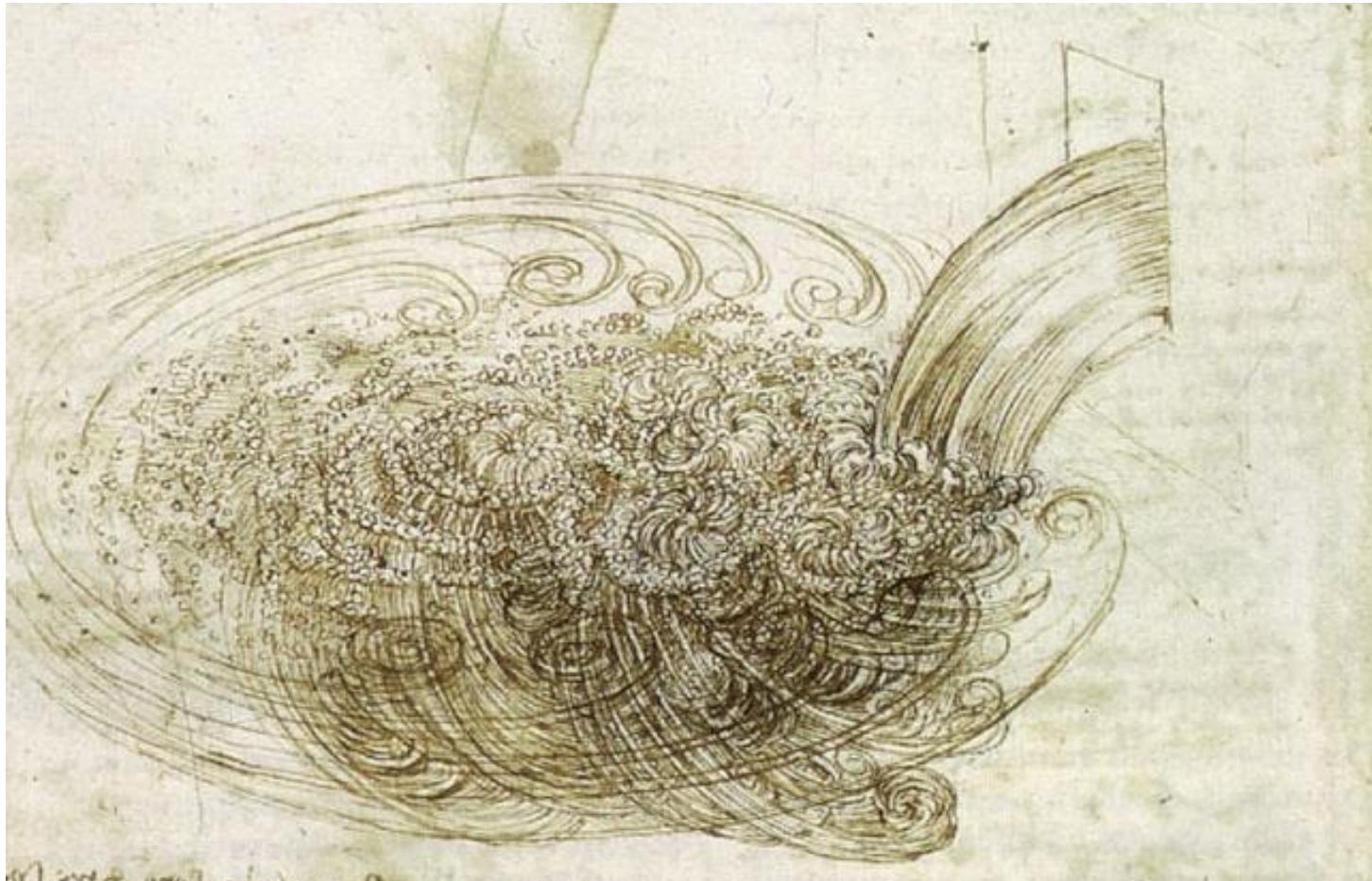


Temperatur und turbulente Mischung

- Die Durchmischung bestimmt den Temperaturausgleich zwischen eingeleitetem Wasser und Seewasser
- Erkenntnis: Das Modell muss die räumliche turbulente Ausbreitung der Strömung simulieren.



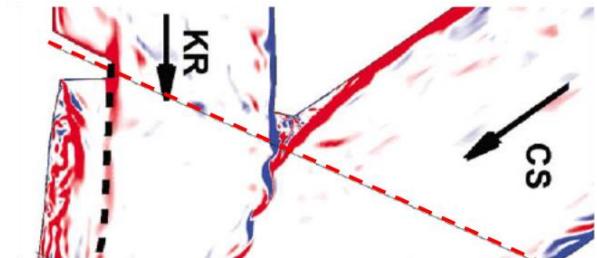
Temperatur und turbulente Mischung



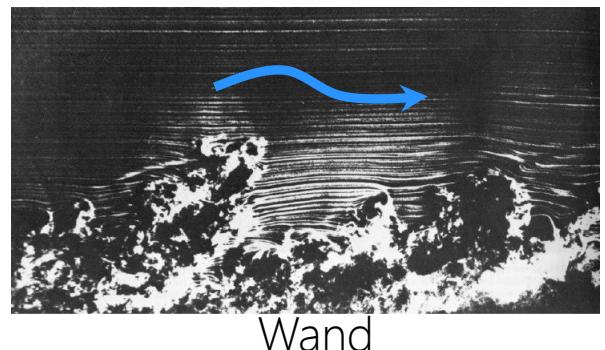
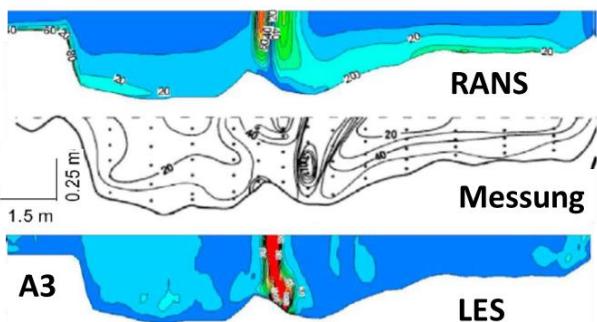
"Observe the motion of the surface of the water, which resembles that of hair, which has two motions, one of which is caused by the weight of the hair, the other by the direction of the curls; *thus the water has eddying motions, one part of which is due to the principal current, the other to the random and reverse motion.*" Leonardo da Vinci, ca. 1508-1513 (Reynolds decomposition)

Turbulenzmodellierung: LES vs. RANS, aufgelöste Wirbel vs. statistisch verteilte Wirbel

- Vor 2010: Fluss- und Seeströmungen werden mit RANS-Methoden modelliert, mit statistisch verteilter Turbulenz. Je nach Strömung andere Modelle.
- Ab 2010: Die 'Germano Identität (Germano et al., 1991)' erlaubt eine Selbststeuerung der Large-Eddy-Modelle => Einfluss der Topografie auf Wirbelbildung erfassbar, Wirbelstrukturen entstehen an korrekter Lage.
- In Wandnähe wird die Wirbelkaskade anisotrop (Turbulent Boundary Layer), LES benötigt hier lokal extreme Gitterauflösungen oder Wandfunktionen.
- Turbulente Fluktuation (Geschwindigkeit grösser oder kleiner als der lokale Durchschnitt) und Temperaturschwankung sind hier nicht mehr unabhängig voneinander



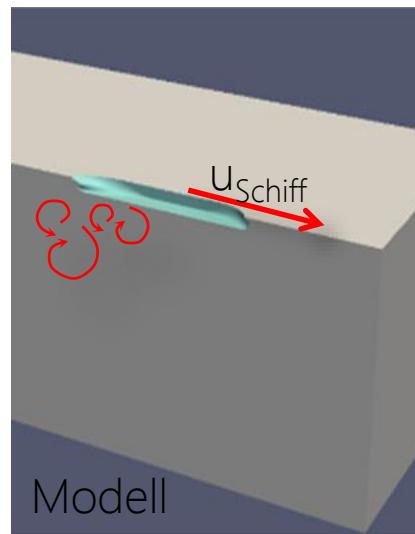
Aus: Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: Insight provided by an eddy-resolving numerical simulation, Constantinescu et al. (2011)



Turbulenz über komplexen Topografien : DES & Hybrid URANS-LES

- Als Folge entstehen «Detached Eddy Simulations» oder «Hybrid URANS-LES» Modelle → in Wandnähe RANS, in Hauptströmung LES
- Das KRISO-Tankschiff Standartexperiment - eine «auf den Kopf gestellte» geeignete Validierung für Turbulenzmodelle einer Seeeinleitung:
 - Im Fahrwiderstand spiegelt sich die Summe aller Wirbel, von kleinen lokalen Ablösezonen bis zu daraus entstehenden grossen Umwälzungen in der Tiefe

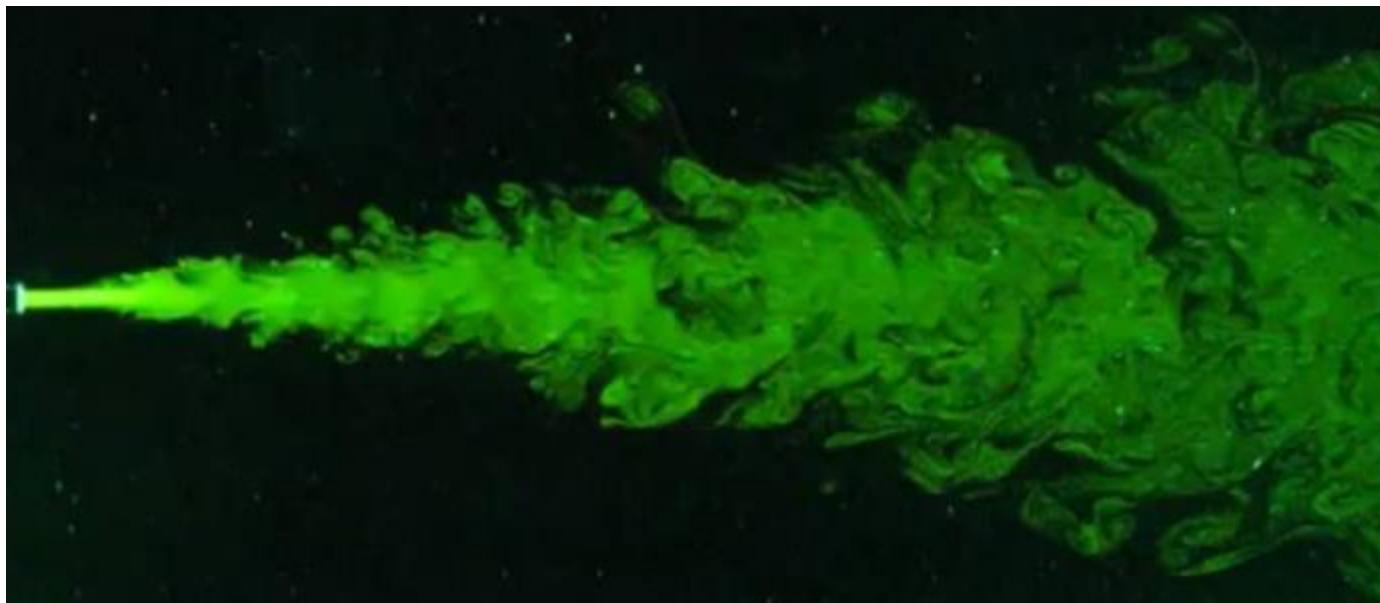
KRISO-Experiment: Widerstandsbeiwert 0.0041



Turb. Modell RANS	Widerstands- beiwert	Turb. Modell LES / Hyb.	Widerstands- beiwert
RANS k-e-v2-f	0.00400	SA DES	0.00520
k- ω SST-SAS	0.00380	LES DMM	0.00170
		Hyb. RANS- LES	0.00407

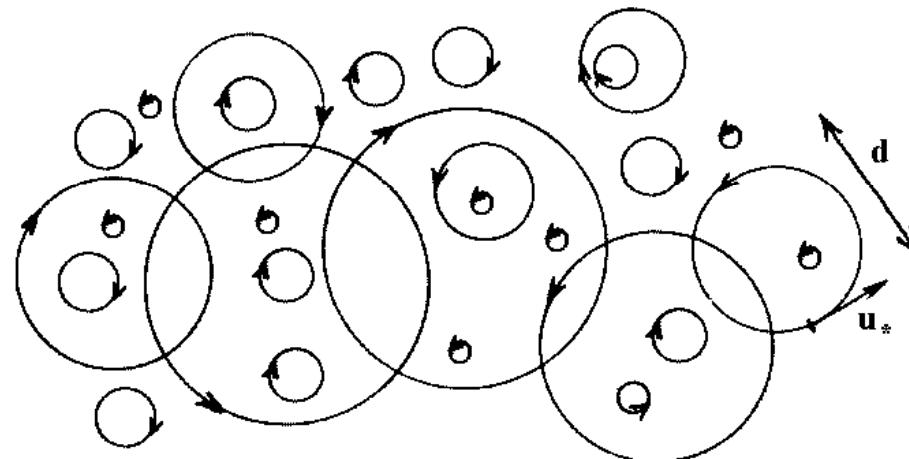
Turbulente Wirbeldiffusivität und Temperaturleitfähigkeit

- Die turbulente Strömung liefert mit ihren grossen Wirbeln die Dispersion.
- Die turbulente Wärmediffusion im Bereich kleiner als drei Gitterzellgrößen muss zusätzlich modelliert werden.
- Für laminare Strömungen kennt man diese als Prantl-Zahl, = Viskosität : Temperaturleitfähigkeit
- Beim analogen Konzept «Turbulente Prantl-Zahl» macht sich hingegen Ernüchterung breit (Journal of Heat Transfer 116, W. M. Kays "Turbulent Prantl Number - where are we?" (1994))

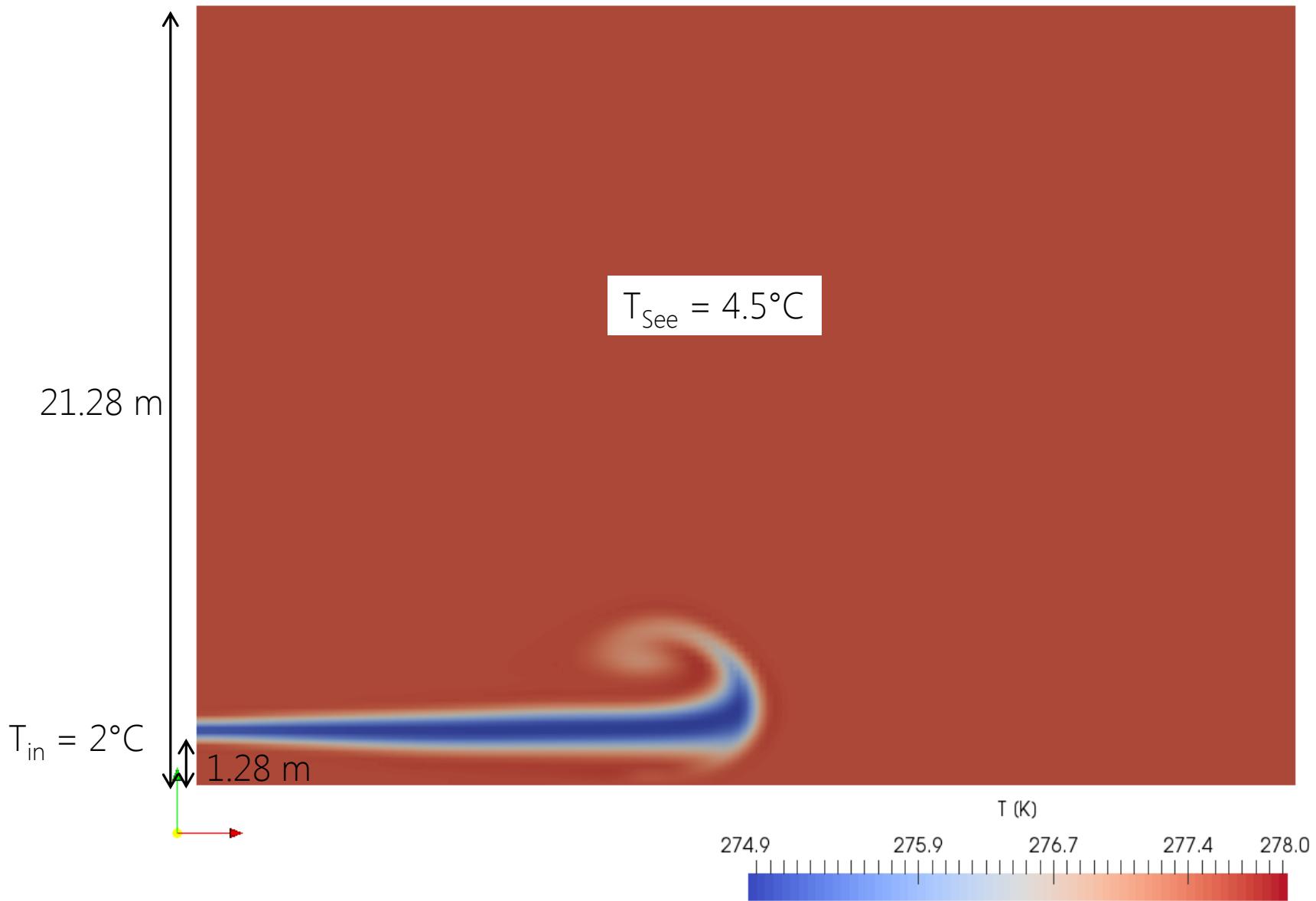


Turbulente Wirbeldiffusivität und Temperaturleitfähigkeit

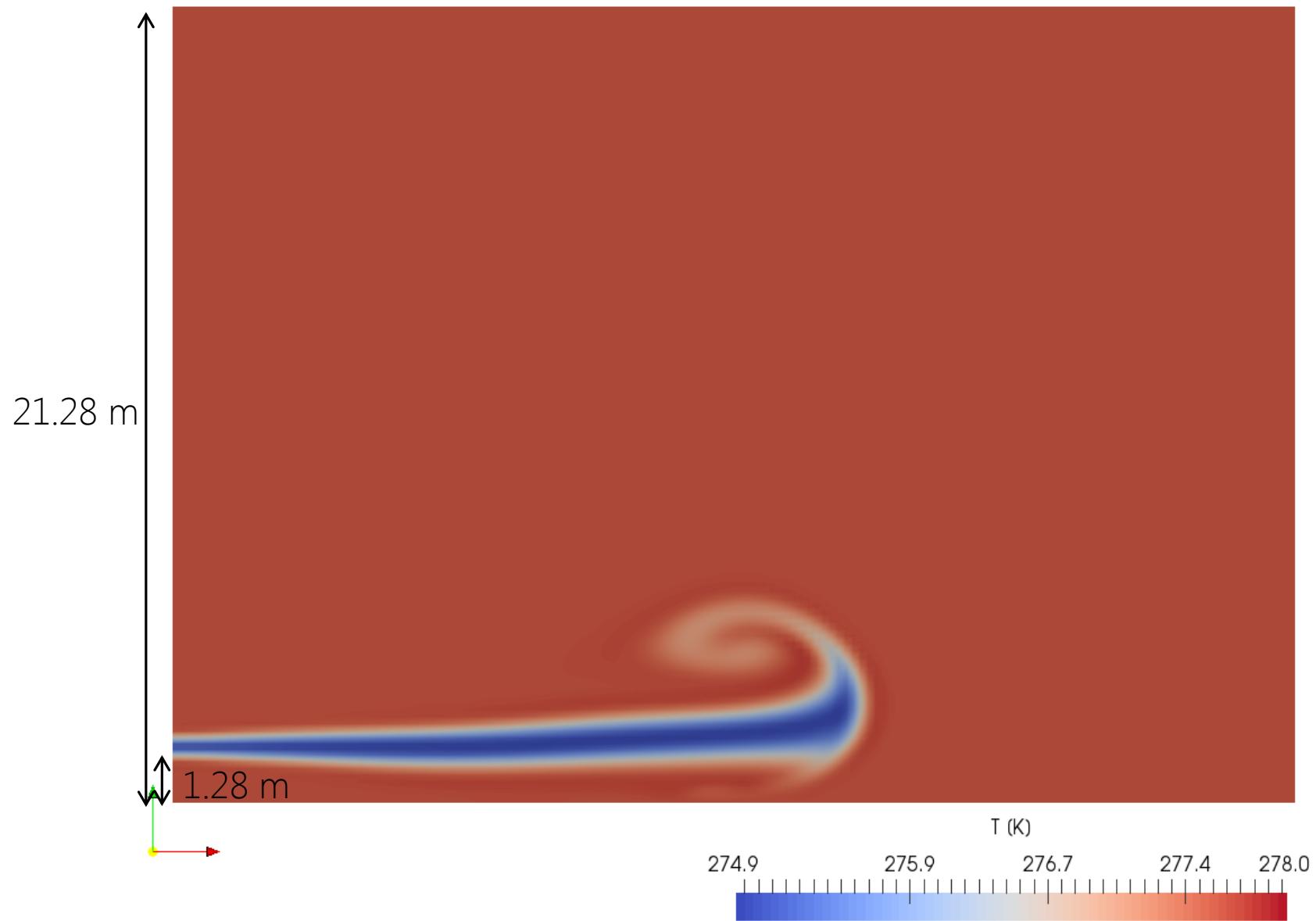
- Die Wirbeldiffusivität D_T muss entweder für jede Strömung kalibriert werden oder auf den korrekt simulierten Wirbeln mit physikalisch gültigen Konzepten basieren.
- Die Betrachtung eines Fluidpartikels als 'Random-Walker' in der turbulenten Strömung liefert eine mathematische Herleitung der Wirbeldiffusivität. Ein Partikel in einem Wirbel macht demnach einen Schritt in der Grösse eines Wirbeldurchmessers d innerhalb eines Zeitschritts einer halben Umwälzzeit $\tau_t = \frac{\pi d}{2u_*}$
- Daraus ergibt sich die Diffusivität des Random-Walk Prozesses zu $D_T = \frac{d^2}{4\tau_t} = \frac{du_*}{2\pi}$
- Die von der Simulation nicht erfasste turbulente Wirbeldiffusivität wird von den grössten der nicht mehr von der Gitterauflösung erfassten Wirbel dominiert, namentlich dem Maximum aus orbitaler Wirbelgeschwindigkeit u_* mal den Wirbeldurchmesser d . => Die sind in Etwa bekannt



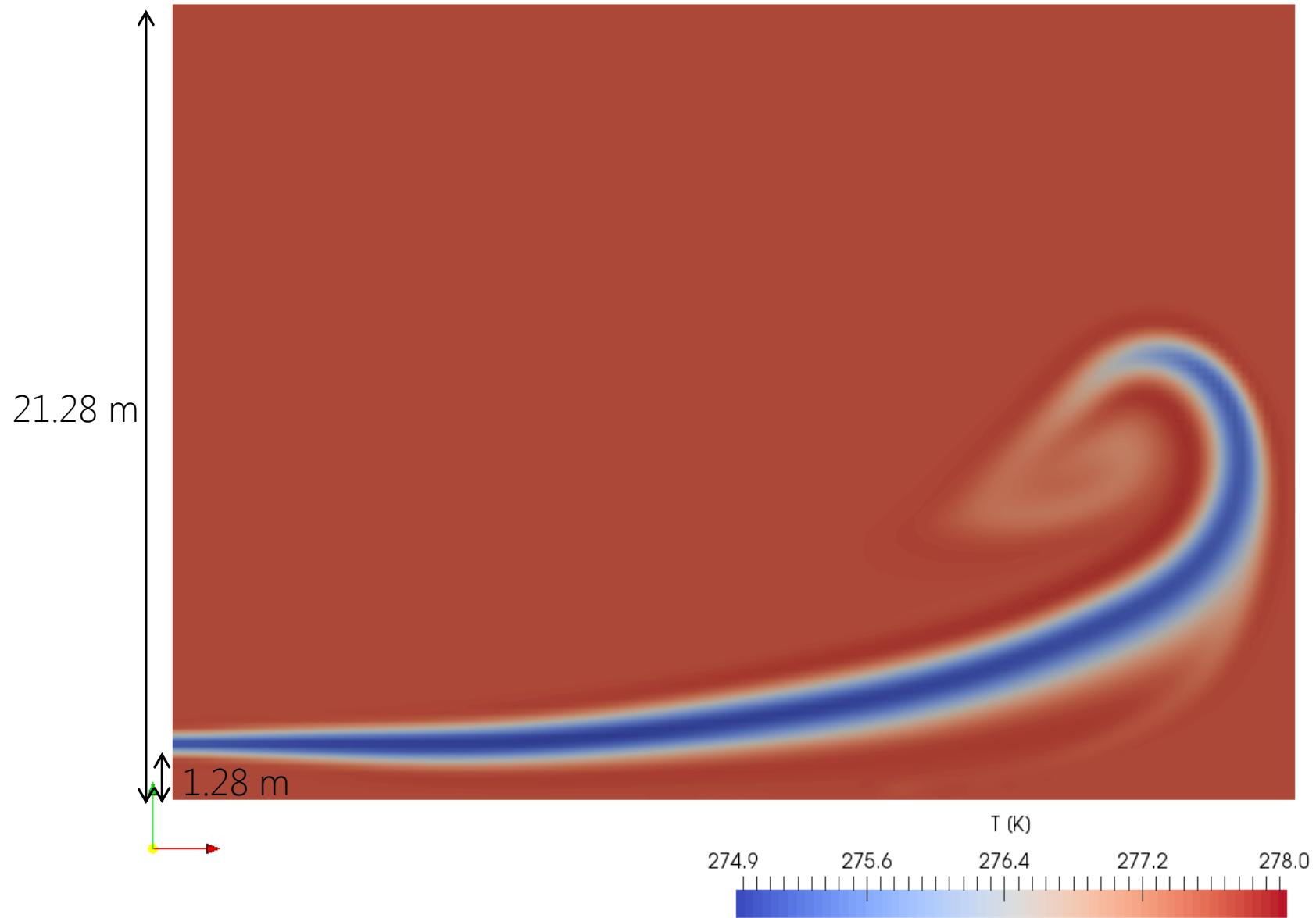
Winter, 2° Zufluss nach 2 Minuten; RANS mit KOmegaSST Turbulenzmodell



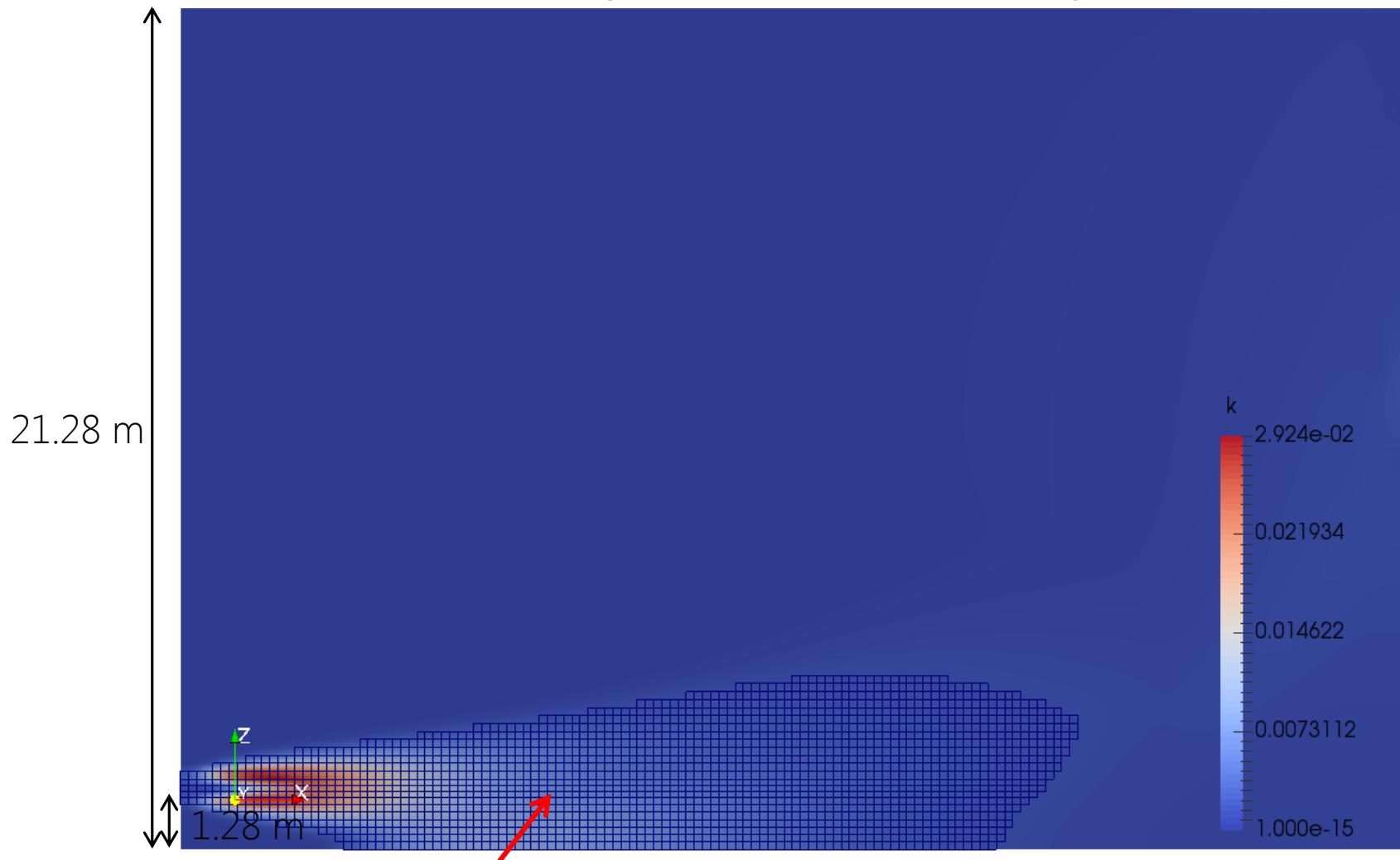
Winter, 2° Zufluss nach 3 Minuten; RANS mit KOmegaSST Turbulenzmodell



Winter, 2° Zufluss nach 10 Minuten; RANS mit KOmegaSST Turbulenzmodell

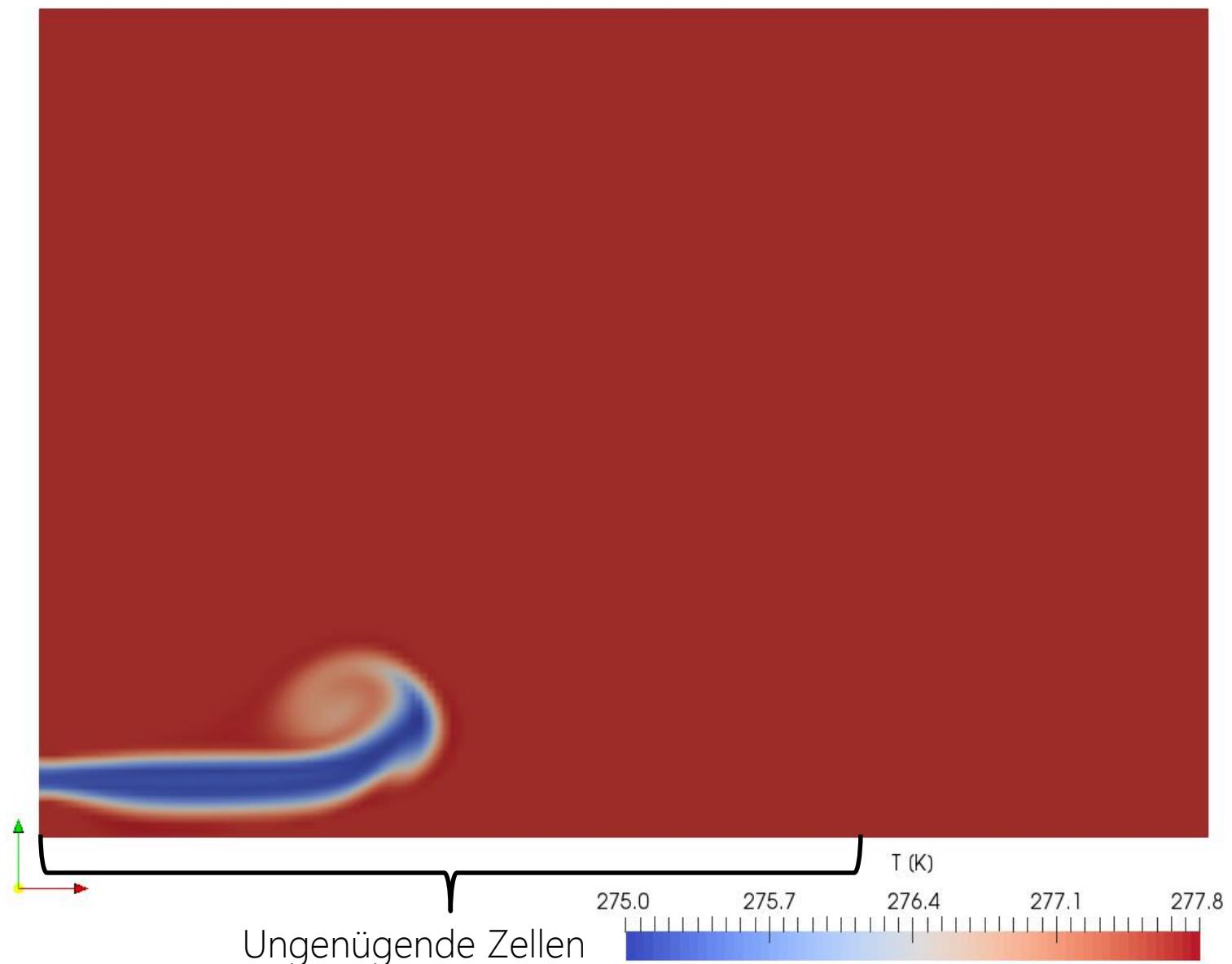


Turbulente kinetische Energie der RANS Simulation zeigt Grenzen für LES

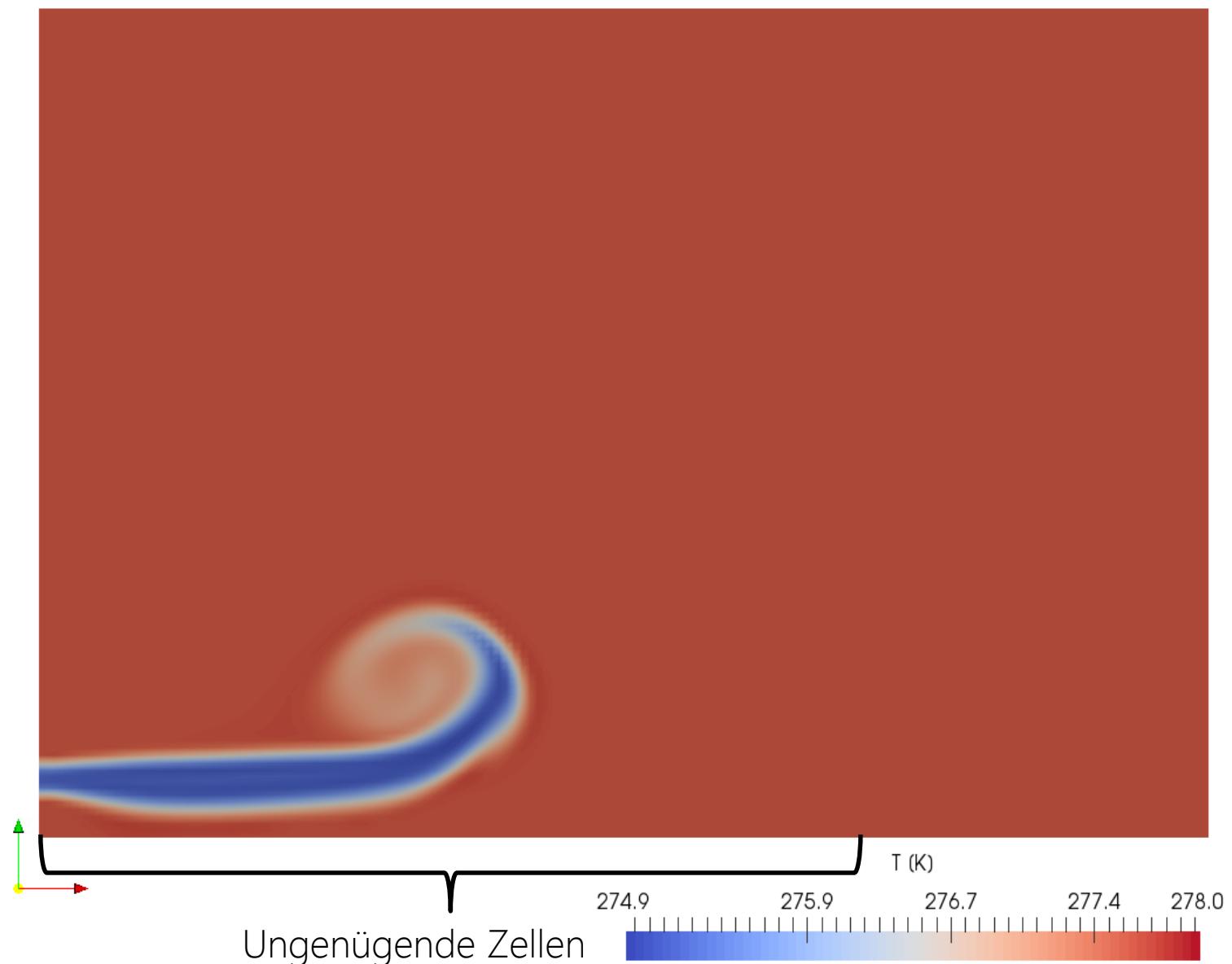


Ungenügende Zellen

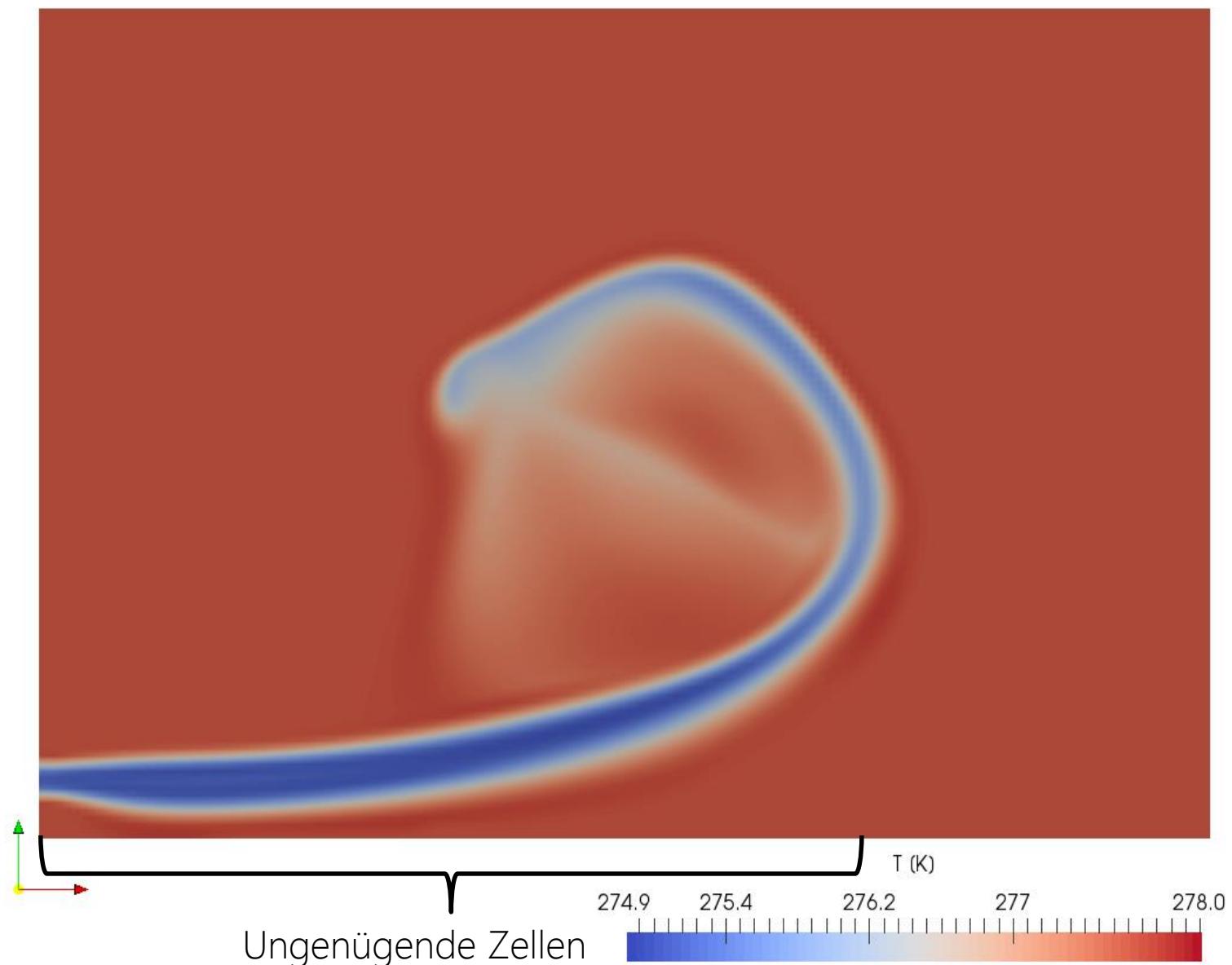
Winter, 2° Zufluss nach 2 Minuten; DDES mit ungenügender Auflösung ohne D_T



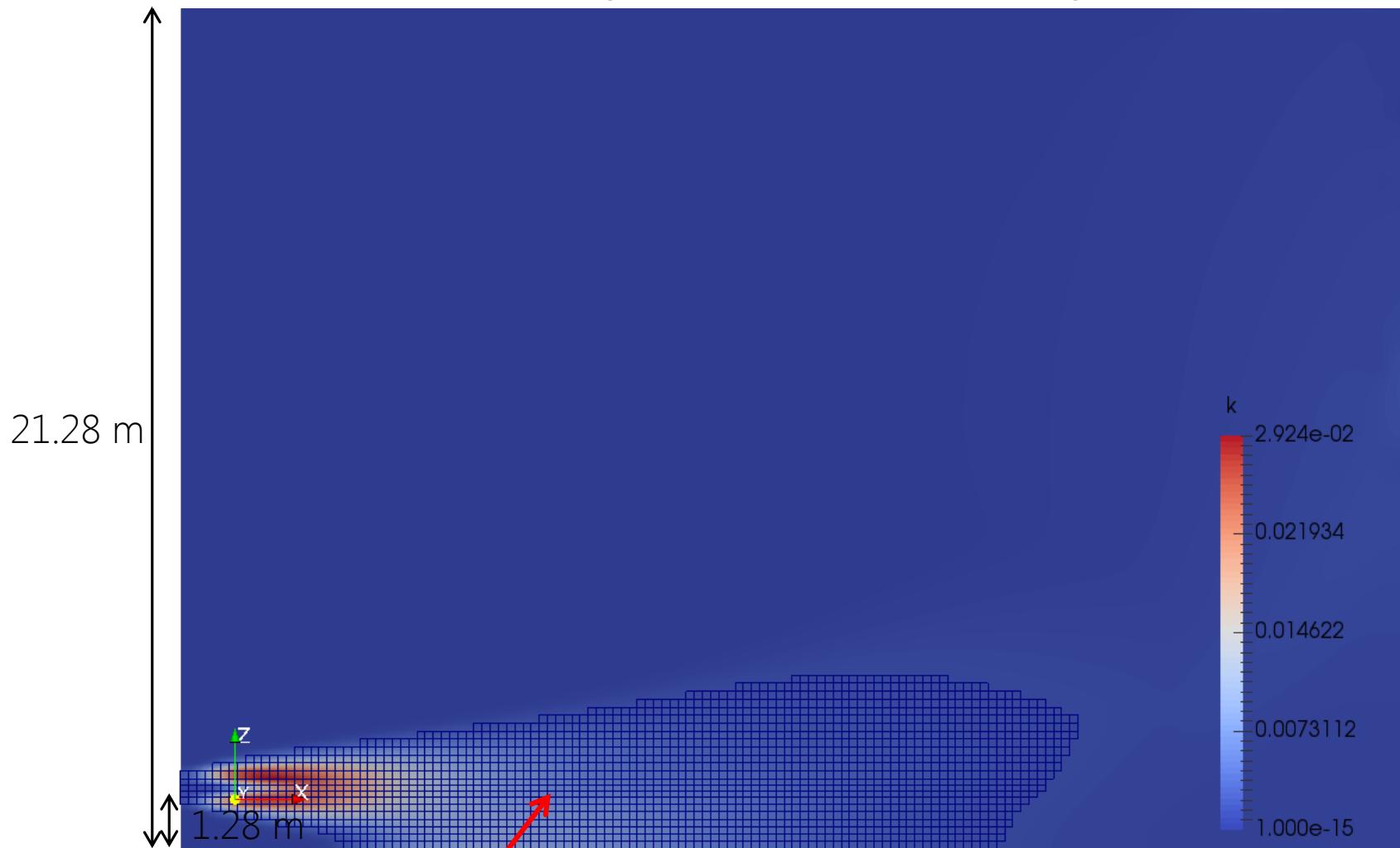
Winter, 2° Zufluss nach 3 Minuten; DDES mit ungenügender Auflösung ohne D_T



Winter, 2° Zufluss nach 10 Minuten; DDES mit ungenügender Auflösung ohne D_T

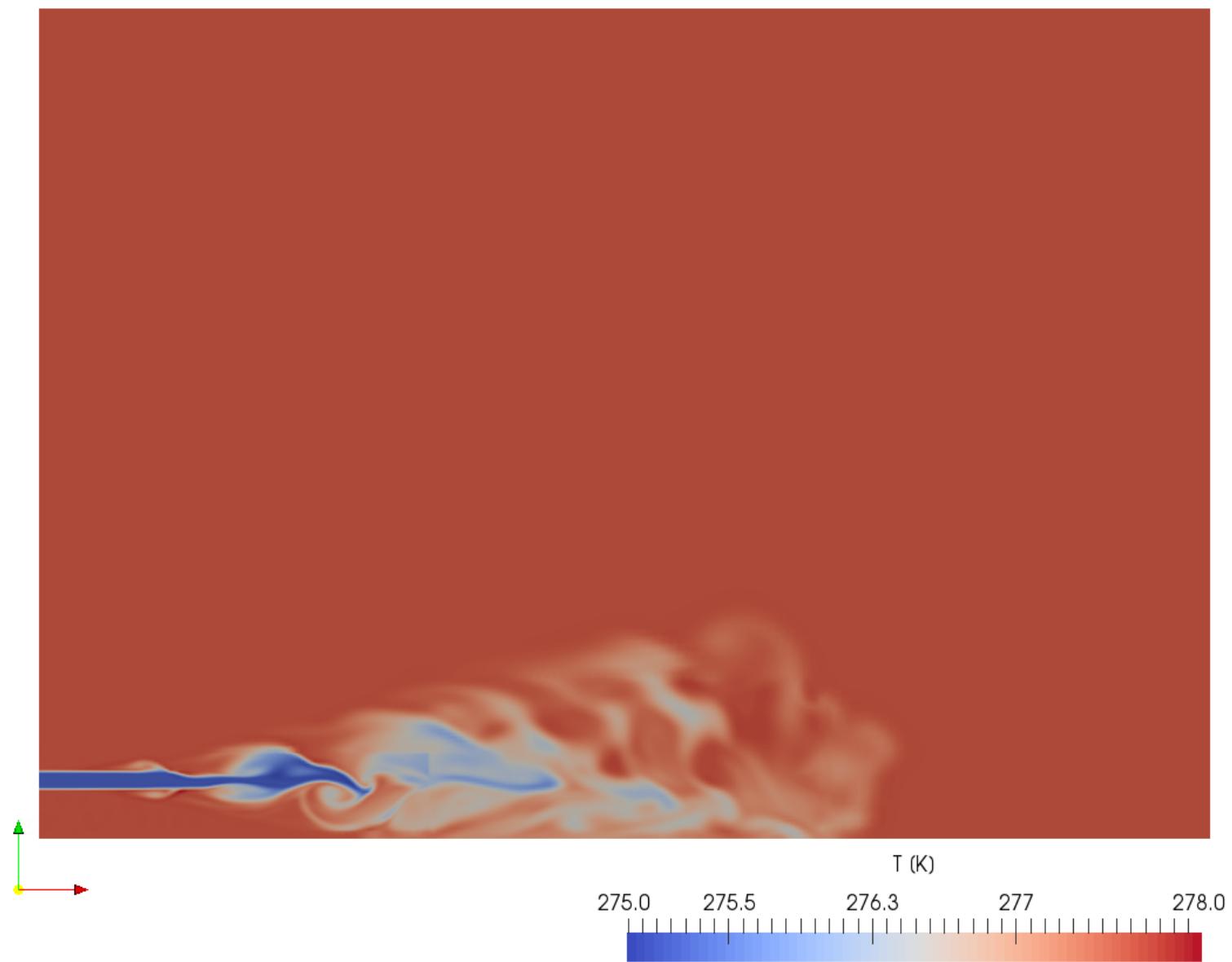


Turbulente kinetische Energie der RANS Simulation zeigt Grenzen für LES

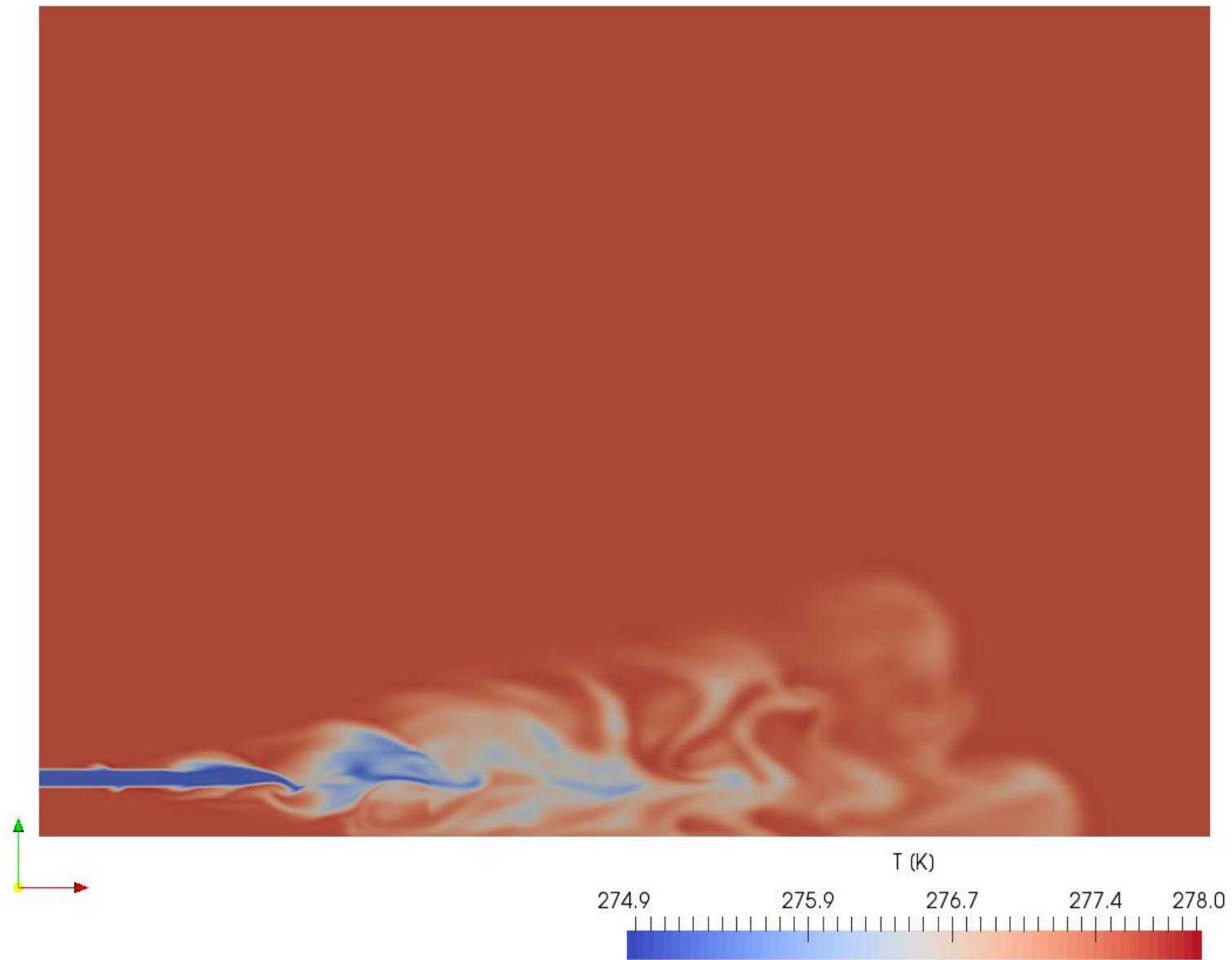


Zellgrösse halbieren

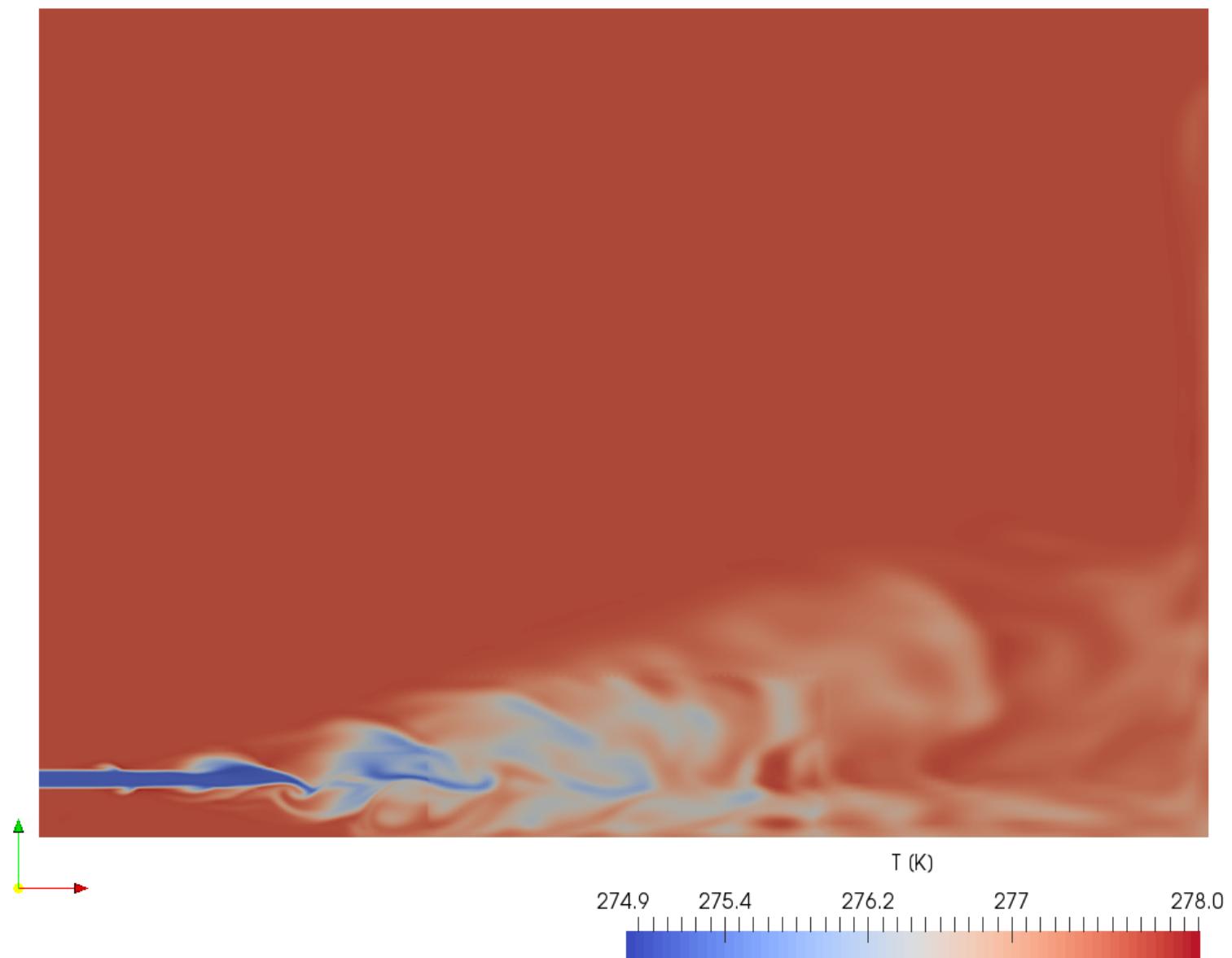
Winter, 2° Zufluss nach 2 Minuten; LES mit D_T und dyn. K-Eqn. SGS-Modell



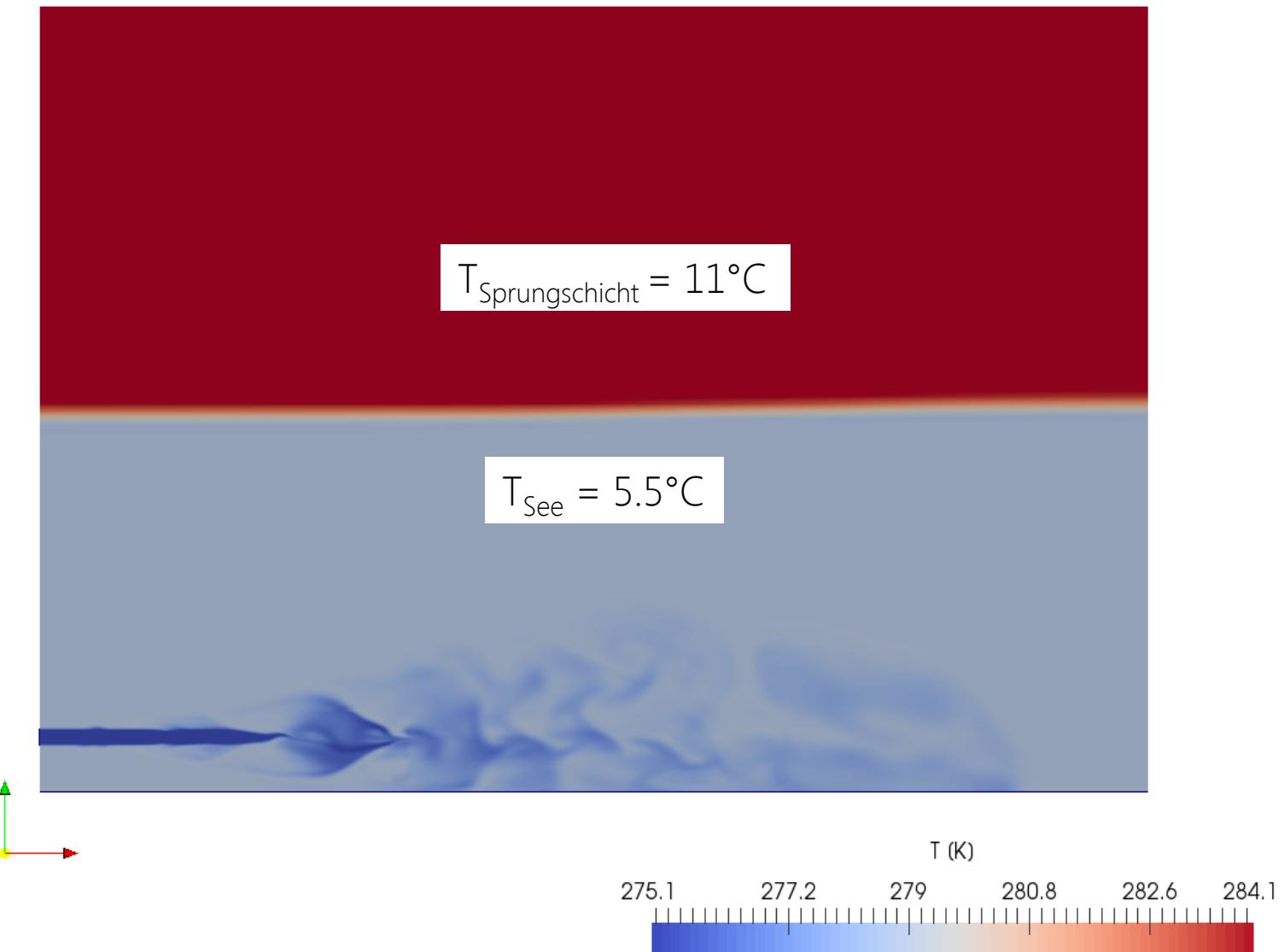
Winter, 2° Zufluss nach 3 Minuten; LES mit D_T und dyn. K-Eqn. SGS-Modell



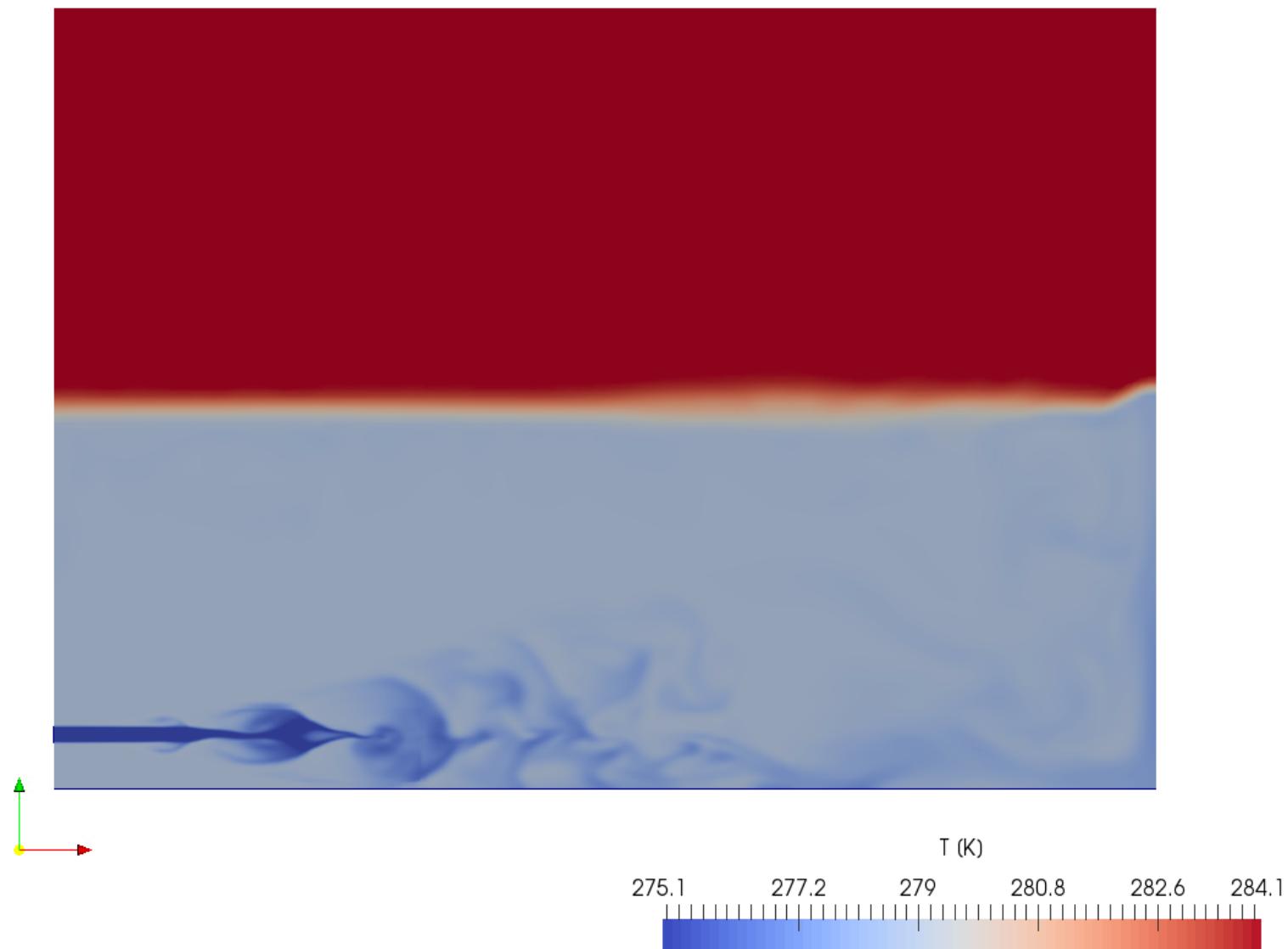
Winter, 2° Zufluss nach 10 Minuten; LES mit D_T und dyn. K-Eqn. SGS-Modell



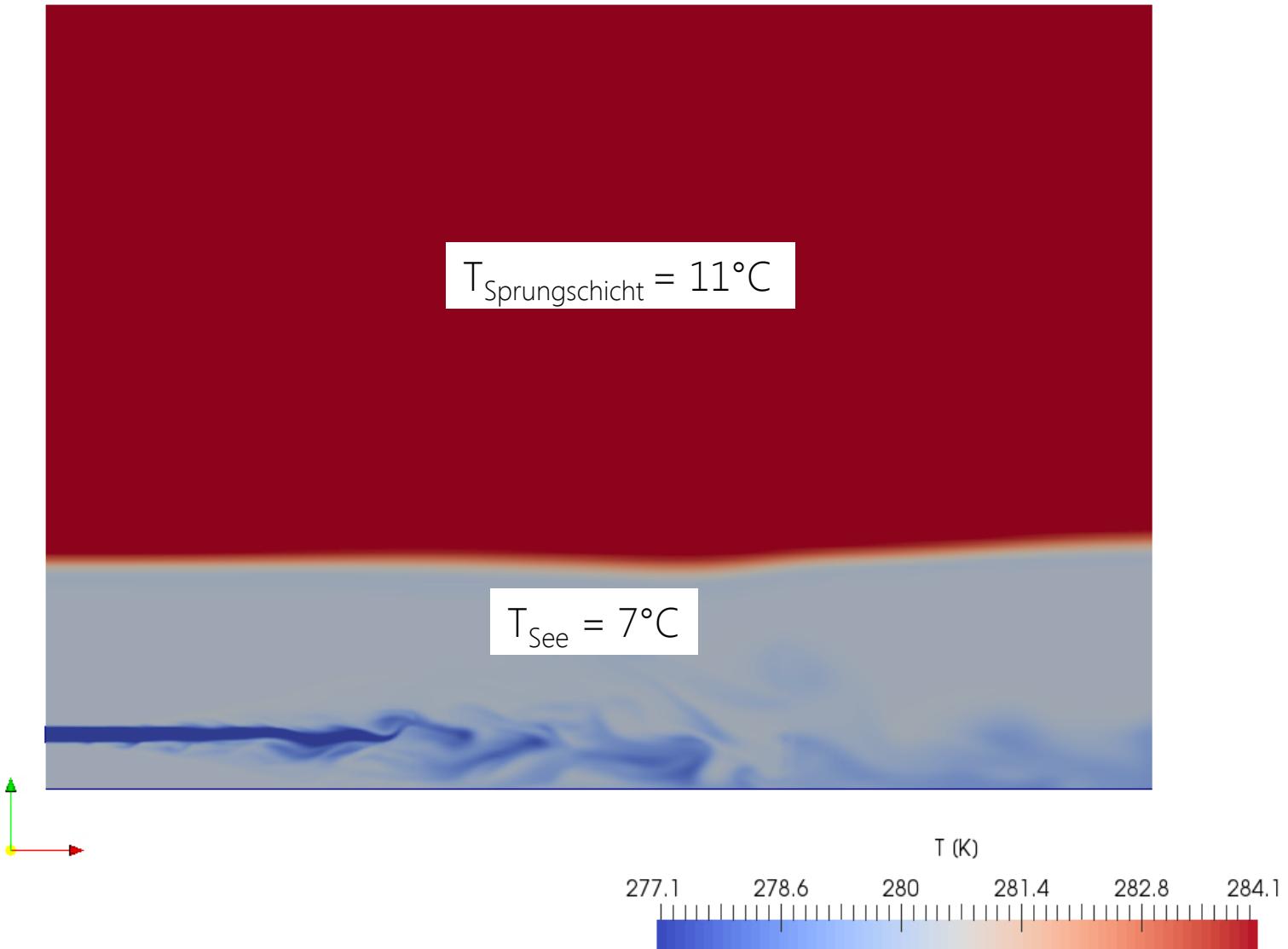
Frühjahr, 2° Zufluss nach 3 Minuten; LES mit D_T und dyn. K-Eqn. SGS-Modell



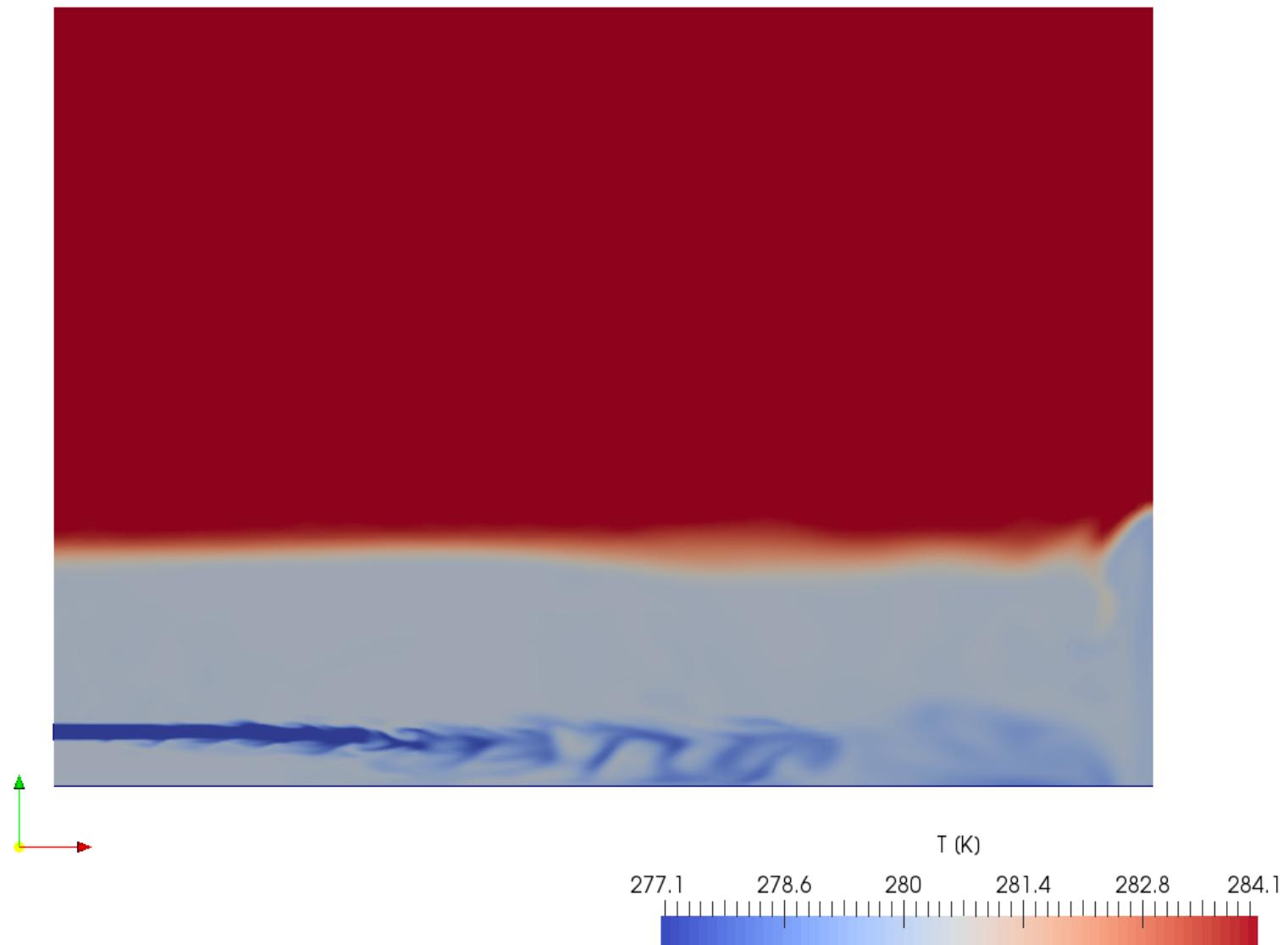
Frühjahr, 2° Zufluss nach 15 Minuten; LES mit D_T und dyn. K-Eqn. SGS-Modell



Herbst, 2° Zufluss nach 3 Minuten; LES mit D_T und dyn. K-Eqn. SGS-Modell



Herbst, 2° Zufluss nach 15 Minuten; LES mit D_T und dyn. K-Eqn. SGS-Modell



Alles in allem ergibt sich....

- ...dass Einleitungen mit Temperaturdurchmischung ökologisch heikel sein können
- ...dass die Temperaturdurchmischung wegen der Turbulenz fluiddynamisch komplex ist
- ...herkömmliche Ansätze das Problem stark vereinfachen und auf idealisierte Fälle begrenzen
- ...dass die Praxis der vereinfachten Modellierung mit konservativen Grenzen begegnet
- ...zeitgemäße Modellierungen den Einleitprozess abbilden können, wenn man weiss wie
- ...mit entsprechender Modellierung auch komplexe Strömungen wie Flusseinleitungen handzuhaben sind



Noch Fragen?

Dr. Albrecht v. Boetticher

Staubli, Kurath und Partner AG
Ingenieurbüro
Bachmattstrasse 53
Postfach 1172
8048 Zürich

www.wasserbau.ch

Telefon 043 336 40 50
E-Mail sk@wasserbau.ch