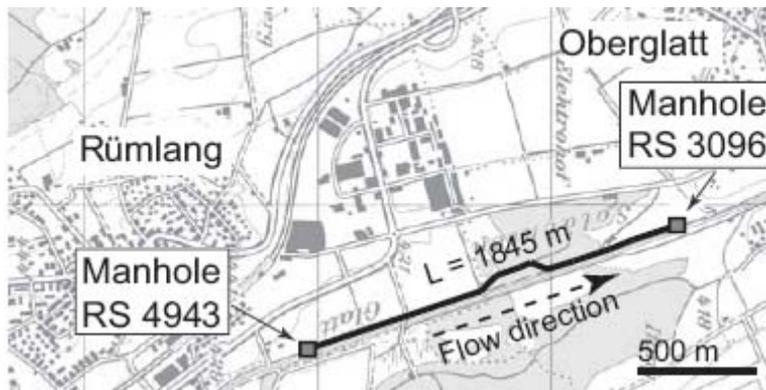


## BERECHNUNG DER ABWASSERTEMPERATUR IN DER KANALISATION

### Einführung in das Simulationsprogramm TEMPEST

Umweltingenieurstudenten der ETH haben an einem Kanalabschnitt in der Nähe von Rümlang (Abb. 1) Messungen und Simulationsrechnungen durchgeführt, mit dem Ziel, den Wärmehaushalt in der Kanalisation zu erfassen und den Einfluss einer geplanten Wärmeentnahme auf die Abwassertemperatur zu untersuchen [1]. Diese Arbeit wird hier benutzt für eine Einführung in das Simulationsprogramm TEMPEST, mit dem der Verlauf der Abwassertemperatur in Kanalsystemen berechnet werden kann.



**Abb. 1:** Zu untersuchender Kanalabschnitt bei Rümlang

Die Übung verlangt keine speziellen Vorkenntnisse. Sie basiert auf einem bereits kalibrierten Modell, mit dem die Eigenschaften und Möglichkeiten von TEMPEST kennen gelernt und ein paar einfache Fragen im Zusammenhang mit Abwasserwärmenutzung beantwortet werden sollen.

Legen Sie auf dem Rechner, auf dem Sie arbeiten, einen Ordner **TEMPEST** an und kopieren Sie die Dateien **TEMPEST.exe** und **Rümlang Modell 1.tmo** von der CD, die dem User Manual beiliegt, in diesen Ordner (Falls im Verlauf der Übung Probleme auftreten, können Sie jederzeit wieder die für das Lösen der Aufgaben verwendeten Dateien von der CD kopieren). Laden Sie jetzt das Programm durch Doppelklick auf die Datei **TEMPEST.exe**. Nun haben Sie das Fenster **TEMPEST** vor sich mit den Programmenüs und den wichtigsten verfügbaren Befehlen.

### DATENEINGABE UND MODELLPARAMETER

Mit dem Befehl **New** im Menü **File** und dem Befehl **Add Sewer Line** im Menü **Model** kann man ein Modell für einen Kanalisationsabschnitt erstellen. Damit Sie sich hier die für die Dateneingabe benötigte Zeit sparen können, laden Sie jetzt das bereits fertige Modell des Kanalabschnitts (**Rümlang Modell 1.tmo**) mit dem Befehl **Open** im Menü **File**. Modelle werden von **TEMPEST** immer in Dateien mit der Extension **tmo** gespeichert.

Wird ein bestehendes Modell geladen, zeigt **TEMPEST** immer das wichtige Fenster **Sewer Lines**, das die Parameter der Kanalabschnitte enthält. In diesem Modell gibt es nur einen Kanalabschnitt, der die Bezeichnung **RS4943-3096** hat. Oben im Fenster werden der Zufluss und die Abwassertemperatur am oberen Ende des Kanalabschnitts eingegeben, entweder durch einen konstanten Wert oder als Zeitreihe. Klicken Sie jetzt auf den oben am Fenster

sitzenden Reiter (Englisch „tab“) **Time Series**, so sehen Sie die verfügbaren Datenzeitreihen links unter „**Name**“. Für die im Moment angewählte Zeitreihe werden rechts im Fenster die Daten für den Zufluss und die Zuflusstemperatur gezeigt. Klicken Sie jetzt auf den Reiter **Sewer Lines** und sehen Sie sich die weiteren Modellparameter an. Die Bedeutung der meisten Parameter ist aus dem Bild ersichtlich, aber im **Anhang B** zum Aufgabenblatt sind alle für eine Modellierung mit **TEMPEST** nötigen Daten und Parameter nochmals mit ihren deutschen Bezeichnungen aufgelistet.

## BERECHNUNG DER ABWASSERTEMPERATUR

Um ein stationäres räumliches Profil der Abwassertemperatur zu rechnen, klicken Sie im Menü **Compute** auf den Befehl **Steady State Solution...** und das Fenster **Compute Solution** erscheint. (Falls in **Sewer Lines** nicht **Constant Value** gewählt ist, wie es hier der Fall ist, wird für die Rechnung der stationären Lösung der erste Wert der angewählten Zeitreihe verwendet.) Wenn Sie jetzt auf **Run** klicken, erscheint das Fenster **Progress**, das Informationen enthält über den Fortschritt der Rechnung. Wenn die Rechnung beendet ist, erscheint vor **Steady State Solution** ein grüner ok-Haken, und Sie können das Fenster mit **Close** schließen.

## DARSTELLUNG DER RESULTATE

Mit dem letzten Befehl öffnet sich automatisch das Fenster **Results**, in dem die Ergebnisse der Rechnung dargestellt sind, oben grafisch und unten tabellarisch. Wie Sie sehen, fällt die Abwassertemperatur „**TW**“ auf der Fließstrecke von 1800 m Länge um etwa 1.5 °C ab. Die genauen Zahlen in der Tabelle sind für die Abwassertemperatur 13.1658 °C für die Distanz 0 m, und wenn Sie nach unten scrollen, 11.6018 °C für das Ende des Kanalabschnitts bei 1850 m.

Unter dem Begriff „**Data Series**“ oben rechts im Fenster sind alle Variablen aufgelistet, die berechnet worden sind. Klicken Sie auf die zugehörigen Kästchen, um einzelne Variablen zur Grafik hinzuzufügen oder daraus zu entfernen.

## DAS MODELL ALS ARBEITSINSTRUMENT

Das Modell kann als Werkzeug benutzt werden, mit dem relativ effizient bestimmte Fragen beantwortet werden können, wie z.B. die Frage nach dem Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Abwassertemperatur. Oft stehen zum Vorneherein nur unsichere Daten über das Bodenmaterial zur Verfügung und darüber, ob das Kanalisationsrohr in gesättigtem oder ungesättigtem Boden liegt. Bevor nun ein grosser Aufwand getrieben wird zur Messung oder Beschaffung dieser Daten, kann man erst einmal abschätzen, ob sie für die Fragestellung überhaupt einen wichtigen Einfluss haben.

Klicken Sie wieder auf den Reiter **Sewer Lines**. Sie sehen, dass der Bodentyp bei Rümmlang mit „**Rümmlang, calibrated**“ bezeichnet wird. Dieser Bodentyp ist beim Kalibrieren des Modells durch den Abgleich von gemessenen und gerechneten Daten gefunden worden. Das Vorgehen war dabei so, dass entsprechend den Angaben der Geologen zuerst einmal einer der in **TEMPEST** zur Verfügung stehenden Bodentypen gewählt und getestet, und dann später etwas angepasst wurde. Sie finden die in **TEMPEST** verfügbaren Bodentypen, wenn Sie im Menü **Model** unter **Model Settings...** den Reiter **Soil Types** anwählen. Hier sind verschiedene zur Auswahl stehende Bodentypen mit ihrer Wärmeleitfähigkeit und Wärmediffusivität gelistet. (Im Abschnitt 2.2.3 Model Settings des User Manuals wird erklärt, wie die Bodentypparameter geändert oder neue Bodentypen definiert werden können.) Der hier gewählte Bodentyp **Rümmlang, calibrated** entspricht in etwa einem kiesigen Boden.

## AUFGABE 1: WIE GROSS IST DER EINFLUSS DER BODENBESCHAFFENHEIT AUF DIE ABWASSERTEMPERATUR?

Um eine erste, schnelle Antwort auf diese Frage zu erhalten, wählen wir einen Bodentyp mit signifikant unterschiedlichen Eigenschaften, z.B. Sand mit teilweiser Sättigung. Klicken Sie jetzt auf **Cancel** und ersetzen Sie im Fenster **Sewer Lines** den Bodentyp **Rümlang, calibrated** durch **Sandy soil, 50% saturated**. Klicken Sie im Menü **Compute** auf den Befehl **Steady State Solution...** und im Fenster **Compute Solution** auf **Run**, und wenn die Rechnung beendet ist, auf **Close**. Die Anfangsbedingung für die Berechnung der Abwassertemperatur in der Tabelle (bei 0 m) ist natürlich immer noch 13.1658 °C, aber für das Ende des Kanalabschnitts bei 1850 m ist die Abwassertemperatur jetzt 11.1415 °C. Die Abwassertemperatur hat sich gegenüber der ersten Rechnung also um  $\Delta TW = 11.6018 - 11.1415 \approx 0,5$  °C geändert. Dies bedeutet, dass die Bodenbeschaffenheit durchaus einen Einfluss von der gleichen Grössenordnung haben kann wie die Wärmenutzung.

Klicken Sie jetzt wieder auf den Reiter **Sewer Lines**, ändern Sie den Bodentyp wieder auf den ursprünglichen Typ **Rümlang, calibrated** und speichern Sie das Modell ab unter dem neuen Namen **Rümlang Modell 2.tmo**, indem Sie im Menü **Model** den Befehl **Save As...** anklicken und dann den Modellnamen ändern.

Durch das Speichern werden die aktuellen Parameterwerte des Modells, nicht aber die gerechneten Daten gespeichert. Falls Sie diese weiter benötigen, klicken Sie im Menü **File** auf den Befehl **Export Data...**. Im Fenster **Data Export** können Sie die Variablen, sowie Zeit und Ort auswählen, die gespeichert werden sollen. Durch klicken auf **Export...** werden die gewählten Daten auf eine Datei mit dem Modellnamen.csv geschrieben, die Sie z.B. in Excel weiter verarbeiten können.

## AUFGABE 2: WIE MODELLIERE ICH EIN KANALSYSTEM, DAS AUS MEHRE-REN STRÄNGEN BESTEHT?

Falls Sie die Abwassertemperatur auch noch für einen weiter stromabwärts liegenden Punkt berechnen möchten, müssen Sie Ihren betrachteten Kanalabschnitt verlängern. Wenn die Gegebenheiten im Kanalrohr nicht ändern, ist das unproblematisch und Sie ändern einfach den Parameter „**Length**“ im **Sewer Lines** Fenster. Wenn aber zwischen dem bisher betrachteten Kanalabschnitt und dem Zusätzlichen die geometrischen oder hydraulischen Bedingungen ändern, müssen Sie einen neuen Kanalisationsabschnitt einführen. Dabei gehen Sie wie folgt vor: In **Model** klicken Sie auf **Add Sewer Line** und geben dem Abschnitt einen Namen, z.B. „**RS3096-2078**“ (wenn der Abschnitt bis zum Schacht **RS2078** geht). Haben Sie bereits einen Abschnitt mit Parameterwerten, die dem neuen Abschnitt ähnlich sind, wählen Sie in **Copy Line** dessen Namen; das erspart Ihnen das Eintippen der Parameterwerte (im Beispiel hier gibt es nur einen Abschnitt zur Auswahl - wählen Sie diesen).

Der neue Abschnitt hat eine Länge von 980 m und ein Gefälle (**Slope**) von 0.002. ändern Sie diese Parameterwerte. Wählen Sie für den Zufluss „**QWin**“ **Constant Value** und setzen Sie diesen auf 0 m<sup>3</sup>/s (Hätten Sie das nicht getan, würde das Programm mit einem seitlichen Zufluss zwischen den beiden Abschnitten rechnen). Nun führen Sie wieder eine stationäre Rechnung durch (**Compute, Steady State Solution, Run**). Am Ende der beiden Abschnitte bei 2825 m ist die Abwassertemperatur nun auf 10.6939 °C abgefallen.

Auf der Grafik sieht man zwischen den beiden Abschnitten einen kleinen „Buckel“ im Verlauf von „**TW**“. Das ist ein numerisches Artefakt, das von der groben räumlichen Auflösung herrührt. Gehen Sie in **Model** zu **Model Settings...** und **Numerics** und ändern Sie den **Stepsize in Space** von 25 m auf 10 m. Wiederholen Sie die stationäre Rechnung damit. Wegen der feineren Auflösung wird die Rechenzeit zwar grösser, aber wie Sie aus der Grafik ersehen, ist das numerische Artefakt nun kleiner geworden.

Ändern Sie in **Model, Model Settings...** und **Numerics** den **Stepsize in Space** wieder auf den ursprünglichen Wert von 25 m und speichern Sie das Modell ab unter dem neuen Namen **Rümlang Modell 3.tmo**.

### **AUFGABE 3: WIE MODELLIERE ICH EINEN SEITLICHEN ZUFLUSS?**

Wir gehen davon aus, dass es zwischen den beiden Abschnitten einen seitlichen Zufluss von  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$  gibt, der eine Abwassertemperatur von  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  hat. Klicken Sie in **Sewer Lines** auf den Namen des zweiten Abschnitts „**RS3069-2078**“ und setzen Sie für „**QWin**“ und „**TWin**“ die **Constant Value** 0.01 und 5 ein. Führen Sie wieder eine stationäre Rechnung durch. Die Grafik zeigt Ihnen die Auswirkung des kalten eingeleiteten Wassers (und wieder einen kleinen Artefakt). Wenn Sie rechts oben im Fenster einmal nur die Variable **h** (Wassertiefe) anwählen, zeigt Ihnen die Grafik den Einfluss des Gefällewechsels.

Speichern Sie das Modell ab unter dem neuen Namen **Rümlang Modell 4.tmo**.

### **AUFGABE 4: WIE BERECHNE ICH ZEITLICHE VARIATIONEN DER WASSER-TEMPERATUR?**

Dynamische Simulationen brauchen mehr Rechenzeit. Reduzieren Sie daher das Kanalsystem wieder auf einen Abschnitt: Wählen Sie in **Sewer Lines** links im Fenster den Namen des zweiten Abschnitts „**RS3096-2078**“ an. Klicken Sie unter **Model** auf **Remove Sewer Line** und bestätigen Sie mit „**Yes**“. Wählen Sie jetzt in **Compute** den Befehl **Dynamic Solution** und setzen Sie im Fenster **Compute Solution** den **Output Timestep** auf 600 Sekunden, und klicken Sie **Run**.

Links im Fenster **Results** sehen Sie, dass Sie jetzt Ergebnisse als Funktion des Ortes und der Zeit darstellen können. Wenn Sie unten links auf „**x = 1850.00 m**“ klicken, zeigt Ihnen die Grafik den zeitlichen Verlauf von TW, QW und h am untern Ende des betrachteten Kanalisationsabschnitts. Inaktivieren Sie die Aufzeichnung der Variablen TW. So wird die starke Dynamik des Abflusses deutlich sichtbar. Diese wird auch ersichtlich, wenn Sie z.B. die räumlichen Profile der Abwassertemperatur vom 27.2.2008 um 0:00 und um 6:30 anschauen; während dieser Zeit sinkt die Temperatur bei 1850 m stark ab, von  $11.9$  auf  $9.7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Speichern Sie das Modell ab unter dem neuen Namen **Rümlang Modell 4.tmo**.

## Anhang A: LITERATUR

- [1] André Daniel Müller: Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Bachelorarbeit, Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IFU), ETH Zürich, 2008.

## Anhang B: MODELLPARAMETER

**Tabelle 1:** Modellparameter, die den Kanalisationsabschnitt zwischen Schacht RS4943 und 3096 in Rümlang beschreiben.

TEMPEST	Dt. Bezeichnung	Wert	Einheit
<b>Sewer Node (Knoten)</b>			
Inflow Q <sub>Win</sub>	Zufluss	(Zeitreihe)	°C
Inflow Temperature T <sub>Win</sub>	Zuflusstemperatur	(Zeitreihe)	m <sup>3</sup> /s
Ambient Temperature T <sub>A</sub>	Umgebungstemperatur	8.3	°C
Ambient Rel. Humidity phi <sub>A</sub>	Relative Luftfeuchtigkeit Umgebung	0.75	-
Ambient Air Pressure T <sub>A</sub>	Luftdruck Umgebung	966	mbar
Air Exchange Coefficient b	Luftaustauschkoeffizient	0.1	-
<b>Sewer Pipe (Rohr)</b>			
Type	Typ	(Eintrag Bibliothek)	
Length L	Länge	1845	m
Nominal Diameter D	Nenndurchmesser	0.9	m
Wall Thickness s	Wanddicke	0.1	m
Slope S <sub>0</sub>	Steigung	0.00091	-
COD Degradation Rate r	Biologische Abbaurate	2.8	mg/(m <sup>3</sup> s)
<b>Soil (Boden)</b>			
Type	Typ	(Eintrag Bibliothek)	
Penetration Depth delta <sub>s</sub>	Eindringtiefe	0.1	m
Soil Temperature T <sub>S,inf</sub>	Bodentemperatur	5.5	°C

**Tabelle 2:** In der Rohr- bzw. der Bodenbibliothek gespeicherte Materialwerte.

Label	Friction Coefficient	Heat Conductivity	Thermal Diffusivity	Fouling Factor
Bezeichnung	Reibungskoeffizient	Wärmeleitungskoeffizient	Wärmediffusivität	
	[m <sup>1/3</sup> /s]	[W/m/K]	[m <sup>2</sup> /s]	[W/m <sup>2</sup> /K]
<b>Pipe Types (Rohrtypen)</b>				
Brick (Backstein)	60	1	0.63	200
Concrete, medium density (Beton, mittlere Dichte)	70	1.35	0.68	200
Concrete, reinforced, 1% steel (Armierter Beton, 1% Stahl)	70	2.3	1	200
Concrete, reinforced, 2% steel (Armierter Beton, 2% Stahl)	70	2.5	1.05	200
Rümlang, calibrated (Für den Kanalabschnitt in Rümlang kalibrierter Rohrtyp)	70	2.3	0.5	200
<b>Soil Types (Bodentypen)</b>				
Gravel, saturated (Wassergesättigter Kies)		0.5	0.6	
Sandy soil, 100% saturated (Wassergesättigter Sandboden)		2.2	0.74	
Sandy soil, 50% saturated (Zu 50% wassergesättigter Sandboden)		1.8	0.85	
Sandy soil, unsaturated (Ungesättigter Sandboden)		0.3	0.24	
Rümlang, calibrated (Für den Kanalabschnitt in Rümlang kalibrierter Bodentyp)		0.7	0.6	