

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

Professur Wasserbau

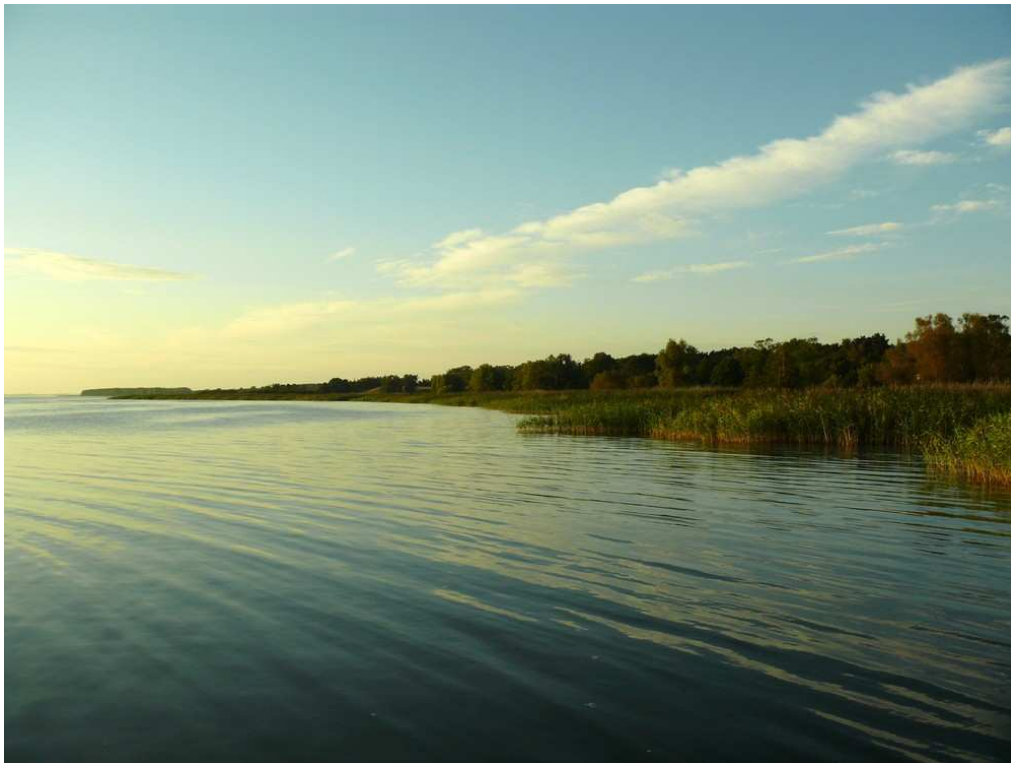


**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Verschiedenen Übersetzungen von TELEMAC-Benutzerhandbüchern

TELEMAC-2D, SISYPHE, TOMAWAC, MATISSE, FUDAA-PREPRO

(Teilen der Diplomarbeit von Jean Ostrovsky an der TU Dresden)



eingereicht von: Jean Ostrovsky

Betreuer: Dr.-Ing. habil. Dirk Carstensen

Dipl.-Ing. Tobias Gierra

Dresden, 22. Oktober 2011



Kurzfassung der Diplomarbeit

Schlagworte: Numerische Modellierung
TELEMAC-2D
X

Verfasser: Jean Ostrovsky

Titel der Diplomarbeit: X

Standort: TU Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Bibliographische Angaben: 2011, 85 Seiten (+Anhang 50 Seiten), 50 Abbildungen,
6 Tabellen

Danksagung

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Betreuern Dr.-Ing. Habil. Dirk Carstensen und Dipl.-Ing. Tobias Gierra, die mir die Bearbeitung dieser interessanten Aufgabe ermöglicht und den dafür benötigten Arbeitsplatz samt Ausstattung zur Verfügung gestellt haben. Die viele wertvollen Anregungen und Tipps zur numerischen Modellierung haben maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Für den Erfahrungsaustausch und prompte Aushilfe bei der Modellierung mit dem System TELEMAC danke ich Dipl.-Ing. Mourad Fezai, Dipl.-Ing. Christophe Coulet, Dr.-Ing. Pablo Tassi und besonders Dr.-Ing. Habil. Jean-Michel Hervouet.

Für die kritische Korrektur meiner deutscher Stilebene danke ich herzlich Herr Felix Tritschler und Frau Kathleen Möller.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis..... | II |
| Symbolverzeichnis | 3 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 5 |
| 1 Einleitung | 6 |
| 2 TELEMAC-2D..... | 7 |
| 2.1 Einleitung | 7 |
| 2.2 Projektverwaltung..... | 7 |
| 2.3 Datenspeicherung | 8 |
| 2.4 Pre-Processing..... | 8 |
| 2.5 TELEMAC-2D | 10 |
| 2.5.1 Einleitung..... | 10 |
| 2.5.2 Theoretischer Hintergrund..... | 12 |
| 2.6 Processing | 16 |
| 2.7 Das Geschiebetransportmodul SISYPHE | 22 |
| 2.7.1 Einleitung..... | 22 |
| 2.7.2 Genauigkeit und Begrenzung des Modells..... | 23 |
| 2.7.3 Berechnungsmethoden..... | 23 |
| 2.7.4 Theoretischer Hintergrund | 25 |
| 2.8 Das Wellenmodul TOMAWAC..... | 37 |
| 2.8.1 Einleitung..... | 37 |
| 2.8.2 Theoretischer Hintergrund | 41 |
| 2.9 Post-Processing | 44 |
| 3 Zusammenfassung und Ausblick | 46 |
| Literaturverzeichnis..... | 47 |

| | |
|--|-----------|
| Anhang | 49 |
| A Dateitypen..... | 50 |
| B Einfache Programminstallation des TELEMAC Systems 6.0 unter Windows ... | 52 |
| C Handhabung von der Netzerstellung-Software MATISSE | 55 |
| D Handhabung der Simulation 1 | 63 |
| E Handhabung der Simulation 2..... | 85 |
| F Plausibilitätsprüfung der in TELEMAC-2D berechnete Reibungs- geschwindigkeit..... | 97 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Pre-Processing des Systems TELEMAC..... | 9 |
| 2.2 | Beispiel eines Programmstartbefehls von TELEMAC-2D mit dem DOS Command..... | 16 |
| 2.3 | Einfaches Schema der Funktionsweise von TELEMAC-Modellen..... | 17 |
| 2.4 | Funktionsschema 1 von SISYPHE..... | 30 |
| 2.5 | Funktionsschema 2 von SISYPHE..... | 33 |
| 2.6 | Beispiel eines TOMAWAC anwendbaren Netz (Quelle: EDF)..... | 43 |
| 2.7 | Beispiel eines Netzes der Diskretisierung von dem Winkel und der Frequenz wie in TOMAWAC benutzt (hier mit 25 Frequenzen und 12 Richtungen)(Quelle: EDF)..... | 44 |
| 2.8 | Post-Processing des Systems TELEMAC..... | 45 |

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

| Symbol | Bezeichnung | Einheit |
|-------------------------|---|---|
| C | Schwebstoffkonzentration | kg/m^3 |
| C_f, C_d | dimensionslosen Reibungskoeffizienten | - |
| C_h | Chézy-Reibungskoeffizient | - |
| D_{50} | Korndurchmesser bei 50% Geschiebemischungskurve | m |
| f | Frequenz | s^{-1} |
| g | Erdbeschleunigung | m/s^2 |
| h | Wassertiefe | m |
| k | Wellennummer | - |
| k_{ST} | Strickler-Reibungskoeffizient | $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ |
| m | Manning-Reibungskoeffizient | $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ |
| n | Bodenporosität | - |
| Q_t | totale Sedimenttransport | $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ |
| Q_t | Resultierende Kraft aus Widerständen | kN/m |
| Q_t | Resultierende Kraft aus Widerständen | kN/m |
| s | relative Dichte | - |
| t | Zeit | s |
| T | Tracer | $^{\circ}\text{C}$ oder kg/m^3 |
| T | Periode | s |
| u, v | Komponenten nach x und y der Fließgeschwindigkeit | m/s |
| U | tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit | m/s |
| U^* | Sohlschubspannungsgeschwindigkeit | m/s |
| x, y | Koordinaten des kartesischen Systems | m |
| $Z_{\text{Oberfläche}}$ | Höhe des freien Wasserspiegels | m |
| Z_f | Bodenhöhe | m |
| Z_{Ref} | Referenzhöhe | m |

Griechische Buchstaben

| Symbol | Bezeichnung | Einheit |
|----------|------------------------------------|-------------------|
| θ | Richtungswinkel | °(Grad) |
| ρ | Flüssigkeitsdichte | kg/m ³ |
| ρ_w | Wasserdichte | kg/m ³ |
| ρ_s | Sedimentdichte | kg/m ³ |
| τ_0 | Sohlschubspannung | N/m ² |
| τ_w | welleninduzierte Sohlschubspannung | N/m ² |
| τ' | lokale Formwiderstand | N/m ² |
| τ'' | lokale Mantelreibung | N/m ² |
| τ_c | kritische Sohlschubspannung | N/m ² |
| ν | Viskosität | m ² /s |
| ω | Kreisfrequenz der Wellen | s ⁻¹ |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|--|
| 1D | eindimensional |
| 2D | zweidimensional |
| 3D | dreidimensional |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| CETMEF | Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales („Zentrum des Fluss- und Küstenstudien“) |
| CHC | Canadian Hydraulic Center |
| CPU | Central Processing Unit |
| d. h. | das heißt |
| EDF | Electricité de France |
| etc. | et cetera |
| GB | Gigabyte |
| IWD | Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik Dresden |
| LNHE | Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement („Nationaler Labor für Hydraulik und Umwelt“) |
| MB | Megabyte |
| R&D | Research and Development |
| TOMAWAC | TELEMAC-based Operational Model Addressing Wave Action Computation |
| SMS | Surface Water Modelling System |
| TU | Technische Universität |
| z.B. | zum Beispiel |

1 Einleitung

Telemac 2D ist ein Programmsystem, das ursprünglich für die Untersuchung von Dammbriichen entworfen wurde. Es besteht heutzutage aus verschiedenen koppelbaren Modulen, die ein vollständiges Abbild von Strömungen, Oberflächenwellen, Wasserqualität, Sedimenttransport und Morphologie in komplexen Küstengebieten geben sollen. Die Module, die zur Modellierung verwendet wurden, sind TELEMAT-2D und SISYPHE. Zusätzliche Programme zur Modellerstellung (MATISSE, FUDAA-PREPRO) und Auswertung der Ergebnisse (FUDAA-PREPRO) wurden genutzt.

2 TELEMAC-2D

2.1 Einleitung

Modelle wurden immer von den Menschen genutzt, um Phänomene besser zu verstehen. Heutzutage helfen die Mathematik, Physik und Informatik numerische Modelle zu bauen, damit zuverlässige Informationen über Phänomene, wie Strömungen, Sedimenttransport, Seegang, Wasserqualität oder Morphologie ermittelbar sind. TELEMAC ist ein Softwaresystem, das entwickelt wurde, um umweltbezogene Prozesse von instationären Strömungen mit freier Oberfläche zu studieren. Es ist deswegen auf Meer- und Küstengebiete, Ästuare, Flüsse und Seen anwendbar. Die hauptsächlichsten Anwendungsfelder sind Hydrodynamik, Wasserqualität, Sedimentologie und Wasserwellen. TELEMAC ist ein von der Laboratoire National d'Hydraulique, ein Departement von der Firma Electricité de France (R&D), entwickeltes integriertes Modellierungsprogramm für Strömungs- und Transportvorgänge im Wasser. Die Aufgaben des Pre-processings können mit den Programmen MATISSE, FUDAA-PREPRO und BLUE KENUE ausgeführt werden. Für das Post-processing stehen RUBENS sowie FUDAA-PREPRO und BLUE KENUE zur Verfügung.

Im Rahmen der Literaturrecherche über des Systems TELEMAC werden die Theorie und Anwendungsfälle der Modellen TELEMAC-2D, SISYPHE sowie TOMAWAC sowie die Handhabung der Software MATISSE und FUDAA-PREPRO in diesem Teil der Diplomarbeit zusammengefasst.

2.2 Projektverwaltung

Eine Simulation mit TELEMAC-2D benötigt verschiedene Daten: Daten im Textformat, welche die physikalischen und numerischen Parameter der Simulation angeben, und die binären Daten im TELEMAC-spezifizierten Seraphin Format, welche zum Beispiel die Bathymetrie, die anfänglichen Bedingungen oder die Ergebnisse angeben. Das Seraphin Format (*.ser) wird im Abschnitt 3.3 beschrieben.

Es ist möglich, eine Simulation mit Daten aus unterschiedlichen Verzeichnissen zu berechnen. Die Pfade der Daten müssen aber immer ohne Spatium wegen den Perl-Skripten gegeben werden. Um jedoch eine klare und ordentliche Projektverwaltung durchzuführen, wird für jedes Projekt ein neues Verzeichnis erstellt, wo all seine Daten gespeichert werden. In diesen Verzeichnissen werden die Daten verständliche Namen haben und für jeden vorbereitenden Schritt neu gespeichert werden.

Die Ergebnisdaten können manchmal eine problematische Größe (mehreren Gigabytes) erreichen, da sie das Dateisystem füllen können. Eine Lösung wäre, die Daten auf dem Netzwerk zu speichern. Die Daten, welche für die Auswertung nicht benötigt werden, werden gelöscht. Diese Lösung war aber in dieser Diplomarbeit nicht nötig, da die Ergebnisdaten selten mehr als 100 MB (maximal 1 GB) erreicht haben.

2.3 Datenspeicherung

Die Geometrie- und Ergebnis-Daten sind mit der eventuell vom Benutzer erstellten Fortran-Datei, welche das Code des TELEMAC-Modells zu verändern erlaubt, die einzigen Daten einer TELEMAC Simulation, welche nicht im Textformat sind.

Dieses Format Seraphin ist das standardisierte binäre Format des Systems TELEMAC. Es kann reelle Zahlen entweder als Fortran- „single“ oder „double precision“-Format speichern. Es enthält unter anderem:

- Name der Simulation,
- Typ des Formats der Zahlen („single“ oder „double precision“),
- Name und Einheit der Variablen,
- Koordinaten jedes Knotens und jedes Elements des Netzes,
- Anfangszeit der Simulation,
- Ergebnistabellen der Variablen zu jedem Zeitschritt an jeden Knoten.

2.4 Pre-Processing

Die Module des TELEMAC Systems basieren auf der Lösung partiell abgeleiteter Gleichungen durch die Finite-Elemente-Methode. Diese Methode beruht auf einer räumlichen Diskretisierung, dem numerischen Gitter des Rechengebietes. Dieses Gitter muss mehrere topografische Bedingungen und die Physik der Phänomene berücksichtigen können.

Es gibt im Systems TELEMAC zwei mögliche nutzbare Softwares, um ein Netz zu erstellen:

- MATISSE, die vom EDF erstellte offizielle Netz-Erstellung Software des Systems TELEMAC;
- BLUE KENUE, ein vom „Canadian Hydraulic Center“ (CHC) erstellte und frei herunterladbare Software für Datenvorbereitung, Analyse und Anzeige numerischer Simulationen, welche unter anderem mit dem Systems TELEMAC durchgeführt werden können. Diese Software wird nicht beschrieben, da sie in dieser Diplomarbeit nicht genutzt wird.

FUDAA-PREPRO soll in der Zukunft Netz-Erstellung durchführen, aber mit der aktuellen Version RC13 kann es das noch nicht.

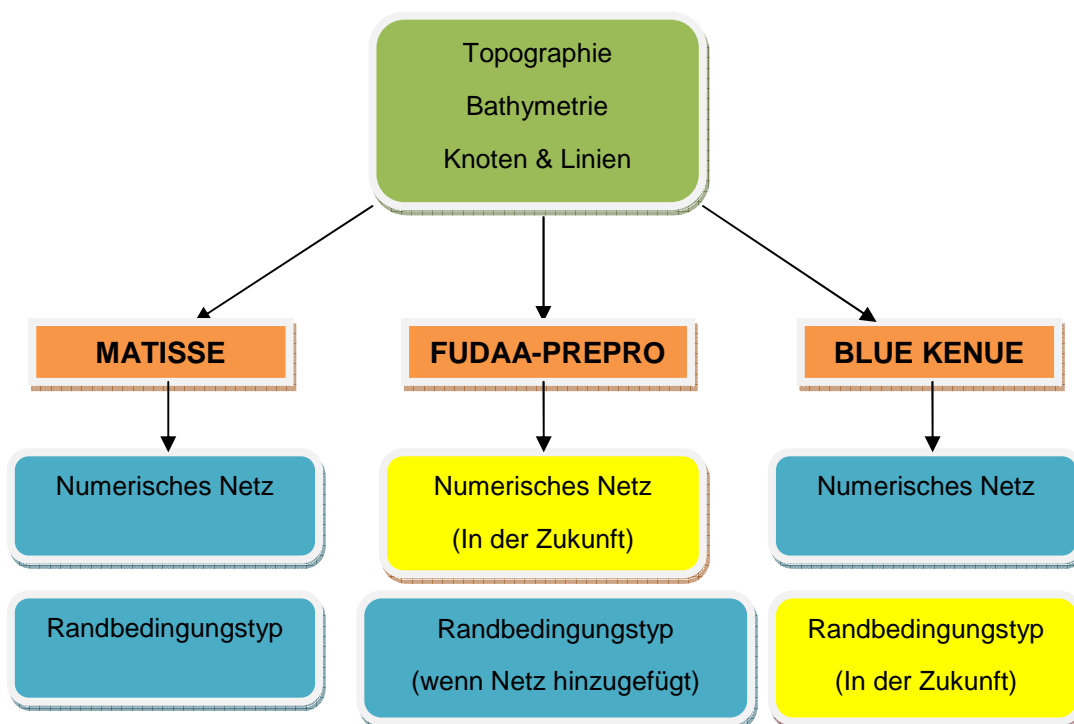


Abbildung 2.1: Pre-Processing des Systems TELEMAC

MATISSE ist eine von EDF erstellte Software, die zum Erstellen, Verändern und Darstellen des im TELEMAC-System Dreiecknetz genutzt werden kann. In MATISSE wird das numerische Gitter automatisch mit einem für hydrodynamischen und Transport-Gleichungen sogenannten „optimalen“ Triangulationsverfahren (Bragier, 1995) berechnet. Dieses Verfahren wird mit einer „Dichtekarte“ (unstrukturiertes Gitter) gesteuert, welche die lokalen Abstände zwischen Knoten als Funktion von physikalischen oder mathematischen Kriterien (z.B. Bathymetrie) beschreibt.

Obwohl das Gitter automatisch generiert wird, kann der Benutzer an verschiedenen Stellen aktiv eingreifen, um nähere Angaben zur Geometrie oder zur hydrodynamischen Behandlung des Problems zu machen. Zum Beispiel:

- Der äußeren Kontur des Rechengebietes,
- Den Inseln innerhalb des Rechengebietes,
- Geometrische Präzision ist zu berücksichtigen. Zum Beispiel Strukturformen, entweder aus dem Rechengebiet heraus, wie ein Brückenpfeiler oder hinein, wie eine Fahrrinne,
- Lokale Bathymetrie,

- Kriterien, um die lokale Knotendichte zu definieren. Die Bathymetrie ist immer als Kriterium berücksichtigt.

Die Netz-Erstellung ist jedoch nicht der einzige Zweck von MATISSE, da es ebenfalls die festen und flüssigen Randbedingungstypen definieren kann.

MATISSE wurde für jede Simulation dieser Diplomarbeit genutzt, deshalb wird im Anhang eine kurze Beschreibung ihres Funktionierens angelegt.

2.5 TELEMAC-2D

2.5.1 Einleitung

Die folgenden Informationen stammen aus dem Benutzerhandbuch und aus dem Theorie- Erklärungsbuch von TELEMAC-2D (EDF R&D, 2010).

Das TELEMAC System ist ein Satz von Finite-Elemente Programmen, das unter anderem für die Studien der instationären Strömungen mit freier Oberfläche entwickelt wurde. Die Programme nutzen eine Kette von gemeinsamen Prozessen (Digitalisierung und grafische Prozesse); es besteht aus 2D- und 3D-Modulen für die Studien von Strömungen, Sedimenttransport, Seegang und Wasserqualität. TELEMAC-2D, das erste Modul der Gruppe, gründet den Kern des Systems. Dieses Programm löst die 2D-Gleichungen von Barré de Saint-Venant (auch als „shallow water equations“ bekannt), und deswegen arbeitet es mit den prinzipiellen Variablen – den senkrechten Mittelwerten der Wassertiefe und der Geschwindigkeit, wobei aber auch der Transport eines passiven Tracer, sowie die Turbulenz berücksichtigt werden können. Die Gleichungen können in cartesianischen oder sphärischen Koordinaten abgebildet werden. Das Programm nutzt dreieckige Finite-Elemente Diskretisierung, und kann auch mit viereckigen (automatisch in dreieckige Elemente geteilte) Elementen berechnen. Die Verteilung von den Strömungen und Wasserspiegelhöhen sind an verschiedenen Zeitschritten eines simulierten hydro-klimatische Ereignisses berechnet.

Mit TELEMAC-2D können die folgenden Phänomene modelliert werden:

- Ausbreitung von langen Wellen, mit Berücksichtigung von nichtlinearen Effekten
- Räumlich variierende Sohlschubspannungen
- Auswirkungen der Erdrotation (Corioliskraft)
- Auswirkungen von meteorologische Faktoren: Atmosphärischer Druck und Wind
- Turbulenz

- Strömende und schießende Abflüsse
- Dichteströmungen durch ungleichförmige horizontale Temperatur- und Salzverteilungen
- Cartesianische und sphärische Koordinaten in großen Gebieten
- Trockenfallen und Überfluten von Watten und Flussauen
- Impulsströmungen und Diffusion von Tracer, mit Erstellung- und Verschwindensterme
- Monitoring von Schwimmer und lagrangianische Driften
- Verarbeitung von Wehren, Deichen, Rohrleitungen
- Berücksichtigung des Strömungswiderstands von vertikalen Strukturen
- Berücksichtigung der Porositätsphänomene
- Berücksichtigung der Seegangströmungen (Kopplung mit den Modulen ARTEMIS und TOMAWAC)
- Kopplung mit dem Geschiebetransport (Kopplung mit dem Modul SISYPHE)

Im Vergleich mit anderen Gleichungen funktionieren die Saint-Venant Gleichungen für kompressible Flüssigkeiten, und deswegen erlauben sie nicht kontinuierlichen Lösungen: die Wechselsprünge. Die zwei prinzipiellen Phänomene, die diese Gleichungen modellieren, sind die Advektion und die Ausbreitung von langen Wellen.

Während der Aufstellung und Lösung der verschiedenen Gleichungen in TELEMAC-2D werden Annahmen und Näherungen aufgestellt:

- Wegen der Bedingung von kleinen senkrechten Bewegungen wird die senkrechte Beschleunigung durch Druck mit der Erdbeschleunigung ausgeglichen eingeschätzt. Das meint, dass der Druck hydrostatisch ist. Es ist für die Aufstellung der Saint-Venant Gleichungen nicht nötig, aber es erlaubt den Druck in einen hydraulisches Potenzial zu konvertieren.
- Als Folge der ersten Näherung wird die senkrechte Geschwindigkeit in den Saint-Venant Gleichungen vernachlässigt.
- Der Boden und die Oberfläche werden für undurchlässig gehalten: so dass kein Wasser durch den Boden oder die Oberfläche fließt, und so dass ein Wasserpartikel, das auf einer dieser Flächen lokalisiert werden würde, dort bleibt. Diese Undurchlässigkeit wird im Fall der Existenz einer Quelle oder Spüle natürlich nicht mehr wahr sein.

- Im Gegensatz zu der horizontalen Dichte kann die senkrechte Variation der Dichte nicht berücksichtigt werden, da die Impulssätze tiefengemittelt sind. Die horizontale Dichte wird außerdem durch die Hypothese von Boussinesq mitbedacht. Die Variation der Dichte des Wassers hat zwei Folgen: die Dilatation des Wassers und die differenzialen Effekte der Erdbeschleunigung. Im Rahmen der Hypothese von Boussinesq wird der Salzgehalt nur in Bezug auf Erdbeschleunigungseffekte berücksichtigt. Die Dilatation des Wassers wird vernachlässigt.
- An den festen Grenzen des Netzes ist keine Bedingung für die Höhe nötig. Da sie für undurchlässig gehalten werden. Der Reibungskoeffizient soll von den Benutzern eingestellt werden, ansonsten wird er mit dem Turbulenzmodell berechnet.
- Bei Berechnungen im cartesianischen Koordinatensystem wird die Erdkrümmung vernachlässigt, und deswegen die Corioliskraft als konstant angenommen.

2.5.2 Theoretischer Hintergrund

Der TELEMAC-2D Code löst die im Jahr 1871 von Barré de Saint-Venant abgeleiteten tiefgemittelten Gleichungen von Strömungen mit freien Oberflächen. Die prinzipiellen Ergebnisse sind an jedem Knoten der numerischen Gitter die Wasserspiegelhöhe und die tiefgemittelte Geschwindigkeit.

Die Barré de Saint-Venant Gleichungen sind von tiefgemittelten, mit hydrostatische Druck von den Navier-Stockes Gleichungen abgeleitet.

Deswegen löst der TELEMAC-2D Code gleichzeitig die vier folgenden hydrodynamischen Gleichungen:

$$\text{Kontinuität: } \frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(h) + h \cdot \text{div}(\vec{u}) = S_h \quad (3.1)$$

$$\text{Impulssatz nach x: } \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} u) \quad (3.2)$$

$$\text{Impulssatz nach y: } \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(\mathbf{v}) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad (3.3)$$

$$\text{Tracerszustand: } \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} T) \quad (3.4)$$

in dem:

| | |
|---|---|
| h [m] | Wassertiefe |
| u, v $\left[\frac{m}{s}\right]$ | Geschwindigkeitskomponenten |
| T $\left[\frac{g}{L}\right]$ or $[^{\circ}C]$ | passiver (nicht schwimmfähiger) Tracer |
| g $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ | Erdbeschleunigung |
| v_t, v_T $\left[\frac{m^2}{s}\right]$ | Impuls- und Tracersdiffusionskoeffizient |
| Z [m] | freie Wasserspiegel |
| t [s] | Zeit |
| x, y [m] | horizontale Raumkoordinaten |
| Sh $\left[\frac{m}{s}\right]$ | Flüssigkeitsquelle oder -spüle |
| S_x, S_y $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ | Quelle- oder Spülterme in den dynamischen Gleichungen |
| ST $\left[\frac{g}{L} \cdot \frac{1}{s}\right]$ | Quelle oder Spüle für Tracers |

h, u, v und T sind die Unbekannten.

Die gegebenen Gleichungen sind mit cartesianischen Koordinaten geschrieben. Sie können auch mit sphärischen Koordinaten gerechnet werden.

Der Tracer stellt eine Temperatur oder eine andere passive physikalische Variable dar, die nicht die Strömungen verändert. Der Tracer kann benutzt werden, um thermische Dilution oder Strömungen von Verunreinigungen zu studieren. Der numerische Wert des Tracers ist jedoch tiefgemittelt und verhindert eine Darstellung der thermischen

oder Dichte- Schichtung. Die Evolution des Tracers ist von der Advektion, Dispersion, Diffusion und von der Quelle- und Spüle-Terme abhängig.

S_x and S_y (m/s²) sind Quellenterme, die der Wind, die Corioliskraft, die Reibungskraft oder ein Impuls einer Quelle oder Spüle in dem Gebiet darstellen. Die verschiedenen Terme dieser Gleichungen sind mit einem oder mehreren Schritten berechnet.

- Advektion von h , u , v und T ,
- Ausbreitung, Diffusion und Quellenterme von den dynamischen Gleichungen,
- Diffusion und Quellenterme von der Tracertransportgleichung.

Jeder dieser Schritte kann übersprungen werden, und in diesem Fall können unterschiedliche Gleichungen gelöst werden. Außerdem kann jede Variable h , u , v und T einzeln advektiert sein. Hierdurch ist es möglich, zum Beispiel eine Tracersadvektion und eine Diffusionsgleichung mit einem festen advektierenden Geschwindigkeitsfeld zu lösen.

Verschiedene zeitliche und räumliche Diskretisierungen werden genutzt, um die Gleichungen zu lösen. Die räumliche Diskretisierung basiert meistens auf der Galerkin Finite-Elemente Methode; die zeitliche Diskretisierung orientiert sich hauptsächlich an der Finite-Differenzen Methode. Eine Ableitung nach der Zeit t einer Funktion wird dann zu $\frac{f(t+1) - f(t)}{DT}$, wobei DT der Zeitschritt ist. Andere Varianten der räumlichen Finite-Elemente Methode bestehen in ihrer Variationsformulierung aus Ableitungen nach der Zeit.

Die Existenz eines Turbulenzmodelles ist in TELEMAC-2D relevant, so dass ein zeitlicher Mittelwert der Saint-Venant Gleichungen berechnet werden kann. Vier verschiedene Möglichkeiten sind in TELEMAC-2D anwendbar:

- Konstante Viskositätskoeffizient, die in diesem Fall die molekulare Viskosität, die turbulente Viskosität und die Dispersion darstellen würde.
- Das Modell von Elder.
- Das Modell von Smagorinsky.
- Das $k-\epsilon$ Modell.

Dieses letzte und wichtigste Turbulenzmodell von TELEMAC-2D ist für die Saint-Venant Gleichungen eine Erweiterung des klassischen Modells, wie das von Rastogi und Rodi (1978) entwickelt worden war.

Turbulente Viskosität kann von dem Nutzer oder von einem Simulationsmodell des Transportes der turbulenten Quantität k (turbulente kinetische Energie) und Epsilon (turbulente Auflösung) gegeben sein, für den sind die Gleichungen wie folgendes:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(k) = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left(h \frac{\nu_t}{\sigma_k} \vec{\nabla} k \right) + P - \varepsilon + P_{kV} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(\varepsilon) = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left(h \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \vec{\nabla} \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P - c_{2\varepsilon} \varepsilon) + P_{\varepsilon V} \quad (3.6)$$

Die rechtseitigen Terme dieser Gleichungen stellen die Herstellung und Zerstörung von turbulenten Quantitäten (Energie und Auflösung) dar. In jeder Gleichung ist der erste rechtseitige Term ein Diffusionsterm. P ist der horizontale Geschwindigkeitsgradient. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k und σ_ε sind empirische Konstanten.

Die Terme P_{kV} und $P_{\varepsilon V}$ stellen die senkrechten Scherspannungen dar und bestehen unter anderem aus dem Reibungskoeffizient c_f . Dieser Parameter wird von dem Benutzer mit seinen richtigen Reibungsformeln und Koeffizienten eingestellt. In TELEMAC-2D können die folgenden Reibungsansätze genutzt werden:

- Reibungsfrei

- Chézy $c_f = \frac{g}{C^2}$ (3.7)

- Strickler $c_f = \frac{g}{K^2 h^{1/3}}$ (3.8)

- Manning $c_f = \frac{gm^2}{h^{1/3}}$ (3.9)

- Nikuradse $c_f = \left[\frac{1}{K} \ln \left(11.0 \frac{h}{k_s} \right) \right]^{-2}$ (3.10)

$$- \text{ Colebrook-White} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log_{10} \left(\frac{R_u}{\alpha_f} + \frac{\beta_f}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.11)$$

$$- \text{ Haaland} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.8 \log_{10} \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{R_u}{3.7} \right)^{1.11} \right) \quad (3.12)$$

Das Log Gesetz wurde auch für die festen Randbedingungen genutzt.

Eine komplette Beschreibung dieser Theorie kann man in dem folgenden Buch finden: "Hydrodynamics of free surface flows", von Jean-Michel Hervouet aus der LNHE (Wiley, 2007).

2.6 Processing

Dos Command

Unter Windows startet man eine TELEMAC-Berechnung mit dem DOS Command (siehe Abbildung 3.2).

```
C:\Users\marc> cd C:\TELEMAC\Daten\Kruemmer
C:\TELEMAC\Daten\Kruemmer> telemac2d cas.txt
```

Abbildung 2.2: Beispiel eines Programmstartbefehls von TELEMAC-2D mit dem DOS Command.

Der erste Befehl „cd C:\Pfad“ erlaubt, zu dem richtigen Ordner, wo die Daten der Simulation gespeichert sind, zu gelangen. Der zweite Befehl „Name des TELEMAC-Modells + Name der Parameterdatei des Projekts“ ist der Startbefehl der Modelle des TELEMAC-Systems.

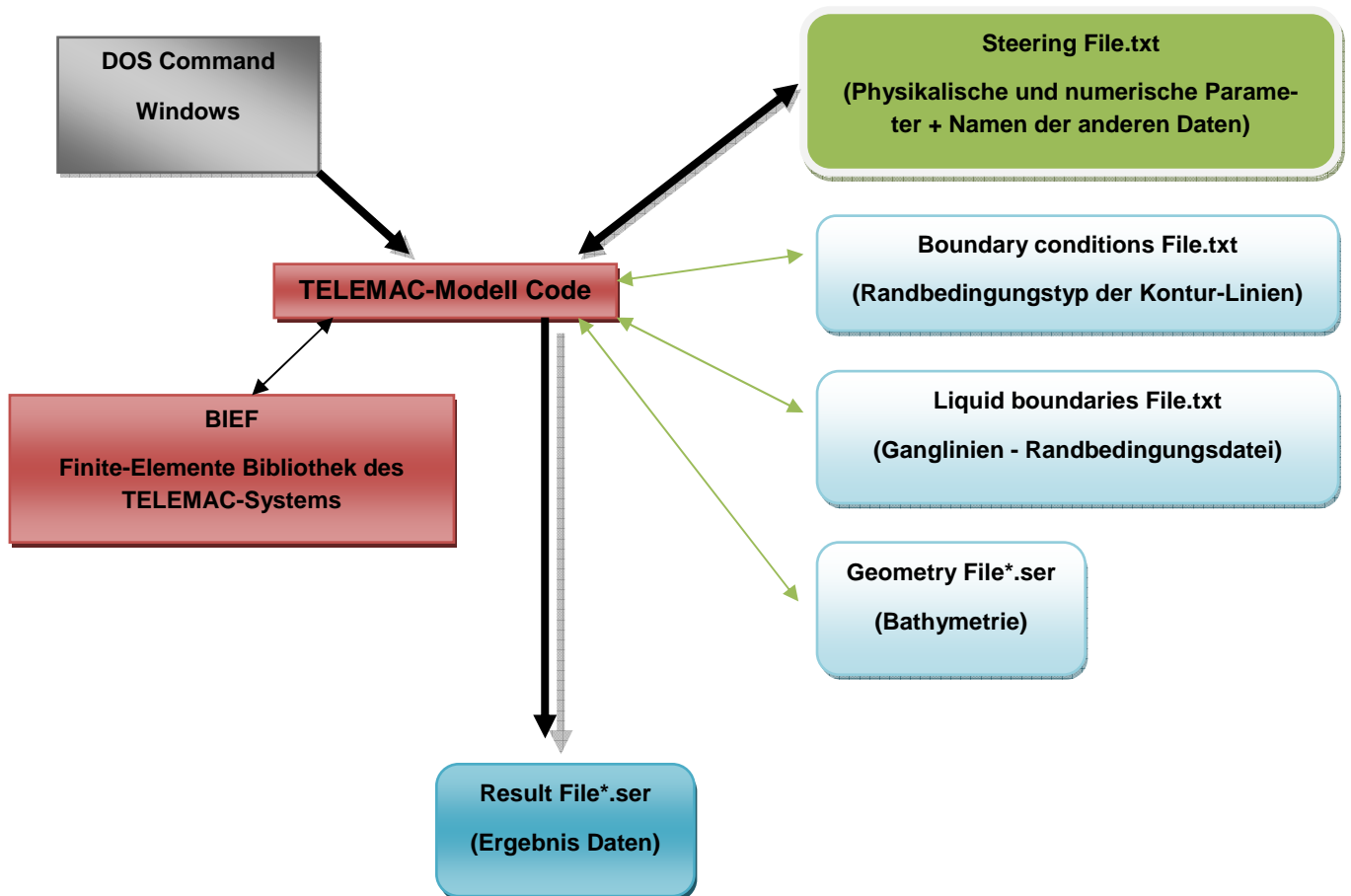


Abbildung 2.3: Einfaches Schema der Funktionsweise von TELEMAC-Modellen

Diese Abbildung zeigt nur ein Basis-Schema einer möglichen Simulation mit TELEMAC-2D.

Die Parameter-Datei ist die wichtigste Datei der Simulation. Sie enthält die Namen von allen anderen Daten, welche in der Simulation genutzt werden. Zusätzlich enthält sie die physikalischen und numerischen Parameter der Simulation. Die Parameter-Datei ist eine Textdatei, wo all diese Informationen über die Daten und Parameter durch Schlüsselwörter eingetragen werden (z.B. BOUNDARY CONDITIONS FILE = cas.conlim; SECONDARY CURRENTS = YES).

Die Anwendungsmöglichkeiten der Modelle TELEMAC-2D, SISYPHE und TOMAWAC, welche kurz und bündig im Abschnitt 3.5, 3.7 und 3.8 beschrieben sind, können alle durch Eintragung solcher Schlüsselwörter in der Parameter-Datei genutzt werden. Die benötigten Schlüsselwörter jeder Anwendungsmöglichkeit finden sich im entsprechenden Benutzerhandbuch des TELEMAC-Systems.

Die Geometrie-Datei ist eine binäre Seraphin-Datei, welche das Netz (Knoten, Elemente, Bathymetrie und mögliche Reibungskoeffizienten) enthält. Die Randbedingungstyp-Datei ist eine Textdatei. Sie enthält den Bedingungstyp jedes Kontur-Knotens in der

Form von einer Anzahltabelle. An jeder Linie der Tabelle wird der Bedingungstyp jedes Knotens durch eine Anzahlkombination beschrieben. Mehr Informationen finden sich im Anhang über MATISSE. Die Randbedingungs-Datei ist eine Textdatei, welche die Ganglinien enthält. Die Ergebnisdatei enthält die gewünschten Variablen an jedem Knoten des Netzes zu jedem gewünschten Zeitschritt. Sie ist eine binäre Seraphin-Datei. Beispiele eines jeden Textdateityps können im Anhang B gefunden werden.

FUDAA-PREPRO

FUDAA-PREPRO ist eine vom „Centre d’Etudes Techniques Maritimes et Fluviales“ (CETMEF – französisches BAW) mit Java-Code erstellte Software, welches das Processing und Post-Processing von TELEMAC-2D durchführen kann. Die während dieser Diplomarbeit aktuelle Version ist die Version RC13. Das Processing mit FUDAA-PREPRO ist für verschiedene Schritte hilfreich. FUDAA-PREPRO wird erlauben, die Bearbeitung des Berechnungsnetzes durch einen 2D-Editor durchzuführen und die Parametrisierung der TELEMAC-Simulation zu vereinfachen.

Im Lauf eines Projektes wird FUDAA-PREPRO:

- für die Erstellung eines Projektes automatisch eine Parameter-Datei, eine Randbedingungstyp-Datei und eine Randbedingungs-Datei erstellen.
- durch einen Schlüsselwort-Monitor eine komplette Auswahl der Schlüsselwörter in TELEMAC-2D anbieten, und die vom Benutzer modifizierten Schlüsselwörter automatisch in die Parameter-Datei schreiben. Dies funktioniert auch für die Namen und Pfade der zusätzlichen Daten (z.B. die Ergebnisdatei), welche durch einen Dateimanager gefunden werden können.
- im 2D-Editor die vom Benutzer veränderte Bathymetrie, die definierten anfänglichen Bedingungen, Randbedingungen (Typ und Ganglinien) und Reibungskoeffizienten in den richtigen Daten automatisch speichern.

Die Handhabung von FUDAA-PREPRO wird in dieser Diplomarbeit durch die Handhabung der erstellten Simulationen erklärt.

Benutzerschnittstelle

Projektbeschreibung

Dem Projekt kann durch das Schlüsselwort TITLE ein Name gegeben werden. FUDAA-PREPRO gibt zusätzlich die Möglichkeit, ein Beschreibungstext des Projektes zu verfassen.

Anfängliche Bedingungen

Anfängliche Wasserstände und Wassertiefen können durch Schlüsselwörter oder durch die neue Programmierung des Codes eingetragen werden. Eine Berechnung kann durch verschiedene Simulationen weiter geführt werden, da eine Ergebnisdatei als Startdatei einer Simulation genutzt werden kann. FUDAA-PREPRO gibt die zusätzliche Möglichkeit, einen anfänglichen Wassertand mit einem Gefälle als Startdatei zu erstellen.

Randbedingungen

Strömungsbedingungen können an offenen Modellrändern angegeben werden. Die Randbedingungen (Wassertiefe, Geschwindigkeitskomponenten oder Durchfluss, Tracer) werden an jedem Knoten mit MATISSE oder FUDAA-PREPRO definiert. Die Bedingungen können mit unterschiedlichen Mitteln abhängig von ihrer Natur definiert werden:

- Zeitunabhängige und raumunabhängige Bedingungen > Schlüsselwörter
- Zeitabhängige und raumunabhängige Bedingungen > Schlüsselwörter oder Randbedingungsdatei.
- Raumabhängige Bedingungen > Programmierung des TELEMAC-Codes

An einem offenen Rand kann die Bedingung als strikt betrachtet werden, d.h. die eingetragenen Werte werden auf jeden Fall erfordert. TELEMAC bietet für die offenen Ränder, wo die Bedingungen nicht exakt bekannt sind, auch die Möglichkeit an, die Thompson-Methode zu nutzen. Die Bedingungen werden angepasst, so dass die Berechnung z.B. für die Massenbilanz kohärenter sein wird.

Zeitraumen

Der Zeitschritt wird in Sekunden eingetragen. Er kann automatisch berechnet werden, so dass im Modell die Courant-Zahl den vom Benutzer gegebenen Wert nie überschreitet. Die Dauer der Simulation kann entweder in Sekunden oder durch die Zahl der gewünschten Zeitschritte angegeben werden. TELEMAC wählt zwischen den beiden Angaben die größere Dauer. Das Datum und die Uhrzeit der Anfangszeit können eingetragen werden.

Allgemeine Parametrisierung

TELEMAC bietet die Möglichkeit an, die Berechnung, wenn das System stationär ist, zu stoppen. „Stationär“ heißt, dass das System an zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten an jeden Knoten dasselbe ist. Kontrollquerschnitte können auch definiert werden, um den Durchfluss zu berechnen.

Physikalische Einflussgrößen

Verschiedene Turbulenzmodelle und Reibungsgesetze werden zur Auswahl angeboten. Es kann auch Bewuchs berücksichtigt werden, dessen Höhe immer größer als die Wassertiefe ist. Konstante Größen wie die Dichte der Luft und des Wassers oder die Schwerkraft und zeitabhängige Größen wie der atmosphärische Druck und der Wind können ebenfalls vom Benutzer eingetragen werden. In ausgedehnten Gebieten kann auch die Coriolis-Kraft betrachtet werden. Beim Eintragen der geographischen Länge, des Datums und der Uhrzeit der Simulation können für Küstenbereiche die Gezeiten-erzeugenden Kräfte berücksichtigt werden (TELEMAC berechnet die Lage der Sonne und des Mondes). Außerdem können Senkrechte Bauwerke (z.B. Brückenpfeiler) eingetragen werden.

Numerische Einflussgrößen

TELEMAC-2D erlaubt mehrere unterschiedliche Durchführungen der Berechnungen. Die St-Venant-Gleichungen können wahlweise durch die Finite-Elemente- oder die Finite-Volume-Methode gelöst werden. Es ist auch möglich, die Boussinesq-Gleichungen zu lösen. Die räumliche Diskretisierung der Wassertiefe und der Geschwindigkeit kann linear oder quadratisch berechnet werden. Es gibt auch verschiedene Optionen, um die Ausbreitungs-, Diffusions- und Konvektions-Schritte der Berechnung durchzuführen. Die Courant-Zahl kann während der Simulation kontrolliert werden. Watten („tidal flats“) können von einer speziellen Berechnung profitieren.

Tracer-Transport

Es können passive Tracern, welche ihrer Definition nach keinen Einfluss auf die Hydrodynamik haben (z.B. Nitrat-Konzentration), berücksichtigt werden. Wenn es sich um den Salzgehalt des Wassers handelt, kann TELEMAC-2D die horizontalen Gradienten der Dichte des Wassers berücksichtigen. Tracer-Konzentrationen können an den anfänglichen Bedingungen sowie an den Randbedingungen definiert werden. Quellen können an den Knoten des Netzes erstellt werden. Das vom niederländischen Unternehmen *Deltares* erstellte Programm DELWAQ kann auch im Rahmen des TELEMAC-Systems für die Wasserqualität genutzt werden.

Schwimmer und Lagrange-Driften

Die Benutzung eines Schwimmers erlaubt, seinen Kurs grafisch darzustellen. Die Berechnung der Lagrange-Driften wird das Umstellen jedes Knotens des Netzes zwischen zwei gegebenen Zeiten darstellen.

Quellen und Senken

Quellen, wie z.B. Abwassereinmündungen, können an jedem Knoten des Netzes konfiguriert werden. Die Bedingungen der Quellen wie der Durchfluss und/oder die Tracer-Konzentrationen werden in der Quellen-Datei hinzugefügt. Senken (Düsen und Saugheber) können auch auf dem Netz definiert werden.

Wehre

Einfache horizontale Wehre können zwischen zwei Linien (flussaufwärts und flussabwärts) definiert werden.

Gekoppelte Berechnungen

Die Seegang-induzierten Strömungen und die Sedimenttransport-induzierten Sohlveränderungen können in der hydrodynamischen Berechnung bei Kopplung mit den anderen Wellenmodulen TOMAWAC (nur in der letzten Version 6.1) und dem Sedimenttransportmodul SISYPHE des TELEMAC-Systems berücksichtigt werden. Anstelle einer gekoppelten Berechnung kann eine Ergebnisdatei von SISYPHE, TOMAWAC und auch des Wellenmoduls ARTEMIS eingetragen werden.

Parallele Berechnungen

Für die Simulationen, welchen eine große Berechnungsmacht brauchen, kann TELEMAC-2D durch parallele Berechnungen auf einem Rechner mit verschiedenen Prozessoren oder auf verschiedenen Rechnern arbeiten.

Ergebnisausgabe

TELEMAC-2D bietet mehrere Ausgabevariablen an, welche grafisch und numerisch (durch z.B. Ausgabertextdaten der Kontrollquerschnitte) gespeichert werden: Wassertiefe, Wasserstand, Fließgeschwindigkeit, Courant-Zahl, Froude-Zahl, Sohlhöhe, Luftdruck, Reibungskoeffizient, Reibungsgeschwindigkeit, Tracer, turbulente Viskosität des K-Epsilon Modells, turbulente kinetische Energie k, ihre turbulente Auflösung Epsilon. Die während der Simulation an jeden Knoten berechneten maximalen Fließgeschwindigkeiten und Wasserstände und die Zeiten, wann sie auftreten, können auch als Ausgabevariablen definiert werden. Die Periode der Speicherung der Ausgabevariablen kann vom Benutzer definiert werden.

2.7 Das Geschiebetransportmodul SISYPHE

2.7.1 Einleitung

Dieser Teil der Diplomarbeit enthält Informationen des Benutzerhandbuchs von SISYPHE (EDF, 2010).

SISYPHE ist ein morphodynamisches Feststofftransportmodell, das einen Teil des Finite-Elemente-Systems TELEMAC darstellt. In diesem Modell wird der Feststofftransport, der in Geschiebe- und Schwebstofftransport zerlegt ist, als Funktion von verschiedenen Durchfluss- und Sediment-Parametern (einerseits Geschwindigkeit, Wassertiefe, Wellenhöhe, etc. und andererseits Korngröße, relative Dichte, Sinkgeschwindigkeit, etc.) an jedem Knoten des numerischen Gitters berechnet. Der Geschiebetransport wird mit klassischen Transportgleichungen aus der Literatur berechnet (Meyer-Peter, Einstein-Brown, etc.) ausgeführt. Der Schwebstoff wird durch die Lösung einer Transportgleichung für tiefengemittelte Schwebstoffkonzentrationen ermittelt. Die Gleichung für Sohlveränderungen (Exner-Gleichung) kann danach mit einer Finite-Elemente- oder Finite-Volumen-Methode gelöst werden.

Dieses Modell ist für Sand sowie kohäsive Sedimente oder Schlamm-Sand Mischungen anwendbar. Die Sediment-Zusammensetzung wird durch eine endliche Anzahl von Klassen vertreten, welche jeweils von ihren mittleren Durchmessern, Korndichten und Sinkgeschwindigkeiten charakterisiert werden. Sedimenttransport-Berechnungen können auch die Wirkung des Bodengefälles, festen Bodens, Sekundärströmungen, Sedimentrutschen, etc. einbezogen werden. Für kohäsive oder gemischte Sedimente kann auch die Wirkung der Bodenkonsolidierung berücksichtigt werden.

SISYPHE ist bei vielen Gewässern anwendbar, wie zum Beispiel Flüsse, Ästuare oder Küstengebiete, da sowohl Wellenwirkungen als auch Gezeitenströmungen berücksichtigt werden können. Die Sohlschubspannung, welche in Mantelreibung und Formwiderstand aufgeteilt ist, kann entweder mit einem Reibungskoeffizient oder mit einem Sohlreibungsprädiktor berechnet werden.

SISYPHE berechnet nicht das Strömungsfeld: die relevanten hydrodynamischen Variablen können entweder in dem Modell erfordert, oder durch eine hydrodynamischen Simulation (gekoppelt oder nacheinander) berechnet werden. Es ist einfacher, eines der hydrodynamischen Module des TELEMAC Systems (nämlich TELEMAC-2D oder -3D und TOMAWAC für Wellen) aus Gründen der Kompatibilität (gleiche Netz, gleiche Pre- und Post-Prozessor...) zu verwenden, jedoch kann der Benutzer auch ein anderes hydrodynamisches Modell wählen.

2.7.2 Genauigkeit und Begrenzung des Modells

Die Genauigkeit des Modells ist durch mehreren Fehler- oder Unsicherheitsquellen begrenzt:

- Die Genauigkeit der empirischen Transportformeln;
- Die Empfindlichkeit des Feststofftransportes in Bezug auf hydrodynamische Variablen wie Strömungsgeschwindigkeit oder Reibungskoeffizient;
- Die Qualität des Ergebnisses ist entscheidend abhängig von der Qualität der anfänglichen Bathymetrie und Interpolation der Dateien auf dem Dreiecks-Elemente-Gitter;
- In den Küstengebieten: die Geschiebetransporte während Ebbe und Flut gleichen sich im Allgemeinen aus. Bei Berechnung kann dieser Effekt in kumulierten numerischen Fehlern und anderen Unsicherheitsquellen versteckt sein;
- Die Sohlveränderung, die nicht aus dem Transport aber aus seiner räumlichen Variation resultiert;
- Die empirische Natur der Sandtransportberechnung mit Kornverteilung-Effekt (Korrektionsfaktoren);
- Die empirische Natur der Erosion-Ablagerung Transportberechnung für die Berechnung der Schwebstofftransport.

Deswegen ist es einerseits wichtig eine gute Schätzung der Empfindlichkeit der Input-Parameter durchzuführen. Es wird dringend empfohlen, die Modelergebnisse mit Messungen zu vergleichen, wenn dies möglich ist. Eine Kalibrierung der letzten Sohlveränderungen ist nötig, um zu wissen, wie genau (und ob) das Modell die zukünftigen Entwicklungen überhaupt berechnen kann.

Andererseits, wenn man die Effekte von neuen Strukturen betrachten möchte, ist die schnelle Sedimententwicklung durch Effekte erster Ordnung wie den Strömungsgradienten verursacht. Eine gute Schätzung wird erreicht, da die anderen nichtsimulierten Faktoren wenig Einfluss auf die Sohlveränderung haben.

2.7.3 Berechnungsmethoden

Es gibt zwei Methoden um SISYPHE zu nutzen. Die erste Methode (die „Kettenmethode“) verwendet das hydrodynamische Berechnungsergebnis als Eingabedatei von SISYPHE. Die zweite Methode (die „Kopplungsmethode“) basiert auf einer gekoppelten Berechnung.

In der Kettenmethode rechnen die zwei Modelle TELEMAC-2D (oder -3D) und SISYPHE unabhängig voneinander. In der zuerst durchgeführten hydrodynamischen Simulation wird der Boden als fest angenommen. Der darauf folgenden morphodynamischen Simulation liegen die zeitlichen Durchflüsse und Wasserspiegel-lager aus der hydrodynamischen Simulation zu Grunde. Diese Methode kann nur für einfache Strömungsfälle genutzt werden, da ausreichend großer Unterschied in der Zeitskalierung zwischen Hydrodynamik und Sohlveränderung benötigt wird. SISYPHE kann für instabile Gezeitenströmungen auch genutzt werden: das Strömungsfeld wird zwischen zwei Zeitschritten der hydrodynamischen Eingabedatei linear interpoliert. Für stationäre Strömungen wird der letzte Zeitschritt genommen, der Durchfluss und die Wasseroberfläche werden als Konstanten angesehen, während der Sohle sich umformen kann.

Zu jedem Zeitschritt wird die Wassergeschwindigkeit durch die Annahme aktualisiert, dass der Durchfluss und die Wasseroberfläche konstant sind. Infolgedessen ist die Geschwindigkeit im Fall von Sedimentation lokal erhöht und im Fall von Erosion lokal reduziert. Diese Aktualisierung berücksichtigt keine Anpassung der Strömung. Es ist nur für einfache Fälle (2D) unter Annahme kleinerer Sohlveränderungen anwendbar. Diese Methode kann für numerische Instabilität verantwortlich sein (Hervouet und Villaret, 2004). Die morphodynamische Berechnung wird gestoppt, wenn die Sohlveränderung einen bestimmten Anteil der ursprünglichen Wassertiefe erreicht, bei dem die Aktualisierung des Strömungsfelds nicht mehr gültig ist. Dieser Anteil ist von dem Benutzer ($x\%$ der Wassertiefe) zu definieren. Es ist in diesem Fall besser die hydrodynamische Simulation neu zu berechnen. Bei dieser einfachen Methode ist auch zu berücksichtigen, dass die Kontinuität der Geschiebemasse nicht immer gewährleistet sein kann, weil die Sohlveränderung Strömungsänderungen aufgrund von Druckverlusten induziert.

Für eine realistischere Simulation ist die zweite Methode vorzuziehen. SISYPHE kann automatisch mit dem hydrodynamischen Model TELEMAC-2D oder -3D gekoppelt werden. Man braucht dafür keinen extra Datenaustausch, da alles intern verknüpft ist.

Zu jedem Zeitschritt werden die hydrodynamischen Variablen (Geschwindigkeitsfeld, Wassertiefe, Sohlschubspannung,...) an das morphodynamische Modell übermittelt, welches dann die aktualisierten Bodenveränderungen zurückgibt.

Die Kopplungsmethode braucht mehr Rechenzeit (Hauptprozessor-Zeit) als die Kettenmethode. Es existiert verschiedenen Techniken, um die Rechenzeit zu reduzieren, z.B. durch parallele Berechnungen. Es ist auch möglich den Geschiebe nicht an jedem Zeitschritt zu berechnen (Coupling period > 1). Der Zeitschritt der Geschiebeberechnung ist dann gleich als der Zeitschritt von TELEMAC multipliziert mit der gegebenen Kopplungsperiode. Für den Schwebstoff muss eine Transport/Diffusion-Gleichung berechnet werden. Diese Gleichung benötigt dieselbe Courant-Zahl wie bei der hydrodynamischen Berechnung. Deshalb muss der Schwebstoff zu jedem Zeitschritt berechnet werden (Coupling period = 1).

2.7.4 Theoretischer Hintergrund

Feine Sedimentpartikel mit Durchmessern kleiner als 60 μm besitzen komplexe kohäsive Eigenschaften, welche die Feststofftransport-Prozesse beeinflussen.

Für nichtkohäsive Sedimente ($D_{50} > 60 \mu\text{m}$, D_{50} ist der Korndurchmesser bei 50% Geschiebemischungskurve) sind die Korngröße und die Dichte ρ_s die wichtigsten Parameter, welche ihren Feststofftransport und Erosionswiderstand festlegen. Für kohäsive Sedimente ($D_{50} < 60 \mu\text{m}$) ist die Korngröße nicht mehr der Schlüsselparameter:

Die Sinkgeschwindigkeit ist nun von der Konzentration und anderen physikalisch-chemischen Eigenschaften der flockungsinduzierten Suspension abhängig, während die kritische Sohlschubspannung von der Konsolidierung des Sedimentbodens abhängig ist.

Wir werden jetzt eine einfache Fall von gleichförmigen nichtbindigen Sedimenten durch einen einzigen Korndurchmesser D_{50} und eine Dichte ρ_s charakterisiert. Der Fall für bindigen und gemischten Sedimente wird nachher erklärt.

Die strömungsinduzierte Sohlschubspannung wird sowohl in der Saint Venant-Impulsgleichung als auch in den Bodenrandbedingungen des Geschwindigkeitsprofils benutzt.

Wenn SISYPHE mit TELEMAC-2D gekoppelt ist, wird die Sohlschubspannung τ_0 zu jedem SISYPHE-Zeitschritt mit der tiefengemittelten Wassergeschwindigkeit unter Verwendung eines Reibungskoeffizienten C_d berechnet.

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot U^2 \quad (3.13)$$

Mit: ρ Flüssigkeitsdichte

U tiefengemittelte Geschwindigkeit

Die Intensität der Sohlschubspannung wird in 2D- und 3D-Modellen mit denselben Reibungsgesetzen berechnet.

Ihre Intensität ist auf die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit bezogen, außer wenn das Nikuradse-Gesetz gilt. In 3D-Modellen ist die Sohlschubspannung unter Annahme eines logarithmischen Profils auf die bodennahe Geschwindigkeit bezogen, während in 2D-Modellen das logarithmische Profil bis zur Oberfläche als gültig angesehen wird.

Im Fall von Nikuradse ist die Intensität auf eine bodennahe Geschwindigkeit unter Annahme eines logarithmischen Profils der Geschwindigkeit bezogen.

Die Richtung der Sohlschubspannung und des resultierenden Geschiebetransports ist in der Richtung der tiefengemittelte Geschwindigkeit in SISYPHE (allein oder mit TELEMAC-2D gekoppelt) berücksichtigt. Wenn SISYPHE mit TELEMAC-3D gekoppelt ist, entspricht die Richtung dieser Variablen der Richtung der bodennahen Fließgeschwindigkeit. Das 3D-Modell liefert eine präzise Schätzung der Sohlreibung, da es vertikalen Drehungen der Strömung berücksichtigen kann.

Die Sohlschubspannung ist der wichtigste hydrodynamische Parameter bei der Transportberechnung nichtbindigen Sedimente. Angesichts einer oder mehreren Bodenformen ist die Sohlschubspannung in zwei Komponenten geteilt: die lokale Formwiderstand τ' und die lokale Mantelreibung τ'' :

$$\tau_0 = \tau' + \tau'' \quad (3.14)$$

Die lokale Mantelreibungs-Komponente bestimmt den Geschiebetransport und die Gleichgewichtskonzentration der Suspension (Konzentration des Schwebstoffs an eine theoretische Grenze zwischen Geschiebe und Schwebstoff). Die totale Sohlschubspannung bestimmt die Wirbelviskosität.

Wenn die strömungsinduzierte Sohlschubspannung ihren kritischen Wert überschreitet, fangen Sedimentpartikeln des Geschiebes an, sich zu bewegen. Zur selben Zeit werden die feinsten Partikel als Schwebstoff transportiert. Der Geschiebetransport findet in einer sehr kleinen und sohlnahen konzentrierte Schicht statt, wo Zusammenstöße und Wechselwirkungen zwischen Körnern auftreten. Der Schwebstofftransport ist als tiefengemittelter Strömung der Sedimentkonzentration vom obersten Teil der Geschiebeschicht bis zur freien Wasseroberfläche definiert. Für verdünnte Suspensionen wird die Strömungstheorie (Turbulenzdiffusion, Wirbelviskosität, logarithmisches Geschwindigkeitsprofil) als gültig betrachtet.

Der totale Feststofftransport Q_t setzt sich aus einer Geschiebe-Komponente Q_b und einer Schwebstoff-Komponente Q_s zusammen:

$$Q_t = Q_b + Q_s \quad (3.15)$$

Verschiedene theoretische Transportgleichungen brauchen eine kritische Sohlschubspannung τ_c als Anfangsbedingung der Erosion:

$$Q_s = 0 \text{ für } \tau_0 < \tau_c \quad (3.16)$$

In SISYPHE wird die kritische Sohlschubspannung entweder mit der Gleichung von Shield (Shield-Parameter) oder durch eine dimensionslose Korngröße und die Van Rijn-Gleichungen berechnet.

Die dimensionslose kritische Schubspannung θ_c oder Shield-Parameter ist definiert als:

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w) \cdot D_{50}} \quad (3.17)$$

Die Van Rijn-Gleichungen mit der dimensionslosen Korngröße D^* :

| | | |
|---------------------|------------------------------------|--------|
| $D^* \leq 4$ | $\theta_c = 0,24 \cdot D^{*-1}$ | |
| $4 < D^* \leq 10$ | $\theta_c = 0,14 \cdot D^{*-0.64}$ | |
| $10 < D^* \leq 20$ | $\theta_c = 0,04 \cdot D^{*-0.1}$ | |
| $20 < D^* \leq 150$ | $\theta_c = 0,013 \cdot D^{*0.29}$ | |
| $150 \leq D^*$ | $\theta_c = 0,045$ | (3.18) |

Mit D^* definiert zu:
$$D^* = \left(\frac{g(s-1)}{v^2} \right)^{1/3} \cdot D_{50} \quad (3.19)$$

Mit: $s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ relative Dichte

v Viskosität

SISYPHE stellt eine Auswahl mehrerer Transportraten-Formeln aus der Literatur zur Verfügung. Für Strömungen und gleichförmige Korngröße kann man zwischen 10 verschiedenen Formeln wählen:

- Meyer-Peter
- Einstein-Brown
- Engelund-Hansen
- Van Rijn : Vorsicht die Formel ist in v6.1 falsch !
- Sind auch für Strömungen und gleichförmige Korngröße anwendbar die Transportformeln, welchen die Welleneffekte oder Kornverteilung berücksichtigen. Sie sind später in diesem Teil der Diplomarbeit genannt.

Diesen Formeln sind allen detailliert in dem Benutzerhandbuch von SISYPHE dokumentiert.

Diesen Gleichungen wurden empirisch für stationäre Strömungsbedingungen aufgestellt. Abhängig von der verwendeten Formeln variiert die Transportrate mit der Strömungsintensität sehr stark (EDF): eine Erhöhung der Geschwindigkeit von 10% resultiert in einer Erhöhung der Transportrate von 30% mit Meyer-Peter, 60% mit Engelund-Hansen oder 80% mit Einstein-Brown.

Einerseits wird sich jeder Fehler der hydrodynamischen Berechnung in der Schätzung der Transportrate schnell fortgepflanzt. Andererseits wird der gemittelte Transport in

nichtstationären Strömungen durch die stärksten Strömungen beeinflusst, und wird so nicht direkt mit der mittleren Strömung bezogen sein.

In SISYPHE werden Korrekturfaktoren auf die Transportraten angewendet, um verschiedene Effekte zu berücksichtigen:

- Schrägboden-Effekte: die Gefälle der Sohle erhöht dem Geschiebetransport nach unten und verringert ihn nach oben. Eine Korrekturfaktor ist in SISYPHE auf die Richtung und den Wert von der Sohl Schubspannung angewendet, bevor dass man die Gleichung der Sohlveränderung löst;
- Sedimentrutschen: ein Algorithmus verhindert, dass die Sohlgefälle größer als den Reibungswinkel des Sediment wird;
- Sekundärströmungen: In gewundenen Strömungen treten zentrifugalen Kräfte auf, welchen eine quere Zirkulation induzieren. Diese Geschwindigkeitsspirale kann leider nicht beim 2-dimensionale Berechnungen dargestellt sein;
- fester Boden: feste Sohle induziert eine Verringerung des Geschiebetransports und lässt die ankommende Sedimente auf ihn passen;
- Watten: hier ist bei Watten gemeint, die Bereiche wo das Wasser sehr flach ist („tidal flats“). Im TELEMAC Systems können zwei Optionen gewählt. Die Erste ist auf die ganzen Punkte des Netzes eine minimale Wassertiefe (1 mm) zu berücksichtigen. Diese Option ist empfohlen. In der Zweite werden die Punkte mit eine nulle Wassertiefe nicht in dem Berechnungselemente berücksichtigt.

Die ausführlichen Beschreibungen dieser Faktoren sind im Benutzerhandbuch verfügbar. Eine weitere Möglichkeit, um zum Beispiel der Effekt von Rippelmarken zu berücksichtigen, ist es, den Reibungsprädiktor von SISYPHE zu nutzen. Der Reibungsprädiktor kann trotzdem nicht bei der Kopplungsberechnung verwendet werden. Strömungs- und Welleneffekte werden berücksichtigt.

Abhängig von dem Verhalten des Schwebstoffes gibt es zwei Berechnungsfälle. Der erste Fall ist, wenn es nur Geschiebetransport und keinen Schwebstofftransport, oder Schwebstofftransport mit quasi-stationären und gleichförmigen Strömungsbedingungen gibt. Dann werden Geschiebe- und Schwebstofftransport zusammen berechnet. Der zweite Fall ist, wenn es zusätzlich zum Geschiebetransport auch Schwebstofftransport mit nichtstationären Transportbedingungen gibt. Dann werden Geschiebe- und Schwebstofftransport getrennt berechnet.

Im Fall eine quasi-stationäre und gleichförmigen Schwebstofftransport werden die Gleichgewichtsbedingungen als gültig betrachten. Die Gleichgewichtsbedingungen bedeuten, dass der Geschiebetransport in einer hochkonzentrierten bodennahen Schicht stattfindet. Deswegen passt sich die Geschiebeschicht sehr schnell an jede Änderung in den Strömungsbedingungen an, so dass die Gleichgewichtsbedingungen als gültig angenommen werden können. Der Geschiebetransport kann dann mit klassischen „ausgeglichenen“ Transportformeln als Funktion der Strömungs- und Sedimentparameter berechnet werden. Die Sättigungsbedingungen werden für den Geschiebetransport als gültig angesehen.

Wenn nur der Geschiebetransport berücksichtigt wird, löst SISYPHE die Exner-Gleichung, um die Sohlveränderung zu berechnen:

$$(1 - n) \cdot \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{Q}_b) = 0 \quad (3.20)$$

Mit : n Bodenporosität ($n \sim 0.4$ für nichtkohäsiven Sedimenten),

Z_f Sohlhöhe,

$Q_b \left[\frac{m^3}{s \cdot m} \right]$ Geschiebetransport pro Breiteeinheit.

Die Gleichung zeigt, dass die Variation der Schichtbreite der Sedimente aus einer einfachen Massenbilanz abgeleitet werden kann. Sie ist nur für Geschiebetransport unter Gleichgewichtsbedingungen gültig. Dennoch kann wie oben erwähnt, die Gleichung für den ganzen Feststofftransport (auch mit Schwebstoff) mit quasi-stationären und gleichförmigen Strömungsbedingungen gelten.

Zeitschritt n - - - - -

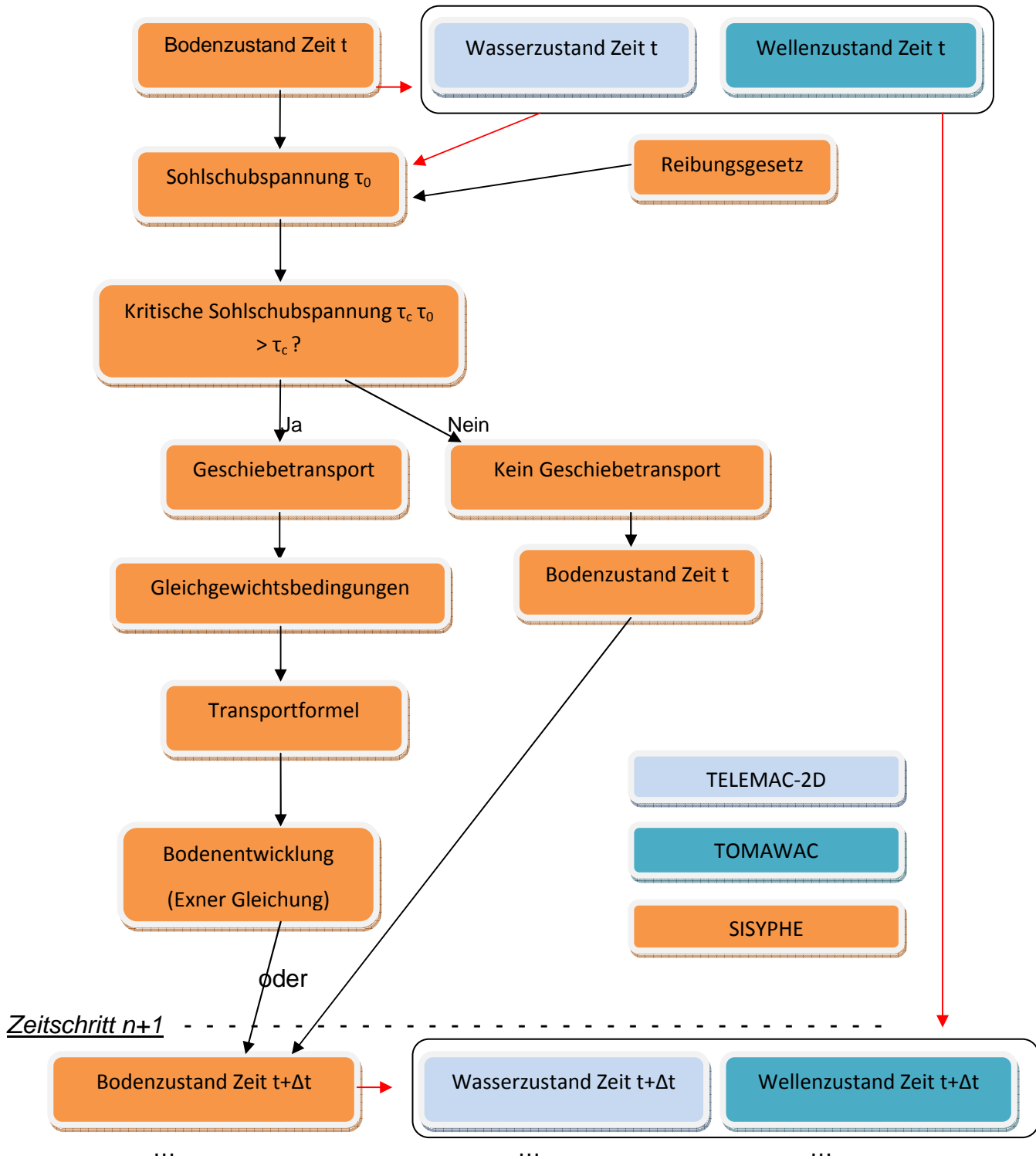


Abbildung 2.4: Funktionsschema 1 von SISYPHE,

Geschiebetransport und Schwebstofftransport in quasi-stationären und gleich-förmigen Strömungsbedingungen. Coupling Period = 1.

Für nicht ausgeglichene Bedingungen erfordern Geschiebe und Schwebstoff unterschiedliche Behandlung. Die Schnittstelle zwischen Geschiebe und Schwebstoff ist bei der Höhe $z = Z_{ref}$ lokalisiert. Die Referenzhöhe Z_{ref} entspricht (theoretisch) der Höhe der Grenze zwischen Geschiebeschicht und Schwebstoffschicht.

- In der kleinen hochkonzentrierten Geschiebeschicht ($z < Z_{ref}$) modifizieren die Partikel-Partikel-Wechselwirkungen die Strömungsstruktur stark. Gleichgewichts-Bedingungen sind jedoch eine gute Annahme um den Geschiebetransport mit der strömungsinduzierte Sohlschubspannung in Verbindung zu bringen.
- In dem obersten Teil der Strömung sind die Theorien der Strömungen für verdünnte Suspensionen ($z > Z_{ref}$) noch anwendbar und die Sedimentkörner sind als passive Einzelwerte berücksichtigt, die denn gemittelten bzw. turbulenten Geschwindigkeiten mit einem addierten Sinkgeschwindigkeitsterm folgen.

Die in SISYPHE verwendete 3D-Advektions-Diffusions-Gleichung für die Schwebstoffkonzentration C ist:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div} \left((\vec{U} + \vec{W}_s) \cdot C \right) = \text{div}(\epsilon_s \cdot \vec{\nabla} C) \quad (3.21)$$

Mit: ϵ_s Diffusionsfähigkeitskoeffizient des Sediments.

Und mit der folgenden Grenzbedingungen:

$$\begin{cases} \epsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} + W_s C = 0 & \text{bei } z = Z_{Oberfläche} \\ -\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} - W_s C = (E - D)_{Z_{ref}} & \text{bei } z = Z_{ref} \end{cases} \quad (3.22)$$

Die Sinkgeschwindigkeit W_s ist ein wichtiger Parameter für die Suspension. Sie wird als Funktion der Korngröße unter Verwendung einer semi-empirischen Formel von Van Rijn berechnet. Die Geschwindigkeit der Partikel U_p wird folgendermaßen notiert:

$$\vec{U}_p = \vec{U} + \vec{W}_s \quad (3.23)$$

Mit: U gemittelte Strömungsgeschwindigkeit.

Für nichtkohäsive Sedimente stammt der Erosionsfeststofftransport E minus dem Ablagerungsfeststofftransport D aus der Gleichgewichtskonzentrations-Theorie (Celik und Rodi, 1988):

$$(E - D)_{Z_{ref}} = W_s (C_{eq} - C_{Z_{ref}}) \quad (3.24)$$

Mit: C_{eq} bodennahe Gleichgewichtskonzentration

$C_{z,ref}$ die Konzentration an der Grenze zwischen Geschiebe und Schwebstoff bei $z = Z_{ref}$.

C_{eq} kann durch zwei empirischen Formeln, die in SISYPHE einprogrammiert sind, berechnet werden: Zyserman-Fredsoe (1994) und Bijker (1992). Die Gleichgewichtskonzentration C_{eq} entspricht der Volumenkonzentration am obersten Teil der Geschiebeschicht.

Die Gleichung der durch Schwebstofftransport induzierten Sohlveränderung gibt die Sedimentflüsse an der Grenze zwischen Geschiebe und Schwebstoff:

$$(1 - n) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + (E - D) = 0 \quad (3.25)$$

Mit: n Bodenporosität

Z_f Bodenhöhe

$(E - D)$ Erosionsfeststofftransport minus dem Ablagerungsfeststofftransport. $(E - D)$ hat die Einheit [m/s], und aus Homogenitätsgründen sind die Porosität und die Konzentration dimensionslos.

Zeitschritt n - - - - -

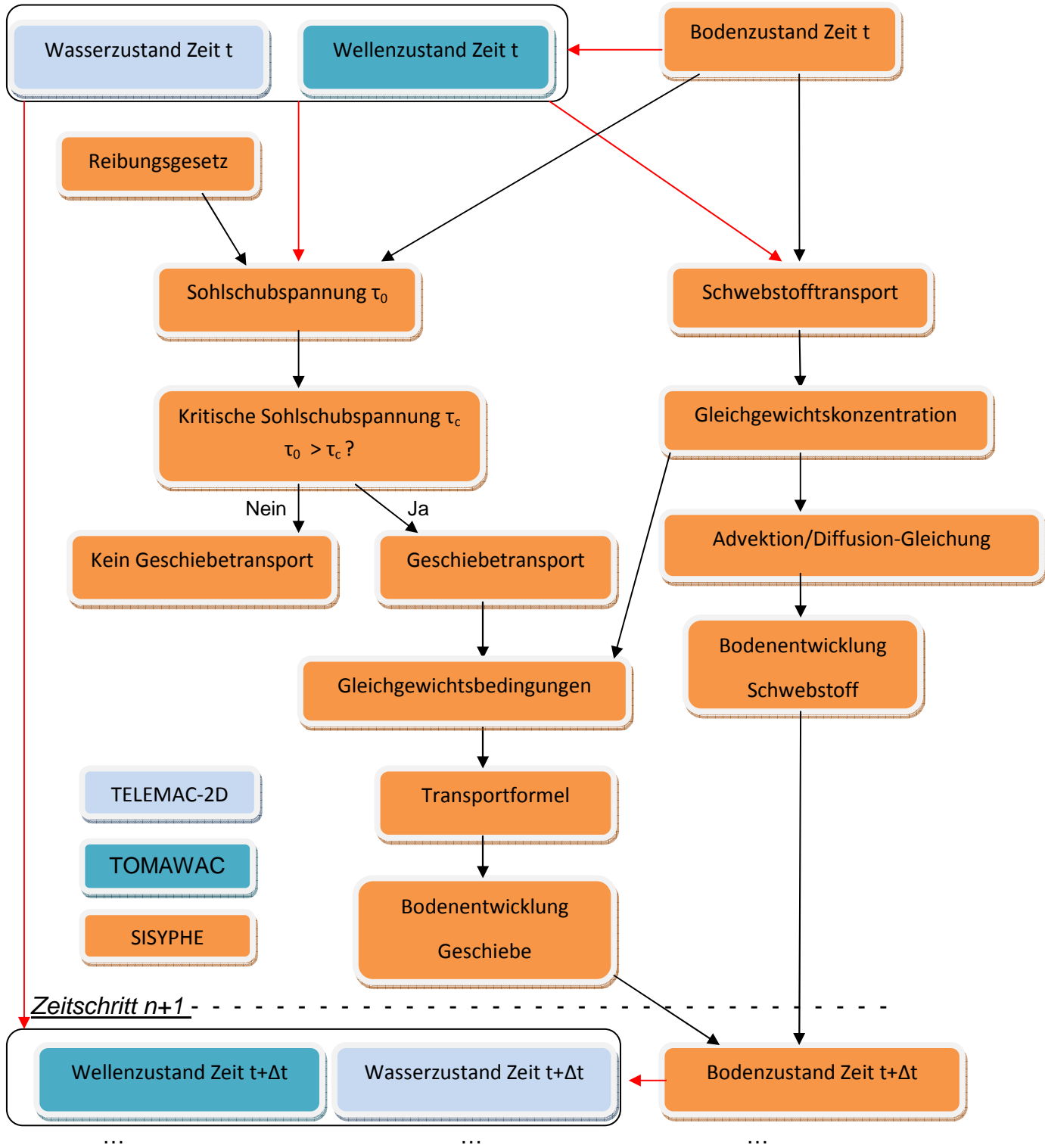


Abbildung 2.5: Funktionsschema 2 von SISYPHE,

Geschiebetransport und Schwebstofftransport mit nichtstationären Strömungsbedingungen.
Coupling Period = 1.

Für nichtbindige Sedimentmischungen diskretisiert SISYPHE die Kornverteilung in einen vom Benutzer gegebenen Anzahl N von Kornklassen. Jede Klasse j ($j \in \llbracket 1; N \rrbracket$) wird bei ihrem „mittleren“ Korndurchmesser $D_{50}(j)$ und an jedem Knoten bei ihrem Sedimentvolumenfraktion (im Prozent) definiert.

Die Sohle wird in einen vom Benutzer gegebenen Anzahl k von Schichten getrennt. Die oberste Schicht ist die aktive Schicht, in welcher die Zusammenstellung der transportierten Sedimente und der Sedimenttransport berechnet werden. Die zweite oberste Schicht ist die Unterstützungsschicht, welche mit der aktiven Schicht Sedimente austauscht, so dass die aktive Schicht immer dieselbe Breite behält. Die Breite der aktiven Schicht ist abhängig von der Strömungen und Sedimenttransportparametern. Die Methode der aktiven Schicht stammt aus der Methode von Hirano (1972).

Transportraten sind für jede Sedimentklasse mit für Sedimentmischung angepassten Transportformeln getrennt berechnet. Die Exner-Gleichung ist für jede Klasse gelöst. Die von jeder Klasse induzierten Sohlveränderungen werden dann addiziert, um die allgemeine Sohländerung anzugeben.

Ebenso wird der Schwebstofftransport für jede Klasse getrennt berechnet. Die resultierende schwebstoffinduzierte Sohlveränderung ist eine Überlagerung der verschiedenen, durch jede Schwebstoffklasse induzierten Sohlveränderungen.

Außer den die klassischen Transportformel, welche für die Korngrößen der verschiedenen Klassen funktionieren können, ist die Formel von Hunziker (1995) in SISYPHE anwendbar. Es ist die Formel von Meyer-Peter, welche für Sedimente mit Kornverteilung angepasst ist.

SISYPHE berechnet auch den Transport von bindigen Sedimente. Die Erosion und Ablagerung der bindigen und regelmäßigen Sedimente wird mit den klassischen Formeln von Krone und Partheniades ermittelt:

$$\begin{cases} E = M \left[\left(\frac{u_*}{u_{*e}} \right)^2 - 1 \right] & \text{für } u_* > u_{*e} \\ D = W_S C \left[1 - \left(\frac{u_*}{u_{*d}} \right)^2 \right] & \text{für } u_* > u_{*d} \end{cases} \quad (3.26)$$

Mit: u_* Reibungsgeschwindigkeit

u_{*e} kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für Erosion

u_{*d} kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für Ablagerung

M Partheniades Parameter, seine Einheit muss mit der Einheit der Konzentration übereinstimmen.

Die Konsolidierungseffekte der bindigen Sedimente können in SISYPHE berücksichtigt werden. Konsolidierung ist, wenn die bodennahe Konzentration der Sedimente steigt, infolge deren eine senkrechte Schichtung der ablagernden Sedimente auftritt.

In SISYPHE wird noch einmal die Sohle in einer vom Benutzer gegebenen Anzahl von Schichten geteilt. In jeder Schicht wird die Konzentration als konstant betrachtet. Die Konzentration steigt senkrecht von der obersten Schicht bis zur Untersten. Die Breite der Schichte wird sich verändern. Die Konsolidierungseffekte werden unter Annahme modelliert, dass der Sedimentübertragung von einer Schicht i zu ihrer unteren Schicht $i+1$ mit der Sedimentmasse der ersten Schicht proportional ist.

$$\frac{dm_i}{dt} = a_i m_i \quad (3.27)$$

Der Sedimentübertragungskoeffizient a_i muss vom Benutzer gegeben sein. Obwohl er einfach ist, gibt der Konsolidierungsalgorithmus ein kohärentes Ergebnis und garantiert die Massenerhaltung. Die Ergebnisse sind sehr sensibel, und der schwierigste Teil der Parametrisierung ist, die Sedimentübertragungskoeffizienten richtig zu kalibrieren. Heutzutage ist ein eher physikalischer Konsolidierungs-Algorithmus entwickelt worden.

Eine Mischung aus bindigen und nichtbindigen Sedimente kann in SISYPHE modelliert werden. Diese ganz neue Entwicklung des SISYPHE-Codes braucht noch getestet und verbessert werden. Mehr Informationen können im benutzerhandbuch von SISYPHE gefunden werden.

In Küstengebieten überlagern sich Effekte der Wellen- sowie Gezeiten-induzierten Strömungen. Beide beeinflussen die Struktur der Bodenschicht. Da diese Schicht sehr dünn ist, sind Sohl Schubspannung und die resultierende Transportrate im Vergleich mit dem Fall „nur Strömungen“ verstärkt. Zusätzlich haben die Rippelmarken einen starken Einfluss auf die Sohlreibung und den Mechanismus des Sandtransports.

Um die Welleneffekte auf den Feststofftransport zu berücksichtigen, kann der Benutzer entweder die Wellenparameter manuell in SISYPHE eingeben, oder mit einem Ergebnis von TOMAWAC arbeiten. Dies macht eine zweite Datei zusätzlich zu der von TELEMAC-2D oder -3D notwendig. Die Datei der TOMAWAC Simulation kann in die hydrodynamische Datei integriert werden. Diese Möglichkeit wird für nichtstationären Fälle empfohlen.

In beiden Fällen benötigt SISYPHE für die morphodynamische Simulation die signifikante Wellenhöhe H_s , die Peakperiode T_p und wenn nötig (z.B. Bailard Formel) die Wellenrichtungswinkel θ_w .

SISYPHE kann die Wellenorbitale im Rahmen der linearen Theorie berechnen.

$$U_0 = \frac{H_s \omega}{2 \sinh(kh)} \quad (3.28)$$

Mit: $\omega = \frac{2\pi}{T_p}$ Kreisfrequenz der Wellen

$k = \frac{2\pi}{L}$ Wellennummer mit L die Wellenlänge. k wird mit der Dispersionsgleichung berechnet: $\omega^2 = gk \tanh(kh)$

Die maximale welleninduzierte Sohlschubspannung wird zu jedem Zeitschritt als Funktion der orbitalen Geschwindigkeit U_w mit Hilfe des quadratischen Reibungskoeffizienten f_w berechnet:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_w \cdot U_w^2 \quad (3.29)$$

Mit: f_w Funktion der relativen Dichte wird mit der Swart-Formel berechnet.

Für kombinierte Wellen- und Strömungseffekte sind, wie oben gesagt, die Schubspannungen τ_{cw} größer als wenn es nur Strömungseffekte gibt.

Die Methode von Bijker mit $\tau_{cw} = \tau_c + \frac{1}{2} \tau_w$ (3.30) wird benutzt, wobei τ_c und τ_w die Strömungs- und Wellen-induzierten Sohlschubspannungen sind. Die Methode von Soulsby, welche in dem unterschiedlich berechneten Koeffizient f_w die Strömungs- und Welleneffekte berücksichtigen wird, ist ebenfalls in SISYPHE anwendbar, und in dem Benutzerhandbuch detailliert.

Unter einer Schwingungsbedingung und ohne die strömungsinduzierten Effekte zu berücksichtigen, können die Rippelmarkendimensionen durch die Methode von Wiberg und Harris (1994) mit Hilfe der orbitalen Geschwindigkeit U_0 , der Wellenperiode T_w und der spezifischen Korngröße D_{50} berechnet werden.

Transportformeln, welche Strömungs- und Welleneffekte berücksichtigen, werden, wie oben gesagt, dafür benutzt, um den Geschiebetransport und den Schwebstofftransport zu berechnen:

- Bijker;
- Soulsby-Van Rijn;
- Bailard;
- Dibajnia-Watanabe.

Diesen Formeln sind allen detailliert in dem Benutzerhandbuch von SISYPHE dokumentiert.

2.8 Das Wellenmodul TOMAWAC

2.8.1 Einleitung

Die folgenden Informationen stammen aus dem Benutzerhandbuch von TOMAWAC (EDF, 2010).

TOMAWAC ist eine wissenschaftliche Software, welche für ozeanische Bereiche sowie intrakontinentale Meeres- und Küstengebiete die räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Leistungsspektren von windinduzierten Wasserwellen sowie der Wellenbewegungen modelliert. Das Akronym TOMAWAC leitet sich aus dem englischen Titel "TELEMAC-based Operational Model Addressing Wave Action Computation" ab.

TOMAWAC ist ein Teilprogramm des Systems TELEMAC (Hervouet, 2007), welches an dem R&D Labor „Laboratoire National d’Hydraulique et Environnement“ der Firma EDF entwickelt wurde.

TOMAWAC modelliert den Meereszustand durch Lösung der Bilanzgleichung des Spektrums der Wirkungsdichte. Um diesen Zweck zu erfüllen, rechnet das Modell die Veränderungen des Wirkungsdichtespektrums an jedem Knoten desselben numerischen Gitters wie in TELEMAC-2D. In TOMAWAC ist das Wellenrichtungsspektrum in eine endliche Anzahl von Ausbreitungsfrequenzen f_i und Richtungen θ_i verteilt. Die Bilanzgleichung der Wirkungsdichte der Wellen wird für jede Komponente (f_i, θ_i) gelöst. Das Modell ist ein so genanntes Modell der dritten Generation, da es keine Parametrisierung der spektralen oder gerichteten Verteilung der Leistung (oder Wirkungsdichte) benötigt. Jede Komponente des Wirkungsdichtespektrums verändert sich im Lauf der Zeit.

TOMAWAC kann in drei Anwendungsfällen genutzt werden:

1. Klimatische Wellenvorhersage aus der Windvorhersage, welche für ein paar Tage Gültigkeit besitzt.
2. Retrospektive Modellierung eines außergewöhnlichen Ereignisses, welches einem oder mehreren Bauwerken geschadet hat, und dessen Datensatz unvollständig ist.
3. Studien über Küsten- sowie Offshore-Gebiete für die Klimaforschung oder für die Berücksichtigung des Wellenzustands während normaler und extremer Wetterereignisse im Rahmen einer Dimensionierungsstudie (Hafenbau, morphodynamische Küstenentwicklungen, etc.)

Während der Entwicklung dieses Modells wurden hauptsächlich die zwei letzten Anwendungsfälle getestet. Es wurde auch die Möglichkeit berücksichtigt, Forschungsaktivitäten in folgenden Bereichen durchführen zu können:

- Wechselwirkungen zwischen Wellen und Strömungen und zwischen Wellen und Erhöhungen besonders in Seegebieten mit signifikanten Gezeitenwirkungen;
- Küstenmorphodynamik;
- Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen in Küstengebieten;
- Küstenstabilität und Küstenschutz;
- Berücksichtigung von Wind- und Wellendatensätzen während der Berechnung.

Wie im ersten Abschnitt beschrieben, ist der Zweck von TOMAWAC die Modellierung von zeitlichen und räumlichen Veränderungen der Meeresoberflächenwellen. Dabei sind die grundlegenden physikalischen Phänomene die Wasserwellen oder der Meereszustand, wobei diese zwei Terme hier als identisch angesehen werden. Die Wasserwelle entspricht im Allgemeinen der windinduzierte Oberflächenwelle von Seegebieten. Ihre Periode T reicht typischerweise von 2.5 bis 25 s, das heißt wird ihre Frequenz $f = \frac{1}{T}$ wird zwischen 0.04 und 0.4 Hz liegen. Der Meereszustand kann unterschiedliche Formen annehmen, die abhängig vom Wetter (ruhiges Meer oder Sturm) oder von der Wellennatur (Seegang oder Dünung) sind.

Eine Wasserwelle kann mittels einer einfachen sinusoidalen Beschreibung physikalisch dargestellt werden, sie ist dann eine ebene (eine Ausbreitungsrichtung) und monochromatische (eine Periode) Welle. In der Realität gibt es auf der Wasseroberfläche mehrere Wellen mit unterschiedlichen Perioden und Ausbreitungsrichtungen. Die Wasserwellenenergie verteilt sich auf eine Reihe von Frequenzen (unregelmäßige Wellen) und auf eine Reihe von Ausbreitungsrichtungen (Mehrrichtungswellen). Eigentlich ist das Leistungsspektrum für beiden Ausbreitungsrichtungen und Frequenzen eine kontinuierliche Funktion. Die Wellen werden in den Gleichungen mit dem Wirkungsdichtespektrum $N(t, x, y, f_r, \theta_i)$ dargestellt. In TOMAWAC ist dies eine Funktion von 5 Variablen: t die Zeit, (x, y) die räumliche Koordinaten, und (f_r, θ_i) die relative Frequenz und die Ausbreitungsrichtung.

TOMAWAC ist vom Ozean bis zum Küstengebiet anwendbar. Das Anwendungsgebiet ist durch die relative Tiefe $\frac{d}{L}$ begrenzt. d ist die Wassertiefe in Meter. L ist die Wellenlänge entsprechend der Spitzspektralfrequenz für unregelmäßige Wellen.

Das Anwendungsgebiet von TOMAWAC entspricht:

- **Der ozeanischen Domäne**, welche durch große Wassertiefen gekennzeichnet (i.e. $\frac{d}{L} > 0,5$) ist. Die prinzipiellen physikalischen Phänomene sind windinduzierte Wellenerzeugung, Verlustleistung durch Gischt, und nichtlineare Wechselwirkungen.
- **Den kontinentalen Seen und den mittleren Wassertiefen**, die durch eine relative Wassertiefe zwischen 0,05 und 0,5 gekennzeichnet sind. Neben den oben genannten Phänomenen, werden dabei der Sohlwiderstand, der Shoaling-Effekt (Wellenänderung durch Sohlerrhöhung), als auch bathymetrie- und/oder strömungsinduzierte Refraktions-Effekte berücksichtigt.
- **Dem Küstengebiet**, einschließlich den Untiefen und ufernahen Bereiche, in welchen die relative Wassertiefe kleiner als 0,05 ist. Für diese Flachwassergebiete sollten auch Sohlwiderstand, bathymetrieinduzierte Brechen der Wellen, sowie nichtlineare Wechselwirkungen zwischen Wellen berücksichtigt werden. Außerdem können Strömungseffekten und veränderliche Wasserspiegel-lager durch Gezeiten und/oder Sturmfluten eine Rolle spielen.

Durch eine sogenannte Finite-Elemente-Methoden-Diskretisierung (die gleiche, welche bei TELEMAC-2D genutzt wird), kann ein numerisches Gitter Zellen enthalten, deren Größen-Verhältnis zwischen der kleinsten und größten Zellenoberflächen 100 erreichen oder überschreiten kann. Deswegen kann TOMAWAC auf Gebiete, welche große Variation in der Wassertiefe haben, angewendet werden. Küstengebiete können besonders genau dargestellt werden.

Das Anwendungsgebiet von TOMAWAC umfasst nicht **Hafengebiete** oder allgemein die Modellierungsfälle, in welchen man die Reflexion und/oder die Diffraktion **an Bauwerken** nicht vernachlässigen kann. Für solche Gebiete ist das Modul des TELEMAC Systems ARTEMIS geeignet.

Verschiedenen Faktoren sind an der Entstehung eines Wellenzustands beteiligt. Der Einfluss jedes Faktors ist von den Eigenschaften der Wellen abhängig.

Die prinzipiellen Faktoren sind:

- Bathymetrie (Sohlwiderstand, Refraktion, Wellenbrechen, nichtlineare Wechselwirkungen mit der Sohle, Rippelmarken, etc.);
- Atmosphärische Zirkulation (Wind- und Luftdruck-Effekte);
- Gezeiten (Wassertiefe- und Strömungsänderungen);
- 3-dimensionale ozeanische Strömungszirkulation;
- Außergewöhnliche wetterinduzierte Wasserstandsänderungen (Sturm, Flutwelle).

Die exakte Modellierung der meist komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren und den Wellen sind aktuelle Themen verschiedener Forschungsprojekte. In

dem oben beschriebenen Anwendungsgebiet von TOMAWAC können verschiedene Wechselwirkungen modelliert werden:

- **Wechselwirkungen zwischen Wellen und Bathymetrie:** das Relief ist zeitunabhängig im Gegensatz zu dem Meeresspiegel. Neben der Meeresspiegeländerung berücksichtigt TOMAWAC auch die Refraktion, den Sohlwiderstand, den Shoaling-Effekt und das shoalingsinduzierte Brechen der Wellen;
- **Wechselwirkungen zwischen Wellen und Atmosphäre:** diese Wechselwirkung ist das Hauptphänomen in der Wellenerzeugung, und hat Anteil an den Energieverlustprozessen (Gischt, Wellenausbreitung gegen die Windrichtung, etc.) und in der Energieübertragung. Um das instabile Verhalten dieser Wechselwirkung darzustellen, braucht TOMAWAC mindestens 10 Meter Windfeld (Festlegung der zwei horizontalen Geschwindigkeitskomponenten) mit einem Zeitschritt, welcher an das modellierte Wetterereignis angepasst ist. Diese Windfelder können von einem meteorologischen Modell oder von Satellitenmessungen zur Verfügung gestellt werden.
- **Wechselwirkungen zwischen Wellen und Strömungen:** die gezeiten- oder zirkulationsinduzierten Meeresströmungen können entsprechend ihrer Intensität die Wellen erheblich beeinflussen. Sie verändern die refraktive Wellenausbreitungsrichtung, reduzieren oder erhöhen die Wellenhöhe entsprechend ihrer Ausbreitungsrichtung im Vergleich mit derjenigen der Wellen, und können die Wellenperioden beeinflussen, wenn diese ein deutlich instationäres Verhalten aufweisen. In TOMAWAC wird das aktuelle Strömungsfeld durch die horizontalen Komponenten der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit an den Knoten des Rengitters ins Modell eingespeist. TOMAWAC erlaubt es durch den Doppler-Effekt, durch instationäre Strömungen sowie durch heterogene aktuelle Strömungsfelder verursachte Frequenzänderungen zu modellieren.

Die oben genannten von TOMAWAC berücksichtigten Prozesse modifizieren die totale Wellenenergie sowie die Verteilung des Richtungsspektrums dieser Energie (z.B. die Form des Energierichtungsspektrums). Aufgrund des aktuellen Forschungsstandes dieser Prozesse sind ihre verschiedenen möglichen numerischen Modellierungen noch nicht ausgereift, obwohl einige davon schon recht weit fortgeschritten sind. Diese Modellierungen sind ebenfalls Gegenstand der Forschung. Betrachtet man die physikalischen Wechselwirkungen, welche im letzten Abschnitt beschrieben wurden, kann TOMAWAC die folgenden physikalischen Prozesse modellieren:

- **Energiezugewinns- und Energieverlustprozesse:**
 - ✓ Windinduzierte Interaktion mit der Atmosphäre. Diese Modellierung beinhaltet die Windenergiezufuhr in die Wellen. Es ist die wesentliche Energiequelle ihres Energierichtungsspektrums. Die Entwicklung dieses Spektrums ist hauptsächlich abhängig von der Geschwindigkeit, der Richtung, der Wirkdauer und der Wirkstrecke des Windes. Es muss

- darauf hingewiesen werden, dass der Energieverlust, wenn der Wind die Wellen bremst, nicht in TOMAWAC berücksichtigt ist;
- ✓ Gischt und Wellenbreche, aufgrund der übermäßigen Steilheit der Wellen während ihrer Erzeugungen und Ausbreitungen;
 - ✓ Sohlwiderstandsinduzierte Energieverluste, die hauptsächlich im Flachwasser auftreten;
 - ✓ Shoalingsinduziertes Brechen der Wellen. Wellen werden steiler aufgrund des Shoaling-Effekts, und brechen, wenn sie zu steil geworden sind;
 - ✓ Verluste durch Wirkungen von Strömungen in Gegenrichtung, welche die Wellen bremsen.
- **Nichtlinearen konservativen Energiezufuhrprozesse:**
- ✓ Nichtlineare resonante Wechselwirkungen. Im Tiefwasser der hauptsächliche Energiezufuhrprozess.
 - ✓ Nichtlineare Wechselwirkungen. Hauptsächlicher Energiezufuhrprozess im Flachwasser.
- **Wellenausbreitungsabhängige Prozesse:**
- ✓ Wellenausbreitung aufgrund Wellengruppengeschwindigkeit und gegebenenfalls der Geschwindigkeit der Ausbreitungsmittel (Meeresströmungen).
 - ✓ Tiefeninduzierten Refraktion, die im Flachwasser eine Richtungsänderung der Wellen und eine Energiezufuhr bedeutet.
 - ✓ Shoaling: Wellenhöhenänderung mit abnehmender Wassertiefe aufgrund der reduzierten Wellenlänge und der Veränderung der Energie-Ausbreitungsgeschwindigkeit.
 - ✓ Strömungsinduzierte Refraktion, welche auch im Flachwasser eine Richtungsänderung der Wellen und eine Energiezufuhr bedeutet
 - ✓ Wechselwirkungen mit instabilen Strömungen, die zu Frequenzerhöhung führen (z.B. Gezeiten).

2.8.2 Theoretischer Hintergrund

Unter den oben aufgeführten Annahmen des Anwendungsgebietes, der Wellendarstellung und der aktiven physikalischen Prozesse kann eine Gleichung des Wirkungsdichtespektrums N mit Hilfe der Ausbreitungsgleichungen von Hamilton in ihre Transportform umgeformt werden:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad}_{\vec{x}, \vec{k}}(N) = Q \quad (3.31)$$

Die Gleichung beschreibt im allgemeinen Fall eine Welle, die sich in einer nicht-homogenen und instabilen Umgebung ausbreitet (Strömungen und Meereshöhe abhängig von Zeit und Raum), wobei die Wellenwirkung durch den Term des Energieverlusts und des Energiezugewinns Q repräsentiert wird.

\vec{x} ist der Ortsvektor.

$\vec{k} = (k_x, k_y) = (k \cdot \sin\theta, k \cdot \cos\theta)$ (mit θ der Winkel der Ausbreitungsrichtung) ist der Vektor des Wellennummers nötig für die Richtungsdiskretisierung des Spektrums.

$\vec{V} = \left(\frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial k_x}{\partial t}, \frac{\partial k_y}{\partial t} \right)$ ist somit definiert.

Die räumliche Diskretisierung kann entweder in kartesischen Koordinaten (x, y) oder in sphärischen Koordinaten an der Erdoberfläche (geografische Breite, Länge) durchgeführt werden.

Die Transportform der Gleichung wird in TOMAWAC genutzt, da sie mit anderen hydraulischen Gleichungen in Beziehung steht.

TOMAWAC ist ein Phasen-gemittelttes Modell: es ist daher von vornherein nicht für die Modellierung der nichtlineare Effekte geeignet, wenn das Wellenprofil nicht mehr als eine Überlagerung von unabhängigen sinusoidalen Komponenten dargestellt werden kann. Diese Effekten werden in TOMAWAC durch die Q -Terme dargestellt.

$$Q = Q_{in} + Q_{ds} + Q_{nl} + Q_{bf} + Q_{br} + Q_{tr} \quad (3.32)$$

mit

Q_{in} : windinduzierte Wellenerzeugung

Q_{ds} : Wellenschaum-induzierter Energieverlust

Q_{nl} : nichtlineare resonante Wechselwirkungen (hauptsächlich im Tiefwasser)

Q_{bf} : Bodenreibungs-induzierter Energieverlust

Q_{br} : Energieverlust durch shoalingeffekt-induziertes Breche der Wellen

Q_{tr} : nichtlineare Wechselwirkungen (hauptsächlich im Flachwasser)

Die theoretische Modellierung von jedem dieser Prozesse ist detailliert im Benutzerhandbuch von TOMAWAC (EDF, 2010) erklärt.

Wie bereits erwähnt sind folgende Prozesse nicht von TOMAWAC aber von ARTEMIS berücksichtigt:

- Diffraktion an Küsten-**Bauwerken** (Wellenbrecher, Pier etc.) oder einer Untiefe, was in einer Energieübertragung im Flachwasser hinter dem blockierenden Hindernis resultiert.
- Partielle oder vollständige Reflexion an einer **Bauwerke** oder Untiefe.

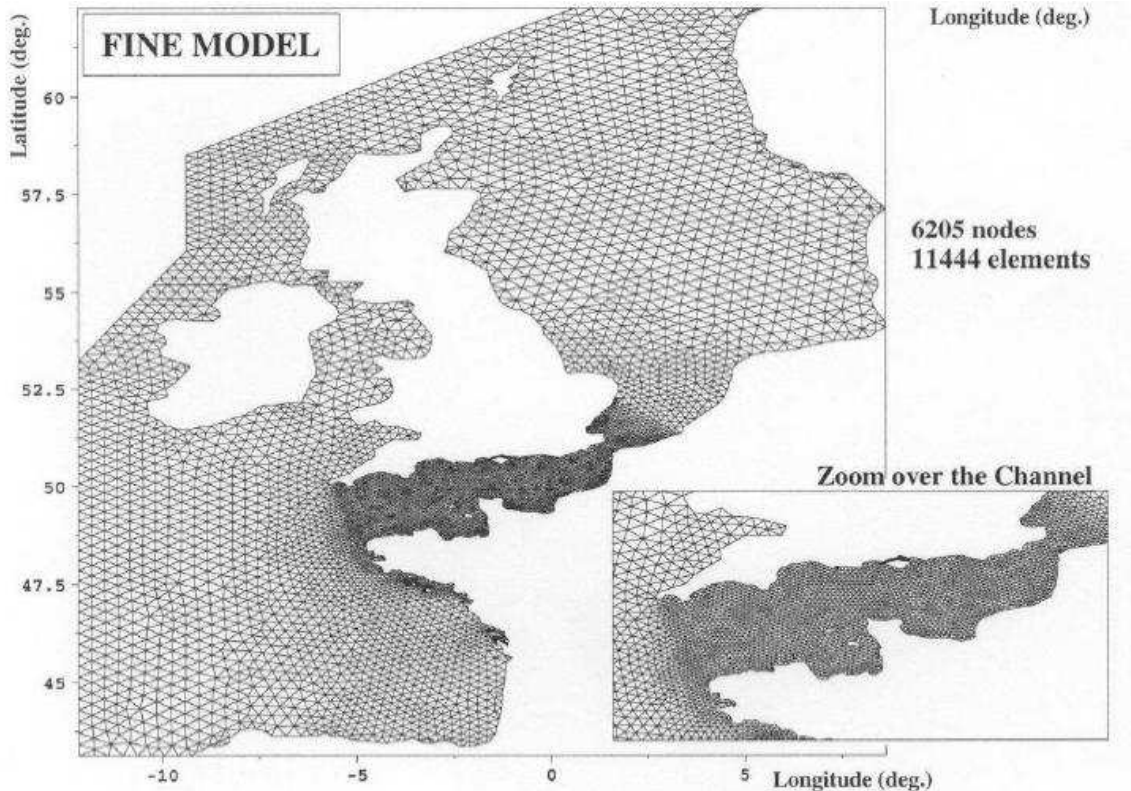


Abbildung 2.6: Beispiel eines TOMAWAC anwendbare Netzes (EDF, 2010)

Die zeitliche und räumliche Diskretisierung in TOMAWAC wird wie in TELEMAC-2D durchgeführt. An jedem Knoten zu jedem Zeitschritt werden auch die Richtungswinkel θ_i und die Frequenz f_r des Wirkungsdichtespektrums diskretisiert.

Der Richtungshorizont $[0^\circ; 360^\circ]$ ist in einer vom Benutzer gegebenen Anzahl ND von Richtungen (=12 automatisch gestellt) gleichmäßig verteilt. Die Richtungen werden so definiert:

$$\theta_m = \frac{(m-1) \cdot 360}{ND} \quad \text{mit } m \text{ von } 1 \text{ bis } ND \quad (3.33)$$

In TOMAWAC ist die Frequenz in eine Reihe von NF Frequenzen (=15 automatisch gestellt) in geometrischer Progression diskretisiert:

$$f_n = f_{1,q}^{n-1} \quad \text{mit } n \text{ von } 1 \text{ bis } NF \quad (3.34)$$

Die minimale Frequenz ist f_1 und die maximale Frequenz $f_{1,q}^{NF-1}$.

Ein 2-dimensionale Netz von (ND,NF) Punkte der Diskretisierung von θ und f ist an jedem Knoten genutzt, welche in eine polarische Koordinatensystem mit θ dem Winkel und f dem Radius dargestellt sein kann.

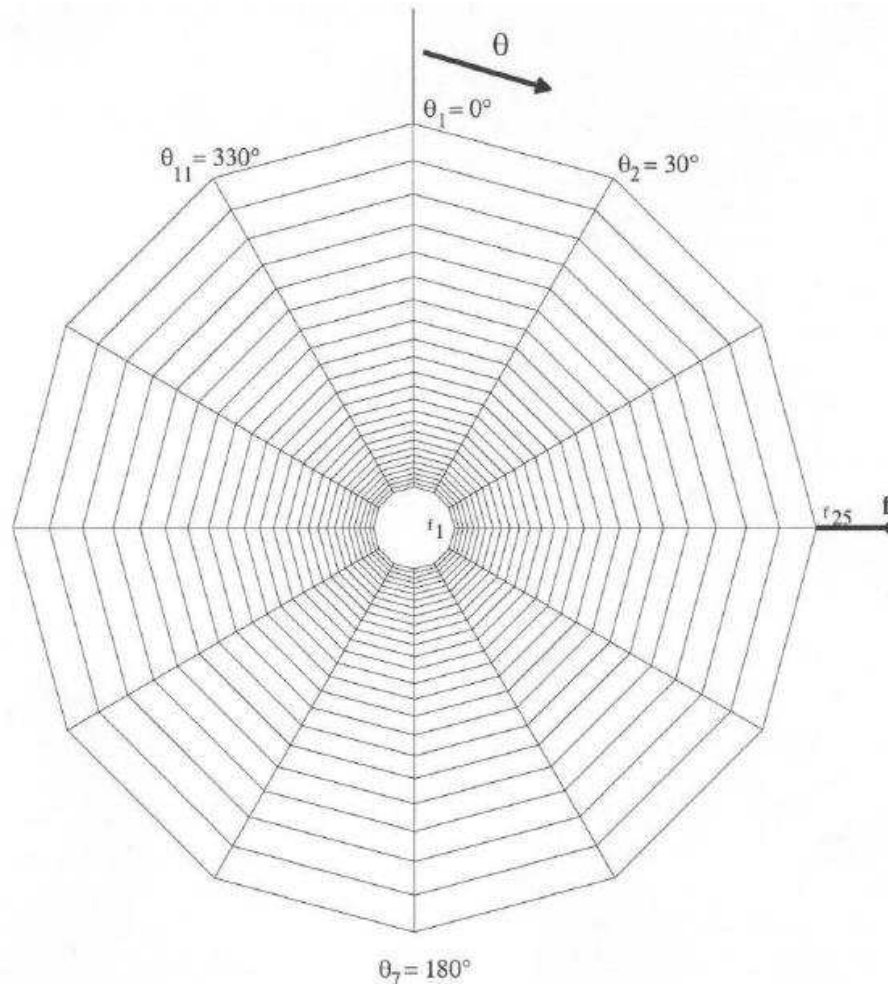


Abbildung 2.7: Beispiel eines Netzes der Diskretisierung des Winkels und der Frequenz wie bei TOMAWAC genutzt (hier mit 25 Frequenzen und 12 Richtungen) (Quelle: EDF, 2010).

2.9 Post-Processing

Drei unterschiedlichen Programme können der Darstellung und Animation von Eingabedaten und Simulationsergebnissen der Modulen des TELEMAC Systems dienen: RUBENS, eine von der Firma EDF erstellte Software, BLUE KENUE des CHC und die Post-Processing Software von FUDAA-PREPRO.

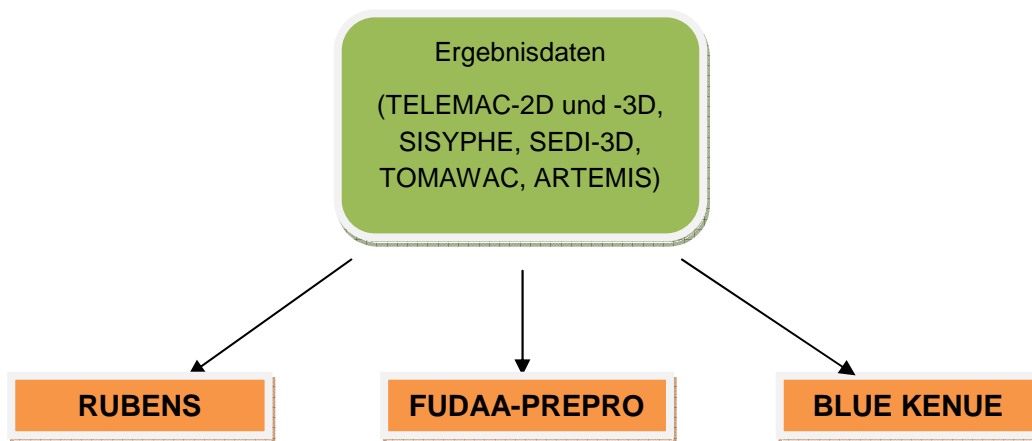


Abbildung 2.8: Post-Processing des Systems TELEMAC

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das Post-Processing Software von FUDAA-PREPRO genutzt. Wenigen Arbeitsschritte sind nötig, um grafischen Auswertungen der Ergebnisse zu erstellen. Die genutzten Handhabungen sind im Anhang E erklärt. Jede berechnete Ausgabevariable kann in 2-dimensionalen Grafik (*.jpg etc.), Animationen (*.avi) oder als Tabellen (*.xyz, *.xls etc.) dargestellt und exportiert werden.

RUBENS wurde die Software sein, welche die breitere Auswahl von Anwendungen anbietet. BLUE KENUE wurde die Bessere sein, um „komplexen“ Daten (nach ESRI etc.) zu exportieren. FUDAA-PREPRO hat in dieser Diplomarbeit das Vorteil, dass seine Benutzerschnittstelle schon während die Modellerstellung gelernt wurde.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Das TELEMAC-System hat sich ein sinnvolles und betriebssicheres Softwaresystem gezeigt. Es öffnet eine besonders große Auswahl von Anwendungsmöglichkeiten, da sein Code frei verändert sein könnte. Die Benutzung ist so gemacht, dass jede Schritte der Erstellung eines Modells eine Auswahl von mehreren Optionen für z.B. die Vernetzung, die Definition der Randbedingungen, die zeitliche und räumliche Diskretisierung, die gelösten Gleichungen, und ihren Lösungsmethoden oder die Ausgabevariablen anbietet. Diese breite Auswahl ist noch verstärkt, da die Fortran 90-Code der Programmen frei verändern sein kann. Dieses System haben aber den Nachteil, dass seine Benutzung mehreren Kenntnissen in Informatik und Hydrodynamik als der anderen Software brauchen könnte.

Das TELEMAC-System ist zusätzlich sehr komplett mit Modulen für 2- und 3-dimensionalen hydrodynamisch-numerischen und morphologischen Berechnungen (TELEMAC-2D, -3D, SISYPHE, SEDI-3D), zwei verschiedenen Wellenmodulen (TOMAWAC, ARTEMIS) und eine gekoppelte Wasserqualitätsmodul (DELWAQ). Nur zwei von dem wurden in dieser Diplomarbeit leider genutzt, es wird aber ein kurzer Überblick der Anwendungsmethoden der anderen Module geben, da sie an desselben Softwaresystem gehören. Die Benutzerschnittstelle einer ganzen Simulation ist zwischen verschiedener Software geteilt, die Texte sind manchmal nicht komplett übersetzt, trotzdem sollte man sich relativ schnell damit zurechtfinden können.

Seit August 2011 ist die Version 6.1 von TELEMAC frei herunterladbar. Die Perl-Skripten der Software wurden mit Python-Skripten ersetzt. Sie anbietet zum ersten Mal die Möglichkeit das Modul TELEMAC-3D zu nutzen. Die gekoppelte Berechnung zwischen TOMAWAC und TELEMAC-2D und -3D wurde entwickelt. Eine SVN Version des Codes ist jetzt zugänglich und wird erlauben, durch Internet den installierten Code zu aktualisieren, und die vom Benutzer erstellten Veränderungen des Codes zu teilen.

Literaturverzeichnis

Bijker E.W., 1968: Mechanics of sediment transport by the combination of waves and current in Design and Reliability of Coastal Structures, 23rd Int. Conf. on Coastal Engineering, 147-173.

Bragier C. 1995: *Mailleur de Delaunay piloté par une carte de tailles en vue d'une adaptation à la bathymétrie*, Bericht : HE-45/95/018, französisch, EDF (Übersetzung des Titels : Durch numerisches Geländemodell Bathymetrie-angepasster Delaunay-Netzersteller)

CETMEF, 2010: *FUDAA-PREPRO RC13 User Manual*

EDF, 2010: *MATISSE 1.0 & 2.0 User Manual*

EDF, 2010: *TELEMAC-2D v6.0 User Manual, Equations and their Resolutions*

EDF, 2010: *TOMAWAC v6.0 User Manual*

EDF, 2010: *SISYPHE v6.0 User Manual*

Fezai M., 2010: *Methode de conversion d'un maillage *.2dm en un maillage *.ser*, opentelemac.org, Forum.

Hervouet J.-M., 2007: *Hydrodynamics of free surface flows*, Edition: Wiley, 2007.

Hervouet J.-M., Villaret C., 2004: *Integrated approaches for modeling sediment transport*, Second International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2004, Naples June 23-25 2004.

Hirano M., 1972: *Studies on variation and equilibrium state of a river bed composed of nonuniform material*, Transactions Jap. Soc. Civ. Eng., 4, 128-129, 1972.

Maubourguet, Chorda, 2010: *Tutorial for MATISSE*

Rastogi A.-K., Rodi W., 1978: *Predictions of heat and mass transfer in open channels*, Journal of the Hydraulics division, ASCE, n

Walters R. A., Carey G. F., 1983: *Analysis of spurious oscillations modes for the shallow water and Navier-Stokes equations*, In: Computer and Fluids, Nr: 11, S. 51-68.

Wiberg P.L., Harris C.K., 1994: *Ripple geometry in wave-dominated environments*, Journal of Geophysical Research 99 (C1), 775-789.

Zyseman J.A., Fredsoe J., 1994: *Data analysis of bed concentration of suspended sediment*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120, N^o9, pp 1021-1042.

Anhang

A Dateitypen

A 1 Parameter-Datei

Für TELEMAC-2D

Die Parameter-Textdatei „cas“ enthält die ganzen von TELEMAC-2D benötigten Schlüsselwörter d.h. die Namen der Daten des Projekts und die physikalischen und numerischen Parametrisierung. Im Fall einer gekoppelten Berechnung enthält die Parameter-Datei von TELEMAC-2D auch die Bedingungen der Kopplung.

Für SISYPHE

Die Parameter-Datei hat dieselbe Rolle, und wird im Fall einer gekoppelten Berechnung nur die Parameter-Datei von TELEMAC-2D vervollständigen.

```
-----  
/ TELEMAC2D Version v6p0 oct 21, 2011  
/ Krueemmer  
-----  
  
-----  
/ EQUATIONS  
-----  
FRICITION COEFFICIENT =55  
LAW OF BOTTOM FRICTION =3  
TURBULENCE MODEL =3  
  
-----  
/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS  
-----  
VELOCITY PROFILES =4;1  
PRESCRIBED FLOWRATES =0;0  
PRESCRIBED ELEVATIONS =0;0  
OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES =1;1  
  
-----  
/ INPUT-OUTPUT, FILES  
-----  
LIQUID BOUNDARIES FILE ='cas.liq'
```

...

A 2 Randbedingungstyp-Datei

Diese Textdatei *.conlim gibt die Berechnungsbedingungen der Knoten der Kontur-Linien. Eine Anzahlkombination wird die Bedingungstyp definieren.

| Beispiel | H; U; V; -; -; -; -; T; -; -; -; -; Knotennummer |
|----------|---|
| | 4 5 5 0.0 0.0 0.0 0.0 4 0.0 0.0 0.0 3 1 <i>Knoten 1</i> |
| | 4 5 5 0.0 0.0 0.0 0.0 4 0.0 0.0 0.0 366 2 <i>Knoten 2</i> |
| | 4 5 5 0.0 0.0 0.0 0.0 4 0.0 0.0 0.0 371 3 <i>Knoten 3</i> |

„4 5 5 4“ = freie Wasserstand, gegebener Durchfluss, freier Tracer

A 3 Randbedingungen-Datei

Diese Textdatei *.liq enthält die Ganglinien der Simulation.

Beispiel

```
# Fichier des frontières liquides transitoires
# Généré le sep 27, 2011
T Q(1) SL(2)
s m2/s m
0.0 0.0080 0.0594
180.0 0.0080 0.0594
86400.0 0.0080 0.0594
```

A 4 Eingabe-Datei der Kontrollquerschnitten

Eingabe-Datei

Diese vom Benutzer erstellte Textdatei wird eine Kontrollquerschnitt definieren, welche den unmittelbaren Durchfluss während die ganzen Simulation zur jeden Zeitschritt speichern wird.

```
#Control section definition
1-1
inflow
2175 2884
```

Ausgabe-Datei

1 bedeutet, dass es ein Querschnittsprofil gibt (und nicht mehrere). -1 ist die negative Zahl, die man eingeben muss, wenn man das Profil durch zwei Knotennummern definiert. Eine positive Zahl würde meinen, dass die zwei Punkten der Linie durch ihren Koordinaten definiert würden. „inflow“ ist der Name des Profils und 2175 und 2884 sind die Knotennummern.

```
TITLE = "Fluxes"
VARIABLES = t inflow
15.000000000000 0.000000000000
30.000000000000 0.000000000000
45.000000000000 0.000000000000
60.000000000000 0.000000000000
75.000000000000 0.000000000000
```

A 5 Seraphin

Die *.ser binären Daten enthalten die zeitlichen und räumlichen Variation der gegebenen Variablen an jeden Knoten des Netzes. Diese Format ist spezifisch des TELEMAC Systems.

B Einfache Programminstallation des TELEMAC Systems 6.0 unter Windows

Das TELEMAC Systems kann unter mehreren Betriebssystemen installiert werden: WINDOWS, LINUX, UNIX, Supercomputer. Unter WINDOWS werden die folgenden Softwares gebraucht, die allen auf Internet für frei herunterladbar sind:

- ✓ **TELEMAC System**
- ✓ Pflichten Unterstützungssoftwares des Codes, als TELEMAC PERL und FORTRAN Skripte nützt:
 - ❖ **PERL Strawberry**
 - ❖ **FORTRAN 90 Compiler**

Man kann in WINDOWS zwischen freien und zahlenden Compiler wählen: **INTEL FORTRAN Compiler** (zahlend) **oder G95 Compiler** (frei).

- ✓ Pre-Processing **MATISSE** und Post-Processing **RUBENS** Softwares

Und es ist auch möglich die Processing-Softwares zu installieren:

- ✓ **BLUE KENUE** für Pre- und Post-Processing;
- ✓ **FUDAA PREPRO** für Pre-Processing, Processing und Post-Processing.

Die Webseiten, wo man diesen Softwares herunterladen kann, sind allen an der Webseite des TELEMAC Systems gegeben (<http://opentelemac.org> unter Downloads).

Installationsschritte:

- **Schritt 1: PERL Strawberry installieren**
 - Herunterladbar unter <http://strawberryperl.com/>;
 - Installieren;
 - *C:\strawberry\c\bin* und *C:\strawberry\perl\bin* in der PATH Umgebungsvariablen des genutzten Benutzerprofils in der Systemsteuerung hinzufügen.

- **Schritt 2: FORTRAN Compiler installieren**

Mit INTEL FORTRAN Compiler (diese Methode war in dieser Diplomarbeit nicht getestet)

 - Compiler installieren;

- Überprüfen, dass die bin Datei von dem Compiler in der PATH Umgebungsvariablen des Benutzerprofils ist;
- Microsoft Visual Studio installieren.

Mit G95 Compiler:

- Herunterladbar G95 z.B. unter <http://www.g95.org/>, und auch einen Hilfsprogramm, das MinGW genannt ist, unter <http://www.mingw.org/>;
- MinGW und dann G95 installieren;
- `C:\...g95\bin` in den PATH Umgebungsvariablen hinzufügen.

➤ **Schritt 3: TELEMAT System installieren**

- Herunterladbar unter <http://opentelemac.org>, es gibt schon G95-kompilierte oder INTEL FORTRAN-kompilierte Versionen;
- Mit dem schon kompilierte Version braucht man nur TELEMAT-2D und TELEMAT-3D aus der .zip-Datei auszuziehen, anders die zwei Software installieren. Es ist wichtig, dass es keinen Spatium in dem Pfad gibt, als PERL Skripte genutzt sind!
- `C:\TELEMAT\6P0\bin` in der PATH Umgebungsvariablen hinzufügen.

➤ **Schritt 4: MATISSE und RUBENS installieren**

- Herunterladbar unter <http://opentelemac.org>;
- Installieren in dem TELEMAT Ordner;
- `C:\TELEMAT\Pre_Post\bin` in der PATH Umgebungsvariablen hinzufügen.

Bemerkung: es ist möglich direkt in RUBENS einen Projekt, die in MATISSE geöffnet ist, zu gucken (Profile, Contour lines,...). Wenn es nicht funktioniert, kann man der Proj_Rub.RUB Ordner in `\TELEMAT\Pre_Post\bin\temp\Proj_Rub.RUB` einfach löschen, um das Problem zu lösen.

➤ **Schritt 5 (Option): FUDAA-PREPRO installieren**

- Herunterladbar unter <http://prepro.fudaa.fr/index.en.php>;
- Installieren;
- In FUDAA-PREPRO, Supervisor > "Edition" > "Preferences" > "Système de Modélisation" (Modellierungssystem) > "TELEMAT":

der Pfad des bin Ordners von TELEMAC z.B.
C:\TELEMAC\6P0\bin hinzufügen.

Bemerkung: es ist möglich direkt in FUDAA-PREPRO den Projekt mit MATISSE oder RUBENS zu öffnen. Wenn es nicht richtig funktioniert, kann man die .bat Datei von TELEMAC-2D in der bin Ordner von MATRUB zu kopieren, und dann das Pfad des bin Ordners von MATRUB (MATISSE und RUBENS) z.B. C:\TELEMAC\Pre_Post\bin in „Systeme de modélisation“ (siehe oben) hinzufügen.

➤ **Schritt 6 (Option): BLUE KENUE installieren**

- Herunterladbar unter
<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/chc/software/kenue/blue-kenue.html>;
- Installieren.

Die Installation von dem TELEMAC System ist jetzt fertig. Viel Spaß!

C Handhabung von der Netzerstellung-Software MATISSE

Dieser Teil der Diplomarbeit enthält Informationen des Benutzerhandbuchs von MATISSE (EDF, 2010) und des auf der TELEMAC Website herunterladbaren Tutoriums (Maubourguet et Chorda, 2010).

Eine kurze Beschreibung der Anwendungsschritte einer Netz-Erstellung soll einen kurzen Überblick über die Handhabung und die Anwendungsmöglichkeiten dieser Software geben. Die Literatur über MATISSE enthält ein Benutzerhandbuch (EDF, 2010) als auch ein Tutorium (Maubourguet et Chorda, 2010) auf Englisch, welches sehr gut gemacht ist. Deswegen ist die Handhabung zwar nicht konkret beschrieben (z.B. Edit > Import > ...), die Möglichkeiten trotz alledem aber theoretisch dem Lesers näher gebracht.

In MATISSE können Bathymetrie- und Linien-Daten in den Formaten .xyz, .dxf, sowie in zwei speziellen TELEMAC-Formaten importiert werden: für Profil- und Linien-Daten ist das SINUSX Textformat anwendbar und für Bathymetrie-Daten und Linien ist das binäre SERAPHIN Format anwendbar. SERAPHIN-Daten werden von MATISSE, FUDAA-PREPRO oder BLUE KENUE erstellt. Abhängig von den ursprünglichen Formaten der Projektdaten können mittels dieser Software die verwendeten Daten zu nutzbaren Formaten konvertiert werden (Siehe Anhang Dateizugang zu Telemac-2D). SINUSX kann entweder mit denselben Softwares oder einfach mit einem Texteditor aus anderen Textdaten erstellt werden (Siehe Anhang Dateitypen).

Die Anwendung von MATISSE wird in 6 Schritte gegliedert, wobei jeder davon einem Benutzungsmodus entspricht:

- Schritt 1: Modus der Bathymetrie
- Schritt 2: Modus der geometrischen Linien
- Schritt 3: Modus der Zonen
- Schritt 4: Modus des digitale Geländemodells
(oder D.E.M. für „Digital Elevation Model“)
- Schritt 5: Modus des Netzes
- Schritt 6: Modus der Randbedingungen

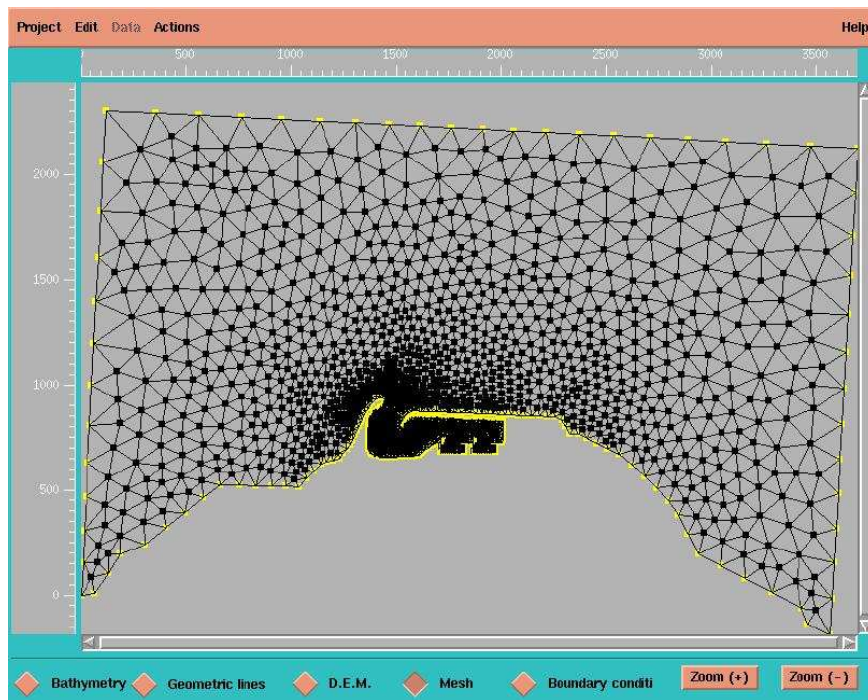


Abbildung 1: Beispiel eines MATISSE Projekt, (EDF, 2010)

Die Modi werden vom Benutzer unterhalb der grafischen Anzeige durch Klicken aktiviert. So sind die verschiedenen Aktionen des Modus verfügbar („Actions“ Menü).

Schritt 1: Modus der Bathymetrie

Der Bathymetrie Modus erlaubt dem Benutzer:

- Neue Punkte zu erstellen;
- Neue Daten zu importieren;
- Die Bathymetrie von einen oder mehreren Punkte zusammen zu verändern;
- Die resultierenden Bathymetrie anzuzeigen.

Die Durchführung wird häufig wie folgt gemacht:

- Bathymetrie Daten hinzufügen;
- Verbesserung der Bathymetrie-Daten;
- Überprüfung durch graphisches Anzeigen der Bathymetrie, und wenn nötig Korrekturen erarbeiten.

Bemerkung:

- Der Import von Querprofilen benötigt eine besondere Behandlung, welche im Benutzerhandbuch erklärt ist. Die Profile müssen nämlich im Format SINUSX sein.

Schritt 2: Modus der geometrischen Linien

Dieser Modus erlaubt dem Benutzer, Linien in der Bathymetrie der Punkte, welchen als Bedingungen für die Netz-Erstellung genutzt werden, zu zeichnen:

- Benutzer-definierte Linien.

Diese werden im digitalen Geländemodell-Modus und im Netz-Modus genutzt, und sind ein Grundpfeiler der Netz-Erstellung. Sie können für verschiedene Verdichtungsaktionen („zwischen diesen zwei Linien so verdichten“) dienen, und Bedingungs-Linien (zukünftigen pflichten Unterstützung-Linien für Knoten und Elemente) definieren. Die Bedingungs-Linien werden so im Modus des Netzes definiert.
- Kontur-Linien

Dies sind ebenfalls vom Benutzer gezeichnete Linien, welche man als Kontur-Linien definiert. Sie beschreiben die Kontur des Rechengebietes und der inneren Inseln.

Dieser Modus erlaubt dem Benutzer:

- Neue Linien zu zeichnen;
- Linien-Daten zu importieren;
- Einzelne oder mehreren Punkte dieser Linien zusammen zu modifizieren.

Die Durchführung wird häufig wie folgt gemacht:

- Import und/oder Zeichnen von neuen Linien-Daten;
- Verbesserung der Linien;
- Überprüfung durch grafisches Anzeigen der Bathymetrie entlang der Linien, und wenn nötig Korrekturen erarbeiten.

Bemerkungen:

- Harte Punkte werden allein vom Benutzer und automatisch definiert. Sie werden unverändert in dem Basis-Netz und somit in der Dichtekarte bleiben. Sie werden feste Punkte sein.
- Es ist auch möglich, einfache Formen (Ellipsen, Rechtecke) direkt zu zeichnen.
- Ein Deich kann definiert sein: wenn die Deich-Konturen über die Bathymetrie hinzugefügt werden, muss man nur ihre Punkte als harte Punkte festlegen. Wenn die Deich-Konturen gezeichnet werden, kann man

die Bathymetrie der Punkte seiner untersten Konturlinie auf das Relief projizieren, und die Bathymetrie der Punkte seiner obersten Konturlinie selbst festlegen. Dieser Sonderfall ist im Tutorium erklärt.

Schritt 3: Modus der Zonen

Zonen können zwischen gekreuzten Linien, welche eine geschlossene Kontur bilden definiert werden. Zonen werden im Netz-Modus genutzt, um besondere Gitternetzgebiete zu erstellen (z.B. Flussgerinne). Ein Beispiel hierzu findet sich im Tutorium.

Schritt 4: Modus des Digitalen Geländemodells (D.E.M. Modus)

Dieser Schritt ist essentiell für die Netz-Erstellung, da es der erste Schritt der Triangulation ist. Beim Aktivieren dieses Modus wird automatisch aus den Bathymetrie-Punkten und den geometrischen Linien ein Basis-Gitter erstellt. Die wichtigste Rolle des Benutzers dabei ist es, die nötigen Kriterien hinzuzufügen, so dass die Dichtekarte berechnet werden kann.

Dieser Modus erlaubt dem Benutzer:

- Neue Kriterien hinzuzufügen;
- Quelldatei der Kriterien zu lesen;
- Modifizierung der Kriterien durchzuführen.

Die Durchführung wird häufig wie folgt gemacht:

- Selektion des Basis-Gitters;
- Hinzufügen neuer Kriterien;
- Veränderung oder Erstellung der Kriterien;
- Überprüfung durch grafisches Anzeigen der Kriterien, und wenn nötig Korrekturen erarbeiten;
- Berechnen der Abstände zwischen den Knoten.

Bemerkungen:

- Feste Punkte können definiert sein. Sie werden automatisch und unverändert als unbewegliche Punkte in dem fertigen Netz hinzugefügt. Die festen Punkte sind alle Bedingungs- und Kontur-Linienpunkte, oder allein vom Benutzer selbst definiert.
- Jedes Kriterium ist auf einem vom Benutzer ausgewählten Gebiet definiert.

- Ein Kriterium kann einfach sein, um beispielweise einen konstanten Abstand zwischen Knoten vorzugeben (z.B. konstantes Kriterium K mit $K = 3$ m). Es ist in diesem Fall von Interesse, ein regelmäßiges Netz zu bekommen. Es ist auch möglich an dem Kriterium einen arithmetischen Operator oder eine analytische Funktion (Linear, Gaussian, Step) auszuführen.
- Mehreren Kriterien können auch kombiniert werden. Zum Beispiel kann der Benutzer in der „Compute criterion“-Aktion wie folgt vorgehen: Kriterium 1 auf ein selektiertes Gebiet anwenden; Kriterium 2 auf das komplementäre Gebiet definiert anwenden; Kriterium 3 auf dem ganzen Gebiet als $\text{Max}(\text{Kriterium 1}, \text{Kriterium 2})$ erstellen.
- So ist es möglich besondere Gebiete zu verfeinern oder vergrößern. Ein Beispiel wird im Tutorium erklärt.

Schritt 5: Netz-Modus

Um das Netz fertig zu stellen und zu überprüfen, müssen noch die Bedingungs-Linien aktiviert werden. Die Bathymetrie, die Konturen und die Dichtekarte existieren bereits.

Dieser Modus erlaubt dem Benutzer:

- Die Bedingungs-Linien auszuwählen;
- Das Netz zu berechnen;
- Überprüfung durch Informationen über das Netz;
- Im Prozess zurück zu gehen (Auswahl oder Modus), wenn das Netz nicht befriedigend ist;
- Netz-Elemente zu korrigieren;
- Wenn das Netz fertig ist, die Geometrie-Datei zu generieren (SERAPHIN Datei).

Bemerkungen:

- Die vor der Netz-Berechnung im Netz-Modus selektierten Linien werden dar als Bedingungs-Linien berücksichtigt.
- Der Benutzer kann zwischen dem unbeweglichen/beweglichen Status von Knoten wechseln.
- Vor der Netz-Berechnung kann der Benutzer seine Zonen mit der „Zone Netzing“ Aktion die Zonen vernetzen. Wie im „Zone“ Abschnitt bereits erwähnt wird diese Handhabung im Tutorium erklärt.
- Es ist darauf hinzuweisen, dass manuelle Änderungen (Punkte verschieben) vor der Netz-Erstellung (und als festen Knoten speichern) durchgeführt werden sollten. Eine neue Erstellung des Netzes wird bereits getätigte manuelle Arbeit löschen!

- Die Überprüfung des Netzes beinhaltet die Anzahl von:
 - o eingeschränkten Dreiecken und
 - o durchkreuzten Segmenten
 sowie die mögliche 2D-Isolinien-Graphiken von:
 - o der Bathymetrie,
 - o gemittelte Länge der Segmente jeder Dreiecks-Elemente,
 - o Oberflächen der Dreiecks-Elemente,
 - o Verzerrung von Dreiecks-Elementen,
 - o kleinster und größter Winkel der Dreiecks-Elemente.

Bemerkungen:

- Es ist beim Erstellung des Netzes stark empfohlen, dass:
 - o Eine flüssige Grenze mindestens 5 Knoten beinhaltet muss (10 wenn möglich),
 - o Eine Gerinne mindestens 3 oder 4 Knoten in der Breite beinhalten muss, so dass der Durchfluss gut herum fließen kann,
 - o Das Netz in der Bereiche, wo die Bathymetrie- oder Topographie-Gradient stark ist, verfeinert sein muss,
 - o Man probiert, um das Netz am bestens mit gleichseitigen Dreiecken zu erstellen, da es die bessere Ergebnisse gibt. Es ist aber manchmal

Schritt 6: Modus der Randbedingungen

Im letzten Schritt sind die Randbedingungen zu definieren und die Randbedingungs-Datei zu generieren.

In einer ersten Phase mit der Hilfe eine Tabelle kann zuerst der Benutzer Randbedingungstypen selbst erstellen:



Abbildung 4: In MATISSE anwendbare Tabelle für das Erstellen der Randbedingungen, (Maubourguet und Chorda, 2010)

Die Spalten entsprechen jeweils die Variable H (Wasserhöhe), U und V die Geschwindigkeitskomponente und T den Tracer. Jeder Nummer entspricht eine Bedingung wie in der folgende Liste erklärt:

| Generic name | Colour code | Corresponding boundary condition |
|------------------|-------------|---|
| Adherence | 0 | Imposed zero value (for velocity) |
| Wave | 1 | Incident wave |
| Sliding | 2 | Solid boundary with a sliding condition |
| | 3 | |
| Free | 4 | "Free" liquid boundary |
| Imposed-flowrate | 5 | Imposed value liquid boundary (values for velocities) |
| Imposed-values | 6 | Imposed value liquid boundary (values for velocities) |

Note: the number of available options (0-6) can be modified in the MATISSE configuration file.

Abbildung 3: Tabelle der Bedeutung der Nummer in dem Randbedingungsdatei, (EDF, 2010)

Die Kombination dieser Parameter erstellt wie in der folgenden Tabelle zusammengefasst besondere Randbedingungen:

| LIHBOR | LIUBOR | LIVBOR | LITBOR | BOUNDARY CONDITION |
|--------|--------|--------|--------|---|
| 2 | 2 | 2 | 2 | Solid boundary. |
| 5 | 4 | 0 | 4 | Prescribed H, free U, zero V, free T. |
| 1 | 1 | 1 | 4 | Incident wave, free T. |
| 5 | 0 | 4 | 4 | Prescribed H , zero U, free V, free T. |
| 4 | 5 | 5 | 5 | Free H, prescribed Q, prescribed T. |
| 4 | 6 | 6 | 5 | Free H, prescribed velocities, prescribed T. |
| 5 | 4 | 4 | 4 | Prescribed H, free velocities, free T. |
| 4 | 5 | 0 | 5 | Free H, prescribed Q with zero V, prescribed T. |
| 4 | 0 | 5 | 5 | Free H, prescribed Q with zero U, prescribed T. |
| 5 | 5 | 5 | 5 | Prescribed H and Q, prescribed T. |
| 5 | 6 | 6 | 5 | Prescribed H and velocities, prescribed T. |
| 2 | 0 | 2 | 2 | Solid boundary with zero U. |
| 2 | 2 | 0 | 2 | Solid boundary with zero V. |

Abbildung 5: Beispiele von möglichen Kombinationen, (EDF, 2010)

In einer zweiten Phase kann er die Punkte der Kontur-Linien als gewählten Gruppen speichern.

Endlich kann er jeder Gruppe mit einem Randbedingungstyp verbinden, und der Randbedingungsdatei (in Textformat) generieren.

D Handhabung der Simulation 1

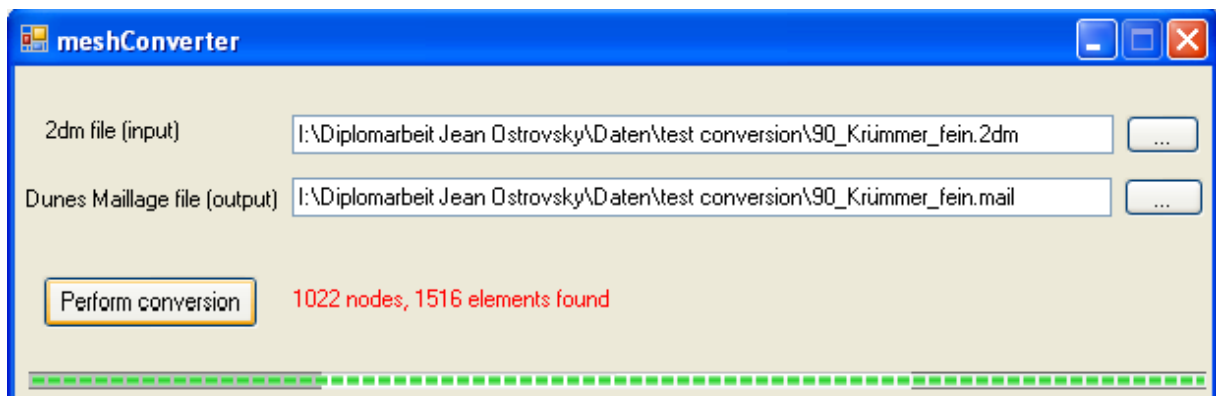
Die Simulation wird in 5 Schritten durchgeführt:

- 1) Konvertierung des Netzes in dem benötigten Format SERAPHIN.
- 2) Neue Vernetzung des *.ser-Netzes mit MATISSE: zwei in diesem Fall interessante mögliche Vernetzungsmethoden werden gezeigt.
- 3) Simulation 1: Erstellung der Datei der anfänglichen Bedingungen mit TELEMAT-2D durch FUDAA-PREPRO.
- 4) Simulation 2: Lauf der gekoppelten Berechnung zwischen TELEMAT-2D und SISYPHE.
- 5) Anzeigen der Ergebnisse durch FUDAA-PREPRO anzeigen.

1) Konvertierung des Netzes

Das ursprüngliche Netz ist eine vom Labor erstellte *.2dm-Datei. Man wird in zwei Schritten ein identisches Netz als SERAPHIN-Datei generieren.

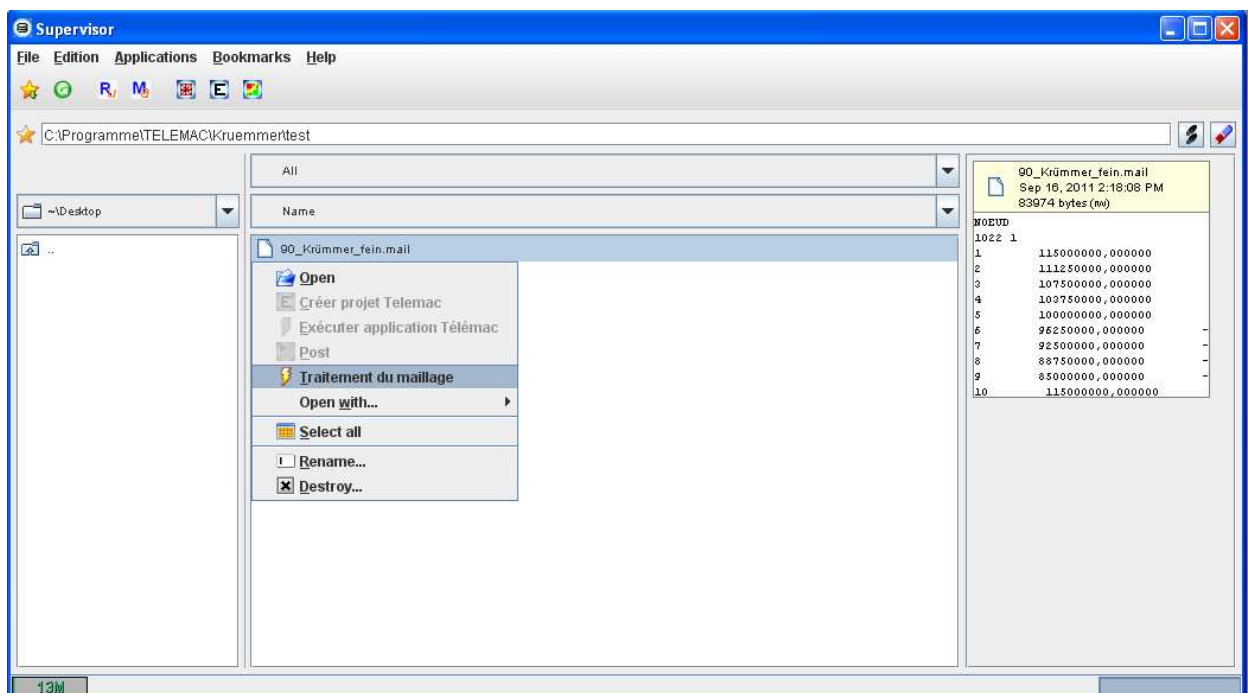
Zuerst wird man den Netz-Konverter (Fezai, 2011) verwenden, um eine .mail-Datei zu erstellen.



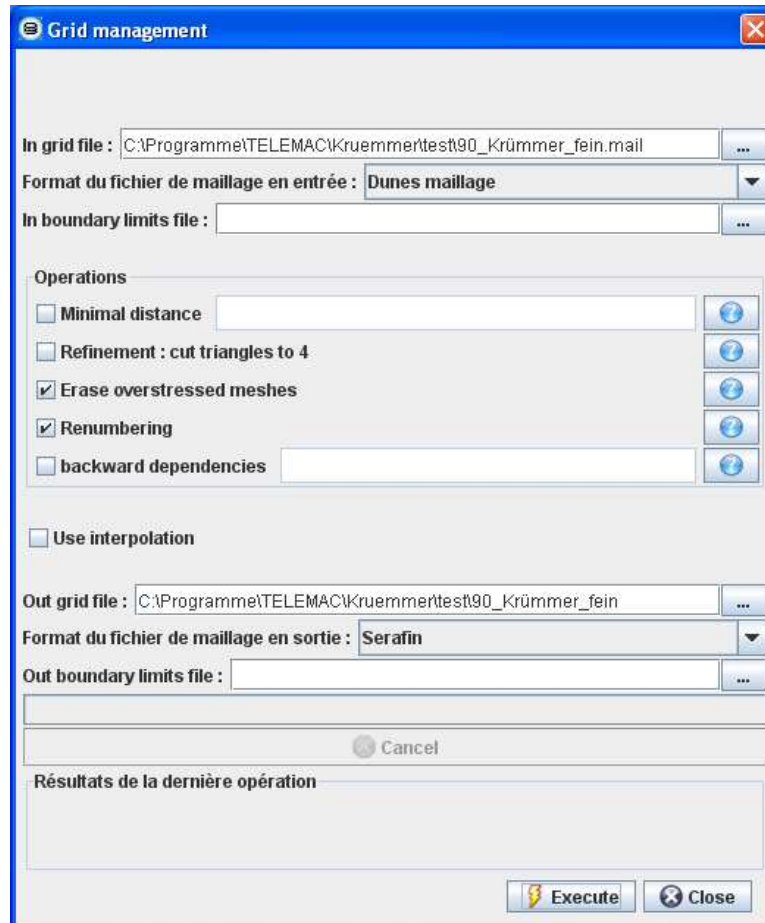
Bemerkungen:

- Das *.2dm Netz darf nur mit Dreiecken mit jeweils 3 Knoten zusammengestellt sein. Um das in SMS zu verändern: **Mesh Module > Elements > „Linear <> Quadratics“**. Dann darf man auch nicht vergessen, das Netz neu zu nummerieren: **Nodestrings > Renumber**.
- Das Betriebssystem muss unbedingt die Zahlen mit dezimalem Punkt und nicht mit Komma (Systemsteuerung) anzeigen (z.B. 1.3, und nicht 1,3).

Dann nutzt man den Supervisor von FUDAA-PREPRO, um die zweite Konversion durchzuführen. (Datei finden – rechtsklicken – **Traitement du maillage** = „Netz-Verarbeitung“)



Man kann während der Verarbeitung die möglichen überlasteten Dreiecke verändern und neu nummerieren.



Man bekommt dann das richtige identische SERAPHIN-Netz, welches die Geometrie-Datei der Simulation sein wird.

2) Neue Vernetzung des Netzes mit MATISSE

Zuerst wird man ein neues MATISSE-Projekt erstellen, in welchem man das im Schritt 1 erstellte Netz nutzen wird.

Im Modus **Geometrie Lines** klickt man auf die Kontur-Linie und bestätigt mit **Actions > Define hard points** bestätigen.

Dies ist wichtig, um am Ende eine genaue Kontur-Linie zu bekommen (ansonsten werden die Ecken automatisch abgerundet).

Man kann in diesem Fall zwischen zwei Methoden der Netz-Erstellung wählen: mit einer Zone oder mit einem Kriterium (Siehe auch das Benutzerhandbuch und das Tutorium von MATISSE).

Neue Vernetzung des Netzes durch einen Zone

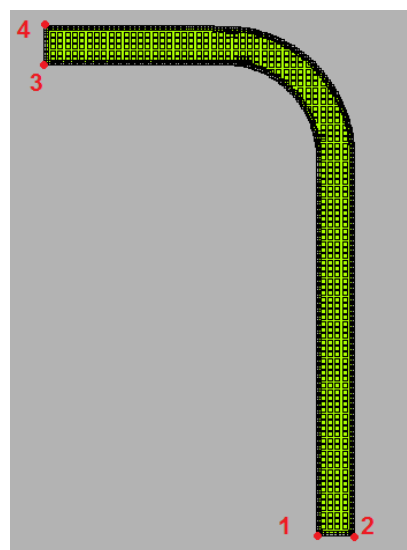
Das gesamte Netz wird die Zone sein.

Im Modus der Zonen: **Data > Create Zone**

Dann klickt man auf den Knoten an der Ecke und auf der Kontur-Linie. Dies erzeugt eine geschlossene Linie. Man bestätigt mit Mittelklick.

Die Ecken der Zone müssen definiert werden („**Modify corners**“)

Man bestätigt zuerst die zwei Ecken an dem Einlass und dann die zwei Ecken an dem Auslass, wie in der folgenden Abbildung gezeigt wird:



Dann bestätigt man. Die Zone ist jetzt definiert.

Im Modus **Mesh** wählt man **Edition > Selection Mode > Select Lignes/Zones**

Man selektiert die Zone mit Linksklick.

Dann **Actions > Zone meshing**

Die folgenden Vernetzungs-Parameter werden genutzt:

Input/Output: Regular step und Parameters = 10

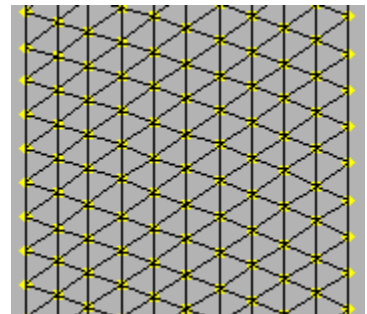
Side 1/Side 2: Regular step und Parameters = 200

Cutting type: Non Alterne 1

Mit der Bestätigung ist die Zone (in diesem Fall das ganzes Netz) vernetzt.

Dann **Actions > Compute Mesh**

Die Vernetzung sieht wie in der folgenden Abbildung aus:



Dieses neue *.ser-Netz wird mit **Project > Generate TELEMAC File** erstellt.

Neue Vernetzung des Netzes durch ein Kriterium

Im Modus **M.N.T.: Edition > Select all**. Allen Knoten des Netzes sind selektiert.

Dann **Actions > Compute criterion**

Man wird den Kruemmer mit einem Abstand von 3 cm zwischen den Knoten vernetzen.

1st operand: nichts wählen

Operator: *constant*

2nd operand: *0.03*

Result: z.B. *krit_3cm* eintragen, und mit ENTER bestätigen

Da **Domain definition: Selection** zeigt, kann man mit **Apply** bestätigen.

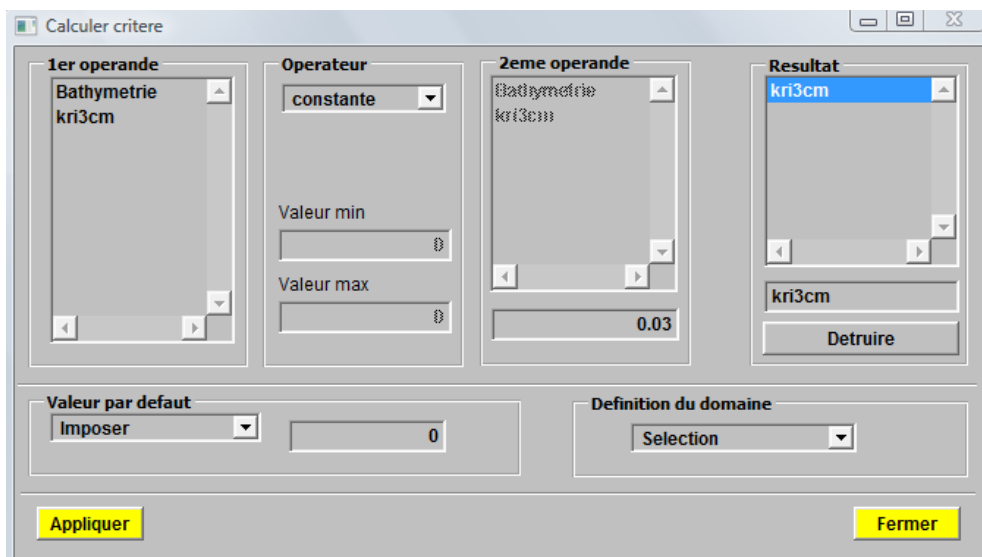


Abbildung des Fensters **Compute Criterion**

Das Kriterium ist jetzt auf dem ganzen Netz definiert.

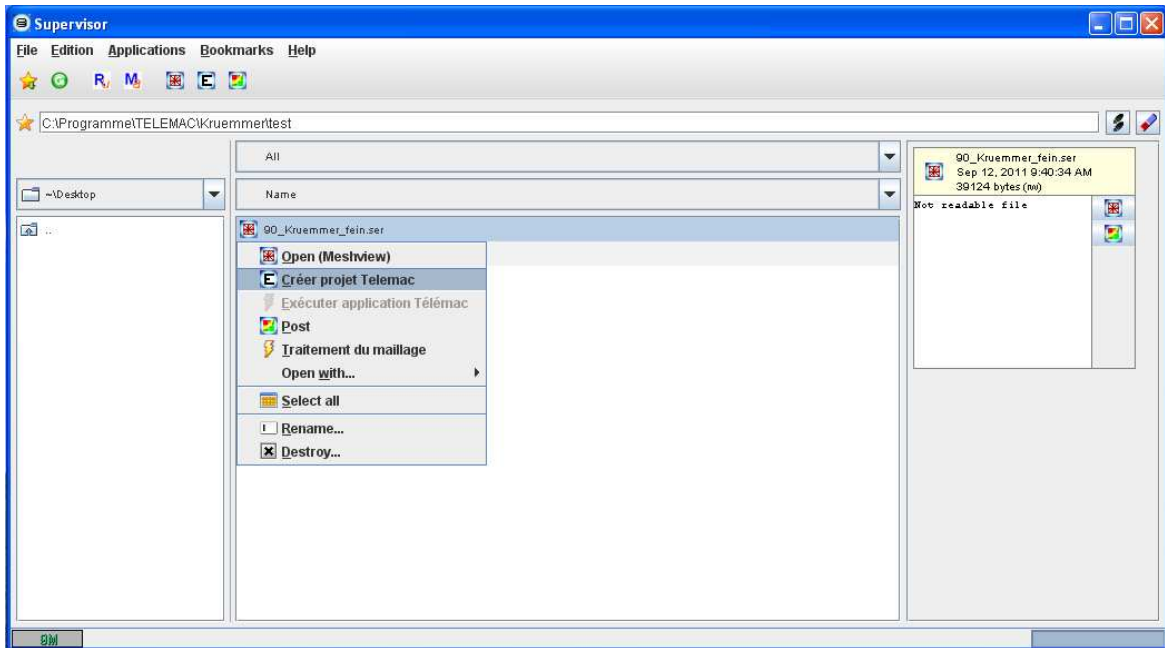
Im Modus **Mesh: Actions > Compute Mesh** wird man das Kriterium *krit_3cm* wählen.

Das Netz ist jetzt erstellt. Die Datei wird man mit **Project > Generate TELEMAC File** erstellen. Eine Kopie dieses Netzes könnte in den Ordner „Kruemmer_startdatei“ kopiert werden.

3) Simulation 1: Erstellung der Datei der anfänglichen Bedingungen mit TELEMAC-2D durch FUDAA-PREPRO

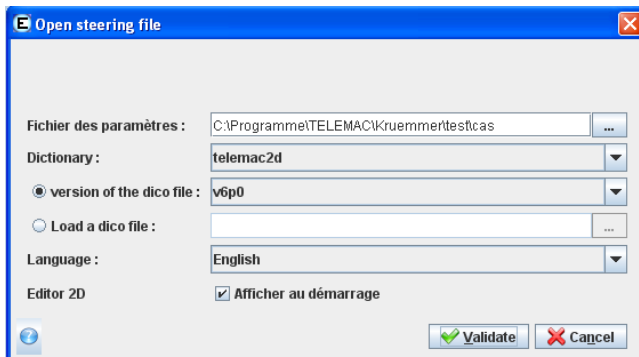
Es ist dann möglich ein TELEMAC-Projekt mit dem Supervisor zu generieren.

(Rechtsklick auf das Netz – **Créer Projet Telemac** = „TELEMAC-Projekt erstellen“)

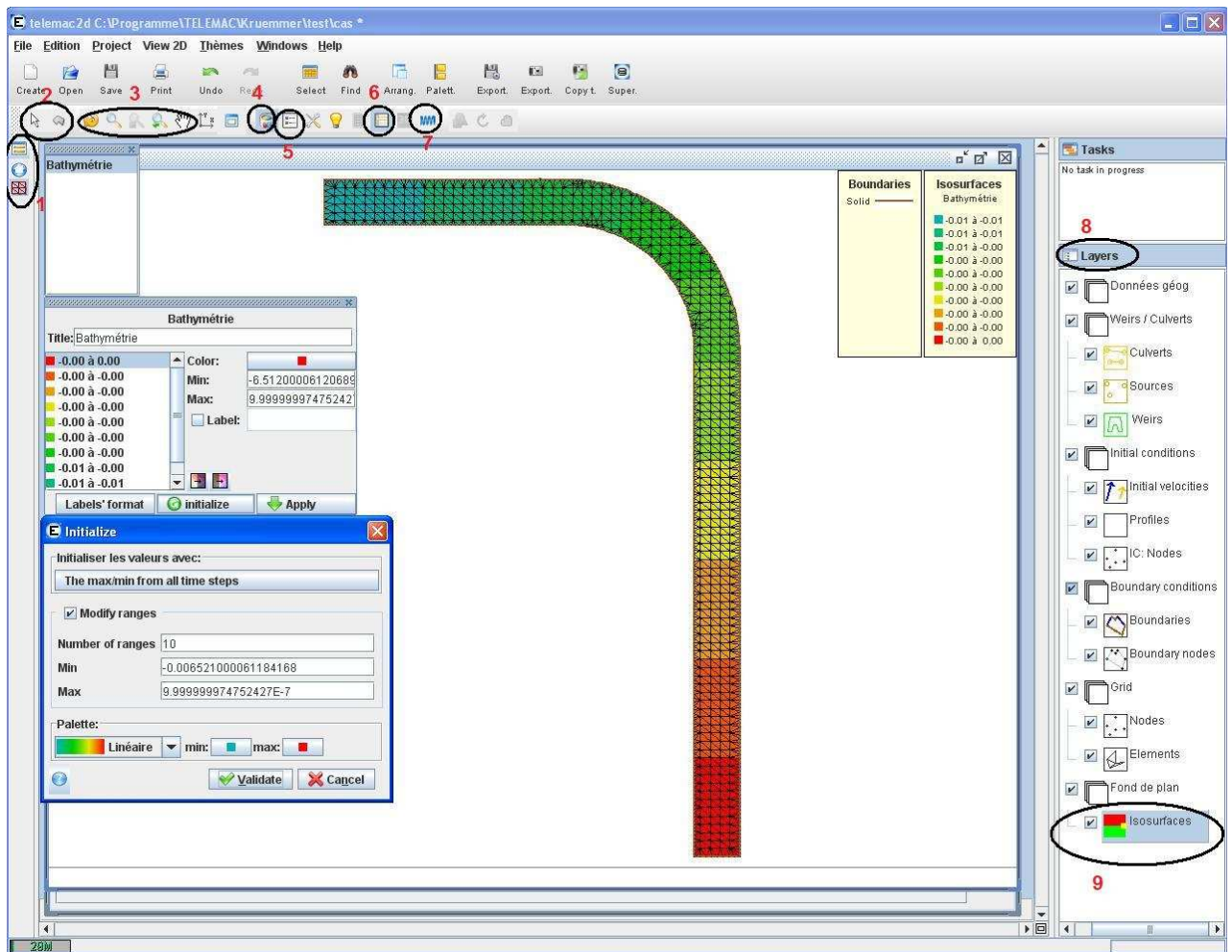


Die Sprache ist zwischen Englisch und Französisch zu wählen.

FUDAA-PREPRO wird die Parameter-Datei (cas.txt) und die Randbedingung-Datei (cas.conlim und cas.liq) generieren.

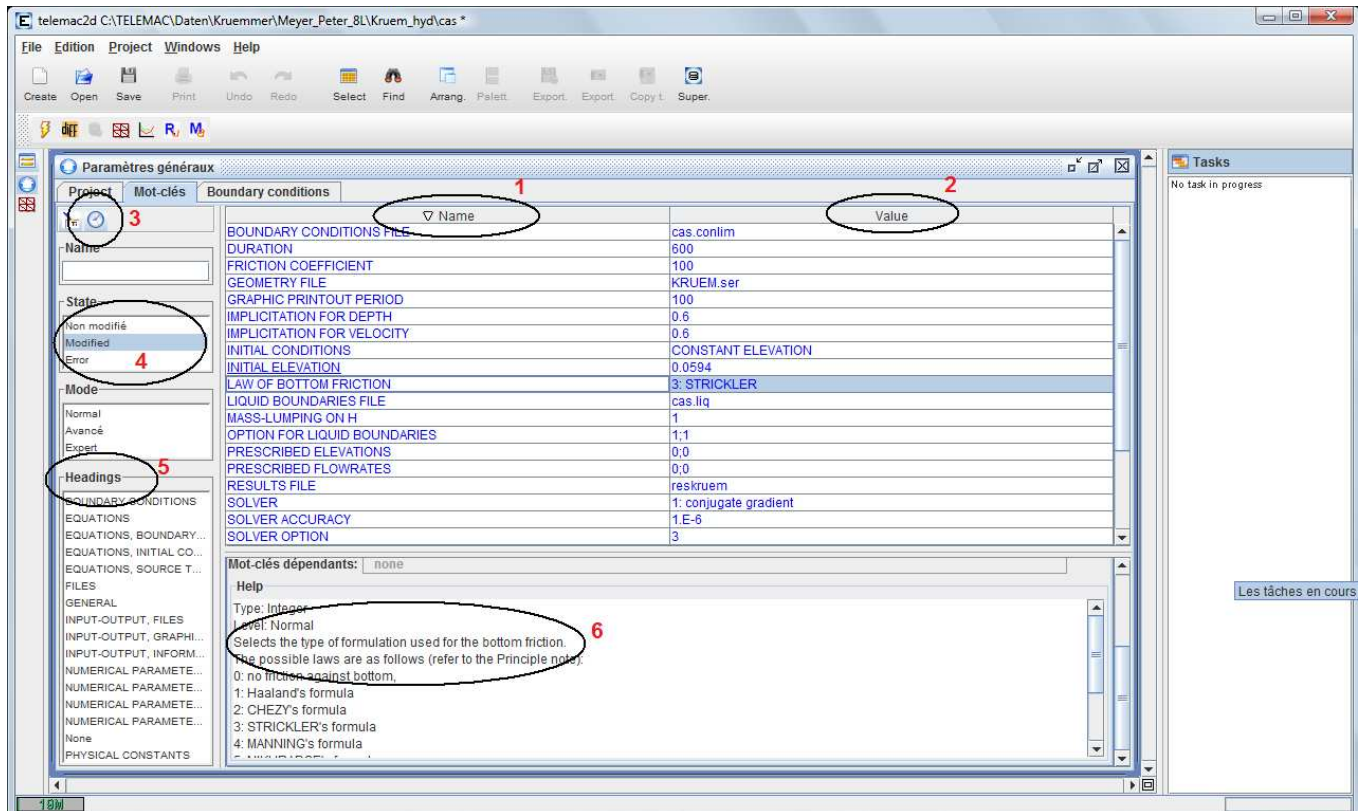


Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Benutzerschnittstelle der 2D-Netzanzeige von FUDAA-PREPRO:



- 1 Wahl zwischen 2D-Anzeige und Parameter-Anzeige
- 2 Selektion – ein einziges Element oder mehrere mit Hilfe eines Polygon
- 3 View tools: Allgemein – Nah-Zoom – ehemalige Anzeige - Verschieben
- 4 Wahl der Farbenskala
- 5 Legende
- 6 Wahl der dargestellten Variable
- 7 2-dimensionale durch Linie definierte Querschnitte
- 8 Schichten
- 9 Schicht: Darstellung der Iso-Oberflächen (Wahl der Variablen mit 6 und der Anzeigefarben mit 4)

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Benutzerschnittstelle des Schlüsselwörter-Monitor von FUDAA-PREPRO:



- 1 Schlüsselwörter (= **Mots-clés**)
- 2 Werte der Schlüsselwörter
- 3 Auswahl des Zeitschrittes und Dauer der Simulation (auch machbar durch die Schlüsselwörter **DURATION** und **TIME STEP**)
- 4 Anzeige der modifizierten/nicht modifizierten Schlüsselwörter
- 5 Anzeige der Schlüsselwörter abhängig von ihren Bedeutung (z.B. Randbedingungen)
- 6 Beschreibung des selektierten Schlüsselwortes

Man wird:

- die anfänglichen Randbedingungen (Wasserspiegel) erstellen;
- Die Randbedingungen-Datei erstellen;
- Die physikalischen und numerischen Parametrisierung der Simulation hinzufügen.

Es wird empfohlen, von Zeit zu Zeit das Projekt mit CTRL+S zu speichern!

Anfängliche Bedingungen

Der Wasserstand wird am $t = 0$ s horizontal sein und auf der Höhe des Auslasses sein. Dafür werden die folgenden Schlüsselwörter so parametrisiert:

INITIAL CONDITIONS = CONSTANT ELEVATION

INITIAL ELEVATION = 0.0594

Randbedingungen

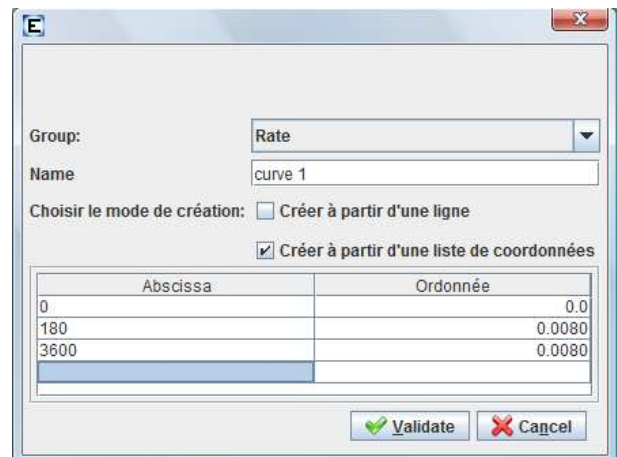
Der Durchfluss beginnt bei null und wird langsam erhöht. Er wird von $0 \text{ m}^3/\text{s}$ zur Zeit $t = 0$ s auf $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ zur Zeit $t = 180$ s steigen, und dann konstant bleiben. Zuerst wird man die Ganjalien eintragen. Es steht im Menü **Project > Time curves**. Mit Rechtsklick wird man **Add a curve** wählen.

Die erste Kurve wird am Einlauf sein:

| T | Q |
|------|-------|
| 0 | 0 |
| 180 | 0.008 |
| 3600 | 0.008 |

Die zweite Kurve wird am Auslauf sein:

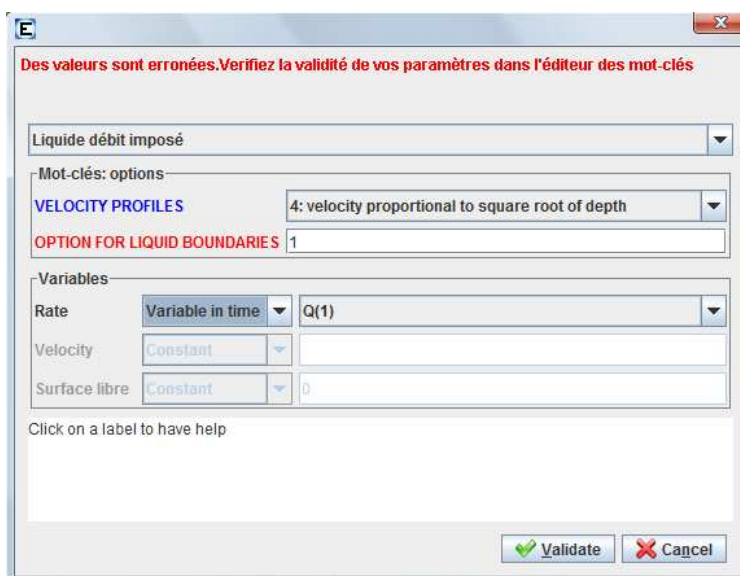
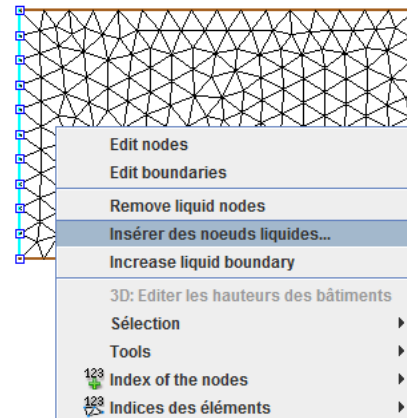
| T | H |
|------|--------|
| 0 | 0.0594 |
| 180 | 0.0594 |
| 3600 | 0.0594 |



T wird in s, Q in m³/s und H in m angegeben.

Man muss die erste Kurve in die Gruppe **Rate** und die zweite Kurve in die Gruppe **Surface libre** verschieben. **Créer à partir d'une liste de coordonnées** bedeutet „mit eine Koordinatenliste erstellen“.

Man kann jetzt den Einlauf in dem 2D-Editor erstellen. In der Schicht **Boundary nodes** wird man die Knoten des Einlaufs selektieren. Mit Rechtsklick die Option **Insérer des noeuds liquides...** (=“flüssigen Knoten hinzufügen“) wählen.



Die Charakteristiken des Einlaufs werden eingetragen:

- Randbedingungstyp ist **Liquide débit imposé** = „gegebener Durchfluss“
- **VELOCITY PROFILES** ist Option **4**

- **OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES** ist **1**, d.h. TELEMAC-2D wird diesen Bedingungen als nicht-modifizierbar betrachten.
- Die Variable Q ist zeitabhängig und ist mit der Ganglinie **Q(1)** verbunden.

Und zuletzt wird man bestätigen.

Für den Auslauf wird dieselbe Manipulation gemacht, obwohl die Schlüsselwörter natürlich anders sind:

- Randbedingungstyp ist **Liquide hauteur imposée** = „gegebene Wasserstand“
- Geschwindigkeitsprofil ist Option **1**
- Option der flüssigen Randbedingungen ist **1**
- Die Variable H ist zeitabhängig und ist mit der Ganglinie **S(1)** verbunden.

Die Rangbedingungen sind jetzt erstellt.

Physikalischen Parameter

Reibungskoeffizient:

In unserem Fall ist es nicht nötig, den Reibungskoeffizienten in den Eigenschaften der Knoten hinzuzufügen, da es derselbe für die ganzen Knoten ist.

FRICITION COEFFICIENT = 55
FRICITION LAW = STRICKLER

Im Anhang E wird erklärt, wie man verschiedene Koeffizienten handhaben kann.

Turbulenzmodell: **TURBULENCE MODEL = K-EPSILON MODEL**

Numerischen Parameter

Dauer der Simulation: **DURATION = 600**

Präzision der Berechnung: **TIME STEP = 0.1**

SOLVER ACCURACY = 10⁻⁶

Stabilität:

IMPLICITATION FOR DEPTH = 0.6
IMPLICITATION FOR VELOCITY = 0.6
MASS-LUMPING ON H = 1

Beseitigung der Störschwingungen:

TREATMENT OF THE LINEAR SYSTEM = Wave equation
SOLVER OPTION = Conjugate gradient

Oder andere Möglichkeit

SUPG = 0; 0
COMPATIBILITY OF FREE SURFACE GRADIENT = 0.9

Ausgabedatei:

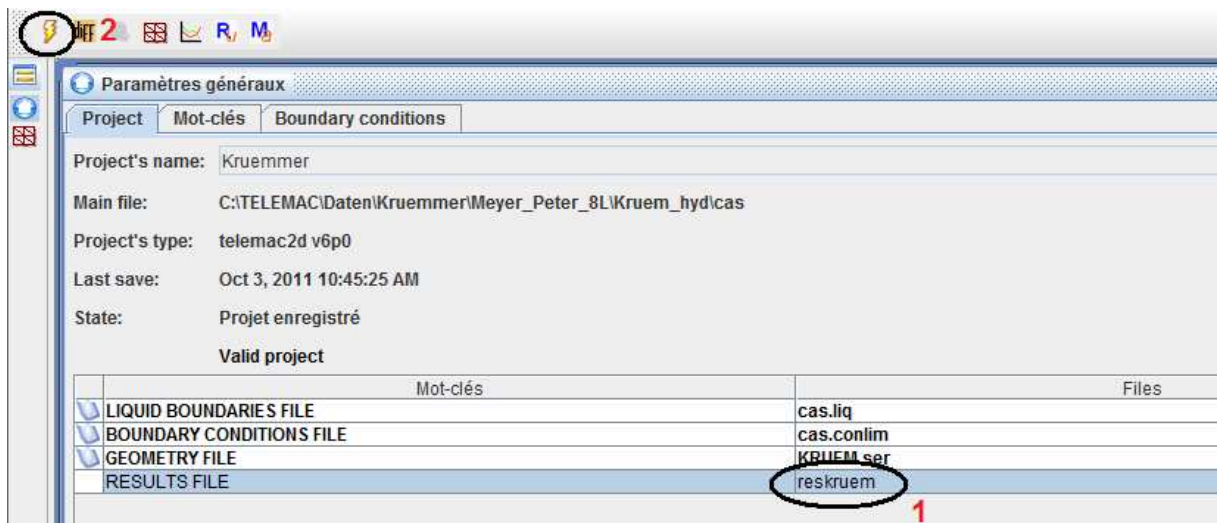
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 30
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUT = U, V, B, H

Wie in der Abbildung dargestellt, werden in dieser Simulation die folgenden Parameter verändert sein

| | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| BOUNDARY CONDITIONS FILE | cas.conlim |
| DURATION | 600. |
| FRICTION COEFFICIENT | 55 |
| GEOMETRY FILE | Kruem_unstructured.ser |
| GRAPHIC PRINTOUT PERIOD | 100 |
| IMPLICITATION FOR DEPTH | 0.6 |
| IMPLICITATION FOR VELOCITY | 0.6 |
| INITIAL CONDITIONS | CONSTANT ELEVATION |
| INITIAL ELEVATION | 0.0594 |
| LAW OF BOTTOM FRICTION | 3: STRICKLER |
| LIQUID BOUNDARIES FILE | cas.liq |
| MASS-LUMPING ON H | 1 |
| OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES | 1;1 |
| PRESCRIBED ELEVATIONS | 0;0 |
| PRESCRIBED FLOWRATES | 0;0 |
| RESULTS FILE | resstartkruem |
| SOLVER | 1: conjugate gradient |
| SOLVER ACCURACY | 1.E-6 |
| SOLVER OPTION | 3 |
| STOP IF A STEADY STATE IS REACHED | <input checked="" type="checkbox"/> |
| TIME STEP | 0.1 |
| TITLE | Kruemmer |
| TREATMENT OF THE LINEAR SYSTEM | 2: Wave equation |
| TURBULENCE MODEL | 3: K-EPSILON MODEL |
| VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS | U,V,H,B,L |
| VELOCITY PROFILES | 4;1 |

Bemerkung: Die Schlüsselwörter **PRESCRIBED ELEVATIONS** und **PRESCRIBED FLOWRATES** werden nicht berücksichtigt, da Ganglinien in der Datei der Randbedingungen gegeben sind.

Man wählt dann den Name und Ordner der Ergebnisdatei (1 z.B. „startdatei“), und man beginnt die Berechnung (2 und bestätigen).



Nach der Berechnung wird man die Ergebnisdatei als Anfangsbedingung der stationären Strömung von 8 L/s nutzen.

Man wird das Projekt der Simulation 2 mit einer Kopie des Projektes der Simulation 1 durchführen, da die zwei Simulationen einander ähneln.

4) Simulation 2: Lauf der gekoppelten Berechnung zwischen TELEMAC-2D und SISYPHE

Man wird in dem Projekt die Anfangsbedingungen, die Randbedingungen, die Dauer der Simulation, und der Name der Ergebnisdaten verändern und die gekoppelte Berechnung von TELEMAC-2D und SISYPHE eintragen. Die Schlüsselwörter, welchen im Vergleich mit der Simulation 1 nicht verändert werden, werden nicht hier beschrieben.

Anfangsbedingungen

Die Schlüsselwörter **INITIAL CONDITIONS** und **INITIAL ELEVATION** sind nicht mehr gültig (Schlüsselwort selektieren, Rechtsklicken > **Initialize**).

Startdatei: **COMPUTATION CONTINUED = Yes,**

INITIAL TIME SET TO 0 = Yes

PREVIOUS COMPUTATION FILE = die in der Simulation 1 erstellte Ergebnisdatei.

Randbedingungen

In **Project > Time curves** müssen die Ganglinien folgendermaßen geändert werden.

Am Einlauf:

| | |
|-------|-------|
| T | Q |
| 0 | 0.008 |
| 86400 | 0.008 |

Am Auslauf:

| | |
|-------|--------|
| T | H |
| 0 | 0.0594 |
| 86400 | 0.0594 |

86400 s = 24 Stunden

Eine andere Möglichkeit hätte gewesen, die Variablen Q am Einlauf und h am Auslauf in jedem Fenster der Randbedingungen als konstant zu definieren, und die Werte einzutragen. Diese unterschiedlichen Handhabung wurde die folgenden Schlüsselwörter verändern:

PRESCRIBED ELEVATIONS = 0; 0.0594

PRESCRIBED FLOWRATES = 0.008; 0

Physikalischen Parameter

Siehe Simulation 1.

```
-----  
/ TELEMAC2D Version v6p0  
/ Kruegger SISYPHE STEERING FILE  
-----  
  
-----  
/ INPUT-OUTPUT, FILES  
-----  
STEERING FILE      ='cas'  
RESULTS FILE       ='reskruem_sed'  
GEOMETRY FILE      ='Kruem_unstructured.ser'  
  
-----  
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING  
-----  
  
-----  
/ INPUT-OUTPUT, INFORMATION  
-----  
  
-----  
/ NUMERICAL PARAMETERS  
-----  
  
-----  
/ PHYSICAL PARAMETERS  
-----  
SEDIMENT DIAMETERS = 0.001  
BED-LOAD TRANSPORT FORMULA = 1  
SECONDARY CURRENTS = YES
```

Numerischen Parameter

Dauer der Simulation: **DURATION = 7200.**

Die Ganglinien können ohne Probleme eine längere Dauer als die Simulation beschreiben.

Gekoppelte Berechnung mit SISYPHE:

COUPLING WITH = INTER-SISYPHE

SISYPHE PARAMETER FILE

= **cas_kruem_sis_coupled.txt**

COUPLING PERIOD = 30

Man darf zuerst die Parameter-Datei „**cas_kruem_sis_coupled.txt**“ von SISYPHE mit dem Texteditor erstellen:

Die Textdatei enthält:

- die Namen der Parameter-Datei von TELEMAC-2D, der Ergebnisdatei von SISYPHE (“reskruem_sed”) und der Netz-datei,
- die Parameter der Berechnung von SISYPHE, welche in diesem einfachen Fall die Korngröße, den Transportgesetz (1 ist für die Meyer-Peter-Formel) und die Berücksichtigung der sekundären Strömungen sind.

Ausgabedatei: eine Ergebnisdatei für TELEMAC-2D und eine Andere für SISYPHE werden erstellt. Dies von SISYPHE die Sohlveränderung (EVOLUTION genannt) automatisch darstellen wird. **GRAPHIC PRINTOUT PERIODE = 1800**

Die modifizierten Schlüsselwörter sehen am Ende wie folgt aus:

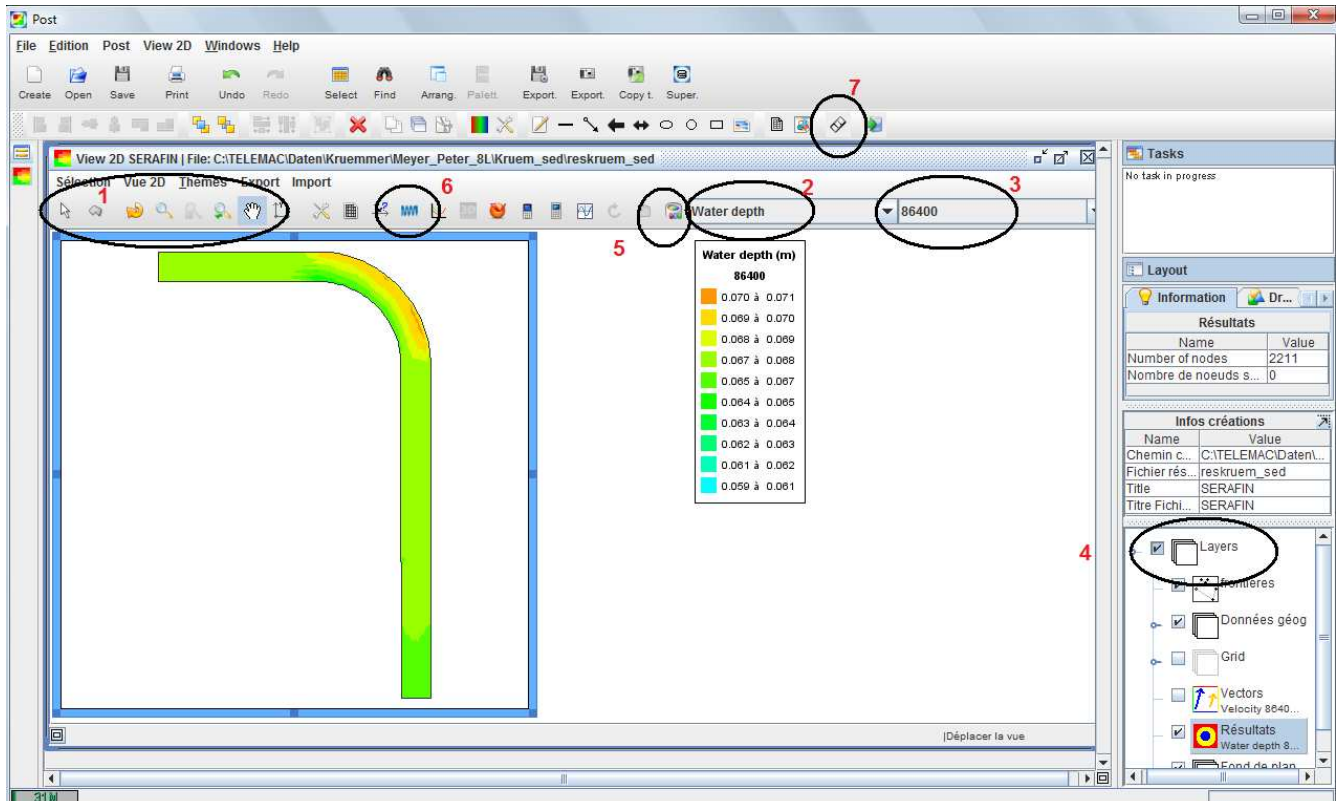
| | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| BOUNDARY CONDITIONS FILE | cas.conlim |
| COMPUTATION CONTINUED | <input checked="" type="checkbox"/> |
| COUPLING PERIOD | 30 |
| COUPLING WITH | INTER-SISYPHE |
| DURATION | 7200 |
| FRICTION COEFFICIENT | 55 |
| GEOMETRY FILE | Kruem_unstructured.ser |
| GRAPHIC PRINTOUT PERIOD | 1800 |
| IMPLICITATION FOR DEPTH | 0.6 |
| IMPLICITATION FOR VELOCITY | 0.6 |
| INITIAL TIME SET TO ZERO | <input checked="" type="checkbox"/> |
| LAW OF BOTTOM FRICTION | 3: STRICKLER |
| LIQUID BOUNDARIES FILE | cas.liq |
| MASS-LUMPING ON H | 1 |
| OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES | 1;1 |
| PRESCRIBED ELEVATIONS | 0;0 |
| PRESCRIBED FLOWRATES | 0;0 |
| PREVIOUS COMPUTATION FILE | condnit.ser |
| RESULTS FILE | reskruem_hyd |
| SISYPHE STEERING FILE | cas_kruem_sis_coupled.txt |
| SOLVER | 1: conjugate gradient |
| SOLVER ACCURACY | 1.E-6 |
| SOLVER OPTION | 3 |
| TIME STEP | 0.1 |
| TITLE | Kruemmer |
| TREATMENT OF THE LINEAR SYSTEM | 2: Wave equation |
| TURBULENCE MODEL | 3: K-EPSILON MODEL |
| VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS | U,V,H,B |
| VELOCITY PROFILES | 4;1 |

Man kann dann die Berechnung in Gang setzen, und die Ergebnisdaten mit FUDAA-PREPRO öffnen.

5) Die Ergebnisse durch FUDAA-PREPRO anzeigen.

Im Supervisor, klickt man doppelt auf die Ergebnisdatei von SISYPHE.

Das Fenster der Postprocessing-Software sieht folgendermaßen aus:



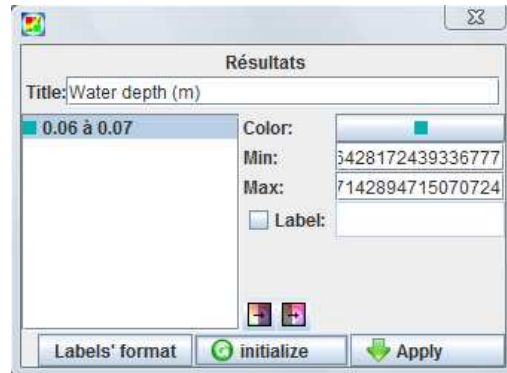
- 1 Selektion und Anzeige-Werkzeug
- 2 Wahl der angezeigten Ausgabevariablen
- 3 Wahl des angezeigten Zeitschrittes
- 4 Schichten
- 5 Wahl der Farbausbreitung
- 6 Anzeige eines 2-dimensionalen Querschnitts
- 7 Anzeige eines „Film“ der Simulation

Diese Beschreibung der durch FUDAA-PREPRO möglichen „Post-Processing“ Aktionen ist nicht erschöpfend.

Die letzten drei Werkzeuge werden im Folgenden ausführlicher beschrieben.

Wahl der Farbausbreitung:

Es ist wichtig, zuerst die gewünschte Variable mit **2** anzuzeigen.



Mit **Label's format** kann man wählen, wie die Werte angezeigt werden (Dezimal etc.)

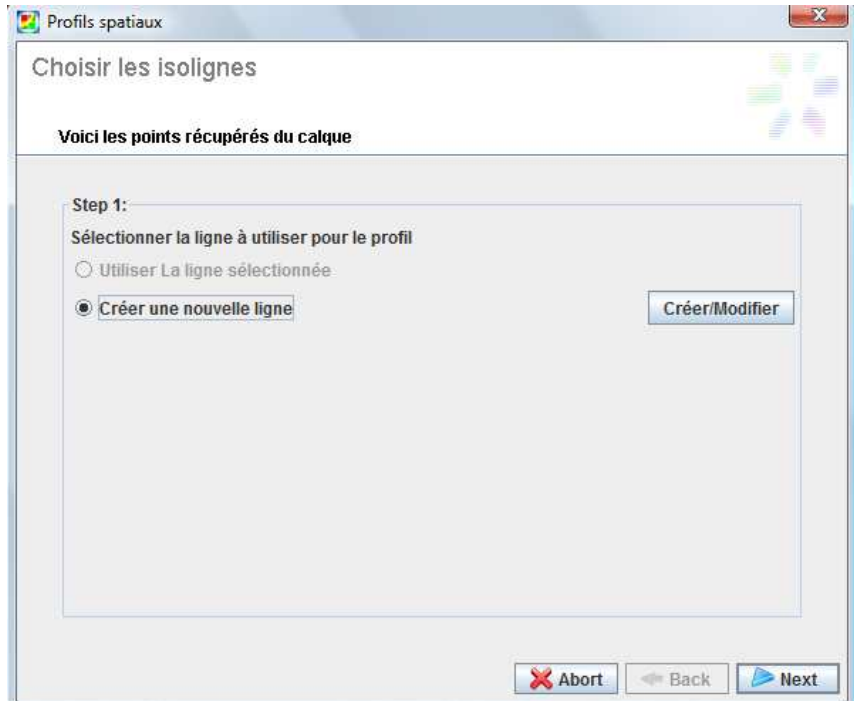
Mit **Initialize** kann man ein Farbenspektrum wählen.

Die Extremwerte des Spektrums können für einen gegebenen (=angezeigte) Zeitschritt oder für die ganze Simulation gewählt werden. Die Farben wählt man mit der **Palette**.



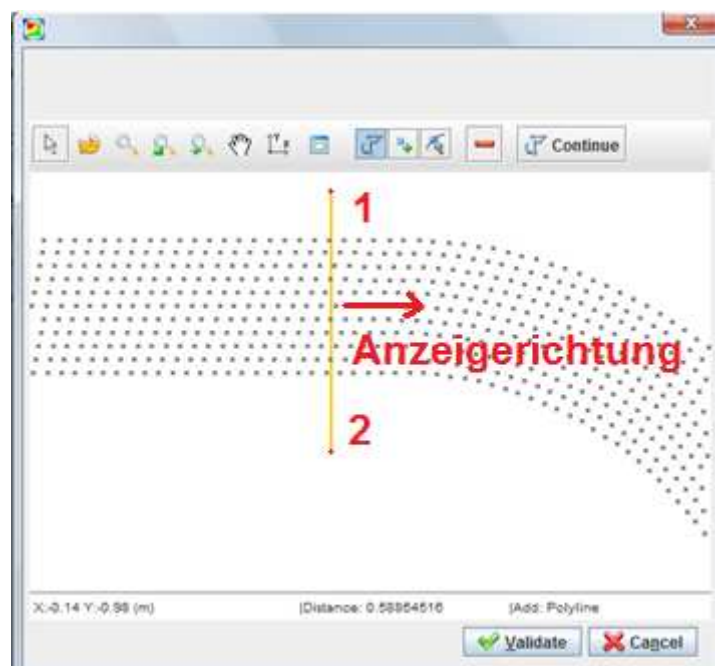
Anzeige eines 2-dimensionalen Querschnitts:

Dieses Teil wurde nicht ins Englisch übersetzt. Es ist aber nicht schlimm, da man nicht viel zu lesen braucht.

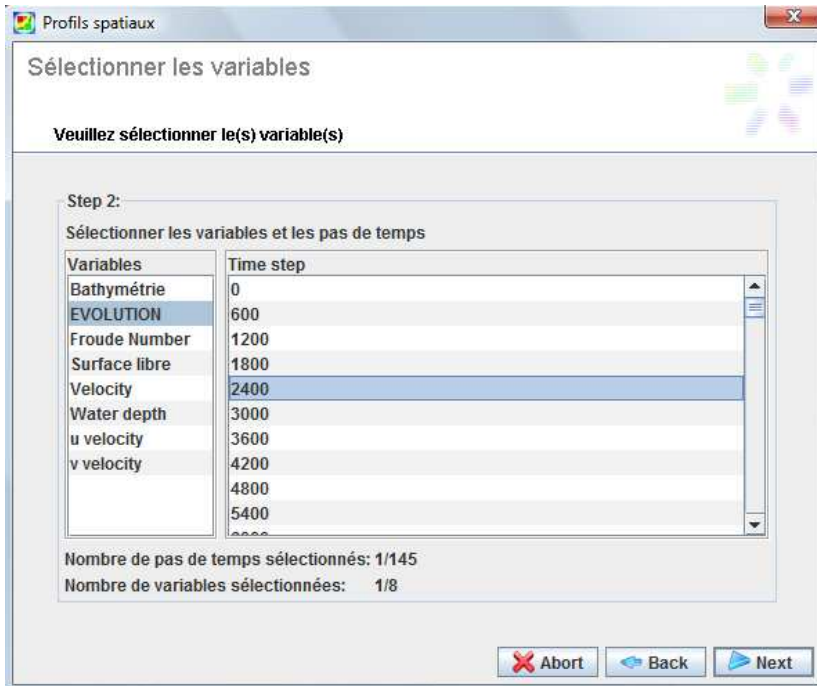


Créer une nouvelle ligne = „Eine neue Linie hinzufügen“

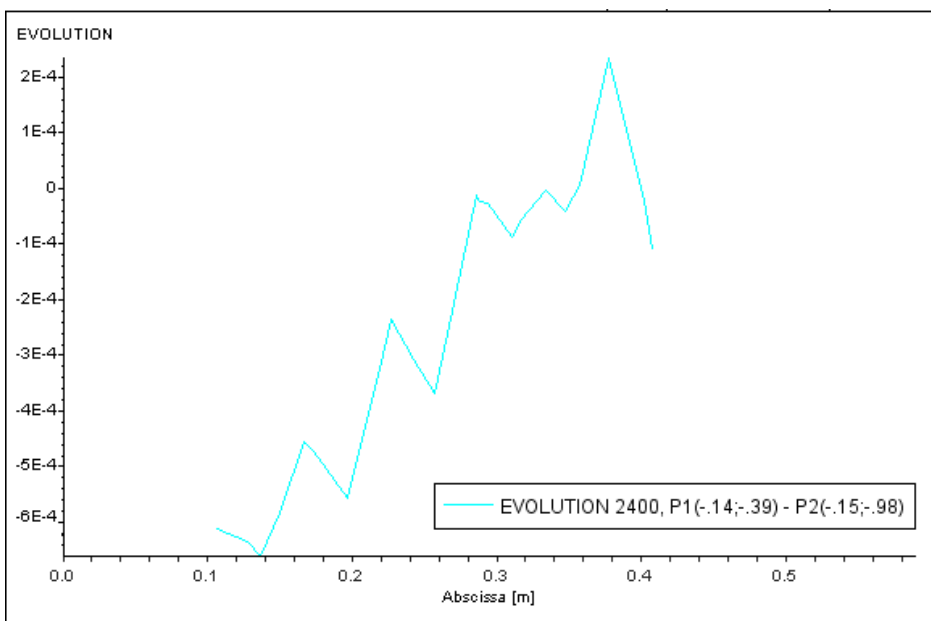
Mit **Créer/Modifier** (=Erstellen/Modifizieren) erstellt man diese Polylinie, welche das Querschnittprofil definieren wird. Die folgende Polylinie ist von Punkt 1 nach Punkt 2 erstellt.



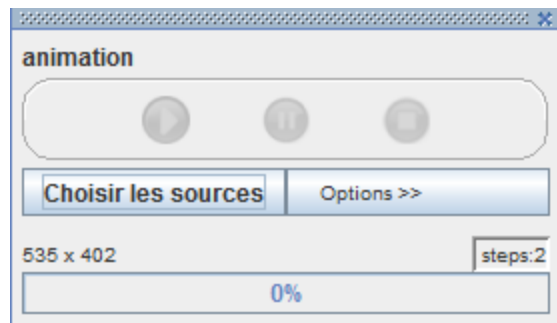
Die in der Grafik angezeigten Variablen und Zeitschritten werden dann gewählt



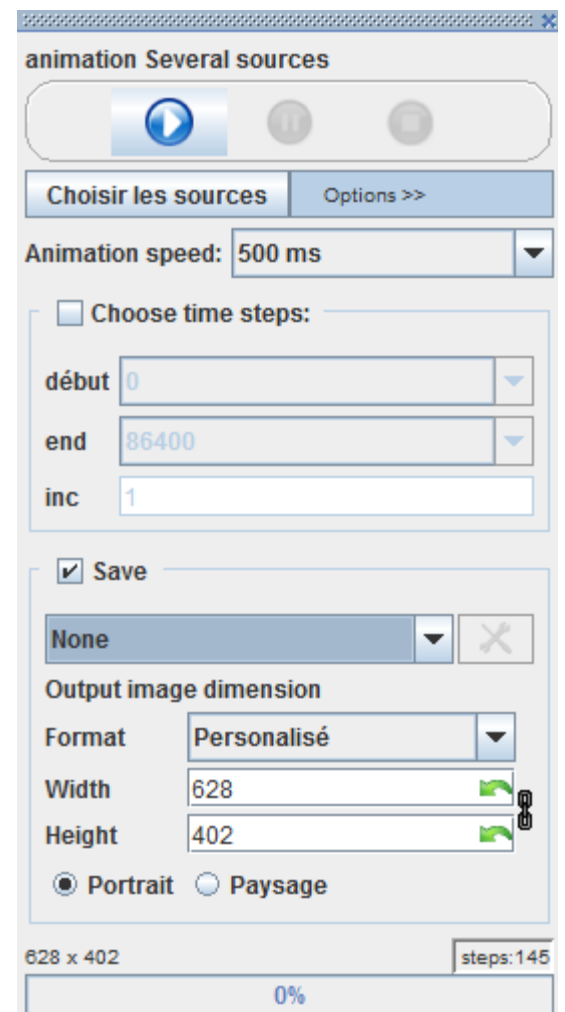
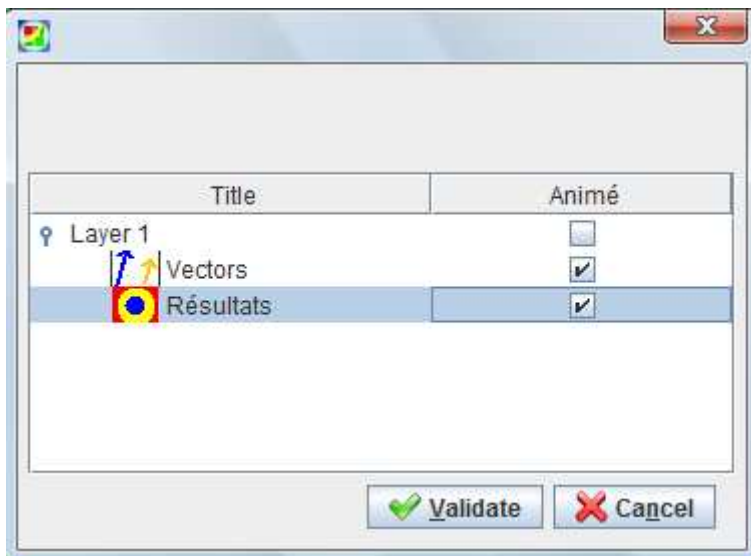
Die Variable **EVOLUTION** ist die Sohlveränderung.



Anzeige eines „Films“ der Simulation:



Choisir les sources (=“Dateiquellen wählen“) bedeutet, dass man die angezeigten Schichten wählen kann. Dafür müssen die Schichten aktiv sein.



Wenn die Dateiquelle gegeben ist, kann man mit **Options** die Anzeige-Geschwindigkeit, die Zeit am Anfang und Ende und das Zeitintervall wählen. Es ist auch möglich, eine .avi-Datei zu erstellen.

E Handhabung der Simulation 2

Die Simulation wird in 4 Schritten durchgeführt:

- 1) Konvertierung des Netzes in dem benötigten Format SERAPHIN.
- 2) Neue Vernetzung des *.ser-Netzes mit MATISSE.
- 3) Lauf der Berechnung mit TELEMAT-2D.
- 4) Anzeigen der Ergebnisse durch FUDAA-PREPRO.

Nur die neuen genutzten vom FUDAA-PREPRO und TELEMAT-2D Möglichkeiten werden detailliert erklärt, da die Handhabung vieler Schritten, welche im Fall 1 erklärt wurde, dieselbe bleibt. Die Unterschiede zwischen diesen Simulationen liegen nur in den Ganglinien und in der Dauer. Die folgende Handhabung ist ein einfaches Beispiel.

1- Konvertierung des Netzes (Fezai, 2010)

Siehe Anhang D.

2- Schritt 2: Neue Vernetzung des Netzes mit MATISSE

Zuerst wird man ein neues MATISSE-Projekt erstellen, in welches das im Schritt 1 erstellte Netz nützlich wird.

Im Modus **Geometrie Lines** klickt man auf die Kontur-Linie und mit **Actions > Define hard points** bestätigen.

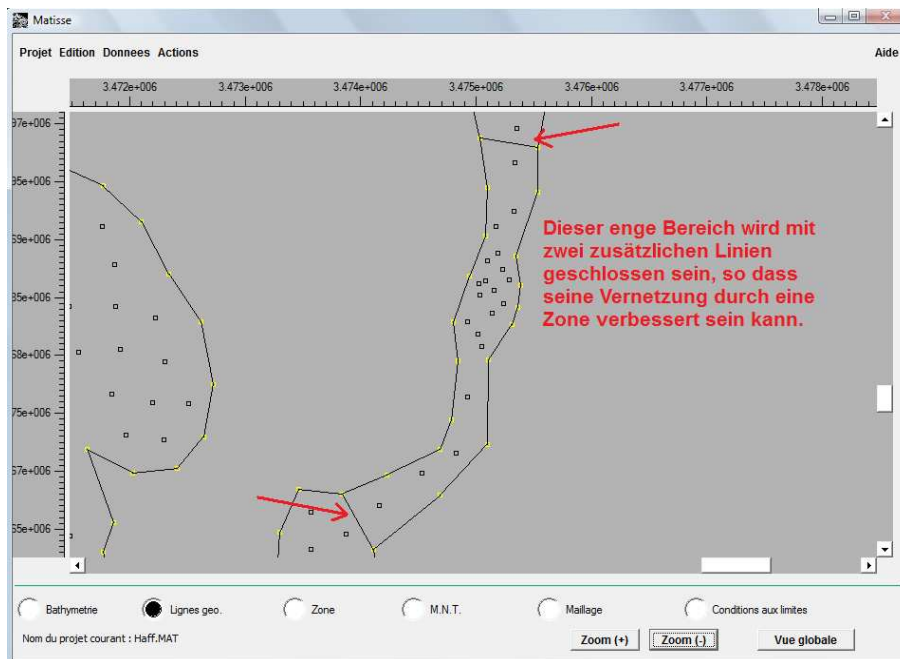
Man wird in diesem Fall die zwei Methoden der Netz-Erstellung kombinieren: mit einem Kriterium und mit Zonen (Siehe auch das Benutzerhandbuch und das Tutorium von MATISSE).

Man wird der Reihe nach vorgehen:

- Die Zonen definieren
- Die Kriterien definieren
- Eine erste durch eines Kriteriums Vernetzung durchführen
- Eine zusätzliche Vernetzung der Zonen durchführen

Zonen definieren

An die engsten Bereiche werden die Zonen genutzt, deshalb wird man schon im Modus **Geometry Lines** die interessanten Bereiche wie in der folgenden Abbildung mit Linien schließen.



Im Modus Zone wird man dann dort Zonen definieren (Siehe Handhabung D und Tutorium). Hinweise: die Qualität der Vernetzung der Zonen wird abhängig von der Regelmäßigkeit ihrer Form sein!

Kriterien kombinieren

Dann wird man im Modus **M.N.T.** die Knoten des Netzes selektieren, wo eine feinere Vernetzung benötigt wird: Kanäle, welche eng sind, oder Gebiete, wo die Bathymetrie eine starke Veränderung zeigt etc.

In diesen Bereichen, wo man die Knoten selektiert hat, wird man ein Kriterium mit einem Abstand von 100 m zwischen den Knoten definieren. Für den komplementären Bereich unserer Selektion, wo eine feinere Vernetzung nicht benötigt wird, wird man ein Kriterium mit einem Abstand von 500 m definieren.

Man wird **Actions > Compute criterion** wählen.

Man wird zuerst diesen selektierten Bereich mit einem Abstand von 100 m zwischen den Knoten vernetzen.

1st operand: nichts wählen

Operator: *constant*

2nd operand: 100

Result: z.B. *krit_100m* eintragen, und mit ENTER bestätigen

Da **Domain definition: Selection** zeigt, kann man mit **Apply** bestätigen.

Jetzt wird man ein zweites Kriterium definieren, so dass man den komplementären Bereich mit einem Abstand von 500 m zwischen den Knoten vernetzt.

1st operand: nichts wählen

Operator: *constant*

2nd operand: 500

Result: z.B. *krit_500m* eintragen, und mit ENTER bestätigen

Wenn **Domain definition** auf **Complementary** ist, kann man mit **Apply** bestätigen.

Mit diesen zwei Kriterien, welche für die komplementären Bereiche definiert sind, kann man ein einziges Kriterium erstellen, welches auf dem ganzen Netz definiert ist.

In **Edition** > **Select all**, wird man

1st operand: *krit_500m*

Operator: *Max(x, y)*

2nd operand: *krit_100m*

Result: z.B. *krit* eintragen, und mit ENTER bestätigen

Da **Domain definition: Selection** zeigt, kann man mit **Apply** bestätigen.

Das Kriterium ist jetzt auf dem ganzen Netz definiert und beinhaltet zwei Abstände zwischen den Knoten, die von den Bereichen abhängig sind.

Erste Kriterium-Vernetzung

Im Modus **Mesh: Actions** > **Compute Mesh** wählen. Das Kriterium *krit* wählen.

Eine erste Vernetzung wird durchgeführt.

Neue Vernetzung der Zonen

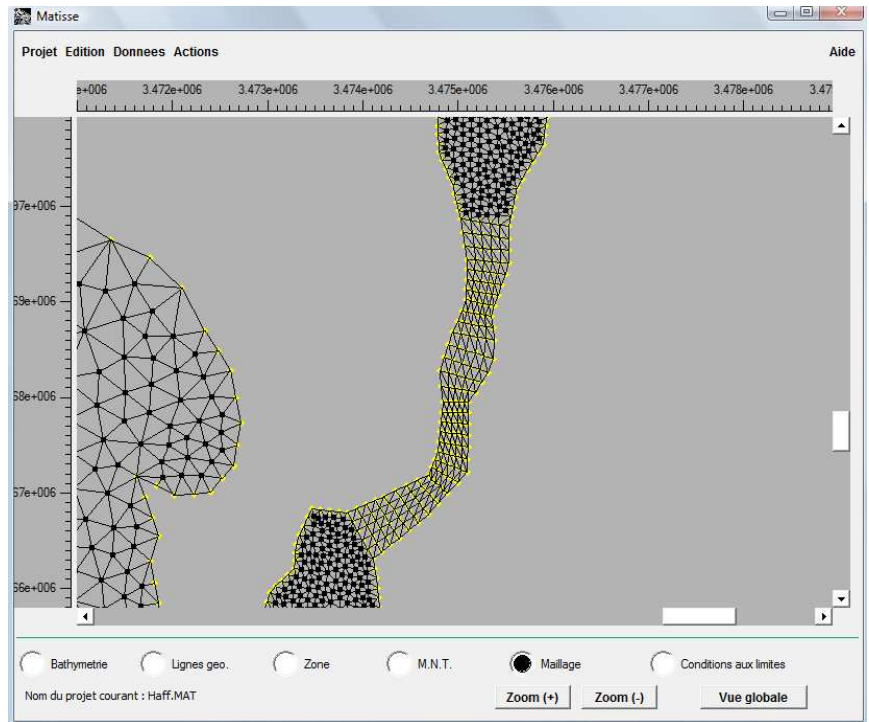
Jetzt muss man noch die engen Bereiche des Netzes (Breite von 300 m oder kleiner), wo die Vernetzung nicht optimal ist, bearbeiten, da TELEMAC-2D in der Breite mindestens 5 Knoten benötigt, so dass das Wasser gut passieren kann.

Man hat auf diesen Bereichen des Netzes Zonen definiert, die jetzt noch vernetzt werden müssen. Die Anwendbarkeit der Vernetzungsmethoden ist abhängig von der Form der Zone.

Es wird empfohlen, 5-6 Knoten in der Breite der verschiedenen Zonen zu nehmen.

Wenn allen Zonen vernetzt sind, kann man **Actions > Compute Mesh** noch einmal durchführen. Die Vernetzung der Zonen ist jetzt zusätzlich zu dem Kriterium berücksichtigt.

Man bekommt z.B. solche Ergebnisse:



Das Netz ist jetzt erstellt. Die Datei wird mit **Project > Generate TELEMAC File** erstellt.

3- Lauf der Berechnung mit TELEMAC-2D.

Man wird:

- Den Reibungskoeffizienten hinzufügen;

- Die Anfänglichen Bedingungen definieren;
- Die Randbedingungen-Datei erstellen;
- Die andere Parametrisierung durchführen.

Es wird empfohlen, von Zeit zu Zeit das Projekt mit CTRL+S zu speichern!

Reibungskoeffizienten

Drei Materialien sind mit Manning-Reibungskoeffizienten von 1, 2 und 3 (Beispielwerten!) definiert. Die Einheit ist $\frac{s}{m^{1/3}}$.

Die Bereiche, wo die Materialien mit $m = 2$ und $m = 3$ auftreten, sind relativ klein. In allen Anderen hingegen ist das Material mit $m = 1$ zu finden.

Deshalb wird man zuerst für die ganzen Knoten einen Reibungskoeffizient von 1 definieren. Die gewünschten Bereiche werden nachher verändert.

Im Schicht (Grid) **Nodes**

Mit einer Polylinie allen Knoten des Netzes wählen

Rechtsklick > **Edit**

Valeurs agrégées (=Werte für alle Knoten mit einem mal definieren)

Für **Bottom friction coefficient** 1 definieren

Man wird die Grenzen zwischen den zwei anderen Materialien des SMS-Projekts, welche als .shp-Datei erstellt werden, hinzufügen. Diese Polygone werden Oberflächen definieren, deren Reibungskoeffizient konstant ist.

Man wird die Schicht **Données géographiques** („geographischen Daten“) selektieren.

Rechtsklick > Ajouter un groupe (=“Gruppe hinzufügen“)

Nom du nouveau groupe (=“Name des neuen Gruppen“), z.B. **material_boundaries** schreiben.

Und Bestätigen.

Für $m = 3$ werden die Polylinien wie folgt hinzugefügt:

Die neue Gruppe selektieren

Rechtsklick > Import

Add (die drei Daten .dbf .shp .shx müssen in demselben Ordner sein, .shp wählen)

Load

Next

Le calque de destination (=“Name der Ziel-Schicht“) z.B. **friction_3** wählen.

Die erstellte Schicht selektieren.

Die .shp-Datei beinhaltet auch die Kontur-Linien, und die Kontur der anderen Polygone, deren Reibungskoeffizient 2 ist. Diese Linien werden gelöscht, so dass in der Schicht nur die Oberfläche mit einem Reibungskoeffizient von 3 bleibt.

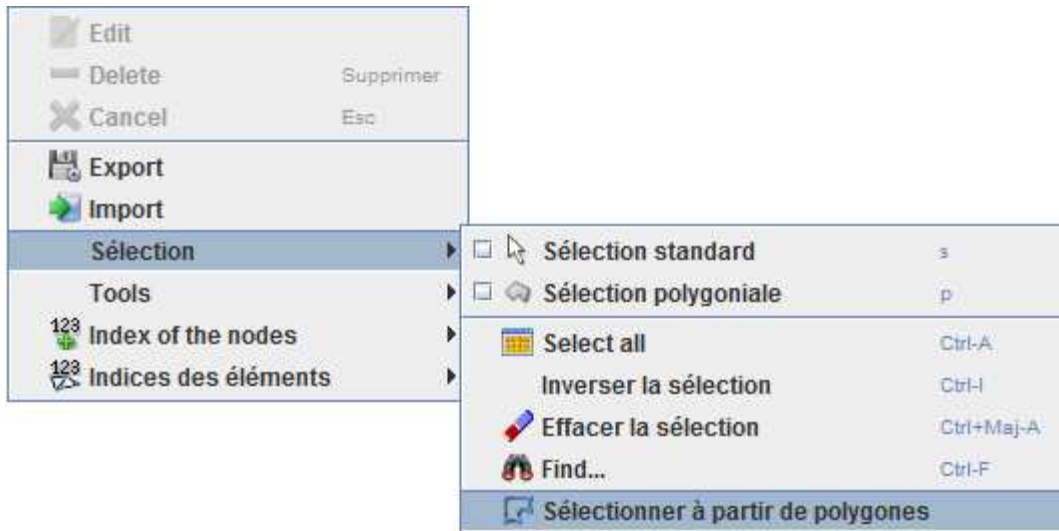
Dieselbe Handhabung wird für $m = 2$ durchgeführt.

Es ist dann möglich, die Knoten durch die Polygone zu selektieren.

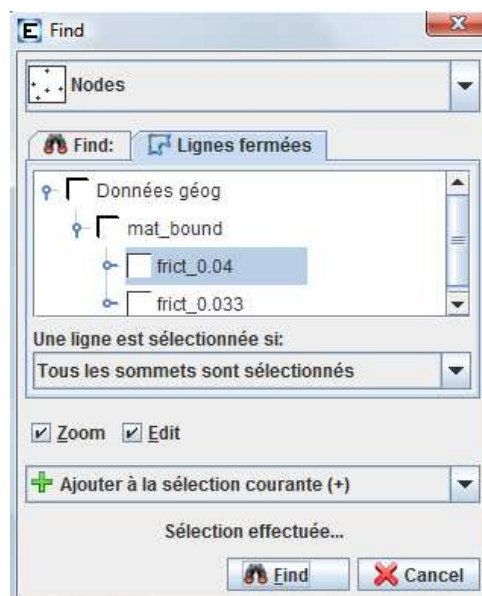
In der Schicht **Nodes** (Grid), rechtsklicken.

Sélection

Sélectionner à partir de polygones (=“durch Polygonen Knoten selektieren“)



Man kann jetzt die Schicht **friction_3** wählen



Die Knoten, welche einen Reibungskoeffizienten von 3 haben werden, werden selektiert.

Rechtsklick > **Edit**

Valeurs agrégées (=Werte für alle Knoten mit einem mal definieren)

Bottom friction coefficient = 3 definieren

Es ist nützlich zu überprüfen, dass alle Knoten den neuen Reibungskoeffizienten bekommen haben (wenn nicht, selektieren, Rechtsklick, **Edit** etc.).

Dieselbe Handhabung wird auch für die Bereiche, wo $m = 2$, durchgeführt.

Anfängliche Bedingungen

Die folgenden Schlüsselwörter werden so parametrisiert:

INITIAL CONDITIONS = CONSTANT ELEVATION

INITIAL ELEVATION = 0

Randbedingungen

Zuerst wird man die Ganglinien eintragen. Es steht im Menü **Project > Time curves**.

Mit Rechtsklick **Import** wählen.

Man kann die Ganglinien importieren. Da die Ganglinien an den offenen Rändern dieselbe ist, kann man mit Rechtsklick **Duplicate** wählen, um sie zu kopieren. Die Ganglinien müssen dann in die guten Schichten verschieben sein (Durchfluss = **Rate** und Wasserstand = **Surface libre**).

In dem 2D Editor wird man die Einlauf und Ausläufe erstellen. Die Handhabung ist dieselbe wie im Fall 1.

Physikalischen Parameter

Turbulenzmodell: **TURBULENCE MODEL = K-EPSILON MODEL**

Reibungsgesetz: **FRICITION LAW = MANNING**

Numerischen Parameter

Dauer: **DURATION = gewünschte Zeit in Sekunden**

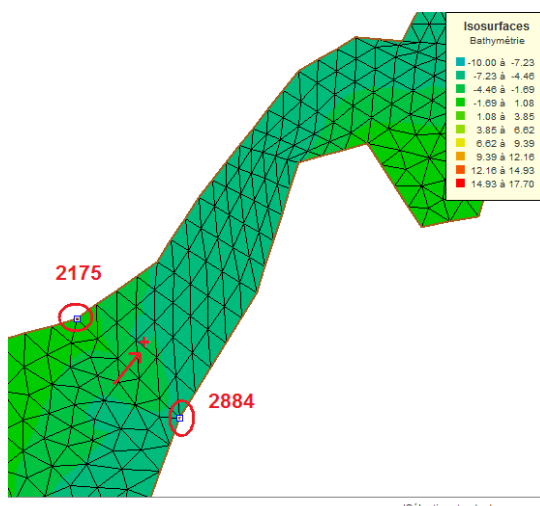
Zeitschritt: **TIME STEP = 15**

Ausgabedatei: **GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 4**

VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUT = U, V, B, H, S, MAXZ, MAXV, TMXZ, TMXV, W, US

Andere Parametrisierung

Ein Kontrollquerschnitt wird definiert, so dass man unabhängig die Randbedingungen eines Teilmodells bestimmen kann. Er ist durch eine Textdatei definiert. Die Abbildung am Links zeigt; wo und wie der Kontrollquerschnitt definiert ist; die am Rechts zeigt, wie man die Textdatei des Kontrollquerschnitts schreiben kann (Siehe Benutzerhandbuch von TELEMAC-2D).



```
#Control section definition
1-1
inflow
2175 2884
```

1 bedeutet, dass es ein Querschnittsprofil gibt (und nicht mehrere). -1 ist die negative Zahl, die man eingeben muss, wenn man das Profil durch zwei Knotennummern definiert. inflow ist der Name des Profils und 2175 und 2884 sind die Knotennummern.

Man muss den Namen der Datei zu dem Schlüsselwort **SECTION INPUT FILE** und den Namen der Ausgabedatei zu dem Schlüsselwort **SECTION OUTPUT FILE** hinzufügen.

In der folgenden Abbildung wird ein Beispiel der benötigten Schlüsselwörter einer Simulation.

| | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| BOUNDARY CONDITIONS FILE | cas.conlim |
| DURATION | 3720 |
| FRICTION COEFFICIENT | 0 |
| GEOMETRY FILE | STET_HAFF.ser |
| GRAPHIC PRINTOUT PERIOD | 4 |
| INITIAL CONDITIONS | CONSTANT ELEVATION |
| LAW OF BOTTOM FRICTION | 4: MANNING |
| LIQUID BOUNDARIES FILE | cas.liq |
| OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES | 1;1;1;1 |
| PRESCRIBED ELEVATIONS | 0;0;0;0 |
| PRESCRIBED FLOWRATES | 0;0;0;0 |
| RESULTS FILE | reshaff |
| SECTIONS INPUT FILE | control_sections.txt |
| SECTIONS OUTPUT FILE | ausgabe_control_sections.txt |
| TIME STEP | 15 |
| TITLE | Stettiner_Haff |
| TURBULENCE MODEL | 3: K-EPSILON MODEL |
| VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS | U,V,B,H,S,MAXZ,MAXV,TMXZ,TMXV,US,W |
| VELOCITY PROFILES | 4;4;4;4 |

Bemerkung: das Schlüsselwort **FRICTION COEFFICIENT** wird wegen dem Schlüsselwort **FRICTION LAW** benötigt, aber es wird nicht genutzt (irgendwelche Zahl reicht)! TELEMAC-2D wird automatisch mit dem Reibungskoeffizienten des Netzes arbeiten. Dies kann überprüft sein, wann die Ausgabevariable „Reibungskoeffizient“ die Richtige ist.

Die Berechnung kann dann durchgeführt werden.

4- Die Ergebnisse durch FUDAA-PREPRO anzeigen.

Siehe Anhang D.

F Plausibilitätsprüfung der in TELEMAC-2D berechnete Reibungsgeschwindigkeit

In TELEMAC-2D wird die Ausgabevariable US (U_{Star}) berechnet:

$$US = \sqrt{C_f} \cdot u$$

Darin ist u die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit. C_f ist der dimensionslose Reibungskoeffizient, welcher wie folgt definiert ist:

$$C_f = \frac{g}{C_h^2} \quad \leftrightarrow \quad \sqrt{C_f} = \frac{\sqrt{g}}{C_h}$$

Mit C_h wird der Chézy-Koeffizient bezeichnet.

US kann dann unter Nutzung des Chézy-Koeffizienten wie folgt definiert werden:

$$US = \frac{\sqrt{g}}{C_h} \cdot u$$

Es kann nachgewiesen werden, dass US die Sohlschubspannungsgeschwindigkeit darstellt.

Die Sohlschubspannungsgeschwindigkeit u^* ist folgendermaßen definiert:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

Die folgende Schlussfolgerung ist für stationäre Berechnungen in Rohrleitungen und offenen Gerinnen gültig.

Technische Hydromechanik 1, G. Bollrich, S.157-158

„Man kann sich diese Energie [...] erzeugt denken, die ihrerseits von einer Wand-schubspannung τ_0 zwischen Flüssigkeit und Wand herrührt. Dieses Gedankenmodell spiegelt die Wirklichkeit nur unvollkommen wider, denn die Umwandlung von mechanischer in Wärmeenergie (Energiedissipation) erfolgt nicht nur an der Wand, sondern im

gesamten Flüssigkeitskörper. Es ermöglicht aber die Formulierung eines einfachen mathematischen Modells, das an gegebenen Stellen zu verfeinern sein wird. In der Hydraulik wird zwischen τ_0 und der Fließgeschwindigkeit u ein auf Erfahrung beruhender quadratischer Zusammenhang postuliert, der – wie sich herausstellt – für hochturbulente Strömung tatsächlich voll zutrifft. Es ist

$$\tau_0 \sim u^2.$$

Um daraus eine Gleichung zu erhalten, muss die rechte Seite mit der Dichte ρ (wegen gleicher Einheiten $[N/m^2]$ auf beiden Seiten) sowie mit einer Konstanten, einem dimensionslosen Beiwert λ , multipliziert werden, der aus Gründen der Zweckmässigkeit im Hinblick auf das Endergebnis mit $\lambda/8$ eingeführt wird:“

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot u^2$$

Und λ ist der Widerstandsbeiwert der Wandreibung. Die Sohlschubspannung ist dann bei turbulenter Fließbewegung, welche nur in Gerinnen praktisch vorkommt, proportional zu dem Geschwindigkeitsquadrat.

Tatsächlich kann man dieses empirische Ergebnis mit einer Analyse der Dimensionen bestätigen:

$$[\tau_0] = \frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2} \quad \text{da} \quad N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$$

d.h.

$$[\tau_0] = \frac{kg}{m \cdot s^2} = \frac{m^2 \cdot kg}{m^3 \cdot s^2} = \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m^2}{s^2}$$

Und

$$[\rho] = \frac{kg}{m^3}$$

$$[u] = \frac{m}{s} \rightarrow [u^2] = \frac{m^2}{s^2}$$

Mit ρ die Dichte des Wassers.

Also

$$[\tau_0] = \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m^2}{s^2} = [\rho] \cdot [u^2]$$

Es ergeben sich die Formeln (1) und (2):

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \cdot u^2$$

Und da der Chézy-Koeffizient C_h wie folgt definiert ist:

$$C_h = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \Leftrightarrow \sqrt{\frac{\lambda}{8}} = \frac{\sqrt{g}}{C_h}$$

Folgt daraus:

$$u^* = \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \cdot u^2 = \frac{\sqrt{g}}{C_h} \cdot u = US$$

Diese Formel kann in den 2-dimensionalen und möglichen nichtstationären Berechnungen von TELEMAC-2D genutzt werden.

Die Diskretisierung der Zeit und des Raumes lässt uns feststellen, dass:

- Das lokale hydrodynamische System während eines Zeitschritts eine stationäre Strömung ist.
- Sich die zu der lokalen tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit senkrechten, gegenläufigen Druckkräfte aufheben.

