

- TANALYS

Eine der wichtigsten Grundlagen für die Arbeit mit dem hydrologischen Modell WaSiM-ETH ist, besonders in gebirgigen Regionen, ein digitales Höhenmodell (DHM) des zu bearbeitenden Einzugsgebietes. Neben den lokalen Informationen über die Höhenlage, das Gefälle, die Exposition oder die Wölbung können aus dem DHM weitere hydrologisch relevante Strukturen und Beziehungen extrahiert werden. Dazu zählen insbesondere die Fließrichtungen, die spezifische Einzugsgebietsfläche eines Rasterelementes, das Flussnetz sowie die Teileinzugsgebietsgrenzen. Auch die topographische Abschattung oder die Horizontüberhöhung lassen sich zur Strahlungsparametrisierung und damit zur Modellierung strahlungssensitiver Prozesse wie Schneeschmelze und Verdunstung nutzen.

Das Programm „Tanalys“ führt eine umfangreiche Topographische Analyse des digitalen Höhenmodells durch. Ausgehend von den Daten des DHM werden die in Abbildung 29 dargestellten Datensätze erzeugt, die vielfach von nachfolgenden Operationen als Eingabegrüds benötigt werden, was durch Pfeile gekennzeichnet ist. Der Ablauf der topographischen Analyse wird durch eine Steuerdatei gesteuert, in welcher der Umfang der Analyse festgelegt wird und auch die vereinzelt nötigen Parameter angegeben werden müssen, z.B. der Schwellenwert der Fließakkumulation für ein Fließgewässer oder die typischen Hochwasser-Abflusspenden bei MHQ.

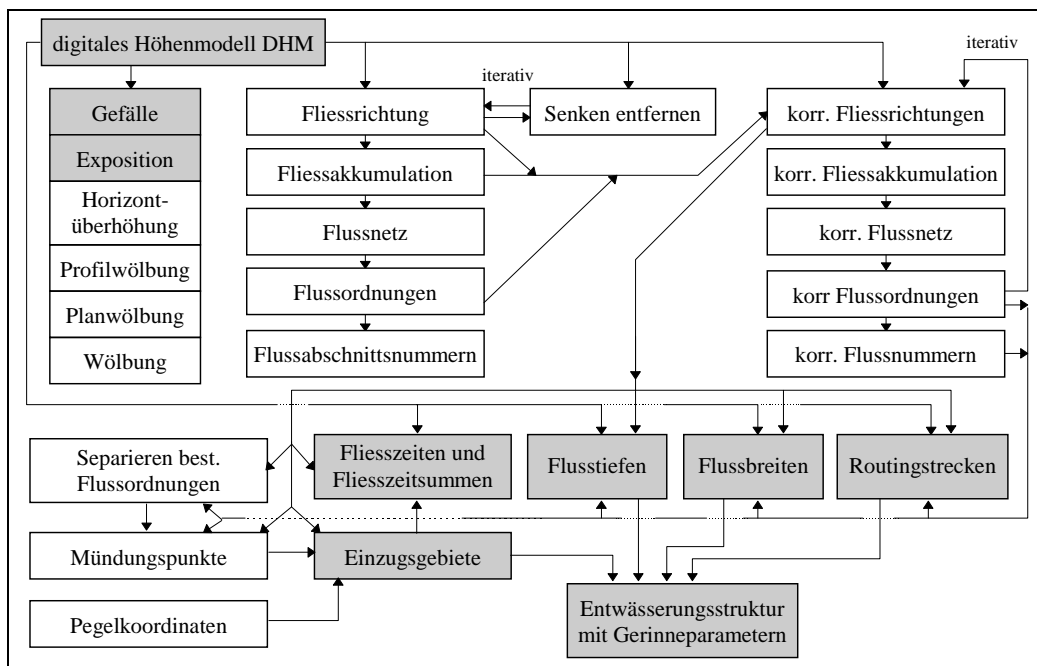


Abb. 29: Topographische Analyse des digitalen Höhenmodells mit Tanalys

Nur die grau unterlegten Datensätze werden direkt von WaSiM-ETH benötigt, Einzugsgebiete und Entwässerungsstruktur jedoch nur, wenn das Infiltrations- bzw. Bodenmodell sowie das Abflussmodell ausgeführt werden sollen. Exposition und Hangneigung werden nur für die Strahlungs- und Temperaturkorrektur benötigt und können überdies in WaSiM-ETH selbst während der Initialisierung aus dem Höhenmodell erzeugt werden. Grundlage der gesamten Analyse ist das digitale Höhenmodell (DHM). Gefälle, Exposition und Hangneigung werden nach den in BEVEN (1993) angegebenen Algorithmen berechnet. Dabei wird ein 3 x 3 - Fenster über das Grid bewegt, um jeweils eine Ebene 2. Ordnung (Paraboloid) durch die 9 Punkte zu legen. Für jeden der 9 Punkte gilt Gleichung (142):

$$z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (142)$$

Wird der jeweilige linke obere Punkt des 3 x 3 - Fensters als Koordinatenursprung (1,1) angesehen und wird die Rasterweite zu einheitlich L gesetzt (was im regelmässigen Raster zulässig ist), so vereinfacht

sich die Lösung des bei Einsetzen aller 9 Punkte entstehenden Gleichungssystems erheblich (Koordinaten $x, y \in \{1, 2, 3\}$). Die Koeffizienten A bis I können auf folgende Weise ermittelt werden:

$$\begin{aligned}
 I &= z_{2,2} \\
 H &= (z_{2,1} - z_{2,3}) / (2L) \\
 G &= (z_{3,2} - z_{1,2}) / (2L) \\
 F &= (-z_{1,1} + z_{3,1} + z_{1,3} - z_{3,3}) / (4L^2) \\
 E &= [(z_{2,1} + z_{2,3}) / 2 - z_{2,2}] / L^2 \\
 D &= [(z_{1,2} + z_{3,2}) / 2 - z_{2,2}] / L^2 \\
 C &= [(-z_{1,1} - z_{1,3} + z_{3,1} + z_{3,3}) / 4 + (z_{1,2} - z_{3,2}) / 2] / L^3 \\
 B &= [(z_{1,1} + z_{3,1} - z_{1,3} - z_{3,3}) / 4 - (z_{2,1} - z_{2,3}) / 2] / L^3 \\
 A &= [(z_{1,1} + z_{1,3} + z_{3,1} + z_{3,3}) / 4 - (z_{1,2} + z_{2,1} + z_{2,3} + z_{3,2}) / 2 + z_{2,2}] / L^4
 \end{aligned}$$

	x=1	x=2	x=3
y=1	$z_{1,1}$	$z_{1,2}$	$z_{1,3}$
y=2	$z_{2,1}$	$z_{2,2}$	$z_{2,3}$
y=3	$z_{3,1}$	$z_{3,2}$	$z_{3,3}$

(143)

Daraus können folgende Parameter ermittelt werden:

Neigung $\hat{\beta} = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2})$ (144)

Exposition $\hat{\Omega} = 180 - \arctan(H / G) + 90(G / |G|)$ (145)

Profil – Wölbung $\phi = -2(DG^2 + EH^2 + FGH) / (G^2 + H^2)$ (146)

Plan – Wölbung $\omega = 2(DH^2 + EG^2 - FGH) / (G^2 + H^2)$ (147)

Gesamtwölbung $\chi = \omega - \phi = 2E + 2D$ (148)

Die Horizontüberhöhung kann benötigt werden, wenn räumlich verteilte detaillierte Strahlungsbilanzen mit Berücksichtigung des Einflusses der Topographie aufgestellt werden sollen. Ausgehend von den in Kapitel 1.3 vorgestellten Algorithmen zur Berechnung der Abschattung des Einzugsgebietes wird für jeden Punkt des digitalen Geländemodells in einer fest vorgegebenen Winkelschrittweite, z.B. von Norden ausgehend 36 Schritte á 10°, der Sonnenwinkel über dem Horizont gesucht, der zu einer Abschattung des aktuellen Punktes führen würde. Neigung und Exposition der Fläche werden dabei ebenfalls berücksichtigt. Mit diesem Überhöhungswinkel $\beta_{h,i}$ wird der Anteil der diffusen Strahlung des in diesem Sektor i sichtbaren Anteils der Himmelshalbkugel, relativ zur diffusen Strahlung dieses Sektors wenn die Horizontüberhöhung 0° wäre, berechnet. Nach OKE (1987) kann unter Berücksichtigung der Abschwächung auch der diffusen Strahlung in Abhängigkeit ihres Einfallswinkels $\sin\beta_h$ sowie unter Beachtung der mit $1 - \sin\beta_h$ abnehmenden Fläche der sichtbaren Himmelshalbkugel der sogenannte Sky-view-factor ψ_{sky} berechnet werden:

$$\Psi_{sky} = \sum_{i=1}^n \cos^2 \beta_{h,i} \tag{149}$$

mit $\beta_{h,i}$ Horizontüberhöhung in aktuellen Sektor i [rad]
 n Anzahl der Teile des Vollkreises, für welche die Horizontüberhöhung berechnet wurde

Die gesamte kurzweilige Strahlungsbilanz R_K lässt sich dann gemäss Gleichung (13) der Modellbeschreibung folgendermassen berechnen:

$$R_K = R_{Sonne} \cdot \frac{\cos \hat{\Theta}}{\cos Z} + D \cdot \psi_{sky} + RG(1 - \psi_{sky}) \cdot \alpha \tag{150}$$

mit D diffuse Strahlung [Wh/m²]
 R_{Sonne}, RG direkte Sonnenstrahlung bzw. Globalstrahlung (direkt+diffus) [Wh/m²]

α mittlere Albedo des vom betrachteten Punkt sichtbaren Terrains [-]

Der mittlere Wert aller Sky-View-Faktoren aus allen Sektoren ist der für diesen Punkt gültige Ausgabe- wert im Horizontüberhöhungsgrid. Soll dagegen nur der relative Anteil A_s , der sichtbaren Himmelshalbkugel (nicht der diffusen Strahlung) an der gesamten Himmelshalbkugel berechnet werden, muss, ausge- hend von der Berechnungsformel der Oberfläche einer Kugelkappe $A = 2\pi r^2(1-\sin\beta_h)$, (149) umformuliert werden in:

$$A_s = 1 - \sum_{i=1}^n \sin \beta_{h,i} \quad (151)$$

Der Unterschied zwischen ψ_{sky} und A_s kann beträchtlich sein, insbesondere bei kleinen Überhöhungswin- keln, berücksichtigt doch (151) im Gegensatz zu (149) nicht das Lambert'sche Gesetz der Abschwächung der Strahlung mit dem Anwachsen des Einstrahlungswinkels in Bezug zur Ebenennormalen. Aus (149) geht hervor, dass kleine Horizontüberhöhungen in der Strahlungsbilanzbildung praktisch nicht ins Ge- wicht fallen. Bei $\beta_h < 5^\circ$ liegt der Sky-view-factor ψ_{sky} nach (149) durchweg bei über 0.99, während bei einem Überhöhungswinkel von 5° nach (151) nur noch etwa 91 % der Himmelsfläche zu sehen sind. Ab- bildung 30 verdeutlicht diese Zusammenhänge. In der gegenwärtigen Modellkonfiguration ist die Nut- zung des Sky-view-fator-Grids noch nicht vorgesehen.

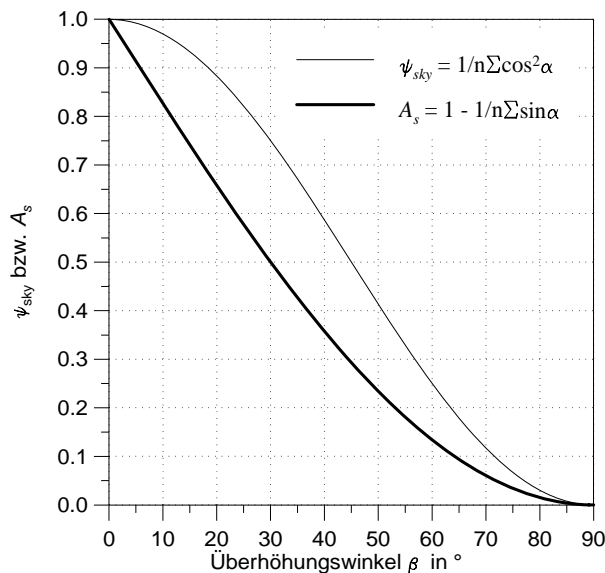


Abb. 30: Sky-View-Faktoren ψ_{sky} und sichtbarer Anteil der Himmelshalbkugel A_s in Abhängigkeit vom Horizontüberhöhungswinkel β_h

Die Fliessrichtungen werden nach dem steilsten Gefälle festgelegt. Eine Zelle entwässert jeweils nur in *eine* der benachbarten acht Zellen. Bei den Fliessrichtungen auftretende Artefakte (Senken, in denen Wasser nicht abfließen kann, Ebenen ohne definierte Fliessrichtungen) oder echte, auch in der Natur vorhandene Senken (beispielsweise im Karst), werden iterativ entfernt. Senken werden entfernt, indem nach Feststellen ihres Umfanges (welche miteinander verbundenen Zellen haben dieselbe Höhe?) der niedrigste der umgebenden höhergelegenen Punkte gesucht und als Ersetzungswert für alle zur Senke gehörenden Zellen herangezogen wird. Ist die solcherart aufgefüllte Senke immer noch eine Senke (kein Randpunkt weist ein Gefälle nach aussen auf) wird das Auffüllen wiederholt, bis einer der Randpunkte ein Gefälle nach ausserhalb der Senke zeigt, oder an den Rand des Grids stösst, was ebenfalls als Aus- laufpunkt angesehen wird. Nun werden die Fliessrichtungen innerhalb der Senke, die nun eine „Ebene“ ist, ebenfalls iterativ, von den Auslaufstellen beginnend, zu diesen Auslaufstellen geführt. Es sind auch mehrere Auslaufstellen für eine Ebene möglich. Eine Version der Senkenentfernung, die nach dem umge-

Zelle zum letzten Gitterpunkt des nächstgelegenen oder, wenn beide Flüsse wie in Abbildung 31 den gleichen Abstand haben, zum grösseren der beiden Flüsse 1. Ordnung gedreht.

Durch Separieren von Flüssen ab bestimmten Ordnungen aufwärts kann das Flussnetz auf Flüsse oberhalb erster, zweiter, dritter Ordnung usw. begrenzt werden. Aus dem separierten Flussordnungsgrid werden die Flussnummern neu bestimmt und daraus die Punkte ermittelt, an denen zwei oder mehr Flüsse in einen neuen Gewässerabschnitt münden. Diese Mündungspunkte sind jeweils die letzten Gridzellen eines Gewässerabschnitts in Fliessrichtung betrachtet. Um zu erreichen, dass das zwischen zwei mündenden Gewässerabschnitten liegende Gebiet in den Hauptfluss und nicht in einen der beiden mündenden Gewässerabschnitte entwässert, werden die Fliessrichtungen um den ersten Punkt des folgenden Gewässerabschnittes entsprechend umgeleitet (siehe Abbildung 31).

Für jeden Gewässerabschnitt des Flussnummerngrids wird unter Einbeziehung des Gefälles auf dieser Strecke, dass sich als Quotient aus der Fliesslänge als Summe der durchflossenen Gridzellenfliesswege und der Differenz zwischen maximaler und minimaler Höhe des Gewässerabschnittes ergibt, eine Fliessgeschwindigkeit nach Manning-Strickler errechnet:

$$v = M \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (152)$$

$$\dot{V} = M \cdot A \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (153)$$

mit	v	Fliessgeschwindigkeit	[m/s]
	M	Manning-Beiwert (10 ... 40)	[m ^{1/3} /s]
	A	Fliessquerschnitt (aus Rechteckprofil Tiefe/Breite = 1/8)	[m ²]
	R_h	hydraulischer Radius (= Querschnittsfläche A / benetzten Umfang U)	[m]
	I	Gefälle der Flussstrecke	[m/m]

Für die Fliessgeschwindigkeitsberechnung müssen zwei Parameter vorgegeben werden: die Abflusspende q in l/(s·km²), für welche die Geschwindigkeit berechnet werden soll und der Manning-Beiwert M . Der \dot{V} Durchfluss an einem Punkt ist das Produkt aus dem Einzugsgebiet A_E dieses Punktes und der Abflusspende q . Wird eine Anfangsgeschwindigkeit von 1 m/s angenommen, kann die Querschnittsfläche $A = \dot{V} / v$ bestimmt werden. Unter Annahme eines Rechteckquerschnittes mit einem Kantenlängenverhältnis von Tiefe/Breite = 1/8 kann der hydraulische Radius R_h bestimmt werden:

$$R_h = \frac{A}{1.25\sqrt{8A}} \quad (154)$$

Nach (152) wird mit M , R_h und I die neue Fliessgeschwindigkeit ermittelt. Mit dieser Fliessgeschwindigkeit v_l wird nun die neue Querschnittsfläche A_l berechnet, woraus sich ein neuer hydraulischer Radius $R_{h,neu}$ ergibt. Iterativ nähert sich so v , R_h und damit die Flussbettiefe und -breite konstanten Werten (Abbruch: $\Delta v < 0.05$ m/s oder 12 Iterationen). Die berechneten Fliessgeschwindigkeiten gelten für die angegebene Abflusspende und die vorgegebene Rauigkeit M und werden der Länge der Flussstrecke entsprechend auf die einzelnen Zellen aufgeteilt. es sollte eine solche Spende angegeben werden, die den noch nicht ausufernden höheren Abflüssen entspricht, da die Fliesszeiten für die Parameterschätzung des Abflussroutings herangezogen werden. Das Abflussrouting seinerseits zeigt seinen Einfluss vor allem bei höheren Abflüssen.

Für solche Gitterzellen, welche nicht von einem Gewässerabschnitt durchflossen werden, wird die Fliessgeschwindigkeit für den Landoberflächenabfluss ebenfalls nach Gleichung (152) berechnet. Diese Fliessgeschwindigkeit wird nach Umrechnung in die zum Durchfliessen einer Gitterzelle nötige Zeit anschließend im Rahmen der Bestimmung der Einzugsgebiete zu Fliesszeitsummen aufaddiert, um so zu einer Fliesszeit-Flächen-Funktion zu gelangen, mit der die Translation des Oberflächenabflusses bis zum Gebietsauslass beschrieben werden kann. Als Vereinfachung der hydraulischen Berechnung wird für den Landoberflächenabfluss eine konstante Abflusstiefe von $R_h = 1$ cm und ein Rauigkeitsbeiwert nach MANNING von $M = 10$ m^{1/3}·s⁻¹ angenommen. Die Fliessgeschwindigkeit hängt auf der Landoberfläche demnach nur noch vom Gefälle ab. Zur Berechnung der Zeit, die das Wasser zum Durchfliessen einer

Gitterzelle bzw. zum Fließen von der Zellmitte der Herkunftszelle zur Zellmitte der Zielzelle benötigt, wird die Länge des Fließweges berücksichtigt.

$$v = 10\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1} \cdot (0.01\text{m})^{2/3} \cdot \sqrt{I} \quad (155)$$

$$t = \frac{cS \cdot \sqrt{2}}{v} \quad \text{für die Fließrichtungen } \nearrow \searrow \swarrow \nwarrow \quad (156)$$

$$t = \frac{cS}{v} \quad \text{für die Fließrichtungen } \uparrow \rightarrow \downarrow \leftarrow \quad (157)$$

Für Gitterzellen, welche von Gewässerstrecken durchflossen werden, wird die Fließzeit aus der nach Gleichung (152) berechneten Fließgeschwindigkeit v im Gerinne ebenfalls entsprechend der Gleichungen (156) und (157) berechnet.

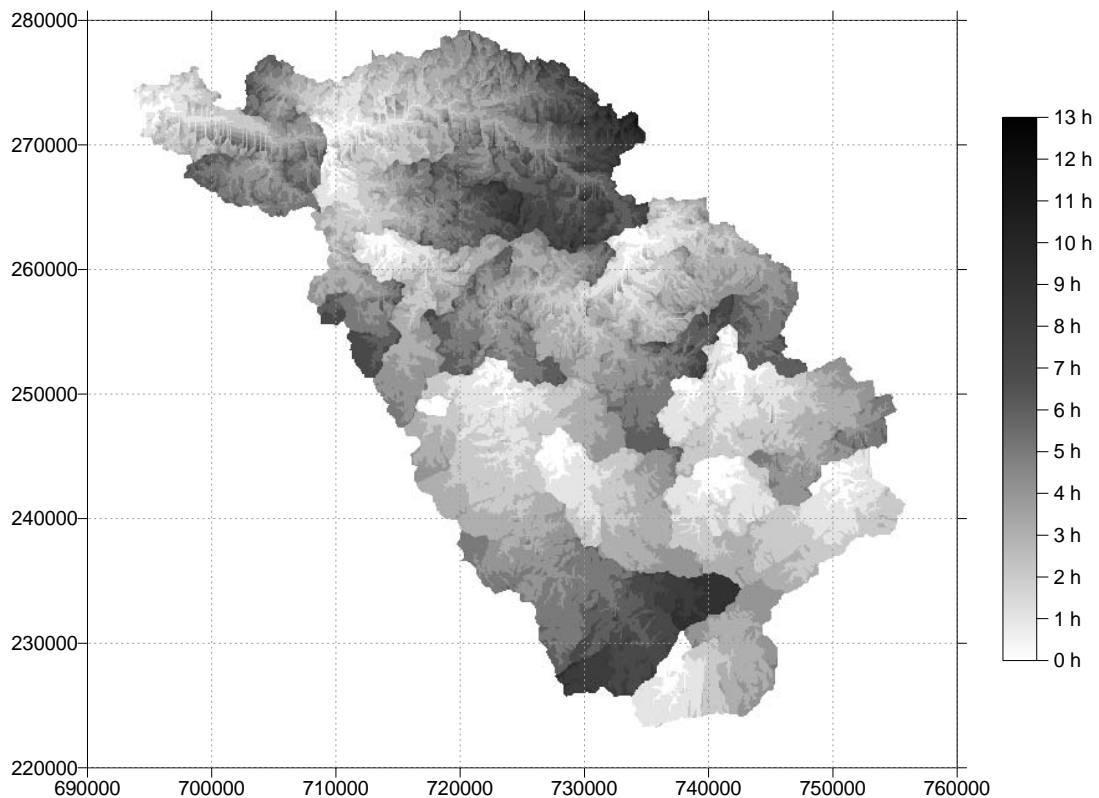


Abb. 32: Fließzeit-Zonen für das Pegelnetz des Thurgebietes in 1-h-Auflösung

Aus den Mündungspunkten oder beliebigen anderen als Grids einzulesenden „Pourpoints“ werden die Einzugsgebiete berechnet. Die im vorigen Schritt pro Zelle berechneten Fließzeiten für den Oberflächenabfluss werden nun für das Fließen bis zum Gebietsauslass addiert. Gridzellen, über welche eine Routingstrecke führt, werden mit dem Code des (ggf. grössten) Oberliegigers versehen und als sogenanntes Link-Grid geschrieben. Die dabei für einzelne Flussabschnitte berechneten Flussbreiten und Flusstiefen werden für alle Zellen, welche eine die vorgegebene Schwelle überschreitende Fließakkumulation haben, als Grids ausgegeben. Gleichzeitig wird die Entwässerungsstruktur analysiert und als Textdatei mit den wichtigsten geschätzten Gerinneparametern geschrieben. Die Strukturdatei hat das im Abschnitt [Abflussmodell] in der WaSiM-Steuerdatei beschriebene Routing-Vorschriften-Format und muss nur noch in diese Datei kopiert werden. Abbildung 32 zeigt ein Beispiel des Fließzeitsummen-Grids für das Einzugsgebiet der Thur. Die einzelnen Zonen stellen die auf die jeweiligen Pegelzugsgebiete bezogenen Fließzeiten in Stundenschritten dar. Helle Flächen kennzeichnen jene Zonen, aus denen das Wasser schnell zum Gebietsauslass gelangt, aus den dunkel dargestellten Zonen kommt das Wasser erst nach

grösserer Verzögerung am Gebietsauslass an, im Beispiel bis zu 13 Stunden später. Das Fliesszeitspektrum hängt vom Manningbeiwert für die Landoberfläche und von der angenommenen Fliesstiefe auf der Landoberfläche sowie in den Gewässern ab.