

# EIN GIS-BASIERTES MODELL ZUR BERECHNUNG VON JAHRESZEITLICH UND RÄUMLICH VARIIERENDEM, THEORETISCHEM WASSERKRAFTPOTENZIAL

Eva Haslauer

**Zusammenfassung:** Um das theoretisch verfügbare Wasserkraftpotenzial zu erfassen, einen künftig möglichen Ausbau abzuschätzen und bei Bedarf Unterstützung bei Standortentscheidungen zu leisten, wird hier ein Modell vorgestellt, das als Ergebnis das theoretische Potenzial an Wasserkraft für ein Untersuchungsgebiet (Bundesland Salzburg, Österreich) berechnet. Das Modell berücksichtigt die Einflussfaktoren Topographie, Abfluss, Niederschlag, Temperatur, Verdunstung und Retention im Boden bzw. im Schnee. Zur Ermittlung des Oberflächenabflusses unter Einbeziehung von Temperatur und Niederschlag wird das Snowmelt-Runoff-Modell von Martinec & Rango (Martinec 1975) adaptiert, wobei zusätzlich zu diesem Ansatz die Verdunstung als reduzierender Faktor über den Ansatz von Wendling (1975, zit. nach Schulla 1997) modelliert wird. Wendling berücksichtigt in seinem Ansatz tägliche Werte der Globalstrahlung sowie der Temperatur zur Abschätzung der täglichen potenziellen Verdunstungsmenge. Die Abschätzung des Wasserkraftpotenzials erfolgt über die Berechnung der potenziellen Lageenergie des Wassers. Die Eingangsparameter dafür sind die Wassermasse, die Erdbeschleunigung und die zu überwindende Höhendifferenz. Das Modell, angewendet auf das Bundesland Salzburg, arbeitet mit einer räumlichen Auflösung von 250 m und liefert als Ergebnisse zum einen monatliche Flächenpotenziale, also die theoretischen Obergrenzen des Wasserkraftpotenzials, als räumlich aufgelöste Datensätze sowie ein zeitlich und räumlich unabhängiges Modell zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit bei gleichzeitiger Dokumentation.

**Schlüsselwörter:** Wasserkraftpotenzial, jahreszeitliche und geographische Varianz, unabhängiger Modellansatz

## A GIS-BASED MODEL APPROACH TO CALCULATE SPATIAL DISTRIBUTED THEORETICAL HYDRO POWER POTENTIALS

**Abstract:** To estimate the available hydro power potential, to legitimate future expansions and to support location decisions a model is developed to calculate the theoretical potential of hydroelectric power for a study area (province of Salzburg, Austria). The model considers the following influencing factors: runoff, topography, precipitation, temperature, evapotranspiration and retention in soil and snow.

To determine the surface runoff, involving temperature and precipitation, the Snowmelt-Runoff-Model of Martinec and Rango (Martinec 1975) is adapted considering additionally evapotranspiration and modelled based upon the approach of Wendling (1975). This approach considers daily radiation and temperature values to estimate the daily amount of potential evapotranspiration.

The estimation of hydropower potentials is done by calculating the potential energy of water. The input parameters therefore are the mass of water, the gravitational acceleration and the difference in height.

The model calculation is based on grid cells (250 m resolution), applied in the model region "Salzburg" and calculates the hydro power potential taking into account the seasonal variance further the output is a model independent of time and location to ensure reproducibility.

**Keywords:** Hydropower potential, seasonal and geographical variance, independent model approach

### Autorin

Dipl.-Ing. (FH) Eva Haslauer, M. Sc.

Research Studio iSpace

Researchstudios Austria Forschungsgesellschaft mbH

Schillerstraße 25

A-5020 Salzburg

E: [eva.haslauer@researchstudio.at](mailto:eva.haslauer@researchstudio.at)

Dieser Beitrag ist eine gekürzte und überarbeitete Version der Master-Thesis von E. Haslauer an der Universität Salzburg mit dem Titel „Entwicklung eines Modells zur Berechnung von jahreszeitlich verfügbarem Wasserkraftpotenzial unter Berücksichtigung von Verdunstung und Wasserrückhalt am Beispiel des Landes Salzburg“, 2009, [http://ispace.researchstudio.at/downloads/2009/MasterThesis\\_EH.pdf](http://ispace.researchstudio.at/downloads/2009/MasterThesis_EH.pdf).

## 1 EINFÜHRUNG UND MOTIVATION

In Österreich ist Wasserkraft die größte Quelle an erneuerbarer Energie. Eine Nutzung bietet sich hier aufgrund der Zuflüsse aus dem Ausland, der großen Niederschlagsmengen, der zahlreichen Alpenflüsse und dem vorherrschenden Gefälle durch Turbinen in Fluss- und Speicherkraftwerken an. Die theoretische Nutzungsmenge an Wasser, zusammengesetzt aus dem Zufluss aus dem Ausland und dem Niederschlag pro Jahr, beläuft sich in Österreich auf 120 Mrd. m<sup>3</sup>. Abzüglich der Verdunstungsmenge verbleiben 84 Mrd. m<sup>3</sup> für den Wasserbedarf. Der Verbrauch, als Gegenüberstellung, liegt in Österreich derzeit bei 2,6 Mrd. m<sup>3</sup> im Jahr, wovon rund 2/3 an die Landwirtschaft und Industrie gehen (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, in Folge kurz BMLFUW 2009).

Die Wasserkraft speziell in Salzburg mit einem Ausbaugrad von rund 60 % bis 70 % (Austrian Energy Agency 2005) gilt, trotz der stetigen Erweiterungen in den letzten Jahrzehnten, immer noch als ausbauwürdiges Potenzial. In Salzburg werden 481 Wasserkraftwerke betrieben, worunter sich 450 Kleinwasserkraftwerke (< 10 MW Leistung) befinden. Die Kleinwasserkraft versorgt in Salzburg ca. 200.000 Haushalte und liefert dafür jährlich rund 730 Mio. kWh elektrische Energie (Kleinwasserkraft Österreich 2008, Die Grünen 2009).

Die Position der Wasserkraft in Österreich, besonders in Salzburg, gab Anlass sich der Modellierung der theoretisch verfügbaren Wassermenge für die Erzeugung von elektrischer Energie zu widmen. Die Aufgabenstellung, die hier zugrunde lag, war die Erarbeitung eines Modells unter der Berücksichtigung bereits bestehender Ansätze, das das Wasserkraftpotenzial bestmöglich abschätzt. Als generelle Einflussfaktoren auf die Wasserkraft gelten die Komponenten der Wasserbilanz

- ▶ der Niederschlag  $N$ ,
- ▶ die Verdunstung  $V$ ,
- ▶ die Rücklage/der Aufbrauch  $\Delta S$  und
- ▶ der Abfluss  $A$ ,

die wie folgt in Beziehung stehen:  $N = A + V + \Delta S$ ; daraus ergibt sich aus  $A = N - V - \Delta S$  der Gebietsabfluss (Maniak 1997).

Die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz galt es individuell zu modellieren, an-

schließend in einem Modell zur Berechnung des Potenzials miteinander in Beziehung zu setzen und damit Abhängigkeiten sowie gegenseitige Einflüsse abzuschätzen und zu quantifizieren. Nicht berücksichtigt blieben bei dieser Betrachtung der Zufluss aus und der Abfluss ins Umgebungsgebiet, es wurde somit angenommen, dass der gesamte Niederschlag, der auf das Untersuchungsgebiet fällt, zur Wasserkraftnutzung herangezogen werden kann, das Untersuchungsgebiet also ein abgeschlossenes System ist.

Nach einer umfangreichen Literaturrecherche wurde zur Modellierung der Verdunstung der Ansatz von Wendling (1975, vgl. Schulla 1997) ausgewählt. Dieser Ansatz erhielt den Vorzug aufgrund der einfachen Verfügbarkeit von benötigten Eingangsparametern, welche sich aus dem Rückstrahlvermögen der Erdoberfläche (Albedo), der räumlichen Verteilung der Durchschnittstemperatur ( $t$ ) und der Globalstrahlung ( $R_G$ ) zusammensetzen.

Für die Modellierung des Oberflächenabflusses (der unterirdische Abfluss blieb hier unbeachtet) wurde das Snowmelt-Runoff-Modell von Martinec & Rango (1975), ein Gradtag-Modell, als Grundlage verwendet. Es wurde hier nicht der gesamte Ansatz umgesetzt, lediglich die Modellierung des Schneeschmelzabflusses über die Gradtag-Methode sowie die Errechnung des Wasserrückhalts über den Rezessionskoeffizienten  $k$ .

Die individuell modellierten Komponenten Abfluss und Verdunstung wurden schließlich in einem Gesamtmodell zur Berechnung des Wasserkraftpotenzials vereint. Aus dem letzten Modellierungsschritt ergab sich die theoretisch erzeugbare elektrische Leistung aus der davor ermittelten, theoretisch verfügbaren Wassermenge.

Der Artikel setzt sich zunächst mit einer Analyse des Stands der Wissenschaft bezüglich der Modellierung von Abfluss, Verdunstung und Energiepotenzial auseinander. Fortgesetzt wird mit der eingesetzten Methodik, woran sich die Fallstudie anschließt. Im Zuge dessen wird auch die Ermittlung des Untersuchungsgebiets sowie die verwendeten Daten betrachtet. Es wird danach auf die Ergebnisse eingegangen, bevor das Fazit den Beitrag abrundet.

## 2 STAND DER WISSENSCHAFT

Zur Ermittlung der potenziellen Verdunstung stehen zum einen das *Energiebilanzverfahren*

(z. B. Kombination aus Energiebilanz und aerodynamischem Ansatz:  $ET_p$  nach Penman) zur Verfügung. Es beschreibt hydrologische Prozesse sehr genau und bedarf dazu einiger Messwerte, wie der latenten Verdampfungswärme, dem aktuellen Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck sowie der Windgeschwindigkeit. Aufgrund der Detailliertheit und der genauen Auseinandersetzung mit der Wärme- und Strahlungsbilanz ist es ein sehr umfangreiches und aufwendiges Verfahren. Die vorkommenden Parameter stehen nur selten alle zur Verfügung bzw. sind oft schwer zu ermitteln, weshalb statt dieser Formel oftmals vereinfachte Ansätze zur Abschätzung der potenziellen Verdunstung verwendet werden.

Zum anderen ist das *aerodynamische Konzept* (z. B.  $ET_p$  nach Haude) ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der potenziellen Evapotranspiration. Es liegen ihm aerodynamische Transportprozesse zugrunde, da hier davon ausgegangen wird, dass die Verdunstung durch die Bewegung der Wassermoleküle in der Luft stattfindet.

Ein drittes Konzept ist das *Strahlungskonzept*, dazu zählt z. B. der Zusammenhang nach Wendling, der auch in dieser Arbeit eingesetzt wird. Dieses Konzept beruht auf Temperaturmessungen sowie auf Werten der Solarstrahlung bzw. der Sonnenscheindauer (Maniak 1997, 33 ff.).

Zur Modellierung der Dynamik von Schneeeakkumulation und -ablation stehen generell zwei Ansätze zur Verfügung:

1. Bei der *Energiebilanzmethode* (z. B. Verfahren nach Knauf) wird der Wärmestrom indirekt über die Temperatur, die Luftfeuchte und die Windgeschwindigkeit berechnet. Zusätzlich fließt die Nettostrahlung, abgeleitet aus der Globalstrahlung, ein. Die Problematik bei diesem Ansatz ist wieder die schwierige Verfügbarkeit der Daten, weshalb oft Näherungsformeln erarbeitet werden, die ohne Strahlungsmessung auskommen. Dazu zählt das *Temperatur-Index-Verfahren* oder auch *Gradtag-Methode*. Diese Methode benutzt die Temperatur als Informationsträger über den Wärmehaushalt. Über die Lufttemperatur und den Gradtag-Faktor wird die Schmelzrate pro Tag ermittelt. Ergebnisse dieses Verfahrens haben meist nur regionale Gültigkeit, die Methode ist jedoch einfach zu handhaben (Maniak 1997, 450 ff.).

2. *Kombinationsverfahren* wurden u. a. von Kustas et al. (1994) und von Cazorzi & Dalla Fontana (1996) vorgestellt. Beim Letzteren wird das Temperatur-Index-Verfahren mit einer vereinfachten Strahlungsbilanz kombiniert, die den Energieeintrag in die Schneefläche wiedergeben soll (energy index). Eine Berechnung der Schmelzrate, getrennt für Tag und Nacht, erfolgt über den Zusammenhang von Schmelzfaktor (combined melt factor, einziger Kalibrierungsfaktor), Energieindex (tägl. Mittel der kumulierten, theoretisch eingehenden Strahlungsenergie) und Temperatur (Cazorzi & Dalla Fontana 1996).

Bei der Ermittlung des Wasserkraftpotenzials ist zwischen: a) *theoretischem* Potenzial (potenzielle Energie aus sämtlichen Gewässern), b) *technischem* Potenzial (tatsächlich abgreifbares Arbeitsvermögen unter Einbeziehung von technischen Einschränkungen, liegt bei ca. 20 % bis 35 % des theoretischen Potenzials), c) *wirtschaftlichem* (wirtschaftlich nutzbares Potenzial) und d) *ausschöpfbarem* Potenzial (tatsächlicher Beitrag zur Energieversorgung) zu unterscheiden.

Hier wird theoretisches Potenzial berechnet, das wiederum als Flächen- oder Linienpotenzial ermittelt wird. *Flächenpotenziale* bezeichnen die Energiemenge, die durch lückenlose Bedeckung des Untersuchungsgebiets mit Auffangbecken/Speicherbecken zu erzeugen wäre und errechnen sich aus „mittlerer Abflussspende · geodätischer Höhendifferenz“ auf den Teilflächen des Untersuchungsgebiets. *Linienpotenziale* beschreiben das Arbeitsvermögen von Flussabschnitten und errechnen sich aus „Fallhöhe · mittlerem Abfluss“ auf einem bestimmten Flussabschnitt. Flächenpotenziale sind generell höher und bilden die theoretische Obergrenze von Wasserkraftpotenzialen in einem Untersuchungsgebiet (Horlacher 2003).

### 3 METHODIK

Die Ergebnisse in dieser Arbeit wurden in der ESRI Softwareumgebung erarbeitet, sämtliche Berechnungen und Analysen in ArcGIS 9.2 (Extension: *Spatial Analyst*) durchgeführt. Die Modelle wurden im ArcGIS ModelBuilder entwickelt, was eine in ArcGIS integrierte Modellierungsoberfläche (siehe Abbildungen 2, 4, 5) mit der im Hintergrund laufenden Modellierungs-

sprache Python ist. Die einzelnen Modellierungs- und Berechnungsschritte werden darin visuell dargestellt, womit Reproduzierbarkeit und Dokumentation der Berechnungsschritte gewährleistet ist. Weiter wurden zur visuellen Interpretierbarkeit Karten und Diagramme erstellt.

Die Modellierungen der Einzelkomponenten Verdunstung und Abfluss ebenso wie die Berechnung der theoretisch verfügbaren Energiemenge werden im Folgenden erläutert.

#### 3.1 VERDUNSTUNG

Die Modellierung der ersten Komponente, der potenziellen Verdunstung, erfolgt über den Ansatz von Wendling (1975) (Formel 1):

$$ETp_w = (R_G \cdot (1,1 - \alpha) + 93 \cdot f) \cdot \frac{(T + 22)}{150 \cdot (T + 123)}$$

*Formel 1: Berechnung der potenziellen Evapotranspiration nach Wendling (Schulla 1997)*

$R_G$  bezeichnet die Globalstrahlung in  $[J/cm^2]$ ,  $\alpha$  die Albedo,  $T$  den täglichen Temperaturwert und  $f$  einen Korrekturfaktor, der die Formel beispielsweise für Küstengebiete anwendbar macht, hier jedoch vernachlässigt wird.

Die potenzielle Verdunstung ist für die Modellierung des Abflusses als minimierender Faktor anzusehen. Die gefallene Niederschlagsmenge, und damit auch die Menge des zur Erzeugung elektrischer Energie zur Verfügung stehenden Wassers, wird um den Betrag der potenziellen Verdunstung minimiert.

#### 3.2 OBERFLÄCHENABFLUSS

Das für die Modellierung des Oberflächenabflusses in dieser Arbeit zugrunde liegende Modell ist das Snowmelt-Runoff-Modell von Martinec & Rango (1975, in Folge kurz SRM). Es wurde entwickelt, um den täglichen Strömungsabfluss in Gebirgsbecken zu simulieren und vorauszuberechnen, wobei die Schneeschmelze den Haupteinflussfaktor darstellt (Brubaker 1996). Das SRM kann über Formel 2 wiedergegeben werden:

$$Q_{n+1} = Q_n \cdot k_{n+1} + \sum [c_{s,n} \cdot a_n \cdot (T_n + \Delta T_n) \cdot S_n + c_{r,n} \cdot P_n] \cdot (1 - k_{n+1}) \cdot A$$

*Formel 2: Formel zum Snowmelt-Runoff-Modell (Martinec 1975)*

In Formel 2 beschreibt  $Q_{n+1}$  den Abfluss des jeweiligen Folgemonats bzw. -tags ( $n+1$ ),  $k_{n+1}$  den Rezessionskoeffizienten, der in einer Periode ohne Niederschlag oder Schneeschmelze den verringerten Abfluss in einer bestimmten Region quantifiziert. Er stellt den Zusammenhang zwischen einem Abflusswert am Tag  $n$  und dem darauffolgenden Tag ( $n+1$ ) dar (Maniak 1997, 450)).  $c_{s,n}$  und  $c_{r,n}$  sind Abflusskoeffizienten für Schnee bzw. Regen und ändern sich zeitlich und zonal. Sie bezeichnen die Wasserverluste, die sich aus dem Verhältnis zwischen Abfluss und der Niederschlagshöhe von Schnee/Regen ergeben.  $a_n$  bezeichnet den Gradtag-Faktor, einen „Index für den Energiehaushalt einer Schneedecke“ (Dietrich 2009). Er wandelt positive Gradtage in Schmelzwassermenge um und wird in der Einheit  $[cm/°C \cdot d]$  angegeben.  $T_n$  ist die Anzahl der positiven Gradtage in der Einheit  $[°C \cdot d]$ ,  $\Delta T_n$  ist der Temperaturgradient von  $0,65 K/100 m$  in der Einheit  $[°C \cdot d]$ ,  $S_n$  der Anteil der mit Schnee bedeckten Fläche am gesamten Untersuchungsgebiet (in % angegeben),  $P_n$  die Niederschlagsmenge in cm und  $A$  die Fläche des betrachteten Gebiets in  $km^2$ .

Die Unterscheidung des Niederschlags in Regen- bzw. Schneeanteil erfolgt über die Festlegung der kritischen Temperatur  $T_{krit}$ . Damit wird der Niederschlag ggf. täglich in Schnee- und Regenniederschlag unterteilt. Der auftretende Schneeniederschlag wird zur Schneemenge kumuliert, woraus sich bei Temperaturen  $\geq 0 °C$  (kritische Temperatur) die Schmelzmenge  $X$  über den Einsatz des Gradtag-Faktors ergibt. Die Schmelzmenge und der Regenniederschlag bilden zusammen den vorläufigen Abfluss. Dieser Abfluss wird minimiert durch die Menge der potenziellen Verdunstung, berechnet über den Ansatz von Wendling. Der daraus verbleibende Abfluss wird schließlich mit dem Faktor  $(1-k)$  entspr.  $1$ -Rezessionskoeffizient) multipliziert, um den Anteil des direkt abfließenden Oberflächenabflusses zu erhalten (ohne Verzögerung abfließende Menge). Die Differenz zwischen vorläufigem Abfluss und direktem Oberflächenabfluss ist der

indirekte Abfluss, der, wiederum abhängig von der Temperatur, im Boden oder in Schnee (in weiterer Folge kumulierter Schnee) gespeichert wird.

Die Modellierung der Rücklage im Boden und in Schnee wurde nicht eigens behandelt, da speziell für die Modellierung des Bodenwasserhaushaltes zum Zeitpunkt der Bearbeitung die nötigen Daten nicht zur Verfügung standen. Es wurde die Rücklage als Differenz zwischen dem Abfluss aus Regen + Schneeschmelze – Verdunstung und dem direkten Abfluss (Multiplikation mit dem Faktor  $(1-k)$ ) abgeschätzt (s. o. bzw. Abbildung 5). Als Anfangswert am Beginn des modellierten Kreislaufs wurde ein Bodenwassergehalt von 65 mm angenommen (Häckel 2005, 158).

### 3.3 THEORETISCH VERFÜGBARE ENERGIE

Wird Wasserkraft genutzt, wird die Lageenergie (potenzielle Energie) des Wassers umgesetzt. Ein Wasserstrom fließt abwärts von einem Energieniveau auf ein tieferes (Höhenunterschied), woraufhin durch eine Turbine und einen Generator elektrische Energie erzeugt wird. Das letzte Modell beschreibt die Ermittlung des Energiepotenzials nach dem Zusammenhang

$$E = \dot{m} \cdot g \cdot h$$

**Formel 3:** Formel zur Ermittlung der potenziellen Energie (Giesecke & Mosonyi 2009)

$E$  bezeichnet hier das Energiepotenzial [z. B. kWh],  $\dot{m}$  den Massenstrom des Wassers [kg/s] (= Dichte · Abflussmenge  $Q$ ),  $g$  die Erdbeschleunigung 9,80665 [m/s<sup>2</sup>] und  $h$  die Höhendifferenz [m] (Giesecke & Mosonyi 2009, 23).

Modelliert wird hier das theoretische Flächenpotenzial, was wegen wirtschaftlicher, technischer und baulicher Einschränkungen, der Topographie oder Umweltschutzauflagen lediglich begrenzt in nutzbares Potenzial umgesetzt werden kann (Horlacher 2003, 8 ff.). Die Formel zur Ermittlung der potenziellen Energie braucht als einen Eingangsparameter die Wassermenge in [kg/m<sup>2</sup>] bzw. [kg/m<sup>2</sup> Rasterzelle]. Die zuvor berechnete, monatlich zur Verfügung stehende Oberflächenwassermenge in [mm/m<sup>2</sup>] wird über den Zusammenhang in Formel 4 in [kg/m<sup>2</sup> Rasterzelle] umgerechnet:

$$\text{kg} = \frac{\text{mm}}{1.000} \cdot 250 \text{ m} \cdot 250 \text{ m} \cdot 1.000$$

**Formel 4:** Umrechnung von [mm/m<sup>2</sup>] in [kg/250 · 250 m<sup>2</sup>]

Auf Basis des vorliegenden Höhenmodells wird die Fließrichtung jeder einzelnen Rasterzelle ermittelt (Funktion *flow direction* aus der ArcGIS Toolbox). Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung der vorhandenen Wassermenge in jeder Rasterzelle (Funktion *flow accumulation*) unter Berücksichtigung der monatlichen Oberflächenwassermenge in [kg/m<sup>2</sup> Rasterzelle · Monat]. Die weitere Multiplikation mit der Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>] und der Höhendifferenz [m] ergibt die theoretisch zur Verfügung stehende Energie (Lageenergie) in [Joule/m<sup>2</sup> Rasterzelle · Monat]. Ein Joule ist wiederum 1 Ws, also Energie · Zeit, wodurch sich aus der Multiplikation mit dem Faktor 1.000 · 60 · 60 das theoretische Arbeitsvermögen in [kWh/Rasterzelle] pro Monat ergibt (Biberacher et al. 2005).

## 4 FALLSTUDIE

### 4.1 ABGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS

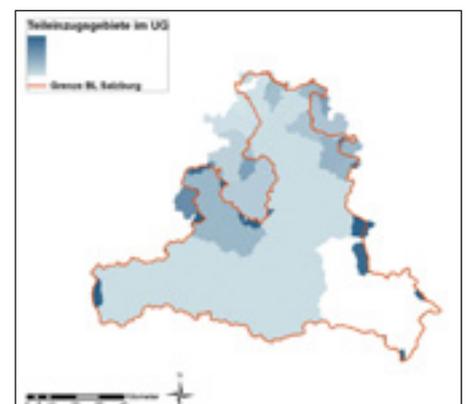
Die Berechnung der Abfluss- und Verdunstungsmengen sowie die Quantifizierung des Rückhalts sollte sich über das Modellgebiet des Bundeslandes Salzburg erstrecken. Das Untersuchungsgebiet (im Folgenden UG) berechnete sich in ArcGIS über folgende Schritte:

- ▶ Bestimmung der *Fließrichtung* (Funktion *flow direction*): Um hydrologische Eigenschaften einer Oberfläche zu erkennen, werden Fließrichtungen einzelner Zellen in einem Raster identifiziert. Der Eingangsdatensatz ist ein digitales Höhenmodell der relevanten Region inklusive eines umgebenden Buffers. Das Ergebnis ist ein Raster, das die Fließrichtung aus jeder Zelle heraus angibt.
- ▶ *Füllen* (Funktion *fill*) von lokalen Senken: Eventuell vorhandene Senken, u. U. auch Datenfehler, werden im UG bis zur Höhe der niedrigsten Geländeerhebung aufgefüllt.
- ▶ Berechnung der *Abflusskonzentration* (Funktion *flow accumulation*): Die Wassermenge, die in eine Zelle fließt, unter der Annahme, dass die gesamte Wassermenge abfließt und keine Interzepti-

on, keine Evapotranspiration oder Verluste an das Grundwasser stattfinden, wird berechnet. Die Verwendung eines gewichteten Datensatzes dient zur Feststellung welche Regenmengen, oder wie in diesem Fall, welche Abflussmengen innerhalb eines Einzugsgebiets auftreten.

- ▶ Ortung des Gebietsauslasses (Funktion *pour points*): Aus einem Rasterdatensatz werden die niedrigsten Punkte (Pour Points) herausgefiltert. Diese Punkte sind Gebietsauslässe des UGs, von denen ausgehend das Einzugsgebiet berechnet wird.
- ▶ Das *Einzugsgebiet* (Funktion *watershed*) „Bundesland Salzburg“ wird ermittelt, basierend auf dem „aufgefüllten“ Höhenmodell, unter Berücksichtigung der ermittelten Fließrichtungen und der Gebietsauslässe, und besteht aus mehreren kleinen Einzugsgebieten, die jeweils von tiefen Punkten im Gelände (Pour Points) ausgehen. Ein Einzugsgebiet ist in ArcGIS definiert als das hangaufwärts gerichtete Gebiet, das alle Abflüsse zu einem Punkt hin (Gebietsauslass, bezeichnet als *Pour Point*) zusammenfasst.

Das ermittelte Untersuchungsgebiet umfasst das Bundesland Salzburg sowie angrenzende Teile des deutschen Bundeslandes Bayern und der österreichischen Bundesländer Oberösterreich, Tirol, Steiermark und Kärnten. Die Fläche beträgt rund 8.500 km<sup>2</sup> und ist im Vergleich zur Fläche des Bundeslandes Salzburg mit 7.154 km<sup>2</sup> um beinahe 1.500 km<sup>2</sup> größer. Auf der Fläche des Untersuchungsgebiets (Abbildung 1) werden nachfolgend auch die Verdunstung und der Oberflächenabfluss berechnet.



**Abbildung 1:** Grenze des Bundeslandes Salzburg und farblich differenziert: die Teileinzugsgebiete (berechnet in ArcGIS 9.2)



Abbildung 2: Lage der Niederschlags- und Temperaturmessstationen der ZAMG im Bundesland Salzburg

## 4.2 DATEN UND DATENAUFBEREITUNG

Die benötigten Parameter und Variablen in dieser Modellierung wurden für jeden Tag im Zeitraum September 2004 bis August 2005 ermittelt, da der letzte, bezüglich der benötigten Temperatur- und Niederschlagsdaten vollständig von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (im Folgenden kurz ZAMG, 2004/05) zur Verfügung stehende Zeitraum zum Zeitpunkt der Berechnung das Jahr 2005 war. Es wurde ein vollständiger Jahresverlauf für die Modellierung gewählt, wobei der Beginn der Modellierung an das Ende der Ablationsphase bzw. den Beginn der Akkumulationsphase gesetzt wurde.

In Abbildung 2 sind die Messstationen eingezeichnet, die frei verfügbare Daten für Temperatur und Niederschlag von der ZAMG zur Verfügung stellen. Die grün markierten Messstationen stellen monatliche Messwerte zur Verfügung, die rot markierten tägliche Messwerte. Tägliche Werte liefern demnach lediglich die Stationen am Flughafen Salzburg und am Sonnblick, alle anderen Messstationen gemittelte Monatswerte.

Die verwendeten *Temperaturdaten* für die Modellierung der Verdunstung und des Abflusses lagen erst monatlich vor,

wurden auf tägliche Werte heruntergebrochen und mit dem Temperaturgradient von  $\pm 0,65 \text{ K}/100 \text{ m}$  an Höhenänderungen im Gelände angepasst (Maniak 1997, 454). Auch die benötigten *Niederschlagsdaten* wurden von monatlichen auf tägliche Werte mithilfe räumlicher Verteilungsmuster umgelegt.

Bei der Modellierung der *Globalstrahlung*  $R_G$  (berechnet mit dem ArcGIS Solar Analyst), als einen Eingangsparameter in die Formel nach Wendling, wird jede Rasterzelle als Punkt behandelt (Schaumberger 2006), für den jeweils vier Faktoren ermittelt werden:

- ▶ Sichtbereich: entscheidend für die Menge der eintreffenden Strahlung (*viewshed*),
- ▶ Karte der direkten Sonneneinstrahlung, wobei jeder Sektor einen Sonnenstand repräsentiert (*direct sunmap*),
- ▶ Karte der diffusen Einstrahlung: Karte mit Sektoren des Himmels, die jeweils Azimutwerte und einen Zenitwert enthalten (*skymap*). Daraus wird für jeden Sektor die diffuse Strahlung ermittelt (ESRI 2007).

Diese Faktoren werden für jede Rasterzelle ermittelt, um daraus eine Karte der solaren Einstrahlung zu berechnen. Weitere Para-

meter, wie der Anteil der diffusen Strahlung an der Globalstrahlung oder das Durchlassvermögen des Himmels, angeführt in Tabelle 1, wurden iterativ ermittelt, zur Angleichung der berechneten Werte an gemessene Werte, und flossen monatlich variierend in die Berechnung mit dem Solar Analyst ein.

Die Wolkenbedeckung wird im Solar Analyst nicht direkt modelliert, sondern im Rahmen des Durchlassvermögens abgeschätzt, da diese Modellierung sehr komplex und umfangreich ist und die dafür benötigten Daten wie Wolkenverteilung, Dicke oder Wolkentyp selten vorhanden sind. Auch die vom Boden reflektierte Strahlung wird in der Modellierung mit dem Solar Analyst nicht eigens berechnet. Hier fehlen wiederum zur Modellierung meist die entscheidenden Parameter wie Landbedeckungseigenschaften, Oberflächenausrichtung und Sonnenposition. Der verwendete Algorithmus im Solar Analyst erlaubt nur eine grobe Abschätzung der reflektierten Strahlung (Fu & Rich 1999). Das Ergebnis der gesamten Strahlungsberechnung in  $[\text{Wh}/\text{m}^2]$  wurde über den Faktor 0,36 in  $[\text{J}/\text{cm}^2]$  umgerechnet, um die Werte in die Formel von Wendling einsetzen zu können. Die hier verwendeten Albedowerte sind gemittelt aus Werten der TU Dresden (Andreas et al. 2000) und von Häckel (2005, 193). Diese Werte wurden Landbedeckungsklassen (Corine Landcover Daten, EEA 2000) mit Rücksicht auf saisonale Variationen (Tabelle 2), zugeordnet.

Die mit dem ArcGIS Solar Analyst ermittelten Strahlungswerte, abgelesen am Flughafen Salzburg, weichen von gemessenen Werten im Zeitraum 01. September 2004 bis 31. August 2005 kaum ab (Abbildung 3). Die gemessenen Werte als Vergleichswerte an den Messstationen Flughafen Salzburg, Rauris, Schmittenhöhe und Sonnblick wurden dem Jahrbuch der ZAMG entnommen.

Für die *Temperaturdaten* im SRM wird empfohlen, negative Temperaturwerte in die Berechnung mit einfließen zu lassen. Mit dem Festsetzen der *kritischen Temperatur* wird festgelegt, bei welcher Schwelltemperatur der gemessene Niederschlag als Schnee und wann er als Regen fällt. Die SRM-Parameter sind durch historische Daten nicht kalibriert oder optimiert. Sie können entweder gemessen worden oder durch hydrologische Beurteilungen entstan-

	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Diffuser Anteil	0,35	0,3	0,3	0,7	0,7	0,35	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,35
Durchlassvermögen	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,6	0,55	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6

**Tabelle 1:** Iterativ ermittelte Werte für den Anteil der diffusen Strahlung an der Globalstrahlung und die Transmissivität (an gemessenen Werten orientiert) für das Bundesland Salzburg

Corine Landcover-Kategorien	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Abbauflächen, Deponien, Baustellen	0,128	0,128	0,128	0,515
Ackerflächen und Dauerkulturen	0,335	0,12	0,485	0,85
Feuchtfächen	0,165	0,165	0,165	0,1
heterogene landwirtschaftlich genutzte Flächen	0,38	0,21	0,53	0,85
Industrie-, Gewerbe-, Verkehrsflächen	0,245	0,143	0,32	0,513
Kraut-Strauch-Vegetation	0,278	0,175	0,175	0,085
offene Flächen ohne oder mit spärlicher Vegetation	0,4	0,25	0,55	0,85
Wald	0,175	0,175	0,175	0,085
Wasserflächen	0,08	0,06	0,08	0,1
Grünland	0,38	0,21	0,53	0,85
künstlich angelegte, nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen	0,38	0,21	0,53	0,85
städtisch geprägte Flächen	0,363	0,175	0,513	0,463

**Tabelle 2:** Ermittelte Albedowerte verbunden mit Landbedeckungsklassen von Corine Landcover (EEA 2000)

den sein, die die Beckencharakteristik, physikalische Gesetze und theoretische Verbindungen bzw. empirische Beziehungen berücksichtigen.

Der *Rezessionskoeffizient*  $k$  quantifiziert in einer Periode, in der weder Niederschlag noch Schneeschmelze stattfinden, den verringerten Abfluss. Er gibt den Zusammenhang zwischen dem Abflusswert am Tag  $n$  und dem Abflusswert des darauffolgenden Tages ( $n+1$ ) wieder und wurde als Monatswert über eine Regressionsanalyse aus täglichen Abflusssummen (Hydrologischer Atlas Österreich 2004/05) ermittelt.  $(1-k)$  ist eine weitere wichtige Komponente und beschreibt den direkten, ohne Verzögerung auftretenden Abfluss eines Gebiets (Martinec 1975).

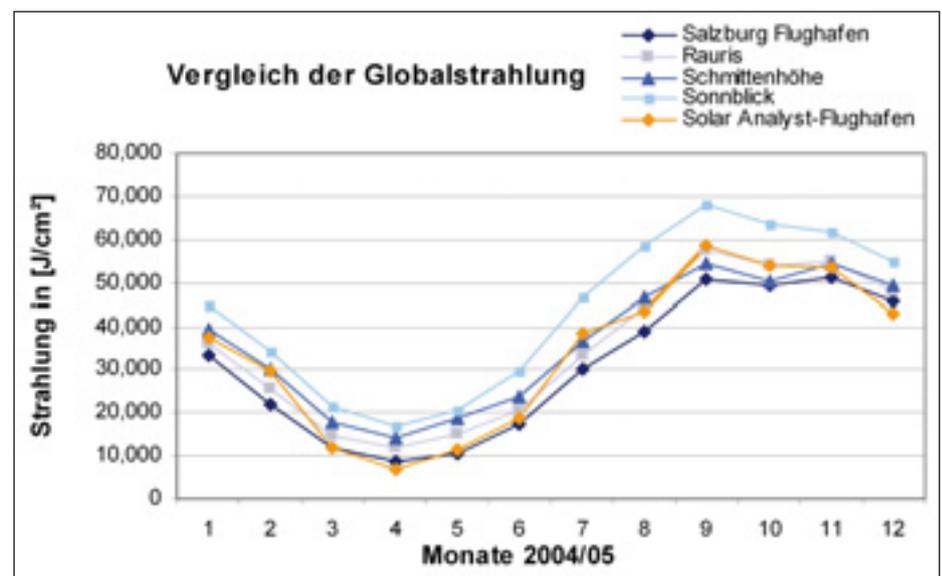
Um die tägliche Schmelzwasserproduktion abzuschätzen, wird der *Gradtag-Faktor*  $a$ , angegeben in  $[\text{cm}/\text{Tag} \cdot ^\circ\text{C}]$ , eingesetzt. Die Gradtag-Methode kann, laut Ferguson (1999), nach einer Kalibrierung oder auch mit guten Beispielwerten eine korrekte Menge an Schmelzwasser in einer Periode abschätzen. Der Gradtag-Faktor wandelt die Anzahl der Gradtage  $T$  (angegeben in  $^\circ\text{C} \cdot \text{Anzahl der}$

Tage, an denen  $T \geq 0^\circ\text{C}$ ) in die tägliche Schmelzmenge um. Gemittelt über drei bis fünf Tage ist der Gradtag-Faktor beständig und kann die Schmelzbedingungen gut repräsentieren. Er ist keine Konstante, sondern ändert sich entsprechend der variierenden Schnee-Eigenschaften während

der Schneeschmelzperiode und wurde in dieser Arbeit für das Sommer- und Winterhalbjahr über

$$a = 1,1 \cdot \frac{\text{Dichte Schnee}}{\text{Dichte Wasser}}$$

ermittelt (Martinec 1975).



**Abbildung 3:** Vergleich von gemessenen (Quelle: ZAMG) mit ermittelten Globalstrahlungswerten (ArcGIS Solar Analyst)

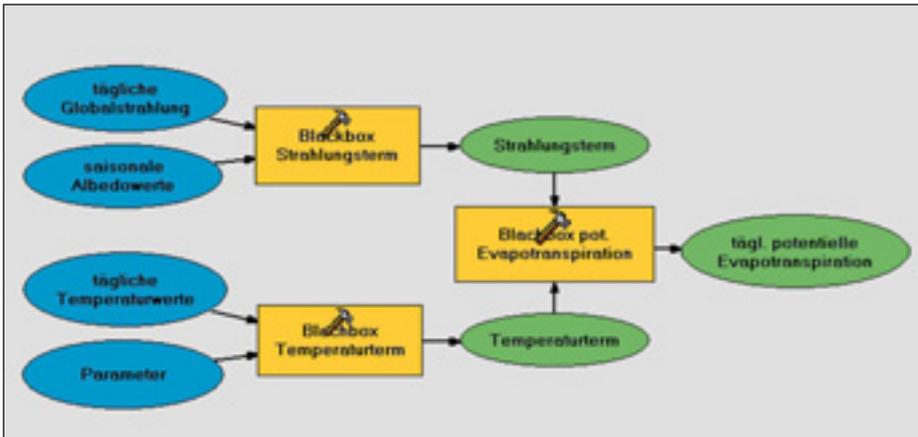


Abbildung 4: Modell zur Verdunstung nach Wendling im ArcGIS Model Builder

5 MODELLE

Abbildung 4 zeigt das erarbeitete Modell zur Ermittlung der potenziellen Verdunstung auf 250 m Rasterbasis, mit täglichem Berechnungsintervall, wobei die Modellstruktur den Ansatz von Wendling wiedergibt.

Das vereinfachte Schema des Oberflächenabfluss-Modells gemäß SRM ist in

Abbildung 5 dargestellt. Die Formel wurde adaptiert und an hier gestellte Anforderungen sowie die Datenverfügbarkeit angepasst, wodurch manche Komponenten vernachlässigt, wiederum andere ersetzt wurden.

Eingangsdaten in das Modell zur Ermittlung der theoretisch erzeugbaren Ener-

gie (Abbildung 6) waren der monatliche direkte Oberflächenabfluss und ein DHM. Vorarbeiten wie die Anpassung von Einheiten oder das Resampling von Zellgrößen zur genaueren Berechnung waren nötig. Auf Basis des Höhenmodells wurden die Fließrichtung und anschließend die Abflusskonzentration mit gewichtenden, monatlichen Abflusswerten berechnet. Mit dem Ergebnis der Abflusskonzentration errechnete sich durch Multiplikation mit der Fallhöhe und der Erdbeschleunigung das monatliche, theoretische Energiepotenzial pro 250 m Rasterzelle.

Es wurde damit das Flächenpotenzial berechnet, das die oberste Grenze eines theoretischen Potenzials darstellt. Man bezeichnet damit jene theoretische Energiemenge, die durch eine lückenlose Bedeckung des Untersuchungsgebiets mit Speicherbecken zu gewinnen wäre (Horlacher 2003, 8 ff.). Durch Aufsummierung der Monatssummen erhält man das jährliche, theoretische Energiepotenzial.

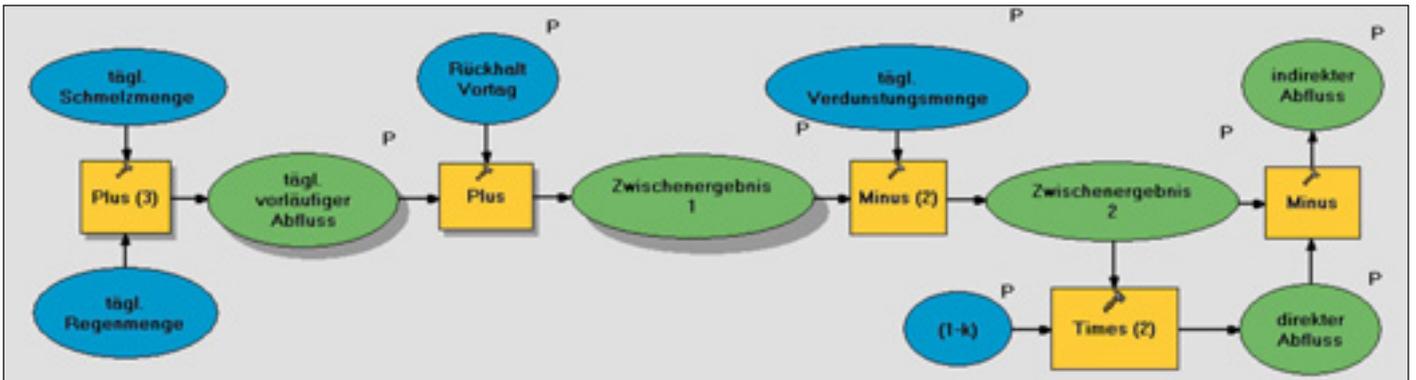


Abbildung 5: Modell zur Berechnung des Oberflächenabflusses im ArcGIS Model Builder



Abbildung 6: Modell zur Berechnung der potenziellen Energie im ArcGIS Model Builder

## 6 ERGEBNISSE

### 6.1 VERDUNSTUNGSMODELLIERUNG

In Abbildung 7 wird der Jahresverlauf der potenziellen Verdunstung wiedergegeben. Gut zu erkennen ist die Abnahme in den Wintermonaten und die Zunahme auf über 100 mm in den Sommermonaten mit einem Spitzenwert im Juli, wenn hohe Niederschlagsmengen bei gleichzeitig hohen Temperaturen auftreten und damit günstige Bedingungen für hohe Evapotranspirationsraten darstellen. Die Verdunstung der ZAMG „... wird mit der GGI Wanne gemessen, sie entspricht der potenziellen Verdunstung, also genügend Wasserangebot“ (Koch 2009). Es ist anzumerken, dass von der ZAMG lediglich Werte für die Monate April bis Oktober 05 vorlagen, „... in den übrigen Monaten besteht die Möglichkeit, dass das Wasser in der Wanne friert“ (Koch 2009). Damit kann kein vollständiger Jahresverlauf gezeichnet werden.

Es zeigt sich deutlich, dass die gemessenen Werte der ZAMG durchwegs niedriger sind als die berechneten Werte nach Wendling. Ein Grund für diese Abweichung können die grob ermittelten täglichen Temperatur- und Niederschlagsdaten sein, die von Monatswerten heruntergebrochen wurden. Die Messstation, die dabei die Daten für Temperatur und Niederschlag lieferte, war die ZAMG-Station am Flughafen Salzburg (Abbildung 2).

### 6.2 ABFLUSSMODELLIERUNG

Die Abflussmodellierung wurde auf die Berechnung von Flächenpotenzialen ausgelegt, was angemessen in Bezug auf den Rechenaufwand und die erwarteten Ergebnisse erachtet wurde. Es wurde die Annahme getroffen, dass das gesamte Untersuchungsgebiet ein Speicherbecken darstellt, das die gefallene Niederschlagsmenge und den Abfluss aus Schneegebieten auffängt. Daraus wurde nachfolgend das Wasserkraftpotenzial ermittelt. Das Ergebnis der Abflussmodellierung mit den Komponenten Niederschlag und Schneefall ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Niederschlagsmengen, in Blau dargestellt, variieren erwartungsgemäß entsprechend der saisonalen Niederschlagsverteilung: hohe Niederschlagsmengen im Sommer, geringere Niederschlagsmengen im Winter.

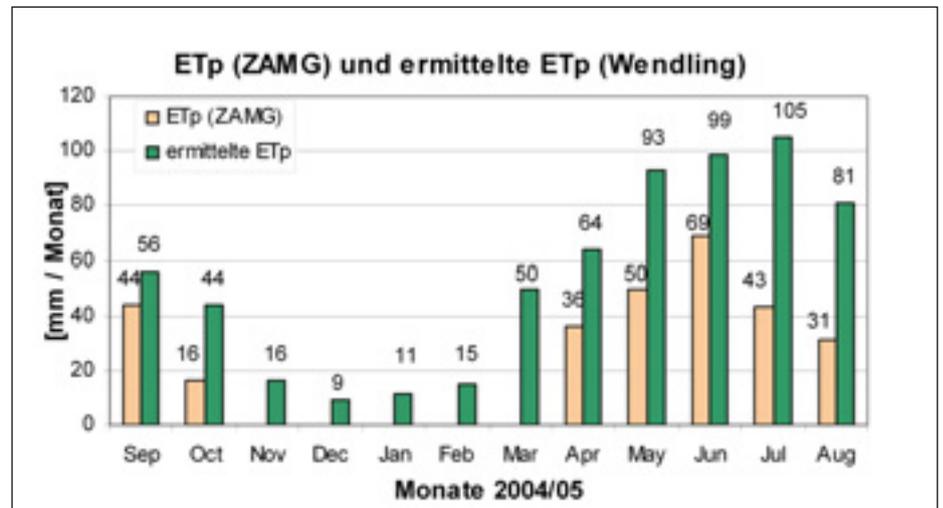


Abbildung 7: Vergleich der gemessenen potenziellen Evapotranspiration der ZAMG (2004/05) mit der berechneten potenziellen Evapotranspiration (Wendling), abgelesen jeweils am Flughafen Salzburg, 2004/05

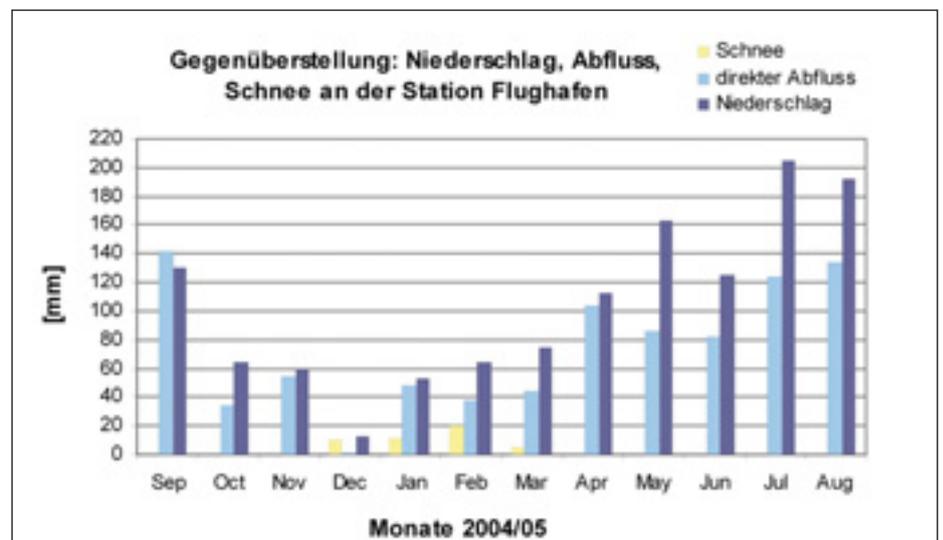


Abbildung 8: Verlauf des Schneefalls, des Niederschlags und der Abflusshöhe, abgelesen an der Station Salzburg-Flughafen 2004/05; Werte berechnet mit dem entwickelten Modell

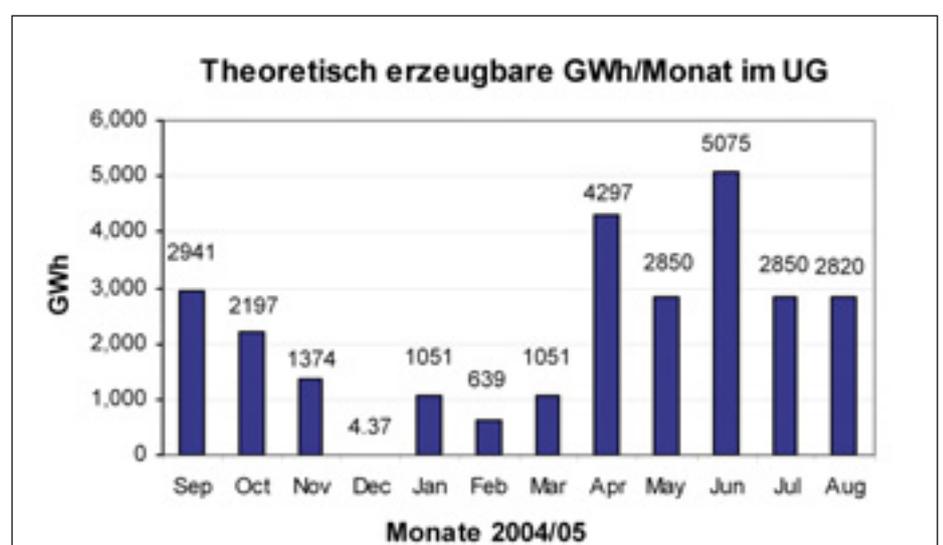


Abbildung 9: Theoretisch erzeugbare Jahresleistung im UG 2004/05



**Abbildung 10:** Karten des ermittelten theoretischen Wasserkraftpotenzials [GWh/250 m Rasterzelle/a] 2004/05 in punktueller und flächenhafter Darstellung

Der Schneefall setzt im November ein und dauert bis zum April an, nicht abzulesen ist hier die Neuschneehöhe, da sie nicht direkt aus den Niederschlagsangaben, in mm berechnet, abgelesen werden konnten. Der direkte Abfluss (ohne Verzögerung auftretender Abfluss) ist im Verlauf durch die Niederschlagskurve geprägt und weist auch zeitgleiche Minima und Maxima auf. Die Differenz zwischen Niederschlag und Abfluss setzt sich aus Bodenwasserrückhalt, Verdunstung und der Verzögerung des Abflusses zusammen.

### 6.3 WASSERKRAFTPOTENZIAL

In Abbildung 9 sind die theoretisch erzeugbaren GWh pro Monat im Zeitraum September 2004 bis August 2005, abgelesen im Salzburger Stadtteil Itzling, wiedergegeben. Die höchsten Werte werden, wie erwartet, im April, zur Zeit der Schneeschmelze, wenn die größte Wassermenge vorherrscht, erreicht. Die niedrigsten Werte finden sich von Dezember bis Februar, wenn der Niederschlag größtenteils in Form von Schnee gebunden ist und nur wenig Wassermenge zum Abfluss kommt und damit zur Leistungserzeugung genutzt werden kann.

Die Ergebnisse aus der Berechnung der monatlich, theoretisch zur Verfügung stehenden Energiemengen ergaben aufsummiert die Jahresmengen. Abbildung 10 zeigt die kumulierten Monatswerte von September 2004 bis August 2005 in [GWh/250 m Rasterzelle/a] mit einem Maximalwert von rund 635 GWh.

Die unterschiedliche Energiemenge wird in Abbildung 10 durch die Größe der Rechtecke dargestellt. Die größten Werte zeigen sich südlich von Salzburg (um Golling an der Salzach), im nordwestlichen Flachgau an der Grenze zu Bayern sowie an den der Salzach zufließenden Flüssen im Pinzgau, Pongau, Tennengau, weiterhin im relativ abgeschlossenen Einzugsgebiet des Lungaus sowie entlang der Saalach von Lofer bis Bad Reichenhall (D). Summiert über das gesamte Untersuchungsgebiet ergibt sich eine theoretisch erzeugbare Energiemenge von rund 30.000 [GWh/a] im Untersuchungsgebiet.

## 7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND FAZIT

Das mit dem hier entwickelten Modell errechnete Wasserkraftpotenzial hat einen

Maximalwert von 635 [GWh/250 m Rasterzelle/a] und summierte 30.000 [GWh/a] im gesamten Untersuchungsgebiet. Die tatsächlich erzeugte, jährliche Leistung mit Kleinwasserkraftanlagen im Bundesland Salzburg liegt bei 703 GWh (Kleinwasserkraft Österreich 2008). Nach einer Studie im Rahmen des Projekts „REGIO Energy“ (2008) wurde für Salzburg ein technisches Potenzial von rund 10.000 [GWh/a] ermittelt (Abflusslinienpotenzial) und ein realisierbares Potenzial von rund 4.000 GWh Strom pro Jahr ausgewiesen (Stanzer & Novak 2009).

Pöry (2008) weist als Abflusslinienpotenzial in Salzburg 9.300 [GWh/a], als technisch-wirtschaftliches Potenzial 6.100 und als reduziertes technisch-wirtschaftliches Potenzial 5.000 [GWh/a] aus. Als technisch-wirtschaftliches Restpotenzial werden hier 2.700 [GWh/a] angegeben.

Der berechnete Wert von 30.000 [GWh/a] an theoretischem Potenzial ist erwartungsgemäß höher als die tatsächliche Erzeugung in Kleinwasserkraftanlagen (703 GWh) oder auch die Werte aus der Pöry-Studie. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass es sich beim berechneten Potenzial zum einen um theoretisches Potenzial, zum anderen um Flächenpotenzial handelt und einzelne Modellierungsschritte mit groben Niederschlagswerten umgesetzt wurden.

Es wäre eine Wandlung des hier errechneten Potenzials in Speicherkraftwerken denkbar, unter der Annahme der Aufstauung der Wassermengen in den Zellen mit großer Wassermenge, was auch mögliche Standorte für Speicherkraftanlagen darstellen könnten. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass bei Ermittlung des technischen und oder wirtschaftlichen Potenzials eine negative Evaluation derartiger Standortentscheidungen erfolgen kann.

Eine erneute Berechnung des Energiepotenzials mit gemessenen, täglichen Temperatur- und Niederschlagswerten ist anzustreben, ebenso wie eine Einteilung in kleinere Untersuchungsgebiete, da regionale Unterschiede besser berücksichtigt werden könnten. Auch der Bodenwassergehalt und die Gletscherschmelze als zwei weitere, für hydrologische Prozesse wichtige Komponenten, wurden nicht eigens modelliert, deren Betrachtung weitere Verfeinerungen in der Modellierung darstellen würden.

Das Herunterbrechen auf technisches und realisierbares Potenzial wäre sinnvoll, um weitere Vergleiche anzustellen, weiter wäre es angebracht, das Linien- anstatt des hier

ermittelten Flächenpotenzials zu berechnen, da diese Kleinwasserkraftanlagen vorzugsweise an Flussläufen errichtet werden. Zur Ermittlung des Linienpotenzials müsste eine

erneute Modellierung entlang von Flüssen mit Betrachtungsdistanzen von rund 5 km oder mehr durchgeführt werden, um ausreichende Höhendifferenzen zu erhalten.

## Literatur

- Andreas, K.; Gersdorf, I.; Höhne, S.; Meszaros, S.; Stock, M.; Wickborn, A.; Woitunik, M. (2000): Bericht zum Feldpraktikum „Meteorologie für Landschaftsarchitekten“. Universität Dresden. [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_forst\\_geo\\_und\\_hydrowissenschaften/fachrichtung\\_wasserwesen/ifhm/meteorologie/studium\\_lehre](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/ifhm/meteorologie/studium_lehre), Zugriff 08/2009.
- Austrian Energy Agency (2005): Wasserkraft. <http://www.energyagency.at/energien-in-zahlen/erneuerbare-energie.html>, Zugriff 07/2009.
- Biberacher, M.; Mittlböck, M.; Rieder, W. (2005): „Virtuelle Kraftwerke“ für autarke Regionen. In: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XVII. Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 54–59.
- Brubaker, K.; Rango, A.; Kustas, W. (1996): Incorporating radiation inputs into the Snowmelt-Runoff-Model. In: Hydrological Processes, 10, S. 1329–1343.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2009): Wasserkreislauf und Wasserbilanz. <http://wasser.lebensministerium.at/article/articleview/60327/1/14151/>, Zugriff 05/2009.
- Cazorzi, F.; Dalla Fontana, G. (1996): Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index. In: Journal of Hydrology, 181, S. 169–187.
- Die Grünen (2009): Wasserkraft. [http://salzburg.gruene.at/neue\\_energie\\_fuer\\_salzburg/wasser/](http://salzburg.gruene.at/neue_energie_fuer_salzburg/wasser/), Zugriff 04/2009.
- Dietrich, J.; Schöniger, M.; Pfützner, B.; Hesse, P.; Mey, S.; Klöcking, B. (2009): Hydro Skript – Skript zur Vorlesung und Übung „Hydrologie“ im Studiengang Geoökologie an der TU Braunschweig. [http://www.hydroskript.de/html/\\_index.html?page=/html/\\_info.html](http://www.hydroskript.de/html/_index.html?page=/html/_info.html), Zugriff 06/2009.
- ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc. (2007): ArcGIS 9.2 Desktop Help. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>, Zugriff 08/2009.
- EEA – European Environment Agency (2000): Corine Landcover. <http://www.eea.europa.eu/themes/landuse//clc-download>, Zugriff 02/2009.
- Ferguson, R. I. (1999): Snowmelt runoff models. In: Progress in Physical Geography, 23 (2), S. 205–227.
- Fu, P.; Rich, P. (1999): Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension Modelling Solar Radiation at Landscape Scales. Proceedings of the ESRI User Conference 1999, San Diego.
- Giesecke, J.; Mosonyi, E.; Heimerl, S. (2009): Wasserkraftanlagen: Planung, Bau, Betrieb. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Häckel, H. (2005): Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Horlacher, H.-B. (2003): Globale Potenziale der Wasserkraft. Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003: „Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit“. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg. [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2003\\_ex03.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_ex03.pdf), Zugriff 05/2009.
- Hydrologischer Atlas Österreich (2004/05): Hydrologischer Atlas. <http://www.boku.ac.at/iwhw/hao/>, Zugriff 02/2010.
- Kleinwasserkraft Österreich (2008): Kleinwasserkraft in Salzburg. [http://www.kleinwasserkraft.at/index.php?option=com\\_content&task=blogcategory&id=24&Itemid=71](http://www.kleinwasserkraft.at/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=24&Itemid=71), Zugriff 08/2009.
- Koch, E. (2009): Verdunstungsmessung bei der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Schriftliche Mitteilung (26.08.2009).
- Kustas, W. P.; Rango, A.; Uijlenhoet, R. (1994): A simple energy budget algorithm for the snowmelt runoff model. In: Water Resour. Res., 30 (5), S. 1515–1527.
- Maniak, U. (1997): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.
- Martinez, J. (1975): The Snowmelt Runoff Model. <http://aces.nmsu.edu/pubs/research/water/SRMSpecRep100.pdf>; <http://hydrolab.arsusda.gov/cgi-bin/srmhome>, Zugriff 05/2009.
- Pöyry (2008): Wasserkraftpotenzialstudie Österreich. Im Auftrag von VEÖ, BMWA, E-Control, Kleinwasserkraft Österreich und VÖEW, 2008.
- Schaumberger, A. (2006): Implementierung des Trockenschadenmodells in einem Geographischen Informationssystem (GIS) als Grundlage für die praktische Anwendung – 2. Klimaseminar Raumberg-Gumpenstein. Irdning, 2006. S. 41–77. [http://www.raumberg-gumpenstein.at/cms/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=129&Itemid=53](http://www.raumberg-gumpenstein.at/cms/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=129&Itemid=53), Zugriff, 10/2009.
- Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. [http://iacweb.ethz.ch/staff/gurtz/download/WaSim\\_ZGS.PDF](http://iacweb.ethz.ch/staff/gurtz/download/WaSim_ZGS.PDF), Zugriff 08/2009.
- Stanzer, G.; Novak, S. (2009): REGIO Energy – Ergebnisse. Projekt gefördert aus dem Klima- und Energiefonds, durchgeführt im Rahmen des Projektes „Energie der Zukunft“. <http://www.regioenergy.at/wasserkraft>, Zugriff 04/2010.
- Worldclim (2006): Climate data for current conditions. <http://www.worldclim.org/current>, Zugriff 03/2010.
- ZAMG – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2005): Meteorologisches Jahrbuch 2004 und 2005. <http://www.zamg.ac.at/klima/jahrbuch/>, Zugriff 05/2009.
- A simple energy budget algorithm for the snow-