

GIS-BASIERTE POTENZIALANALYSE DER WASSERKRAFT

Gernot NISCHLER¹, Claudia MAYER¹, Klaus MAIER¹, Heinz STIGLER

Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation TU Graz

Inffeldgasse 18 A-8010 Graz, Telefon: 0316-873 7907

E-Mail: Gernot.Nischler@TUGraz.at, Web: www.IEE.TUGraz.at.

Kurzfassung:

Der Beitrag erläutert einleitend die Bedeutung der Wasserkraft für die zukünftige Energie- und Klimapolitik der Europäischen Union. Die Theorie der Potenzialanalyse für die energetische Nutzung der Wasserkraft unter Anwendung geografischer Informationssysteme (GIS) bildet damit eine wichtige Planungsgrundlage für die künftige Nutzung der Wasserkraft. Das im Rahmen dieses Beitrags modellierte Potenzial stellt ein entlang tatsächlicher Flussverläufe akkumuliertes theoretisches Niederschlagsflächenpotenzial unter Berücksichtigung der Verdunstung dar, wobei durch die Anwendung von GIS-Systemen die naturräumlichen Voraussetzungen zur energetischen Nutzung der Wasserkraft (Fallhöhe und Wassermenge) im entwickelten Modell implizit und in einer entsprechend hohen räumlichen Auflösung berücksichtigt werden. Als Untersuchungsgebiete werden die europäischen Mitgliedsstaaten Italien, Frankreich und die iberische Halbinsel ebenso wie regionale Untersuchungsgebiete (Region Piemont, Einzugsgebiet Ebro) herangezogen und mit Referenzstudien renommierter Forschungsinstitute verglichen.

Keywords: Wasserkraft, Potenzialanalyse, GIS, erneuerbare Energie

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Auch in der Erneuerbaren Richtlinie 2009/28/EC hält die Europäische Union am Gemeinschaftsziel für den Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch fest. Der Anteil erneuerbarer Energien wurde gemeinschaftsweit auf 20% festgelegt, ist jedoch aufgrund unterschiedlicher Potenziale im Bereich erneuerbarer Energien in nationale Einzelziele aufgeteilt worden. In Artikel 3 Abs. (1) sowie im Anhang I Teil A der Richtlinie 2009/28/EC sind daher verbindliche nationale Gesamtziele fixiert worden. Da die Länder Italien, Frankreich, Spanien und Portugal im Fokus dieser Veröffentlichung stehen, werden in Tabelle 1 die nationalen Ziele ebene dieser Mitgliedsstaaten aus der Richtlinie 2009/28/EC Anhang I Teil A zitiert.

Zudem fordert Artikel 4 der Erneuerbaren-Richtlinie die Verabschiedung nationaler Aktionspläne für erneuerbare Energie, sog. National Renewable Energy Action Plans (NREAP), welche unter anderem für den Elektrizitätssektor den Anteil verbrauchter Energie aus erneuerbaren Quellen im Jahr 2020 aufzeigen. Die Analyse der bis Oktober 2010 verfügbaren nationalen Aktionspläne zeigt, dass der Elektrizitätssektors mit einem Anteil von 45% zur Erreichung des gemeinschaftsweiten 20%-Zieles beiträgt. (Beurskens et al., 2010)

Tabelle 1: Zielwert für den Anteil von erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch im Jahr 2020 laut Anhang I 2009/28/EC u. der prognostizierte Wert lt. nationalen Aktionsplänen (Beurskens et al., 2010)

Land	Zielwert laut Anhang I Teil A 2009/28/EC	Zielwert laut nationalem Aktionsplan (NREAP)
Italien	17%	17%
Frankreich	23%	23%
Spanien	20%	22,7%
Portugal	31%	31%
Österreich	34%	34,2%

¹ Jungautor

Bei näherer Betrachtung der eingesetzten Stromerzeugungstechnologien überwiegen gemeinschaftsweit die Nutzung von Windenergie und Wasserkraft gegenüber den anderen erneuerbaren Energiequellen. Stromerzeugung aus Lauf- und Speicherwasserkraft kann demzufolge einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der energie- und umweltpolitischen Ziele der EU leisten.

In vielen Regionen Europas gibt es noch ungenutztes Potenzial, dessen Lokalisierung unter Zuhilfenahme von Geografischen Informationssystemen (GIS) eine wesentliche Planungsgrundlage für die Projektierung von Wasserkraftanlagen darstellt. Es ergibt sich demnach die zentrale Frage wie hoch die Potenziale der (erneuerbaren) Wasserkraft sind und wo diese Potenziale liegen. Aus diesem Grund wurde für die Länder Italien, Frankreich, Spanien und Portugal eine GIS-basierte Potenzialanalyse unter Berücksichtigung räumlicher Besonderheiten durchgeführt. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die unterschiedlichen in der Literatur verwendeten Potenzialbegriffe erläutert um anschließend die Methodik des GIS-Modells zur Potenzialermittlung zu verstehen. Anschließend werden die Ergebnisse des berechneten jährlichen Potenzials für Italien, Frankreich und die iberische Halbinsel, sowie die berechneten Monatspotenziale im Piemont diskutiert.

2 Methodische Vorgehensweise zur GIS-basierten Analyse der Wasserkraft

Geografische Informationssysteme, kurz GIS, stellen im Wesentlichen einen Bezug zwischen Daten und deren räumlichen Lage dar. Die Nutzung von GIS für die Potenzialanalyse erneuerbarer Energien wie Windkraft, Solarenergie, Biomasse oder aber Wasserkraft ist daher naheliegend, da all diese Energieformen eine Dargebotsabhängigkeit vom jeweiligen Primärenergieträger Wind, Globalstrahlung, biogener Brennstoff oder aber Wasser aufweisen. Für die Analyse wurde das Softwarepaket ArcGIS 9.3 von ESRI verwendet.

2.1 Theorie der Potenzialanalyse mittels geografischer Informationssysteme

Für die Nutzung der Wasserkraft sind zwei Parameter ausschlaggebend: die verfügbare Wassermenge und die nutzbare Fallhöhe über welche die potenzielle Energie des Wassers abgebaut werden kann. Sowohl die Wasserverfügbarkeit als auch die durch die Geomorphographie bedingten Fallhöhen lassen sich durch Geoinformationssysteme räumlich zuordnen und für die Potenzialanalyse der Wasserkraft verwenden.

Für das weitere Verständnis werden folgende Potenzialbegriffe für die Wasserkraft erläutert. Die Begriffe stammen im Wesentlichen aus Pyöry, 2008 und Horlacher, 2003.

1. *Theoretisches Potenzial*: Das theoretische Potenzial umfasst die potenzielle Energie aller Gewässer im Untersuchungsgebiet, wobei technische und wirtschaftliche Nutzungsgrenzen nicht berücksichtigt werden. Damit stellt diese Art des Potenzials die denkbare Obergrenze dar. Folgende Unterbegriffe sind in der Literatur zu finden.
 - a) *Niederschlagspotenzial*: Nutzung der gesamten potenzielle Energie des Niederschlags
 - b) *Abflussflächenpotenzial*: nur der abflusswirksame Niederschlag fließt in die Potenzialberechnung ein, wobei eine nahezu lückenlose Abdeckung des Untersuchungsgebietes mit Speicherbecken angenommen wird. Eingangsgröße ist im Wesentlichen der in einem gewissen Zeitraum (Monat, Jahr) auf das Untersuchungsgebiet fallende mittlere Niederschlag.
 - c) *Abflusslinienpotenzial*: berücksichtigt das entlang der Fließgewässer theoretisch nutzbare Potenzial. Dabei fließen langjährige mittlere Abflusswerte und die Fallhöhen entlang des Flusses in die Berechnung des Abflusslinienpotenzials ein. Wenn man vom Abflusslinienpotenzial das bereits ausgebaute Potenzial beispielsweise in Form von Regelarbeitsvermögen abzieht erhält an das *theoretische Linienrestpotenzial*. Dieses Restpotenzial lässt sich dabei wiederum in das *Neuerschließungs-* und das *Optimierungspotenzial* einteilen.

2. *Technisches Ausbaupotenzial*: Darunter versteht man das technische nutzbare Potenzial unter Berücksichtigung des Gesamtwirkungsgrades der Energieumwandlungskette inklusive der Fließwasserverluste sowie unter Berücksichtigung ökologischer, infrastruktureller und rechtlich-organisatorischer Rahmenbedingungen. Laut Horlacher liegt das technische Potenzial bei ca. 20 bis 35% des theoretischen Potenzials. Allerdings kann dieses Verhältnis keineswegs pauschal angenommen werden und bedarf daher stets einer konkreten Analyse.
3. *Technisch-Wirtschaftliches Ausbaupotenzial*: Darunter versteht man im Allgemeinen jenen Anteil des technischen Potenzials, welcher unter Berücksichtigung ökonomischer Rahmenbedingungen wirtschaftlich sinnvoll genutzt werden kann.

Abhängig vom Potenzialbegriff sind zusätzlich zur Wassermenge (Niederschlag oder Abflusswerte) und zur Information über die Fallhöhe entlang der Flüsse weitere Eingangsgrößen notwendig. Dazu gehören auszugswise die Information über Einzugsgebiete, Flussverläufe, Anlagenwirkungsgrade, bestehenden Kraftwerksstandorte und deren Produktionsdaten, Verdunstung, ökologische Rahmenbedingungen wie z.B. Restwassermengen oder wirtschaftliche Treiber und Hemmnisse für potenzielle Standorte. Zusätzlich zur räumlichen Zuordnung der Inputparameter eines GIS-Modells ist auch der entsprechende zeitliche Bezug der Eingangsdaten notwendig. Üblicherweise, und so auch im weiteren Verlauf dieser Veröffentlichung, stützen sich Potenzialanalysen auf langjährige Zeitreihen der Eingangsdaten, wobei üblicherweise jährliche aber auch monatliche Mittelwerte herangezogen werden.

Unter Berücksichtigung der Vielfalt an Potenzialbegriffen, welche sich zudem oftmals marginal voneinander unterscheiden, erscheint es zweckdienlich vor der Interpretation von Potenzialen aus Studien den darin definierten Potenzialbegriff zu analysieren. So wird oftmals bereits im Abflusslinienpotenzial ein pauschaler Anlagenwirkungsgrad von beispielsweise 80% berücksichtigt und dennoch vom Abflusslinienpotenzial gesprochen.

Per Definition berücksichtigt das Abflusslinienpotenzial das Potenzial entlang tatsächlicher Flussverläufe, welches jedoch in den meisten Definitionen auf langjährigen Abflussmesswerten und nicht auf langjährigen mittleren Niederschlagswerten beruht. Zwar wurde für die Potenzialanalyse der Länder Italien, Frankreich und jener der iberischen Halbinsel ebenso das Potenzial entlang der tatsächlicher Fließgewässer modelliert, jedoch basierend auf dem Niederschlag im gesamten Einzugsgebiet des jeweiligen Flussabschnittes. Daher traf weder die Definition des Abflussflächen- noch jene des Abflusslinienpotenzials zu, so dass ein neuer Potenzialbegriff definiert wurde. Die Ergebnisse des Modells zeigen daher das *entlang tatsächlicher Flussverläufe akkumulierte Abflussflächenpotenzial unter Berücksichtigung einer einfachen Wasserhaushaltsgleichung*.

2.2 Methodik und Modellbeschreibung

Nachdem nun der Potenzialbegriff definiert wurde, werden in diesem Kapitel die angewendete Methodik und das Modell zur GIS-basierten Potenzialberechnung beschrieben. Das Modell wurde konzipiert für die Berechnung des theoretischen Jahresenergiepotenzials. Die Basis des Modells bilden zwei physikalische Formeln, zum einen die Wasserhaushaltsgleichung (Formel 1) und zum anderen die Formel für die potenzielle Energie (Formel 2).

$$A = N - V \pm \Delta S$$

Formel 1: Wasserhaushaltsgleichung

A.....Abflusshöhe [mm]

N.....Niederschlagshöhe im Einzugsgebiet [mm]

V.....Verdunstung oder Evapotranspiration [mm]

ΔSRücklage oder Verbrauch von Wasser im Einzugsgebiet (Speicherglied) [mm]

Die allgemeine Darstellung der Wasserhaushaltsgleichung in Formel 1 beinhaltet den Niederschlag, die Verdunstung und das sogenannte Speicherglied. Für die spezielle Anwendung der Formel für die GIS-basierte Potenzialanalyse weisen die Eingangsgrößen einen räumlichen Bezug auf. Zudem beziehen sich die Eingangsgrößen auf ein bestimmtes Zeitintervall. Im speziellen Anwendungsfall der Jahrespotenzialanalyse handelt es sich um jährliche langjährige Mittelwerte des Niederschlags und der Verdunstung in einer räumlichen Auflösung von einem Quadratkilometer im Falle des Niederschlags. Wie bereits im Kapitel 2.1 erläutert, ermöglicht der räumliche Bezug der Daten überhaupt erst die GIS-basierte Analyse.

Das Speicherglied ΔS beinhaltet im Wesentlichen die Schneeretention und die Schneeschmelze, welche vereinfacht eine Abflussverzögerung innerhalb des hydrologischen Jahres bewirken. Für die Berechnung des Jahrespotenzials kann das Speicherglied nach Wakonigg, 1997 in erster Näherung vernachlässigt werden. Bei Eingangsdaten auf Monatsbasis hingegen ist die Vernachlässigung dieser Abflussverzögerung durch Schneerücklage und Schneeschmelze nicht vernachlässigbar. Die Verdunstung beinhaltet sowohl die Evaporation als auch die Transpiration. Dabei unterscheidet man zwischen potenzieller und tatsächlicher Evapotranspiration. Die potenzielle Evapotranspiration wird definiert als die Wasserdampfmenge, welche bei ungehindertem Wassernachschub unter den meteorologischen, vegetationsbedingten und pflanzenspezifischen Randbedingungen pro Zeitintervall maximal verdunsten kann (Maniak, 2005). Aufgrund der Annahme, dass ständig ausreichend Wasser zur Verdunstung bereit steht, handelt es sich bei der potenziellen Evapotranspiration um einen theoretischen Maximalwert. Die tatsächliche Evapotranspiration hingegen beschreibt die unter Berücksichtigung der tatsächlichen Wasserverfügbarkeit im Untersuchungsgebiet mögliche Verdunstung innerhalb des betrachteten Zeitraums. Insbesondere in ariden Gebieten, wie beispielsweise im Süden Italiens, spielt die Verdunstung (potenzielle oder tatsächliche) eine bestimmende Rolle für die Belastbarkeit der Potenzialergebnisse des Modells. Aufgrund der zum Zeitpunkt der Potenzialanalyse nicht verfügbaren Geodaten für die tatsächliche Evapotranspiration wird diese über den Zusammenhang zwischen Globalstrahlung und Breitengrad aus der potenziellen Verdunstung angenähert.

Unter Anwendung der vereinfachten Wasserhaushaltsgleichung bestehend aus der Differenz von Niederschlagsmengen (langjährige Mittelwerte) und Verdunstung und unter Vernachlässigung des Speichergliedes wird die nutzbare Wassermenge in einer räumlichen Auflösung von 250 m mal 250 m (entspricht einer Rasterzelle) berechnet (Abbildung 1c). Die Niederschlags- und Verdunstungsdatensätze in mm pro Zeitintervall (Jahr oder Monat) lassen sich ihrer räumlichen Auflösung entsprechend über die Äquivalenz von Millimeter Niederschlag und Liter pro Quadratmeter in die Masseneinheit kg umrechnen. Damit liefert das Ergebnis der Wasserhaushaltsgleichung die die Masse m als Eingangsgröße die Formel der potenziellen Energie (Formel 2).

$$E = m \cdot g \cdot \Delta h$$

Formel 2: Formel der potenziellen Energie

E potenzielle Energie [J]

m Masse [kg]

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

Δh Höhendifferenz [m]

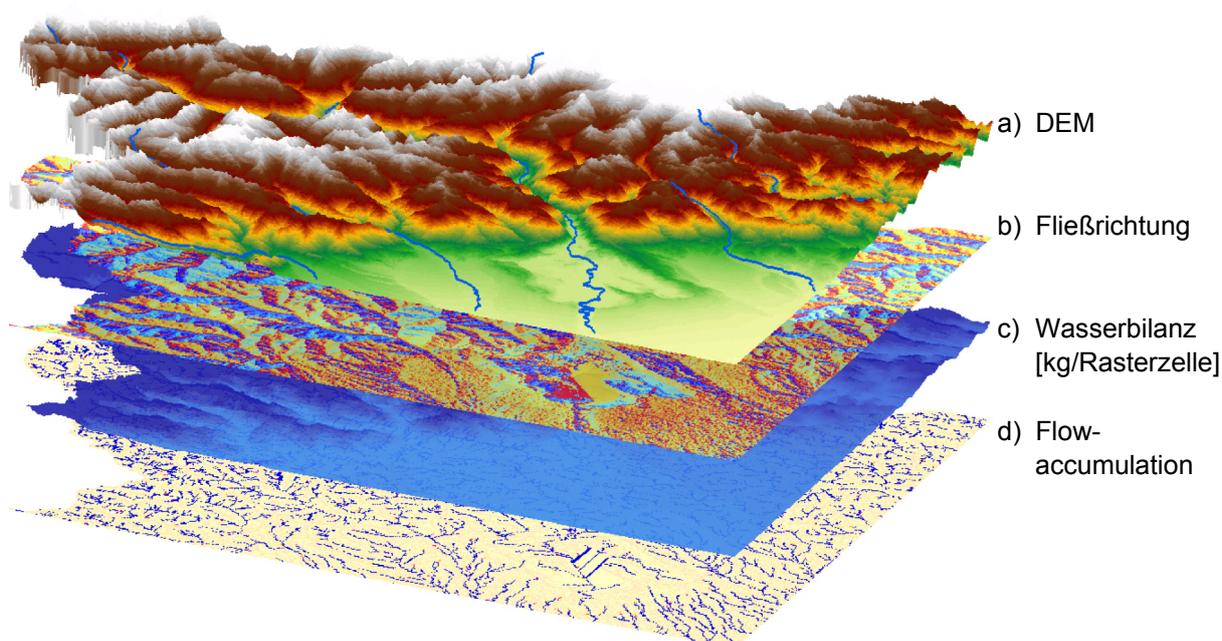


Abbildung 1: Modellierungsschritte des Potenzialmodells in ArcGIS zur Berechnung der Masse je Rasterzelle (eigene Darstellung)

Wie bereits beschrieben, stellen die berechneten Potenziale das entlang tatsächlicher Flussverläufe akkumulierte Abflussflächenpotenzial dar. Daher gilt es für die potenzielle Energie den räumlichen Bezug zu den tatsächlichen Flussverläufen herzustellen. Ausgehend von einem digitalen Höhenmodell wird zunächst ein von artifiziellen Senken befreites Höhenmodell erstellt (Abbildung 1a). Dieses bereinigte Höhenmodell bildet die Basis für die Berechnung der Fließrichtung. Das Ergebnis ist ein Raster, welches für jede Rasterzelle die Richtung angibt, in welche ein auf die Rasterzelle treffender Wassertropfen abfließt. ArcGIS 9.3 wählt dabei jeweils jene Richtung der stärksten Absenkung bezogen auf die betrachtete Rasterzelle. Das Ergebnis (Abbildung 1b) ist ein kodiertes Rasterfile mit Werten von 2^0 bis 2^7 , wobei jede Zahl einer Haupt- bzw. Nebenhimmelsrichtung entspricht. Im darauffolgenden Modellierungsschritt wird aus der Fließrichtung die Strömungsnetzwerke, d.h. die tatsächlichen Flussverläufe berechnet. Hierbei wird die direkt oder indirekt in eine Zelle mündende Menge aller bergwärts der Zelle liegenden Rasterzellen akkumuliert. Dabei erlaubt ArcGIS 9.3 die Gewichtung der Zellen, wobei im Falle des Modells für das Jahrespotenzial die aus der Wasserhaushaltsgleichung folgende Wassermenge je Rasterzelle als Gewicht herangezogen wird. Das Ergebnis der „flow-accumulation“ ist daher die entlang tatsächlicher Flussverläufe zusammentreffende Wassermenge basierend auf der Rasterzellengenauen Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung aller bergwärts der betrachteten Rasterzelle liegenden Zellen im jeweiligen Einzugsgebiet (Abbildung 1d).

Neben der Masse m gilt es zudem die Höhendifferenz Δh zu bestimmen. Dazu wird in einem ersten Schritt aus dem digitalen Höhenmodell (Abbildung 2a) mit einer räumlichen Auflösung von 250 mal 250 Metern mit Hilfe von ArcGIS 9.3 jeweils die geodätische Höhe derjenigen Nachbarzelle der jeweils betrachteten Rasterzelle erhoben, welche den geringsten aller acht Nachbarzellen aufweist (Abbildung 2b). Gleichzeitig entspricht diese Rasterzelle auch der in Fließrichtung liegenden Rasterzelle, so dass in einem zweiten Schritt durch die Differenzbildung aus dem digitalen Höhenmodell und den ermittelten minimalen Nachbarzellen die Höhendifferenz einer jeden Rasterzelle entlang der tatsächlichen Fließrichtungen berechnet wird.

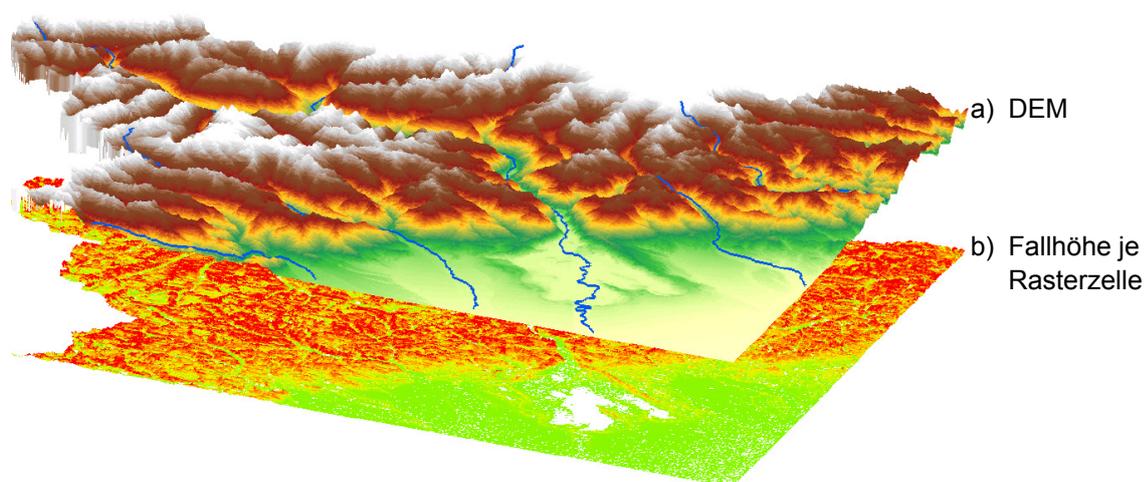


Abbildung 2: Modellierungsschritte des Potenzialmodells in ArcGIS zur Berechnung der Fallhöhe je Rasterzelle in Fließrichtung (eigene Darstellung)

Die Multiplikation der beiden Ergebnistraster aus Abbildung 1d und Abbildung 2b mit der Erdbeschleunigung ergibt das energetische Potenzial je Rasterzelle. Die Einheit ist abhängig von der räumlichen Auflösung des digitalen Höhenmodells und der zeitlichen Auflösung der Eingangsdaten für die Wasserbilanz. Für die Rastergröße 250 m mal 250 m ergibt sich bei Verwendung langjähriger Mittelwerte für Niederschlag und Verdunstung ein Ergebnistraster mit der Einheit GWh/a auf jeweils 62.500m^2 . Darin liegt auch ein entscheidender Vorteil des Modells. Abhängig von der räumlichen Auflösung des digitalen Höhenmodells kann je nach Größe des Untersuchungsgebiets der Trade-Off zwischen Modellierungsgenauigkeit und Datenspeicherbedarf bzw. Rechenzeit beeinflusst werden.

3 Diskussion der Ergebnisse und Modellvalidierung

Nach der Beschreibung der Methodik zur Berechnung des Wasserkraftpotenzials werden nun die Ergebnisse der durchgeführten Analysen diskutiert. Auf jährlicher Basis werden konkrete Ergebnisse Italiens dargestellt und diskutiert, jene für Frankreich, Spanien und Portugal werden jedoch ebenso aufgezeigt. Auf Basis monatlicher meteorologischer Eingangsdaten (Niederschlag und Verdunstung) wurden ausschließlich die Potenziale der Region Piemont² modelliert. Die Diskussion der monatlichen Ergebnisse zeigt die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Schneeakkumulierung und der Schneeschmelze, an deren Modellierung derzeit gearbeitet wird und erste Berechnungen trotz weniger Eingangsparameter gute Übereinstimmung mit tatsächlichen mittleren Monatsabflüssen diskreter Abflussstationen liefern.

3.1 Ergebnisse der Potenzialanalyse auf Jahresbasis

Unter Anwendung langjähriger Mittelwerte der Niederschlagsdaten in einer Auflösung von 1km² und der potenziellen Evapotranspiration in einer Auflösung von 20km mal 20km wurde die Wasserbilanz entsprechend der Formel 1 unter Vernachlässigung des Speichergliedes berechnet und als Eingangsgröße zur Berechnung der Wassermasse je Rasterzelle (Auflösung von 250m mal 250m) entlang tatsächlicher Flussverläufe herangezogen. Basierend auf diesen jährlichen Eingangswerten wurde mit Hilfe des in Kapitel 2.2 beschriebenen Modells das jährliche theoretische Abflussflächenpotenzial entlang der Flussverläufe in Italien, Frankreich, Spanien und Portugal berechnet.

Da zum Zeitpunkt der Berechnungen die tatsächliche Evapotranspiration nicht in Form von Rasterdaten mit zufriedenstellender räumlicher Auflösung zur Verfügung standen und die Interpolation von Messwerten diskreter Messstationen sich ebenso als nicht zielführend erwies, wurden die Berechnungen vorerst mit der potenziellen Evapotranspiration vollzogen. Wie bereits erwähnt ist der Unterschied zwischen der potenziell möglichen und der tatsächlichen Verdunstung insbesondere in trockenen Gebieten nicht vernachlässigbar. In Gebieten wie z.B. in Süditalien ergeben sich bei Anwendung der potenziellen Verdunstung unter Umständen für eine gewisse Anzahl an Rasterzellen negative Werte für die Wasserbilanz, was in weiterer Folge einen Verlust von Wasserfracht und damit einen Potenzialverlust zur energetischen Nutzung bedeutet. In den Modellergebnissen, insbesondere jenen von Italien und der iberischen Halbinsel (aufgrund deren geografischer Lage im Süden Europas), drückt sich dies in Form unzureichender Potenziale im Vergleich mit Referenzstudien aus. Aufgrund der Nichtverfügbarkeit von Rasterdaten zur aktuellen Verdunstung zum Zeitpunkt der Modellierung wurde daher für Italien eine Methode entwickelt, die aktuelle Verdunstung abzuschätzen. Die in Fohrer et al., 2007 dargestellten Korrelationen zwischen der Verdunstung und meteorologischer Faktoren wie z.B. Globalstrahlung, Temperatur und Luftfeuchte zeigen insbesondere für die Globalstrahlung einen Korrelationsfaktor von 0,86. Aus diesem Grund liegt es nahe eine Abhängigkeit der Verdunstung von der Globalstrahlung zu ermitteln, welche naturgemäß eine Abhängigkeit vom Breitengrad aufweist (Quaschnig et al., 2001). Der Ansatz für die empirische Ermittlung des Verhältnisses zwischen tatsächlicher und potenzieller Verdunstung in Abhängigkeit des Breitengrades basiert auf der vereinfachten Wasserhaushaltsgleichung. Neben den Niederschlagsdaten fließen langjährige mittlere Abflussmesswerte diskreter Messstationen sowie das jeweils dahinter liegende Einzugsgebiet in die Berechnung ein (Abbildung 3). Die Differenz aus dem gesamten Niederschlag im Einzugsgebiet der Messstation und dem an dieser Messstation tatsächlichen Abfluss ergibt unter Vernachlässigung des Speichergliedes in erster Näherung den Anteil der Verdunstung.

² Grenzregion zu Frankreich im Nordwesten Italiens

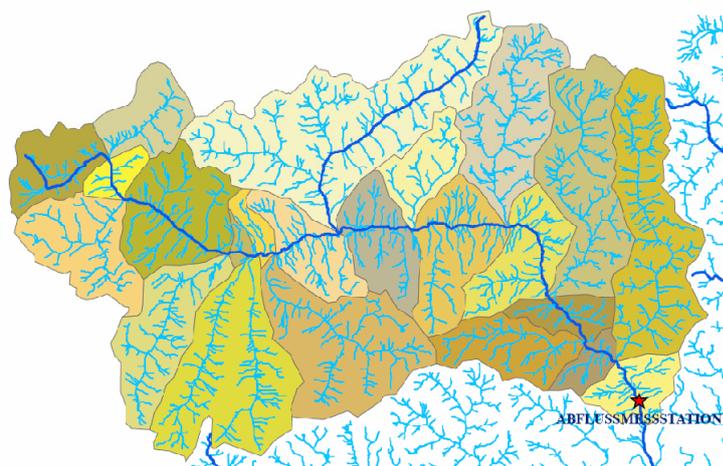


Abbildung 3: geeignetes Einzugsgebiet zur Ermittlung der tatsächlichen mittleren Verdunstung (Datenquelle: Alterach, 2006)

Nicht alle Abflussmessstationen eignen sich gleichermaßen für diese Untersuchung. Eine gewisse Anzahl am Untereinzugsgebieten bergwärts des gewählten Pegels kann den relativen Fehler minimieren, so dass insgesamt aus über 300 Pegelmessstationen für Italien rund 30 Pegel zwischen dem 37. und dem 47. Breitengrad (nördlich) für diese Untersuchung herangezogen werden. Schlussendlich wird für jedes der 30 Einzugsgebiete die berechnete tatsächliche Verdunstung mit der in Form von Rasterdaten verfügbaren potenziellen Verdunstung ins Verhältnis gesetzt, so dass sich ein mittlerer Korrekturfaktor für das betrachtete Einzugsgebiet ergibt. Durch Interpolation ergibt sich für Italien ein empirischer Zusammenhang zwischen Breitengrad und dem Verhältnis von tatsächlicher zu potenzieller Evapotranspiration, wie in Abbildung 4 dargestellt. Dabei zeigt die durchgezogene dunkelblaue Linie die in jeweils 0,5°-Schritten gemittelten Stützstellen (30 Abflussmessstationen), während die strichlierte Linie die interpolierte Näherungsformel darstellt. Diese Korrekturmethode wurde nach verfügbar werden von Rasterdaten (Trabucco et al., 2010) zur tatsächlichen Verdunstung auf ihre Zuverlässigkeit hin validiert. Dazu wurde für das Untersuchungsgebiet Italien die tatsächliche Verdunstung in einer Auflösung von 1km² zu potenziellen ins Verhältnis gesetzt und daraus wiederum in 0,5°-Schritten die Abhängigkeit vom Breitengrad ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt, dunkelgrün der Mittelwert aller Rasterzellen im jeweiligen Breitengradbereich, hellgrün die minimalen Werte im jeweils betrachteten Breitengradbereich. Dabei ist zu erkennen, dass der mittels der beschriebenen empirischen Näherung ermittelte Verlauf des Korrekturfaktors aus dem Verhältnis zwischen tatsächlicher und potenzieller Verdunstung über die geografische Breite qualitativ gut mit dem tatsächlichen Verlauf übereinstimmt, jedoch ein durchschnittlicher Fehler von rund 30% zwischen Näherungsformel und tatsächlichem Mittelwert besteht. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration aus der potenziellen nur ein sog. Bodenfaktor berücksichtigt wurde, während der Vegetationsfaktor nicht in die Berechnung einfließt (Trabucco et al., 2010). Damit kann von einer Überschätzung der aktuellen Evapotranspiration ausgegangen werden, so dass zusätzlich der Vergleich zwischen minimalen Werten aus den Rasterdaten und der Näherungsformel herangezogen wird. Dabei zeigen sich Fehler von durchschnittlich nur mehr 3%.

Basierend auf den ermittelten Korrekturfaktoren wird das jährliche theoretische Potenzial in GWh/a und Rasterzelle für Italien berechnet. Dabei ergibt sich ein Gesamtpotenzial von rund 358 TWh/a. Eine Referenzstudie des renommierten italienischen Forschungsinstitutes ERSE ergibt für Italien ein Gesamtpotenzial von theoretischen 315 TWh/a (Alterach, 2006), basiert jedoch auf einem grundsätzlich anderen Ansatz für die Berechnung. Die Methode von ERSE beruht dabei auf wesentlichen Vereinfachungen und liefert daher keine Rasterzellen genaue Lokalisierung der Potenziale entlang der Fließgewässer ist aber dennoch mit einem erheblichen Modellierungsaufwand verbunden und bedarf zudem zusätzlicher Eingangsdaten. In der ERSE-Studie wird vereinfachend angenommen, dass jedes Einzugsgebiet nur von maximal drei darüber liegenden Einzugsgebieten gespeist wird. Das Potenzial im untersuchten Einzugsgebiet ergibt sich aus der Summe der Wasserfracht der drei bergwärts liegenden Einzugsgebiete, welche über die gesamte Höhendifferenz des untersuchten Einzugsgebietes kalkuliert wird und dem Niederschlagspotenzial kalkuliert mit der Höhendifferenz zwischen der mittleren

Höhe und der Austrittshöhe des untersuchten Einzugsgebietes. Zusätzlich wird ein Permeabilitätsindex je Einzugsgebiet berücksichtigt, welcher als einfacher Multiplikator den Niederschlag in einen unterirdischen und einen oberirdischen Abflussanteil aufteilt. Jedoch wird eine Rückgabe unterirdischer Abflüsse evtl. in talwärts des untersuchten Einzugsgebietes liegende Fließgewässer nicht berücksichtigt.

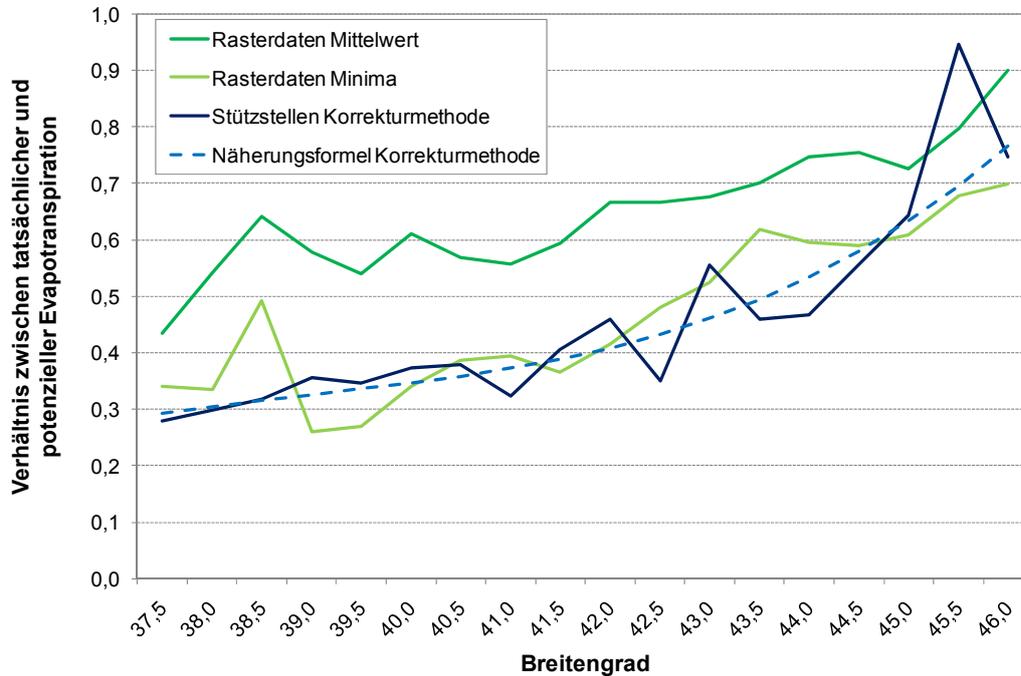


Abbildung 4: Ergebnis des Korrekturfaktors für die potenzielle Verdunstung in Abhängigkeit des Breitengrades

Die Potenzialanalyse für Frankreich ergibt ein theoretisches Potenzial von 230 TWh/a. Das theoretische Potenzial in Frankreich wird in einer Studie der Technischen Universität Dresden (Horlacher, 2003) mit 200 TWh/a abgeschätzt, eine Bericht der französischen Regierung aus dem Jahr 2002 weist ein theoretisches Potenzial von 270 TWh/a aus Amoudry, 2003.



Abbildung 5: Untersuchungsgebiete laut ital. Umweltministerium (distretti idrografici)

Tabelle 2: Vergleich der Ergebnisse der Jahresanalyse mit der Referenzstudie von ERSE (Alterach, 2006)

Untersuchungsgebiet (Aggregationsgebiet)	Ergebnisse IEE/TU Graz [TWh/a]	Referenzstudie ERSE [TWh/a]
Alpi orientali	68,3	79,9
Padano	180,8	133,9
Appennino settentrionale	24,4	25,7
Appennino centrale	32,4	24,6
Appennino meridionale	36,6	37,6
Sardegna	9,9	6,6
Sicilia	6,0	7,1
Summe	358,4	315,4

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse für Spanien und Portugal³ ergeben, unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verdunstung, ein Jahrespotenzial von rund 239 TWh. Eine Vergleichsstudie aus dem Jahre 1980 weist für Spanien hingegen ein Potenzial von jährlichen 150 TWh aus (Montes et al., 2004), zusätzlich der Bruttopotenzialangabe für Portugal von rund 32 TWh/a (REN, 2006) ergeben sich für die iberische Halbinsel rund 182 TWh/a an gesamten theoretischen Potenzial.

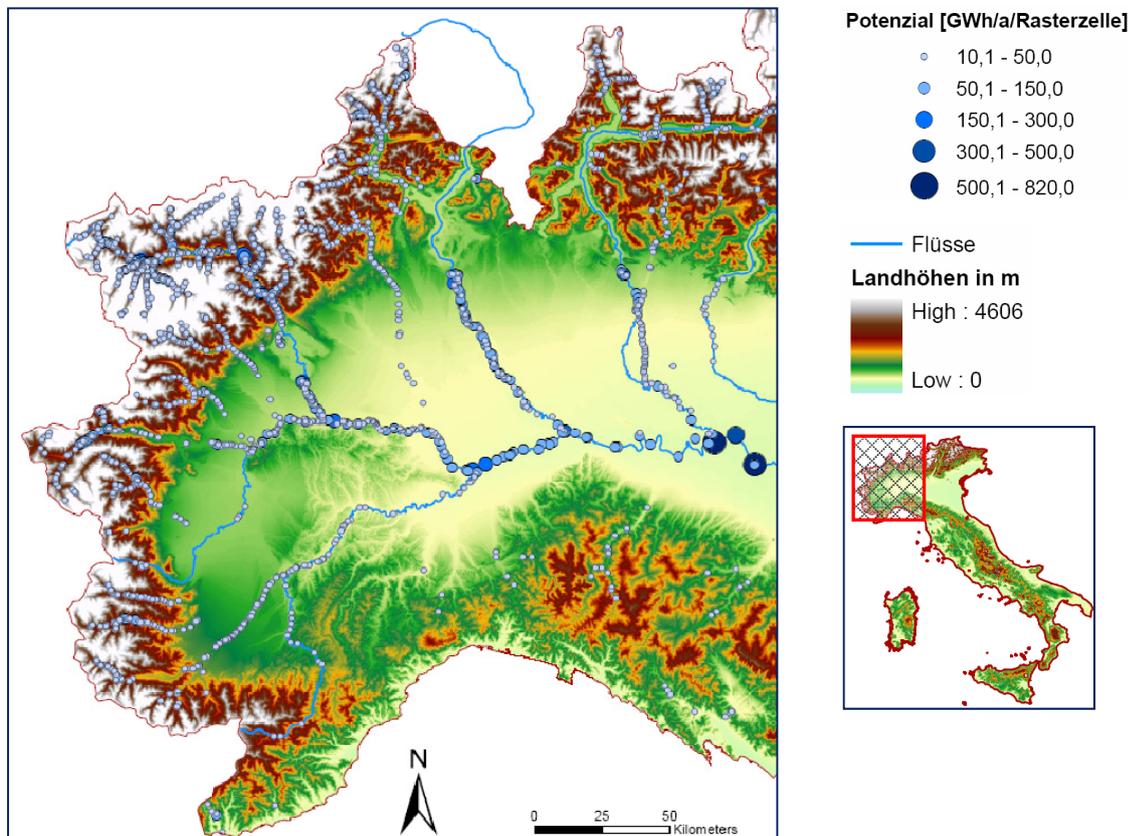


Abbildung 6: nordwestlicher Ausschnitt aus dem Ergebnis des Jahrespotenzials in GWh/a und Rasterzelle für Italien

In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Jahresanalyse für den nordwestlichen Teil Italiens und den südöstlichen Teil Frankreichs dargestellt. Rasterzellen mit einem Jahrespotenzial unterhalb von 10 GWh/a wurden der Übersicht halber nicht dargestellt. Es zeigen sich in diesen Darstellungen insbesondere die Einflüsse von Fallhöhe Δh und/oder Wassermenge m auf das theoretische Energiepotenzial. Während in den Gebirgen die verfügbaren Fallhöhen vorherrschen (Speicherkraftwerke), beruht das Potenzial in den Ebenen hauptsächlich auf der erheblichen Wasserfracht (Laufwasserkraftwerke) der großen Flusssysteme. Ausleitungskraftwerke oder aber verzweigte Wasserfassungen für Speicherkraftwerke können bewirken im Wesentlichen eine Akkumulation einzelner Fallhöhen zwischen jeweiligen Rasterzellen, so dass das Potenzial derartiger Anlagen im wesentlichen der Potenzialsomme derjenigen Rasterzellen entspricht, deren Fallhöhen für das jeweilige Kraftwerk genutzt werden.

³ Aufgrund grenzüberschreitender Einzugsgebiete wurde das Potenzial der gesamten iberische Halbinsel berechnet.

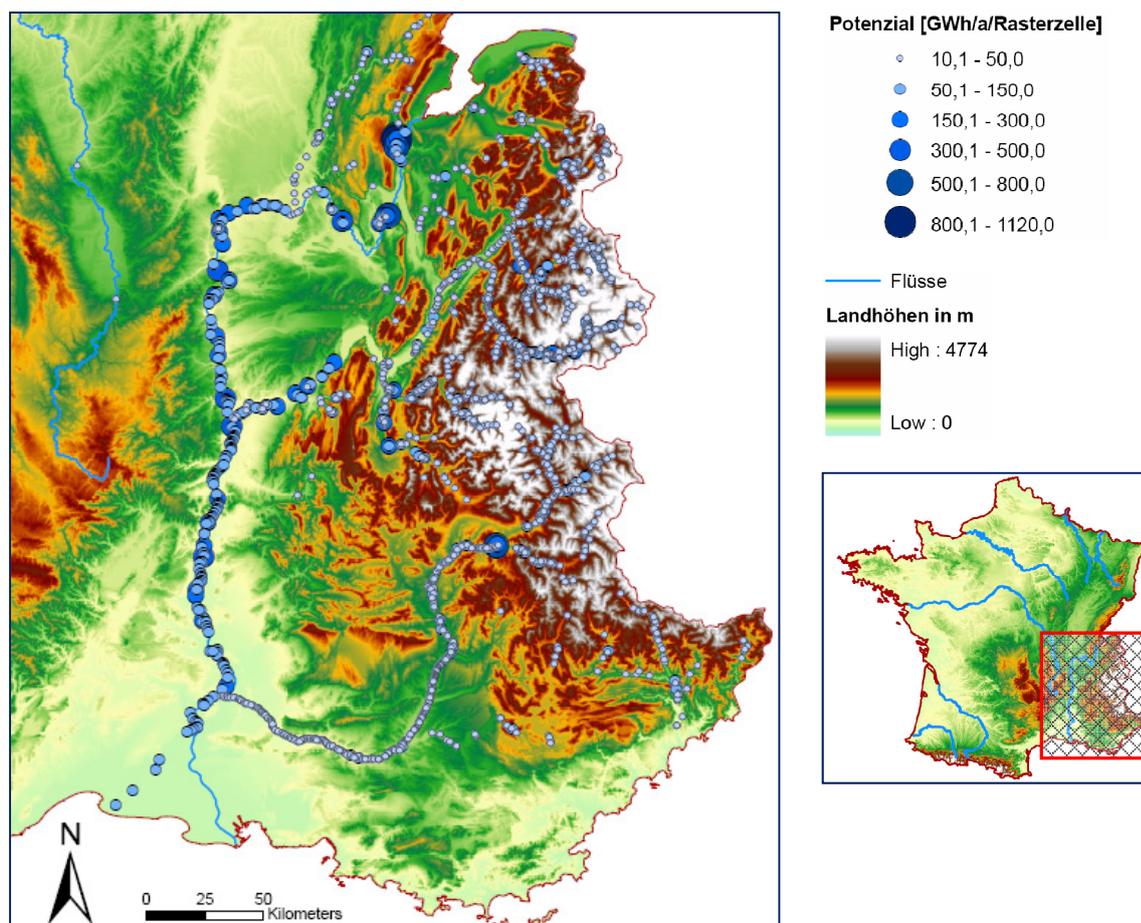


Abbildung 7: südwestlicher Ausschnitt aus dem Ergebnis Jahrespotenzial in GWh/a und Rasterzelle für Frankreich

3.2 Ergebnisse der monatlichen Potenzialanalyse im Piemont

Zusätzlich zur Analyse auf Jahresbasis wurde eine monatliche Analyse der potenziellen Produktion in GWh/Rasterzelle am Beispiel der norditalienischen Region Piemont und dem nordspanischen Einzugsgebiet des Ebro durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert und wiederum, sofern verfügbar mit entsprechenden Referenzstudien verglichen.

Ergebnisse der Analyse für das Piemont – Italien

Die Summe der monatlichen Potenzialanalysen in der Region Piemont inkl. der Wasserfrachten aus Einzugsgebieten, welche die regionale Grenze des Piemont überschreiten⁴, ergibt, basierend auf langjähriger Niederschlags-Monatsmittelwerte abzüglich Verdunstung, ein Gesamtjahrespotenzial von 52,2 TWh/a, der Vergleichswert aus der Referenzstudie ergibt ein Jahrespotenzial von 51,9 TWh/a. So kann insgesamt von einem belastbaren Ergebnis der Einzelanalysen auf Monatsbasis ausgegangen werden.

Dennoch bringt insbesondere die Vernachlässigung des Speichergliedes ΔS in der Wasserhaushaltsgleichung (Formel 1) bei monatlicher Betrachtung einen gewichtigen Nachteil mit sich, so dass die Monatspotenziale nicht das typische Abflussregime der Fließgewässer im Untersuchungsgebiet widerspiegeln. Dies wurde in Abbildung 8 anhand des Vergleiches des normierten Verlaufs des monatlichen Potenzials mit dem auf den langjährigen mittleren Jahresabfluss bezogenen langjährigen mittleren Monatsabflusses (sog. Pardè-Koeffizienten) einer repräsentativen Abflusstation im Untersuchungsgebiet Piemont dargestellt. Dabei zeigt sich beim Abfluss ein pluvio-nivales Abflussregime, während der Verlauf der Monatspotenziale in erster Näherung ein reines Regenregime vermuten ließe. Während die Vernachlässigung des Speichergliedes auf Jahresbasis wie gezeigt haltbare

⁴ z.B. Ticino mit seinem Einzugsgebiet in der Schweiz in den Kantonen Tessin und Graubünden oder der Doro Baltea mit seinem Einzugsgebiet im Aostatal

Ergebnisse liefert, zeigt die Monatsanalyse bei Anwendung des Modells am Beispiel des Piemonts deutliche Nachteile.

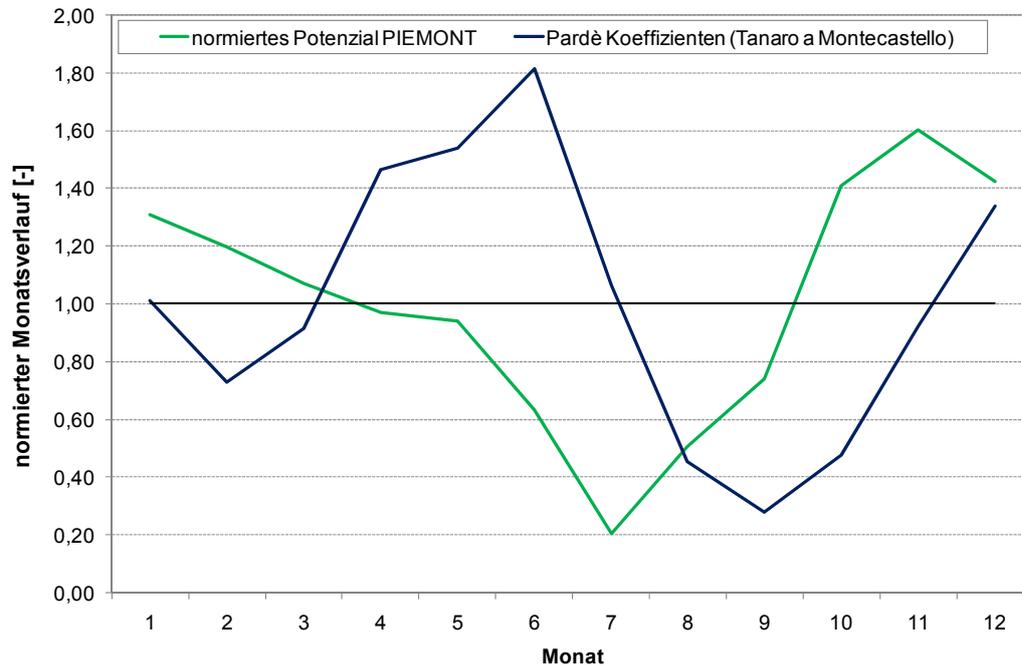


Abbildung 8: Vergleich des normierten Verlaufs des Monatspotenzials im Piemont mit Pardè-Koeffizienten einer repräsentativen Messstationen im Piemont (Datenquelle Abflussdaten APAT, 2010)

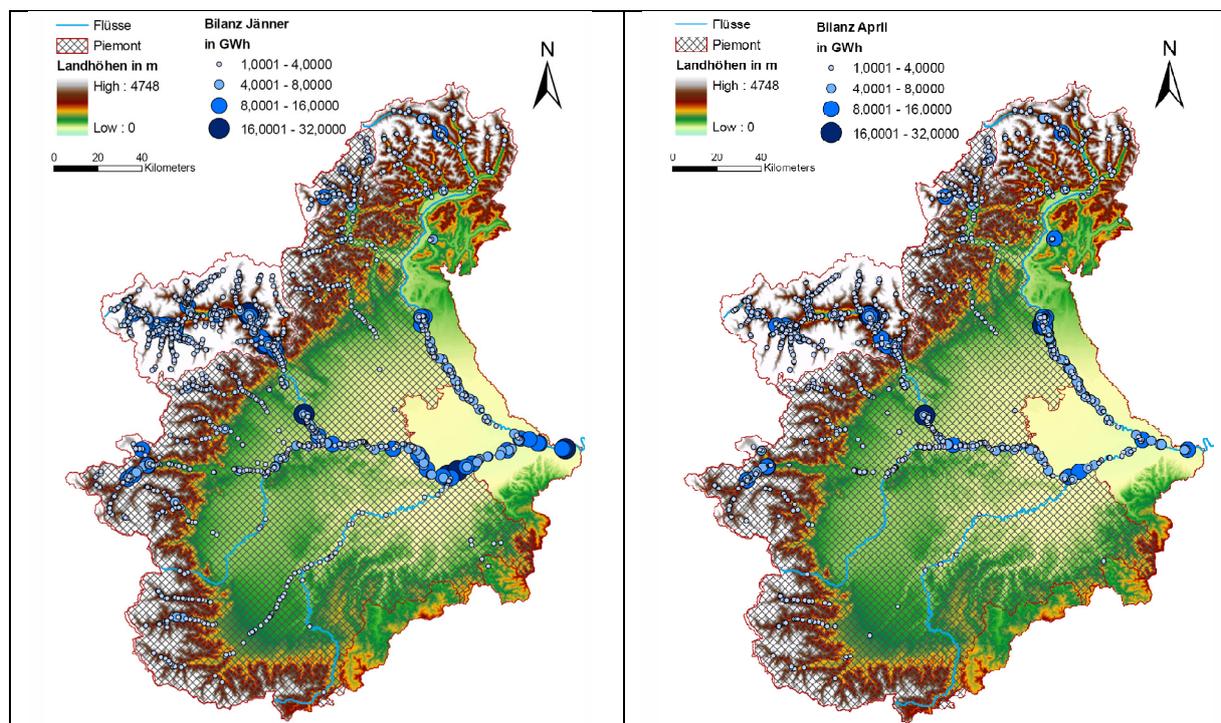


Abbildung 9: Ergebnisse der monatlichen Potenzialanalyse im Piemont für den Jänner (links) und den April (rechts) (Mayer, 2010)

Aus diesem Grund ist die Berücksichtigung des Schneespeichers, welcher sich vereinfacht ausgedrückt in eine monatliche Schneeakkumulation und eine monatliche Schneeschmelze aufteilt, für Einzugsgebiete mit einem nivalen Regimeanteil unerlässlich um zuverlässige und robuste Ergebnisse auf Monatsbasis zu berechnen. Die Verschiebung der Potenziale innerhalb des Jahres zeigt auch

Abbildung 9, in welcher das Potenzial im Jänner jenes im April übersteigt, da der im Jänner in Form von Schnee fallende Anteil des Gesamtniederschlags nicht berücksichtigt wurde.

Ergebnisse der Analyse für das Einzugsgebiet des Ebro (Spanien)

Dass die Vernachlässigung der Schneespeicherkomponente und der Schneeschmelze nicht zwingendermaßen einen derart erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse wie am Beispiel des Piemont gezeigt haben muss, zeigt die monatliche Potenzialberechnung im Einzugsgebiet des Flusses Ebro im Nordwesten Spaniens. Das komplexe Abflussregime dieses Flusses ist gekennzeichnet durch ein Winterregenregime im kantabrischen Gebirge (Dezembermaximum) und einem „iberisch“ bedingten Maximum im März verursacht durch die Schneeschmelze in den Pyrenäen (Abbildung 10). Im Vergleich dazu, zeigt der normierte monatliche Verlauf des berechneten Potenzials in Abbildung 10 im Wesentlichen den charakteristischen Verlauf des Abflussregimes im Untersuchungsgebiet. Dennoch kann eine unterjährige Verschiebung von in etwa einem Monat beobachtet werden, welche im Wesentlichen durch die Vernachlässigung von Schneespeicherung und Schneeschmelze in den Gebirgsanteilen des Ebro-Einzugsgebietes⁵ auftritt und dessen Wasserfracht sich über das gesamte Einzugsgebiet bis hin zur Mittelmeermündung in Form einer zeitlichen Vorsprung im Potenzial niederschlägt. Daher wird das Potenzial in den Monaten November bis Februar tendenziell überschätzt während ab März die durch Schneeschmelze bedingte Zunahme der Abflüsse nicht abgebildet wird.

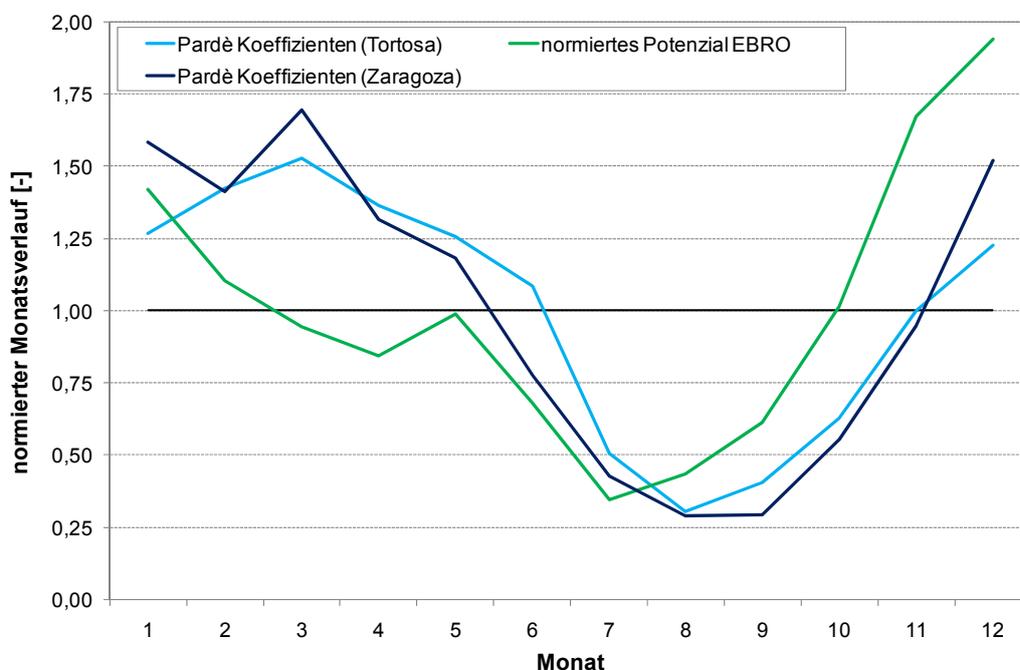


Abbildung 10: Vergleich des normierten Verlaufs des Monatspotenzials im Einzugsgebiet des Ebro mit Pardè-Koeffizienten der Messstationen Zaragoza und Tortosa (Datenquelle Abflussdaten MMA, 2010)

Zusätzlich ist das Einzugsgebiet des Ebro geprägt von der intensiven Nutzung von Speicherseen für die Bewässerung in der Landwirtschaft. Die Einflüsse dieser Speicherbewirtschaftung auf das monatliche Abflussverhalten werden im Modell ebenso nicht abgebildet.

Die Modellergebnisse der Monatsanalysen zeigen daher eine der wesentlichen Verbesserungsmöglichkeiten des Modells. Derzeit wird an einem Modellansatz gearbeitet, welcher basierend auf monatlichen Eingangsdaten für Niederschlag und Temperatur den monatlichen abflusswirksamen Niederschlag ermittelt.

⁵ Zuflüsse aus den Pyrenäen und geringe Gebietsanteile des kantabrischen Gebirgszuges.

3.3 Validierung der Modellergebnisse

Im folgenden Abschnitt wird eine Validierung der Modellergebnisse vorgenommen. Dabei werden unterschiedliche Qualitätskriterien überprüft. Ein Qualitätskriterium stellt der bereits angestellte Vergleich mit Referenzstudien von Forschungseinrichtungen und sonstigen Institutionen (Ministerien, Übertragungsnetzbetreiber) dar, welcher in Abbildung 11 nochmals dargestellt ist.

Tendenziell liefert das Modell einen höheren Wert als die jeweilige Referenzstudie. Oftmals liegt die Ursache in den Unterschieden der Modellierung wie am Beispiel der Studie von ERSE bereits in Kapitel 3.1 beschrieben. Zudem ist auch am Beispiel von Frankreich zu erkennen, dass in der Literatur durchwegs unterschiedliche Potenziale als theoretisch verfügbar ausgewiesen werden und daher das Modell für eine Abschätzung des Jahrespotenzials sowohl auf Staatenebene als auch auf regionaler Ebene (z.B. Piemont oder Einzugsgebiet Ebro) gute Ergebnisse liefert. Zudem sind die Grenzen der Einzugsgebiete nicht zwingend mit jenen des Staatsgebietes deckungsgleich, dies ist insbesondere an den Grenzen Frankreichs und Italiens hin zur Schweiz der Fall. Diese Wasserfrachten aus grenzüberschreitenden Einzugsgebieten, welche nach Italien oder Frankreich entwässern wurden im hier gezeigten Modell ebenso berücksichtigt.

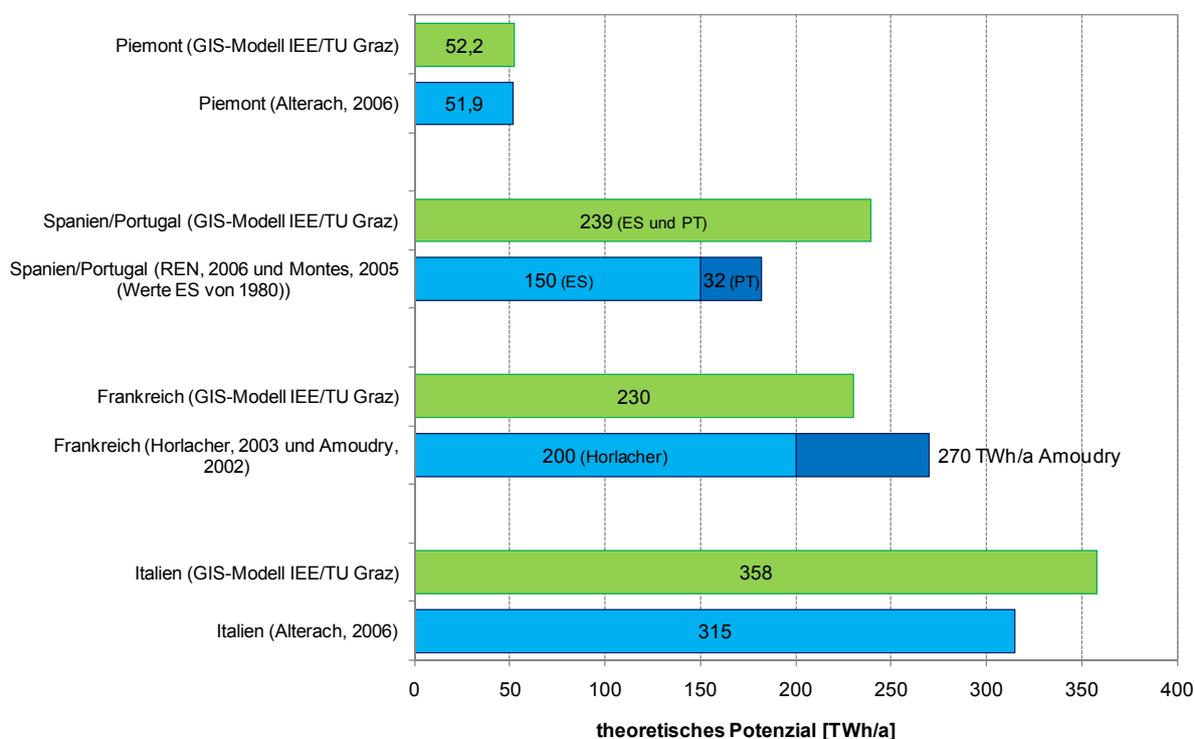


Abbildung 11: Vergleich der Ergebnisse der Jahrespotenzialanalyse mit Ergebnissen aus Referenzstudien

Ein weiteres Kriterium ist die Übereinstimmung von großen Potenzialen je Rasterzelle und bereits realisierten Kraftwerksstandorten. Dazu zeigt folgende Karte einen Vergleich zwischen Kraftwerksstandorten mit einer installierten Engpassleistung von über 20 MW und den berechneten Potenzialen über 10 GWh/a und Rasterzelle.

Wie in Abbildung 12 zu sehen, stimmen tatsächliche Kraftwerksstandorte in vielen Fällen mit Rasterzellen mit hohem modelliertem Potenzial überein. Dies ist insbesondere bei Laufwasserkraftwerken in Querbauweise der Fall. Bei Speicherkraftwerken hingegen summieren sich die Rasterpotenziale entlang der Rasterzellen, deren Fallhöhe über die Druckrohrleitung abgearbeitet wird. Der historisch gewachsene Kraftwerkspark spiegelt in logischer Konsequenz die primäre Nutzung der geeignetsten Standorte wieder, so dass es nicht verwundert, dass bereits viele Kraftwerke an den potenziell günstigsten Rasterzellen entstanden sind.

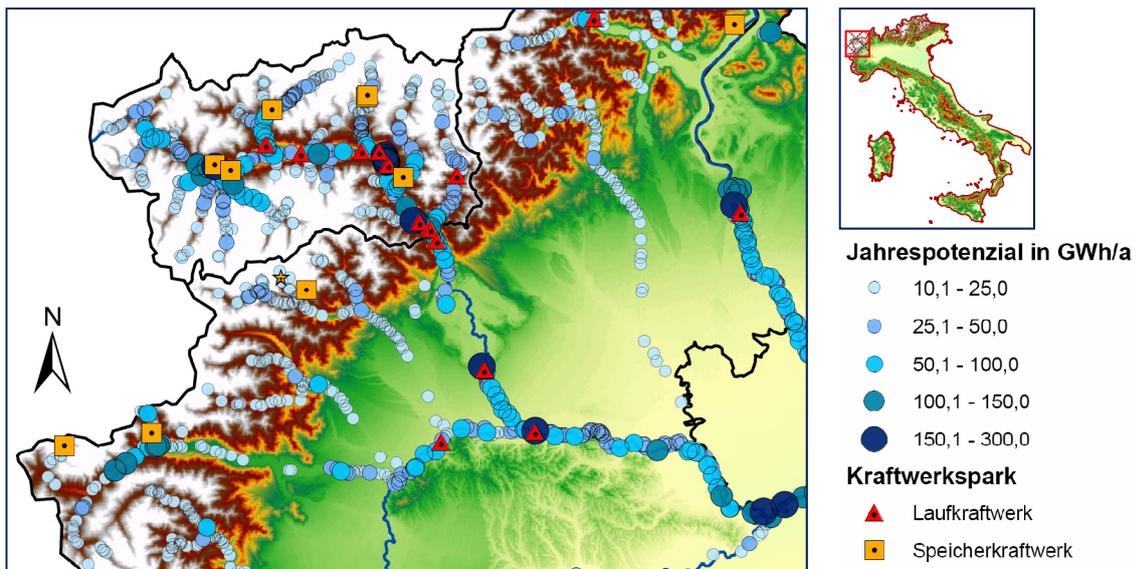


Abbildung 12: Vergleich der Modellergebnisse mit tatsächlichen Kraftwerksstandorten am Beispiel Italiens (Rasterzellen mit weniger als 10 GWh/a sind ausgeblendet) (Datenquelle Kraftwerksstandorte Gutschi et al., 2010)

Abbildung 13 zeigt einen Ausschnitt aus dem Einzugsgebiet des Ebro im Nordosten Spaniens. Dabei sind wiederum tatsächliche Kraftwerksstandort und die berechneten Potenziale je Rasterzelle dargestellt. Auch hier erkennt man eine gute Übereinstimmung mit Kraftwerksanlagen und naturräumlich bedingten (d.h. Fallhöhe und oder entsprechende Wasserfracht) Potenzialen. Insbesondere zu erwähnen gilt, dass zahlreiche Speicher in Spanien zusätzlich zur Verwendung für die Energieerzeugung zur Trinkwasserversorgung und Bewässerung für die Landwirtschaft dienen.

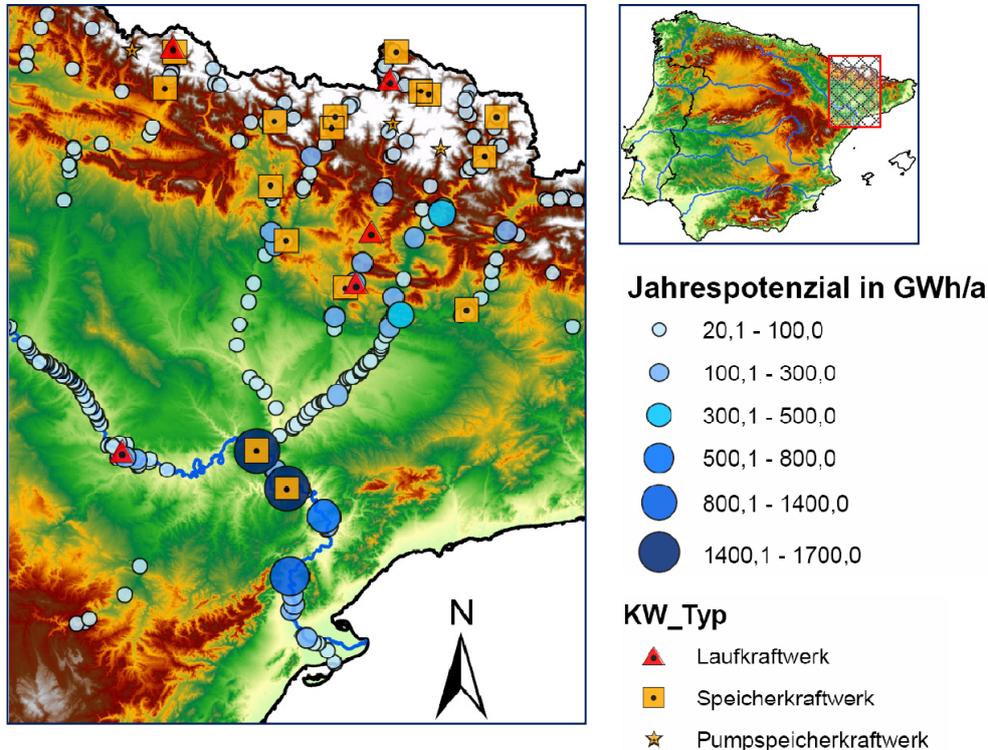


Abbildung 13: Vergleich der Modellergebnisse mit tatsächlichen Kraftwerksstandorten am Beispiel Spaniens (Rasterzellen mit weniger als 20 GWh/a sind ausgeblendet) (Datenquelle Kraftwerksstandorte Gutschi et al., 2010)

Abbildung 14 zeigt anhand des Vergleichs der Potenziale je Rasterzelle entlang des Flusses Doro Baltea in Norditalien mit dessen Höhenprofil. Dabei erkennt man, dass die großen Potenziale insbesondere im Oberlauf des Flusses (im Aostatal) hauptsächlich aufgrund verfügbarer Fallhöhen auch bei vergleichsweise geringen Durchflussmengen verfügbar sind, während Flussabwärts hin zur Po-Mündung bereits eine entsprechende Wassermenge die Höhe der Potenziale stärker beeinflusst als die dort verfügbare Fallhöhe. Damit zeigt sich eine gute Sensitivität des Modells auf die beiden wesentlichsten Einflussgrößen für die Nutzung der Wasserkraft, die Fallhöhe Δh und die Masse m .

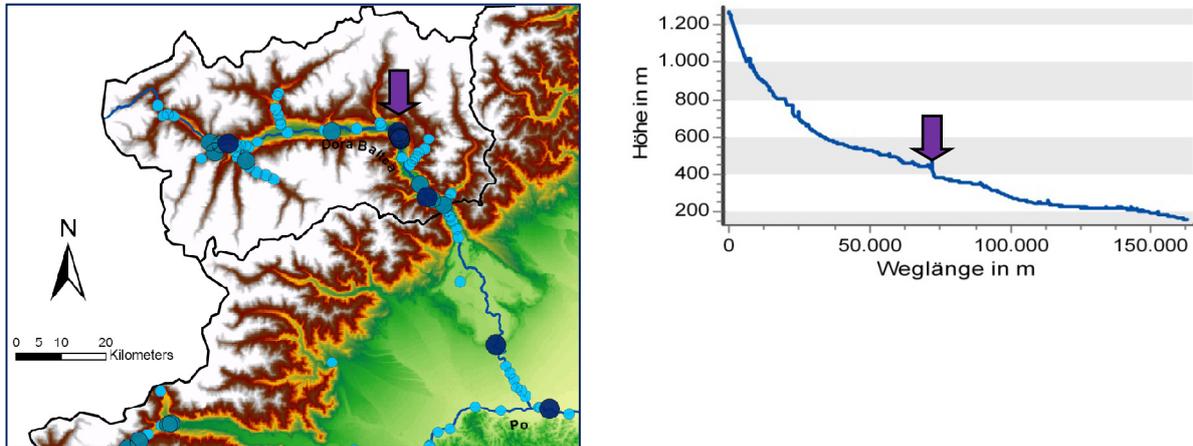


Abbildung 14: Potentiale entlang des Doro Baltea größer 50 GWh/a und Rasterzelle (links) und Höhenprofil des Doro Baltea (rechts)

Die Vorteile des Modells liegen in der übersichtlichen Grundstruktur, dem modularen Aufbau und allem voran der geringen Anzahl an notwendigen Modellinputparameter, welche zudem für die hier gezeigten Analysen frei zugänglich sind. Die räumliche Auflösung der Ergebnisse hängt dabei in erster Linie von der räumlichen Auflösung der Eingangsdaten (digitales Höhenmodell und meteorologische Daten) ab, und kann daher an die Größe des Untersuchungsgebietes angepasst werden. Nachteilig sind die hohe Sensitivität des Modells auf die Qualität der Eingangsparameter sowie der relative hohe Datenspeicherbedarf, welcher jedoch generell bei Anwendung von Geoinformationssystemen auftritt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Erreichung der nationalen Ziele hinsichtlich des Anteils erneuerbarer Energien am Gesamtenergiebedarf spielt der Elektrizitätssektor eine wesentliche Rolle. Die Nutzung der Wasserkraft zur Energieerzeugung nimmt dabei in den nationalen Energieplänen den zweiten Platz hinter der Windkraft ein. Die GIS-basierte Potenzialberechnung der Wasserkraft stellt damit eine wesentliche Planungsgrundlage für mögliche Standorte neuer Wasserkraftwerke dar.

Basierend auf der Formel der potenziellen Energie und der Wasserhaushaltsgleichung wurde ein GIS-Modell entwickelt, welches unter Anwendung weniger und zudem frei zugänglicher Eingangsparameter die Berechnung des theoretischen Potenzials pro Jahr und Rasterzelle erlaubt. Abhängig von der räumlichen Auflösung des digitalen Höhenmodells liefert das Modell das entlang tatsächlicher Flussverläufe akkumulierte Niederschlagsflächenpotenzial unter Berücksichtigung der Verdunstung. Dabei ist es insbesondere in trockenen Gebieten (z.B. Südspanien oder Süditalien) notwendig anstelle der potenziellen Verdunstung die aktuelle zu verwenden. Dazu wurde eine Näherungsmethode entwickelt, welche es erlaubt abhängig vom Breitengrad die aktuelle Verdunstung anzunähern. Der Vergleich mit verfügbaren Daten der aktuellen Evapotranspiration bestätigt diese methodische Vorgehensweise, deren Ergebnisse zudem im Vergleich mit Studien renommierter Forschungsinstitute gute Ergebnisse liefern. So zeigt sich insbesondere bei Italien mit berechneten 358 TWh/a im Vergleich zur Referenzstudie von ERSE mit 315 TWh/a ebenso wie bei Frankreich mit berechneten 230 TWh/a im Vergleich zu in der Literatur angeführten 200 bis 270 TWh/a eine gute Modellqualität. Auch für kleinere Untersuchungsgebiete wie beispielsweise der norditalienischen Region Piemont ist das Modell mit einem Ergebnis von 52,2 TWh/a im Vergleich zur ERSE-Studie (51,9 TWh/a) in der Lage die theoretischen Potenziale zu berechnen. Für Untersuchungen auf

Monatsbasis kann das Modell keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern, da die Vernachlässigung des Speichergliedes in der Wasserhaushaltsgleichung, allen voran Schneeretention und –schmelze, insbesondere in Gebieten mit einem hohen Anteil an Gebirgen aus den nival beeinflussten Abflussregimes (nival, pluvio-nival oder komplex nivalen Abflussregime) der Flüsse im untersuchten Einzugsgebiet ein rein pluviales macht. Derzeit wird an einem monatlichen Modell gearbeitet, so dass zukünftig belastbare Potenzialergebnisse auch auf monatlicher Basis berechnet werden können. Ein weiterer zukünftiger Modellentwicklungsschritt ist die Abschätzung technischer Potenziale entlang der tatsächlichen Flussverläufe unter Berücksichtigung von hydraulischen Verlusten (Fließverlusten) und dem Anlagenwirkungsgrad. Zusätzliche Reduktionsfaktoren wie Restwasservorschriften oder anderweitigen Wassernutzungen (Industrie, Landwirtschaft, Trinkwasserversorgung) sind im speziellen Untersuchungsfall gesondert zu berücksichtigen.

5 Literatur

- ALTERACH, Julio Alberto [et al.], 2006:** *Valutazione della disponibilità idrica e del potenziale di producibilità idroelettrica a scala nazionale e di bacino*, CESI Ricerca, Progetto Produzione e Fonti Energetiche.
- AMOUDRY, Par M. Jean-Paul, 2003:** *RAPPORT D'INFORMATION*. N°15 Senat Session Ordinaire 2002-2003. Annexe au procès-verbal de la séance du 9 octobre 2002. Seite 67.
- APAT, 2010:** Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici. SINTAI – Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine. Consultazione dati storici.
- BEURSKENS, HEKKENBERG, 2010:** *Renewable Energy Projections as Published in the National Renewable Energy Action Plans of the European Member States*. ECN. EEA.
- FOHRER, HÖRMANN, 2007:** *Einführung in die Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Fachabteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft Universität Kiel.
- GUTSCHI, Christoph [et al.], 2009:** *ATLANTIS – Simulationsmodell der europäischen Elektrizitätswirtschaft bis 2030*. Elektrotechnik & Informationstechnik (2009) 126/12: 438–448. DOI 10.1007/s00502-009-0703-8. Springer Verlag.
- HASLAUER, E.M., 2009:** *Entwicklung eines Modells zur Berechnung von jahreszeitlich verfügbarem Wasserkraftpotenzial unter Berücksichtigung von Verdunstung und Wasserrückhalt am Beispiel des Landes Salzburg*. Salzburg.
- HORLACHER, H.-B., 2003:** *Globale Potenziale der Wasserkraft*, TU Dresden, Dresden.
- JARVIS, A.; REUTER, H.I.; NELSON, A.; GUEVARA, E., 2008:** Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database.
- MANIAK, Ulrich, 2005:** *Hydrologie und Wasserwirtschaft [Buch]*. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag, 2005
- MAYER, Claudia, 2010:** *Potenziale erneuerbarer Stromerzeugung in Italien und Frankreich*. Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation. Technische Universität Graz.
- MMA, Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2010:** *SIA Sistema integrado de información del agua*.
- MONTES, Germán Martínez [et al.], 2004:** *An overview of renewable energy in Spain. The small hydro-power case*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 9 (2005) 521–534. doi:10.1016/j.rser.2004.05.008 ELSEVIER 2004.
- PYÖRY, 2008,** *Wasserkraftpotenzialstudie*, Studie von Pyöry Energy GmbH im Auftrag des VEÖ, Wien.
- QUASCHNING, Volker; GEYER, Michael, 2001:** *Optimale Einsatzgebiete für solarthermische Kraftwerke und Photovoltaikanlagen*. 16. Symposium Photovoltaische Solarenergie. S. 272 - 277.
- REN, S.A. , 2006:** *Potencial Hidroeléctrico nacional. Importância sócio-económica e ambiental do seu desenvolvimento*. Hidroelectricidade em Portugal – memória e desafio. Novembro de 2006.
- TRABUCCO, A. AND ZOMER, R.J. 2010.** *Global Soil Water Balance Geospatial Database*. CGIAR Consortium for Spatial Information. Published online, available from the CGIAR-CSI GeoPortal at: <http://www.cgiar-csi.org>
- WAKONIGG, Herwig, 1997:** *Versuch einer Verdunstungskarte der Steiermark auf empirischem Weg*. Institut für Geographie und Raumforschung Universität Graz.