

---

# Deutschlandweite Standortbestimmung für Wasserspeicherkraftwerke mit Methoden der Reliefanalyse

Thorsten HENS, Denise HEINISCH und Jörg GROHMANN

Björnsen Beratende Ingenieure, Koblenz · t.hens@bjoernsen.de

## Zusammenfassung

Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben ist der Ausbau der Strom- und Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen zu fördern. Die damit verbundenen Änderungen im räumlichen und zeitlichen Angebot von Energie führen zu einem erhöhten Bedarf an Speicherkapazität. Wasserspeicherkraftwerke übernehmen bereits heute als Regelungskraftwerke und Energiespeicher wichtige Funktionen im Stromverbundnetz. Eine deutschlandweite Suche nach Standorten für Wasserspeicherkraftwerke soll das vorhandene Potenzial aufzeigen und als Grundlage für konkrete Planungsmaßnahmen dienen. Für die Standortbestimmung wurden Methoden der Reliefanalyse mit klassischen Standortanalysemethoden kombiniert und Standortfaktoren für Wasserspeicherkraftwerke aus Geodaten abgeleitet. Die ermittelten, potenziellen Standorte wurden in nachgeschalteten Projekten weiter untersucht. Für eine Auswahl an Standorten wurden Raumordnungsverfahren eingeleitet.

## 1 Ausgangslage und Problemstellung

### 1.1 Grundlagen der Energiewirtschaft

Mit der Verabschiedung des Stromeinspeisungsgesetzes (1991), das vom „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien“ (Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)) im Jahr 2000 abgelöst wurde, ist die Förderung des Ausbaus von Strom- und Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen gesetzlich verankert. Die Änderungen in der Erzeugungsstruktur für elektrische Energie ergeben einen steigenden Bedarf an Speicherkapazitäten. Dabei ist die Pumpspeichertechnologie bereits wirtschaftlich verfügbar, alternative Technologie wie z. B. die Druckluftspeicher stehen noch am Anfang der Entwicklung. Aufgrund der guten Regelfähigkeit bei kürzesten Anlaufzeiten übernehmen Wasserspeicherkraftwerke mehrere Funktionen im Stromverbundnetz und bilden eine wichtige Stütze der Versorgungssicherheit (GIESECKE & MOSONYI 2005).

Zur Bestimmung der in Deutschland verfügbaren Standortpotenziale für Wasserspeicherkraftwerke hat die Trianel European Energy Trading GmbH die Björnsen Beratende Ingenieure GmbH mit einer deutschlandweiten Standortsuche für Wasserspeicherkraftwerke beauftragt.

## 1.2 Vorgehensweise

Im Rahmen einer Grundlagenbearbeitung wurden zunächst die technischen Anforderungen an Wasserspeicherkraftwerke ermittelt, bestehende Anlagen analysiert und standortbezogene Parameter und deren Größenordnungen abgeleitet.

Aus den Standortfaktoren wurden die Anforderungen an die Datengrundlage formuliert und Methoden zur Ableitung der Standortfaktoren aus den Geodaten entwickelt. Der Einsatz von GIS eignet sich dabei besonders aufgrund der Möglichkeit, Methoden der komplexen Reliefanalyse mit klassischen Standortanalyseverfahren zu kombinieren und Analyseprozesse zu automatisieren.

## 2 Standortbestimmung für Wasserspeicherkraftwerke

### 2.1 Technische und wirtschaftliche Grundlagen

Das Prinzip der Speicherkraftwerke beruht darauf, dass Wasser aus einer Tieflage (Talsperre, Unterbecken) in hochgelegene Speicherbecken gepumpt wird. Die im Oberbecken zwischengespeicherte potenzielle Energie des Wassers kann über Turbinentechnik zurückgewonnen werden. Die Leistung der Turbine ergibt sich dabei aus der verfügbaren Fallhöhe sowie dem Durchfluss, der vom verfügbaren Volumen und der täglichen Betriebszeit abhängig ist. Die spezifischen Kosten zur Herstellung der Anlage sinken mit zunehmender Größe der Anlage, wobei die Errichtung langer Druckleitungen sowie Eingriffe in stark geneigtem Gelände die Baukosten erhöhen und das Konfliktpotenzial vergrößern.

### 2.2 Standortfaktoren von Wasserspeicherkraftwerken

Aus den hydraulischen und wirtschaftlichen Grundlagen ergeben sich sechs Standortfaktoren. Die *topografische Lage* des Standorts ist durch eine Hochlage für das Oberbecken und eine Tieflage für das Unterbecken charakterisiert. Die *Höhendifferenz* zwischen Ober- und Unterbecken (Fallhöhe) sowie die am Standort *verfügbare Fläche* bestimmen, neben der baulichen Ausführung, die Leistungsfähigkeit der Anlage. Der *horizontale Abstand* zwischen Ober- und Unterbecken sowie die *Neigungsverhältnisse* wirken sich auf die Kosten der Realisierung aus, während die aktuelle *Nutzung* am Standort und in der Umgebung für die Genehmigungsfähigkeit ausschlaggebend ist.

### 2.3 Datengrundlage

Zur Analyse der topografischen Lage, der Höhendifferenzen sowie der Neigungsverhältnisse wurde auf das Digitale Höhenmodell (DHM) der Fernerkundungsdaten der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) von Februar 2000 zurückgegriffen. Die Analyse der Nutzungskonflikte wurde anhand der Siedlungs- und Verkehrsflächen des Digitalen Landschaftsmodells (DLM250) sowie den Schutzgebietsdaten des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) durchgeführt.

### 2.4 Methodik der Standortbestimmung

Die potenziellen Ober- und Unterbeckenstandorte auf Höhenrücken bzw. in Tallagen wurden mithilfe des Index der topografischen Position (*Topographischen Positions Index*

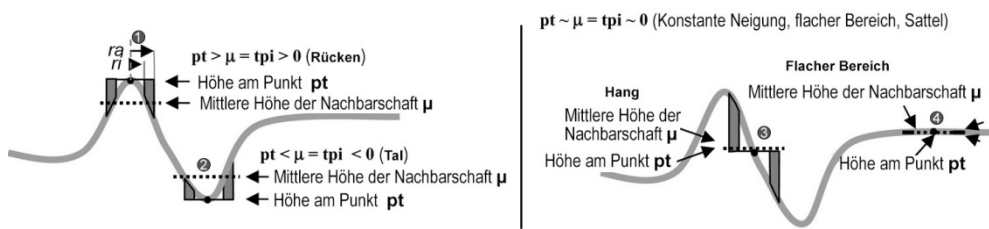
(TPI) berechnet, der von WEISS (2001) vorgestellt wurde. Der TPI vergleicht die Höhe jeder Zelle im DHM mit dem Mittelwert der Zellhöhen über eine definierte Nachbarschaft (siehe Formel 1, Nachbarschaftsform: ANNULUS). Positive TPI-Werte repräsentieren Bereiche, die höher liegen als ihre Umgebung, also Rücken (siehe Abbildung 1, 1); Zellen mit negativen TPI-Werten stellen Täler (siehe Abbildung 1, 2) dar. TPI-Werte um den Wert 0 zeigen entweder flache Bereiche (Hangneigung fast 0) (siehe Abbildung 1, 3) oder Hänge mit konstanter Neigung (Hangneigung größer 0) (siehe Abbildung 1, 4) an.

$$TPI_M = \text{int} \left( (DHM - \text{focalmean}(DHM, ANNULUS, ri, ra)) + 0,5 \right) \quad (1)$$

*M:* Maßstabsfaktor, entspricht *ra* in Meter

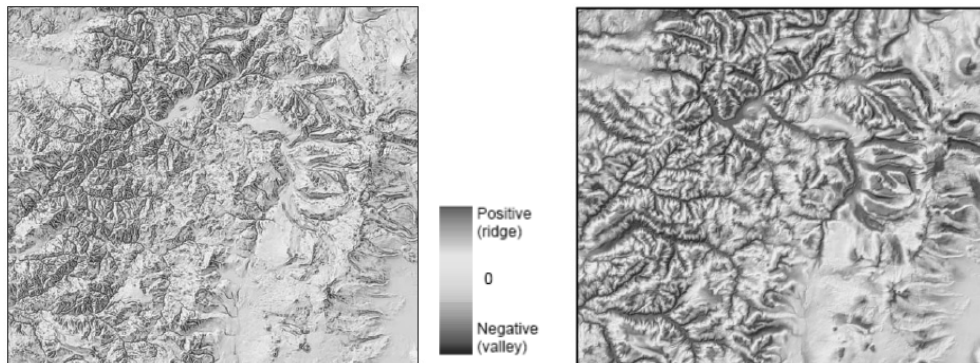
*ra:* Äußerer Radius der betrachteten Nachbarschaft (Anzahl Zellen)

*ri:* Innerer Radius der betrachteten Nachbarschaft (Anzahl Zellen)



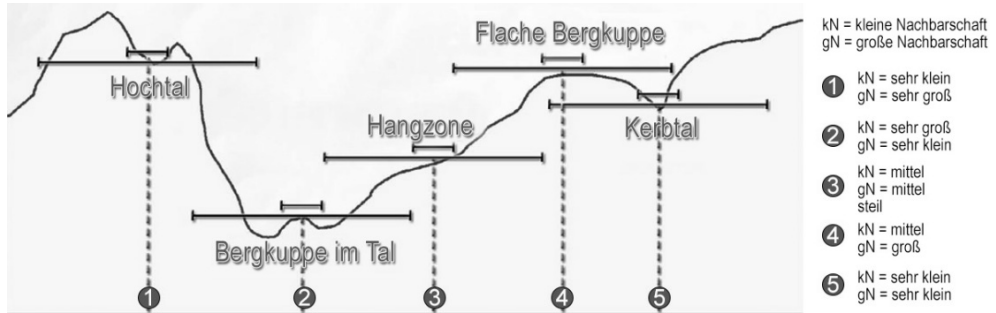
**Abb. 1:** TPI-Wertebereich (in Anlehnung an WEISS 2001)

Der Index der topografischen Position ist methodisch bedingt maßstabsabhängig, die Größe der betrachteten Nachbarschaft ist für den Detaillierungsgrad der Abbildung der Formen ausschlaggebend. Bei einem großen Maßstab werden Klein- und Kleinstreliefformen der Landschaft abgebildet, bei einem kleinen Maßstab hingegen werden die Hauptformen wie Täler und Berggücken deutlicher herausgearbeitet (siehe Abb. 2).



**Abb. 2:** TPI-Raster für einen großen ( $M = 300$  m) und kleinen Maßstab ( $M = 2000$  m), berechnet für ein DHM mit 30 m Rastergröße (WEISS 2001)

Durch die Kombination zweier TPI-Raster mit unterschiedlichen Maßstäben können Landschaftsformen nach der Methode von WEISS (2001) klassifiziert werden. Dazu werden die TPI-Raster zunächst standardisiert (Mittelwert = 0, Standardabweichung = 1) und anschließend aufgrund der standardisierten Zellwerte und der aus dem DHM berechneten Hangneigung in zehn Landschaftsformen (siehe Tabelle 1) nach dem Prinzip von Abbildung 3 klassifiziert.



**Abb. 3:** Prinzip der Klassifikation von Landschaftsformen durch Kombination von zwei TPI-Rastern unterschiedlicher Maßstäbe (in Anlehnung an JENNES 2006).

**Tabelle 1:** Kriterien zur Klassifikation der Landschaftsformen aus TPI-Rastern unterschiedlicher Maßstäbe und der Hangneigung (in Anlehnung an JENNES 2006)

| Nr. | Landschaftsform                  | Nachbarschaft  |                | Neigung        |
|-----|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|     |                                  | Klein          | Groß           |                |
| 1   | Täler, Kerbtäler                 | $TPI \leq -1$  | $TPI \leq -1$  |                |
| 2   | Flachtäler                       | $TPI \leq -1$  | $-1 < TPI < 1$ |                |
| 3   | Hochtäler, Quellgebiete          | $TPI \leq -1$  | $TPI \geq 1$   |                |
| 4   | U-Täler                          | $-1 < TPI < 1$ | $TPI \leq -1$  |                |
| 5   | Ebenen                           | $-1 < TPI < 1$ | $-1 < TPI < 1$ | $\leq 5^\circ$ |
| 6   | Hangzonen                        | $-1 < TPI < 1$ | $-1 < TPI < 1$ | $> 5^\circ$    |
| 7   | Oberhangzonen, Tafelberge        | $-1 < TPI < 1$ | $TPI \geq 1$   |                |
| 8   | Lokale Rücken, Bergkuppen im Tal | $TPI \geq 1$   | $TPI \leq -1$  |                |
| 9   | Hangrücken                       | $TPI \geq 1$   | $-1 < TPI < 1$ |                |
| 10  | Bergkuppen, Gipfel               | $TPI \geq 1$   | $TPI \geq 1$   |                |

Aus den zehn Landschaftsformen wurden die Tallagen (siehe Tabelle 1, Nr. 1 – 4) und die Toplagen (siehe Tabelle 1, Nr. 10) als potenzielle Standorte für die Ober- bzw. die Unterbecken selektiert.

Ein optimaler Standort – hinsichtlich der Standortfaktoren Höhendifferenz und horizontaler Abstand – zeichnet sich durch eine maximale Fallhöhe bei geringer horizontaler Entfernung aus. Diese Eigenschaft wurde über das relative Relief erfasst, das den Höhenunterschied zwischen dem höchsten und dem tiefsten Punkt in einem bestimmten Gebiet beschreibt. Das relative Relief wurde aus dem DHM für vier Nachbarschaftsgrößen (500 m × 500 m, 1000 m × 1000 m, 1500 m × 1500 m, und 2000 m × 2000 m) nach Formel 2 berechnet.

$$Relief_{relativ,xN,yN} = \frac{focalmax(DHM,RECTANGLE,xN,yN) - focalmin(DHM,RECTANGLE,xN,yN)}{xN \cdot yN} \quad (2)$$

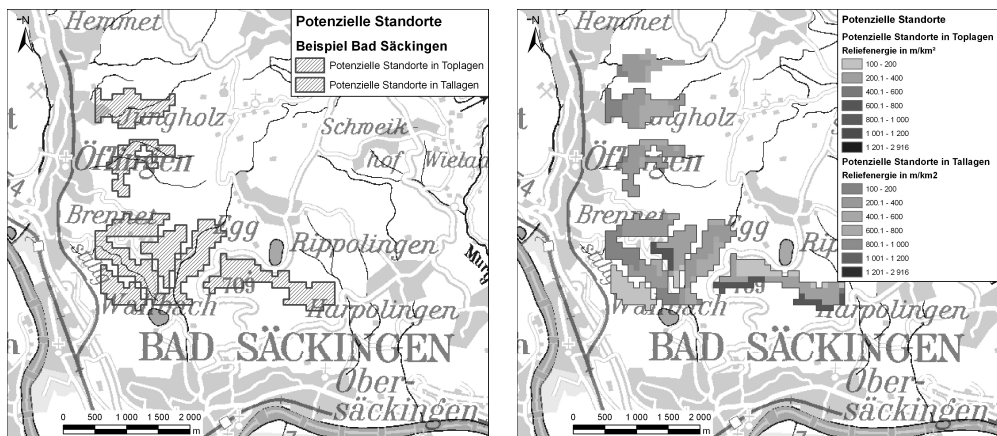
*xN, yN:* Größe der Nachbarschaft in Metern, *xN:* Breite, *yN:* Höhe

Das Maximum über die vier Raster unterschiedlicher Nachbarschaftsgrößen beschreibt das maximale relative Relief der Standorte. Standorte unterhalb eines definierten Grenzwertes des maximalen relativen Reliefs wurden eliminiert, da für diese Standorte keine wirtschaftliche Realisierbarkeit gegeben ist. Anschließend wurden die verbleibenden Standorte mit den Restriktionsflächen (gepufferte Siedlungs-, Verkehrs- und Schutzgebietsflächen) verschritten. Aus den Standorten ohne Restriktionen wurden abschließend die Standorte selektiert, die eine Mindestgröße aufweisen und bei denen eine Kombination aus Ober- und Unterbecken gegeben war.

Die Umsetzung des Standortsuchverfahrens erfolgte mit dem Programm ESRI ArcGIS und den Erweiterungen Spatial Analyst und 3D Analyst sowie der Erweiterung Topographic Position Index (TPI) (JENNESS 2006). Die automatisierten Berechnungen wurden mithilfe des ArcGIS Model Builders realisiert.

### 2.5 Ergebnisse

Als Ergebnis Berechnungen wurden zahlreiche potenzielle Standorte ermittelt. Teilweise zeichnen sich die Standorte durch die Kombinierbarkeit unterschiedlicher Ober- und Unterbecken-Varianten aus (siehe Abb. 4).



**Abb. 4:** Ergebnis des Standortscreenings, links Lage der potenziellen Oberbecken (rot) und Unterbecken (blau), rechts mit klassifiziertem relativen Relief

Über das berechnete relative Relief kann dann die optimale Kombination (größter Wert des relativen Reliefs) festgestellt werden. Ohne Berücksichtigung derartiger Varianten verbleiben 44 potenzielle Standorte für Wasserspeicherkraftwerke. Die weitere Plausibilisierung der eingestellten Parameter und der Ergebnisse erfolgte zunächst anhand von ausgewählten Testflächen, für die bereits Kenntnisse über eine Eignung vorhanden waren oder Neuanlagen in Planung sind. Bereits bestehende Wasserspeicherkraftwerke und Talsperren wurden durch den Suchalgorithmus nur bestätigt, wenn die Betrachtung der Restriktionen ausgeschaltet wurde, da oft nach Bau der Anlagen ein Schutzgebietsstatus festgelegt wurde.

Nach einer visuellen, fachlichen Prüfung und Plausibilisierung dieser Standorte wurden unter Berücksichtigung zusätzlicher Bewertungskriterien 14 Standorte für vertiefte, standortbezogene Untersuchungen ausgewählt. Ausgeschlossen wurden dabei Standorte, die aufgrund „weicher“ Kriterien für nicht realisierbar erachtet wurden, wie z. B. die unmittelbare Lage zu Siedlungszentren oder die Lage in intensiv genutzten Flächen der Bereiche Energie, Wasserwirtschaft oder Tourismus.

### 3 Fazit und Ausblick

Die deutschlandweite Standortbestimmung für Wasserspeicherkraftwerke hat gezeigt, dass in einem GIS über die kombinierte Analyse des Reliefs mit klassischen Standortanalyseverfahren potenzielle Standorte für Ober- und Unterbecken von Wasserspeicherkraftwerken ermittelt werden können. In den nachgeschalteten individuellen Untersuchungen wurden einerseits Standorte aufgrund weiterer anderer Kriterien verworfen, andererseits berechnete Standorte auch bestätigt und in nachgeordneten Projekten bis zum Raumordnungsverfahren weiter verfolgt.

Für weitere Untersuchungen können die eingestellten Parameter optimiert werden. In Abhängigkeit von den Entwicklungen der Energiepolitik sowie der Energiepreisgestaltung werden ggf. auch andere Anlagengrößen in Kombination mit Solar- oder Windparkstandorten zur Errichtung von Speicherbauwerken interessant und mithilfe der angewendeten Methodik großflächig prüfbar.

### Literatur

- BJÖRNSEN BERATENDE INGENIEURE GMBH (2011), Standortscreening für Wasserspeicherkraftwerke in Deutschland – Erläuterungsbericht. Erstellt im Auftrag der Trianel GmbH (unveröffentlicht).
- GIESECKE, J. & MOSONYI, E. (2005), Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb. 4. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 830 S.
- JENNESS, J. (2006), Topographic Position Index (TPI) v.1.3a. TPI\_Documentation.pdf. <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm> (17.04.2013).
- WEISS, A. (2001), Topographic Position and Landforms Analysis. Poster Presentation, The Nature Conservancy, ESRI International User Conference San Diego, CA. [http://www.jennessent.com/downloads/TPI-Poster-TNC\\_18x22.pdf](http://www.jennessent.com/downloads/TPI-Poster-TNC_18x22.pdf) (17.04.2013).