

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 102 (2011)

Heft: 12

Artikel: Alternative Wege zur Erhöhung der Produktion aus Wasserkraft

Autor: Molinari, Peter / Bernegger, Walter

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856873>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Alternative Wege zur Erhöhung der Produktion aus Wasserkraft

Überlegungen zu Potenzial und Kosten einer Vergrösserung von Druckstollen am Beispiel von Ova Spin – Pradella

Seit dem Beschluss, langfristig aus der Kernenergie auszusteigen, verschob sich das Gewicht in der Energiepolitik hin zu Effizienzsteigerung und erneuerbaren Energien. Der Artikel zeigt, dass Effizienzpotenzial nicht nur auf der Verbraucherseite, sondern auch auf der Produktionsseite und beim Einsatz der finanziellen Mittel besteht und dass bei der Nutzung dieses Potenzials die wichtigste aller erneuerbaren Energien, die Wasserkraft, ohne ökologische Nachteile ausgebaut werden kann.

Peter Molinari, Walter Bernegger

2007 hat der Bundesrat aufgrund der «Energieperspektiven 2035» entschieden, die Schweizer Energiestrategie auf die vier Säulen Energieeffizienz, erneuerbare Energien, Grosskraftwerke und aktive Energieaussenpolitik abzustützen.

In Art. 1 des Energiegesetzes (EnG) wurden in den Absätzen 3 – 5 betreffend der ersten beiden Säulen der Energiestrategie verbindliche Ziele festgelegt und in Art. 7 die Instrumente bereitgestellt, die zur Erreichung dieser Ziele beitragen sollten.

So soll die durchschnittliche Jahreserzeugung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Stand im Jahr 2000 um mindestens 5400 GWh und diejenige von Elektrizität aus Wasserkraftwerken im gleichen Zeitraum um mindestens 2000 GWh erhöht werden. Vor allem das Ausbauziel für die Produktion aus Wasserkraft wurde von offizieller Stelle als ambitioniert erkannt[1] und gibt nach wie vor Anlass zu Diskussionen. Dabei geht es vor allem um die Einschätzung des realistischen Zubaupotenzials und um die zu erwartenden Produktionseinbußen als Folge der Umsetzung des Gewässerschutzgesetzes (GSchG).

Zu den aufgrund von Art. 7 EnG institutionalisierten Instrumenten gehört die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV), mit welcher seit 2009 Produktionsanlagen aus Wasserkraft, Fotovoltaik,

Windenergie, Geothermie und Biomasse subventioniert werden.

Aufgrund der enormen Nachfrage nach diesen Subventionen, des rasanten Anstiegs der Anzahl Anlagen sowie der Produktion aus KEV-Anlagen (505 GWh im 2010 oder knapp 0,8% der gesamten inländischen Stromproduktion[2]) wird die KEV allgemein als Erfolgsgeschichte bezeichnet.

Das Ziel im Bereich «Energieeffizienz» ist gemäss Art. 1 Abs. 5 EnG auf eine Stabilisierung des Energieverbrauchs in privaten Haushalten bis zum Jahr 2030 auf dem Niveau 2009 oder tiefer festgelegt. In weiteren Artikeln (Art. 3, Art. 8, Art. 10 ff.) sind die Grundsätze für eine sparsame und rationelle Energienutzung, die anlage- und gerätespezifischen Massnahmen sowie die Fördermittel festgelegt. Was dabei auffällt, ist die Tatsache, dass die Stossrichtung im Bereich Energieeffizienz oder Effizienz allgemein ausschliesslich auf die Verbraucherseite zielt.

Als Folge der Havarie im Kernkraftwerk von Fukushima im März 2011 hat sich der Bundesrat für einen schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie, ohne Ersatz der bestehenden Kernkraftwerke am Ende ihrer sicherheitstechnischen Betriebsdauer, entschieden. Dabei will der Bundesrat die bisherige Stromversorgungssicherheit, die sich durch die Attribute hohe Qualität, gute Verfügbarkeit, weitgehend CO₂-freie Produktion und

wettbewerbsfähige Preise auszeichnet, auch in Zukunft garantieren.[3]

Neue Ausbauziele bei der Wasserkraft

Im Nachgang zu diesem Entscheid und weil bei dieser Versorgungsvariante der Wasserkraft eine zentrale Bedeutung zukommt und sie entsprechend weiter ausgebaut werden soll, wurde auch das Ausbaupotenzial der Wasserkraftnutzung «unter neuen Rahmenbedingungen» vom Bundesamt für Energie (BFE) neu abgeschätzt.[4] Dabei kommt nun das BFE unter Berücksichtigung einer Minderproduktion infolge «moderater» Umsetzung der Restwasserbestimmungen von 700 GWh und von 2000 GWh infolge Klimaerwärmung auf ein Ausbaupotenzial von 4000 GWh. Mit anderen Worten, das BFE stellt ein Brutto-Potenzial an zusätzlicher Produktion aus Wasserkraft von 6700 GWh fest! Dies soll mit 1900 GWh durch neue Kleinwasserkraftwerke und der Rest zu gleichen Teilen durch Ausrüstungsersatz, Erneuerungen und ähnlichem sowie durch Neubauten von Grosswasserkraftwerken erreicht werden.

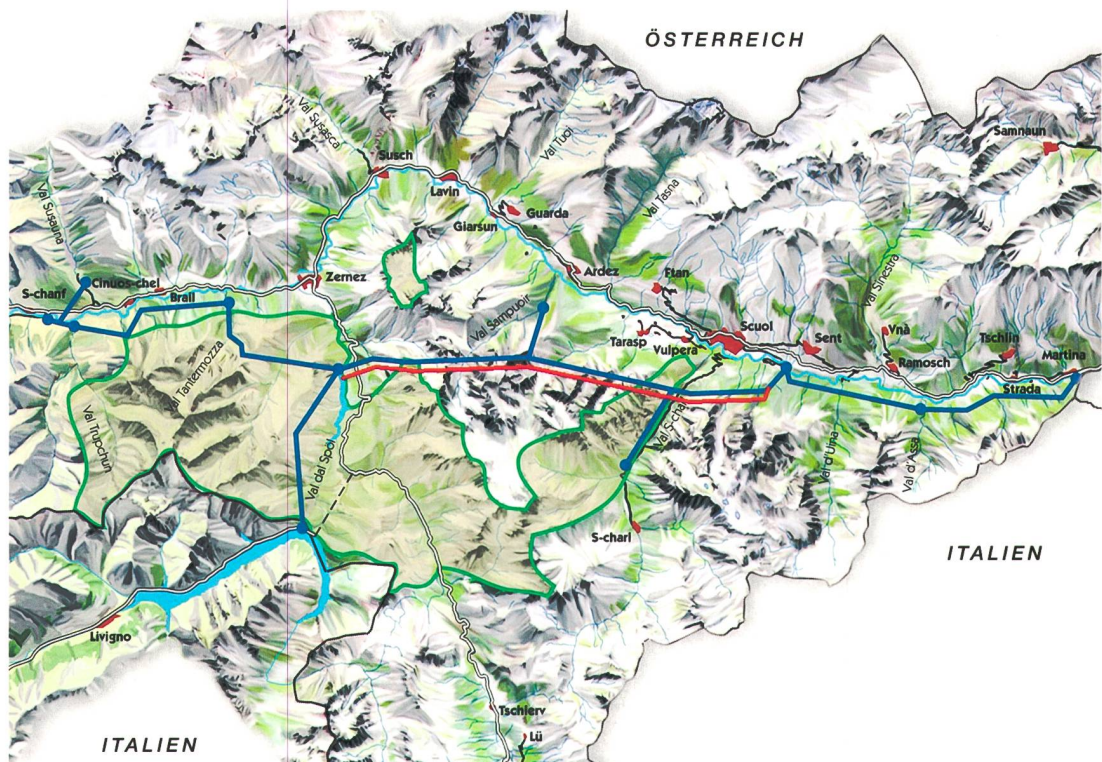
Eine nüchterne Betrachtung dieser Abschätzung lässt sehr schnell erkennen, dass – wenn die im Art. 1 EnG definierten Ausbauziele der Wasserkraft (2000 GWh) offiziell als ambitioniert bezeichnet wurden – diese Schätzung des Ausbaupotenzials der vielbemühten Quadratur des Kreises entspricht.

Ebenso schnell klar wird, dass diese Schätzungen nur umgesetzt werden können, wenn der Fokus von der verbraucherseitigen Effizienzsteigerung auf den effizienten Einsatz der Mittel (KEV) und auf Effizienzsteigerungen bei der Produktion erweitert wird. Wie dies möglich wäre, soll in der Folge am Beispiel der Engadiner Kraftwerke AG (EKW) illustriert werden.

Die Anlagen der Engadiner Kraftwerke

Die Anlagen der EKW wurden zum grössten Teil während der 1960er-Jahre erstellt und 1970 in Betrieb genommen.

Bild 1 Geographische Übersicht über die Anlagen der EKW mit systematischer Darstellung einer Verdoppelung des Druckstollens Ova Spin – Pradella (rot).



Die vorläufig letzte Ausbaustufe von Pradella, bei Scuol nach Martina, wurde 1994 in Betrieb genommen. EKW produziert durchschnittlich zirka. 1350 GWh jährlich an sauberer, erneuerbarer Energie aus Wasserkraft, mehr als doppelt so viel als die Produktion der KEV-Anlagen im Jahr 2010. Damit gehört EKW zu den fünf grössten Produzenten von Strom aus Wasserkraft in der Schweiz. [5]

Arten von Stollen

Entsprechend der Topographie des Engadins (langgestrecktes Tal mit relativ geringem Gefälle), sind lange Stollen notwendig, um das Wasser des Inns effizient und in grossen Kraftwerken nutzen zu können. Bei solchen Aus- und Überleitungen stehen grundsätzlich drei Möglichkeiten zur Wahl: Hangkanäle, Freispiegelstollen, Druckstollen.

Hangkanäle haben den Nachteil, dass sie der Oberfläche folgen und je nach Topographie dadurch sehr lang werden. In Freispiegelstollen fliesst das Wasser, wie der Name sagt, mit freiem Wasserspiegel, ähnlich einem offenen Kanal. Mit Freispiegelstollen kann der Nachteil der Länge vermieden werden, hingegen bedürfen Freispiegelstollen im Verhältnis zum zu transportierenden Wasservolumen eines relativ grossen Querschnitts. Dieser lässt sich allerdings mit einem grösseren Gefälle wieder etwas reduzieren.

Die EKW verfügt mit dem ca. 15,1 km langen Überleitstollen von der Wasserfassung S-charf zum Ausgleichsbecken Ova Spin über einen solchen Freispiegelstollen. Der Optimierungsprozess zwischen Gefälle und Querschnitt hat damals offenbar ergeben, dass der Stollen mit einem durchschnittlichen Gefälle von ca. 1,3‰ (ca. 20 m Gefälle) gebaut wurde.

Mit Druckstollen, in denen das Wasser, wie der Name sagt, wie in einem Rohr unter einem leichten Druck fliesst, lassen sich die durchschnittlichen Gefälle auf ca. 0,5 bis maximal 1‰ reduzieren. Reibungsverluste entstehen jedoch auch hier.

Reibungsverluste und Stollengrösse

Nach physikalischen Gesetzmässigkeiten sind die Reibungsverluste eine Funktion der ins Quadrat gesetzten Fliessgeschwindigkeit. Es gilt somit $R = f(v^2)$ wobei R für die Reibungsverluste (in Metern) und v für die Fliessgeschwindigkeit steht.

Die Kontinuitätsgleichung $Q = v \cdot A$, worin Q die Wassermenge in m^3/s und A die Querschnittsfläche in m^2 (bei einem kreisrunden Stollen: $A = \pi \cdot r^2$) bezeichnet, besagt, dass die Fliessgeschwindigkeit v bei konstanter Wassermenge ihrerseits umgekehrt proportional von der Querschnittsfläche abhängt ($v = Q / A$).

Dies bedeutet, dass sich beispielsweise bei einer doppelten Querschnittsfläche die Fliessgeschwindigkeit halbiert und die Reibungsverluste sich somit vierteln.

Aufgrund dieser Erkenntnis stellt sich die praktische Frage, weshalb dann die wasserführenden Druckstollen nicht immer auf einen maximalen Durchmesser dimensioniert wurden, um die Reibungsverluste möglichst gering zu halten. Dieser Optimierungsprozess wurde und wird sehr wohl bei der Dimensionierung von Druckstollen angewendet. Die Reibungsverluste, welche sich direkt auf die Jahresproduktion auswirken, sind dabei aber nicht die einzige Variable. Wenn die Reibungsverluste mit zunehmendem Stollendurchmesser abnehmen, so nehmen gleichzeitig die Erstellungskosten für den Stollen zu.

Die Optimierung erfolgt also zwischen minimalen Reibungsverlusten bei minimalen Erstellungskosten. Im Falle des rund 20,3 km langen Druckstollens zwischen dem Ausgleichsbecken Ova Spin und dem Wasserschloss oberhalb der Kraftwerkszentrale Pradella führten diese Berechnungen offenbar zu einem Ausbruchdurchmesser von 5,9 m.

Finanzielle Kalkulation einer Stollenvergrösserung

Diese Betrachtungen führten zu der folgenden, summarischen Abschätzung, welche Kosten eine theoretische Verdop-

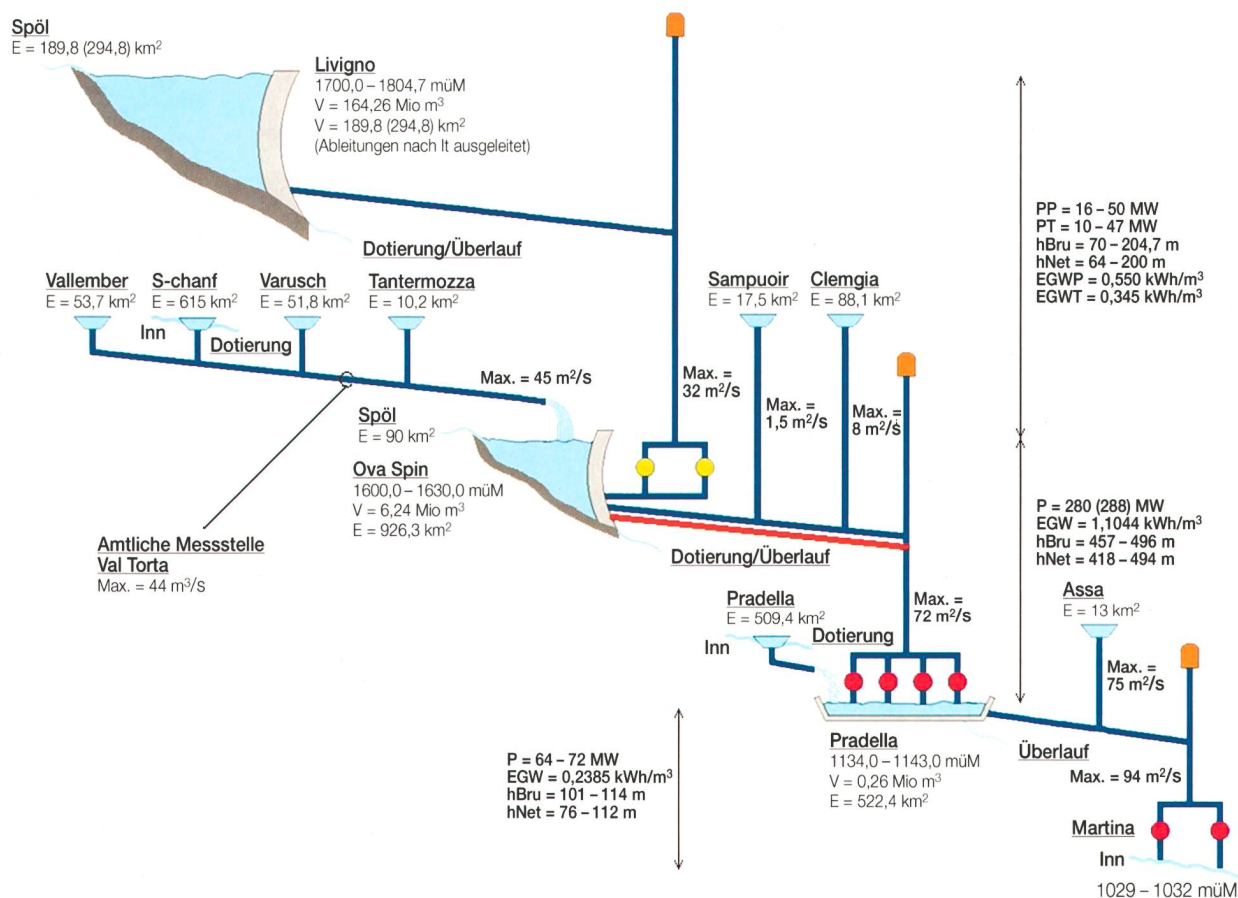


Bild 2 Hydraulikschema der EKW mit systematisch eingezeichneter Verdoppelung des Druckstollens Ova Spin – Pradella.

pelung des Druckstollens von Ova Spin nach Pradella verursachen und welche Mehrproduktion infolge der dadurch um den Faktor vier reduzierten Reibungsverluste daraus resultieren würde.

Aufgrund von aktuellen Projekten in der Schweiz und in Österreich wird mit rund 11 000 CHF pro Laufmeter Stollen mit einem Durchmesser 5,9 m relativ grosszügig gerechnet. Auf einen 20,3 km langen Parallelstollen ergäbe dies Investitionen in der Höhe von rund 225 Mio. CHF.

Die Kraftwerkszentrale Pradella ist mit einer Ultraschall-Durchflussmessung zur Messung der turbinierten Wassermenge ausgerüstet. Im Weiteren sind im Leitsystem der Leitstelle in Pradella sämtliche für eine Abschätzung der Mehrproduktion notwendigen Messwerte, wie Generatorenleistung und Seeniveaus im Ausgleichsbecken Ova Spin (oberwasserseitig) und Pradella (unterwasserseitig) im Minutenintervall ausgelagert. Aus diesen Minutenwerten wurden für ein Geschäftsjahr Viertelstunden-Mittelwerte gebildet. Aus diesen Mittelwerten und

den für die Wirkungsgradmessungen bestimmten Reibungsfaktoren der Druckstollen lassen sich die aktuellen Reibungsverluste für jede Viertelstunde sehr genau bestimmen. Da sich bei einer Verdoppelung des Druckstollens die Reibungsverluste wie gezeigt, um den Faktor 4 reduzieren, lässt sich über das Bruttogefälle und die aktuelle, viertelstündliche Produktion die durchschnittliche Mehrproduktion pro Viertelstunde bestimmen. Die so durch Summierung der Viertelstunden-Mittelwerte erhaltene Mehrproduktion für das gewählte Geschäftsjahr wurde in der Folge noch auf ein Mitteljahr umgerechnet. Daraus resultierte eine jährliche Mehrproduktion von durchschnittlich 32 GWh.

Nun ist diese Mehrproduktion natürlich nicht umsonst zu haben. Schreibt man die Investition bei einem durchschnittlichen Kapitalzins von 5% über 80 Jahre ab und vernachlässigt man Instandhaltungskosten am Stollen, resultieren jährliche Aufwendungen im Durchschnitt der 80 Jahre von rund 8,5 Mio. CHF oder Produktionskosten von rund 27 Rp./

kWh bezogen auf die Mehrproduktion von 32 GWh.

Vergleich mit Fotovoltaik

Bei Neuinvestitionen in grosse Wasserkraftwerke bilden heute Produktionskosten von ca. 12 Rp./kWh die «Schmerzgrenze» für die Investoren. Wollte man also dieses auf der Hand liegende Potenzial nutzen, müsste eine Möglichkeit für die Finanzierung der Mehrkosten von rund 15 Rp./kWh gefunden werden.

Hierzu ein paar Überlegungen zur Effizienz der eingesetzten KEV-Abgaben:

- Für die Produktion von 32 GWh im Jahr mit Fotovoltaik bedürfte es einer Fläche von rund 17 ha Solarpanels. Dies entspricht einer Fläche von rund 27 Fussballfeldern.
- Die über KEV finanzierten Fotovoltaik-Anlagen wurden im Jahre 2010 mit durchschnittlich 61 Rp./kWh subventioniert. [6] Dies wäre rund 4 Mal mehr als die geschätzte notwendige Mehrkostenfinanzierung für ein Projekt zur Verdoppelung des Druckstollens Ova Spin - Pradella. Selbst wenn man berücksichtigt,

dass die Subventionen für neuinstallierte Anlagen laufend sinken, ist eine Mehrkostenfinanzierung für Projekte zur Verdoppelung von Druckstollen bei Wasserkraftwerken, wie das Beispiel EKW zeigt, um Faktoren günstiger als die Förderung von neuen Fotovoltaik-Installationen.

■ Eine Gegenüberstellung der Anzahl KEV-Anlagen, die Ende 2010 in Betrieb waren, mit ihrer Jahresproduktion nach Technologie zeigt, dass 1609 Fotovoltaik-Anlagen jährlich 24 GWh produzieren. Demgegenüber produzieren 196 KEV-finanzierte Wasserkraftanlagen jährlich 342,2 GWh (Bild 3). [7]

Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Überlegungen und Abschätzungen zeigen ein enormes Effizienzsteigerungspotenzial bei der Wasserkraftproduktion auf. Allein bei EKW liesse sich dasselbe Prinzip auch auf den Druckstollen zwischen Pradella und der Zentrale Martina anwenden. Eine Verdoppelung dieses 14,3 km langen Stollens würde im Mitteljahr eine Mehrproduktion von ca. 25 GWh ergeben.

Davon ausgehend, dass bei den 10 grössten Wasserkraftwerken in der Schweiz eine Verdoppelung von Druckstollen möglich wäre – mit Mehrproduktionen in ähnlicher Grössenordnung – liessen sich dadurch allein rund 300 GWh pro Jahr zusätzlich generieren. Dies ohne Nutzung auch nur eines Trop-

fens zusätzlichen Wassers aus den genutzten Flüssen und ohne merkliche Auswirkungen auf die Umwelt. Einzig das anfallende Ausbruchmaterial müsste umweltschonend deponiert werden.

Die hier dargelegten Gedanken sollen als Denkanstoss dienen und müssten gewiss noch verifiziert werden. Eine solche Verifikation übersteigt die Kapazität eines dem Tagesgeschäft verpflichteten Kraftwerkdirektors. Der mit der neuen Energiestrategie erfolgte Paradigmen-

wechsel in der Schweizer Energiepolitik erfordert jedoch Massnahmen, die über die Effizienzsteigerung auf der Verbraucherseite hinausgehen. Insbesondere wäre es an der Zeit, auch die Effizienz der eingesetzten Ressourcen (KEV) zu überprüfen. Das gesteckte Ziel einer eigenständigen Stromproduktion ohne Kernkraftwerke kann nur mit mutigen Würfen und maximaler Effizienz aller eingesetzten Mittel erreicht werden.

Referenzen

- [1] Botschaft zur Änderung des Elektrizitätsgesetzes und zum Stromversorgungsgesetz vom 3. Dezember 2004 (04.083)
- [2] Geschäftsbericht 2010 der Stiftung Kostendeckende Einspeisevergütung und Elektrizitätsstatistik Schweiz, publiziert vom BFE.
- [3] Mitteilung des UVEK vom 25. Mai 2011: «Bundesrat beschliesst im Rahmen der neuen Energiestrategie schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie».
- [4] Faktenblatt des BFE vom 10. Juni 2011: Energieperspektiven 2050 «Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung unter neuen Rahmenbedingungen».
- [5] Homepage der Engadiner Kraftwerke AG: www.engadin-strom.ch.
- [6] Geschäftsbericht 2010 der Stiftung Kostendeckende Einspeisevergütung, S. 5.
- [7] Geschäftsbericht 2010 der Stiftung Kostendeckende Einspeisevergütung, S. 6.

Angaben zum Autor

Peter Molinari ist Direktor der Engadiner Kraftwerke AG.

Engadiner Kraftwerke AG, 7530 Zernez
p.molinari@engadin-strom.ch

Walter Bernegger ist Leiter des Bereichs «Werke Steuerung» bei den Engadiner Kraftwerken AG.
w.bernegger@engadin-strom.ch

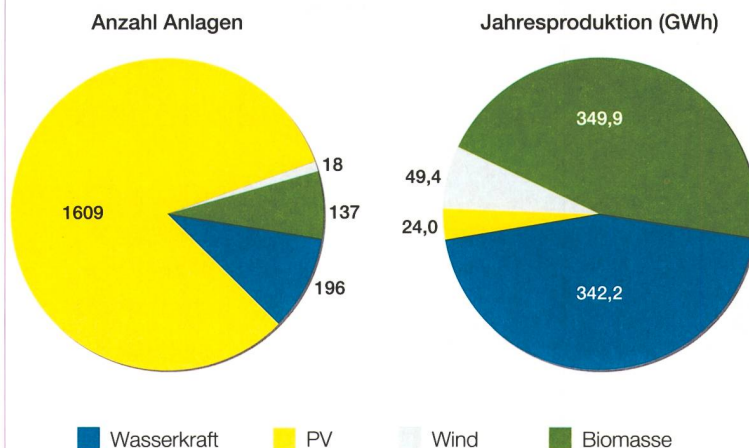


Bild 3 Gegenüberstellung der Anzahl KEV-Anlagen nach Technologie geordnet mit der entsprechenden Jahresproduktion.

Résumé

Alternatives pour augmenter la production des centrales hydrauliques

Réflexions sur le potentiel et les coûts d'un agrandissement des conduites forcées sur l'exemple d'Ova Spin – Pradella

Les pertes dues au frottement dans les conduites forcées des centrales hydrauliques sont en relation avec la vitesse d'écoulement au carré. La vitesse d'écoulement dépend quant à elle de la surface de la section transversale de la conduite forcée. Une section deux fois plus grande réduit de moitié la vitesse d'écoulement et de quatre fois les pertes dues au frottement. Cependant, plus le diamètre de la conduite est grand, plus les coûts de fabrication sont élevés. Les coûts et la production supplémentaire d'énergie d'une conduite parallèle avec le même diamètre que la conduite existante ont été évalués sur l'exemple de la conduite forcée des centrales d'Engadine, du bassin de compensation d'Ova Spin à la centrale de Pradella. Les coûts par kWh supplémentaire s'élèveraient à 29 ct. Ce résultat est en dessous des coûts de production intéressants pour les investisseurs qui sont de 12 ct/kWh au maximum. Les contributions nécessaires par kWh seraient toutefois inférieures aux subventions pour les installations photovoltaïques.

Même si les calculs doivent encore être vérifiés, ils montrent qu'en matière d'efficacité, un changement de paradigme en politique énergétique n'implique pas seulement des mesures de la part des consommateurs et que l'affectation des fonds pour la rétribution à prix coûtant du courant injecté devrait être revue.

Mn

Anzeige

Die Beiträge dieser Ausgabe finden Sie neu auch unter www.bulletin-online.ch