Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

PROGRAMM KLEINWASSERKRAFTWERKE

Potenzialanalyse Kleinwasserkraftwerke - Vorstudie zu Kraftwerken an Fliessgewässern

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Dr. Martin Baur, econcept AG

Reto Dettli, econcept AG

Prof. Dr. Rolf Weingartner, GIUB

Daniel Viviroli, GIUB

Pascal Imhof, GIUB

Monika Fässler, GIUB

Hubert Gerhardinger, GIUB

econcept

Lavaterstrasse 66
8002 Zürich

Tel. 01 286 75 75 Fax. 01 286 75 76
econcept@econcept.ch

UNIVERSITÄT BERN

Geographisches Institut
Gruppe für Hydrologie

Hallerstrasse 12
3012 Bern

Tel. 031 631 88 74 Fax. 031 631 80 15
wein@giub.unibe.ch

Programm Kleinwasserkraftwerke
www.kleinwasserkraft.ch

Impressum

Datum: 7.6.2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen
Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00
www.bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter: bruno.guggisberg@bfe.admin.ch

Projektnummer: 101480

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhalt

Zusammenfassung ..... **i**

1 Einleitung **1**

1.1 Stand der Wasserkraftnutzung in der Schweiz 1

1.2 Auftrag und Ziele 1

2 Potenzialanalyse Bottom-up **3**

2.1 Einleitung 3

2.2 Bestehende Studien zu Ausbaupotenzialen von Kleinwasserkraftwerken 4

2.3 Datenlage zur Ermittlung der Potenziale in Kleinwasserkraftwerken 7
2.3.1 Kraftwerke grösser als 300 kW 7
2.3.2 Kraftwerke kleiner als 300 kW sowie Dotierkraftwerke 8

2.4 Kantonale Fallstudien 9
2.4.1 Fallstudie Kanton St. Gallen 9
2.4.2 Fallstudie Kanton Zürich 10
2.4.3 Kurzabklärungen in ausgewählten weiteren Kantonen und weitere mögliche Datenquellen 13

2.5 Fazit 15
2.5.1 Kleinwasserkraftwerke < 300 kW 15
2.5.2 Spezialfall Dotierkraftwerke 15

2.6 Empfehlungen aus der Bottom-up Analyse 16

3 Potenzialanalyse Top - down **19**

3.1 Problemstellung 19

3.2 Abschätzung Abfluss 22
3.2.1 Vorgehensweise und Resultate 22
3.2.2 Folgerungen 28

3.3 Analyse des Gerinnegefälles 29
3.3.1 Vorgehensweise und Resultate 29

3.3.2 Folgerungen 33
3.3.3 Gefälleanalyse auf der Basis des virtuellen Gewässernetzes im Testgebiet der Töss 35

3.4 Ableitung des Einzugsgebietes 36
3.4.1 Vorgehensweise und Resultate 37
3.4.2 Folgerungen 39

3.5 Erstellen der Potenzialkarte 41

3.6 Schlussfolgerungen zur Top-down-Analyse 43

4 Schlussfolgerungen 45

5 Vorschlag für das weitere Vorgehen 47

Anhang 49

Literatur 55

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Vorstudie ist die Entwicklung eines Konzepts für eine möglichst genaue Abschätzung des vorhandenen technischen Potenzials für Kleinwasserkraftwerke in der ganzen Schweiz. Dazu wurden zwei unterschiedliche Ansätze verwendet:

- Eine Bottom-up Analyse der Firma **e c o** n c e p t AG.
- Eine Top-down Analyse des Geographischen Instituts der Uni Bern (Gruppe für Hydrologie).

Im Rahmen der Bottom-up Analyse wurden die beiden Kantone Zürich und St. Gallen sowie im Speziellen die Einzugsgebiete der Thur und der Töss untersucht. Die Top-down Analyse beschränkt sich aus Gründen des Aufwands auf die Töss.

In der Bottom-up Analyse wurden die kantonalen Wasserrechtsregister und Sanierungsberichte Restwasser ausgewertet. Die beiden kantonalen Fallstudien für Zürich und St.Gallen haben gezeigt, dass die vorhandenen Unterlagen und Daten für eine Potenzialschätzung ausreichend sind und mit begrenztem Aufwand beschafft und ausgewertet werden können. Durch die in diesen Unterlagen identifizierten stillgelegten KWKW konnte eine Schätzung über das technische Potenzial an den entsprechenden Gewässern gemacht werden. Für die Töss konnte so ein technisches Potenzial von 470 kW ermittelt werden. Durch die in den Sanierungsberichten teilweise vorhandenen Angaben über die Wahrscheinlichkeit der Wiederinbetriebnahme gewisser stillgelegter Kraftwerke können auch Aussagen über die Realisierbarkeit dieser ermittelten Potenziale angestellt werden, wobei für die Töss lediglich ca. 100 kW dieser 470 kW als wirtschaftlich realistisches Potenzial charakterisiert werden können.

Auch bestehende Dotierkraftwerke sind in den Sanierungsberichten identifiziert, das Potenzial für neue Dotierkraftwerke lässt sich mit den Angaben der Sanierungsberichte abschätzen und zwar durch die Betrachtung von Kraftwerken ab einer bestimmten Grösse, deren Restwassermengen erhöht wurden. Dadurch können die für ein Dotierkraftwerk möglichen Standorte eruiert und in einer gezielten Erhebung ermittelt werden.

Da sich die Datenlage in den Kantonen unterscheidet, lassen sich voraussichtlich nicht für alle Kantone die Aussagen in der selben Detailtreue machen. Grundsätzlich empfiehlt sich je nach Datenlage ein kantonsspezifisches Vorgehen.

In der Top-down Analyse wurde durch die Gruppe für Hydrologie der Universität Bern untersucht, wie das KWKW-Potenzial eines beliebigen Gewässerabschnit-

tes ermittelt werden kann. Um die Nutzungsmöglichkeiten für KWKW innerhalb der Töss abzuschätzen, wurden durch GIS-gestützte Gelände- und Gerinneanalysen sowie durch hydrologische Modellierungen Potenzialkarten für bestimmte Einzugsgebiete erstellt.

Letztere stellen das Leistungspotenzial für jeden Gewässerabschnitt dar. Das dadurch ermittelte maximale Gesamtpotenzial im Testgebiet der Töss beträgt insgesamt 27'000 kW. Dabei handelt es sich um ein in der Praxis nicht erreichbares Gesamtpotenzial, das nur zustande käme, falls absolut jeder Gewässerabschnitt der Töss für die Wasserkraft genutzt würde. Auf der Grundlage der Potenzialkarten lassen sich aber beispielsweise auch jene Gewässerabschnitte herausfiltern, welche die höchsten Leistungspotenziale innerhalb des betrachteten Einzugsgebietes aufweisen, welche also für eine zukünftige Nutzung am Erfolg versprechendsten sind.

Durch die gute hydrologische Datenlage in der Schweiz sind bei der Top-down Analyse in der Regel gute bis sehr gute Ergebnisse zu erwarten, wobei sich allerdings die Vorgehensweise nur für reliefiertes Gelände (Grossteil der Schweiz ohne tieferes Mittelland) eignet und die notwendige manuelle Nachbereitung und eigene Programmierung relativ aufwändig sind.

Beide hier untersuchten Ansätze liefern also die gewünschte Abschätzung des Potenzials für KWKW in der Schweiz. Die Wahl der Methode hängt schlussendlich vom Hintergrund, den Anforderungen und dem Verwendungszweck der Potenzialschätzungen ab.

Die Bottom-up Analyse erlaubt mit begrenztem Aufwand eine Analyse des ungenutzten Potenzials in stillgelegten Wasserkraftanlagen. Diese könnten aufgrund der bestehenden Konzessionen kurz bis mittelfristig reaktiviert werden. Für das Eruieren von Standorten für neue Anlagen führt die Top-down Analyse zu aussagekräftigen Resultaten. Die Analysen müssten sich aus Gründen des Aufwandes auf klar definierte Einzugsgebiete und Regionen beschränken. Der Realisierungszeitraum zur Nutzung der günstigen Voraussetzungen für neue Kleinwasserkraftwerke ist mittel- bis langfristig.

1 Einleitung

1.1 Stand der Wasserkraftnutzung in der Schweiz

Die Schweiz verfügt am 1. Januar 2005 über 518 Wasserkraftwerke mit einer maximal möglichen Leistung grösser oder gleich 300 kW. Insgesamt beträgt die maximal mögliche Leistung ab Generator 13‘275 MW mit einer mittleren Produktionserwartung von 34‘900 GWh/a, dies ergibt einen Anteil an der gesamten Stromerzeugung von 55%. 2004 betrug der Zuwachs 7 MW an maximal möglicher Leistung ab Generator sowie 50 GWh an mittlerer Produktionserwartung (Wasserkraftstatistik der Schweiz (Wasta-Ordner)).

Während die Wasserkraftwerke grösser als 300 kW systematisch erfasst wurden, fehlen für die kleineren Wasserkraftwerke verlässliche Zahlen. Die letzte umfassende Erhebung aus dem Jahr 1985 des BWG ergab 700 Zentralen kleiner als 300 kW, eine Schätzung der Veränderungen zwischen 1985 und 1997 ergab weiterhin 700 Zentralen (ISKB 1999). Insgesamt zählt die Schweiz also ca. 1‘000 Kleinwasserkraftwerke bis 10 MW mit einer installierten Leistung von 779 MW und einer mittleren jährlichen Produktionserwartung von 3‘372 GWh/a (s. 2.2a)).

Insgesamt bestehen aber bei Kleinwasserkraftwerken < 300 kW und bei Dotierkraftwerken wenig Kenntnisse über das Potenzial.

1.2 Auftrag und Ziele

Das Programm Kleinwasserkraftwerke beabsichtigt, eine Potenzialanalyse für Kleinwasserkraftwerke durchführen zu lassen. Vor der Ausschreibung eines derartigen Auftrags soll eine Vorabklärung durchgeführt werden.

Das Ziel dieser Vorabklärung ist die Entwicklung eines Konzepts für eine möglichst genaue Abschätzung des vorhandenen technischen Potenzials für Kleinwasserkraftwerke in der ganzen Schweiz, differenziert nach Leistungsklassen bis 10 MW, wobei sich die Arbeit auf Kraftwerke an Gewässern konzentriert. Trinkwasserkraftwerke werden separat abgeklärt.

Voraussetzung für die Nutzung der Wasserkraft ist eine Wasserrechtskonzession. Die Ermittlung des Potenzials ist komplex, da neben einigen modernisierten Kraftwerken zahlreiche ältere Anlagen bestehen, die noch über ein Potenzial zur Steigerung der Elektrizitätsproduktion verfügen. Zudem bestehen auch nicht mehr genutzte Kraftwerke und Wasserrechtskonzessionen. Zusätzlich zu beach-

ten sind Dotierkraftwerke bei grösseren Wasserkraftwerken, die gerade in Zusammenhang mit den neuen Restwasserbestimmungen an Bedeutung gewinnen.

Zur Bestimmung des technischen Potenzials von Kleinwasserkraftwerken werden zwei unterschiedliche Ansätze verwendet:

- Eine Bottom-up Analyse der Firma **e c o** n c e p t AG.
- Eine Top-down Analyse des Geographischen Instituts der Uni Bern (Gruppe für Hydrologie)

Die Bottom-up Analyse der Firma **e c o** n c e p t AG beruht auf einer Auswertung der bestehenden Wasserrechtsregister.

In der Top-down Analyse soll aufgezeigt werden, wie das Kleinwasserkraft-Potenzial (KWKW-Potenzial) eines beliebigen Gewässerabschnittes ermittelt werden kann. Um die Nutzungsmöglichkeiten für Kleinwasserkraftwerke abzuschätzen, werden so genannte Potenzialstudien durchgeführt. Diese werden vor allem für räumliche Übersichtsdarstellungen und zur Identifikation von Schlüsselstellen, also von Gewässerabschnitten mit besonders günstigen Bedingungen, eingesetzt. Die gewählte Vorgehensweise unterscheidet sich nicht wesentlich von jener, welche das Bundesamt für Wasserwirtschaft im Jahr 1987 für die Studie „Kleinwasserkraftwerke in der Schweiz“ wählte (BWW 1987). In den letzten Jahren haben sich allerdings durch markante Entwicklungen im Bereich der Geographischen Informationssysteme (GIS), der verfügbaren räumlichen Informationen wie auch der hydrologischen Modellierung neue, interessante Möglichkeiten ergeben, das KWKW-Potenzial abzuschätzen. Diese sollen in der Top-down Analyse konsequent angewandt und getestet werden. Der Ansatz wird als „Top down“ bezeichnet, weil er auf eine Übersichtsdarstellung zielt, also beispielsweise Gewässerabschnitte identifizieren will, welche über ein bemerkenswertes Potenzial besitzen.

Die vorliegenden Vorabklärungen konzentrieren sich auf die in den Kantonen Zürich und St. Gallen liegenden Einzugsgebiete der Thur und der Töss. Die Top-down Analyse beschränkt sich auf die Töss.

2 Potenzialanalyse Bottom-up

2.1 Einleitung

Bei den Anlagen an Fliessgewässern ist aufgrund der bestehenden Grundlagen zwischen den folgenden Anlagenkategorien zu unterscheiden:

- Kraftwerke > 300 kW: Diese Anlagen werden in der Wasserkraftstatistik (Wasta-Ordner) erfasst, es besteht eine gute Datenbasis. Das Ausbaupotenzial ist in verschiedenen Studien (z.B. Electrowatt-Ekono 2004) erfasst. Insgesamt handelt es sich um ca. 500 Anlagen.

- Kraftwerke < 300 kW: Gemäss Schätzung ISKB (1999) bestehen in der Schweiz ca. 700 Kraftwerke, wobei jedoch keine neuere Erhebung zu diesen Kleinstkraftwerken besteht. Verlässliche Angaben lassen sich allenfalls aus den kantonalen Wasserrechtsregistern gewinnen. Diese sind kantonal unterschiedlich aufgebaut und geben Auskunft über das theoretische Nutzungspotenzial der konzessionierten Wassermenge, jedoch nicht über die effektiv genutzte Wassermenge oder produzierte Energie. Ergänzt werden könnten die Angaben des Wasserrechtsregisters durch die Auswertung der von den Kantonen im Rahmen der Gewässerschutzgesetzes zu erstellenden Inventare aller Wasserfassungen sowie der Angaben im kantonalen Sanierungsbericht Wasserfassungen. Die Verwendbarkeit sowie der Inhalt dieser Daten wird anhand einer Pilotstudie für die Kantone Zürich und St. Gallen geprüft.

- Spezialfall Dotierkraftwerke: Dotierkraftwerke nutzen das Energiepotenzial des Restwassers von grösseren Kraftwerken und haben mit den neueren Bestimmungen zum Restwasser einen grösseren Stellenwert erhalten. Zurzeit bestehen keine frei zugänglichen Angaben zu Dotierkraftwerken, da diese immer im Zusammenhang mit einem grösseren Kraftwerk erstellt werden. Dotierkraftwerke können theoretisch im Rahmen bestehender Konzessionen realisiert werden, daher finden sich in den kantonalen Wasserrechtsregistern nicht zwingend Angaben zu Dotierkraftwerken. Ihr Potenzial und ihr Ausbaustandard sind nicht bekannt. Möglicherweise lassen sich über die Auswertung der kantonalen Inventare der Wasserfassungen und der jeweiligen Sanierungsberichte direkt Informationen über vorhandene Dotierkraftwerke oder zumindest Hinweise für eine zielgerichtete Erhebung bei in Frage kommenden Anlagenbetreibenden gewinnen.

2.2 Bestehende Studien zu Ausbaupotenzialen von Kleinwasserkraftwerken

a) Positionspapier Kleinwasserkraftwerke (BFE 2004)

Gemäss Positionspapier Kleinwasserkraftwerke des Bundesamts für Energie (BFE 2004a) und Forschungsprogramm Kleinwasserkraftwerke (BFE 2004b) präsentiert sich die Situation in Bezug auf die KWKW in der Schweiz wie folgt. Insgesamt sind gemäss Schätzungen ISKB (1999) rund 700 Anlagen in Betrieb, wobei sich Stilllegungen und Wiederinbetriebnahmen seit den 90er Jahren die Waage halten. Die heutige Nutzung ist in folgender Tabelle präsentiert:

Bereich: Max. Leistung ab Generator (kW)	Anzahl Anlagen	Max. Leistung ab Generator (MW)	Mittlere jährliche Energieproduktion (GWh/a)
< 300	700	56	245
300 bis 1000	168	94	487
1000 bis 10000	169	629	2640
Total	1037	779	3372

Tabelle 1: Heutige Nutzung KWKW, Stand 1.1.2004 (BFE 2004a und BFE 2004b)

Gemäss BFE (2004b) gibt es in der Schweiz zahlreiche stillgelegte Kraftwerke, die mit relativ wenig Aufwand sowie verträglichen Umweltauswirkungen wieder in Betrieb genommen werden könnten. Insgesamt besteht ein Trend, Pico-Kraftwerke aufgrund schlechter Wirtschaftlichkeit, Konzessionsende oder Sanierung gemäss Gewässerschutzgesetz (GSchG) aufzugeben. Hingegen bestehen Potenziale bei grösseren Kraftwerken, insbesondere Nebennutzungskraftwerken, wie Trinkwasser- und Abwasseranlagen oder Dotierkraftwerken. Zudem verbessern sich die Vermarktungschancen von lokal produziertem Ökostrom zusehends.

Das Ausbaupotenzial der KWKW (bis 1 MW[1]) beträgt gemäss DIANE-Studien 1997:

Anlagentyp	Ausbaupotenzial in GWh/a
Trinkwasserkraftwerke	100
Abwasserkraftwerke	20
Reaktivierung/Modernisierung	35-70
Dotierkraftwerke	5-20
Neubauten	30-90
Total	190-300

Tabelle 2: Ausbaupotenzial für Kleinwasserkraftwerke bis 1 MW gemäss BFE 2004b.

Die im vorliegenden Kontext betrachteten Kleinwasserkraft- und Dotierkraftwerke (ohne Nebennutzungskraftwerke) erreichen ein Potenzial von 70 - 180 GWh/a. Diese Zahlen stammen aus dem DIANE 10 Programm von 1997 und sind aktualisierungsbedürftig.

b) Ausbaupotenzial der Wasserkraft (Electrowatt-Ekono 2004)

Die Studie von Electrowatt-Ekono (2004) ist im Zusammenhang mit der Aktualisierung der Energieperspektiven entstanden. Sie versucht, die Schlüsse aus neuen Tendenzen im technologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Umfeld der Wasserkraftnutzung zu ziehen. Die 20 wichtigsten Einflussgrössen auf das Ausbaupotenzial der Schweizer Wasserkraft werden identifiziert (z.B. Liberalisierung, Förderbeiträge, Baukosten, Marktentwicklung etc.). Damit wird das Gesamtpotenzial als Summe des Ausbaupotenzials und der Produktion des bestehenden Kraftwerkparks unter Berücksichtigung der Restwasserbestimmungen ermittelt. Diese Abschätzung berücksichtigt alle Kraftwerke grösser als 300 kW, wie sie in der Schweizer Wasserkraftstatistik aufgeführt sind.

Bis 2050 wird ein möglicher Produktionszuwachs bei der Wasserkraft von 1‘800 bis 5‘440 GWh bei einer Leistungserhöhung von 777 bis 2‘213 MW erwartet (Electrowatt-Ekono 2004, S. 85).

[1] Kleinwasserkraftwerke bis 1 MW werden gefördert, "Kleinwasserkraft" umfasst hingegen alle Anlagen bis 10 MW.

Die folgende Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von Electrowatt-Ekono (2004) für 2020 mit den Ergebnissen früherer Studien für 2025:

Studie	Datum	Ausbaupotenzial 2020/2025, Produktion GWh	Ausbaupotenzial 2020/2025, Leistung MW
Elektrowatt	1987	3‘600-5‘500	3‘500-5‘100
SWV	1987	3‘170	
KOWA	1993	1‘520-1‘870	
Electrowatt-Ekono	2004	660-1‘573	282-659

*Tabelle 3: Vergleich verschiedener Potenzialstudien (Quellen: Electrowatt-Ekono 2004 und **e c o** n c e p t /IAEW/Consentec 2004).*

Die Tabelle zeigt, dass die Schätzungen aus Electrowatt-Ekono 2004 tiefer liegen als die Schätzungen aus den 80er Jahren. Die Ergebnisse sind in etwa vergleichbar mit den Ergebnissen der KOWA-Studie. Beide Studie berücksichtigen im Gegensatz zu Elektrowatt 1987 und SWV 1987 bereits mögliche Einschränkungen durch Restwasservorgaben, sind daher also realistischer. Über die Aufteilung dieser Potenziale auf Kleinwasserkraftwerke bis 10 MW und grössere Kraftwerke ab 10 MW werden in diesen Studien allerdings keine Angaben gemacht.

c) Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen (PSI 2005)

Das PSI hat im Rahmen des Projekts „Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen (GaBE)“ Potenzialabschätzungen für KWKW vorgenommen.

Aufbauend auf Potenzialabschätzungen von Elektrowatt aus dem Jahre 1987 kommen die Autoren zum Schluss, dass das ökonomisch realistische (Stromgestehungskosten zwischen 10 und 25 Rp./kWh) maximale Ausbaupotenzial für Anlagen < 10MW bei einer Ausbauleistung von 830 MW und einer Mehrproduktion von ca. 2‘200 GWh/a besteht. Dabei sind mögliche ökologische Einschränkungen durch Restwasservorschriften jedoch nicht berücksichtigt. Für Anlagen < 1MW beträgt das ökonomisch und ökologisch interessante Ausbaupotenzial heute ca. 70-180 GWh/a, wobei ein Teil dieses Potenzials in einer Modernisierung oder einem Ausbau bestehender, alter KWKW besteht. Die Möglichkeiten zum Neubau von KWKW sind durch die Restwasservorschriften und den Landschaftsschutz stark eingeschränkt (PSI 2005, S. 104).

d) Zusammenfassung

Die Ergebnisse der oben genannten Studien können wie folgt zusammengefasst werden:

- Gemäss BFE beträgt das Potenzial für alle Kraftwerke < 1MW insgesamt zwischen **190 - 300 MW** (Kleinwasserkraftwerke und Nebennutzungskraftwerke) bei einer aktuellen (Juni 2004) installierten Leistung von 135 MW in ca. 865 Anlagen. Kleinwasserkraftwerke < 1MW ohne Nebennutzungskraftwerke weisen ein Potenzial von **70 - 180 MW** auf.

- Gemäss PSI 2005 beträgt das Potenzial für alle Kleinwasserkraftwerke < 10 MW **830 MW** Leistung mit einer Mehrproduktion von 2‘200 GWh/a bei einer aktuellen (Juni 2004) installierten Leistung von ca. 760 MW und einer mittleren Stromproduktion von ca. 3‘420 GWh/a in ca. 1‘010 Anlagen.

- Electrowatt-Ekono 2004 beziffert das gesamte maximale Ausbaupotenzial der Schweizer Wasserkraftwerke > 300 kW auf **777 bis 2‘213 MW** mit einer Produktionserhöhung von 1‘800 bis 5‘400 GWh/a.

Die Ergebnisse zeigen, dass Wasserkraftwerke insgesamt ein beträchtliches Potenzial aufweisen, auch wenn ökologische Einschränkungen berücksichtigt werden. Die Ergebnisse für die verschiedenen Leistungsklassen zeigen allerdings auch, dass dieses Potenzial zum grössten Teil bei Kraftwerken mit einer installierten Leistung grösser als 1 MW anfällt. Die Potenziale der Kleinwasserkraftwerke < 1MW, die zwischen 190 bis 300 MW liegen, sind insgesamt gering.

2.3 Datenlage zur Ermittlung der Potenziale in Kleinwasserkraftwerken

2.3.1 Kraftwerke grösser als 300 kW

Wasserkraftanlagen mit einer Leistung über 300 kW sind in der Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz (WASTA) des BFE/BWG erfasst. Diese wird jährlich aktualisiert. Insgesamt zählt die Schweiz 510 Wasserkraftzentralen über 300 kW. In den hier untersuchten Kantonen Zürich und St. Gallen befinden sich 13 (ZH), respektive 43 Zentralen (SG). Die 13 im Kanton Zürich verzeichneten Zentralen grösser als 300 kW weisen eine maximal mögliche Leistung ab Generator von 119 MW mit einer mittleren Produktionserwartung von 534 GWh/a auf, die 43 Zentralen des Kantons St. Gallen erreichen eine installierte Leistung von 419 MW und eine mittlere Produktion von 596 GWh/a.

Die Zentralen im WASTA-Ordner sind anhand der 9 Flussgebiete Rhein, Aare, Reuss, Limmat, Rhone, Tessin, Adda, Inn und Etsch geordnet.

In der WASTA werden die folgenden Angaben systematisch erhoben:

- Standort
- Besitzer
- Ausbauwassermenge
- installierte Leistung
- mittlere Produktionserwartung
- genutzte Gewässer
- Inbetriebnahme
- letzter Umbau
- Konzessionsart/Konzessionsablauf

Die Datenbasis der Kraftwerke zwischen 300 kW und 10 MW kann als gut bezeichnet werden. Das Potenzial ist u.a. in Electrowatt-Ekono (2004) beziffert.

2.3.2 Kraftwerke kleiner als 300 kW sowie Dotierkraftwerke

Kraftwerke kleiner als 300 kW sowie Dotierkraftwerke sind nicht systematisch erfasst. Um abzuklären, wie die Kraftwerke < 300 kW erfasst werden können und welche Datengrundlagen dazu bereits auf Kantons- und Bundesebene bestehen, werden in den Kantonen Zürich und St. Gallen jeweils zwei Fallstudien durchgeführt. Ergänzend werden eine Kurzerhebung in verschiedenen weiteren Kantonen sowie verschiedene Expertengespräche durchgeführt.

Als mögliche Datenquellen in Frage kommen das Wasserrechtsregister der Kantone, in dem sämtliche konzessionierten Anlagen verzeichnet sind, sowie die im Rahmen des Gewässerschutzgesetzes und der Restwasserbestimmungen von den Kantonen im Auftrag des BAFU zu erstellenden Inventare sämtlicher restwasserrelevanter Wasserfassungen und die Sanierungsberichte Restwasser. In den Fallstudien werden Verwendbarkeit und Inhalt dieser Datenquellen abgeklärt.

2.4 Kantonale Fallstudien

2.4.1 Fallstudie Kanton St. Gallen

Ein Gespräch mit Herrn B. Müller, Leiter Sektion Gewässernutzung im AFU des Kantons St. Gallen, sowie eine Sichtung der im Kanton St. Gallen vorhandenen Grundlagen hat die folgenden Erkenntnisse gebracht:

Ein Inventar sämtlicher restwasserrelevanter Wasserfassungen im Rahmen der Restwassersanierungen wurde bereits in den 90er Jahren erstellt und ist beim BAFU erhältlich. Die Grundlagen bestehen im Kanton St. Gallen nicht mehr, da in der Zwischenzeit eine EDV-Umstellung erfolgte, und die Datenbank nicht mehr verfügbar ist. Dies ist aber nicht weiter schlimm, da im Kanton St. Gallen das Wasserrechtsregister EDV-mässig erfasst ist. Die Datenbank erlaubt gezielte Auswertungen nach Leistung, Gewässer, Konzessionsablauf, in Betrieb/nicht in Betrieb stehende Anlagen etc. Weitere Angaben wären in den Archiven in den jeweiligen Akten nachzuschlagen. In dieser Datenbank sind auch bisher bestehende Dotierkraftwerke erfasst.

Nicht erfasst ist, ob die konzessionierte Leistung der Anlagen in vollem Umfang ausgeschöpft wird oder nicht. Dies ist bei Einzelfällen bekannt, allgemein aber nicht erfasst.

Die Situation der Wasserkraftanlagen im Kanton St. Gallen präsentiert sich wie folgt:

			In Betrieb		Ausser Betrieb	
Mittlere Brutto-leistung (BkW)	Anzahl Anlagen (Total)	Leistung Total (BkW)	Anzahl Anlagen	Leistung Total (BkW)	Anzahl Anlagen	Leistung Total (BkW)
- 40	139	1‘619	64	935	75	684
40 - 300	40	5‘142	37	4‘859	3	283
301 - 1000	22	13‘423	22	13‘423	0	0
1000-10‘000	8	17‘358	8	17‘358	0	0
Total	209	37‘542	131	36‘575	78	967

Tabelle 4: Anzahl und Leistung der KWKW bis 10 MW im Kanton St. Gallen

Insgesamt existieren 209 KWKW kleiner als 10 MW im Kanton St. Gallen, davon sind 131 in Betrieb und 78 ausser Betrieb. Bei den Kleinstwasserkraftwerken kleiner als 40 kW sind mehr als die Hälfte der konzessionierten Anlagen ausser Betrieb. Das theoretische technische Potenzial bei einer Wiederinbetriebnahme

dieser 75 Anlagen würde 684 kW betragen. Die meisten dieser Anlagen wurden allerdings aus Rentabilitätsgründen aufgegeben und werden daher voraussichtlich auch nicht wieder in Betrieb genommen.

Etwas grösseres realisierbares Potenzial besteht bei den Anlagen zwischen 40 und 300 kW. Dort stehen insgesamt 3 Anlagen mit einer Leistung von 283 kW ausser Betrieb. Auch hier ist eine Wiederinbetriebnahme fraglich, die Chancen auf rentablen Betrieb sind allerdings besser als bei den Kleinstanlagen. Das technische Potenzial von 3 Anlagen beträgt mehr als einen Drittel des technischen Potenzials der 75 Kleinstanlagen. Der Fokus wird im Kanton St. Gallen daher nicht auf die Kleinstanlagen gerichtet, da mit der Sanierung/ Wiederinbetriebnahme einer grösseren Anlage (> 100 kW) das Potenzial von unzähligen kleinen Anlagen kompensiert werden kann. Gemäss Müller lohnen sich Potenzialabklärungen bei KWKW kleiner als 40 kW nicht, da diese kaum wieder in Betrieb genommen werden und insgesamt deren Potenzial in installierter Leistung verschwindend klein ist. Besser wäre eine Konzentration auf die ausser Betrieb stehenden Anlagen zwischen 40 kW und 300 kW.

Dotierkraftwerke sind in den Konzessionen mit erfasst. Der Einbau eines Dotierkraftwerks wird bei Sanierungen immer geprüft, ist im Moment aber meist noch zu teuer. Bei Anlagen mit hohen Restwasserverlusten bestünde aber durchaus ein Potenzial für den Einbau eines Dotierkraftwerks. Bisher sind aber keine Projekte bekannt.

2.4.2 Fallstudie Kanton Zürich

Ein Gespräch mit Herrn Christoph Noll, Sektionsleiter Gewässernutzung im AWEL des Kantons Zürich, sowie eine Sichtung des Zürcher Wasserrechtsregisters und des Sanierungsberichts Restwasser hat die folgenden Erkenntnisse geliefert:

- Werke < 1 MW wurden schon immer periodisch durch den Kanton Zürich erfasst, es bestehen insgesamt wenig Kenntnislücken. Die periodische Erfassung wurde jedoch aufgegeben, da sich eine vertiefte Beobachtung der vielen Kleinstwasserkraftwerke nicht mehr lohnt, da diese von Leistungs- und Produktionsseite her den Aufwand nicht rechtfertigen.

- Insgesamt bestehen (Stand 1.1. 2004) 97 Anlagen < 1MW, davon sind 94 Anlagen < 300 kW. 57 Anlagen mit einer Leistung von 4,2 MW sind in Betrieb, wobei jedoch keine Informationen darüber bestehen, ob diese Leistungen jeweils voll ausgeschöpft werden. Diese Information wäre nur durch die Befragung der einzelnen Anlagenbetreiber eruierbar. Die mittle-

re Jahresproduktion dieser Anlagen beträgt ca. 21 GWh. 40 Anlagen sind nicht in Betrieb, davon sind mehr als die Hälfte (23 Anlagen) kleiner als 5 kW. Würden alle konzessionierten Anlagen in Betrieb stehen, könnte die mittlere Jahresproduktion auf rund 25 GWh (entspricht ca. 0,35% des kantonalen Strombedarfs von ca. 7‘800 GWh) erhöht werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Zusammensetzung der Kraftwerkskonzessionen 2004 für Werke < 1 MW:

			In Betrieb		Ausser Betrieb	
Mittlere Bruttoleistung (BkW)	**Anzahl Anlagen (Total)**	**Leistung Total (BkW)**	**Anzahl Anlagen**	**Leistung Total (BkW)**	**Anzahl Anlagen**	**Leistung Total (BkW)**
- 5	38	82	15	40	23	42
5 - 50	33	656	20	474	13	182
50 - 100	12	914	10	769	2	145
100 - 150	4	494	3	378	1	116
150 - 300	7	1602	7	1602	0	0
300 - 600	3	1273	2	908	1	365
600 - 1000	0	0	0	0	0	0
Total	**97**	**5021**	**57**	**4171**	**40**	**850**

Tabelle 5: Zusammensetzung der KWKW-Konzessionen im Kanton Zürich 2004

Wie die Tabelle zeigt, wäre das technische Potenzial, wenn alle nicht in Betrieb stehenden Anlagen wieder in Betrieb genommen würden, insgesamt 850 kW, wobei die Wiederinbetriebnahme einer einzigen Anlage zwischen 300 und 600 kW bereits mehr als einen Drittel dieses Potenzials erbringen würde. Das Potenzial der insgesamt 36 ausser Betrieb stehenden Picokraftwerke beträgt ca. 25% des Gesamtpotenzials, die restlichen drei Viertel werden von den 4 Anlagen zwischen 50 und 600 kW erbracht. Eine Inbetriebnahme der meisten dieser Kraftwerke ist gemäss Noll aus wirtschaftlichen Gründen allerdings so gut wie ausgeschlossen.

Aufbau Wasserrechtsregister des Kantons Zürich:
Erfasst sind sämtliche Kleinwasserkraftwerke des Kantons Zürich mit Angaben zur Ausbauwassermenge sowie zum Gefälle. Die Leistung der Anlagen ist nur teilweise im Wasserrechtsregister eingetragen, wobei es sich manchmal um die maximal mögliche Leistung ab Generator handelt und manchmal um die wasserzinspflichtige Leistung aufgrund des nutzbaren Gewässers und des Gefälles. Die Leistungen der Anlagen wären mit grossem Aufwand eruierbar anhand der archi-

vierten Akten der jeweiligen Anlagen. Zusätzlich sind alle relevanten Verfügungen ab 1900 im Wasserrechtsregister abgelegt. Ein Teil der Angaben des Wasserrechtsregister ist EDV-mässig erfasst, zumindest die Fassungen, Adressen der Betreiber sowie Verfügungen. Auswertungen sind aber aufgrund des Datenformats praktisch unmöglich. Teilweise ist erfasst, ob die jeweilige Anlage noch in Betrieb steht oder nicht. Fazit: Das Wasserrechtsregister ist zur Abschätzung des technischen Potenzials von KWKW im Kanton Zürich allenfalls ergänzend geeignet.

Aufbau Sanierungsbericht Restwasser des Kantons Zürich:
Der Sanierungsbericht selbst ist relativ kurz, wichtig in unserem Zusammenhang sind die Anhänge mit den Details zu den Anlagen. Der Aufbau der jeweiligen Anlagenblätter ist immer gleich (s. Beispiele im Anhang). Erfasst sind: Eigentümer, Gewässer, Koordinaten, Höhe Wasserentnahme und Wasserrückgabe, Fassungsart, maximal installierte Leistung ab Generator, Konzessionsablauf, Ausbauwassermenge, Abflussmenge und Restwassermenge, eine Beurteilung (wird Anlage betrieben oder nicht, Restwasserproblem etc.), sowie Bemerkungen (Anlage in Betrieb?, bei Anlagen, die nicht in Betrieb sind teilweise Abschätzung, ob Wiederaufnahme realistisch oder nicht).

Nicht im Sanierungsbericht erfasst sind Anlagen, die aus Restwassersicht kein Problem darstellen. Im Kanton Zürich sind dies lediglich 10 Anlagen, z.B. die grösseren Rheinkraftwerke und 2 kleine Kraftwerke an der Töss. Die fehlenden Kraftwerke könnten über das Wasserrechtsregister eruiert werden. Grundsätzlich sind die in unserem Zusammenhang wichtigen Kraftwerke aber im Sanierungsbericht erfasst.

Kantonale Sanierungsberichte werden von der Abteilung Gewässerschutz beim BAFU betreut. Grundsätzlich sind die Angaben öffentlich, für Auswertungen im Auftrag des Bundes sollten auch die Adressen der EigentümerInnen genutzt werden können. Falls der Bund dies erlaubt, steht von Seiten des Kantons Zürich dem nichts entgegen.

Dotierkraftwerke:
Im Kanton Zürich existieren keine Dotierkraftwerke, einzig das Kraftwerk Wettingen, an dem Zürich beteiligt ist, verfügt über ein Dotierkraftwerk. Potenziale für Dotierkraftwerke bestehen im Kanton Zürich bei einer Handvoll Kraftwerke, die alle im Sanierungsbericht aufgelistet sind. Aus Restwassersicht unproblematische Kraftwerke eignen sich in der Regel nicht für Dotierkraftwerke. Weitere Voraussetzungen für ein Potenzial von Dotierkraftwerken sind ein günstiger Standort sowie eine gewisse kritische Grösse. Aus den Angaben im Sanierungsbericht könnte diese kritische Grösse berechnet werden.

Die Ergebnisse einer speziellen vertieften Betrachtung der Kraftwerke an der Töss sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Wasserrechts-nummer	Standort	Leistung (kW)	Konzessions-ende	In Betrieb?
33	Winterthur	4,5	Unbefristet	Nein
34	Winterthur	5,5	Unbefristet	Nein
49	Kollbrunn	263	Unbefristet	Ja
56	Winterthur	192	Unbefristet	Nein
57	Winterthur	180,7	Unbefristet	Nein
78	Liesenthal	168,7	2052	Ja
82a)	Tössrain	90,5	unbefristet	Nein
86	Winterthur Hard	252,7	2041	Ja
100	Kollbrunn	203,3	unbefristet	Ja
35h	Kyburg	272,9	unbefristet	Ja
Total:		1‘633,8, davon in Betrieb: 1‘160,6 (ausser Betrieb: 473,2)		5 Ja 5 Nein

Tabelle 6: Kraftwerke an der Töss, gemäss Sanierungsbericht Kanton Zürich

Von insgesamt 10 Kraftwerken an der Töss sind 5 in Betrieb mit einer Leistung von 1‘160,6 kW, 5 Anlagen mit einer Leistung von 473,2 kW sind ausser Betrieb. Das technische Potenzial an der Töss beträgt also mindestens 473 kW. Aus dem Sanierungsbericht Restwasser können die Einzelheiten der ausser Betrieb stehenden Anlagen sowie - oftmals - gar eine Einschätzung, ob eine Reaktivierung realistisch ist oder nicht, abgelesen werden. Daraus können die jeweiligen Potenziale in Bezug auf bereits konzessionierte aber momentan nicht in Betrieb genommene Anlagen abgeschätzt werden.

2.4.3 Kurzabklärungen in ausgewählten weiteren Kantonen und weitere mögliche Datenquellen

Kanton Bern:

Alle bewilligten Kraftwerke, inklusive Dotierkraftwerke sind in einer Invent-Datenbank registriert. Die Daten bzw. Auszüge daraus werden für klar definierte Studien zur Verfügung gestellt. Zusätzlich lassen sich die Informationen aus dem Sanierungsbericht Restwasser des Kantons Bern (BVE 2001) nutzen.

Kanton Wallis:

Die Grundlagen stehen zur Verfügung. Grundsätzlich ist das Walliser Wasserrechtsregister vertraulich.

Die Grundlagen und die Potenziale für die KWKW inklusive Dotierkraftwerke zwischen 300 kW und 10 MW sind detailliert erfasst und beschrieben in der Studie „Erneuerungs- und Erweiterungspotenzial der Wasserkraftwerke im Kanton Wallis“. Angaben zu den Anlagen > 300 kW sind auch im Internet zu finden.

Datengrundlagen für kleinere Zentralen < 300 kW und Trinkwasserkraftwerke sind bei der Dienststelle für Wasserkraft des Kantons verfügbar. Es handelt sich um insgesamt 26 in Betrieb stehende Anlagen < 300 kW mit einer installierten Leistung von 3‘022 kW und einer jährlichen mittleren Produktion von 16 GWh/a. Konzessionierte aber nicht in Betrieb stehende Anlagen sind der Dienststelle für Wasserkraft bekannt.

Datenbank der unabhängigen Produzenten im Rahmen der Mehrkostenfinanzierung (Art. 7 EnG):

Eine weitere mögliche Datenquelle, über die allenfalls unausgeschöpfte Potenziale ermittelt werden könnten, wäre die im 1. Quartal 2006 von der Etrans erstellte Datenbank der unabhängigen Produzenten im Rahmen der Mehrkostenfinanzierung (Art. 7 EnG). Die EVU, die Anspruch auf Vergütung der Mehrkosten durch Wasserkraftanlagen unabhängiger Produzenten (<1 MW) haben, müssen diese Anlagen zwischen dem 1. März und dem 30. April bei der Etrans melden. Die erfassten Daten sind u.a. die maximal installierte Leistung ab Generator, die Brutto-Leistung, der reduzierte Übernahmepreis, das Jahr der Inbetriebnahme, die eingespeiste Überschussenergie sowie die nachgewiesenen Mehrkosten. Angaben zum Betreiber, dem Konzessionsablauf sowie hydrologische Daten fehlen in dieser Datenbank vollständig.

Ob die Datenbank für statistische Zwecke genutzt werden kann, unterliegt der Entscheidung des BFE. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass diese - insbesondere im Rahmen eines BFE-Auftrags - genutzt werden könnte, wobei die erfassten Daten jedoch im Kontext einer Potenzialabschätzung KWKW nur von zweitrangigem Interesse sind und allenfalls ergänzend genutzt werden können. Eine Einsatzmöglichkeit bestünde allenfalls in der Ermittlung von nicht ausgeschöpften Potenzialen einzelner Kraftwerke, wenn die mittlere Produktionserwartung aus dem Inventar oder dem Wasserrechtsregister mit der tatsächlichen Produktion aus der Etrans-Datenbank verglichen wird.

2.5 Fazit

2.5.1 Kleinwasserkraftwerke < 300 kW

Für die Abschätzung des Potenzials von Kleinwasserkraftwerken kleiner als 300 kW kommen verschiedene Datenquellen in Frage:

- Das Inventar der restwasserrelevanten Wasserfassungen und die Sanierungsberichte Restwasser, die beim BAFU erhältlich sind
- Die kantonalen Wasserrechtsregister, die in Aufbau, Art und Verfügbarkeit unterschiedlich sind
- Weitere kantonsspezifische Datenbanken und Erhebungen
- Datenbank der unabhängigen Produzenten der Etrans

Nach einer allgemeinen Auswertung der Inventare und Sanierungsberichte für alle Kantone muss das weitere Vorgehen zur Abschätzung der Potenziale von KWKW je nach Kanton in enger Absprache und Zusammenarbeit mit den jeweiligen Energiefachstellen/Umweltschutzämter und unter Nutzung der spezifischen weiteren Datenquellen vorgenommen werden.

2.5.2 Spezialfall Dotierkraftwerke

Wie die Fallstudien gezeigt haben, sind die Angaben zu den Dotierkraftwerken in den meisten Kantonen vorhanden, entweder im Inventar der Wasserfassungen oder in einer selbst erstellten Datenbank.

Das Potenzial für neue Dotierkraftwerke wird am besten mittels der Sanierungsberichte Restwasser ermittelt, da oftmals der Bau einer Dotierzentrale mit der Einführung oder Erhöhung einer Restwasserabgabe einhergeht (Hardegger 2002, S. 210).

In den Sanierungsberichten Restwasser der Kantone sind alle restwasserrelevanten Anlagen verzeichnet. Zusätzlich finden sich dort die Vorschläge für höhere Restwassermengen. Die Anlagen mit höheren Restwassermengen kommen theoretisch für den Einbau eines Dotierkraftwerks in Betracht. Eine Erhöhung der Dotierwassermenge in einem Kraftwerk erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass ein zusätzliches Dotierkraftwerk erstellt wird, da dieses durch die Erhöhung der Dotierwassermenge rentabler wird. Zusätzlich müssen die Anlagen und die hydrologischen Voraussetzungen geeignet sein. Beispielsweise machen zu kleine Bäche

keinen Sinn, bisher wurden Dotierkraftwerke bei Anlagen ab ca. 100 bis 200 kW gebaut (state of the art), in Zukunft mit den verschärften Restwasservorschriften ist aber zu erwarten, dass diese auch bei kleineren Kraftwerken gebaut werden könnten, was bisher noch wenig wirtschaftlich ist. Eine bestimmte kritische Grösse könnte aus dem Gefälle und der nutzbaren Dotierwassermenge (gemäss Bestimmungen GSchG) berechnet werden (Gefälle x Wassermenge ergibt eine theoretische Leistung, wobei ab einer gewissen Schwellenleistung ein Dotierkraftwerk möglich wäre). Aus den Angaben im Sanierungsbericht könnte diese theoretische Leistung berechnet werden.

Falls das Potenzial von Dotierkraftwerken mittels einer Umfrage abgefragt werden soll, empfiehlt sich aus Effizienzgründen eine Konzentration der Befragung auf diejenigen Anlagen, deren Restwasserabgabe erhöht wurde und die eine bestimmte kritische Grösse erreichen.

2.6 Empfehlungen aus der Bottom-up Analyse

Für eine zielführende Erfassung des technischen Potenzials der KWKW in der Schweiz schlagen wird die Verwendung der folgenden Datenquellen vor:

- **WASTA-Ordner und Potenzialstudie Electrowatt-Ekono:**
  KWKW über 300 kW sind in der Schweizer Wasserkraftstatistik systematisch erfasst. Die Datenbasis kann als gut bezeichnet werden. Das Potenzial für bestehende und neue Anlagen > 300 kW wurde in verschiedenen Studien (Electrowatt 2004, und für Kantone bspw. Kanton Wallis 2000) berechnet.

- **Inventar bestehender Wasserfassungen sowie Sanierungsberichte Restwasser der Kantone:**
  Wichtigste Datenquelle für die Identifikation von Kraftwerken < 300 kW, Dotierkraftwerken sowie deren Potenziale besteht in der Auswertung der von den Kantonen zu erstellenden Sanierungsberichte Wasserentnahmen sowie der im Zuge dieser Berichte erstellten Inventare bestehender Wasserfassungen (gemäss Art. 82, Abs. 1 GSchG). In diesen Inventaren sind sämtliche restwasserrelevanten Anlagen aufgelistet. Das Inventar des Kantons Zürich hat gezeigt, dass die dort verfügbaren Informationen ausreichend wären, um das Potenzial KWKW sowie von Dotierkraftwerken für den Kanton Zürich abzuschätzen.
  Gemäss Informationen des BAFU liegen bis auf Jura und Neuenburg die Wasserkraftinventare sämtlicher Kantone beim BAFU vor, wobei jedoch die Qualität und die Vollständigkeit der Daten heterogen sind. Dies betrifft

aber vor allem hydrologische Angaben wie Abflussdaten etc. Bezüglich Sanierungsberichte sind bei der Mehrheit der Kantone die Arbeiten im Gang. Grundsätzlich sollten die Inventare nutzbar sein, gemäss BAFU muss bei einer Weitergabe der Daten das Einverständnis der Kantone eingeholt werden muss, aus Sicht der Kantone (ZH und SG) kann der Bund jedoch selbst entscheiden, ob er die Daten herausgeben will oder nicht (auch Datenschutzmässig werden sich die Kantone nicht gegen Entscheide des BAFU stellen). Neben KWKW sind in den Inventaren auch bestehende Dotierkraftwerke in der Regel aufgeführt. Das Potenzial von Dotierkraftwerken kann über eine genauere Untersuchung von sanierten Anlagen mit einer Erhöhung der Restwassermenge und einer bestimmten Grösse eruiert werden.

- **Kantonale Wasserrechtsregister:**
  Ergänzend zur Auswertung der Inventare können die kantonalen Wasserrechtsregister untersucht werden im Hinblick auf Anlagen, die nicht Restwasser relevant sind. In gewissen Kantonen sind die Wasserrechtsregister EDV-mässig erfasst und können einfach ausgewertet werden (Kanton St. Gallen). In anderen Kantonen ist die Auswertung der Wasserrechtsregister aufwändig, da diese nur in schriftlicher Form bestehen und wichtige Details in archivierten Akten gesucht werden müssen (Kanton Zürich). Wieder andere Kantone (Wallis) behandeln die Informationen des Wasserrechtsregisters vertraulich.

- **Spezifische kantonale Statistiken und Datenbanken:**
  Vereinzelte Kantone haben eigene Statistiken und Datenbanken erstellt, die ausgewertet werden können (VS, BE). Diese können punktuell zur Plausibilisierung der Angaben aus dem Wasserrechtsregister und dem Inventar verwendet werden.

3 Potenzialanalyse Top - down

3.1 Problemstellung

Um die Nutzungsmöglichkeiten für Kleinwasserkraftwerke abzuschätzen, werden so genannte Potenzialstudien durchgeführt. Sie werden vor allem für räumliche Übersichtsdarstellungen und zur Identifikation von Schlüsselstellen, also von Gewässerabschnitten mit besonders günstigen Bedingungen, eingesetzt. Eine solche Untersuchung führte zum Beispiel die Firma Basler und Hofmann, Ingenieure und Planer AG, an der Thur im Oberen Toggenburg durch (BWW 1987).

Bei Potenzialstudien stehen als Zielgrössen das **mittlere natürliche Leistungspotenzial (P_m)** und das **Bruttoenergiepotenzial (E)** im Vordergrund. Diese sind wie folgt definiert:

$$P_m = 9.8 \cdot Q_m \cdot \Delta h \quad [kW]$$ *Gleichung 1*

$$E = \frac{9.8 \cdot V_N \cdot \Delta h}{3600} \quad [kWh]$$ *Gleichung 2*

P_m: mittleres natürliches Leistungsp**otenzial** (am Ende des betrachteten Abschnitts) vor Abzug der Verluste

Q_m mittlerer jährlicher Abfluss (zu Beginn des Gewässerabschnitts) [m^3/s]

Δh Höhendifferenz zwischen Anfang und Ende des betrachteten Gewässerabschnitts (Bruttofallhöhe) [m]

E Bruttoenergiepotenzial (am Ende des betrachteten Abschnitts)

V_N mittleres jährliches Nutzvolumen (zu Beginn des Gewässerabschnitts) [m^3]

Um die Vergleichbarkeit des Leistungspotenzials von ungleich langen Gewässerabschnitten zu ermöglichen, kann ein mittleres spezifisches Leistungspotenzial (p_m) berechnet werden. Dabei erfolgt eine Normierung über die Abschnittslänge (Δl):

$$p_m = \frac{P_m}{\Delta l} \quad \left[\frac{kW}{m}\right]$$ *Gleichung 3*

Zur räumlich differenzierten Bestimmung der beiden Zielgrössen P_m und E sind räumlich hochaufgelöste Informationen zum **Abfluss** und zur **Bruttofallhöhe** notwendig. In den letzten Jahren haben sich durch rasante Entwicklungen im Bereich der Geographischen Informationssysteme (GIS), der verfügbaren räumlichen Informationen wie auch der hydrologischen Modellierung neue, interessante Möglichkeiten ergeben, diese beiden Kenngrössen zu erheben. In der vorliegenden Pilotstudie sollen diese Möglichkeiten am konkreten Fall der Töss getestet und im Hinblick auf eine gesamtschweizerische Potenzial-Studie beurteilt werden. Somit ergibt sich für die Top-down Analyse die in Abbildung 1 dargestellte Vorgehensweise.

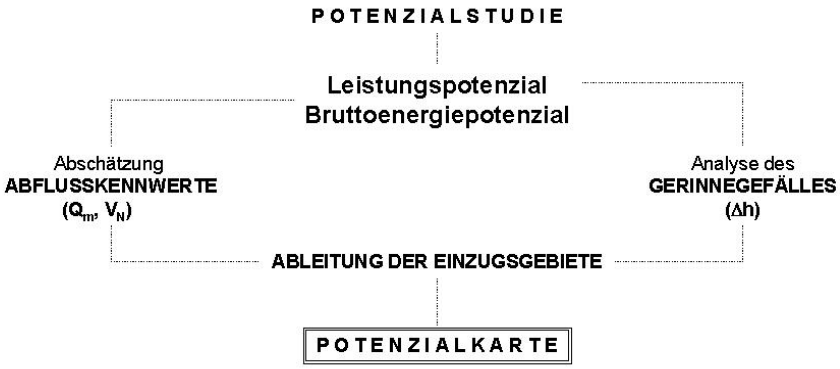


Abbildung 1: Vorgehensweise bei der Top-down Analyse

Die Struktur der Abbildung 1 bildet sogleich die Grundlage für die inhaltliche Gliederung des Teilberichts „Potenzialanalyse Top-down“. Bei jedem Teilschritt werden kurz die Vorgehensweise geschildert, die Resultate diskutiert und Folgerungen in Bezug auf eine Anwendung in anderen Gebieten abgeleitet.

Zur räumlich differenzierten Bestimmung der beiden Grössen P_m und E sind unter anderem auch Analysen mit einem Geographischen Informationssystem (GIS) notwendig. Wir verwendeten für die Analysen vor allem ArcGis (ArcMap, Arc-Workstation). Um die gesteckten Ziele zu erreichen, mussten in mehreren Fällen zusätzliche Analyse-Module programmiert werden. Als Inputdaten für die GIS-Analysen verwendeten wir das digitale Höhenmodell DHM10 (© swisstopo) und das Gewässernetz V25 GWN (© swisstopo).

Die hydrologischen Auswertungen basieren vor allem auf dem Modellsystem PREVAH (Gurtz *et al.* 1997, Zappa 2002, Viviroli *et al.* 2007) sowie auf einer für die Schweiz flächendeckend vorhandenen Abflussmodellierung von Zappa (2002).

Für die Pilotstudie wurde das Einzugsgebiet der Töss gewählt. Als voralpines Gebiet mit einer mittleren Gebietshöhe von 650 m ü. M. (Abflussstation Neftenbach) repräsentiert es einen Raumausschnitt der Schweiz, der für die Kleinwasserkraftnutzung besonders interessant ist. Das Abflussregime der Töss ist pluvial geprägt (Weingartner und Aschwanden 1992). Das Abflussverhalten der Einzeljahre wird demnach stark vom Niederschlagsgeschehen beeinflusst; es variiert relativ stark von Jahr zu Jahr. Gemittelt über mehrere Jahre erhalten wir aber einen relativen ausgeglichenen Jahresgang (Abbildung 2).

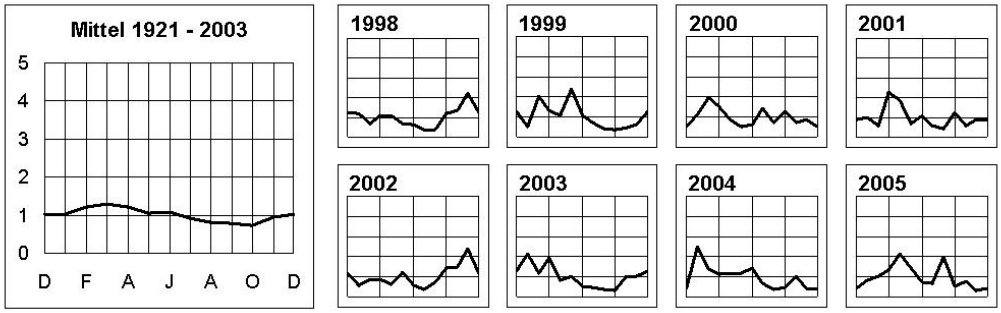


Abbildung 2: Abflussregime der Töss, Mittelwert 1921-2003 und ausgewählte Einzeljahre; Ordinate: Pardé-Koeffizienten; Abszisse: Monate (D: Dezember usf.). Die Pardé-Koeffizienten berechnen sich aus dem Quotienten zwischen dem mittleren Monats- und dem mittleren Jahresabfluss. Ein Koeffizient von 2 bedeutet beispielsweise, dass der Abfluss im betreffenden Monat zwei Mal so gross ist wie der Jahresabfluss

Für die vorliegende Studie besonders wichtig ist, dass das Einzugsgebiet der Töss im Hörnli-Gebiet (Molasse) liegt und somit vor allem im Ober- und Mittellauf stark reliefiert ist. Dies bietet besonders für die automatische Herleitung der Einzugsgebietsgrenzen (Kap. 3.4) und des virtuellen Gewässernetzes (Kap. 3.3.2) aus dem digitalen Höhenmodell entscheidende Vorteile.

3.2 Abschätzung Abfluss

3.2.1 Vorgehensweise und Resultate

Für die Abschätzung des Leistungs- und Energiepotenzials sind möglichst detaillierte hydrologische Grundlagen notwendig (vgl. Abbildung 1). Die wichtigsten Grössen sind der mittlere jährliche Abfluss Q_m und das mittlere jährliche Nutzvolumen V_N. Für die Bestimmung der letzteren Grösse sind Kenntnisse der Dauerkurve notwendig (Abbildung 3).

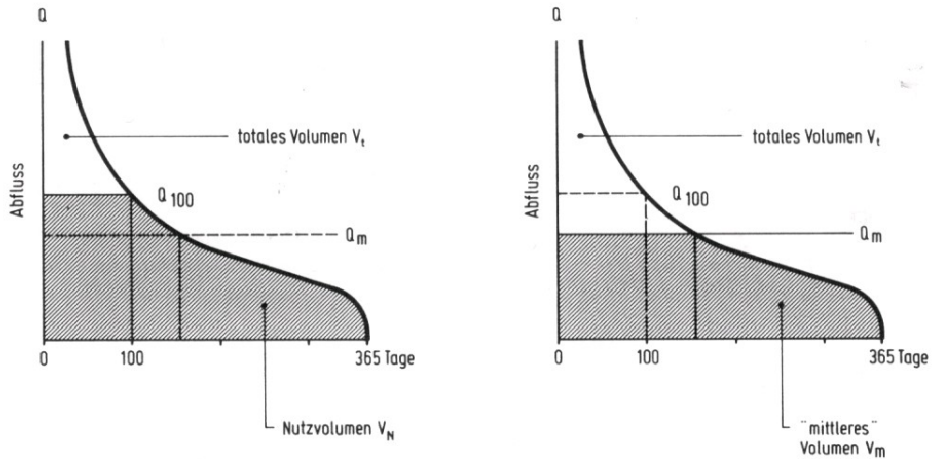


Abbildung 3: Nutzvolumen (V_N) und mittlerer Jahresabfluss (Q_m) (aus BWW 1987)

In der vom BWW (1987) in Auftrag gegebenen Studie im Oberen Toggenburg wurden die beiden Grössen pragmatisch ermittelt, d.h., auf der Basis von Dauerkurven, welche „von inner- und ausserhalb liegenden Messstationen“ hergeleitet wurden. In dieser Abschätzung der hydrologischen Grössen liegt sicherlich noch ein Verbesserungspotenzial, zumal die Hydrologie seit 1987 gerade auf dem Gebiet der Modellentwicklung grosse Fortschritte erzielt hat.

a) Das hydrologische Modellsystem PREVAH

Für die Bereitstellung der Abflusswerte lassen sich neben konventionellen Messdaten oder Resultaten aus Wasserbilanzstudien auch hydrologische Modellsysteme einsetzen. Diese bilden den Wasserhaushalt in mehr oder weniger stark vereinfachter Form ab und erlauben die Bestimmung der entstehenden Abflüsse in räumlich aufgelöster Form.

Ein derartiges Modellsystem ist das **Pre**cipitation-**R**unoff-**Eva**potranspiration-**H**ydrotope Model PREVAH (Gurtz *et al.* 1997, Zappa 2002, Viviroli *et al.* 2007).

Es wird seit vielen Jahren für Einzugsgebiete der Schweiz angewendet und bietet sich durch den daraus entstandenen Erfahrungsschatz auch für den Einsatz im vorliegenden Projekt an.

PREVAH basiert auf dem Prinzip kaskadenartig angeordneter Linearspeicher, welche den Bodenwasserhaushalt sowie die unterschiedlichen Abfluss-komponenten repräsentieren (Abbildung 4); Schneedecke und vergletscherte Flächen werden über spezielle Zusatzmodule nachgebildet.

Der Antrieb von PREVAH erfolgt über sechs meteorologische Grössen (Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit), welche seit den frühen 1980er Jahren durch das automatische Messnetz (ANETZ) der MeteoSchweiz erfasst werden. Bezüglich zeitlicher Auflösung lassen sich alle Komponenten des Wasserhaushaltes in stündlichen Schritten berechnen. Mit PREVAH können demnach die oben erwähnten Kennwerte und die Dauerkurve problemlos bestimmt werden, und zwar auch in räumlich hochaufgelöster Form (s. unten).

Aus Gründen der beschränkten (finanziellen) Ressourcen wurden für diese Vorstudie allerdings nur monatliche und jährliche Mittelwerte (Q_m) berechnet; damit lässt sich nur das Leistungspotenzial P_m bestimmen. Eine Ausweitung auf das Energiepotenzial E, für welches das Nutzvolumen V_N bekannt sein muss (Gleichung 2), ist aber jederzeit möglich.

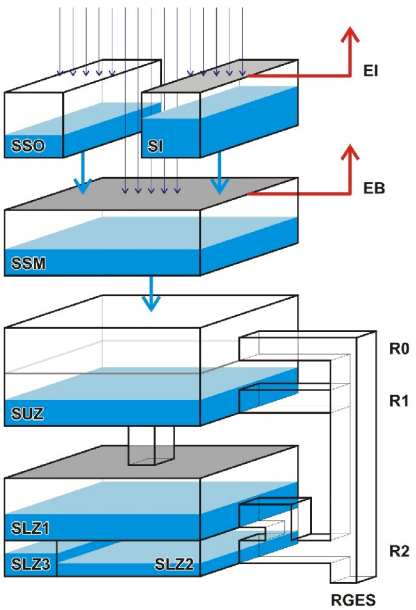


Abbildung 4: Prinzip der kaskadierenden Linearspeicher im hydrologischen Modellsystem PREVAH (aus Viviroli et al. *2007)*

Die räumliche Auflösung von PREVAH ist in erster Linie durch die Verfügbarkeit und Genauigkeit der benötigten physiographischen Grundlagenkarten beschränkt. Limitierend sind diesbezüglich vor allem die Bodeninformationen, welche in der Schweiz in einer Rasterweite von immerhin 100 m x 100 m (0.01 km^2) vorliegen; diese Auflösung wird folglich auch für die Modellierung der Wasserhaushaltskomponenten gewählt. Das heisst explizit, dass Wasserhaushaltskarten in einer Auflösung von 0.01 km^2 erstellt werden können, wovon für die Abschätzung des Wasserkraftpotenzials die Abflusskarten relevant sind.

Da das Modell freie Parameter besitzt, ist im Normalfall eine Kalibration an gemessenen Abflussdaten notwendig; dies beschränkt die Modellanwendung auf Einzugsgebiete, welche über Abflussdaten verfügen. Allerdings ist gegenwärtig eine Erweiterung des Modellsystems in Arbeit, welche die Anwendung auch in ungemessenen Einzugsgebieten erlauben soll (Viviroli 2007).

b) Anwendung von PREVAH in der Pilotregion Töss–Neftenbach („PREVAH detailliert“)

Im Einzugsgebiet der Töss wurde PREVAH für das Gebiet bis zum Pegel Neftenbach kalibriert (vgl. Abbildung 5). Dazu mussten die notwendigen physiographischen und meteorologischen Grundlagen aufbereitet werden. Dies erfolgt über zwei spezielle Teilprogramme des Modellsystems, welche den Benutzeraufwand für die Aufbereitung auf ein Minimum reduzieren. Die Rasterweite des Modells wurde wie oben beschrieben auf 100 m festgelegt. Bei einer modellierten Fläche von 340.4 km^2 (reales Einzugsgebiet: 342 km^2) ergibt dies 34‘040 Rasterzellen. Diese werden anschliessend zu 351 hydrologisch ähnlich reagierenden Teilflächen, sog. Hydrological Response Units (HRU), zusammengefasst, mit welchen das Modell rechnet. Diese Generalisierung reduziert den Rechenaufwand beträchtlich und bedingt kaum Kompromisse in der Güte der Resultate. Trotz dieses modellinternen Aggregationsschrittes sind die resultierenden Karten des Abflusses weiterhin in einer Auflösung von 100 m x 100 m verfügbar.

Als Modellierungszeitraum wurden die Jahre 1983–2001 verwendet, wobei 1983 als „Aufwärmphase“ für das Modell (Füllen der verschiedenen Speicherelemente) dient und nicht weiter betrachtet wird; wie bereits erläutert wird mit einem Zeitschritt von einer Stunde gerechnet. Somit entstehen für insgesamt 18 Jahre Modellresultate, aus welchen beliebige hydrologische Kenngrössen berechnet und daraus hydrologische Karten abgeleitet werden können (Abbildung 5). Diese Karten liegen in einem leicht weiter verwendbaren Dateiformat vor, welches sich problemlos in Geographische Informationssystemen (GIS) importieren lässt.

Die erreichte Güte der Modellierung kann für das Einzugsgebiet der Töss, Neftenbach, als sehr gut bezeichnet werden. Für das Gütemass von Nash und Sutcliffe (1970) errechnet sich für den Abfluss ein Wert von 0.86, bei einem Maximum des Gütemasses von 1 und einem Minimum bei -∞; ein Wert von 0 wird erreicht, wenn der Jahresmittelwert des Abflusses als einziger Wert verwendet wird.

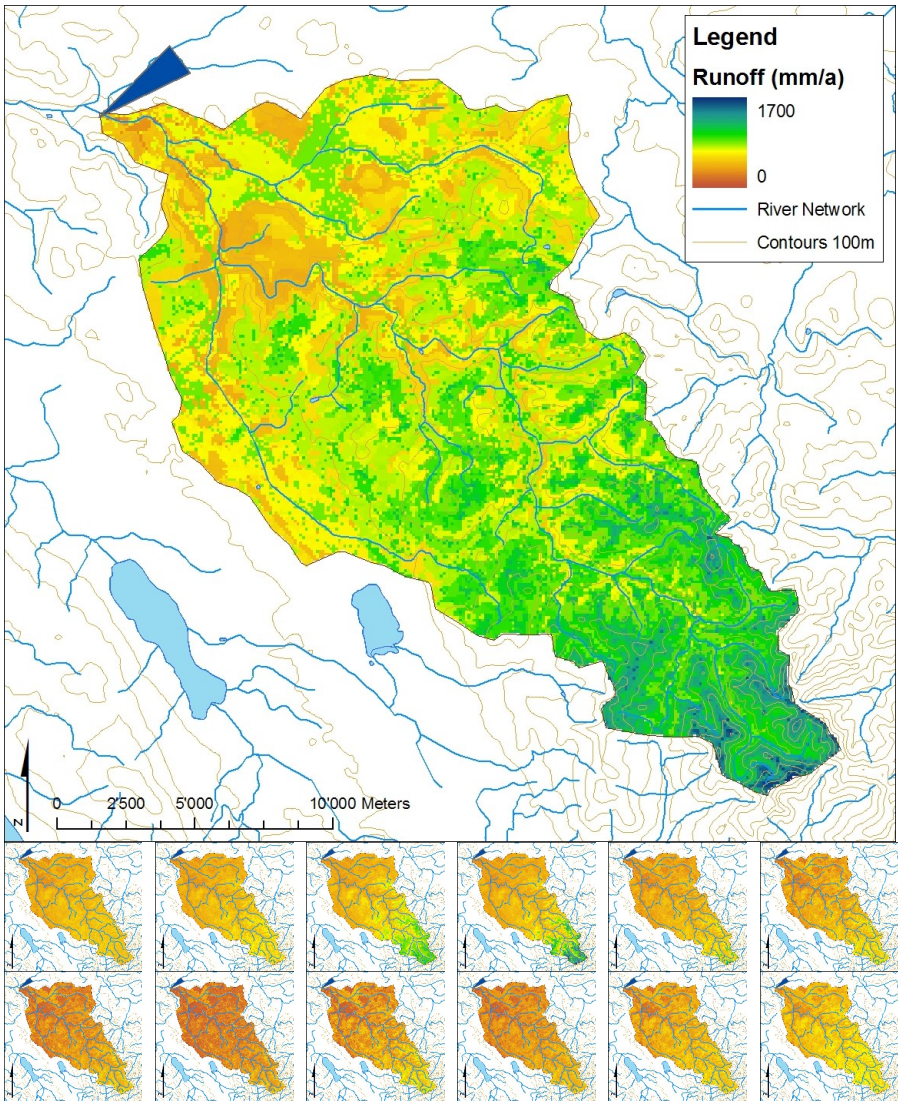


Abbildung 5: Töss–Neftenbach (342 km^2), mit PREVAH modellierter Abfluss; Jahresmittel 1984–2001 (oben) und Monatsmittel 1984–2001 (unten; in horizontaler Abfolge Januar bis Juni und Juli bis Dezember) mit Rastergrösse 100 m×100 m.

c) Anwendung von PREVAH in weiteren Gebieten

Grundsätzlich ist PREVAH für beliebige mesoskalige Einzugsgebiete der Schweiz einsetzbar, wobei bei Gebieten mit einer kleineren Einzugsgebietsfläche bei der Genauigkeit des Modellantriebes mit grösseren Problemen (vor allem Niederschlag) zu rechnen ist. Als Untergrenze der Gebietsgrösse muss aufgrund unserer Erfahrungen etwa 15 km^2 angenommen werden.

Der Aufwand für die Aufbereitung des Modells für ein neues Einzugsgebiet hängt wesentlich davon ab, ob für das betreffende Gebiet bereits ein kalibrierter Satz der freien Modellparameter vorliegt. Ist dies der Fall, ist die einzusetzende Vorbereitungszeit gering und beschränkt sich im wesentlichen auf die Rechenzeit für die Interpolation des Modellantriebs.

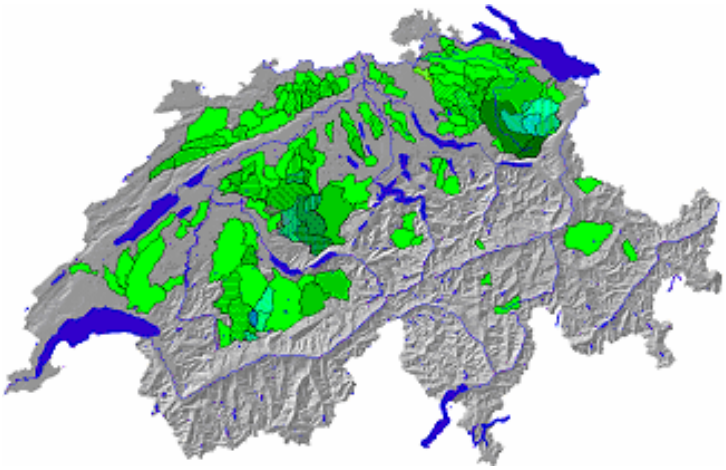


Abbildung 6: Für die Anwendung von PREVAH kalibrierte Einzugsgebiete- Stand Winter 2005/2006 (Viviroli 2007)

Für die Schweiz liegt inzwischen eine Datenbank mit kalibrierten Parametersätzen vor, welche bereits ca. 150 mittelgrosse Einzugsgebiete umfasst und einen beträchtlichen Teil der nordalpinen Schweiz abdeckt (Abbildung 6). Existiert für das fragliche Gebiet noch kein kalibrierter Parametersatz, hängt der Aufwand vom Vorhandensein von Abflussdaten und von der angestrebten Genauigkeit ab: Liegen mindestens fünf Jahre Abflussdaten vor, kann eine Modellkalibrierung vorgenommen werden. Diese läuft halbautomatisch ab und dauert je nach Gebietsgrösse einige Stunden bis Tage, wobei Zwischen- und Endresultate der Kalibration kontrolliert werden müssen. Von den so erreichten Modellresultaten kann eine hohe Verlässlichkeit erwartet werden.

Ist eine Modellierung aufgrund der Datenlage nicht möglich, so bestehen verschiedene Alternativen, um die gesuchten hydrologischen Grössen mit relativ

geringem Aufwand abzuschätzen: z.B. BWW 1987; Weingartner und Aschwanden 1992; Schädler und Weingartner 2002. Je nach Zielgrösse und Region sind hier nur noch befriedigende Resultate zu erwarten. Wenn sich das Interesse allerdings nur auf Monats- oder Jahresmittelwerte des Abflusses beschränkt, liegen die zu erwartenden Fehler durchaus noch in einem vertretbaren Rahmen.

d) Anwendung des "Schweiz-Modells" von Zappa (2002) („PREVAH flächendeckend)

Im Gegensatz zur oben beschriebenen, auf einzelne Einzugsgebiete ausgerichteten Modellierung ("PREVAH detailliert") hat Zappa (2002) eine Modellierung des Abflusses für die gesamte Fläche der Schweiz durchgeführt. Bei einer räumlichen Auflösung von 500 m x 500 m wurde das Modell mit klimatischen Inputs im Tagesschritt angetrieben. Die Interpolation der klimatologischen Eingangsgrössen erfolgte jeweils gesondert für neun Klimaregionen der Schweiz und wurde anschliessend innerhalb der Regionen auf ca. 2500 klimatische Untereinheiten mit einer mittleren Fläche von etwa 16 km^2 heruntergebrochen. Da bei dieser Modellierung keine direkte Kalibration auf eine gemessene "Realität" vorgenommen werden konnte, musste das Modell exemplarisch an 33 repräsentativen Abflussmessstationen kalibriert werden. Als Kalibrationsgrundlage dienten dabei nicht absolute Werte des gemessenen Abflusses, sondern dimensionslose Koeffizienten, welche den langjährigen mittleren monatlichen Gang des Abflusses beschreiben. Die langjährigen absoluten Monatsmittel des gemessenen Abflusses wurden zur Validierung des Modells verwendet.

Aus den Modellresultaten wurden langjährige Jahres- und Monatsmittelwerte für die Periode 1980–2000 berechnet. Entsprechend den bei der Modellkalibration nötigen Kompromissen ist von den Resultaten eine wesentlich geringere Detailzuverlässigkeit zu erwarten als beim Modell "PREVAH detailliert". Problematisch ist vor allem die Erfassung des Zeitpunktes, an dem die Schneeschmelze im Frühling beginnt; zudem wird in alpinen und voralpinen Einzugsgebieten der Winterniederschlag teilweise unterschätzt, teilweise überschätzt. PREVAH kann aber auch in dieser Anwendung die wesentlichen Prozesse des Wasserhaushaltes mit befriedigender bis guter Qualität wiedergeben. Wenn flächendeckende Werte für den Abfluss der Schweiz gefordert sind, ist die geringere lokale Genauigkeit vertretbar.

Da die Resultate dieser Modellierung bereits als Datensatz vorliegen (vgl. Abbildung 7), ist eine Anwendung für beliebige Gebiete ohne weiteren Aufwand

möglich. Konkret können aus diesem Datensatz Q_m-Werte für die ganze Schweiz in einer Auflösung von 500 m · 500 m bezogen werden.

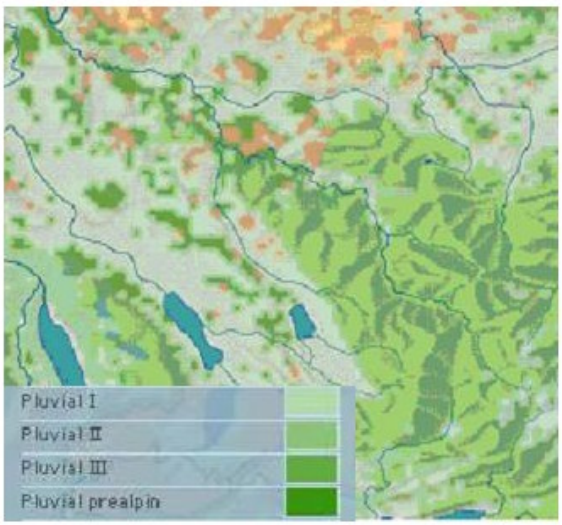


Abbildung 7: Ausschnitt aus dem Abflussdatensatz von Zappa (2002) (aus Atlas der Schweiz)

3.2.2 Folgerungen

Im Einzugsgebiet der Töss ergaben beide hydrologischen Modellanwendungen hervorragende Ergebnisse. Beim Jahresabfluss ist die Abweichung des flächendeckenden Modells fast ebenso gering wie diejenige der detaillierten Version (vgl. Tabelle 7). In anderen Regionen muss bei “PREVAH flächendeckend” mit grösseren Abweichungen gerechnet werden.

	PREVAH detailliert	PREVAH flächendeckend
Periode	1984–2001	1980–2000
Simulation	735 mm/a	737 mm/a
Messung	741 mm/a	730 mm/a
Differenz	6 mm/a (-0.8%)	7 mm/a (1%)

Tabelle 7: Vergleich der simulierten mittleren jährlichen Abflüsse für Töss–Neftenbach mit den gemessenen Werten

Das hydrologische Modellsystem PREVAH eignet sich bei der Anwendung auf ausgewählte Einzugsgebiete sehr gut für detaillierte Analysen, die zur Erhebung der Dauerkurve und damit des Energiepotenzials E notwendig sind. Dieses Vorgehen („PREVAH detailliert“) ist vor allem für die Betrachtung von Kernregionen zu empfehlen.

Sollen hingegen flächendeckende Betrachtungen für die ganze Schweiz erfolgen, ist der Datensatz von Zappa (2002) vor allem aus Gründen des Aufwands geeigneter („PREVAH flächendeckend“); die komplette räumliche Abdeckung ist allerdings mit einer Einbusse an Genauigkeit und räumlicher Auflösung zu erkaufen.

3.3 Analyse des Gerinnegefälles

3.3.1 Vorgehensweise und Resultate

Der digitale Datensatz V25 GWN (© swisstopo) bildet den Ausgangspunkt für die Gefälleanalyse des Gerinnenetzes. Dieser Datensatz entspricht der Gewässerinformation der analogen Landeskarte 1:25‘000.

a) Datenbereinigung

Bevor die eigentlichen Auswertungen durchgeführt werden konnten, musste der Datensatz V25 GWN bereinigt werden. Die drei wichtigsten Bereinigungsschritte werden im Folgenden kurz erläutert:

1.) Als erstes müssen die überflüssigen Daten des digitalen Gewässernetzes – also z.B. Seen und Druckleitungen – gelöscht werden. In ArcGis werden dazu Daten mit den Namen „See“, „Seeinsel“, „Druckl1“ und „Druckl2“ über die OBJECTVAL-Attributklasse ausgewählt und entfernt. Die Arbeit wesentlich erleichtern würde ein weiterer Attributsatz in den Ausgangsdaten, über den natürliche Fliessgewässer direkt und ohne Umweg über die OBJECTVAL-Klasse identifiziert werden könnten.

2.) In einem zweiten Schritt sind die Fliessgewässer zu lokalisieren, die über Einzugsgebietsgrenzen hinweg fliessen und damit nicht plausibel sind. Zur Kontrolle ist eine Karte im Massstab 1:25000 beizuziehen.

3.) In einem dritten Schritt wird mit dem Hilfsprogramm SWAPFLOZ[2] (Daten-Interface: .e00) die Fliessrichtung des Gewässernetzes überprüft; bergwärts fliessende Gewässer werden lokalisiert und gedreht. Ebenfalls mit SWAPFLOZ geschieht die Zuordnung der sog. Flussordnungszahl nach Strahler.[3] Auch hier ist eine manuelle Kontrolle notwendig, um allfällige Bifurkationen auszuschliessen. Beim Export aus SWAPFLOZ werden dem Gewässernetz die Attribute der Flussordnungszahl (FLOZ-VAL) hinzugefügt. Für die KWKW-Potenzialberechnung kann die Flussordnungszahl zum Abwärtsverfolgen der Flussabschnitte weiterverwendet werden.

Die manuelle Kontrolle und Bereinigung der Daten ist unbedingt notwendig. Der Arbeitsaufwand für das Tössgebiet (342 km^2) betrug rund acht Stunden; er hängt natürlich entscheidend von der Fehlerquelle der Daten und der Genauigkeit der Bearbeitung ab. Insgesamt ist also der Korrekturaufwand nicht zu unterschätzen; Bei flacher Topographie (Mittelland!) dürfte er noch um einiges grösser sein.

b) Herleitung des Gerinnegefälles und der Bruttofallhöhe

Zur Bestimmung des Gerinegefälles bzw. der Bruttofallhöhe (Δh) müssen neben dem Datensatz V25 GWN (Gewässernetz) auch ein digitales Höhenmodell (DHM) vorliegen. Mittels Höhenextraktion lassen sich daraus für den Anfangs- und Endpunkt eines Gerinneabschnitts die absolute Höhe [m ü. M.] und die Bruttofallhöhe bestimmen. Als digitales Höhenmodell steht uns das DHM10 (© swisstopo) zur Verfügung. Es besitzt eine Auflösung von 10 m x 10 m. Die Höhengenauigkeit liegt im Zentimeter-Bereich. DHM10 und V25 GWN wurden seinerzeit unabhängig voneinander erhoben. Daher haben sich einige Unstimmigkeiten eingeschlichen, die bei der gemeinsamen Auswertung der beiden Datensätze zu Problemen führten:

- Zahlreiche Flüsse fliessen leicht versetzt am Hang anstatt in der Talsohle (Abbildung 8 und Abbildung 9);
- Rund 10% der Gerinneabschnitte weisen ein gegenläufiges Gefälle auf, d.h., der Bach oder Fluss fliessen hier aufwärts, was natürlich nicht der Realität entspricht (vgl. Tabelle 8). Die Fehlerquote hängt von der Abschnittslänge ab; sie ist bei kleinen Abschnitten grösser, da hier die Höhenunterschiede zwischen Anfangs- und Endpunkt weniger ausgeprägt sind.

---

[2] programmiert von Hubert Gerhardinger, GIUB

[3] Definition Flussordnungszahl: *Ausgegangen wird von den Quellabschnitten, welchen die Ordnungszahl 1 zugewiesen wird. Beim Zusammenfluss zweier Gewässerabschnitte erfolgt eine Erhöhung der Ordnungszahl um eins, wenn die zwei Abschnitte eine gleiche Ordnungszahl aufweisen, andernfalls wird die höhere Ordnungszahl weitergeführt.*

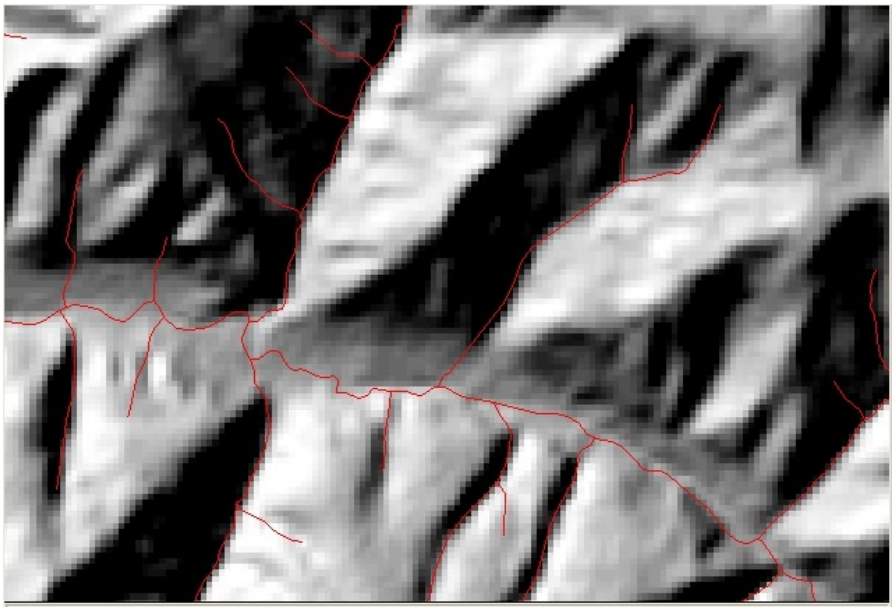


Abbildung 8: Ausschnitt aus ARCINFO, vergrösserte Darstellung V25 GWN (rot) und DHM10 (als Hillshade). Die Fehler, die sich durch nicht zusammenpassende Datensätze ergeben, sind deutlich erkennbar

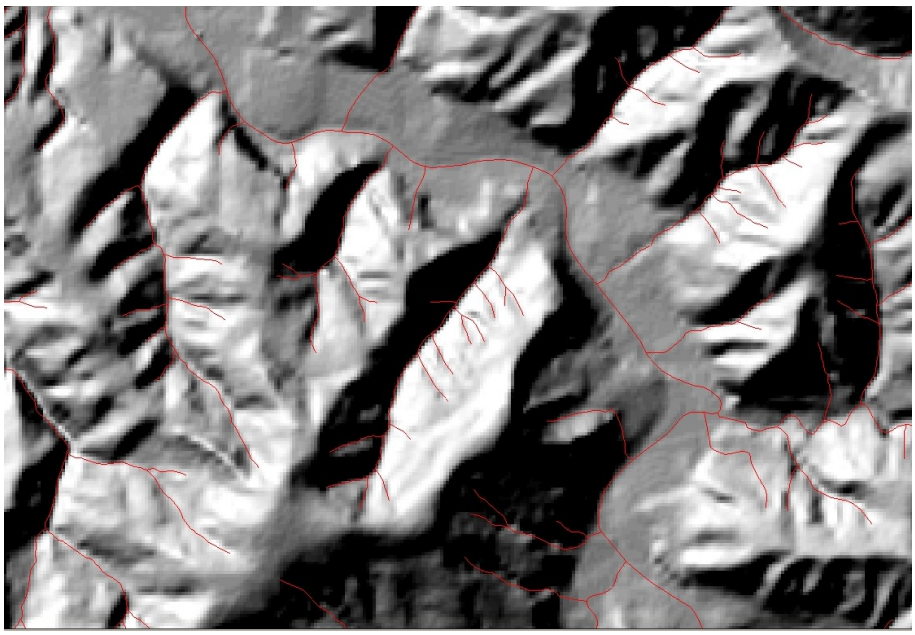


Abbildung 9: Ausschnitt aus ARCINFO, vergrösserte Darstellung V25 GWN (rot) und DHM10 (als Hillshade). Die Fehler, die sich durch nicht zusammenpassende Datensätze ergeben, sind deutlich erkennbar

c) Auswertung der Gerinneabschnittslängen

Für die Kleinwasserkraftnutzung müssen eher kurze Gerinneabschnitte in Betracht gezogen werden. Es wurde versucht, eine für die Potenzialstudie ideale Abschnittslänge zu ermitteln. Die ideale Abschnittslänge ist eine Kombination aus einer möglichst hohen Auflösung (kleinen Abschnittslänge) und einer möglichst geringen Fehlerquote. Da ArcGis die Funktion zur Unterteilung des Gewässernetzes in Teilstücke nicht bietet, geschah dies mit Hilfe des Programms DENSIFY[4] (Daten-Interface: Generate File). Dabei kann die Abschnittslänge in beliebiger Länge [m] gewählt werden. Die weitere Auswertung und Verarbeitung erfolgte dann wieder mit ArcGis: Mit einem Skript wurde den neu entstandenen Nodes die Höhe aus dem Höhenmodell DHM10 zugewiesen (fhoe (Höhe des Anfangspunktes [m ü. M.]), thoe (Höhe des Endpunktes [m ü. M.])). Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die Resultate, welche wir oben bereits besprochen haben. Abbildung 10 stellt insbesondere den Anteil der aufwärts fliessenden und damit fehlerhaften Abschnittslängen grafisch dar. Es fällt auf, dass die Fehlerquote ab einer Abschnittslänge ≥ 100 m nicht mehr entscheidend abnimmt. Eine Abschnittslänge von 100 m entspricht somit den formulierten Kriterien einer idealen Abschnittslänge. Eine Aggregierung zu längeren Abschnitten (> 100 m) ist stets noch möglich. Bei einer Abschnittslänge von 100 m beträgt die Fehlerquote 5.54%. Die Höhendifferenz bei aufwärts fliessenden Flussabschnitten wird für die spätere Auswertung des Wasserkraft-Potenzials auf den kleinsten in den Daten festgehaltenen positiven Wert gesetzt.

Abschnitts-länge [m]	Anzahl Abschnitte (Arcs)	Aufwärts fliessende Abschnitte (fhoe < thoe)		Ohne Gefälle (fhoe = thoe)		fallende Abschnitte (thoe < fhoe)	
		Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
50	21839	1564	7.16	1190	5.45	19085	87.39
75	15152	940	6.20	649	4.28	13563	89.51
100	11745	651	5.54	399	3.39	10695	91.06
150	8379	388	4.63	231	2.76	7760	92.61
200	6716	276	4.10	159	2.37	6281	93.52
300	5131	183	3.57	84	1.64	4864	94.80
400	4435	143	3.22	64	1.44	4228	95.33
500	4059	128	3.15	56	1.38	3875	95.47

Tabelle 8: Auswertung der Gerinneabschnittslängen der Töss. Die Fehlerquelle liegt in den aufwärts fliessenden Abschnitten, bei denen der Ausgangspunkt fhoe tiefer liegt als der Endpunkt thoe

[4] programmiert von Hubert Gerhardinger, GIUB

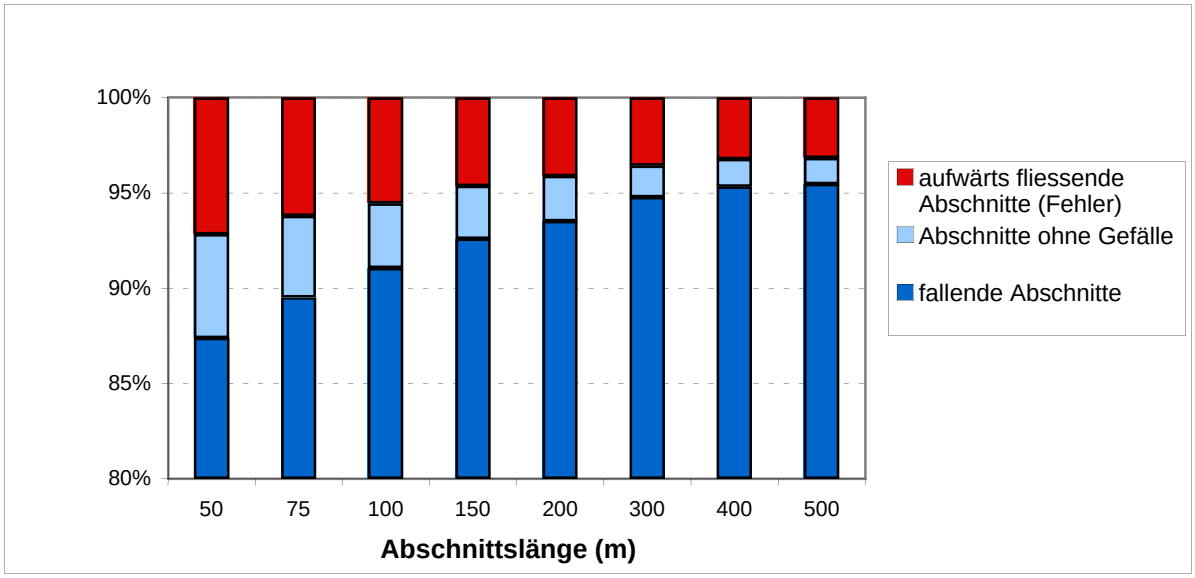


Abbildung 10: Auswertung der Gerinneabschnittslängen der Töss.

3.3.2 Folgerungen

a) Mangelhafte Datenlage

Bei der Bestimmung der Gerinnabschnitte bzw. des Gerinnegefälles und der Bruttofallhöhe sind verschiedene datenimmanente Fehler aufgetreten:

- Allgemeine, systematische Fehler: nicht zusammenpassende Datensätze wegen der unabhängigen Datenerhebung.
- Spezifische Fehlerquelle: Bei „aufwärts fliessenden“ Gerinneabschnitten wurde die Höhendifferenz auf den kleinsten in den Daten festgehaltenen positiven Wert gesetzt.

Insgesamt ist die Datenlage als mangelhaft zu beurteilen. Die Berechnung der Gerinnekennwerte ist mit grösseren Fehlern behaftet. Zudem erfordert die Nachbearbeitung der Daten einen beträchtlichen manuellen Aufwand.

b) Generierung eines virtuellen Gewässernetzes

Um besser zusammenpassende Datensätze zu erhalten, wurde das Gewässernetz in ArcGis virtuell erstellt. „Virtuell“ bedeutet, dass das Gewässernetz aus der Topographie direkt abgeleitet wurde. Grundlage dazu bildet das DHM10.

In einem Testgebiet innerhalb des Töss-Einzugsgebiets (vgl. Karte am Schluss des Kapitels 5) wurde ein virtuelles Gewässernetz berechnet.[5] Dies geschieht in ArcMap mit folgenden Schritten:

1) DHM-Korrektur: Spatial Analyst Tools → Hydro → Fill
   Input: DHM Testgebiet
   Output: DHM_fill

2) Flow Direction: Spatial Analyst Tools → Hydro → Flowdirection
   Input: DHM_fill
   Output: Flowdir_fill

3) Flow Accumulation: Spatial Analyst Tools → Hydro → Flow Accumulation
   Input: Flowdir_fill
   Output: FlowAcc_flow

Mit dem Raster Calculator wurde der Schwellenwert der Entwässerung und somit der Dichte des virtuellen Gewässernetzes berechnet. Verschiedene Tests zeigten, dass ein Schwellenwert von 175 ein virtuelles Gewässernetz ergibt, das dem natürlichen am ähnlichsten ist. Das Gewässernetz wurde anschliessend automatisch vektorisiert und dabei gleichzeitig generalisiert. Danach war eine erneute Überprüfung der Fliessrichtung mit dem Programm SWAPFLOZ notwendig (vgl. Kap. 3.3.1). Die Höhenzuweisung zu den Gerinneabschnitten geschah analog wie beim natürlichen Gewässernetz. Die Attribute für Gefälle und Bruttofallhöhe wurden den jeweiligen Abschnitten hinzugefügt.

Tabelle 9 zeigt einen Vergleich des natürlichen (V25 GWN) und des virtuellen Gewässernetzes. Das virtuelle Gewässernetz zeigt eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Datensatz V25 GWN. Für die KWKW-Potenzialberechnung ist daher das virtuell erstellte Gewässernetz basierend auf dem DHM10 zu benutzen.

Typ Gewässernetz (GWN)	Anzahl Abschnitte	Aufwärts fliessende Abschnitte	
		Anzahl	%
Natürliches GWN (V25 GWN)	4588	202	4.4
Virtuelles GWN	4348	58	1.33

Tabelle 9: Vergleich des natürlichen und virtuellen Gewässernetzes im Testgebiet innerhalb des Einzugsgebiets der Töss.

5 Um den Aufwand in Grenzen zu halten, mussten diese Berechnungen auf ein Teileinzugsgebiet der Töss beschränkt werden

Der Ansatz über das virtuelle Gewässernetz ist nur in Gebieten erfolgreich, die – wie das Tössgebiet – stärker reliefiert sind, also im Alpen und Voralpenraum. In mittelländischen Einzugsgebieten stösst der Ansatz über eine Berechnung des virtuellen Gewässernetzes wegen des wenig ausgeprägten Reliefs rasch an Grenzen. Aber auch der konventionelle Weg, also die Kombination von DHM und V25 GWN, ist in diesen Gebieten noch fehleranfälliger als in der Töss.

3.3.3 Gefälleanalyse auf der Basis des virtuellen Gewässernetzes im Testgebiet der Töss

Auf der Grundlage des virtuellen Gewässernetzes wurden die Gefälleverhältnisse im Testgebiet innerhalb der Töss analysiert. Als Abschnittslänge wurde 100 m gewählt. Abbildung 11 zeigt die prozentuale Verteilung des Gefälles.

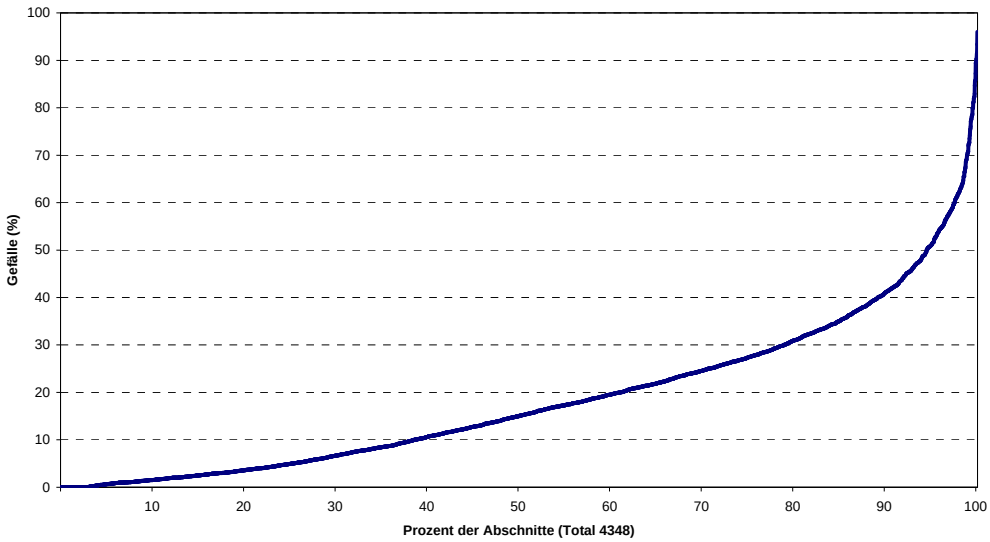


Abbildung 11: Analyse des Gefälles auf der Grundlage des virtuellen Gewässernetzes im Testgebiet der Töss.

Die wichtigsten Kennzahlen der Länge, des Gefälles und der Bruttohöhe der Gerinneabschnitte werden nachfolgend aufgeführt:

<u>Abschnittslängen:</u>

Anzahl Abschnitte: 4348
Mediane Länge: 99.99 m
Mittlere Länge: 86.70 m

Maximale Länge: 121 m
Minimale Länge: 5 m
Standardabw. 24.82m

Es mag auf den ersten Blick erstaunen, dass die mittlere, maximale und minimale Abschnittslänge nicht 100 m betragen, obwohl für die Gefälleanalyse eine Abschnittslänge von 100 m gewählt wurde. Diese Abschnittslänge gilt aber nur für Bach- und Flussabschnitte, bei denen keine Seitenarme münden. Sobald ein Seitenarm zufliesst bzw. zwei oder mehrere Bäche zusammenfliessen, wird ein Abschnittsende festgelegt, so dass sich unterschiedlich lange Gerinneabschnitte ergeben.

Gefällsverhältnisse der Gerinneabschnitte:

Anzahl Abschnitte: 4348
Medianes Gefälle: 15.03%
Mittleres Gefälle: 18.61 %
Maximales Gefälle: 96 %
Minimales Gefälle: 0 %
Standardabweichung 16.5 %

Höhendifferenz der Gerinneabschnitte:

Anzahl Abschnitte: 4348
Mediane Differenz: 12.4 m
Mittlere Differenz: 16.4 m
Maximale Differenz: 91.6 m
Minimale Differenz: 0 m
Standardabweichung 15.64 m

3.4 Ableitung des Einzugsgebietes

Für jeden Gerinneabschnitt (Länge 100 m) ist nun in einem nächsten Schritt das zugehörige hydrologische Einzugsgebiet zu ermitteln. Dieses wird dann mit den hoch aufgelösten Abflussdaten im GIS überlagert, um so die hydrologischen Kenngrössen Q_m und V_N zu bestimmen (vgl. Abbildung 1).

3.4.1 Vorgehensweise und Resultate

a) Generierung der Einzugsgebiete auf der Basis von Gewässernetz (V25 GWN) und Geländemodell (DHM10)

Im vorliegenden Fall wurden die Einzugsgebiete von Punkten aus bestimmt, an denen sich das Gewässernetz verzweigt (vgl. Abbildung 12). Damit lassen sich für diese Punkte die notwendigen hydrologischen Kenngrössen berechnen. Diese können wiederum auf die dazwischenliegenden Gerinneabschnitte interpoliert werden. Dies geschieht extern mit dem Programm QCORRECT.[6] Damit wird eine Potenzialabschätzung für jeden Gerinneabschnitt möglich.

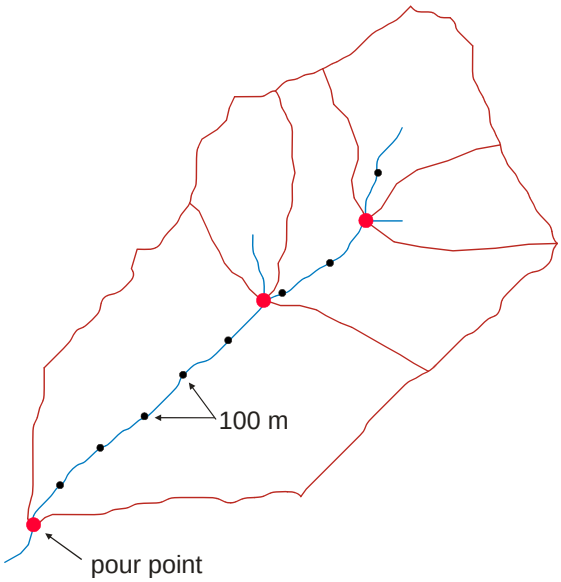


Abbildung 12: Berechnungsprinzip für Einzugsgebiete (eigene Darstellung)

Die Berechnung der Einzugsgebiete wird in zwei Schritten ausgeführt:

- In einem ersten Schritt werden durch ein eigens dafür erstelltes Programm die Punkte, bei denen mindestens zwei Gewässernetzvektoren (Arcs) zusammentreffen, aus dem Gewässernetz extrahiert. Sinnvollerweise wird diesen so genannten Ausflusspunkten oder Pour Points die Meereshöhe aus dem Geländemodell zugewiesen.

- In einem zweiten Schritt werden mit ArcGis aus dem Geländemodell und den Ausflusspunkten mittels der Operation „Watershed“ die Einzugsgebiete berechnet. Zur Analyse ist eine Konvertierung in Vektordaten notwendig.

[6] programmiert von Hubert Gerhardinger

b) Probleme bei der Einzugsgebietsberechnung

Wie in Abbildung 13 unschwer zu erkennen ist, häufen sich die Fehler in den berechneten Einzugsgebieten. Neben kleinen, unlogischen Teilflächen und der Rasterung folgenden Einzugsgebietsgrenzen sind auch Gewässer zu beobachten, die über Einzugsgebietsgrenzen fliessen. Im oberen (südlichen) Teil des Töss-Einzugsgebietes kann eine leichte Qualitätssteigerung aufgrund des stark reliefierten Geländes festgestellt werden. Die auftretenden Probleme sind vor allem auf die in Kap. 3.3 beschriebene Lagediskrepanz der zu Grunde liegenden Gewässernetz- und Geländemodelldaten zurückzuführen. Basierend auf diesen Datensätzen kann somit keine sinnvolle Einzugsgebietsanalyse durchgeführt werden.

c) Korrekturansätze

Es stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Auswahl, um die Berechnung der Einzugsgebiete zu verbessern:

1) Standortkorrektur der Ausflusspunkte: Anhand der GIS-Funktion „Snap Point“ werden die Ausflusspunkte innerhalb einer manuell gewählten Pufferdistanz an geeignetere Orte verschoben. Die im Fallbeispiel in Abbildung 13 berechneten Einzugsgebiete (50 m Snap Toleranz) lassen auf eine Erhöhung der Qualität schliessen, doch weisen sie immer noch viele Fehler auf.

2) Manuelle Korrektur: Die fehlerhaften Einzugsgebiete werden manuell korrigiert.

Abbildung 13: Einzugsgebiete berechnet aus den Pour Points (linke Darstellung) und aus den Snap Points mit 50 m Toleranz (rechte Darstellung)

c) Arbeitsaufwand

Die automatische Einzugsgebietsberechnung nach dem im Kap. 3.4.1a) geschilderten Vorgehen betrug im Fall der Töss maximal einen halben Tag, sofern das Programm zur Ausflusspunktselektion (NODE EXTRACTION[7]) zur Verfügung steht. Der Aufwand, um das ganze Einzugsgebiet der Töss von fehlerhaften Teileinzugsgebieten manuell zu bereinigen, beträgt dann schätzungsweise mindestens zwei Personenwochen; er ist damit im Hinblick auf eine gesamtschweizerische Analyse viel zu hoch!

3.4.2 Folgerungen

a) Mangelhafte Datenlage

Aus den genannten Gründen kann mit den konventionellen Datensätzen (Gewässernetz V25 GWN) und Geländemodell (DHM10) nicht kombiniert gearbeitet werden. Es soll deshalb wiederum auf ein virtuelles Gewässernetz ausgewichen werden.

b) Generierung der Einzugsgebiete auf der Basis des Geländemodells (DHM10) und eines virtuellen Gewässernetzes

1) Berechnung des virtuellen Gewässernetzes, das aus dem Höhenmodell DHM10 generiert wird (vgl. Kap. 3.3.2). Die Abdeckung des ursprünglichen Gewässernetzes (Dichte) kann manuell eingestellt werden (vgl. Abbildung 14).

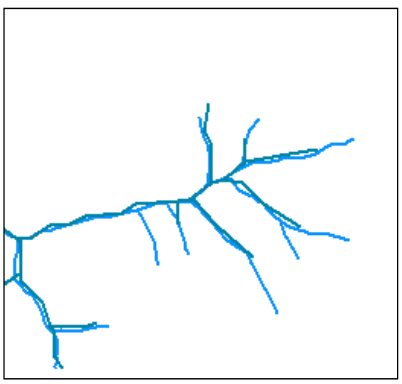


Abbildung 14: Vergleich der Gewässernetzvektoren (V25 GWN; blau) mit dem virtuellen Gewässernetz (schwarz); gleicher Ausschnitt wie Abbildung 13

[7] programmiert von Hubert Gerhardinger

2) Einzugsgebietsberechnung: Es wird das gleiche Vorgehen wie oben gewählt. Die Bestimmungspunkte werden dort gewählt, wo mindestens zwei Gewässernetzvektoren zusammentreffen (Abbildung 15).

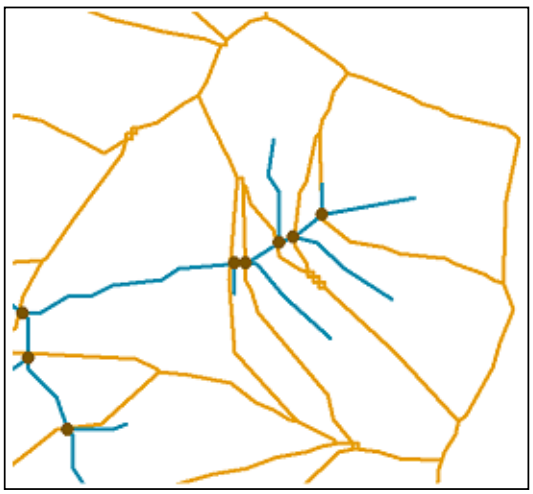


Abbildung 15: Einzugsgebiete berechnet aus dem virtuellen Gewässernetz

Auch diese Vorgehensweise erweist sich als schwierig. Das Hauptproblem liegt in unabgeschlossenen, ineinander übergehenden Einzugsgebieten, dies vor allem in Bereichen mit einer hohen Flussmündungsdichte. Eine manuelle Nachbearbeitung ist auch hier nötig.

Die Generierung von Einzugsgebieten auf der Basis von Gewässernetz V25 GWN und Geländemodell DHM10 kann nicht empfohlen werden. Die Berechung auf der Basis von Höhenmodell (DHM10) und einem virtuellen Gewässernetz erreicht eine höhere Qualität, ist aber ebenfalls nicht fehlerfrei. Es drängt sich auch hier eine manuelle Nachbearbeitung der Einzugsgebietsgrenzen und eine Reduktion der Bestimmungspunkte auf. Der Arbeitsaufwand ist selbst für ein kleineres Einzugsgebiet wie jenes der Töss nicht zu unterschätzen.

Die hier vorgestellten Analysen bleiben zudem auf alpine und voralpine Gebiete beschränkt. Für eine GIS-gestützte Einzugsgebietsgenerierung ist das Mittelland eindeutig zu wenig reliefiert.

3.5 Erstellen der Potenzialkarte

Durch die manuelle Nachbereitung konnten nun für alle Gerinneabschnitte die Einzugsgebietsflächen bzw. die zugehörigen Zwischeneinzugsgebiete bestimmt werden (s. Karte „Einzugsgebietsgrenzen“). Somit sind alle Grundlagen vorhanden, um die Potenzialkarten GIS-gestützt herzustellen.

a) Karte des mittleren natürlichen Leistungspotenzials

Die Karte „Mittleres natürliches Leistungspotenzial“ basiert auf der Berechungsformel in Gleichung 1. Sie zeigt das Leistungspotenzial am unteren Ende jedes Gerinneabschnittes, welche in der Regel eine Länge von 100 m aufweisen. Die Potenzialwerte wurden klassiert, um die Übersichtlichkeit und Lesbarkeit der Karten zu erhöhen. Es können nun insbesondere jene Abschnitte identifiziert werden, welche ein hohes Potenzial aufweisen und damit für die Wasserkraftnutzung besonders geeignet sind (wobei Fragen der Zugänglichkeit etc. nicht beurteilt wurden). Diese Abschnitte liegen einerseits am „Hauptfluss“, wo die grosse mittlere Abflussmenge entscheidend ist, und andererseits in den südlichen Teilen des Testgebietes, wo eine Kombination grosser Abflüsse und hoher Reliefenergie vorliegt.

Diese Karte soll nun weiter ausgewertet werden, um eine Übersicht über das Leistungspotenzial zu erhalten. Im Testgebiet wurden rund 4'600 Gewässerabschnitte ausgeschieden. Für jeden Abschnitt konnte das Potenzial berechnet werden. In Abbildung 16 sind diese Potenziale der Grösse nach geordnet. Der Abschnitt mit dem grössten Potenzial erreicht einen Wert von rund 300 kW; das mittlere Potenzial eines Abschnittes liegt bei 5,9 kW. Multipliziert man diesen Wert mit der Anzahl Gewässerabschnitte – nimmt man also an, dass alle 4600 Abschnitte genutzt werden (was natürlich unrealistisch ist) – so erhält man für das Testgebiet einen Maximalwert von rund 27'000 kW.

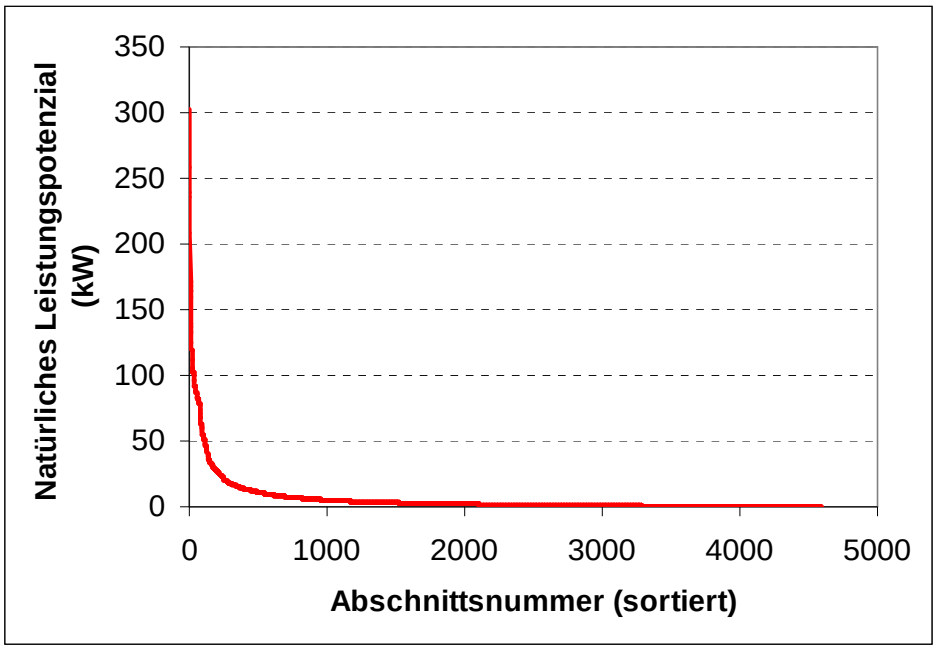


Abbildung 16: Natürliches Leistungspotenzial der Gewässerabschnitte, sortiert nach der Grösse des Leistungspotenzials

Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf die 100 Gewässerabschnitte mit dem höchsten natürlichen Leistungspotenzial (Abbildung 17). Würde man z.B. die 10 Abschnitte mit dem höchsten Leistungspotenzial nutzen, ergäbe sich ein Potenzial von rund 2000 kW, also rund 200 kW pro Gewässerabschnitt. Für die 100 produktivsten Gewässerabschnitte erhalten wir ein Total von rund 10‘000 kW oder 100 kW pro Abschnitt. Vergleicht man die Summe der ersten 100 Abschnitte mit dem Gesamtpotenzial (27'000 kW, s. oben), so zeigt sich, dass sich eine Konzentration der Nutzung auf wenige Abschnitte aufdrängt. Die Karte des mittleren natürlichen Leistungspotenzials hilft, diese Abschnitte zu identifizieren.

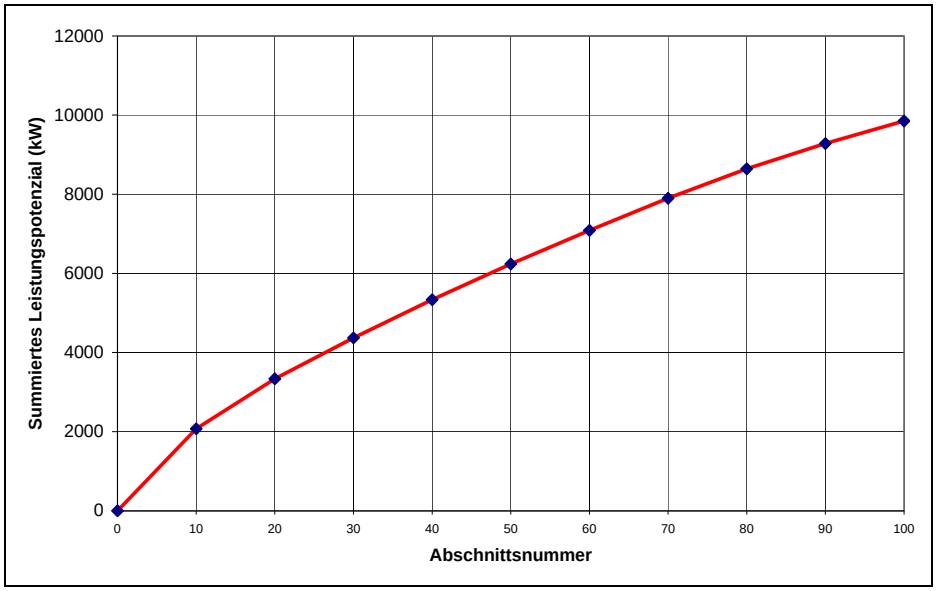


Abbildung 17: Summiertes natürliches Leistungspotenzial der 100 Gewässerabschnitte mit dem grössten Leistungspotenzial

b) Karte des mittleren natürlichen spezifischen Leistungspotenzials

Die einzelnen Gerinneabschnitte sind zwar in der Regel 100 m lang, aber aufgrund von Bachverzweigungen etc. (vgl. Kap. 5.3) weichen einzelne Abschnitte von dieser Länge ab. Um einen direkten Vergleich der Gerinneabschnitte zu ermöglich, wurde das Leistungspotenzial nach Gleichung 2 über die Flusslänge normiert und dann wiederum klassiert (Karte „Mittleres natürliches spezifisches Leistungspotenzial“).

3.6 Schlussfolgerungen zur Top-down-Analyse

Grundsätzlich konnte die in Abbildung 1 dargestellte Vorgehensweise eingehalten werden und das Ziel, Potenzialkarten zu erstellen, erreicht werden. Während der Bearbeitung sind aber einzelne Problemsituationen aufgetreten, auf die nochmals hingewiesen werden muss. Diese beziehen sich vor allem auf die GIS-Aufbereitung und Datenlage:

- Gewässernetz und Geländemodell stimmen nicht immer überein.
- Um die Ziele zu erreichen, muss die GIS-Funktionalität durch eigene Programmierung ergänzt werden.

- Speziell die Ableitung der Einzugsgebietsgrenzen der einzelnen Gerinneabschnitte bedarf einer manuellen Nachbereitung.
- Die gewählte Vorgehensweise eignet sich nur für reliefiertes Gelände, also für den grössten Teil der Schweiz mit Ausnahme des tieferen Mittellandes.

Hingegen sind bei der Hydrologie dank der guten Datenlage in der Schweiz und den verfügbaren Modellen in der Regel gute bis sehr gute Ergebnisse zu erwarten.

4 Schlussfolgerungen

Das Ziel der vorliegenden Vorabklärung bestand darin, ein Konzept für eine möglichst genaue Abschätzung des technischen Potenzials für Kleinwasserkraftwerke in der Schweiz zu entwickeln. Dazu wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt.

In einer Bottom-up Analyse wurden die kantonalen Wasserrechtsregister und Sanierungsberichte Restwasser ausgewertet. Die beiden kantonalen Fallstudien haben gezeigt, dass die vorhandenen Unterlagen und Daten für eine Potenzialschätzung ausreichend sind und mit begrenztem Aufwand beschafft und ausgewertet werden können.

Durch die in diesen Unterlagen identifizierten stillgelegten Kleinwasserkraftwerke konnte eine Schätzung über das technische Potenzial an den entsprechenden Gewässern gemacht werden. Für die Töss konnte so ein technisches Potenzial von 470 kW ermittelt werden. Durch die in den Sanierungsberichten teilweise vorhandenen Angaben über die Wahrscheinlichkeit der Wiederinbetriebnahme gewisser stillgelegter Kraftwerke können auch Aussagen über die Realisierbarkeit dieser ermittelten Potenziale angestellt werden. Für die Töss können lediglich ca. 100 kW dieser 470 kW als realistisches Potenzial charakterisiert werden, die Realisierung der übrigen 370 kW ist gemäss Einschätzung des Kantons Zürich aus wirtschaftlichen Gründen eher unwahrscheinlich.

Aus den vorhandenen Unterlagen lassen sich auch Aussagen über den Stand und das Potenzial von Dotierkraftwerken anstellen. Bestehende Dotierkraftwerke sind in den Sanierungsberichten identifiziert, das Potenzial für neue Dotierkraftwerke lässt sich mit den Angaben der Sanierungsberichte abschätzen und zwar durch die Betrachtung von Kraftwerken ab einer bestimmten Grösse, deren Restwassermengen erhöht wurden. Dadurch können die für ein Dotierkraftwerk möglichen Standorte eruiert und in einer gezielten Erhebung ermittelt werden.

Da sich die Datenlage in den Kantonen unterscheidet, lassen sich voraussichtlich nicht für alle Kantone die Aussagen in der selben Detailtreue machen. Grundsätzlich empfiehlt sich je nach Datenlage ein kantonsspezifisches Vorgehen.

Im Rahmen einer Top-down Analyse wurde das Ziel verfolgt, durch GIS-gestützte Gelände- und Gerinneanalysen sowie durch hydrologische Modellierungen Potenzialkarten für bestimmte Einzugsgebiete zu erstellen. Für ein Testgebiet innerhalb des Töss-Einzugsgebietes konnten derartige Potenzialkarten erstellt werden, die das Leistungspotenzial für KWKW für jeden Gewässerabschnitt darstellen. Das dadurch ermittelte maximale Gesamtpotenzial im Testgebiet der Töss beträgt insgesamt 27'000 kW. Dabei handelt es sich um ein in der Praxis

niemals erreichbares Gesamtpotenzial, das nur zustande käme, falls absolut jeder Gewässerabschnitt der Töss für die Wasserkraft genutzt würde. Durch die gute hydrologische Datenlage in der Schweiz sind bei der Top-down Analyse in der Regel gute bis sehr gute Ergebnisse zu erwarten, wobei sich allerdings die Vorgehensweise nur für reliefiertes Gelände (Grossteil der Schweiz ohne tieferes Mittelland) eignet und die notwendige manuelle Nachbereitung und eigene Programmierung relativ aufwändig sind.

Beide hier untersuchten Ansätze liefern also die gewünschte Abschätzung des Potenzials für KWKW in der Schweiz. Die Wahl der Methode hängt schlussendlich vom Hintergrund, den Anforderungen und dem Verwendungszweck der Potenzialschätzungen ab:

Steht ein umsetzungsorientiertes Vorgehen im Vordergrund, welches für einen kurz- bis mittelfristigen Horizont pragmatisch am technischen Potenzial an gewissen Gewässern interessiert ist, so empfiehlt sich die Auswertung der kantonalen Wasserrechtsregister und Sanierungsberichte Restwasser. Durch diese Methode können mit wenig Aufwand Schätzungen über mögliche Potenziale an Gewässern gemacht werden, welche bereits ökologische und wirtschaftliche Kriterien berücksichtigen. Insbesondere bei alten und gut genutzten Industriestandorten wie der Töss sind die Potenziale vermutlich mehrheitlich ausgereizt. Zusätzliche Potentiale bestehen hauptsächlich in der Reaktivierung stillgelegter oder allenfalls der Erweiterung bestehender Kraftwerke.

Die GIS-gestützte hydrologische Modellierung ist demgegenüber je nach Datenlage aufwändiger und berechnet das Gesamtpotenzial für KWKW, ohne wirtschaftliche oder umweltpolitische Kriterien zu berücksichtigen. Diese Methode ist vor allem für Gewässer mit wenigen Kraftwerken sowie für die Suche nach und die Bewertung von neuen Standorten zu empfehlen. Die Top-down Methode führt für noch nicht entwickelte Gewässerabschnitte zu zuverlässigen und differenzierten Schätzungen des Gesamtpotenzials, welche eine Identifizierung der Abschnitte mit hohem Leistungspotenzial erlauben.

5 Vorschlag für das weitere Vorgehen

Das Vorgehen für eine gesamtschweizerische Potenzialanalyse von Kleinwasserkraftwerken an Fliessgewässern hängt von den Zielsetzungen des Programms und dem Zeithorizont der Umsetzung ab.

Mit der Bottom-up Methode lassen sich die ungenutzten Potentiale in stillgelegten KWKW erkennen und - abhängig von den neuen zu erwartenden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Vergütungssätzen für die produzierte Elektrizität - mit einem Umsetzungshorizont von 3-5 Jahren realisieren. Der nötige Arbeitsaufwand für eine flächendeckende Analyse liegt bei 3-4 Personenmonaten.

Mit der Top-down Methode lassen sich neue potentielle Standorte ermitteln. Da die Bewilligungsverfahren aufwändig sind, ist der Zeithorizont der Umsetzung deutlich länger und liegt im Bereich von 5-15 Jahren und darüber hinaus. Der Arbeitsaufwand für eine flächendeckende Analyse liegt bei 1-2 Personenjahren. Eine flächendeckende Analyse ist jedoch nicht nötig, da sich die interessanten Gebiete eingrenzen lassen.

Das weitere Vorgehen hat sich deshalb an den Zielsetzungen des Programms zu orientieren. Wir können Ihnen die folgenden beiden Ansätze vorschlagen

Zielsetzung kurz- bis mittelfristige Wiederinbetriebnahme stillgelegter Kraftwerke und optimale Nutzung des Potentials in Dotierkraftwerken

Mit diesem Vorgehen kann zum ersten Mal mit vertretbarem Aufwand eine gesamtschweizerische Übersicht der in Betrieb und nicht mehr in Betrieb stehenden KWKW an Gewässern erstellt werden. Dazu sind folgende Arbeitsschritte anzugehen:

1. Erstellung eines Katasters mit allen KWKW der Schweiz basierend auf den Restwasserberichten und Inventaren der Wasserfassungen der Kantone.
   Inhalt: Betreiber mit Adresse, Standort, Alter, konzessionierte Leistung, Status (in Betrieb/stillgelegt), Erneuerungen, Dauer der Konzession. In bestimmten Kantonen sind zusätzliche nützliche Bemerkungen zu den bestehenden Anlagen vorhanden.

2. Bestimmung des Potenzials für Dotierkraftwerke durch gezielte Auswertung der Restwasserberichte im Hinblick auf Kraftwerke mit erhöhten Restwas-

sermengen und einer bestimmten Grösse. Bei den Betreibern dieser Kraftwerke wird eine Erhebung durchgeführt.

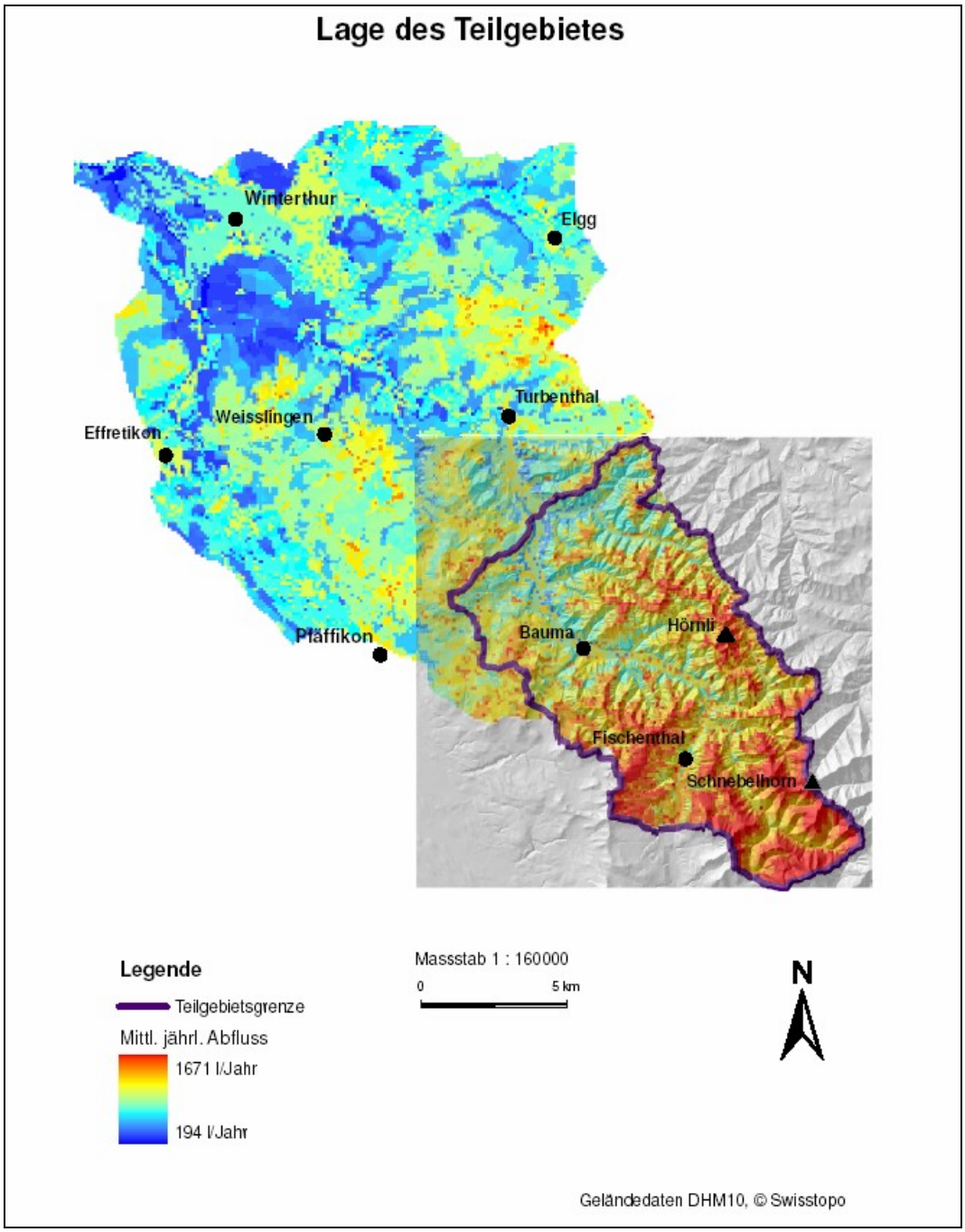
3. Auswertung und Analyse des Katasters nach bestimmten Kriterien:
   - Anlagen mit Sanierungsbedarf
   - Stillgelegte Kraftwerke
   - Regionale Differenzierungen
   - Anlagen mit auslaufender Konzession
4. Ergänzung des Katasters mit Informationen über die produzierte Elektrizität. Ausgehend von der Datenbank der etrans bezüglich der Vergütung der unabhängigen Produzenten gemäss Art. 7 EnG ist eine Ergänzung des Katasters möglich. Alternativ könnte auch eine Befragung der EigentümerInnen durchgeführt werden. Es interessiert die produzierte Elektrizität, um mögliche Erweiterungen zu identifizieren.
5. Durchführung von Fallstudien zur vertieften Analyse der Wirtschaftlichkeit einer Wiederinbetriebnahme ausgewählter stillgelegter KWKW.
   Das Kataster ist ein hilfreicher Fundus für die Promotion von Elektrizität aus KWKW und die aktive Marktbearbeitung auf Seiten der Produzenten. Als Basis dazu sollten einige Fallstudien zur Wirtschaftlichkeit einer Wiederinbetriebnahme durchgeführt werden.

Zielsetzung mittel- bis langfristige Realisierung neuer Kraftwerke an bisher ungenutzten Standorten

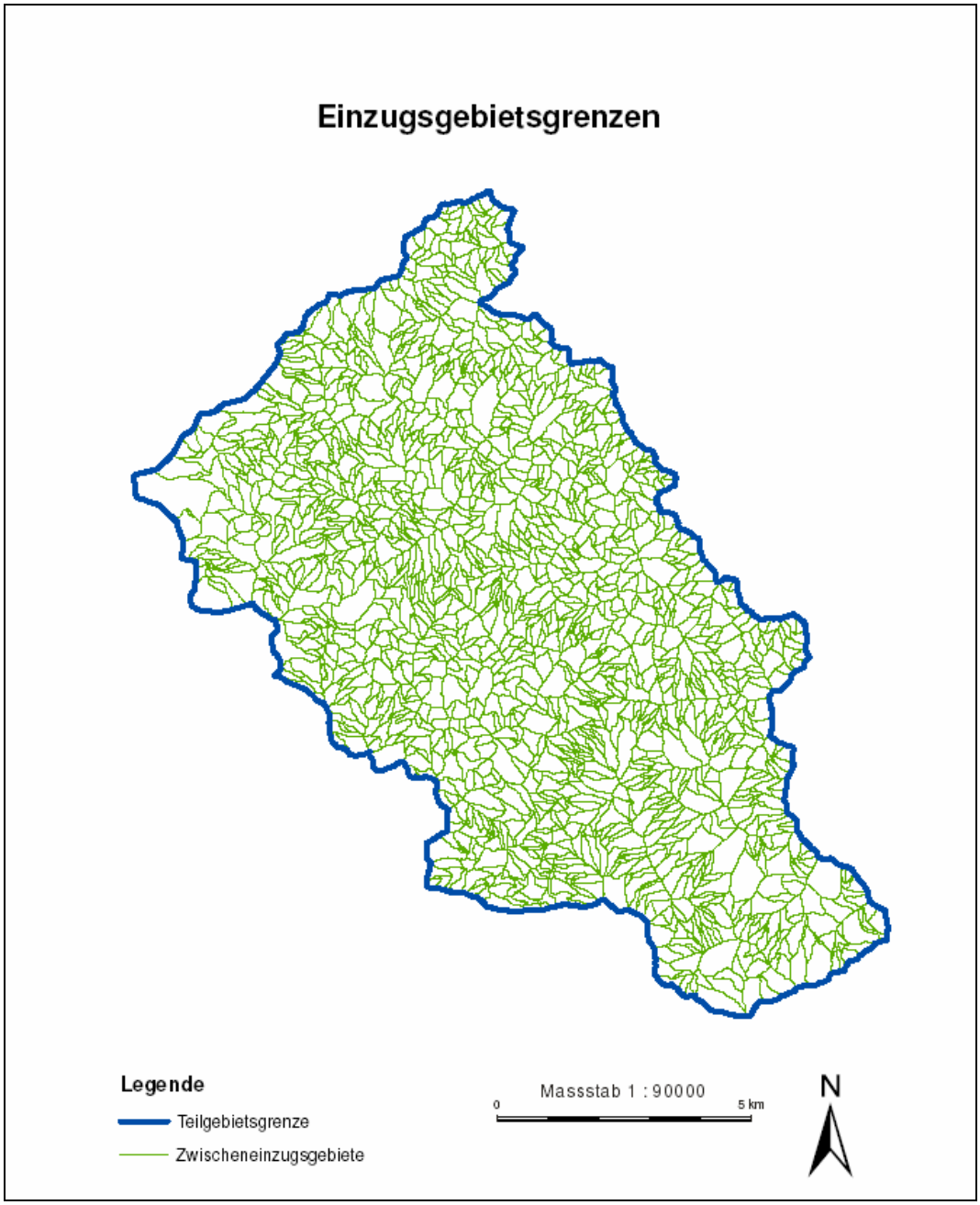
1. Auswahl der Erfolg versprechendsten Regionen für zusätzliche Kleinwasserkraftwerke.
   Diese dürften in traditionell eher wenig industrialisierten Gegenden in den wasserreichen Voralpenregionen liegen.
2. GIS-Analysen und hydrologische Modellierungsarbeiten
3. Erstellung der Potenzialkarten als Basis zur Eruierung neuer Standorte.

Anhang

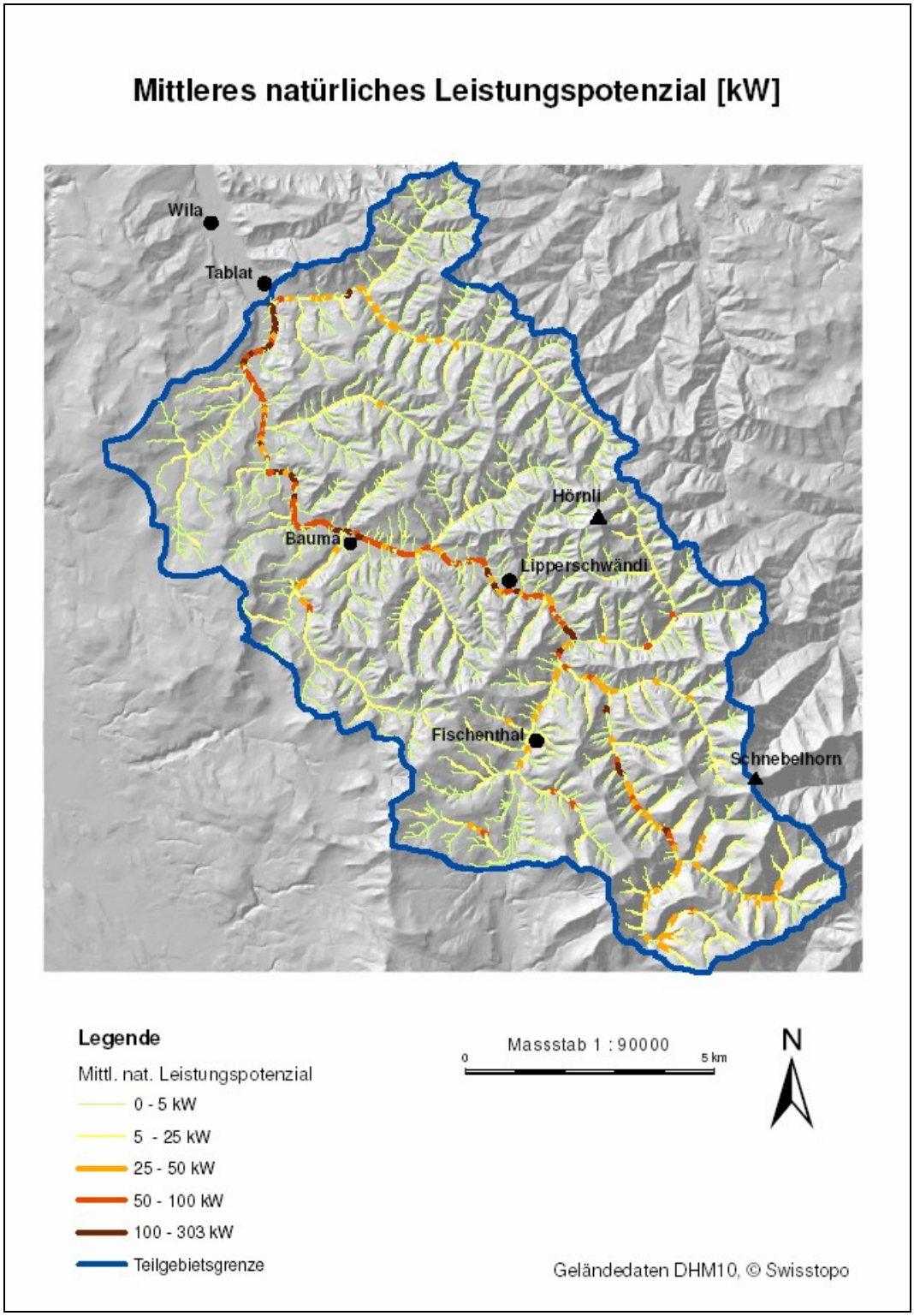
Karte - Lage des Testgebietes



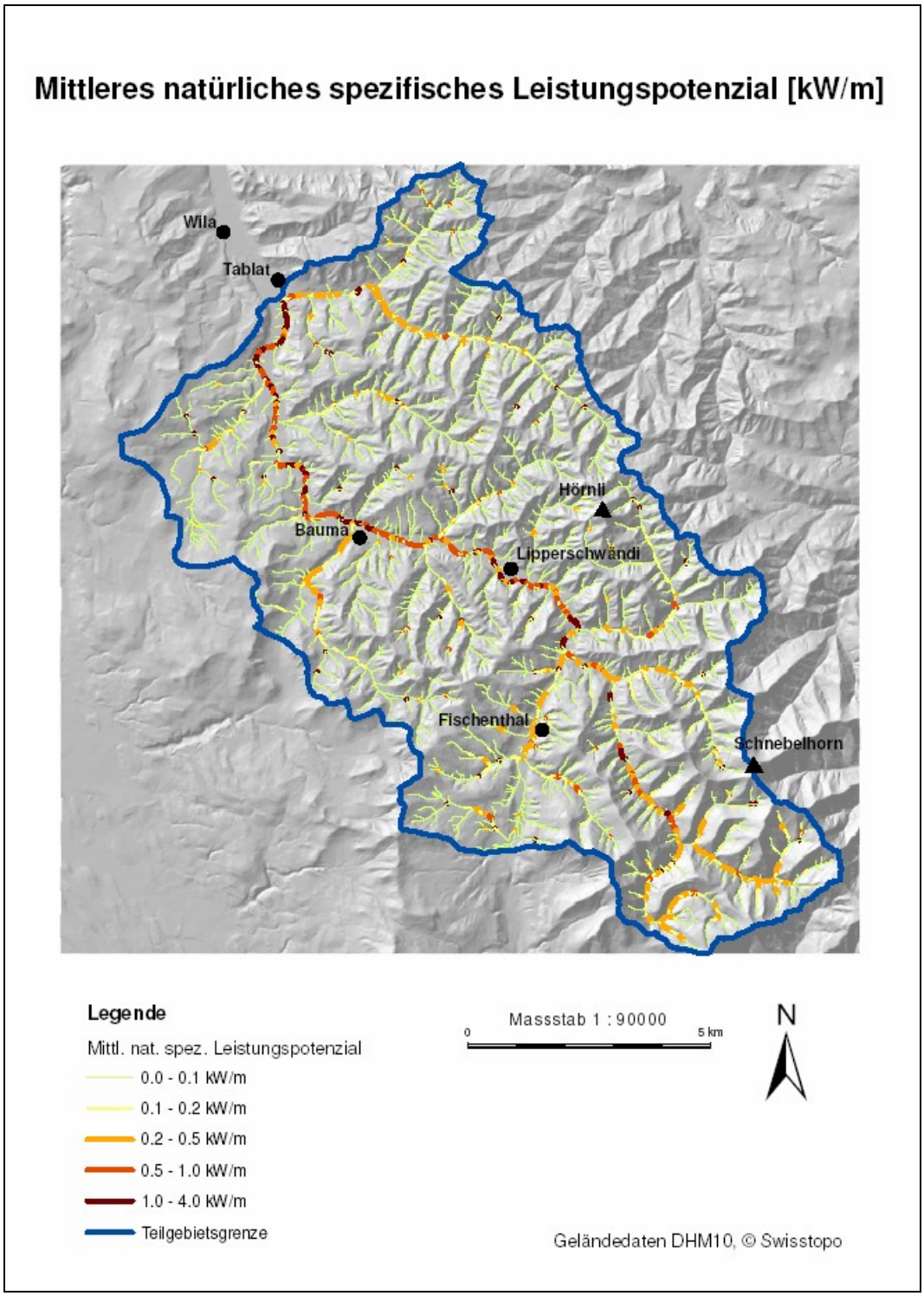
Karte - Einzugsgebietsgrenzen



Karte - Mittleres natürliches Leistungspotenzial



Karte - Mittleres natürliches spezifische Leistungspotenzial



Auszug aus Sanierungsbericht Kanton Zürich 1

Baudirektion
Kanton Zürich

Grundblatt

AWEL Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft

Sanierungsbericht zu: **Wasserrecht Nr. 7 Bezirk Uster**

Eigentümer			Herrn und Frau H. und C. Rütschi Tüfental 8132 Egg bei Zürich

Wasserentnahme	Gewässer		Dorfbach
	Ort		Tiefenthal
	Koordinaten		695 535 / 239 275
	Höhe	m ü.M.	493.65
	Fassungsart		Wehr
Wasserrückgabe	Gewässer		Dorfbach
	Ort		Tiefental
	Koordinaten		695 680 / 239 660
	Höhe	m ü.M.	476.45

Konzessionsdaten	Nutzungsart		Wasserkraftwerk
	Leistung	BkW	9.9
	davon ehehaft	BkW	9.9
	Kantonsanteil	BkW	9.9
	Datum der Konzession		31.12.1915
	Konzessionsende		unbefristet
	Ausbauwassermenge	l/s	keine Angaben

Für Sanierung gemäss	betroffene Schutzgebiete		keine
GschG relevante Daten	Fischgewässer		Ja
	Abflussmenge Q_{347}	l/s	unter 50
	RW gem. Art.31 Abs. 1	l/s	50
	RW gem. Art.31 Abs. 2	l/s	keine Erhöhung erforderlich
	RW gemäss Konzession	l/s	0

G-7.XLS

Abteilung Wasserwirtschaft
Tel. 01 259 39 55

9.02.99 Nä

Auszug aus Sanierungsbericht Kanton Zürich 2

Baudirektion
Kanton Zürich

Bericht

AWEL Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft

Sanierungsbericht	**zu :**	**Wasserrecht Nr. 7 Bezirk Uster**

Sanierungspflicht	gem. Art. 80 Abs. 1 GSchG	Sanierungspflicht besteht in nicht entschädigungsbegründendem Umfang.
Sanierungspflicht	gem. Art. 80 Abs. 2 GSchG	Besteht keine.
Beurteilung		Die Anlage wird zur Zeit nicht betrieben. Es besteht kein Restwasserproblem, da kein Wasser entnommen wird. Auf die Berechnung der hydrologischen Zahlen wird daher verzichtet.
Massnahmen bis:		Es wurde schriftlich darauf hingewiesen, dass vor der Wiederherstellung der Anlage ein Projekt zur Bewilligung eingereicht werden muss. Die Restwasserproblematik ist dann zu lösen
Oekomorphologische Beurteilung		
Bemerkungen:		Der Wasserrechtsinhaber prüft zur Zeit zusammen mit der Kantonalen Denkmalpflege eine Renovation der Kraftanlage. Eine Wiederherstellung der Anlage ist infolge sehr hoher Kosten eher unwahrscheinlich.

G-7.XLS

Abteilung Wasserwirtschaft
Tel. 01 259 39 55

1.02.99 Nä

Literatur

BFE 2004a: Positionspapier Energie aus Kleinwasserkraftwerken, BFE, Bern 2004.

BFE 2004b: Programmleitung Kleinwasserkraftwerke/entec ag: Programm Kleinwasserkraftwerke: Forschungsprogramm 2004-2007, BFE, Bern 2004.

BUWAL 1997: Sanierungsbericht Wasserentnahmen. Sanierung nach Art. 80 Abs. 1 Gewässerschutzgesetz, Bern 1997.

BVE 2001: Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern: Sanierungsbericht Wasserentnahmen, März 2001 (http://www.bve.be.ch/site/index/wwa/bve_wwa_wasserkraft/bve_wwa_wkr_restwasser/bve_wwa_wkr_restwasser_dokumentation.htm).

BWW 1987 Kleinwasserkraftwerke in der Schweiz – Teil III. Veröffentlichung des Bundesamts für Wasserwirtschaft. Mitteilung Nr. 2, Bern 1997.

econcept 1997: Dettli, R., Müller, M.: DIANE 10: Klein-Wasserkraftwerke. Strategiebeurteilung, Bundesamt für Energiewirtschaft, Zürich Dezember 1997.

econcept 2004: Dettli, R., Baur, M.: Kostenstruktur Kleinwasserkraftwerke, BFE, KAP, Zürich 2004.

econcept/IAEW/Consentec 2004: Ott, W., Baur, M. et al.: Windenergie und schweizerischer Wasserkraftpark, EWG/BFE, Bern 2004.

Electrowatt-Ekono 2004: Laufer, F., Grötzinger, S., Peter, M., Schmutz, A.: Ausbaup**otenzial** der Wasserkraft, BFE, Bern 2004.

Gurtz et al. 1997: Gurtz J., Baltensweiler A., Lang H., Menzel L., Schulla J.: Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", NFP-31. Zürich: vdf Hochschulverlag 1997.

Hardegger 2002: Hardegger, P.: Pro und Kontra aus Sicht der Umwelt, in: wasser, energie, luft, 94. Jahrgang, Heft 7/8, 2002, p. 210 - 211.

ISKB 1999: Kleinstwasserkraftwerke in der Schweiz: Zuwachs 1985 bis 1997, Presseauswertung und Umfrageergebnisse, BFE, Affoltern/Bern 1999.

Kanton Wallis 2000: Erneuerungs- und Erweiterungspotenzial der Wasserkraftwerke im Kanton Wallis, Studienbericht Nr. 11, BWG, 2000.

Nash/Sutcliffe 1970: Nash J.E., Sutcliffe J.V.: River flow forecasting through conceptual models: Part I - a discussion of principles, Journal of Hydrology 10, 1970, S. 282-290.

PSI 2005: Hirschberg, S. et al.: Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen (GaBE). Neue erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten, Paul Scherrer Institut, Villigen, Mai 2005.

Sanierungsbericht Bern 2001: Sanierungsbericht Wasserentnahmen gemäss Art. 80 ff. GSchG, BVE des Kantons Bern, Bern 2001.

Schädler/Weingartner 1992: Schädler, B., Weingartner, R.: Natürliche Abflüsse 1961–1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.4, Bern 1992.

Viviroli 2007: Viviroli, D.: Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse für beliebige Einzugsgebiete der Schweiz. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern (in Vorbereitung, 2007).

Viviroli/Gurtz/Zappa 2007: Viviroli D., Gurtz J., Zappa M.: The PREVAH Modelling System. Berne, Zurich and Birmensdorf: GIUB, IACETH and WSL (in preparation) 2007.

Weingartner/Aschwanden 1992: Weingartner, R., Aschwanden, H.: Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2, Bern 1992.

Wasta-Ordner: Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz. Zentralen. Herausgegeben vom Bundesamt für Energie/Bundesamt für Wasserwirtschaft, Stand 1.1.2005.

Zappa 2002: Zappa M.: Multiple-Response Verification of a Distributed Hydrological Model at Different Spatial Scales. Diss. ETH No. 14895. Zürich: Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich 2002.