



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 11. August 2012

Erhebung des Kleinwasserkraftpotentials der Schweiz

Ermittlung des theoretischen Potentials und
Methodik zu dessen ganzheitlicher Beurteilung

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Watergisweb AG
Donnerbühlweg 41
CH-3012 Bern
www.watergisweb.ch

Gruppe für Hydrologie, Geographisches Institut
Universität Bern
CH-3012 Bern
www.hydrologie.unibe.ch

Autoren:

Dr. Udo Schröder, Watergisweb AG, u.schroeder@watergisweb.ch
Dr. Carol Hemund, Universität Bern, hemund@giub.unibe.ch
Prof. Dr. Rolf Weingartner, Universität Bern, weingartner@giub.unibe.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter: Dr. Klaus Jorde
BFE-Projektnummer: SI/500234

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

Vorwort

Die Nutzung der Fliessgewässer für die Erzeugung elektrischer Energie steht im Spannungsfeld von Nutzungs- und Schutzansprüchen an die Ressource Wasser. Die im Jahr 2008 erstmals im Auftrag eines privaten Stromproduzenten für den Kanton Bern entwickelte GIS-basierte Methode zur flächendeckenden Potentialabschätzung wurde vom Netzwerk Wasser im Berggebiet mit dem Swiss Mountain Water Award 2008 ausgezeichnet. Aus dieser ersten Studie wurde anschliessend das Forschungsprojekt, dessen Ergebnisse hiermit vorliegen, konzipiert, welches das Wasserkraftpotential für die gesamte Schweiz flächendeckend untersucht. Insbesondere war dabei die Identifizierung noch vorhandener Potentiale für Kleinwasserkraftwerke und deren ganzheitliche Beurteilung von Interesse. Ziel dieses Projekts war es somit, technische Daten über das Potential für Kleinwasserkraftwerke mit sozioökonomischen und ökologischen Beurteilungen zu verbinden, um letztlich zu einer ganzheitlichen Beurteilung des Wasserkraftpotentials zu gelangen.

Das Projekt umfasste zwei Teilprojekte:

Teilprojekt A. «Ermittlung des hydroelektrischen Potentials für Kleinwasserkraftwerke in der Schweiz» der Watergisweb AG. Dieser Teil analysiert das prinzipiell nutzbare Wasserkraftpotential an allen Fliessgewässern in der Schweiz sowie in den Einzugsgebieten und Regionen. Es identifiziert flächendeckend das theoretisch nutzbare sowie das bereits genutzte Wasserkraftpotential. Mit geeigneten GIS-gestützten Analysen, welche sich als praxistauglich erwiesen haben, wurde das hydroelektrische Potential der Fliessgewässer in der Schweiz flächendeckend analysiert. Die Potentialdaten stehen auf dem Geodatenportal des Bundes der Öffentlichkeit zur Verfügung. Der Bericht zu diesem Teilprojekt findet sich als Anhang A in diesem Schlussbericht.

Teilprojekt B. «Ganzheitliche Beurteilung des Wasserkraftpotentials» der Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern. Dieses Teilprojekt setzt den Fokus auf die Ebene ausgewählter Einzugsgebiete. Die erarbeitete Methodik basiert auf GIS-Daten und berücksichtigt und bewertet bei der Ausweisung des Wasserkraftpotentials auch die sozioökonomischen und ökologischen Einflussfaktoren. Die Resultate sollen unter Berücksichtigung des regionalen und nationalen Kontextes und in Zusammenarbeit mit den verschiedenen Interessenvertretern umgesetzt werden. Der Bericht zu diesem Teilprojekt findet sich als Anhang B in diesem Schlussbericht.

Zielsetzungen und Ergebnisse

Die übersichtsmässige Beurteilung des Wasserkraftpotentials, wie sie nicht nur für potentielle Kraftwerksbetreiber sondern für die Planung der zukünftigen Stromversorgung der Schweiz bekannt sein muss, vernachlässigte bisher die ganzheitliche Sicht sowie den regionalen und raumplanerischen Kontext. Mit diesem Projekt sollte ein Instrumentarium entwickelt und angewandt werden, mit dem sich das Wasserkraftpotential und das hydrologische Umweltpotential in den Einzugsgebieten einer Region umfassend und ganzheitlich beziffern und vergleichen lassen. Dies soll letztlich zu einer differenzierteren Sicht des Wasserkraftpotentials führen.

Hierfür wurden, basierend auf vorhandenen GIS-basierten Datensätzen folgende Informationen ermittelt:

- Totales hydroelektrisches Energiepotential,
- bereits genutztes Energiepotential,
- realisierbares Potential,
- Einflussfaktoren, welche die Nutzung eines Gewässerabschnitts ausschliessen oder einschränken,
- relevante ökologische und sozioökonomische Einflussfaktoren.

Innerhalb der einzelnen Teilprojekte wurden daraus folgende Ergebnisse abgeleitet:

- Das hydroelektrische Wasserkraftpotential unter Ausschluss der grossen Flüsse wie Rhein, Rhone und Aare,
- eine Methodik zur flächendeckenden ganzheitlichen Beurteilung der Wasserkraftpotentiale,
- Karten des ganzheitlichen Wasserkraftpotentials für ausgewählte Piloteinzugsgebiete,
- ein Leitbild für eine gesamtschweizerische Erhebung.

Die jeweils entwickelten Methoden und die Ergebnisse sind in den beiden als Anhang beigefügten Berichten der Teilprojekte A und B dokumentiert.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 29. August 2012

Erhebung des Kleinwasserkraftpotentials der Schweiz

Ermittlung des theoretischen Potentials
(Anhang A)

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Watergisweb AG
Donnerbühlweg 41
CH-3012 Bern
www.watergisweb.ch

Autoren:

Dr. Udo Schröder, Watergisweb AG, u.schroeder@watergisweb.ch

BFE-Bereichsleiter:	Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter:	Dr. Klaus Jorde
BFE-Projektnummer:	SI/500234-02

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Ausgangslage	7
1.1	Glossar	7
2	Ziele	9
2.1	Übergeordnete Zielsetzung.....	9
2.2	Zielsetzung des vorliegenden Teilprojekts	9
3	Konzeptueller Ansatz	11
4	Datengrundlagen	15
4.1	Höhenmodell DHM25	15
4.2	Das Gewässernetz GWN25	16
4.3	Modellierte mittlere monatlich Abflüsse MQ-CH.....	17
4.4	Vorhandene Wasserkraftnutzung.....	17
4.4.1	Restwasserstrecke auf einem Gewässer	17
4.4.2	Restwasserstrecken auf mehreren Gewässern	18
4.5	Limitierende Faktoren (Schutzgebiete)	19
5	Datenmodell	20
5.1	Kurzbeschreibung der Entitäten.....	20
6	Berechnungsmethodik	22
6.1	Berechnungsablauf.....	22
6.2	Erläuterungen zu den Analyseschritten.....	26
6.2.1	Einzugsgebietsberechnung	26
6.2.2	Das Wassertropfenprinzip	26
6.2.3	Festlegen der Gewässerpunkte für die EZG-Berechnung	28
6.2.4	Standortanalyse	31
6.2.5	Relevanzlängen der Gewässerpunkte.....	31
6.3	Randbedingungen für die Analysen	32
6.4	Sonderfälle	32
6.4.1	Kanäle und anthropogene Gewässer	32
6.4.2	Falsche Gewässerstruktur.....	34
6.4.3	Falsche Gewässerstruktur, Wasserscheide.....	35
6.4.4	Mündungsbereiche.....	36
6.4.5	Siedlungsgebiete.....	37
6.4.6	Bifurkation	38
7	Resultate	39
7.1	Restwassermengen	40
7.2	Hydroelektrisches Potenzial.....	41
7.3	Potenzialanteile der Schutzgebiete.....	41
7.4	Potenzialanteil vorhandene Kraftnutzung.....	42
7.4.1	Betrachtung einzelner Kraftwerksstandorte	43
7.5	Gegenüberstellung der Resultate mit der jährlichen Stromproduktion aus Wasserkraft 43	
7.5.1	Plausibilisierung	44
7.6	Kantonale Verteilung des hydroelektrischen Potenzials	45
7.7	Energiepotenzial je Höhenstufe	45
7.8	Theoretisches Potenzial der Gewässer < 1000 m Länge	46
7.9	Gewässer mit einem theoretischen Potenzial < 30 kW	46
7.10	Verteilung der Energiepotenziale	47
7.11	Kartographische Ergebnisdarstellung	48
7.11.1	Übersichtskarte (M 1:100 000)	49
7.11.2	Detailkarte (M 1:25 000).....	50
7.12	Bewertung und Ausblick	50

8	Datenhaltung	52
8.1	Oracle Datenbank.....	52
8.2	File Geodatabase	52
8.3	Softwaresysteme, Speicherbedarf	53
9	Softwaremodule	54
10	Qualitätssicherung, Plausibilitätsprüfungen	57
10.1	Plausibilität Einzugsgebietsgrösse.....	58
10.2	Extreme Potenzialbeträge für einzelne Gewässerpunkte	59
10.3	Fehlerbehandlung.....	59
11	Limitierungen, nicht berechnete Gewässer	60
11.1	Routensystem nicht eindeutig.....	60
11.2	Wechsel der Routennummer auf dem Hauptgewässer	60
11.3	Nicht berücksichtigte Gewässer.....	60
12	Datenabgaben	63
13	Präsentationen, Publikationen	64
14	Referenzen	65

Liste der Abbildungen

Abb. 1: Prinzipskizze für die Berechnung des theoretischen hydroelektrischen Potenzials....	11
Abb. 2: Restwasserstrecke auf dem gleichen Gewässer	18
Abb. 3: Restwasserstrecken, die sich auf mehrere Gewässer verteilen.....	18
Abb. 4: Killerfaktoren	19
Abb. 5: Einflussfaktoren	19
Abb. 6: Datenmodell (vereinfacht)	20
Abb. 7: Diskrepanz zwischen Gewässerlauf GWN25 und Tiefenlinie des DHM25.....	26
Abb. 8: Erstellen eines generischen Gewässerlaufs (Prinzipskizze)	27
Abb. 9: Gewässer im GWN25 und zugeordnete <i>generische Gewässer</i>	28
Abb. 10: Anordnung von Referenzpunkten auf dem generischen Gewässer	29
Abb. 11: GWN25 Gewässerpunkte und Referenzpunkte auf dem generischen Gewässer ...	30
Abb. 12: Gewässerpunkte (grün) und Punkte für die Einzugsgebietenberechnung (rot)	30
Abb. 13: Prinzip der Standortanalyse	31
Abb. 14: Anthropogen überprägtes Gewässer (Kanal)	33
Abb. 15: Nicht übereinstimmende Gewässerstruktur GWN25 - generisches Gewässer	34
Abb. 16: GWN25 fliesst über eine Wasserscheide	35
Abb. 17: Nicht analysierbarer Mündungsbereich der Rotache	36
Abb. 18: GWN25-Gewässer und generisches Gewässer im Siedlungsgebiet.....	37
Abb. 19: Bifurkation, falsche Abgrenzung des Einzugsgebiets	38
Abb. 20: Theoretisches hydroelektrisches Potenzial und Potenzialanteile für ein Gewässer .	39
Abb. 21: Geographische Lage nationaler Schutzgebiete zum Gewässernetz	42
Abb. 22: Theoretische hydroelektrische Potenziale an Kraftwerksstandorten	43
Abb. 23: Theoretisches hydroelektrisches Potenzial je Kanton.....	45
Abb. 24: Histogramm der Energiepotenziale je Höhenstufe.....	46
Abb. 25: Theoretisches Energiepotenzial je Gewässer.....	47
Abb. 26: Detaillierungsgrad thematischer Karten.....	48
Abb. 27: Legende der Karteninhalte	48
Abb. 28: Beispiel einer Übersichtskarte (Auszug).....	49
Abb. 29: Beispiel einer Detailkarte (Auszug).....	50
Abb. 30: Softwaremodule für die Berechnung der hydroelektrischen Potenziale	54
Abb. 31: Plausibilitätsprüfung der Einzugsgebietsgrösse	58
Abb. 32: Übersicht hoher Potenziale für einzelne Gewässerpunkte.....	59

Liste der Tabellen

Tab. 1: Übersicht der verwendeten Geodaten	15
Tab. 2: Kennwerte Gewässernetz GWL_25	16
Tab. 3: Eigenschaften der Fliessgewässer	16
Tab. 4: Kennwerte Gewässernetz GWN_25_ROUTE_250.....	17
Tab. 5: Randbedingungen und Limitierungen für die Analysen.....	32
Tab. 6: Geographische und hydrographische Kenngrössen der analysierten Daten.....	41
Tab. 7: Vergleich Wasserkraftstatistik 2011 und Resultate Potenzialstudie	44
Tab. 8: Energiepotenziale der Gewässer < 1000 m.....	46
Tab. 9: Gewässer mit einem Energiepotenzial < 30 kW	46
Tab. 10: Inhalte der Geodatenbank	53
Tab. 11: Verwendete Softwaresysteme und Speicherbedarf	53
Tab. 12: Beschreibung der Softwaremodule.....	55
Tab. 13: Gewässertypen	60
Tab. 14: Übersicht der bereits abgegebenen Daten	63
Tab. 15: Präsentationen und Publikationen	64

Abstract

Die detaillierte Kenntnis des in den Schweizer Fließgewässern vorhandenen hydroelektrischen Potenzials für Kleinwasserkraftwerk ist eine zentrale Grundlage für Planungs- und Bewilligungsmassnahmen, sowie für die Ausgestaltung von Fördermassnahmen zum Ausbau erneuerbarer Energien. Für die ganzheitliche Betrachtung des Ausbaus der Wasserkraft sind die oft kontroversen Nutzungs- und Schutzinteressen der Stakeholder objektiv zu berücksichtigen.

Unter Nutzung vorhandener Geodaten des BAFU und der swisstopo und zielgerichteter GIS-gestützter Analysen, wurde das theoretische hydroelektrische Potenzial aller natürlichen Fließgewässer der Schweiz detailliert analysiert (49'560 Km). Mit einer Standortanalyse wurden Gewässerabschnitte identifiziert, deren Potenzial aufgrund eidgenössischer Schutzgebiete nicht nutzbar ist, oder aufgrund vorhandener Wasserkraftanlagen (WASTA) bereits genutzt wird.

Die Ergebnisse sind für ca. 800'000 Gewässerabschnitte mit einer Länge von 50 m gemäss einem speziell entwickelten Datenmodell in einer Datenbank gespeichert. Das ermittelte theoretische Potenzial von 11'548 MW, die Potenzialanteile eidgenössischer Schutzgebiete (1677 MW) sowie jene der bereits genutzten Gewässerstrecken (1'893 MW) werden kartographisch in Detail- und Übersichtskarten dargestellt.

Die Aussagen zum theoretischen Potenzial sind korrekt zu interpretieren, da unter Berücksichtigung technischer, ökologischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Aspekte nur ein Teil des theoretischen Potenzials für die Stromerzeugung tatsächlich nutzbar ist.

Die Limitierungen der Berechnungsalgorithmen sind umfassend erläutert. Mit zahlreichen Mechanismen zur Qualitätssicherung wurde die Güte der automatisierten Analysen geprüft. Nicht analysiert wurden der Rhein unterhalb von Lichtenstein, sowie die Rhone unterhalb von Martigny. Beides sind stark verbaute Gewässer, die für das Kleinwasserpotenzial der Schweiz nicht relevant sind.

Erste Ergebnisse der Studie wurden bereits an kantonale und eidgenössische Fachstellen, Gemeinden, Forschungsanstalten, Schulen und anderen abgegeben. Das Konzept und erste Ergebnisse wurden an diversen Fachtagungen publiziert.

1 Einleitung und Ausgangslage

Die Nutzung einheimischer, erneuerbarer Energieträger wird in allen gesellschaftlichen Bereichen intensiv diskutiert. Einen besonderen Stellenwert nimmt hierbei die Wasserkraft ein, eine Ressource, die nicht nur in der Schweiz auf eine lange Tradition zurückblicken kann. Die Nutzung der Wasserkraft wird aufgrund der zahlreichen Nutzungs- und Schutzinteressen kontrovers, und häufig auch emotional geprägt diskutiert.

Eine sachliche Diskussion im Hinblick auf die Nutzung und den Ausbau der Wasserkraft bedingt eine detaillierte, schweizweite Übersicht des vorhandenen Wasserkraftpotenzials sowie der beeinflussenden Faktoren. Nicht zuletzt für die Ausgestaltung von Fördermassnahmen oder für die Berechnung der CO₂-Reduktion durch die Substitution fossiler Brennstoffe ist das vorhandene, respektive nutzbare Wasserkraftpotenzial von zentraler Bedeutung.

Forschungsanstalten und Ingenieurbüros haben wiederholt Potenzialstudien zur Wasserkraft durchgeführt. Diese Potenzialstudien waren regional ausgerichtet und berücksichtigten somit nur einzelne Gewässer. Vielfach wurde auch nur ein einziges Gewässer analysiert, um dessen Eignung zur Energiegewinnung zu ergründen. Zur Anwendung kamen neben individuellen Analyseverfahren auch projektspezifische Datengrundlagen, welche teilweise auch im Feld erhoben wurden. Dies alles erschwert ein Vergleich der Ergebnisse dieser Studien.

Bis anhin gab es keine schweizweite, detaillierte Analyse des vorhandenen Wasserkraftpotenzials, welche auf einer einheitlichen Methodik und auf einer flächendeckenden, einheitlichen Datengrundlage basiert. Mit dem BFE Projekt „Erhebung des Kleinwasserkraftpotenzials für die Schweiz, Ermittlung des hydroelektrischen Potenzials“ wurde dieses Defizit behoben.

Eine nachhaltige, von Versorgungssicherheit geprägte Energieerzeugung aus Wasserkraft bedingt den Bau neuer, respektive die Leistungserhöhung bestehender Kraftwerke. Eine von der Bevölkerung getragene Nutzung der Wasserkraft erfordert eine ganzheitliche Betrachtung des vorhandenen hydroelektrischen Potenzials unter sozi-ökonomischen, technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Faktoren. Das im Rahmen der Studie ermittelte theoretische Potenzial liefert nur eine Grundlage für diese ganzheitliche Betrachtung.

1.1 Glossar

Begriff Erläuterung

ArcGIS GIS-Software der Firma ESRI

ArcGIS-Tool Softwaremodul, welche ArcGIS um spezifische Funktionen erweitert.

Ausschlussfaktoren Eidgenössische Schutzgebiete wie Auen, Hochmoore, Flachmoore, Amphibienlaichgebiete, die eine Wasserkraftnutzung ausschliessen. Ausschlussfaktoren werden auch als Killerfaktoren bezeichnet.

BAFU Bundesamt für Umwelt

DHM25 Digitales Höhenmodell, Rasterdatensatz mit Grösse 25 m x 25 m

Einflussfaktoren Gebiete im Bundesinventar der Landschafts- und Naturdenkmäler (BLN), die eine Wasserkraftnutzung nicht verhindern, aber erschweren.

Einzugsgebietsdaten Bezeichnung für alle Daten und Informationen zu einem Einzugsgebiet, bezogen auf einen Gewässerpunkt

EZG Abkürzung für Einzugsgebiet

Featureclass Bezeichnung eines Datensatzes mit Raumbezug (GIS-Layer) in einer

Geodatenbank [ESRI Terminologie]

Generisches Gewässernetz Gewässernetz, erstellt auf der Basis der Tiefenlinien des Höhenmodells DHM25

Geodaten Daten mit einem eindeutigen Raumbezug. Unterschieden werden die geometrischen Objekte Punkt, Linie, Fläche und Raster.

Geodatenbank Bezeichnung für Datenbanken, in welchen Geometrien und Sachdaten gemeinsam gespeichert werden.

Geometric Network Datenstruktur zu Abbildung von topologischen Netzwerkbeziehungen, beispielsweise in einem Gewässernetz

GIS Geographisches Informationssystem. Softwaresystem zum Erfassen, Speichern, Verwalten, Analysieren, Abfragen und Anzeigen raumbezogener Daten

GWLNR Feld für die Routenkennung im Geometric Network.

GWN25 Digitales Gewässernetz des Bundes, Version 2007

Limitierende Faktoren Oberbegriff für alle in den Analysen berücksichtigten Faktoren

Ausschlussfaktoren = Nationale Schutzgebiete,
Einflussfaktoren = BLN-Gebiete,
Vorhandene Krafternutzung = Wasserkraftwerke

Linienpotenzial Theoretisches hydroelektrisches Energiepotenzial für einen Gewässerabschnitt. Ergibt sich aus dem Abfluss, dem Gefälle und der Erdbeschleunigung. Im Bericht wird es auch vielfach nur als theoretisches Potenzial bezeichnet

MQ-CH Rasterdatensatz der mittleren monatlichen Abflüsse mit einer Rastergrösse von 500 m (erstellt vom BAFU)

Oracle Relationales Datenbankmanagement System zum Speichern grosser Datenmengen

Potenzialanteile Anteil am Gesamtpotenzial von Gewässerabschnitten, welche durch Wasserkraftanlagen bereits genutzt werden oder in eidgenössischen Schutzgebieten / in BLN Gebieten liegen. Die Potenzialanteile werden auch als *genutzt*, *ausgeschlossen* oder *beeinflusst* bezeichnet.

Räumliche Analysen Verschneidungs- und Überlagerungsfunktionen in einem GIS

RDBMS Relationales Datenbankmanagement System wie ORACLE, SQL-SERVER, INGRES u.a.

Spezifische Leistung Hydroelektrische Leistung normiert auf die Länge von 1 Meter (kW/m)

Tiefenlinie Aus DHM25 hergeleiteter Verlauf der Talsohle. Gemäss dem Höhenmodell erfolgt auf der Tiefenlinie der oberirdische Abfluss.

Vorhandene Krafternutzung Bezeichnung für Gewässerabschnitte, die durch Wasserkraftwerke bereits genutzt werden.

WASTA Jährliche Statistik der Wasserkraft erstellt vom Bundesamt für Energie BFE

2 Ziele

2.1 Übergeordnete Zielsetzung

Die Nutzung der Fließgewässer für die Erzeugung elektrischer Energie steht im Spannungsfeld von Nutzungs- und Schutzansprüchen an die Ressource Wasser. Übergeordnetes Ziel dieses Projekts ist es, das vom hydrologischen Charakter der Gewässer bestimmte Kleinwasserkraftpotenzial mit sozioökonomischen und ökologischen Beurteilungen zu verbinden, um letztlich zu einer ganzheitlichen Beurteilung des Wasserkraftpotenzials zu gelangen. Das Gesamtprojekt gliedert sich in drei Teilprojekte.

- Teilprojekt A (Waternisweb AG):
Hydrologisches Potenzial der Schweizer Fließgewässer
Basierend auf den hydromorphologischen Gegebenheiten wird das theoretisch vorhandene Wasserkraftpotenzial aller Fließgewässer der Schweiz ermittelt. Flächendeckend werden das theoretische, das bereits genutzte Wasserkraftpotenzial sowie die Anteile eidgenössischer Schutzgebiete am theoretischen Potenzial detailliert ermittelt. Die Angabe zum theoretischen Potenzial allein liefert noch keine Aussage zum noch ausbaubaren, respektive nutzbaren Kleinwasserkraftpotenzial. Technische, wirtschaftliche, ökologische und rechtliche Aspekte reduzierten das theoretische Potenzial auf das noch ausbaubare Potenzial.
- Teilprojekt B (Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern):
Ganzheitliche Betrachtung des Wasserkraftpotenzials
Basierend auf den Resultaten des Teilprojekts A werden sozioökonomische und ökologische Einflussfaktoren berücksichtigt. Mit den Analysen soll, unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren, das noch ausbaubare Wasserkraftpotenzial ermittelt werden.
- Teilprojekt C (Netzwerk Wasser im Berggebiet NWB):
Praxisrelevante Umsetzung der Resultate
Die Ergebnisse der vorangegangenen Teilprojekte bilden die Grundlage für eine praxisrelevante, nachhaltige Umsetzung. Den kantonalen Bewilligungsbehörden wird ein Werkzeug bereitgestellt, welches erlaubt, die Nutzung und den Ausbau der Wasserkraft unter Berücksichtigung der Interessen aller Stakeholder nachhaltig und zukunftsorientiert zu gestalten.

2.2 Zielsetzung des vorliegenden Teilprojekts

Mit geeigneten GIS-gestützten Analysen ist für alle Fließgewässer der Schweiz deren theoretisches¹ hydroelektrisches Energiepotenzial detailliert, d.h. mit hoher räumlicher Auflösung, zu ermitteln. Neben der Identifikation und Quantifizierung bereits vorhandener Kraftnutzungen ist der Anteil eidgenössischer Schutzgebiete am hydroelektrischen Potenzial zu identifizieren. Die Resultate sind kartographisch und numerisch in geeigneter Form bereit zu stellen. Folgende Informationen sind für alle Fließgewässer zu ermitteln:

¹ Das theoretische Energiepotenzial wird bestimmt durch die hydromorphologischen Eigenschaften eines Gewässers, ohne Berücksichtigung gesetzlicher Bestimmungen wie Restwassermengen oder technischer, wirtschaftlicher oder ökologischer Aspekte.

- theoretisches hydroelektrisches Energiepotenzial
- genutztes theoretisches Potenzial durch vorhandene Kraftwerke
- Anteil am theoretischen Potenzial, das durch Ausschlussfaktoren (eidgenössische Schutzgebiete) für eine Nutzung nicht verfügbar ist.
- Anteil am theoretischen Potenzial, welche durch Einflussfaktoren (BLN-Gebiete), nur unter erschwerten Bedingungen nutzbar ist.
- verbleibendes, nicht beeinflusstes theoretisches Potenzial².

Eine theoretisch mögliche Energieproduktion liesse sich auf der Basis des Linienpotenzials³ berechnen. Dies führt jedoch zu einer rein theoretischen Grösse, die technisch nicht realisierbar ist.

Mit dem Teilprojekt sollen die Grundlagen geschaffen werden, um unter Berücksichtigung weitere Nutzungs- und Schutzaspekte, wirtschaftlicher, technischer und gesellschaftlicher Faktoren sowie der geltenden rechtlichen Grundlagen, das für die Kleinwasserkraft noch nutzbare Potenzial zu quantifizieren sowie deren geographische Verbreitung zu ermitteln. Die Berücksichtigung all dieser Faktoren war jedoch nicht Gegenstand des Teilprojekts.

Die Analysen müssen objektiv, robust und nachvollziehbar sein. Sie müssen flächendeckend für alle vorhandenen topographischen und hydrologischen Charakteristiken in den Einzugsgebieten anwendbar sein, wie beispielsweise:

- Gebirgsregionen
- Flachland
- Siedlungsgebiete
- anthropogen beeinflusste Gewässerläufe

Die Ergebnisse sind anschaulich in unterschiedlichen Detaillierungsstufen kartographisch und tabellarisch darzustellen. Unter Anwendung von WebGIS-Applikationen (z.B. GoogleEarth) sind die Resultate auch in digitaler Form einem breiten Interessentenkreis in verständlicher Weise zugänglich zu machen.

Die Berechnungsmethodik soll auch in anderen Ländern anwendbar sein. Hierfür sind die Grenzen und Einschränkungen der Methodik zu identifizieren und zu bewerten. Besonderes Augenmerk gilt der Güte sowie der räumlichen Auflösung der GIS-Daten und deren Einfluss auf die Resultate.

² Kantonale Schutzgebiete wurden nicht berücksichtigt

³ Das Linienpotenzial entspricht in der vorliegenden Studie dem theoretischen Energiepotenzial auf der Basis der hydromorphologischen Charakteristiken der Fliessgewässer.

3 Konzeptueller Ansatz

Das theoretische hydroelektrische Potenzial eines Fließgewässers, es wird auch als Linienpotenzial bezeichnet, wird bestimmt durch die topographischen und hydrologischen Kennwerte:

1. Einzugsgebietsfläche
2. Oberirdischer Abfluss des Einzugsgebiets
3. Längsprofil des Gewässers (Gefälle).

Mit Kenntnis des aus einem Einzugsgebiet resultierenden Abfluss (Q), kann für einen unterliegenden Gewässerabschnitt mit bekanntem Gefälle (Δh) das theoretische hydroelektrische Potenzial (P) nach Gl. (1) ermittelt werden kann.

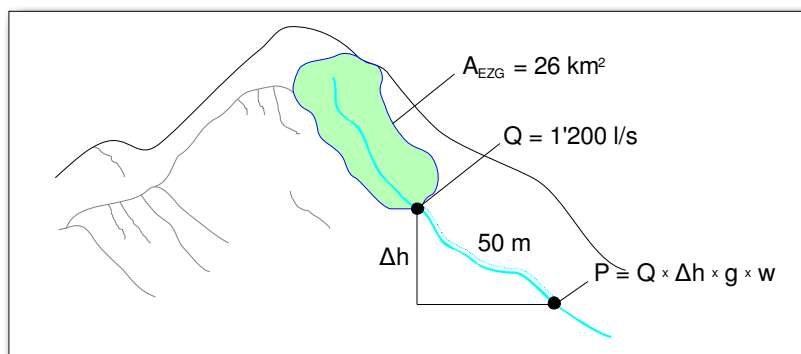


Abb. 1: Prinzipskizze für die Berechnung des theoretischen hydroelektrischen Potenzials

$$P = Q \cdot \Delta h \cdot g \cdot w \quad (1)$$

Mit

P = elektrische Leistung [W]

Q = Abflussmenge [$l \cdot s^{-1}$]

Δh = Höhenunterschied zwischen zwei Gewässerpunkten [m]

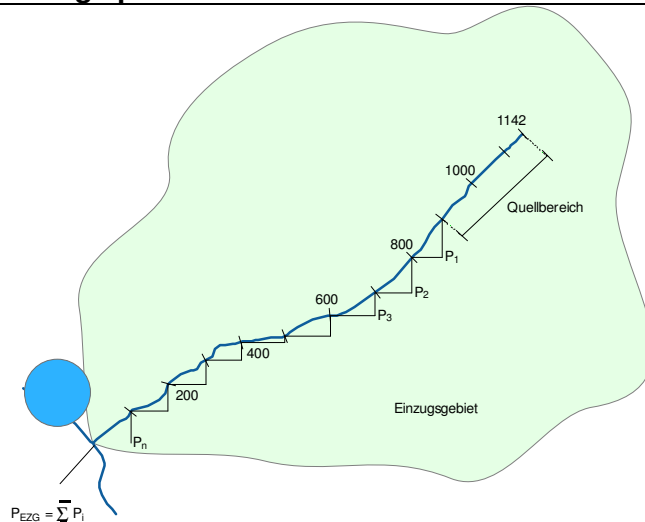
g = Erdbeschleunigung $9.81 [m \cdot s^{-2}]$

w = Koeffizient für den Wirkungsgrad ($w = 1.0$ für das theoretische Potenzial)

Aus dem theoretischen Potenzial kann durch die Subtraktion vorhandener Krafnutzungen und limitierender Faktoren (Natur- und Gewässerschutz) das theoretisch noch nutzbare Potenzial berechnet werden. Aus diesem theoretisch nutzbaren Potenzial, lässt sich durch die Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher, ökologischer und rechtlicher Aspekte das noch ausbaubare Potenzial berechnen.

Der konzeptuelle Ansatz für die Berechnung der Energiepotenziale und die Darstellung der Resultate wird mittels der nachfolgenden Graphiken erläutert.

Energiepotenzial ermitteln

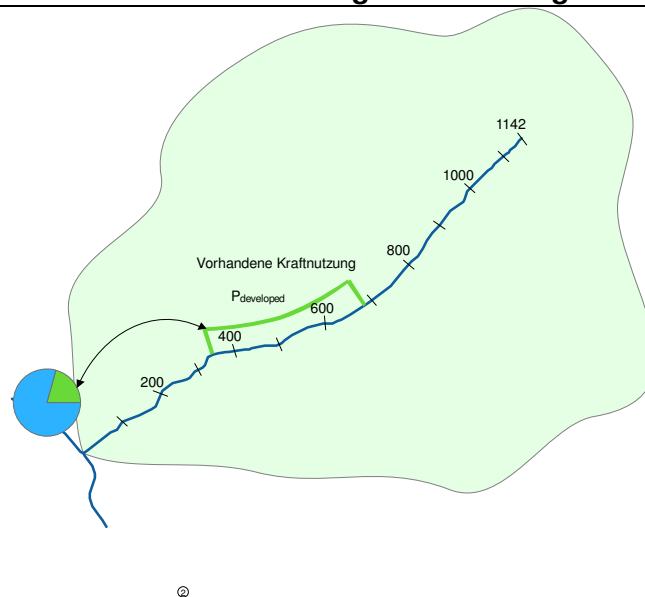


Ein Gewässer wird in äquidistante Abschnitte unterteilt. Das theoretische hydroelektrische Potenzial kann für jeden Abschnitt aus, **Abfluss und Gefälle** berechnet werden. Das Aufsummieren der Potenziale aller Abschnitte eines Gewässers ergibt das *theoretische hydroelektrische Potenzial* des Gewässers.

Der Abfluss der einzelnen Gewässerabschnitte lässt sich aus dem jeweiligen Einzugsgebiet ableiten.

Zur Vermeidung von Fehlern, wird der Quellbereich nicht berücksichtigt (die ersten 250 m ab Quelle). Die Abflussberechnung basiert auf dem anthropogen unbeeinflussten, mittleren natürlichen Abfluss /2/.

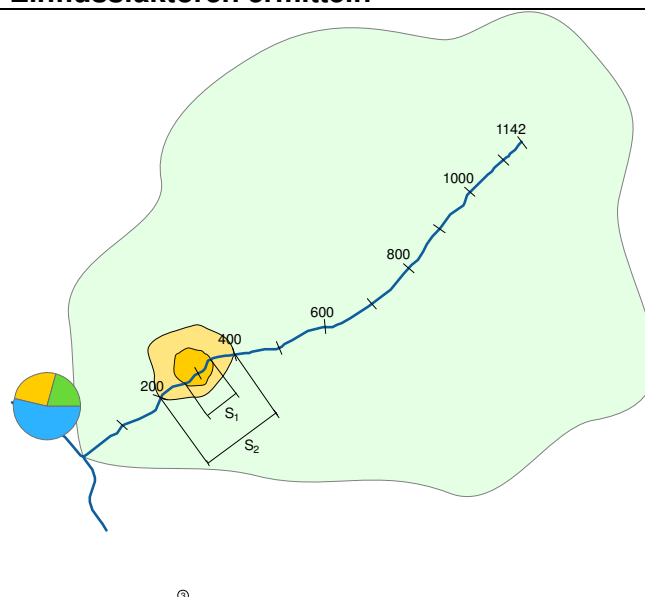
Vorhandene Kraftnutzung berücksichtigen



Die Nutzung der Gewässer ist bewilligungspflichtig und in Konzessionen rechtsverbindlich festgelegt. Informationen zur Energieproduktion sind für Wasserkraftwerke > 300 kW in digitaler Form vorhanden (WASTA Statistik). Die Subtraktion des bereits genutzten Energiepotenzials vom totalen Energiepotenzial wird das *theoretisch noch verfügbare Energiepotenzial* ermittelt.

Angaben zu Kraftwerken mit einer Leistung geringer als 300 kW sind nicht in digitaler Form flächendeckend für die Schweiz vorhanden. Vielfach handelt es sich um Kleinstwasserkraftwerk von wenigen kW, die häufig nicht permanent betrieben werden, und somit energietechnisch nicht von grosser Bedeutung sind.

Einflussfaktoren ermitteln



Das theoretisch verfügbare Energiepotenzial wird durch Einflussfaktoren reduziert. Diese beeinträchtigen eine Kraftnutzung, verhindern sie jedoch nicht. Als Einflussfaktor wurden die BLN Gebiete berücksichtigt. (**B**undesinventar der **L**andschafts- und **N**aturdenkmäler).

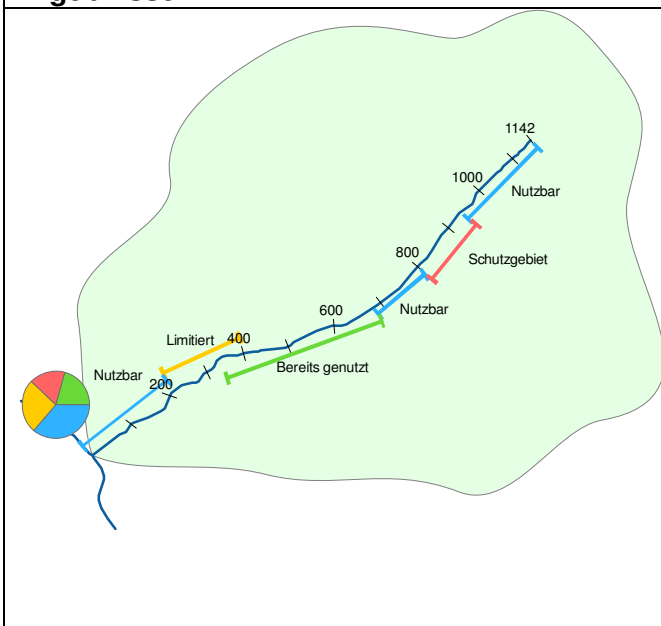
Anmerkung: Für das Ausweisen des noch ausbaubaren Potenzials sind auch kantonale Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Diese standen flächendeckend jedoch nicht zur Verfügung.

Ausschlussfaktoren ermitteln



Ausschlussfaktoren⁴ sind eidgenössische Schutzgebiete wie Hochmoore, Flachmoore, Auen und Amphibienlaichgebiete. Gewässerabschnitte in diesen Schutzgebieten sind von einer Krafnutzung ausgeschlossen. Die Analyse der Einfluss- und Ausschlussfaktoren erfolgt GIS-technisch mittels Verschneidung.

Ergebnisse



Unter Berücksichtigung der genannten Faktoren wird das verbleibende *theoretisch nutzbare Potenzial* ermittelt.

Im theoretisch nutzbaren Potenzial sind rechtliche Aspekte (Restwassermenge), technische Parameter (Wirkungsgrad) sowie wirtschaftliche Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Die Analysen liefern Gewässerabschnitte:

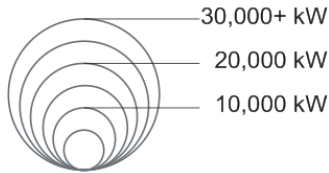
- die bereits einer Wasserkrafnutzung unterliegen,
- aufgrund ihrer Lage in eidgenössischen Schutzgebieten von einer Nutzung ausgeschlossenen sind,
- eine Nutzung durch ihre Lage in BLN Gebieten erschwert wird.

Neben den Gewässerstrecken (Längen) sind auch die **Potenzialanteile** der oben genannten Gewässerabschnitte bekannt.

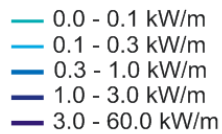
⁴ Ausschlussfaktoren werden auch als Killerfaktoren bezeichnet.

Resultatdarstellung

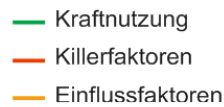
Theoretisches hydroelektrisches Potenzial



Spezifische Leistung



Kraftnutzung und limitierende Faktoren

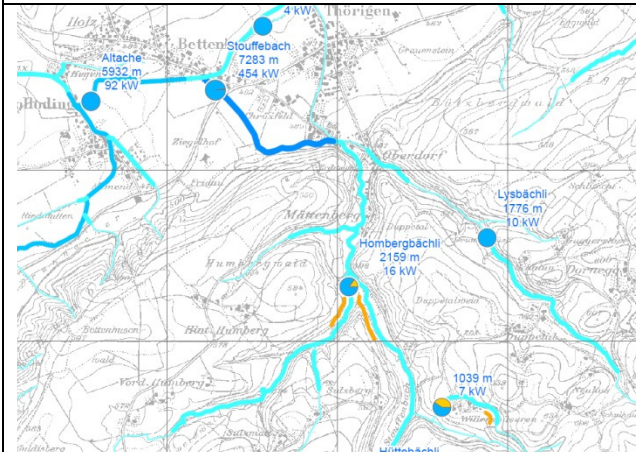


In Karten werden die Potenzialanteile einzelner Gewässer, respektive ganzer Flussgebiete in einem **Kreisdiagramm** dargestellt. Die Kreisfläche ist proportional dem *theoretischen Potenzial* (Gesamtpotenzial). Die Potenzialanteile limitierender Faktoren werden als Kreissegmente ausgewiesen.

Mit der **spezifischen Leistung** wird die Leistung pro Längenschnitt (kW/m) ausgewiesen.

Vorhandene Kraftnutzungen und Einfluss- und Ausschlussfaktoren werden in einer Bänderdarstellung entlang des Gewässers dargestellt.

Thematische Karten



In den **Detailkarten** (M 1:25'000) werden für jedes Gewässer das Gesamtpotenzial und die Teilpotenziale ausgeschieden.

In den **Übersichtskarten** werden das Gesamtpotenzial und die Potenzialanteile nur für grössere Fluss- oder Einzugsgebiete ausgewiesen. Hierfür werden alle Potenziale der im Flussgebiet enthaltenen Gewässer aufsummiert.

4 Datengrundlagen

Alle erforderlichen Daten waren bei Bundesstellen in digitaler Form vorhanden. Es mussten keine Daten erhoben oder erfasst werden.

Tab. 1: Übersicht der verwendeten Geodaten

Nr	Name	Inhalt	Herkunft	Datenstand	Bemerkung
1	GWN25	Gewässernetz	Swisstopo	Release 2007	Erfassungsmassstab 1:25'000
2	DHM25	Höhenmodell 25 m* 25 m	Swisstopo		
3	MQ-CH	Modellierte mittlere monatliche Abflüsse	BAFU	1981-2000	Rasterdaten mit einer Auflösung von 500 m * 500 m
4	Restwasserkarte	Entnahmen, Rückgaben und Restwasserstecken	BAFU	Siehe Dokumentation	Bezug bei Marc Baumgartner
4a	Restwasserkarte EAWAG	Entnahmen, Rückgaben und Restwasserstecken	EAWAG	Basiert auf Restwasserkarte BAFU	Nur als Webkarte verfügbar http://www.eawag.ch/repository/surf/restwasser/index.html
5	WASTA Bestehende_Zentralen.xls	Statistik der Wasserkraftnutzung	BFE	1.1.2009 1.1.2011	Bezug bei Gerhard Dasen 11/2009 Bezug bei M. Hertach 3/2012
6	WANUTZ_FR	Entnahme und Rückgaben Kanton FR	FR	2009	Bezug bei Michael Reist 4.11.2009
7	AMPHIB_AML	Amphibien Laichgebiete	BAFU		Ausschlussfaktor
8	AUEN_AU	Auen	BAFU		Ausschlussfaktor
9	BLN_BLN	BLN Gebiete	BAFU		Einflussfaktor
10	FLACHMOOR_FM_NAT	Flachmoore von nationaler Bedeutung	BAFU		Ausschlussfaktor
11	HOCHMOOR_HM	Hochmoore von nationaler Bedeutung	BAFU		Ausschlussfaktor

4.1 Höhenmodell DHM25

Verwendet wurde das Höhenmodell DHM25 der swisstopo mit 25 m * 25 m Rastergrösse /1/. Das Höhenmodell deckt zwar das Staatsgebiet der Schweiz ab, jedoch nicht alle *hydrologischen Einzugsgebiete*, da diese im angrenzenden Ausland liegen können. Die dadurch entstehenden Fehler sind jedoch zu vernachlässigen.

4.2 Das Gewässernetz GWN25

Das Gewässernetz GWN25 des Bundes basiert auf einem Erfassungsmassstab von 1:25'000. Das Gewässernetz liegt in zwei Ausprägungen vor /2/ und /6/.

- GWN_25_I: 277257 Gewässerabschnitte mit Angaben zu den Eigenschaften der einzelnen Abschnitte.
- GWL_25: Geroutetes Gewässernetz (Basis für die Analysen).

Der Layer GWL_25 umfasst 100'132 Gewässer.

Tab. 2: Kennwerte Gewässernetz GWL_25

Parameter	Wert / Einheit	Bemerkung
Anzahl Gewässer	100'132	Gesamtzahl aller gerouteten Gewässer
Kürzestes Gewässer	0.0038 km	
Längstes Gewässer	377 km	
Mittlere Länge	0.761 km	
Gesamtlänge	76'230 km	

In den Analysen werden nur die in Tab. 3 blau markierten natürliche Gewässer berücksichtigt⁵.

Tab. 3: Eigenschaften der Fließgewässer

ObjectVal	Beschreibung (Objektart)	gerichtet
Bach	Bach, kleiner Fluss	j
Bachachs	fiktiver Bachverlauf	j
Bach_U	Bachverlauf unterirdisch oder auf der Pixelkarte nicht dargestellt	j
Bisse	Suone: Bewässerungskanäle an den Talflanken	j
Druckl_1	Druckleitung einfach	j
Druckl_2	Druckleitung mehrfach	j
Drucksto	Druckstollen	j
Fluss	Fluss	j
Fluss_U	Flussverlauf unterirdisch oder auf der Pixelkarte nicht dargestellt	j
Kanal	Bach ohne erkennbare / eindeutige Fließrichtung	n
Seeachse	Fiktive Seeachse innerhalb eines Sees	j
Seeinsel	Seeinsel	j
See	Seeufer	j

Hierdurch reduziert sich die Anzahl der Gewässer auf 84'594. In nachgeschalteten Analyseschritten wurden noch weitere Gewässer identifiziert, welche zwar als natürliche Fließgewässer attribuiert sind, jedoch anthropogener Natur sind. Für die Analysen wurden nur Gewässer mit einer Länge > 250 m berücksichtigt.

Resultat aller Bereinigungen ist der Layer GWN_25_ROUTE_250⁶, welcher als Basis für die Berechnung des theoretischen hydroelektrischen Potenzials diente, siehe

⁵ Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 11.3.

⁶ Der Layer enthält nur Gewässer mit einer Länge > 250 m

Tab. 4: Kennwerte Gewässernetz GWN_25_ROUTE_250

Parameter	Wert / Einheit
Anzahl Gewässer	53'640
Kürzestes Gewässer	0.250 km
Längstes Gewässer	377 km
Mittlere Länge	0.802 km
Gesamtlänge	62'135 km
Anteil am Gesamtwässernetz	81 %

Eine detaillierte Beschreibung des Gewässernetzes findet sich in der Produktbeschreibung GWN25 /6/.

4.3 Modellierte mittlere monatlich Abflüsse MQ-CH

MQ-CH ist ein Rasterdatensatz mit einer räumlichen Diskretisierung von 500 m * 500 m. Für jede Rasterzelle sind der mittlere natürliche monatlich Abfluss sowie der Jahresabfluss bekannt. Der Datensatz und seine Herleitung sind in /3/ detailliert beschrieben.

4.4 Vorhandene Wasserkraftnutzung

Die Identifikation vorhandener Wasserkraftnutzung erfolgte

- anhand der Wasserkraftstatistik des BFE 2008 (WASTA) /4/ und /13/
- der Restwasserkarte des BAFU /5/
- der Restwasserkarte der EAWAG /12/

Die Daten der Restwasserkarte des BAFU wurde mit der Wasserkraftstatistik WASTA über die WASTA Nr. verknüpft. Hieraus resultieren 572 Wasserkraftanlagen⁷, welche für die Analysen des hydroelektrischen Potenzials Verwendung fanden.

Mittels GIS-gestützter, Analysen basierend auf einem Network Dataset⁸, wurden jene Gewässerabschnitte identifiziert, die einer Kraftnutzung unterliegen. Zwei Arten von „Restwasserstrecken“ sind zu unterscheiden.

4.4.1 Restwasserstrecke auf einem Gewässer

Wasserentnahme und -rückgabe liegen auf dem gleichen Gewässer, siehe Abb. 2. Gesamthaft betrifft dies eine Gewässerlänge von 776 km.

⁷ In der WASTA Statistik 2011 /13/ werden 576 Kraftwerke geführt.

⁸ ESRI Terminologie für Linienobjekte mit Topologie- und Richtungsinformationen in einem Dataset.

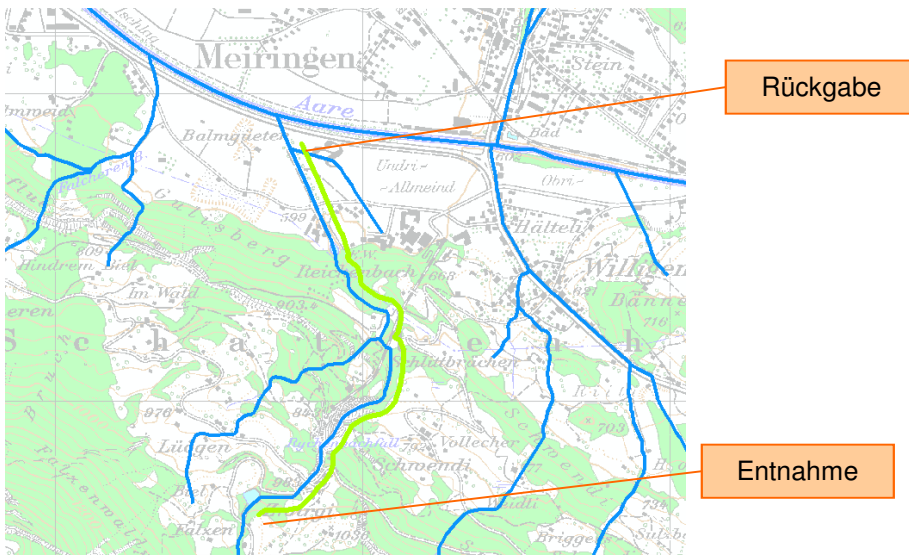


Abb. 2: Restwasserstrecke auf dem gleichen Gewässer

4.4.2 Restwasserstecken auf mehreren Gewässern

Die Entnahmen für eine Krafterzeugung liegen auf unterschiedlichen Gewässern. Dies umfasst auch Überleitungen aus anderen Einzugsgebieten, siehe Abb. 3. Die Gesamtlänge der Restwasserstrecken aller 183 identifizierten Wasserkraftwerke beträgt 1515 km.

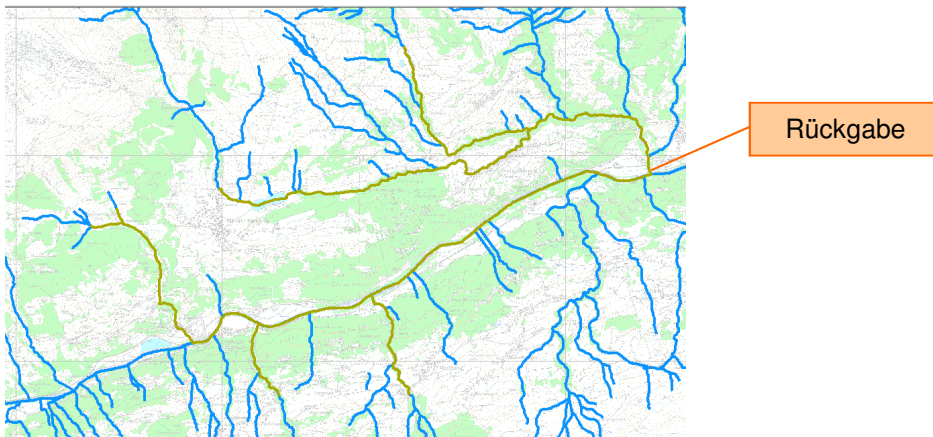


Abb. 3: Restwasserstrecken, die sich auf mehrere Gewässer verteilen

In den Analysen wurden nur Wasserkraftwerke aus WASTA mit einer Leistung > 300 kW berücksichtigt. Eine Vielzahl kleiner Anlagen mit Leistungen unter 300 kW fand keine Berücksichtigung, weil diesbezügliche Information flächendeckend für die Schweiz nicht in digitaler Form verfügbar sind.

4.5 Limitierende Faktoren (Schutzgebiete)

Limitierende Faktoren⁹ werden unterschieden in:

- Killerfaktoren¹⁰ (Nationale Schutzgebiete)
- Einflussfaktoren (BLN Gebiete¹¹)

Die Daten liegen in separaten GIS-Layern als Flächen vor.

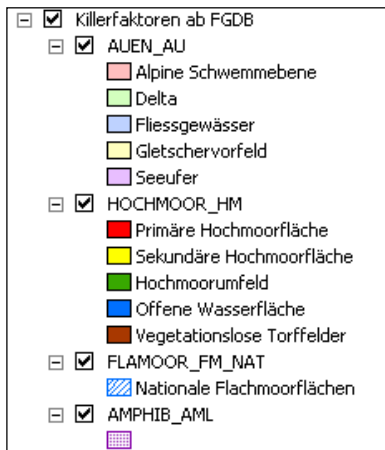


Abb. 4: Killerfaktoren

Killerfaktoren schliessen die Nutzung einer Gewässerstrecke kategorisch aus. Berücksichtigt wurden die in Abb. 4 dargestellten Schutzgebiete von nationaler Bedeutung.

- Auen
- Hochmoore Bedeutung
- Flachmoore
- Amphibienlaichgebiete

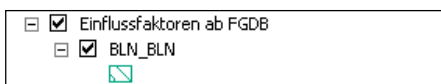


Abb. 5: Einflussfaktoren

Einflussfaktoren behindern oder erschweren die Nutzung einer Gewässerstrecke für die Energiegewinnung. Im Gegensatz zu *Killerfaktoren* schliessen sie eine Nutzung nicht kategorisch aus.

⁹ Im Prinzip gehört auch eine vorhandene Wasserkraftnutzung zu den limitierenden Faktoren.

¹⁰ Synonym für Killerfaktoren wird auch der Begriff Ausschlussfaktoren verwendet.

¹¹ Bundesinventar der Landschafts- und Naturdenkmäler

5 Datenmodell

Das Datenmodell ermöglicht das redundanzfreie Speichern aller Analyseresultate und wichtiger Zwischenergebnisse. In einer vereinfachten Form ist es in Abb. 6 als Entitätendiagramm dargestellt. Rechts der blauen Trennlinie sind die Entitäten betreffend Gewässerpunkte aufgeführt, links der Trennlinie jene für die Gewässer. Entitäten, welche Informationen zu den Potenzialen enthalten und primär die Grundlage für die tabellarische und graphische Resultatdarstellung bilden, sind orange markiert.

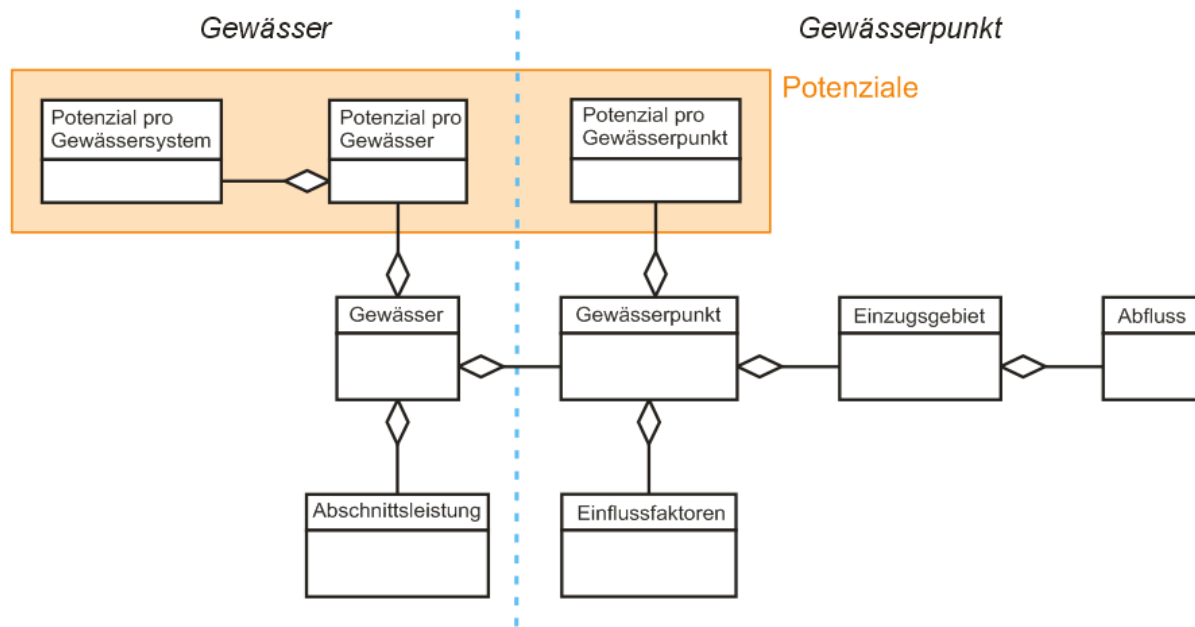


Abb. 6: Datenmodell (vereinfacht)

Um die Lesbarkeit des vorliegenden Berichts zu wahren, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung des Datenmodells verzichtet. Eine vollständige Beschreibung des Datenmodells wird in digitaler Form bereitgestellt. Nachfolgend sind nur die wichtigsten Informationen zu den Entitäten und deren Besonderheiten aufgeführt.

5.1 Kurzbeschreibung der Entitäten

Gewässerpunkt Ist die zentrale Entität. Für jeden Gewässerpunkt bekannt sind:

- Geographische Lage (Rechtswert, Hochwert, Höhe m.ü.M.)
- Zugehörigkeit zu einem Gewässer (Flussnummer)
- Lage (Position) auf der Flussachse

Einzugsgebiet Alle Informationen zum Einzugsgebiet des Gewässerpunktes (1:1 - Verknüpfung)

- Geometrie des Einzugsgebiets
- Kennwerte (minimale, mittlere und maximale Höhe (m), Fläche (m²))

Abfluss Enthält die Abflusskennwerte für ein Einzugsgebiet (1:13 - Verknüpfung)

- Mittlere monatliche Abflüsse Jan - Dez in (l/s)
- Mittlerer jährlicher Abfluss (l/s)

Einflussfaktoren¹² Alle Informationen zu den limitierenden Faktoren für einen Gewässerpunkt (1:n - Verknüpfung). Die limitierenden Faktoren sind das Ergebnis der Standortanalyse.

- Vorhandene Krafternutzung und konzessionierte Leistung (falls vorhanden)
- Einflussfaktoren (BLN Gebiete)
- Ausschlussfaktoren (nationale Schutzgebiete)

Hinweis: Für jeden limitierenden Faktor wird auch dessen Schlüssel (eindeutige Kennung) gespeichert. Hierdurch kann der Gewässerpunkt bei Bedarf wieder mit dem Originaldatensatz des limitierenden Faktors verknüpft werden.

Potenzial pro Gewässerpunkt Für jeden Gewässerpunkt wird aus dem mittleren Jahresabfluss und der Höhendifferenz zum nächsten flussabwärts liegenden Gewässerpunkt das theoretische hydroelektrische Potenzial ermittelt (1:1 - Verknüpfung).

Gewässer Alle *Gewässerpunkte* sind über einen eindeutigen Schlüssel einem Gewässer (Fluss) zugeordnet (1:n - Verknüpfung).

- Mit der Positions- und Höhenangaben ist das Längsprofil bekannt.
- Jeder Gewässerpunkt repräsentiert eine Referenzlänge, im Normalfall 50 m. Die Referenzlänge ergibt sich aus der Summe der jeweils halben Distanz zum nächsten flussabwärts und flussaufwärts liegenden Gewässerpunkt.

Abschnittsleistung Zur Wahrung der Übersichtlichkeit in Kartendarstellungen wird die *spezifische Leistung* für längere Gewässerabschnitte (1, 2 oder 5 km) ermittelt.

Potenzial pro Gewässer Enthält Angaben zum gesamten theoretischen Potenzial der Gewässer, sowie der Potenzialanteile. Dient als Grundlage für die kartographische Darstellung (Detailkarten).

- Gesamtes theoretisches Potenzial
- Potenzialanteil Wasserkraftanlagen (Krafternutzung)
- Potenzialanteil BLN-Gebiete (Einflussfaktoren)
- Potenzialanteil nationale Schutzgebiete (Ausschlussfaktoren)

Die Subtraktion der Potenzialanteile vom gesamten theoretischen Potenzial ergibt das noch theoretisch verfügbare Potenzial der Gewässer. Aus dem theoretisch verfügbaren Potenzial lässt sich unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher, ökologischer und rechtlicher Aspekte das noch ausbaubare Potenzial ermitteln.

Potenzial pro Gewässersystem Enthält Angaben zum gesamten theoretischen Potenzial eines *Einzugsgebietes*, sowie der Potenzialanteile. Dient als Grundlage für Übersichtskarten.

- Gesamtes theoretisches Potenzial
- Potenzialanteil Wasserkraftanlagen (Krafternutzung)
- Potenzialanteil BLN-Gebiete (Einflussfaktoren)
- Potenzialanteil eidgenössische Schutzgebiete (Killerfaktoren)

Es gelten sinngemäss die gleichen Aussagen wie für das „Potenzial pro Gewässer“

¹² Die Bezeichnung Einflussfaktoren für die Entität mag irreführend sein, da mit Einflussfaktor auch die BLN-Gebiete bezeichnet werden. Die Bezeichnung der Entität ist jedoch historisch begründet und konnte zu Projektbeginn nicht mehr geändert werden.

6 Berechnungsmethodik

Die Analysen werden GIS-gestützt durchgeführt. Hierfür werden die topographischen und hydrologischen Grundlagedaten, sowie die limitierenden Faktoren, bedürfnisgerecht aufbereitet und in eine Geodatenbank überführt. In Geodatenbanken können geometrische Informationen gemeinsam mit Sachdaten verwaltet und für raumbezogene Analysen genutzt werden.

Das hydraulische Potenzial eines Gewässerpunktes wird nach Gleichung 2 für jeden Gewässerpunkt aufgrund der berechneten Abflussmenge und der Höhendifferenz zum nächsten flussabwärts liegenden Gewässerpunkt ermittelt, siehe auch Kap. 3.

$$P = Q \cdot \Delta h \cdot g \cdot w \quad \text{Gl. 2}$$

Mit

P = elektrische Leistung [W]

Q = Abflussmenge [l/s]¹³

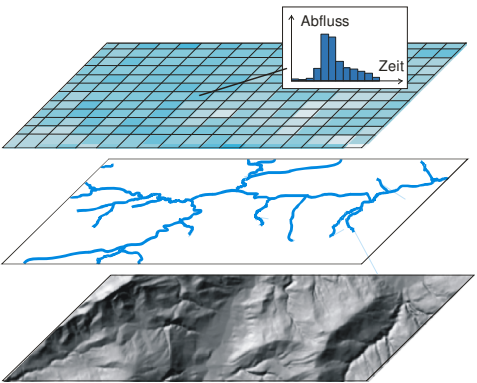
Δh = Höhenunterschied zwischen zwei Gewässerpunkten [m]

g = Erdbeschleunigung [9.81 m/s²]

w = Koeffizient für den Wirkungsgrad, Annahme $w = 1.0$

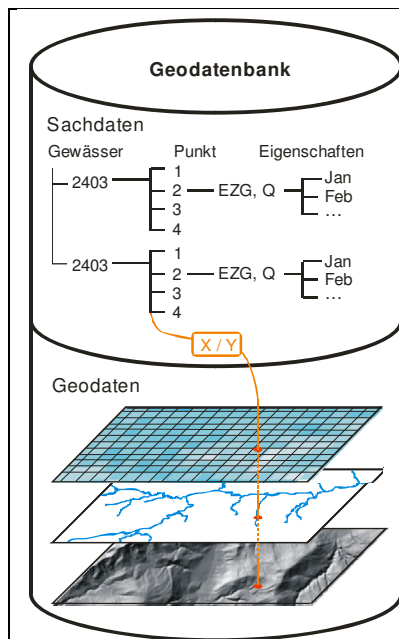
Die Berechnungsmethodik wird nachfolgend anhand von Graphiken illustriert und detailliert erläutert. Wo notwendig und dem Verständnis dienlich wird auf Besonderheiten hingewiesen.

6.1 Berechnungsablauf

	<p>① Aufbereiten der Grundlagedaten</p> <ul style="list-style-type: none">- Bereitstellen der Abflussdaten MQ-CH für das Projektgebiet. - Bestimmen der geometrischen Abflussverhältnisse aus dem Höhenmodell. Erstellen eines <i>generischen Gewässernetzes</i>.- Aufbereiten der GIS-Layer für die limitierenden Faktoren.
---	---

¹³ Verwendet wird der mittlere natürliche Abfluss

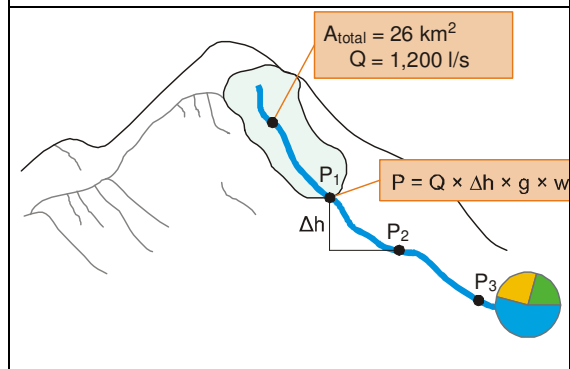
	<p>① Zuordnung eines Gewässers an ein generisches Gewässer</p> <p>Die Berechnung der Einzugsgebiete erfolgt auf der Tiefenlinie des Höhenmodells, nachfolgend auch als generisches Gewässer bezeichnet. Das Höhenmodell wird hierzu mit dem Spatial Analyst von ESRI wie folgt aufbereitet.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Senken füllen - Fließrichtung berechnen - Abflusskonzentration berechnen <p>Auf der Basis der Abflusskonzentration werden die generischen Gewässerverläufe (Tiefenlinien) erstellt. Jedem Gewässer des GWN25 wird genau ein generisches Gewässer zugeordnet. Die Methodik ist in Kap. 6.2.2 ausführlich erläutert.</p>
	<p>② Festlegen diskreter Gewässerpunkte</p> <p>Die zu analysierenden Gewässer werden, ausgehend von der Mündung in äquidistante Abschnitte unterteilt (Schrittweite 50 m). Die gewählte Schrittweite ist das Ergebnis einer bereits durchgeführten Sensitivitätsanalyse. Für jeden Gewässerpunkt auf dem GWN25 wird ein entsprechender Gewässerpunkt auf dem zugeordneten generischen Gewässerlauf ermittelt. Aus dem DHM25 wird für jeden Gewässerpunkt dessen Höhe über NN ermittelt.</p>
	<p>③ Berechnen der Einzugsgebietskennwerte</p> <p>Für jeden diskreten Gewässerpunkt werden, das jeweilige Einzugsgebiet (EZG) und alle gewünschten Kennwerte ermittelt (Fläche, minimale, maximale und mittlere Höhe).</p>
	<p>④ Berechnen der Abflussmengen</p> <p>Die natürlichen mittleren monatlichen Abflüsse und der Jahresabfluss werden für jeden Gewässerpunkt durch den räumlichen Verschnitt der EZG-Fläche mit den Rasterdaten der Abflüsse (MQ-CH) ermittelt /3/.</p>



⑤ Speichern der Resultate in einer Geodatenbank

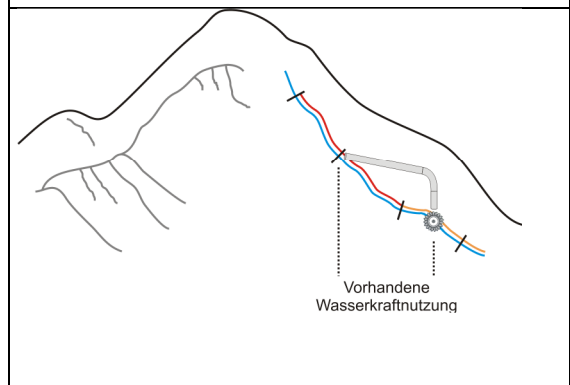
Die geographischen und hydrologischen Kennwerte aller Gewässerpunkte werden, gemäss dem Datenmodell, in einer auf Oracle basierenden Geodatenbank gespeichert.

Die Daten in der Geodatenbank bilden die Grundlage für die nach geschalteten Analysen zum Energiepotenzial der Gewässer, sowie zur Analyse der Potenzialanteile durch die limitierenden Faktoren.



⑥ Ermitteln des theoretischen Energiepotenzials

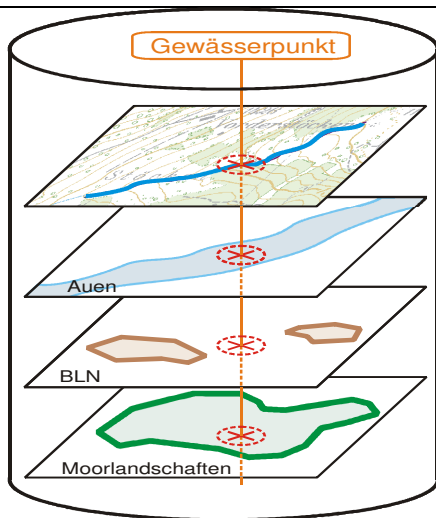
Für jeden Gewässerabschnitt ($P_1 - P_2 = 50 \text{ m}$) wird dessen theoretisches hydraulisches Energiepotenzial ermittelt. Das Aufsummieren der Potenziale der einzelnen Gewässerabschnitte ergibt das theoretische Gesamtpotenzial des Gewässers. Durch das Speichern der detaillierten Analyseresultate in der Datenbank sind jederzeit weitere bedürfnisgereichte Auswertungen möglich. Das theoretische Energiepotenzial wird ermittelt auf der Basis natürlicher, anthropogen unbeeinflusster Abflüsse.



⑦ Bereits genutztes Energiepotenzial (WASTA)

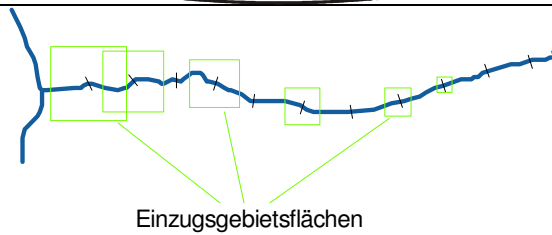
Standorte vorhandener Wasserkraftwerke und die sie beeinflussenden Gewässerabschnitte (Restwasserstrecken), werden mittels räumlichen Verschnitts im GIS identifiziert. Das hydroelektrische Potenzial der Restwasserstrecken wird vom theoretischen Potenzial „subtrahiert“.

In diesem Arbeitsschritt werden auch Wasserentnahmen und Rückgaben sowie hydrologische Besonderheiten wie grosse Quellschüttungen berücksichtigt.



⑧ Standortanalyse

Jeder Gewässerpunkt wird auf das Vorhandensein von Killer- und Einflussfaktoren untersucht. Dies erfolgt mittels räumlicher Verschneidung im GIS.



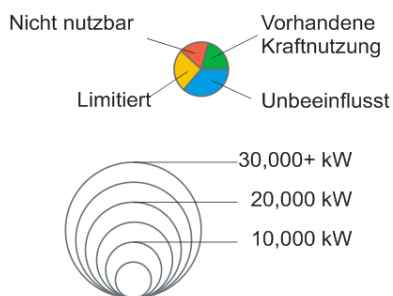
⑨ Qualitätssicherung und Plausibilitätstests

Zur Prüfung der Resultate werden QS-Mechanismen und Plausibilitätstests angewendet.

- Mit *statischen Verfahren* werden Ausreißer und nicht plausible Werte identifiziert.
- Mit *halbautomatischen Verfahren* werden Gewässer mit auffälligen Resultaten identifiziert und visuell überprüft.

Beispiel: Die Einzugsgebietsfläche und der Abfluss muss mit der Lauflänge ansteigen, die Abflüsse müssen einer für das Gebiet typischen Abflusspende [$l/s \cdot km^2$] genügen.

Theoretisches hydroelektrisches Potenzial



Spezifische Leistung

- 0.0 - 0.1 kW/m
- 0.1 - 0.3 kW/m
- 0.3 - 1.0 kW/m
- 1.0 - 3.0 kW/m
- 3.0 - 60.0 kW/m

Kraftnutzung und limitierende Faktoren

- Kraftnutzung
- Killerfaktoren
- Einflussfaktoren

Resultatdarstellung

- Das theoretische hydroelektrische Potenzial und die Potenzialanteile von Kraftnutzung und limitierender Faktoren eines Gewässers werden in einem Kreisdiagramm ausgewiesen. Die Kreisfläche ist proportional dem Gesamtpotenzial.
- Die spezifische Leistung der Gewässer wird für Abschnitte von 1000 m Länge farblich differenziert in 5 Klassen ausgewiesen.
- Vorhandene Kraftnutzungen und limitierende Faktoren werden als Bänder entlang dem Gewässer dargestellt.

6.2 Erläuterungen zu den Analyseschritten

6.2.1 Einzugsgebietsberechnung

Problematik: Die Einzugsgebiete können **nicht** direkt auf der Grundlage von Punkten **auf** dem GWN25 ermittelt werden, da das Gewässernetz GWN25 und das Höhenmodell DHM25 nicht aufeinander abgestimmt sind. Anschaulich ist dies in Abb. 7 dargestellt. Ein Vergleich der Gewässerläufe aus GWN25 mit der Tiefenlinie aus dem DHM25 zeigt je nach morphologischer Situation ein mehr oder weniger starkes Abweichen von der GWN25-Achse.

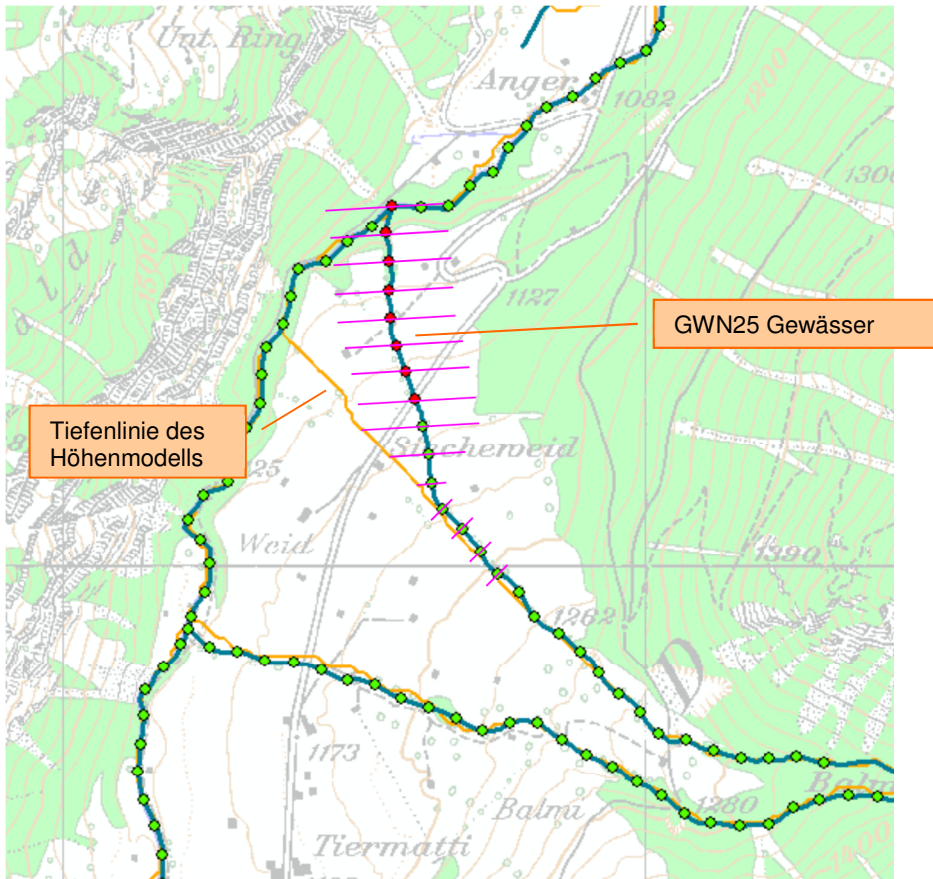


Abb. 7: Diskrepanz zwischen Gewässerlauf GWN25 und Tiefenlinie des DHM25

Lösungsansatz: Die Einzugsgebiete für Gewässerpunkte auf dem GWN25 werden auf der Basis entsprechender Punkte auf den Tiefenlinien des DHM25 ermittelt. Dies bedingt, dass für jedes Gewässer des GWN25 genau eine Tiefenlinie aus dem DHM25 zugeordnet wird. Der Lösungsansatz wird als „Wassertropfenprinzip“ bezeichnet.

6.2.2 Das Wassertropfenprinzip

Die Überlegung: Jedem Gewässer im GWN25 wird genau eine Tiefenlinie aus dem DHM25 zugeordnet, die dem Gewässer möglichst *ähnlich*¹⁴ ist. Abb. 8 illustriert, dass alle Tiefenlinien, welche sich in einem Umkreis von 100 Metern (orange Kreislinie) zu einer Quelle befinden auf einer Tiefenlinie zusammenlaufen. Diese Tiefenlinie (breite violette Linie) entspricht mit zunehmender Lauflänge dem GWN25 Gewässer.

¹⁴ Die Differenz zwischen Tiefenlinie und GWN25 Gewässer soll minimal sein.

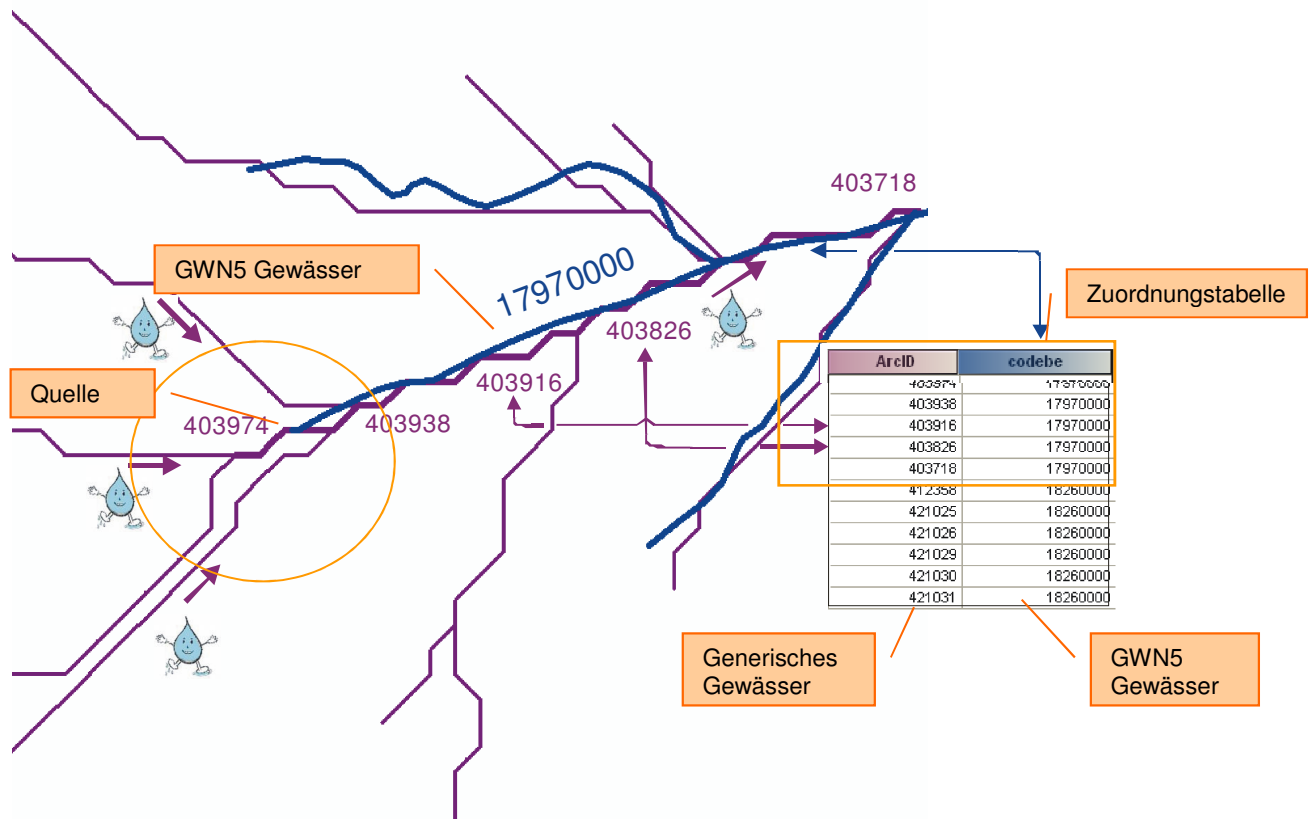


Abb. 8: Erstellen eines generischen Gewässerlaufs (Prinzipskizze)

Das Prinzip: Wird auf irgendeiner Tiefenlinie in der Nähe der Quelle eines GWN25 Gewässers ein „Wassertropfen“ gestartet, so durchfließt dieser bereits nach kurzer Distanz alle Tiefenlinien des DHM25, die dem GWN25 Gewässer entsprechen. In Abb. 8 ist das Prinzip beispielhaft am Gewässer 17970000 dargestellt.

Alle vom Wassertropfen durchflossenen Abschnitte der Tiefenlinien werden in einer *Zuordnungstabelle* protokolliert. Das Zusammenfassen aller Abschnitte eines Gewässers über einen Schlüssel (orange Markierung) liefert ein *generisches Gewässer*, welches genau einem natürlichen Gewässer des GWN25 entspricht.

Die Anwendung des Prinzips ist in Abb. 9 anhand mehrerer Gewässer beispielhaft dargestellt. Gestartet wird mit einem sehr hoch aufgelösten Netz von Tiefenlinien (violett, Bild links). Für jede Quelle wird auf einer Tiefenlinie im Umkreis von 100 m (oranger Kreis) ein Wassertropfen gestartet. Im Bild rechts sind nur noch die generischen Gewässer dargestellt, die einem GWN25 Gewässer zugeordnet sind. Auf diesen generischen Gewässern werden die Referenzpunkte für die Berechnung von Einzugsgebiet und Abfluss festgelegt, siehe Kap. 6.2.3.

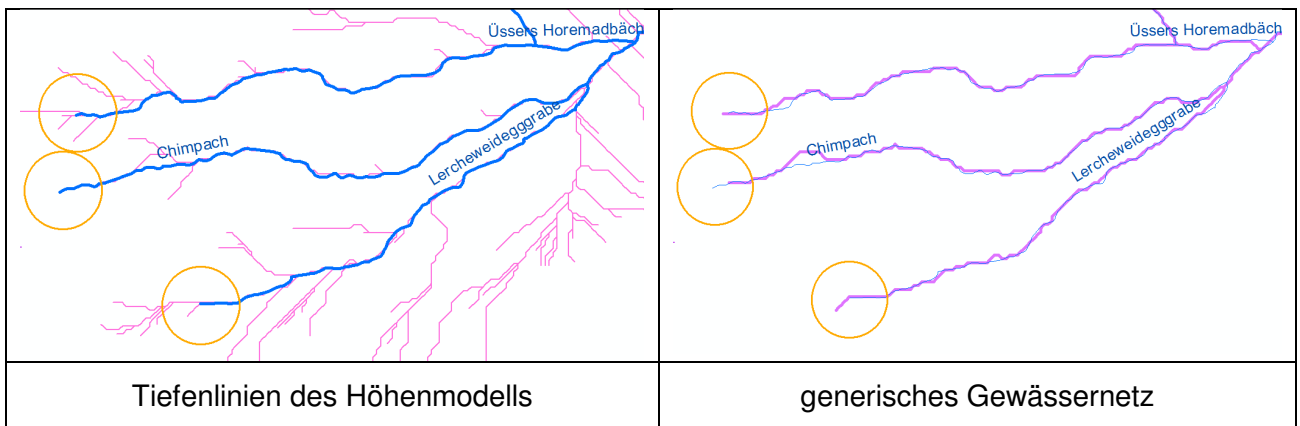


Abb. 9: Gewässer im GWN25 und zugeordnete *generische Gewässer*

Bei der Entwicklung dieser Methodik wurden ca. 6300 Gewässer visuell überprüft, ob die Zuordnung der generischen Gewässer korrekt ist. GIS-gestützt wurde die Güte der Zuordnung bewertet. Basierend auf diesen Analysen wurde das Wassertropfenprinzip optimiert.

6.2.3 Festlegen der Gewässerpunkte für die EZG-Berechnung

Aufgrund der fehlenden Übereinstimmung von GWN25 und Höhenmodell, siehe Abb. 7, erfolgt die Berechnung der Einzugsgebiete indirekt über Referenzpunkte auf dem generischen Gewässernetz, d.h., den Tiefenlinien des Höhenmodells. Die Referenzpunkte werden wie folgt festgelegt.

- Der Referenzpunkt auf der Tallinie wird durch das Erstellen einer Senkrechten im Punkt auf dem GWN25 gesucht. Maximale Länge der Senkrechten 500 m.
- Wird das zugeordnete generische Gewässer geschnitten, ist der gewünschte Referenzpunkt gefunden.
- Überschneiden sich zwei gedachte Linien benachbarter GWN25 Punkte zu ihren Referenzpunkten auf der Tallinie, erfolgt keine Zuordnung der Referenzpunkte. Eine Zuordnung erfolgt erst wieder wenn sich die zwei gedachten Linien nicht mehr überschneiden.
- In einem nachgeschalteten Arbeitsschritt werden die fehlenden Referenzpunkte auf der Tallinie generiert, indem sie in gleichmässigen Abständen zwischen zwei bekannten Referenzpunkten angeordnet werden, siehe Abb. 10. Die Methodik wird als „Gummibandprinzip“ bezeichnet.

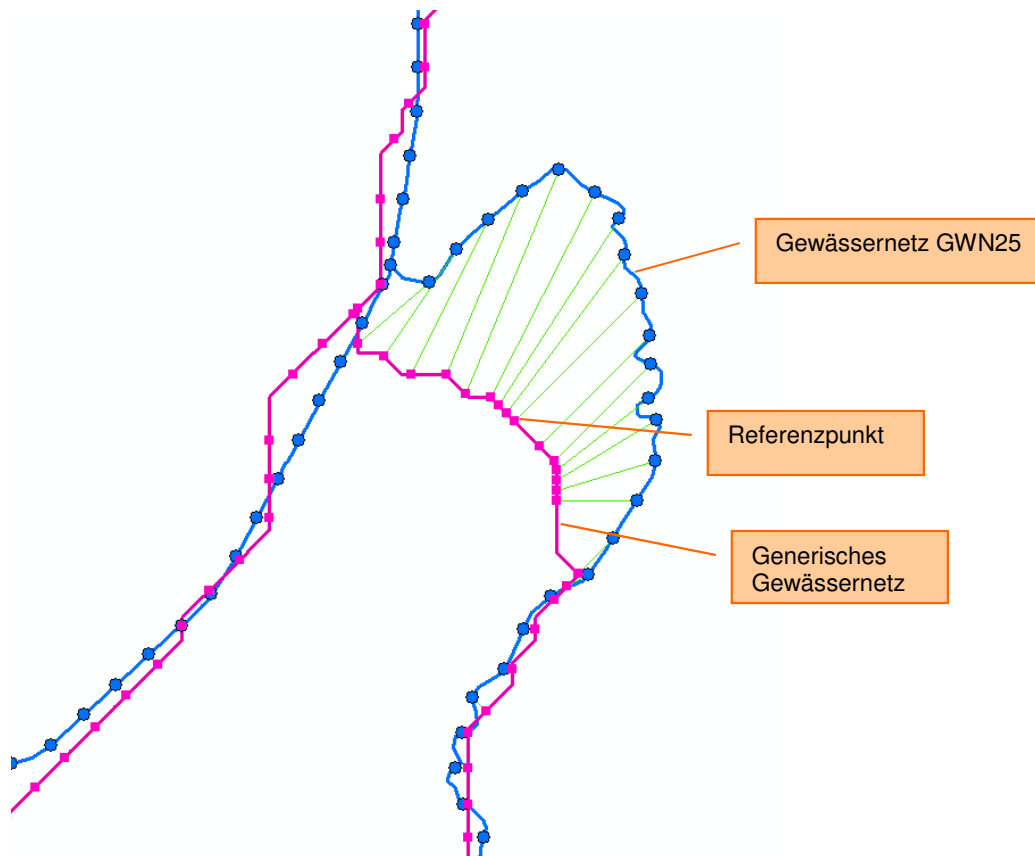


Abb. 10: Anordnung von Referenzpunkten auf dem generischen Gewässer

Die Methodik liefert für jeden Gewässerpunkt, für den das Einzugsgebiet zu berechnen ist, zwei Koordinatenpaare:

1. Koordinaten¹⁵ des Punkts auf dem Gewässer GWN25
2. Koordinaten des Punkts auf dem zugeordneten generischen Gewässer

Das Ergebnis dieses Verfahren ist beispielhaft in Abb. 11 illustriert. Orange dargestellt sind die Verbindungslinien zwischen den Punkten auf dem GWN25 Gewässer und den Referenzpunkten des zugeordneten generischen Gewässers. Basierend auf den Punkten des generischen Gewässers werden die Einzugsgebiete berechnet.

Die Graphik verdeutlicht, dass sich das generische Gewässer je nach topographischer Situation mehr oder weniger stark vom GWN25 Gewässern „entfernen“ kann. Im markierten Bereich handelt es sich um eine Ungenauigkeit im Höhenmodell.

¹⁵ Rechts- und Hochwerte in Landeskoordinaten

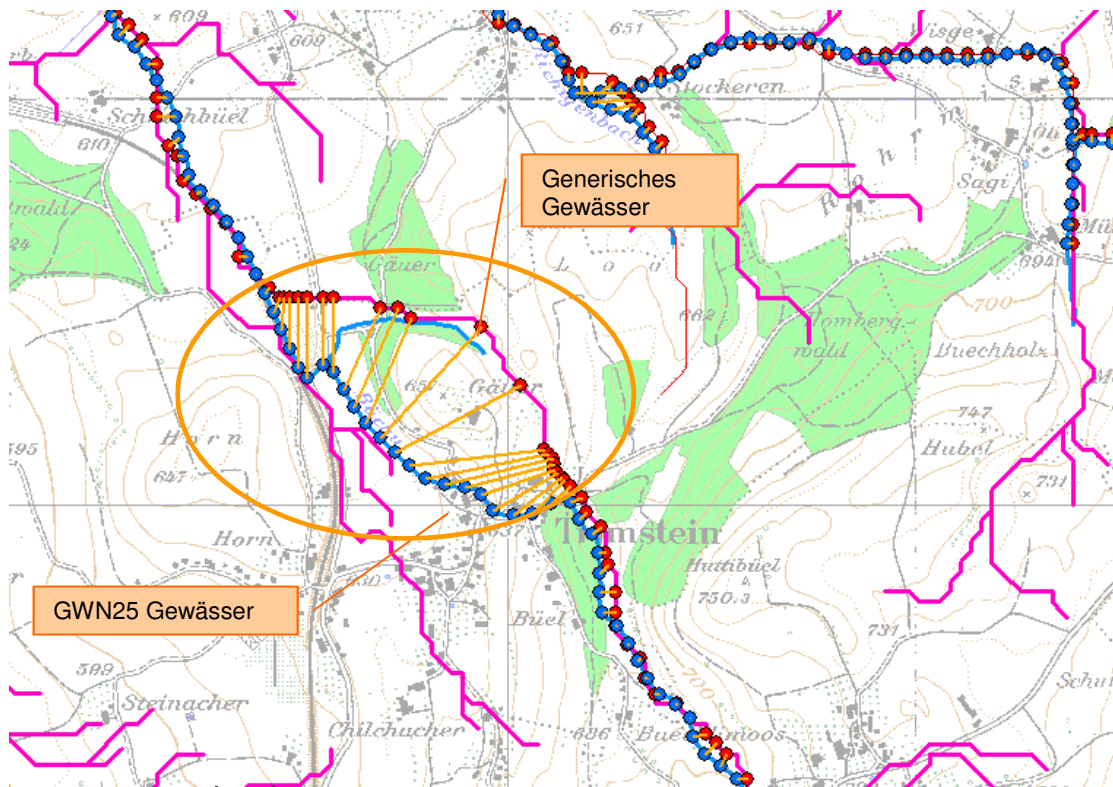


Abb. 11: GWN25 Gewässerpunkte und Referenzpunkte auf dem generischen Gewässer

Da die korrespondierenden Punkte mehr oder weniger weit auseinander liegen können, kann der Gebietsauslass eines Einzugsgebiets nicht mit dem Gewässerpunkt auf dem GWN25 übereinstimmen. Beispielhaft ist die in Abb. 12 dargestellt. Das Einzugsgebiet besitzt stufenförmige Grenzen, da es auf der Basis des DHM25 berechnet wird (Rastergröße 25 m * 25 m).

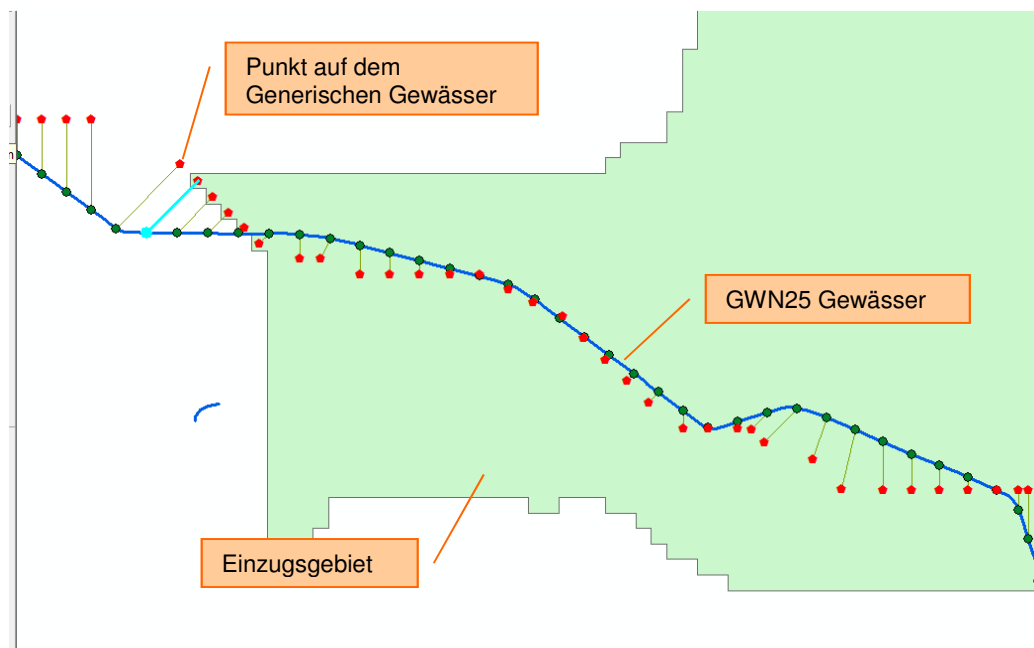


Abb. 12: Gewässerpunkte (grün) und Punkte für die Einzugsgebietsberechnung (rot)

6.2.4 Standortanalyse

Mit einer räumlichen Analyse im GIS wird geprüft, ob die Gewässerpunkte von Killer- oder Einflussfaktoren beeinträchtigt sind, oder bereits einer Kraftnutzung unterliegen. Das Verfahren ist in Abb. 13 dargestellt.

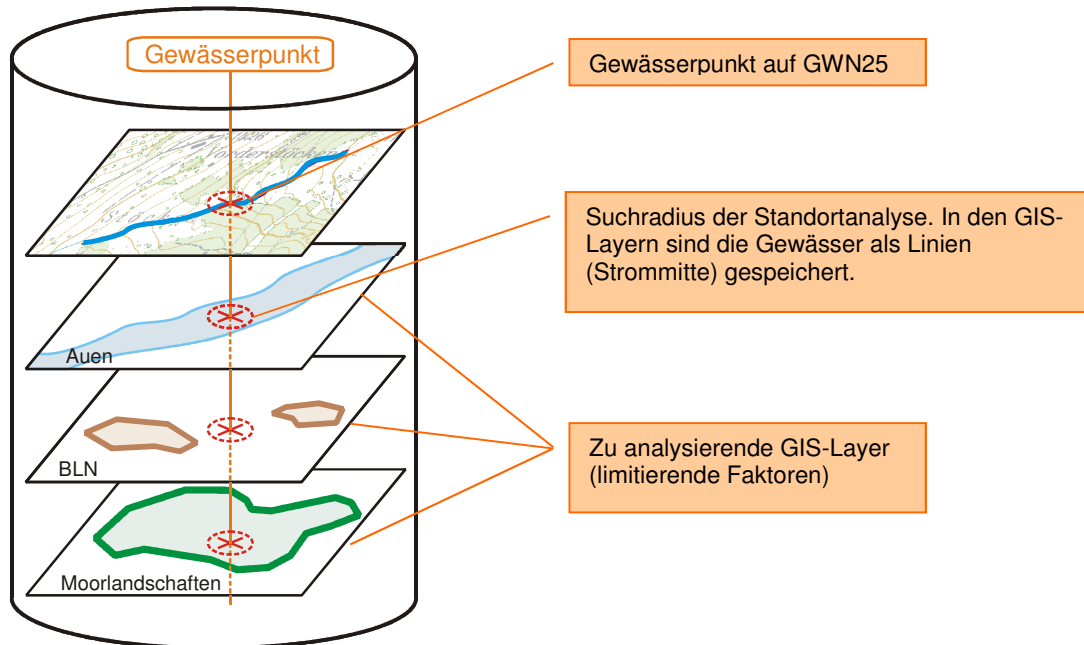


Abb. 13: Prinzip der Standortanalyse

In einer beliebigen Anzahl von Layern (limitierende Faktoren) wird für jeden Gewässerpunkt geprüft, ob sich an dessen Standort Informationen befinden. Im Prinzip erfolgt für jeden Gewässerpunkt ein Durchschuss durch die Layer der limitierenden Faktoren. Mit dem Suchradius wird die Gewässerbreite berücksichtigt.

Erläuterung zur Gewässerbreite: Das Gewässernetz GWN25 liegt als Liniengeometrie vor. Da eine Linie mathematisch keine Ausdehnung hat, wird die tatsächliche Breite des Gewässers im GWN25 nicht berücksichtigt. Einflussfaktoren wie beispielsweise Auen werden vielfach jedoch nur bis an das Ufer erfasst. Mit dem Suchradius wird in der Standortanalyse eine Breite von 20 m für die Gewässer berücksichtigt.

6.2.5 Relevanzlängen der Gewässerpunkte

Jeder diskrete Gewässerpunkt auf dem GWN25 ist repräsentativ für eine bestimmte Gewässerlänge. Die repräsentative Gewässerlänge, auch als Relevanzlänge bezeichnet, ergibt sich aus der Summe der jeweils halben Distanz zum flussabwärts und flussaufwärts liegenden Gewässerpunkt. Normalerweise beträgt die Relevanzlänge 50 m.

Werden aufgrund von Plausibilitätstests Resultate eines Punktes gelöscht, vergrößern sich die Relevanzlängen der benachbarten Gewässerpunkte. Hierdurch werden Fehler bereinigt, ohne die Aussagekraft der Resultate zu beeinflussen.

6.3 Randbedingungen für die Analysen

Für die Analyse der hydroelektrischen Potenziale galten die in Tab. 5 aufgeführten Randbedingungen.

Tab. 5: Randbedingungen und Limitierungen für die Analysen

Nr.	Position	Beschreibung	Grenzwert / Anmerkung
1	Wertebereich Leistung	Ein ursprünglich vorgesehener unterer Grenzwert von 30 kW wurde nicht berücksichtigt. Dies erlaubt auch die Analyse von Kleinstgewässern mit geringem Potenzial	(30 kW)
2	Minimale Gewässerlänge	Gewässer, die eine minimale Gewässerlänge unterschreiten, werden in den Analysen nicht berücksichtigt.	250 m
3	Quellbereich	Analog der <i>minimalen Gewässerlänge</i> , wird der Quellbereich eines Gewässers nicht analysiert.	250 m ab Quelle
4	Gewässerbreite	Breite eines Gewässers, welches im GIS als Linie dargestellt ist.	20 m
5	Gletscher	Gewässerlinien durchziehen teilweise auch Gletscher. Hierbei handelt es sich um virtuelle Gewässer.	Die Daten werden berechnet, jedoch nachträglich „ausgeblendet“

6.4 Sonderfälle

Je nach geographischer und morphologischer Situation liefert das Wassertropfenprinzip **kein** oder ein **falsches** Resultat. Diese Sonderfälle und der Umgang mit ihnen werden nachfolgend anhand von Beispielen erläutert.

6.4.1 Kanäle und anthropogene Gewässer

Problematik: Abb. 14 zeigt ein kanalisiertes Gewässer entlang der Emme (gelb markierte Linie). Der natürliche Oberlauf des Gewässers wird noch korrekt erfasst. Nach der „Begradigung“ schneidet das Gewässer mehrere Tiefenlinien (violett dargestellt).

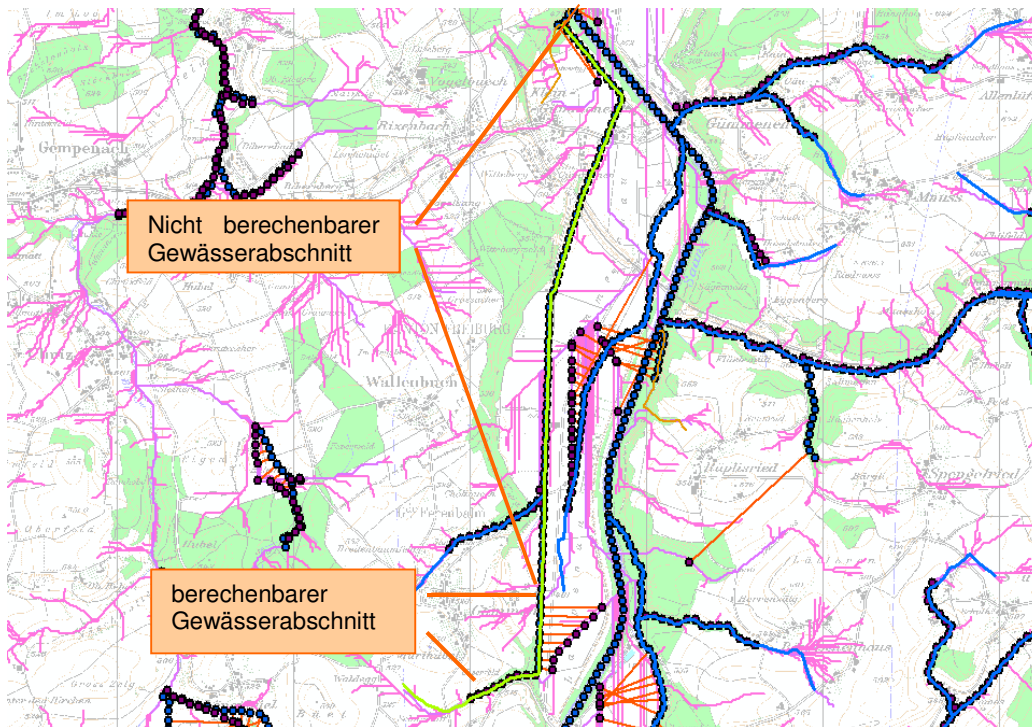


Abb. 14: Anthropogen überprägtes Gewässer (Kanal)

Behandlung, Konsequenz: Für den „begradigten“ Gewässerabschnitt können keine Einzugsgebiete berechnet werden können, da dieser Gewässerabschnitt mehrere generische Gewässer kreuzt, die anderen Gewässern aus dem GWN25 zugeordnet sind. Ohne Einzugsgebiet ist keine Abflussberechnung möglich. Der in Abb. 14 markierte Gewässerabschnitt wird nicht analysiert. Das theoretische hydroelektrische Potenzial für das Gewässer wird unterschätzt.

6.4.2 Falsche Gewässerstruktur

Problematik: Abb. 15 illustriert das Problem von nicht übereinstimmenden Gewässerstrukturen¹⁶. Das generische Gewässernetz des gelb markierten Gewässers mündet in das generische Gewässer des parallel verlaufenden westlichen Gewässers. Ein generisches Gewässer kann per Definition aber nur einem Gewässerlauf aus GWN25 zugeordnet werden. Die Punkte des gelb markierten Gewässers ohne rote Verbindungslinie besitzen keine Referenzpunkte auf einem generischen Gewässer.

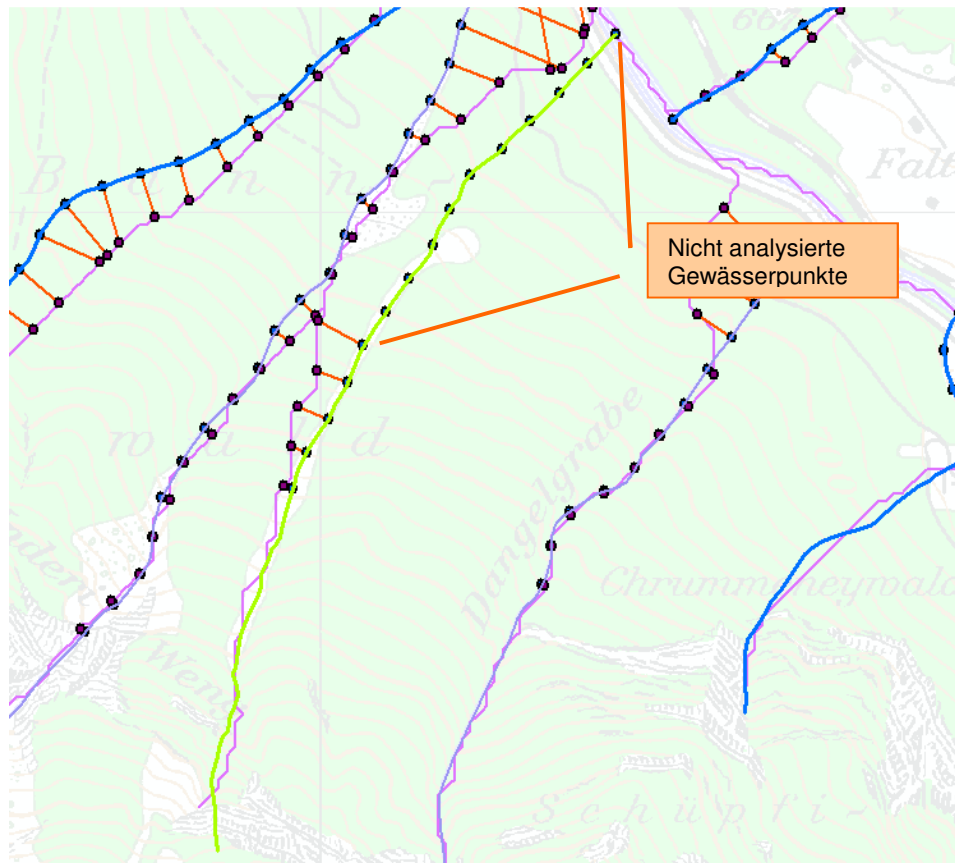


Abb. 15: Nicht übereinstimmende Gewässerstruktur GWN25 - generisches Gewässer

Behandlung, Konsequenz: Gemäss Konzept werden die Einzugsgebiete auf der Basis der Referenzpunkte auf dem zugeordneten generischen Gewässer berechnet. Für Gewässerpunkte, denen keine Referenzpunkte zugeordnet sind werden keine Einzugsgebiete und somit auch keine Abflüsse berechnet. Die markierten Gewässerpunkte werden in den Analysen nicht berücksichtigt.

Das theoretische Potenzial für das gelb markierte Gewässer wird deshalb unterschätzt. Nach der Mündung des generischen Gewässers in das westlich angrenzende Gewässer, werden für die auf diesem Gewässer liegenden Punkte die Einzugsgebiete und damit die Abflüsse überschätzt. Dies führt zu einer Überschätzung der Potenzialen auf dem westlichen Gewässerlauf.

Ein Vergleich der theoretischen Potenziale beider Gewässer zeigt, dass das gelb markierte Gewässer unterschätzt, wohingegen das westliche Nachbargewässer überschätzt wird. Bei

¹⁶ Die unterschiedlichen Gewässerstrukturen ergeben sich aus einer fehlenden Übereinstimmung von GWN25 und Höhenmodell DHM25.

regionaler Betrachtungsweise gleichen sich die Fehler aus, d.h. die Summe des theoretischen Potenzials beider Gewässer ist korrekt. Zu erwähnen ist, dass es sich bei diesem Beispiel um kurze, etwas über 1000 m lange Gewässer handelt.

6.4.3 Falsche Gewässerstruktur, Wasserscheide

Problematik: Abb. 16 zeigt eine weitere mehrfach zu beobachtende Situation. Das GWN25-Gewässer „überfließt“ eine Wasserscheide im DHM25.

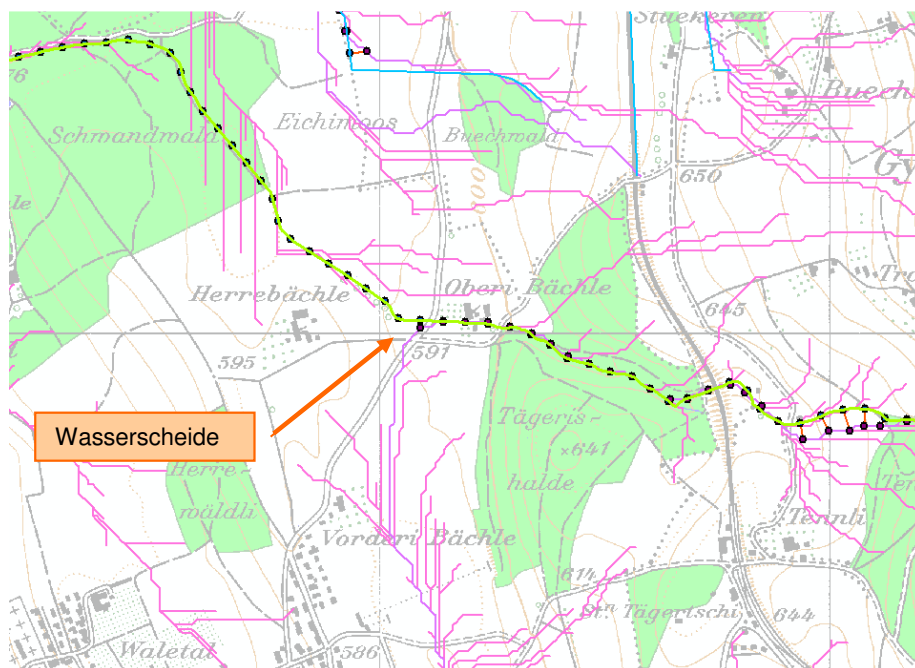


Abb. 16: GWN25 fließt über eine Wasserscheide

Behandlung, Konsequenz: Die Gewässerpunkte im Oberlauf bis zur Wasserscheide werden korrekt analysiert (Einzugsgebiete, Abflüsse, Potenziale berechnen). Für Gewässerpunkte nach der Wasserscheide können die Einzugsgebiete nicht mehr korrekt berechnet werden, die Einzugsgebiete wären zu klein, der Abfluss wird unterschätzt. Alle Gewässerpunkte flussabwärts der Wasserscheide werden nicht analysiert. Das theoretische Potenzial des Gewässers wird unterschätzt.

Die Situation tritt in erster Linie in flachen Gebieten auf. Vielfach handelt es sich um kurze Gewässer mit geringem Gefälle, welche hinsichtlich ihres hydroelektrischen Potenzials nur von geringer Bedeutung sind.

6.4.4 Mündungsbereiche

Problematik: Abb. 17 zeigt, dass sich die Tiefenlinie (hellblaue Markierung) im Mündungsbereich kontinuierlich vom GWN25-Gewässer entfernt. Im vorliegenden Fall wird dieser Effekt hervorgerufen durch die Anhebung des Gewässerbetts im Mündungsbereich durch Sedimentation, d.h. das Gelände liegt tatsächlich unter dem Gewässerbett.

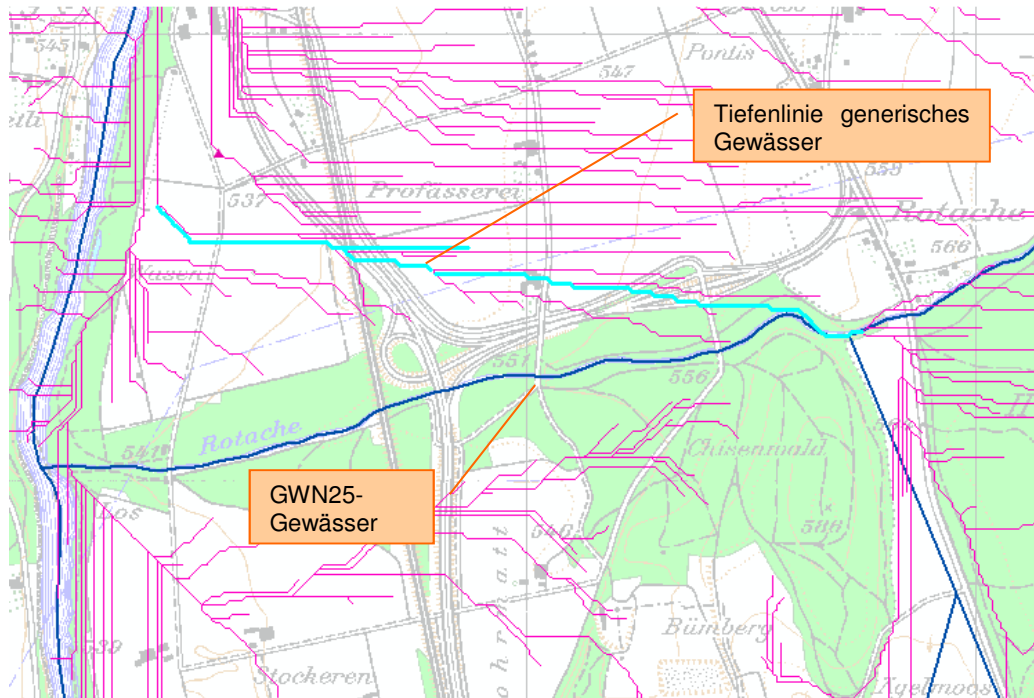


Abb. 17: Nicht analysierbarer Mündungsbereich der Rotache

Behandlung, Konsequenz: Mit Hilfe des Gummibandprinzips, siehe Kap. 6.2.3, können die für die Einzugsgebietsberechnung erforderlichen Referenzpunkte auf dem generischen Gewässer auch festgelegt werden, wenn sich das generische Gewässer, wie im vorliegenden Fall, vom GWN25-Gewässerlauf entfernt. Optisch sieht es nicht sehr ansprechend aus, wenn der Gebietsauslass des Einzugsgebiete mehrere 100 m von GWN25-Gewässerpunkt entfernt liegt. Unter inhaltlichen Gesichtspunkten ist es aber korrekt, so dass die Potenziale für den hellblau markierten Gewässerabschnitt berechnet wurden.

6.4.5 Siedlungsgebiete

Problematik: Auch in Siedlungsgebieten ist vielfach eine schlechte Übereinstimmung von generischem Gewässer und GWN25-Gewässer zu beobachten, siehe Abb. 18. Ursachen sind:

- die anthropogene Überprägung der Gewässer
- die Auflösungsgrenze des DHM25

In Abb. 18 ist das Gerinnebett an jener Stelle, an welcher sich das generische Gewässer vom GWN25-Gewässer entfernt, um einige Meter eingetieft (eigene Beobachtung). Aufgrund der geringen Breite des Gewässers und der steilen Talflanken wird dieser Umstand im Höhenmodell nicht wiedergegeben.

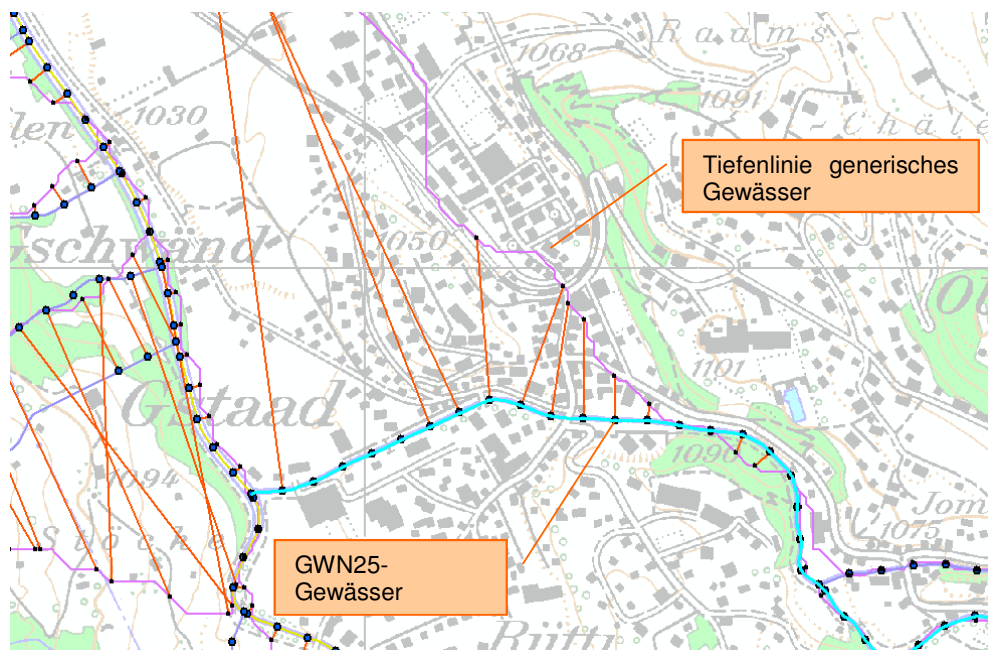


Abb. 18: GWN25-Gewässer und generisches Gewässer im Siedlungsgebiet

Behandlung, Konsequenz: Prinzipiell gleiche Behandlung wie in Kap. 6.4.4. Soweit dies nach optischer Prüfung vertretbar war, wurden die Potenziale berechnet, auch wenn die Referenzpunkte weit vom GWN25-Gewässer entfernt liegen.

Im vorliegenden Fall wurde die Berechnung der Potenziale abgebrochen, nachdem das generische Gewässer die Hauptstasse von Gstaad (Kreuzung mit der Bahnlinie) erreicht hat. Die letzten 400 Meter bis zur Mündung (8 Gewässerpunkt) wurden nicht analysiert.

7 Resultate

Ziel des Teilprojekts war es, eine räumlich hoch aufgelöste, schweizweite Übersicht des theoretischen Kleinwasserkraftwerkspotenzials zu erstellen.

Aus den vorgängig skizzierten Analyseschritten liegen detaillierte Angaben zum theoretischen hydroelektrischen Potenzial und der limitierenden Faktoren aller natürlichen Fließgewässer der Schweiz vor. Die Analysen erfolgten auf Gewässerpunkten, die im äquidistanten Abstand von 50 m platziert wurden. Ein Gewässerpunkt ist repräsentativ für seine Relevanzlänge¹⁷. Für ein Gewässer können die Resultate als „Excel-Tabelle“ interpretiert werden, siehe Abb. 20.

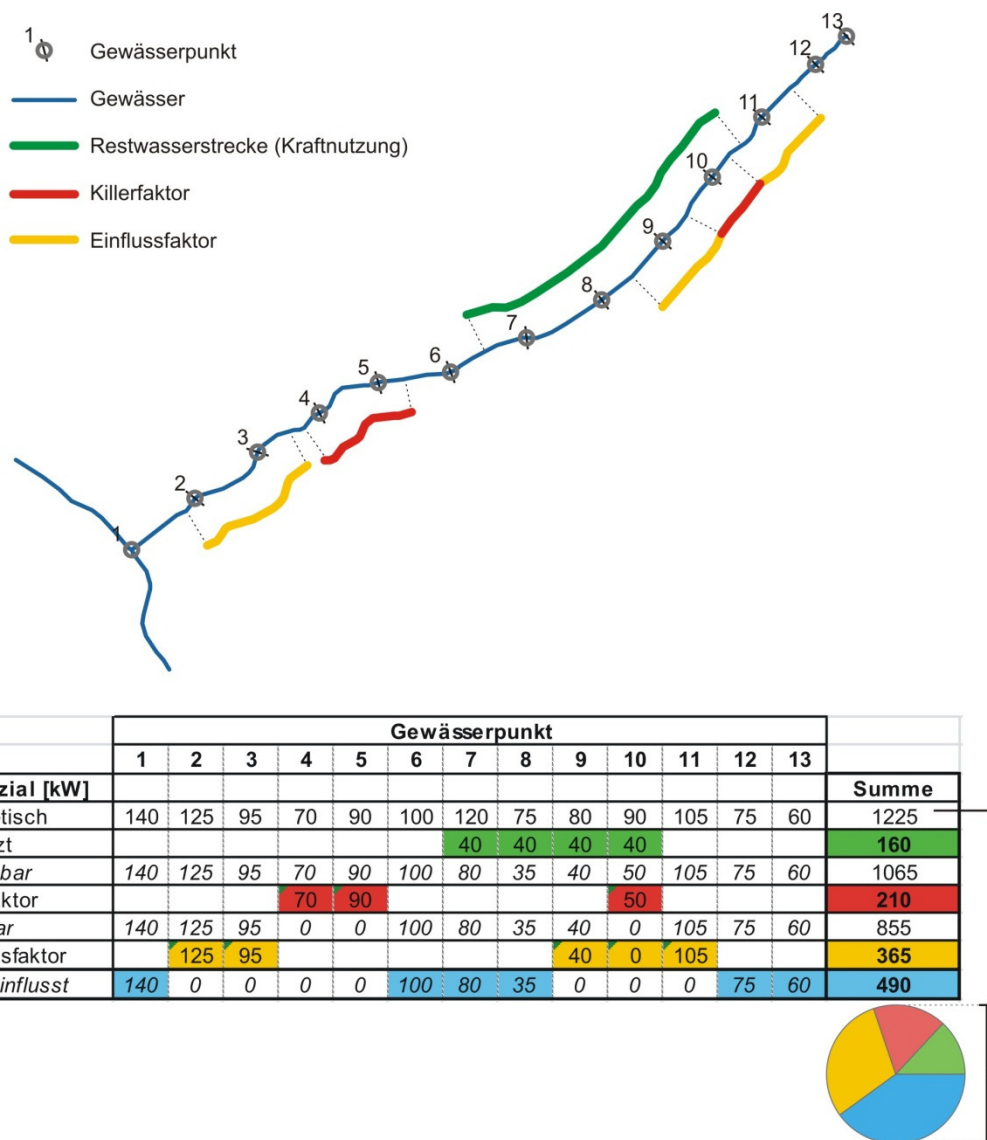


Abb. 20: Theoretisches hydroelektrisches Potenzial und Potenzialanteile für ein Gewässer

¹⁷ Die Relevanzlänge ergibt sich aus der Summe der halben Distanz zu seinen Nachbarpunkten, üblicherweise 50 m.

- Jede **Spalte** enthält alle Informationen aus den Analysen zu einem Gewässerpunkt. Für jeden Gewässerpunkt wird das aufgrund von Abfluss und Höhendifferenz zum flussaufwärts liegenden Nachbarpunkt errechnete theoretische Potenzial ausgewiesen. Je nach Eigenschaften des Gewässerpunktes wird das theoretische Potenzial den Kategorien Killer- oder Einflussfaktoren, resp. bereits durch Wasserkraft genutzt zugewiesen.
- Die **erste Zeile** enthält das theoretische Potenzial für jeden Gewässerpunkt.
- Die **weiteren Zeilen** weisen die Potenzialanteile der bereits vorhandenen Wasserkraftnutzung, respektive jene in den eidgenössischen Schutzgebieten aus.
- Zeilenweises aufsummieren aller Gewässerpunkte ergibt neben dem theoretischen Gesamtpotenzial des Gewässers auch die Potenzialanteile der limitierenden Faktoren. Die Subtraktion der Potenzialanteile von Gesamtpotenzial liefert für jedes Gewässer das theoretisch noch nutzbare Potenzial. Erfahrungsgemäss können 5 % bis 20 % davon realisiert werden. Bei Gewässern mit geringem ökologischem Wert lassen sich bis zu 40 % des theoretisch nutzbaren Potenzials energietechnisch verwerten.
- Gewässerpunkte mit inhaltlich zusammengehörenden Informationen wie genutzte Gewässerstrecken (Kraftwerke) oder Schutzgebiete (Killer-, Einflussfaktor) wurden für die Darstellung im GIS zu Liniengeometrien zusammengefasst.

Anmerkung: Die tabellarische Resultatdarstellung in Abb. 20 ist eine rein theoretische Potenzialbetrachtung. Um die Potenziale in der Tabelle energietechnisch zu nutzen müsste alle 50 m eine Fassung existieren, die den gesamten Abfluss ableitet und am 50 m flussabwärts liegenden Gewässerpunkt turbinieren.

7.1 Restwassermengen

Die Berechnung des theoretischen hydroelektrischen Potenzials erfolgte ohne Berücksichtigung von Restwassermengen. Gründe dafür sind:

1. Das theoretische hydroelektrische Potenzial wird basierend auf dem mittleren Jahresabfluss berechnet. Demgegenüber wird die Leistung von Kraftwerken mittels der Ausbauwassermenge festgelegt. Übliche Ausbauwassermengen von Q_{70} , Q_{90} oder auch Q_{120} liegen deutlich höher als der Jahresmittelwert.
2. Es existiert keine einheitliche Vorschrift, wie die Restwassermenge für alle Fliessgewässer der Schweiz zu ermittelt ist.
3. Restwassermengen für Kraftwerkskonzessionen werden von den Bewilligungsbehörden oft situationsbedingt festgelegt.
4. Eine Quantifizierung der Restwassermenge ist gebunden an ein konkretes Kraftwerksprojekt. Demgegenüber ist das mit der vorliegenden Studie berechnete hydroelektrische Potenzial eine rein theoretische Grösse. Ein Vermischen dieser beiden Betrachtungsweisen führt zu Fehlinterpretationen. Sind Restwassermengen zu berücksichtigen, müsste der Berechnung des hydroelektrischen Potenzials auf der Grundlagen einer Ausbauwassermenge erfolgen.

Die Berücksichtigung von Restwassermengen bei der Berechnung des theoretischen Potenzials wurde mit Frau Irène Schmidli eingehend diskutiert, Abteilungsleiterin Wasserkraft in der Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern. Sie ist nicht zuletzt aufgrund der genannten Argumentationskette auch der Meinung, dass bei der Berechnung des theoretischen Potenzials die Restwassermengen nicht zu berücksichtigen sind.

7.2 Hydroelektrisches Potenzial

Die geographischen, hydrographischen Kenngrößen sowie das theoretische hydroelektrische Kleinwasserkraftwerkspotenzial der Schweiz sind in Tab. 6 zusammengestellt. Ausgewiesen werden auch die Potenzialanteile, die sich aus einer bereits vorhandenen Wasserkraftnutzung, sowie der Berücksichtigung von Killer¹⁸- und Einflussfaktoren ergeben. Die von den limitierenden Faktoren betroffenen Gewässerlängen werden ausgewiesen.

Tab. 6: Geographische und hydrographische Kenngrößen der analysierten Daten

Parameter	Werte	
Hydrographische Kennwerte		
Fläche Schweiz	41'296.3 km ²	
Anzahl analysierter Gewässer	32'098	
Anzahl analysierter Gewässerpunkte	894'824 (729'097) ¹⁹	
Länge aller analysierten Gewässer	49'560 km	
Höchster Gewässerpunkt	3'339 m.ü.M.	
Tiefster Gewässerpunkt	193 m.ü.M.	
Energiepotenzial	Leistung	Gewässerstrecke
① Theoretisch vorhandenes Potenzial P_{tot}	11'992 MW	49'577 km
② Genutztes Potenzial ²⁰ P_{GN}	4'649 MW	2'200 km
③ Verfügbares Potenzial ①-② P_{Ver}	7'343 MW	47'377 km
④ Ausgeschlossen durch Killerfaktoren P_{K}	603 MW	1'602 km
⑤ Limitiert durch Einflussfaktoren P_{E}	1'765 MW	7'368 km
⑥ Unbeeinflusstes Potenzial ③-④ P_{PNutz}	6'739 MW	45'775 km

7.3 Potenzialanteile der Schutzgebiete

Erstaunen mag der geringe Anteil der Schutzgebiete am theoretischen Potenzial, (603 MW + 1765 MW), bei einer Gesamtlänge der betroffenen Gewässer von 8970 km. Die Schutzgebiete befinden sich primär in den Oberläufen (Quellgebieten) der Fließgewässer, welche aufgrund der geringen Abflussmenge jedoch nur ein geringes Potenzial aufweisen, siehe Abb. 21.

¹⁸ Eidgenössische Schutzgebiete

¹⁹ Der in Klammer ausgewiesene Wert repräsentiert die tatsächliche Anzahl der Gewässerpunkte, welche für die Berechnung des theoretischen hydroelektrischen Potenzials verwendet wurden. Die Reduktion ergibt sich aus der nachgeschalteten Fehlerbereinigung.

²⁰ Ausgewiesen wird das theoretische Potenzial der beeinflussten Gewässerstrecken, Für ca. 50 % der Gewässerstrecken sind keine Angaben zur installierten Leistung vorhanden.

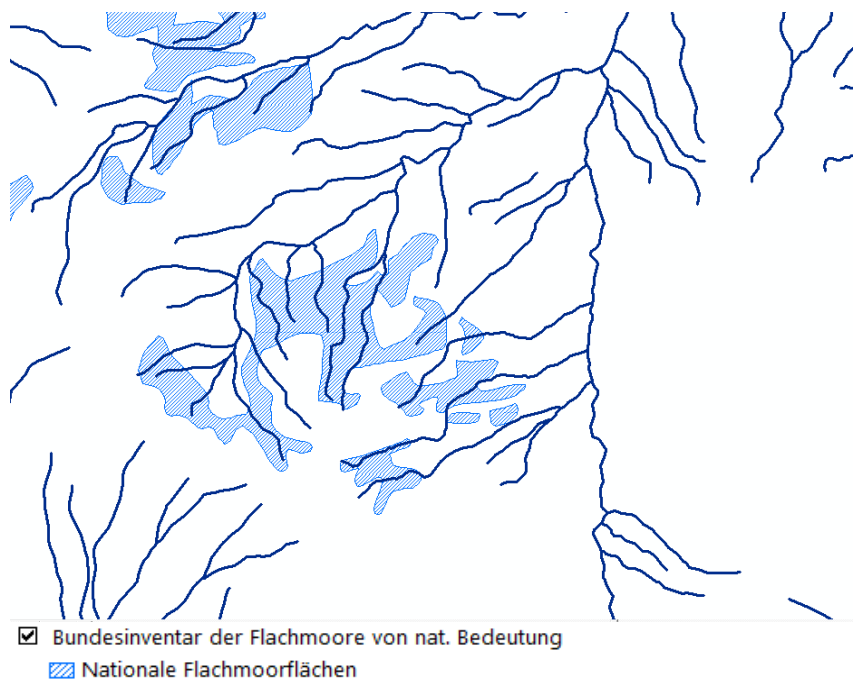


Abb. 21: Geographische Lage nationaler Schutzgebiete zum Gewässernetz

7.4 Potenzialanteil vorhandene Krafternutzung

Um das genutzte Wasserkraftpotential zu ermitteln, wurde das theoretische Potential der ca. 2'200 km langen Restwasserstrecken aufsummiert.

Anmerkung zur ermittelten Länge der Restwasserstrecke: Die Untersuchungen der EAWAG /12/ weisen eine Länge der Restwasserstrecken von 2712 km auf. Bei der Ausscheidung der Restwasserstrecken wurden auch Abflussbeeinflussungen an Gewässerstrecken unterhalb von Rückgabestellen berücksichtigt. Insbesondere im Tessin wurden Gewässerabschnitte als Restwasserstrecken bezeichnet, welche wir aufgrund der uns zur Verfügung stehenden Daten nicht überprüfen konnten. Eine Anfrage an die EAWAG für einen Abgleich der Resultate blieb unbeantwortet.

Für die 2'200 km genutzten Gewässerabschnitte wurde ein theoretisches Potenzial (Leistung) von 4'649 MW ermittelt. Dies ist deutlich geringer als die tatsächliche Ausbauleistung der Wasserkraftanlagen gemäss WASTA /13/ von 16'109 MW. Gründe hierfür sind:

1. Die Ausbauleistung von Wasserkraftanlagen basiert auf der Ausbauwassermenge, welche deutlich höher ist als der Jahresmittelwert.
2. Es wurden auch die Restwasserstrecken/Überleitungen von Speicherkraftwerken berücksichtigt, die für den Spitzenbetrieb ausgelegt sind. Deren Ausbauleistung übersteigt das theoretische Potential bei weitem.
3. Gewässer, welche für das Kleinwasserkraftpotential nicht Interesse sind wie die Unterläufe von Rhein, Rhone und Aare wurden in den Analysen nicht berücksichtigt.

Eine direkte Gegenüberstellung von Ausbauleistung und theoretischen Potential führt deshalb zu Fehlinterpretationen. Insofern ist es im Rahmen der Studie korrekt, für das genutzte Potential nur das in den Restwasserstrecken enthaltene theoretische Potential auszuweisen.

Eine Gegenüberstellung der Resultate der Studie und der jährlichen Stromproduktion findet sich in Kap 7.5.

7.4.1 Betrachtung einzelner Kraftwerksstandorte

Die Standortwahl der existierenden Wasserkraftanlagen ist in erster Linie bestimmt durch ein möglichst hohes Energiepotenzial des Gewässers. Extrem hohe Energiepotenziale an einzelnen Gewässerabschnitten wurden im Rahmen der Qualitätssicherung detaillierter betrachtet.

Mit einem räumlichen Verschnitt wurden alle Gewässerpunkte identifiziert, die extrem hohe Energiepotenziale aufweisen, siehe dazu die Ausführungen in Kap. 10.2. Die grössten Werte wurden visuell überprüft, Beispiele sind in Abb. 22 dargestellt.

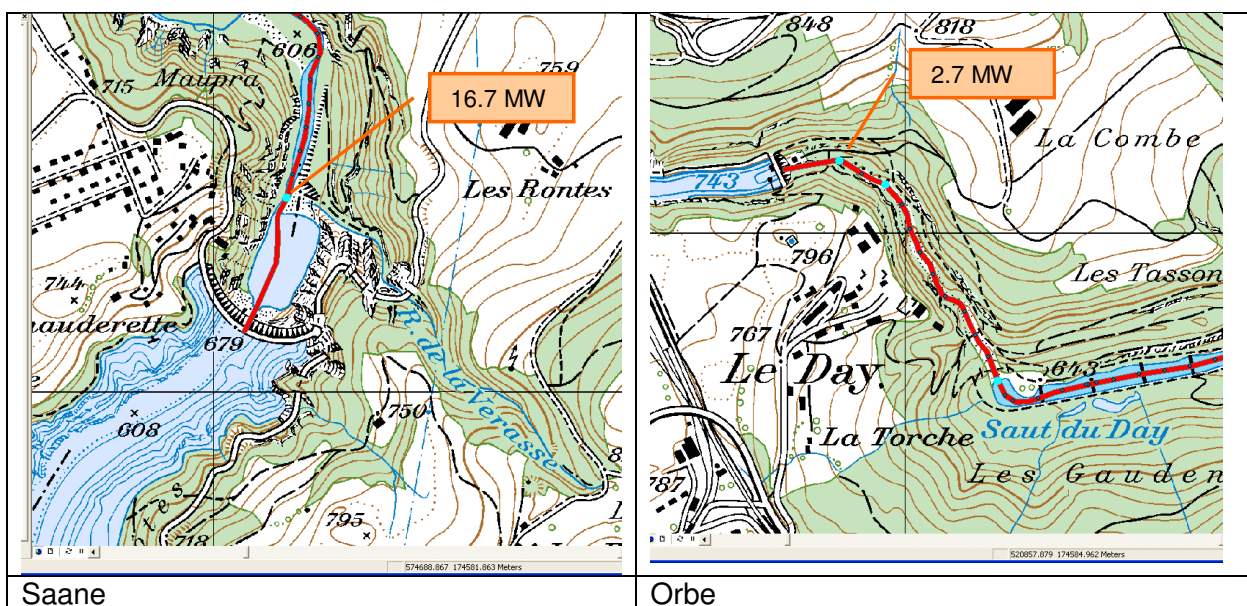


Abb. 22: Theoretische hydroelektrische Potenziale an Kraftwerksstandorten

Abb. 22 verdeutlicht, warum auf relativ kurzen Gewässerstrecken recht hohe Energiepotenziale zur Verfügung stehen. Gewässerpunkte an Kraftwerksstandorten repräsentieren das Gefälle sowie die Abflussmenge am entsprechenden Standort.

Die Prüfung einzelner Gewässerpunkte an Kraftwerksstrecken ist ein Beweis für die Güte und Leistungsfähigkeit des Berechnungskonzepts. Mit unseren Analysen wurden (fast) alle Kraftwerksstandorte und Wasserfälle²¹ lagegenau identifiziert.

7.5 Gegenüberstellung der Resultate mit der jährlichen Stromproduktion aus Wasserkraft

Die mittlere Jahresproduktion der 576 Wasserkraftwerke liegt bei 35'800 GWh. Den grössten Anteile haben die Laufwasserkraftwerke mit 16'800 GWh, respektive die Speicherkraftwerke mit 17'400 GWh. Der Anteil der Pumpspeicherkraftwerke liegt bei 1'600 GWh.

In Tab. 7 sind die Resultate der Potenzialstudie der aktuellen Wasserkraftstatistik 2011 gegenübergestellt.

²¹ Wasserfälle sind durch eine maximale Fallhöhe bei minimaler räumlicher Distanz von zwei Gewässerpunkten charakterisiert.

Tab. 7: Vergleich Wasserkraftstatistik 2011 und Resultate Potenzialstudie

	Potenzialstudie Kleinwasserkraft			WASTA 2011
	Unberücksichtigt	Berücksichtigt	Total	
Anzahl Anlagen	78	498	576	576
Installierte Leistung MW	1693	12767	14460	16109
Produktion GWh	9512	29903	39415	39613
Genutzte Gewässerlänge km		2200		2712

- In der Potenzialstudie wurden 78 Anlagen nicht berücksichtigt, welche eine Jahresproduktion von 9'512 GWh aufweisen. Diese Anlagen liegen an den Unterläufen von Rhein, Rhone und Aare, also Gewässerabschnitte, die für die Kleinwasserkraft nicht interessant sind.
- In der Studie berücksichtigt wurden 498 Wasserkraftwerke mit einer Jahresproduktion von 29'903 GWh. Die von diesen Kraftwerken genutzte Gewässerlänge beträgt ca. 2'200 km. Bei Laufwasserkraftwerken wurde anhand der Karte visuell die Länge des Rückstaus ermittelt. Bei Speicherkraftwerken müssten alle Gewässer oberhalb der Staumauer als genutzt markiert werden. Aufgrund der komplexen und oft nicht bekannten Überleitungen ist das aber nicht vollständig möglich.
- Die Differenz²² von 1649 MW bei der installierten Leistung ist in Kraftwerken begründet, die zwar im Untersuchungsgebiet liegen, aber nicht berücksichtigt werden könnten. Dazu zählen u.a. Trinkwasserkraftwerke und vor allem Kraftwerke, die keinem Gewässer zugeordnet werden konnten.

7.5.1 Plausibilisierung

1. Theoretisches Potenzial genutzter Gewässerstrecken und Stromproduktion.
Gemäss Tab. 6 beträgt das theoretische Potenzial der genutzten Gewässerstrecken von 2'200 km ca. 4649 MW. Unter der Annahme einer mittleren Jahresproduktion von 5'000 Std ergibt sich eine Stromproduktion von 23'245 GWh. Die WASTA Statistik weist für die 498 berücksichtigten Kraftwerke 29'903 GWh aus.

2. Plausibilitätsprüfung der Resultate der Potenzialstudie anhand der Grimselkraftwerke.

Kenndaten Grimselkraftwerke

Ausbauleistung 1'060 MW
 Jahresproduktion 2'300 GWh
 Turbinierete Wassermenge 700 mio m³ / Jahr

Kenndaten BFE Potenzialstudie

Mittlerer Jahresabfluss am Gebietsauslas bei Innertkirchen = 32 m³/s (1000 mio m³/J)

Theoretische Potenziale aller Gewässer im Einzugsgebiet = 208 MW.

Theoretische Jahresproduktion 208 MW * 24 * 365 = 1822 GWh

Da es sich um ein Pumpspeicherwerk handelt wird unter der Annahme, dass 25 % der Energie aus gepumptem Wasser erzeugt eine Jahresproduktion von 2277 GWh ermittelt.

²² Ergibt sich durch Subtraktion von 16'109 MW -14'460 MW

7.6 Kantonale Verteilung des hydroelektrischen Potenzials

Die detaillierte, räumlich hoch aufgelöste Kenntnis des theoretischen hydroelektrischen Potenzials in der Schweiz, siehe Abb. 20 öffnet ein bereits Spektrum an Analysen. Ein Beispiel ist in Abb. 23 dargestellt, es zeigt das theoretische hydroelektrische Potenzial je Kanton.

Wie nicht anders zu erwarten, verfügen die Bergkantone (Bern, Graubünden, Tessin, Uri und Wallis) über die höchsten Potenziale. Es ist zu berücksichtigen, dass die Unterläufe der grossen Flüsse Rhein und Rhone nicht analysiert wurden.

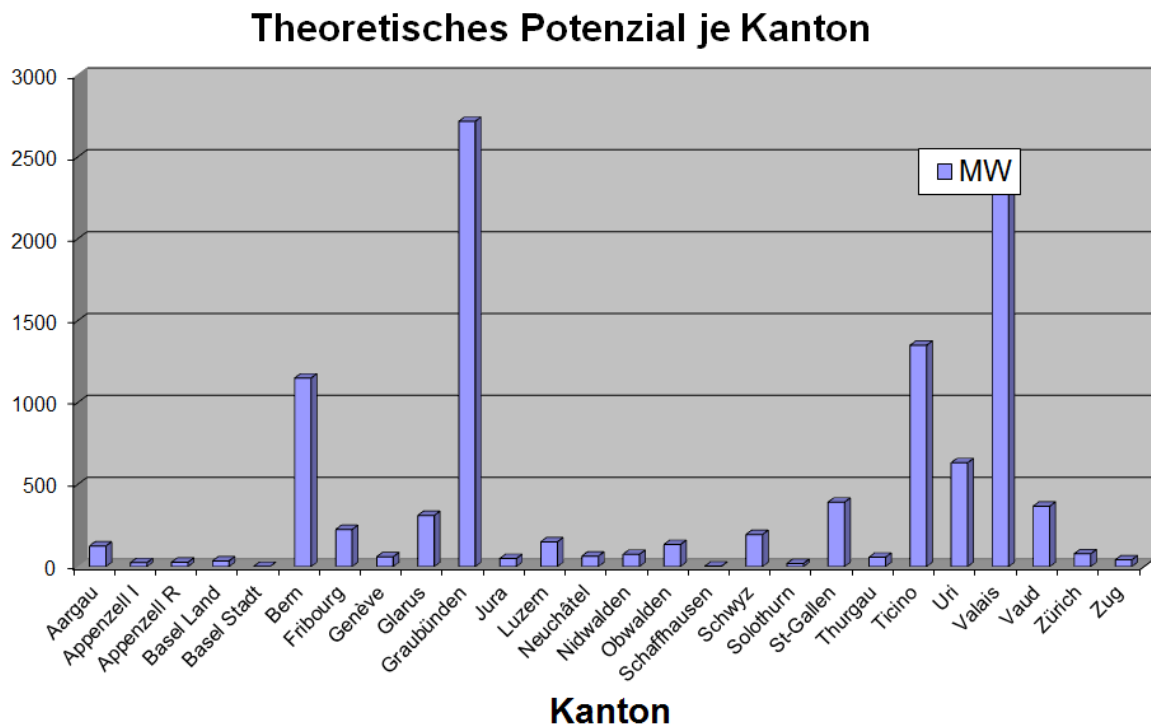
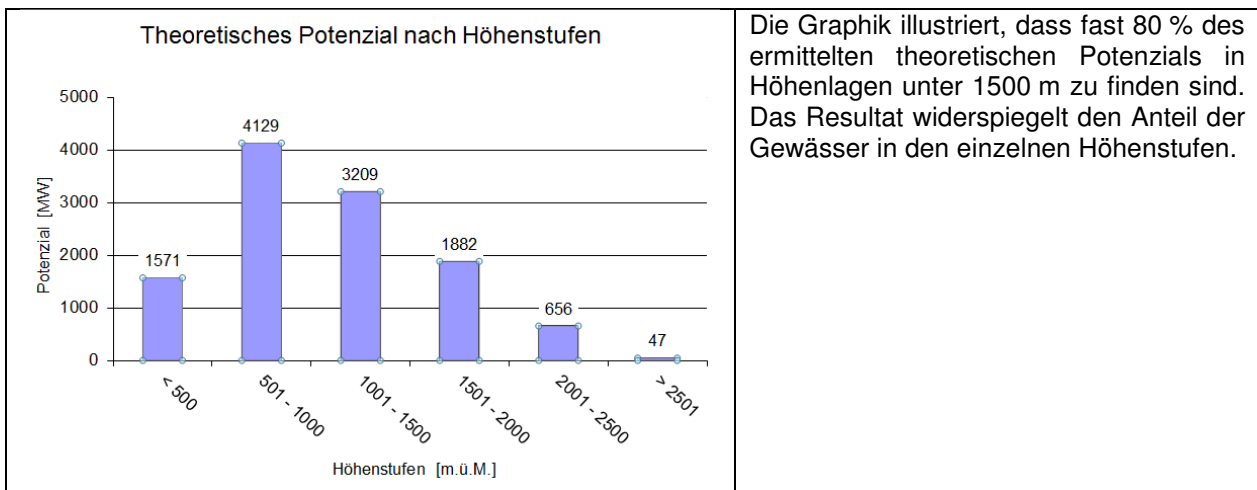


Abb. 23: Theoretisches hydroelektrisches Potenzial je Kanton

7.7 Energiepotenzial je Höhenstufe

Die untenstehenden Graphiken zeigen die Energiepotenziale differenziert nach Höhenstufen auf der Basis der analysierten Gewässerpunkte.



Die Graphik illustriert, dass fast 80 % des ermittelten theoretischen Potenzials in Höhenlagen unter 1500 m zu finden sind. Das Resultat widerspiegelt den Anteil der Gewässer in den einzelnen Höhenstufen.

Abb. 24: Histogramm der Energiepotenziale je Höhenstufe

7.8 Theoretisches Potenzial der Gewässer < 1000 m Länge

Das analysierte digitale Gewässernetz GWN25 weist 18'254 Gewässer aus, mit einer Länge < 1000 m. Energietechnisch sind die kurzen Gewässer trotz ihrer hohen Zahl jedoch nur von geringer Bedeutung, siehe Tab. 8. Gründe dafür sind.

- Kurze Gewässer besitzen kleine Einzugsgebiete und damit auch geringe Abflüsse.
- Viele dieser kurzen Gewässer befinden sich ausserhalb der Alpen und weisen neben geringen Abflüssen auch ein geringes Gefälle auf.

Tab. 8: Energiepotenziale der Gewässer < 1000 m

Hydrographische Kennwerte		
Anzahl analysierter Gewässer	18'254	
Länge aller Gewässer	11'105 km	
Parameter	Werte	
Energiepotenzial	Leistung	Gewässerstrecke
① Theoretisch vorhandenes Potenzial P_{tot}	196.0 MW	11'105.0 km
② Genutztes Potenzial P_{GN}	13.6 MW	4.7 km
③ Verfügbares Potenzial ①-② P_{Ver}	182.4 MW	11'100.3 km
④ Ausgeschlossen durch Killerfaktoren P_K	7.7 MW	166.6 km
⑤ Limitiert durch Einflussfaktoren P_E	49.9 MW	1007.1 km
⑥ Nutzbares Potenzial ③-④ P_{Nutz}	174.7 MW	10'933.7 km

7.9 Gewässer mit einem theoretischen Potenzial < 30 kW

Wie in Kapitel 6.3 ausgeführt wurden entgegen der ursprünglichen Idee auch Gewässer mit einem theoretischen Potenzial < 30 kW analysiert.

Tab. 9: Gewässer mit einem Energiepotenzial < 30 kW

Parameter	Wert
Anzahl Gewässer	21'306
Länge der Gewässer	18'281 km
Theoretisches Potenzial	148.5 MW

Unter Berücksichtigung von Gewässerlänge und Anzahl der Gewässer wird erkennbar, dass es sich vorwiegend um kurze Gewässer handelt. In gewisser Weise spiegelt dies die Ergebnisse aus Tab. 8 wieder. Bei der Längenangabe von 18'281 km ist zu berücksichtigen, dass hier auch längere Gewässer berücksichtigt wurden, für welche aufgrund der topologischen Gegebenheiten, respektive des Gewässertyps (kein natürliches Gewässer), nur ein Teil des Gewässerlaufs analysiert wurde, siehe Kap. 3. In Tab. 9 wird jedoch die Gesamtlänge der Gewässer ausgewiesen.

7.10 Verteilung der Energiepotenziale

Abb. 25 zeigt die theoretischen Energiepotenziale aller Gewässer sortiert nach Beträgen. Etwa 5000 Gewässer weisen ein theoretisches Potenzial grösser als 100 kW auf. Etwa 2700 Gewässer besitzen ein theoretisches Potenzial > 300 kW.

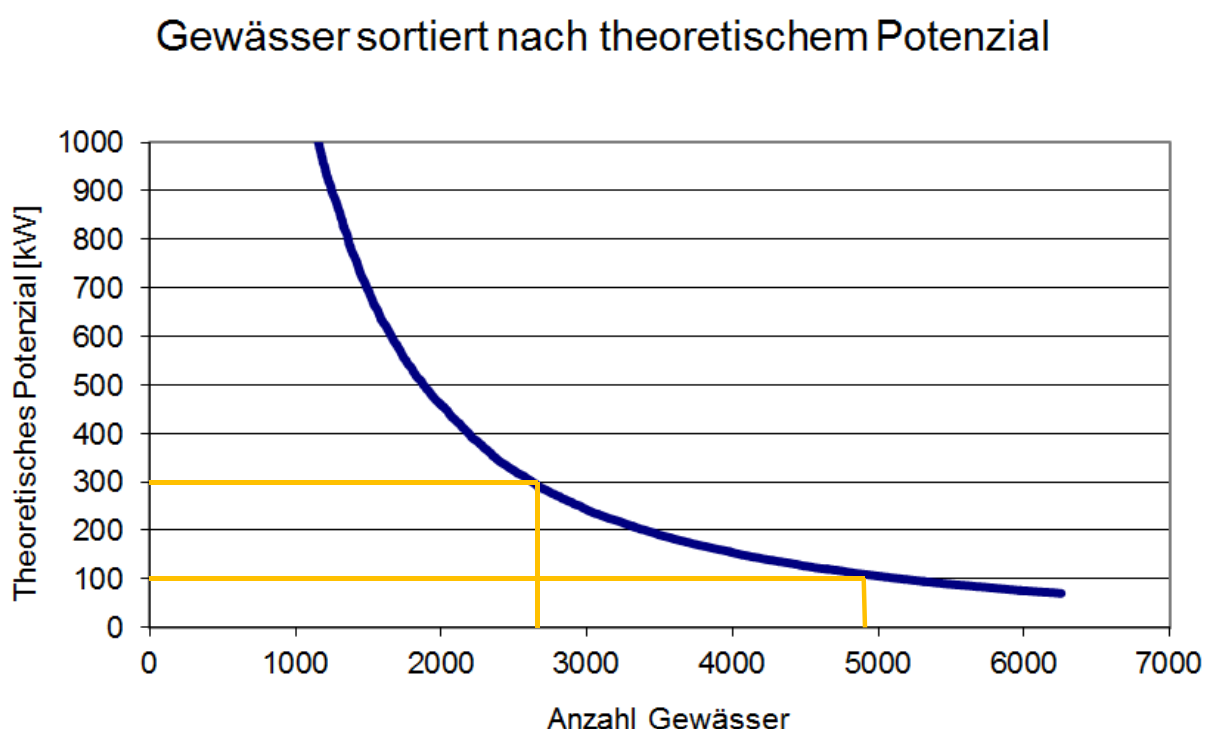


Abb. 25: Theoretisches Energiepotenzial je Gewässer

Weitere denkbare Auswertungen wären:

- Durch eine Verschneidung des hydroelektrischen Potenzials mit Informationen zu den Siedlungs- und Industriegebieten können räumliche Abhängigkeiten von Angebot (Energie) dem Bedarf visualisiert werden²³.
- Identifikation potenzieller Kraftwerksstandorte nach unterschiedlichen Kriterien, wie kürzeste Ausleitstrecke, maximales Gefälle, u.a..

²³ Interessant im Hinblick auf das SmartGrid Konzept, die Energie dort zu erzeugen, wo sie benötigt wird.

7.11 Kartographische Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse können zielgerichtet in unterschiedlichen Detaillierungsstufen kartographisch visualisiert werden, siehe Abb. 26.

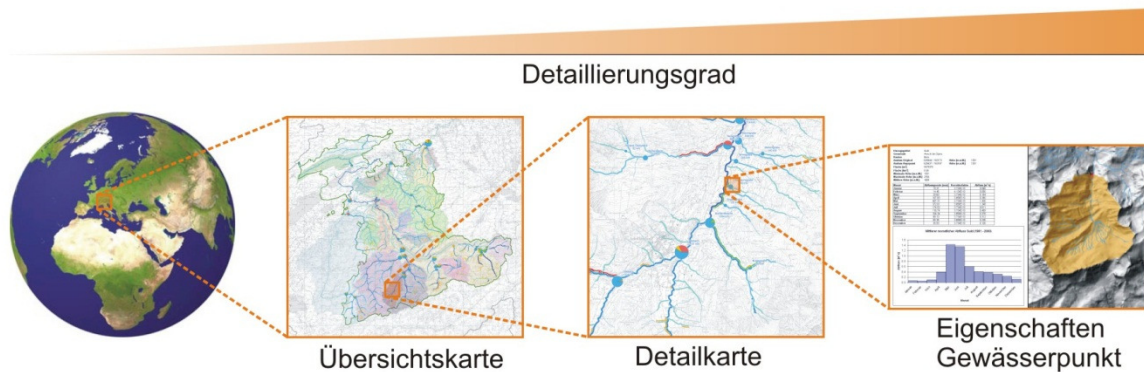


Abb. 26: Detaillierungsgrad thematischer Karten

Neben einer massstabsabhängigen Hintergrundkarte enthalten die Karten folgende Informationen:

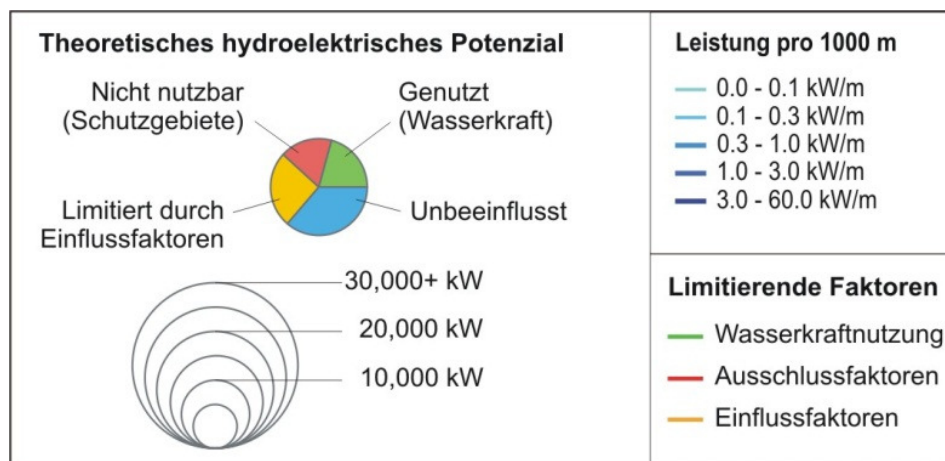


Abb. 27: Legende der Karteninhalte

- Das *Theoretische Energiepotenzial* wird flächenproportional als Kreisdiagramm an der Mündung eines Gewässers dargestellt. Die Teilpotenziale (genutzt, unbeeinflusst, limitiert durch Einflussfaktoren und Nutzung ausgeschlossen) sind gemäss ihrem Anteil am theoretischen Potenzial farblich differenziert als Kreissegmente dargestellt.
- Die *Spezifische Leistung* gibt die Leistung je Meter an (kW/m). Sie wird für Gewässerabschnitte von 1 km Länge berechnet. Die Ergebnisse werden in 5 Klassen eingeteilt und farblich differenziert dargestellt.
- Die limitierenden Faktoren und vorhandene Kraftnutzungen werden mit Liniereignissen²⁴ entlang der entsprechenden Gewässerstrecken dargestellt:
 - Vorhandene Kraftnutzung (WASTA Daten), grün in Fließrichtung links
 - Einflussfaktoren, gelb in Fließrichtung rechts
 - Killerfaktoren, rot in Fließrichtung rechts

²⁴ Softwaretechnisch werden benachbarte Punkte mit gleichen Eigenschaften zu Liniereignissen zusammengefasst.

7.11.1 Übersichtskarte (M 1:100 000)

Ziel dieser Karten ist es, die **regionale Verteilung der Energiepotenziale** übersichtlich darzustellen. Hierfür werden grossräumige Flussgebiete festgelegt, die farblich differenziert werden. Am Gebietsauslass werden die Energiepotenziale der Flussgebiete ausgewiesen.

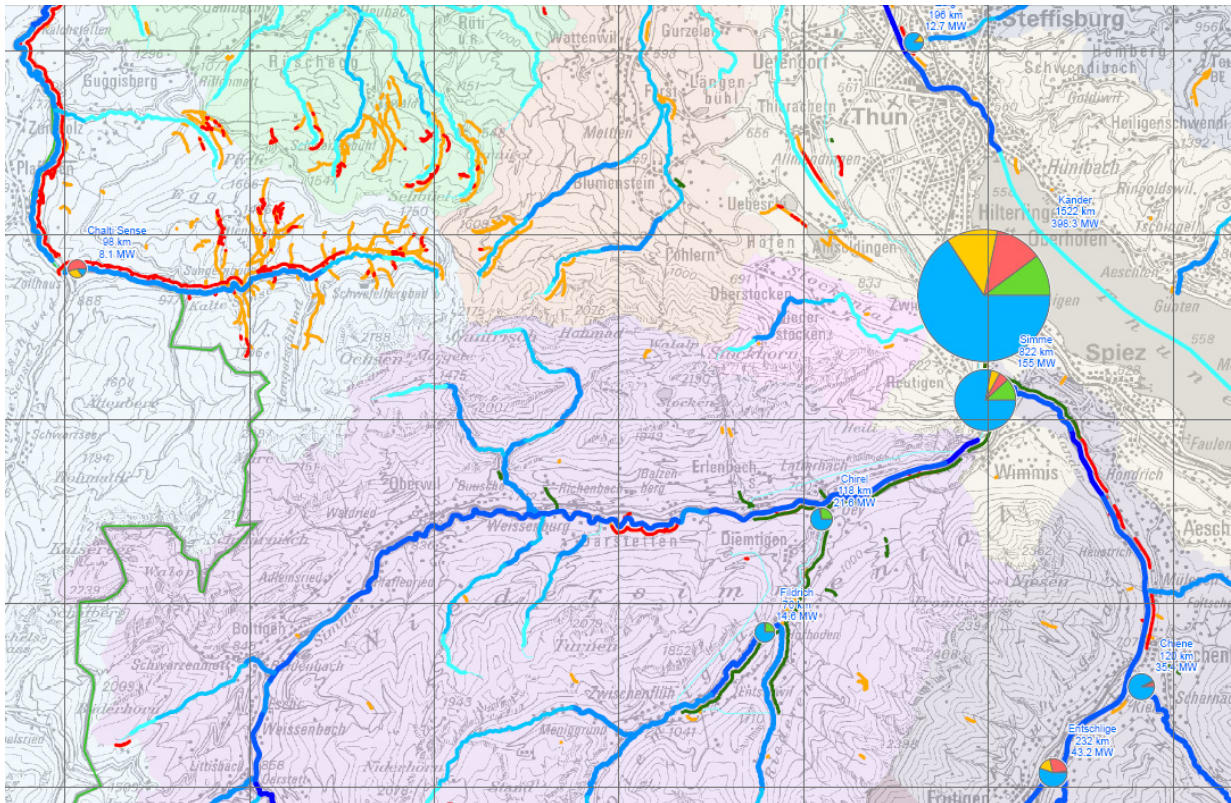


Abb. 28: Beispiel einer Übersichtskarte (Auszug)

7.11.2 Detailkarte (M 1:25 000)

Die Karten basieren auf den Blattchnitten der Landeskarten LK25. Die Energiepotenziale aller Gewässer werden jeweils an der Mündung als Kreisdiagramm dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit kann es angebracht sein, Potenziale < 30 kW nicht in Kreisdiagrammen darzustellen.

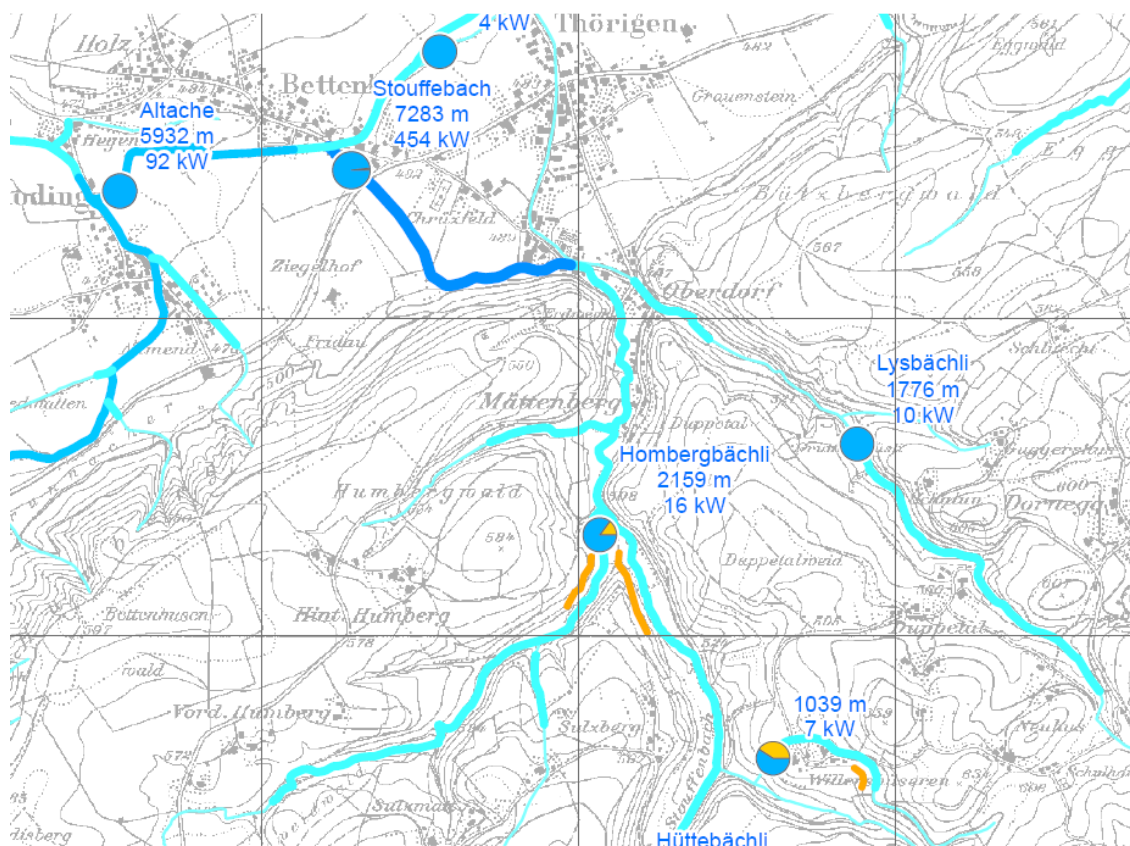


Abb. 29: Beispiel einer Detailkarte (Auszug)

Alle Karten basieren auf den Werten der einzelnen Gewässerpunkte, welche in äquidistanten Abständen von 50 m auf den Gewässern verteilt sind. Jeder Punkt repräsentiert einen Gewässerabschnitt der sich aus dem Abstand zu seinen benachbarten flussaufwärts und flussabwärts liegenden Punkt ergibt (normalerweise 50 m). Für Übersichtskarten werden die Resultate je nach gewünschter Aussage mehr oder weniger „generalisiert“.

7.12 Bewertung und Ausblick

Mit der vorliegenden Studie stehen erstmals Informationen zum theoretischen hydroelektrischen Potenzial aller Fließgewässer der Schweiz zur Verfügung, die auf einer einheitlichen Datengrundlage und mit einer einheitlichen Analysemethodik ermittelt wurden. Auch wenn einzelne Gewässer aufgrund der geographischen Gegebenheiten, resp. dem zugrundeliegenden Höhenmodell nicht berechnet werden konnten, schränkt dies die Aussagekraft der Resultate nicht ein.

Berücksichtigt wurden die bekannten, vorhanden Wasserkraftanlagen, sowie eidgenössische Schutzgebiete. Die vorliegenden, räumlich hoch aufgelösten Resultate bilden eine fundierte

Grundlage für weiterführende Analysen, wie beispielsweise die gesamtheitliche Sicht der Wasserkraftnutzung unter Einbezug sozioökonomischer Faktoren.

Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, ist das ausgewiesene theoretische Potenzial mit dem notwendigen Sachversand zu betrachten. Das unter technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und rechtlichen Gesichtspunkte noch ausbaubare Potenzial liegt deutlich unter dem theoretischen Potenzial. Für die Berechnung des theoretischen Potenzials wurden keine Restwassermengen berücksichtigt, da diese nicht nach einer einheitlichen Methodik berechnet werden können. Restwassermengen werden nach Aussagen der Bewilligungsbehörden situationsbedingt für einzelne Kraftwerksstandorte festgelegt.

Das grosse Interesse an den Resultaten manifestiert sich in den bereits im Vorfeld abgegebenen Daten. Neben kantonalen Fachstellen, sind Forschungsanstalten, Gemeinden, Private und sogar Schulen am hydroelektrischen Potenzial der Fließgewässer interessiert.

Es muss das Ziel sein, die Ergebnisse der Studie einem breiten Interessentenkreis zugänglich zu machen.

8 Datenhaltung

Die Daten werden in zwei unterschiedlichen Systemen verwaltet.

1. Eine Oracle Datenbank enthält die Ergebnisse und Zwischenergebnisse der Analysen.
2. Eine ESRI File Geodatabase enthält GIS-Daten für Kartendarstellungen.

Die Daten in Oracle werden auch als Primärdaten bezeichnet, wohingegen jene in der Geodatabase als abgeleitete Daten bezeichnet werden.

8.1 Oracle Datenbank

Die Resultate der einzelnen Analyse- und Berechnungsschritte, siehe Kap. 6, sind für jeden Gewässerpunkt, gemäss dem Datenmodell (Kap. 5), in Oracle gespeichert.

Basierend auf den Daten der einzelnen Gewässerpunkte erfolgten weitere Analysen wie:

- Berechnung des hydroelektrisches Potentials für einen Gewässerabschnitt definierter Länge (1000 m)
- Berechnung des Potentials der einzelnen Flüsse
- Berechnung des Potentials für Flussgebiete
- Identifikation potentieller Kraftwerksstandorte
- Plausibilitätstests
- etc

Die Resultate dieser Analysen sind ebenfalls in Oracle gespeichert.

8.2 File Geodatabase

Eine ESRI File Geodatabase enthält die Geometrien aller Einzugsgebiete. Des Weiteren wurden ausgewählte Daten, die für die kartographische Darstellung der Resultate in ArcGIS erforderlich sind, aus Oracle exportiert und in der File Geodatabase als Featureclass abgelegt. Dies ist aus Gründen der Performance bei der Erstellung von Karten notwendig. Die Geodatenbank enthält folgende Featureclasses:

Tab. 10: Inhalte der Geodatenbank

Datensatz	Beschreibung
Abschnitt_1000	Hydroelektrisches Potential für Gewässerabschnitte von 1000 m
Einflussfaktoren	BLN-Gebiete für die Bänderdarstellung
Killerfaktoren	Killerfaktoren für die Bänderdarstellung (Eidgenössische Schutzgebiete)
Kraftnutzung	Gewässerstrecken, die durch Kraftwerke genutzt werden.
Stream_Result	Theoretisches hydroelektrisches Potential und Potentialanteile für jedes analysierte Gewässer
Streamdata_Result	Theoretisches hydroelektrisches Potential und Potentialanteile für jeden analysierten Gewässerpunkt
Watershed	Einzugsgebiete der analysierten Gewässerpunkte
Stream_MQ	Mittlere monatlichen Abflüsse und Jahresabfluss der Gewässer

Über eindeutige Schlüssel der einzelnen Featureclasses können die Daten der Geodatabase mit der Oracledatenbank verknüpft werden.

8.3 Softwaresysteme, Speicherbedarf

Tab. 11: Verwendete Softwaresysteme und Speicherbedarf

Beschreibung	Datenbanksystem, Version	Speicherbedarf
Datenmodellierung	CaseStudio2, Version 2.22	
Datenbanksystem	Oracle10g, Version 10.2.0.1	9 GB
Geodaten: Einzugsgebiete, Hydroelektrisches Potenzial, Einflussfaktoren, Kraftnutzung	ESRI File Geodatabase ArcGIS 10.	1.6 GB

9 Softwaremodule

Nach einem modularen Konzept wurde die in Kap. 6 skizzierte Berechnungsmethodik softwaretechnisch abgebildet. Im Wesentlichen entspricht jeder Bearbeitungsschritt einem Modul, welches für sich eigenständig lauffähig ist. Durch das Zusammenfassen der Module zu einer Prozesskette können die Analysen im automatisiert durchgeführt werden (Batchmodus).



Abb. 30: Softwaremodule für die Berechnung der hydroelektrischen Potenziale

Die Module liegen als Bibliotheken (DLL) oder als ausführbare Programme (EXE) vor und sind in VisualBasic 6 programmiert. Einzelne Module verfügen über eine Benutzeroberfläche, können aber auch im Batchmodus betrieben werden. Für raumbezogene Analysen greifen die Programme auf das ArcObjects Objektmodell von ESRI zu.

Steuerparameter für die Analysen und variable Informationen zur Programmausführung sind in einem *Konfigurationsfile* definiert. Für jedes Softwaremodul ist im Konfigurationsfile eine Section reserviert. Funktionen und Besonderheiten der einzelnen Module werden nachfolgend kurz erläutert.

Tab. 12: Beschreibung der Softwaremodule

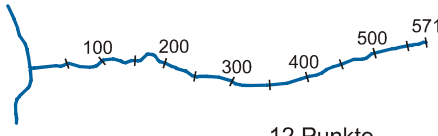

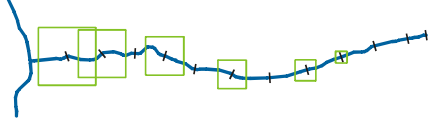
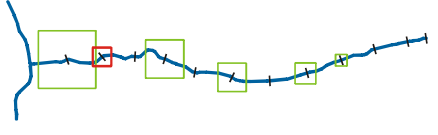
Softwaremodul	Beschreibung
<p><i>ArcMap ICommand</i> KWK_Network.dll</p>	<p>Jedem Gewässer im GWN25 wird <i>eine definierte Abfolge von Abschnitten</i> des generischen Gewässernetzes zugeordnet. Die Zuordnung der Abschnitte zum Gewässernetz wird in einer eigenen Tabelle abgelegt. Diese <i>Zuordnungstabelle</i> bildet die Grundlage für das Geometric Network des generischen Gewässernetzes. Abschnitte des generischen Gewässernetzes, welche nicht einem GWN25-Gewässer zugeordnet werden, werden gelöscht.</p>
<p><i>ArcMap ICommand</i> KWK_GewPunkt.dll</p>	<p>Legt ausgehend von der Mündung in äquidistanten Abständen Punkte auf den Gewässern des GWN25 fest. Zu jedem Gewässerpunkt wird seine Entsprechung auf den zugeordneten Abschnitten des generischen Gewässernetzes festgelegt. Dabei wird die <i>Zuordnungstabelle</i> aus <i>KWK_Network.dll</i> als Grundlage verwendet. Gemäss Konzept dürfen sich Referenzpunkte nur auf einem zugeordneten generischen Gewässer befinden. Bei den analysierten Punkten auf den generischen Abschnitten (depending points) werden die Ost-West und Nord-Süd Koordinaten, sowie die Höhe erfasst und in der Datenbank abgelegt.</p>
<p><i>Executable</i> KWK_Rechner.exe</p>	<p>Programm, welches über die Eingabezeile oder über ein Batch-File die zu berechnenden Gewässer entgegen nimmt und an die entsprechenden Libraries weiterleitet.</p>
<p><i>ArcObjects Library</i> KWK_Rechner.dll</p>	<p>Steuert die Berechnung und Simulation von Einzugsgebieten und Abflüssen. Dabei werden sequentiell alle zu berechnenden Punkte eines Flusses abgearbeitet.</p>
<p><i>ArcObjects Library</i> KWK_EZG.dll</p>	<p>Berechnet aus dem <i>DHM25</i> die Geometrie und die Kennwerte des Einzugsgebietes. Basierend auf dem <i>MQ-CH</i>-Raster werden die monatlichen und jährlichen Abflüsse ermittelt. Als Gebietsauslass werden die Referenzpunkte der Gewässerpunkte auf dem generischen Gewässernetz (depending points) verwendet. Die Berechnung des Einzugsgebietes wird unter Verwendung der in <i>ArcMap - SpatialAnalyst</i> implementierten Methode <i>Watershed</i> durchgeführt. Die Abflüsse werden über die <i>Zonale Statistik</i> von <i>Spatial Analyst</i> berechnet. Dabei bilden die Raster der berechneten Einzugsgebiete und die Raster des MQ-CH die Input-Grössen. Um Fehler durch die Diskrepanz der Rasterzellengrössen zwischen <i>DHM25</i> und <i>MQ-CH</i> wird mit der Einstellung <i>Minimum Of Input</i> des <i>Spatial Analyst</i> gearbeitet. Die berechneten Raster der Einzugsgebiete werden ohne Generalisierung in Polygone umgewandelt und in Geodatabases abgelegt.</p>
<p><i>Executable</i> KWK_Abschnitt.exe</p>	<p>Stellt eine Benutzeroberfläche für die Wahl der zu berechnenden Gewässer zu Verfügung. Die Berechnung der normierten Energiepotenziale kann über einzelne Gewässer, eine Auswahl von Gewässern oder über alle Gewässer durchgeführt werden.</p>
<p><i>Library</i> KWK_Abschnitt.dll</p>	<p>Berechnet die normierten Energiepotenziale für einen Gewässerabschnitt von beliebiger Länge. Die Berechnung basiert auf den Daten in der Datenbank und benötigt kein ArcMap.</p>
<p><i>Executable</i> KWK_Standortanalyse.exe</p>	<p>Programm, welches über die Eingabezeile oder über ein Batch-File die zu berechnenden Gewässer entgegen nimmt und an die entsprechenden Libraries weiterleitet.</p>

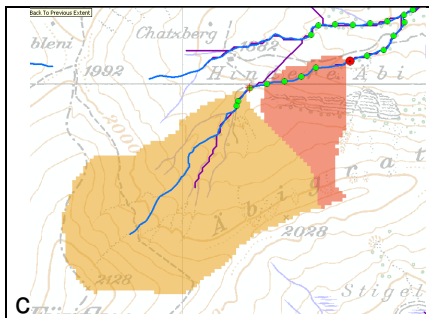
<p>ArcObjects Library KWK_Standortanalyse.dll</p>	<p>Ermittelt für jeden Gewässerpunkt die Existenz von Einfluss- und Killerfaktoren sowie eine allfällig vorhandene Krafftutzung. Die Steuerung der Standortanalyse erfolgt über die Steuertabellen <i>FEATURECLASS</i> und <i>FEATURECLASS_ATTRIBUT</i> in der Datenbank. In diesen werden die zu analysierenden Layer und die zu speichernden Attribute definiert.</p>
<p>Executable KWK_Linienereignis.exe</p>	<p>Programm, welches über die Eingabezeile oder über ein Batch-File die zu berechnenden Gewässer entgegen nimmt und an die entsprechenden Libraries weiterleitet.</p>
<p>Library KWK_Linienereignis.dll</p>	<p>Erstellt aus benachbarten Gewässerpunkten mit gleichen Eigenschaften (Killer- und Einflussfaktoren) Linienereignisse. Die Resultate werden in einer eigenen Datenbanktabelle (<i>LINE_EVENT</i>) abgelegt. Diese Tabelle dient nur der kartografischen Darstellung. Bei der Erstellung der Linienereignisse wird die hierarchische Ordnung zwischen Einfluss- und Killerfaktoren berücksichtigt. Das heisst, dass ein Killerfaktor immer über einen Einflussfaktor dominiert.</p>
<p>Executable KWK_Datensammler.exe</p>	<p>Programm, welches über die Eingabezeile oder über ein Batch-File die zu berechnenden Gewässer entgegen nimmt und an die entsprechenden Libraries weiterleitet.</p>
<p>Library KWK_Datensammler.dll</p>	<p>Die über verschiedene Tabellen verteilten Informationen zu einem einzelnen Gewässerpunkt (Einzugsgebiet, Abfluss, Standortinformationen, ...) werden in einer eigenen Resultattabelle (<i>STREAMDATA_RESULT</i>) zusammengezogen. Dies führt zu einer redundanten Speicherung einzelner Werte. Spezifische Informationen zu einem Punkt lassen sich aber dadurch schneller und einfacher beziehen, was die redundante Speicherung rechtfertigt.</p>
<p>Executable KWK_FlussSammler.exe</p>	<p>Programm, welches über die Eingabezeile oder über ein Batch-File die zu berechnenden Gewässer entgegen nimmt und an die entsprechenden Libraries weiterleitet.</p>
<p>Library KWK_FlussSammler.dll</p>	<p>Berechnet für jedes Gewässer das theoretische Potenzial und die Potenzialanteile. Die Resultate sind beispielsweise die Grundlage für die Kreis- und Säulendiagramme in den Detailkarten. Als Input für die Berechnung dienen die Resultate welche von <i>KWK_Datensammler.dll</i> errechnet wurden.</p>
<p>ArcGIS ICommand KWK_OberliegerSammler.dll</p>	<p>Berechnet auf der Basis eines Geometric Network das theoretische Potenzial und die Potenzialanteile für ein Fluss- oder Einzugsgebiet. Die Resultate sind die Grundlage für die Kreis- und Säulendiagramme in den Übersichtskarten. Die Selektion der zu berücksichtigenden Flüsse wird über die <i>Network Methode Find Upstream</i> durchgeführt. Die zu berechnenden Gewässer werden in einer Eingabemaske festgelegt. Standardmässig wird ein ganzer Fluss berücksichtigt. An einem Fluss kann die Analyse aber auch erst ab einer frei bestimmbar Position durchgeführt werden. Dabei wird das gesamten Potenzial oberhalb der definierten Position aufsummiert.</p>
<p>Library KWK_Daten.dll</p>	<p>Basismodul für die Speicherung (Persistenz) aller Daten. Jede Datenbanktabelle liegt als eigene Klasse vor. Die Tabellenbeziehungen (z.B. 1:1 oder 1:n Beziehungen) werden als Objektreferenzen oder Objektmengenreferenzen (<i>Dictionaries</i>) abgebildet. Die jeweiligen Klassen besitzen selbst die Logik für ihre Speicherung. Bei der Erstellung einer neuen Instanz von Datenklasse wird automatisch ein <i>Global Unique Identifier (GUID)</i> bestimmt. Diese <i>GUID</i> wird für die eindeutige Identifikation eines Objektes verwendet und dient auch in der Datenbank als Primärschlüssel in den einzelnen Tabellen.</p>

10 Qualitätssicherung, Plausibilitätsprüfungen

Automatische Rechenverfahren zur raumbezogen Analyse umfangreicher Daten bedingen die Anwendung von Mechanismen zur Qualitätssicherung, respektive eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse. Der individuelle Charakter der Geodaten (Höhenmodell, Gewässernetz), respektive deren fehlende Übereinstimmung, können leicht zu Fehlinterpretationen führen. Fehler sind aufgrund der grossen Datenmenge nicht oder nur schwer erkennbar.

Um in den etwa 800'000 analysierten Gewässerpunkten jene Ergebnisse zu finden, die fehler- oder zumindest zweifelhaft sind, werden diverse QS-Mechanismen angewendet. Mit den nachfolgend skizzierten Verfahren gilt es, die sprichwörtliche Nadel im Heuhaufen zu finden.

<p>SG15790000</p>  <p>12 Punkte Länge: 571 m</p>	<p>1. Vergleich Anzahl Punkte versus Gewässerslänge Für jedes Gewässer wird geprüft, ob die Anzahl diskreter Gewässerpunkte für die Analysen mit der geometrischen Länge (Kilometrierung der Route) korrespondiert.</p> $L_{\text{Gew}} - (N * \Delta L) < \Delta L$ <p>Mit: L_{Gew} = Gesamtlänge des Gewässers [m] N = Anzahl Gewässerpunkte ΔL = Abstand der Analysepunkt auf dem Gewässer [50 m] Das Resultat muss kleiner dem Abstand ΔL sein.</p>																																
	<p>2. Anzahl berechenbarer Punkte Für jedes Gewässer wird die Anzahl berechenbarer Punkte ermittelt, hier grün dargestellt. Ist die Anzahl berechenbarer Punkte kleiner als ein vorgegebener Grenzwert (< 0.8) wird das Gewässer visuell geprüft.</p>																																
	<p>3. Plausibilität der Resultate Einzugsgebietsflächen und Abflüsse müssen mit der Lauflänge ansteigen. Die errechneten Abflusswerten werden einer für das Gebiet typischen Abflusspende [$l/s \cdot km^2$] gegenübergestellt.</p>																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NAME</th> <th>GEWAESSER</th> <th>POTENTIAL</th> <th>RELEVANZ_L</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>saane</td> <td>19255.309449</td> <td>56473.853627</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>Siesse</td> <td>10169.984661</td> <td>17751.755365</td> <td>175</td> </tr> <tr> <td>Leimeggbach</td> <td>2208.642611</td> <td>17579.391617</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Urtbach</td> <td>1111.461072</td> <td>5911.503613</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Combe de l'Ortie le Boeuf</td> <td>664.359002</td> <td>4636.685259</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>lare</td> <td>87092.272175</td> <td>3590.896754</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>lare</td> <td>87142.272175</td> <td>3590.838477</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table>	NAME	GEWAESSER	POTENTIAL	RELEVANZ_L	saane	19255.309449	56473.853627	75	Siesse	10169.984661	17751.755365	175	Leimeggbach	2208.642611	17579.391617	50	Urtbach	1111.461072	5911.503613	50	Combe de l'Ortie le Boeuf	664.359002	4636.685259	50	lare	87092.272175	3590.896754	50	lare	87142.272175	3590.838477	50	<p>4. Potenziale je Gewässerpunkt Die ermittelten Potenziale an den Gewässerpunkten werden in einer Tabelle dargestellt. Durch Sortieren einzelner Spalten können Extremwerte identifiziert werden, die visuell zu verifizieren sind.</p>
NAME	GEWAESSER	POTENTIAL	RELEVANZ_L																														
saane	19255.309449	56473.853627	75																														
Siesse	10169.984661	17751.755365	175																														
Leimeggbach	2208.642611	17579.391617	50																														
Urtbach	1111.461072	5911.503613	50																														
Combe de l'Ortie le Boeuf	664.359002	4636.685259	50																														
lare	87092.272175	3590.896754	50																														
lare	87142.272175	3590.838477	50																														
	<p>5. Verhältnisgrößen Jeder Gewässerpunkt wird mit seinem flussabwärts liegenden Gewässerpunkt verglichen. Es wird der Quotient der EZG-Flächen resp. der Abflüsse gebildet. Extreme Sprünge, die nicht durch die Zunahme der EZG-Fläche durch die Einmündung eines Seitenbachs erklärt werden können, werden visuell überprüft.</p>																																



6. Zwiebelschalenprinzip

Das Einzugsgebiet eines flussaufwärts liegenden Gewässerpunktes muss vollständig im EZG des aktuellen Gewässerpunktes liegen. Im skizzierten Beispiel ist das nicht der Fall.

Auf eine detaillierte Darstellung der Resultate der einzelnen QS-Mechanismen und Plausibilitätsprüfungen wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Einige Verfahren werden lediglich beispielhaft dargestellt.

10.1 Plausibilität Einzugsgebietsgrösse

Die Grösse der Kreissymbole in Abb. 31 repräsentiert die Flächen der ermittelten Einzugsgebiete. Gut erkennbar ist, dass die Einzugsgebietsflächen mit der Lauflänge des Gewässers zunehmen. Dies ist korrekt.

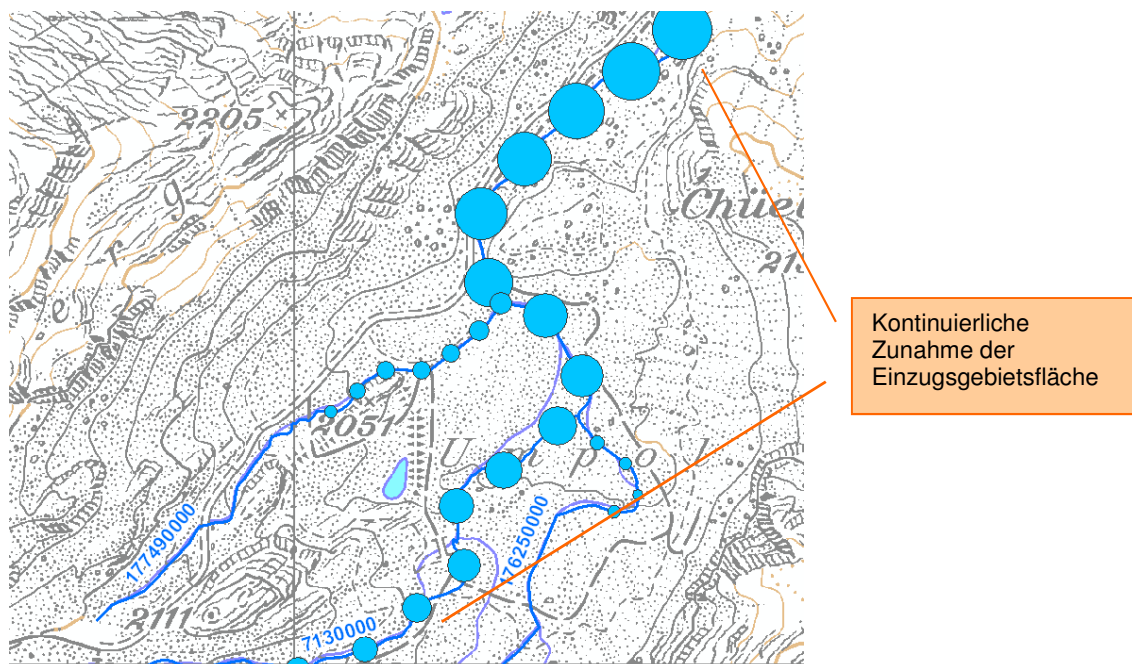


Abb. 31: Plausibilitätsprüfung der Einzugsgebietsgrösse

10.2 Extreme Potenzialbeträge für einzelne Gewässerpunkte

In Abb. 32 dargestellt ist eine Tabelle mit Potenzialen von Gewässerpunkten. Die Spalte *Potenzial* ist absteigende sortiert. Für die extrem hohen Potenzialwerte sind folgende Ursachen anzuführen:

- Grosse Abflussmenge bei mittlerem Gefälle. Für die Aare zwischen Thun und Bern werden für Strecken von 50 m Potenziale > 500 kW ermittelt. Korrekt.
- Extrem grosse Höhenunterschiede zwischen zwei Gewässerpunkten. Bei der visuellen Prüfung der Punkte wurden diese als Wasserfälle oder Kraftwerkstandorte identifiziert. Korrekt
- Grosse Distanzen zwischen zwei analysierten Gewässerpunkten. Die Diskrepanz zwischen GWN25 und generischem Gewässer kann dazu führen, dass über längere Gewässerstrecken keine Analysepunkte vorhanden sind. Mit steigender Distanz vergrößert sich auch die Höhendifferenz, was bei entsprechender Abflussmenge zu hohen Potenzialen führt. Korrekt.

MEASURE	MEASURE_LI	EASTING	NORTHING	CODEBE	NAME	GEWASSER	POTENTIAL	RELEVANZ_L	NORM
11100.001345	11100	583317.060611	194278.807138	2270000	Saane	19255.309449	55473.853627	75	
13599.99849	13600	614402.548124	173337.202768	14500000	Giesse	10169.844661	17751.755365	175	
599.99978	600	636455.146823	161574.929862	261050000	Heimeggbach	2208.642611	17579.391617	50	
300.000242	300	644491.303663	163869.880329	233640000	Tuttbach	1111.431072	5911.503613	50	
200.000047	200	596276.143246	239515.545352	101590000	Combe de l Ortie le Boeuf	664.389002	4636.665259	50	
118545.898298	118550	609140.713858	187579.80167	370000	Aare	87092.22175	3590.898754	50	
118495.89873	118500	609131.09394	187628.667515	370000	Aare	87142.22175	3590.838477	50	
2899.999309	2900	557722.949544	223374.878263	760650000	La Ronde	2580.26126	3520.191865	50	
118645.896988	118650	609178.728322	187487.578805	370000	Aare	86992.22175	3316.160542	50	
203145.872141	203150	667851.964187	160187.039202	370000	Aare	2482.22175	2938.040179	825	
203095.874237	203100	667842.465273	160233.97135	370000	Aare	2542.22175	2791.606598	50	
106295.88969	106300	602973.074349	196977.701722	370000	Aare	99342.22175	2537.292502	50	
115945.892347	115950	608478.770374	190059.85833	370000	Aare	89692.22175	2449.435292	50	
183995.864848	184000	659288.471084	174329.621378	370000	Aare	21642.22175	2391.11233	50	
1250.001641	1250	656920.353915	173924.931172	18740000	Rychenbach	10313.601616	2295.015958	75	
163945.864866	163950	659251.171521	174362.917984	370000	Aare	21692.22175	2251.780728	50	
2949.999731	2950	557728.808112	223333.086687	760650000	La Ronde	2530.26126	2236.421809	50	
183895.864777	183900	659217.787346	174399.540557	370000	Aare	21742.22175	2155.216304	50	
183845.864726	183850	659189.861616	174440.917691	370000	Aare	21792.22175	1963.977652	50	
152495.90662	152500	631242.023201	170140.433902	370000	Aare	53142.22175	1935.105059	50	
152545.91283	152550	631280.766649	170170.082121	370000	Aare	53092.22175	1933.727019	50	
202645.870957	202650	667752.911637	160624.502452	370000	Aare	2992.22175	1927.05179	50	
199695.871578	199700	666603.215602	162838.518118	370000	Aare	5942.22175	1819.645805	50	
1349.996003	1350	661202.547705	173472.703211	5690000	Gadmerwasser	16270.25659	1671.700856	50	
181495.870727	181500	656974.321215	174879.616206	370000	Aare	24142.22175	1661.808825	50	
54399.996742	54400	603815.855616	140547.691389	4390000	Simme	499.056443	1658.734451	75	
17599.999102	17600	614614.341292	211284.048501	4680000	Emme	58130.34794	1623.768979	75	
118595.897281	118600	609157.151265	187532.678835	370000	Aare	87042.22175	1592.478678	50	
2199.996845	2200	614389.570349	189273.731985	4390000	Simme	52699.056443	1528.505568	400	
199645.870904	199650	666595.969816	162887.704852	370000	Aare	5992.22175	1519.597614	50	

Extremwerte für die visuelle Prüfung

Abb. 32: Übersicht hoher Potenziale für einzelne Gewässerpunkte

10.3 Fehlerbehandlung

Alle auffälligen Gewässerpunkte wurden visuell geprüft. Gewässerpunkte mit falschen oder nicht erklärbaren Resultaten wurden gelöscht²⁵. Ausgehend von 894'824 analysierten Gewässerpunkten wurden aufgrund

- der Plausibilitätsprüfung,
- den QS-Mechanismen
- den in Kap. 11 genannten Einschränkungen und Limitierungen

die Resultate von rund 100'000 Gewässerpunkten in der Datenbank gelöscht. Aufgrund des grossen Stichprobenumfangs wird die Aussagekraft der Resultate in keiner Weise beeinträchtigt.

²⁵ Gelöscht wurden nur die Resultate, nicht die Punkte.

11 Limitierungen, nicht berechnete Gewässer

11.1 Routensystem nicht eindeutig

Einzelne Gewässer im GWN25 besitzen Routen, die nicht monoton ansteigen oder fallen. Die Bearbeitung dieser Gewässer ist problemlos möglich, da für die Festlegung äquidistanter Punkte auf den Gewässern nur die geometrische Länge berücksichtigt wird. Allerdings kann es bei der Festlegung von Linienereignissen zu Fehlern kommen, da die Position von Events auf nicht monotonen Routen nicht eindeutig festzulegen ist. Dies hat aber nur Auswirkungen auf die kartographische Darstellung.

11.2 Wechsel der Routennummer auf dem Hauptgewässer

Einige Hauptgewässer wechseln die Routennummer. Gemäss der Randbedingung, dass die ersten 500 m nach der Quelle für die Analysen nicht berücksichtigt werden, wurden Abschnitte von 500 m bei diesen Gewässern nicht analysiert. Diese Gewässer wurden nachträglich noch einmal mit geänderter Randbedingung analysiert (Kein Quellbereich berücksichtigen). In einigen Fällen wurde auf eine nachträgliche Berechnung dieser Gewässer verzichtet, namentlich dann, wenn diesen Gewässern kein eindeutiges generisches Gewässer zugeordnet werden konnte.

11.3 Nicht berücksichtigte Gewässer

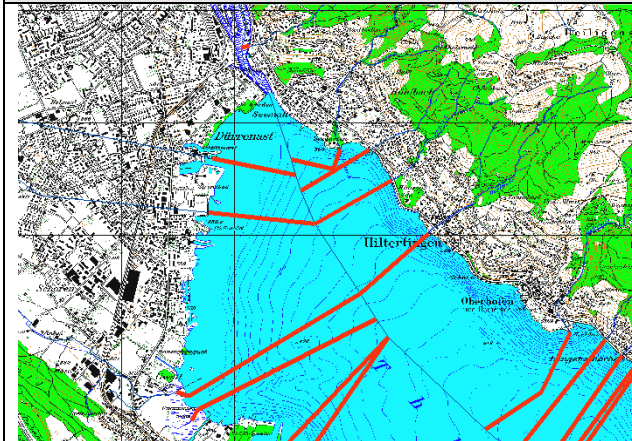
Gemäss dem konzeptuellen Ansatz werden nur natürliche Gewässer analysiert. Nicht natürliche Gewässerabschnitte wurden auf der Basis des Abschnittstyps im Layer GWN_25_I ermittelt, siehe Tab. 13. Die orange markierten Gewässer wurden bei den Analysen nicht berücksichtigt, da für diese Gewässertypen kein Einzugsgebiete und keine Abflussdaten zu ermitteln sind.

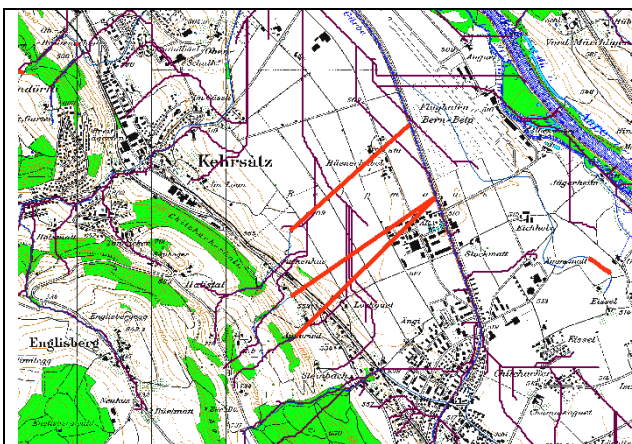
Tab. 13: Gewässertypen

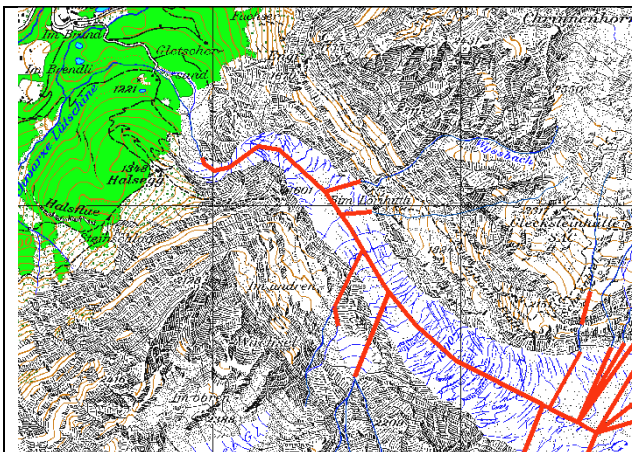
ObjectVal	Beschreibung (Objektart)	gerichtet
Bach	Bach, kleiner Fluss	j
Bachachs	fiktiver Bachverlauf	j
Bach_U	Bachverlauf unterirdisch oder auf der Pixelkarte nicht dargestellt	j
Brisse	Suone: Bewässerungskanäle an den Talflanken	j
Druckl_1	Druckleitung einfach	j
Druckl_2	Druckleitung mehrfach	j
Drucksto	Druckstollen	j
Fluss	Fluss	j
Fluss_U	Flussverlauf unterirdisch oder auf der Pixelkarte nicht dargestellt	j
Kanal	Bach ohne erkennbare / eindeutige Fliessrichtung	n
Seeachse	Fiktive Seeachse innerhalb eines Sees	i
Seeinsel	Seeinsel	i
See	Seeufer	i

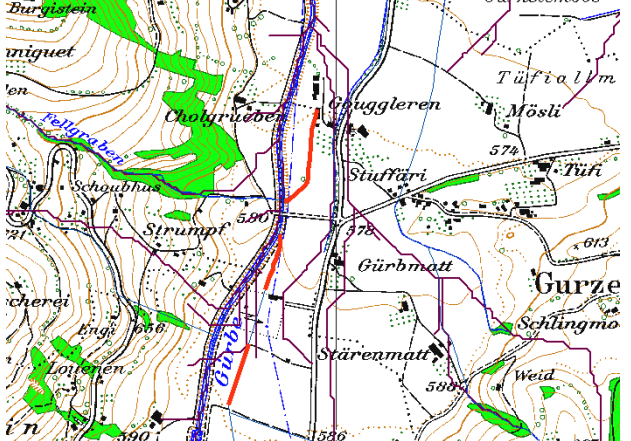
Berücksichtige Gewässertypen

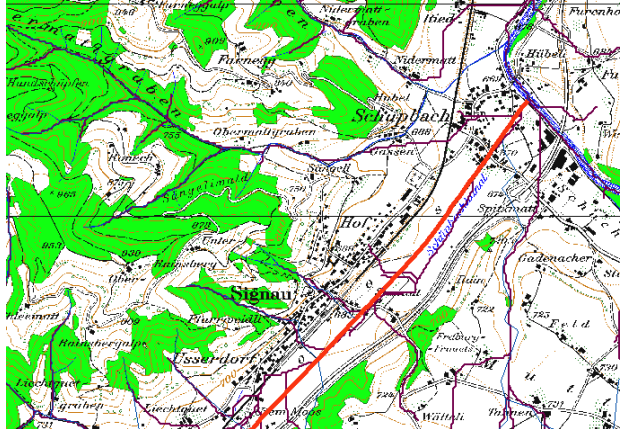
Mit den nachfolgenden Graphiken werden einige der in die in Tab. 13 ausgewiesenen Gewässerabschnittstypen beispielhaft illustriert.

Beispiel	Nr / Typ Erläuterung
	<p>2 / Bachachse</p> <p>Ein rein gedachter Gewässerverlauf ohne Übereinstimmung mit dem generischen Gewässernetz und ohne Höhendifferenzen zwischen den Gewässerpunkten</p>

	<p>4 / Virtueller Bachverlauf (a)</p> <p>Meist kurze Gewässerrläufe, bei welchen die Versickerung bekannt ist und der Versickerungspunkt mit einem Einlauf in einem Gewässer durch eine direkte Linie verbunden wurde.</p> <p>Wird im Jura zur Abbildung der <i>unterirdischen</i> Gewässersysteme verwendet.</p>
--	--

	<p>4 / Virtueller Bachverlauf (b)</p> <p>Um die Verbindung von Wasserläufen welche auf Gletscher münden zum restlichen Gewässernetz zu garantieren, werden diese als virtuelle Bachläufe definiert.</p>
---	--

Beispiel	Nr / Typ Erläuterung
	<p data-bbox="847 217 999 248">/ Kanal (a)</p> <p data-bbox="847 282 1378 405">Kanäle sind schwer zu interpretierende Gewässer. Das illustrierte Gewässer kann nicht analysiert werden, da es sich um einen „gegrabenen Kanal“ handelt“.</p>

	<p data-bbox="847 710 999 741">/ Kanal (b)</p> <p data-bbox="847 775 1378 920">Der dargestellte Kanal ist ein „kanalisiertes Gewässer“, für welches zumindest teilweise ein natürliches Einzugsgebiet ermittelt werden kann. Wird in den Analysen berücksichtigt.</p>
--	--

Neben diesen anthropogenen und virtuellen Gewässer wurden folgende Gewässerabschnitte nicht berücksichtigt.

1. Der Rhein unterhalb von Lichtenstein. Hier gab es Zuordnungsproblem zu einem generischen Gewässer. Zudem ist der Rhein unterhalb von Lichtenstein für Kleinwasserkraftwerke nicht interessant.
2. Die Rhone unterhalb von Martigny. Hier waren die gleichen Probleme wie beim Rhein anzutreffen.

12 Datenabgaben

Einzelne Ergebnisse des Projekts wurden bereits an die nachfolgend aufgeführten Stellen abgeben,

Tab. 14: Übersicht der bereits abgegebenen Daten

Adressat	Beschreibung
Amt für Energie, Kanton URI	GIS-Daten zu den theoretische hydroelektrischen Potenzialen und eidgenössischer Schutzgebiet der Fliessgewässer im Kanton Uri.
Amt für Umwelt, Kanton Nidwalden	GIS-Daten zu den theoretische hydroelektrischen Potenzialen der Fliessgewässer im Kanton Nidwalden.
Amt für Wasser, Energie, Luft (AWEL), Kanton Zürich	Gewässererkennungswerte (Einzugsgebiete und Abflüsse), für alle Gewässer im Kanton Zürich. Die Daten bilden die Grundlage für ein geplantes Gewässerinformationssystem.
BAFU	Gewässererkennungswerte (Einzugsgebiete und Abflüsse), für alle Gewässer, die sich auf LK25 Blättern im Kanton Bern befinden. Die Daten wurden für einen Prototyp zur webbasierten Darstellung von Gewässererkennungswerten verwendet.
Entec AG, St. Gallen	Ausgewählte Gewässererkennungswerte von ca 10. Fliessgewässern. Die Daten wurden im Rahmen eines BAFU-Projekts verwendet, um Aussagen zur ganzheitlichen Bewertung der Wasserkraft zu tätigen.
EPFL, Nicolas Crettenand (Doktorand)	GIS-Daten zu den theoretische hydroelektrischen Potenzialen der Fliessgewässer im Kanton Wallis.
Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Fachbereich Wasserbau Prof. Dr. P. Gonsowski	Ausgewählte Gewässererkennungswerte wie Höhe, Einzugsgebiete, Abflüsse für zwei Gewässer in der Region Andermatt, Die Daten wurden für Studentenarbeiten verwendet.
Gemeinde Zernez	Karte mit den hydroelektrischen Potenzialen und den Einfluss- und Killerfaktoren für die Gemeinde Zernez.
Geographisches Institut der Universität Bern (GIUB)	Gewässererkennungswerte und Daten zu den hydroelektrischen Potenzialen gemäss definierter Schnittstelle für die ganze Schweiz. Teilprojekt B
Raumentwicklung, Wirtschaftsförderung, Geoinformation rawi Kanton Luzern	GIS-Daten zu den theoretische hydroelektrischen Potenzialen der Fliessgewässer im Kanton Luzern.
Kantonsschule Küssnacht	Karte mit den hydroelektrischen Potenzialen der Gemeinde Zollikon als Grundlage für eine Facharbeit an der Schule (Genossenschaft Solécole)
Tiefbauamt Kanton Freiburg	GIS-Daten zu den theoretische hydroelektrischen Potenzialen der Fliessgewässer im Kanton Freiburg
Baudepartement Kanton Aargau	Alle Einzugsgebiete und Abflüsse im Kanton Aargau als Geodatenatz
SN Energie AG, Schwanden	Gewässerlängsprofile, Abflüsse, Einzugsgebiete, Datenabgabe im Excel Format
Energie St. Moritz	GIS-Daten zu den theoretische hydroelektrischen Potenzialen und den Einfluss- und Killerfaktoren der Fliessgewässer in der Gemeinde St. Moritz

13 Präsentationen, Publikationen

Erste Ergebnisse des vorliegenden Teilprojekts wurden an folgenden Veranstaltungen präsentiert, resp. publiziert.

Tab. 15: Präsentationen und Publikationen

Veranstaltung	Beschreibung
Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, 9/2009 Bozen	Posterpräsentation des Teilprojekts A. Konzept und Berechnungsmethodik
Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, 9/2010 Kempten	Vortrag zu den durchgeführten Analysen und den Ergebnissen.
AGIT Salzburg 7/2010	Vortrag zu GIS-technischen und inhaltlichen Aspekten bei der Berechnung von Einzugsgebieten auf der Basis digitaler Höhenmodelle.
Einstein TV 4.11.2010	Bäche sind eine gewaltige Energiequelle – theoretisch, Beitrag in Einstein TV, Sendung vom 4.11.2010
Arbeitssitzung Energiefachstellen der Bergkantone, Altdorf 5/2010	Vorstellung der Resultate der Potenzialstudie. Diskussion der Resultate im Hinblick auf die Publikation der Ergebnisse.
Jahresversammlung NWB 10/2010 Lugano	Vorstellung der GoogleEarth Applikation zur Darstellung der Resultate im Internet, gemäss Swiss Mountain Water Award 2008.
Fachtagung „Wasser – unser Leben“ des Schweizerischer Stahl- und Haustechnik-handelsverband SSHV 6/2011 Basel	Präsentation der Resultate in Zusammenhang mit dem Leitthema „Wasserschloss Schweiz, Potenziale und Probleme

Publikationen

U. Schröder (2009): Flächendeckende GIS-gestützte Identifikation des Kleinwasserkraftpotenzials in der Schweiz. OTTI, Tagungsband zum 12. Internationalen Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, September 2009, Seite 87-92.

Schröder, U. und Weidmann, Y (2010): GIS-gestützte Berechnung des hydroelektrischen Potenzials von Fliessgewässern in der Schweiz – Einfluss von Höhenmodell und Gewässernetz. Angewandte Geoinformatik 2010, Beiträge zum 22. AGIS-Symposium Salzburg, Wichmann Verlag, Seite 310-315.

U. Schröder (2010): Das hydroelektrische Potenzial der Schweiz als Planungsgrundlage für den Ausbau der Kleinwasserkraft. OTTI, Tagungsband zum 13. Internationalen Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, September 2010, Seite 22-27.

U. Schröder (2011): Ermittlung des Wasserkraftpotenzials in der Schweiz. Wasserwirtschaft 7-8/2011, Seite 19-23

14 Referenzen

- /1/ . SWISSTOPO (2005): Das digitale Höhenmodell der Schweiz, Produktinformation.
- /2/ BUNDESAMT FÜR UMWELT BAFU (2007): Strukturierung und Adressierung des Gewässernetzes 1:25 000 nach Modell gwn25-07.
- /3/ Pfaundler, Martin; Zappa Massimiliano: Die mittleren Abflüsse der Schweiz MQ-CH. Ein optimierter Datensatz im 500 m * 500 m Raster.
<http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01832/01855/index.html?lang=de>
- /4/ BFE (2008): Wasserkraftstatistik 2008. Excel Tabelle, zugestellt am 4.11.2009
- /5/ BAFU Restwasserkarte, Digitaler Datensatz
- /6/ SWISSTOPO (2007): VECTOR25, Das digitale Landschaftsmodell der Schweiz,
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/vector25.htm>,
- /7/ BUNDESAMT FÜR ENERGIE, Erhebung des Kleinwasserkraftpotenzials in der Schweiz. Ermittlung des hydroelektrischen Potenzials Für Kleinwasserkraftwerke. Jahresbericht 2008
<http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000010111.pdf&name=00000280219>
- /8/ Watergisweb AG: Beschreibung der Schnittstelle für den Datenaustausch mit dem GIUB, Aktennotiz vom 12.05.2009
- /9/ Schröder, Udo (2009): Flächendeckende GIS-gestützte Identifikation des Kleinwasserkraftwerkpotenzials in der Schweiz. Tagungsband 12. Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke in Bozen, S. 87
- /10/ Schröder, Udo (2010): Das hydroelektrische Potenzial der Schweiz als Planungsgrundlage für den Ausbau der Kleinwasserkraft. Tagungsband 13. Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke in Kempten, S. 22-27.
- /11/ Schröder, Udo; Weidmann, Yvo (2010): GIS-gestützte Berechnung des hydroelektrischen Potenzials von Fließgewässern in der Schweiz – Einfluss von Höhenmodell und Gewässernetz. Angewandte Geoinformatik 2010, S. 310-315. Wichmann Verlag.
- /12/ EAWAG (2011): Wasserkraftnutzung und Restwasser. Restwasserstrecken und Sanierungsbedarf.
- /13/ BFE (2012): Wasserkraftstatistik 2011. Excel Tabelle, zugestellt am 2/2012



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 9. Januar 2012

Erhebung des Kleinwasserkraftpotentials der Schweiz

Methodik zu dessen ganzheitlicher Beurteilung
(Anhang B)

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Gruppe für Hydrologie, Geographisches Institut
Universität Bern
CH-3012 Bern
www.hydrologie.unibe.ch

Autoren:

Dr. Carol Hemund, Universität Bern, hemund@giub.unibe.ch
Prof. Dr. Rolf Weingartner, Universität Bern, weingartner@giub.unibe.ch

BFE-Bereichsleiter:	Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter:	Dr. Klaus Jorde
BFE-Projektnummer:	SI/500234-01

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Ausgangslage	4
1.1 Forschungshintergrund	4
1.1.1 Energie- und Umweltpolitik.....	4
1.1.2 Wasserkraft	5
1.2 Forschungsbeitrag	5
1.2.1 Fehlende Instrumente.....	5
1.2.2 Projektrahmen	6
2 Ziel der Arbeit	6
2.1 Methode	7
2.2 Grundlagen	8
2.2.1 Herleitung	8
2.2.2 Daten	9
2.2.3 Untersuchungseinheiten.....	10
2.2.4 Beurteilungsraster	11
2.2.5 Untersuchungsgebiete.....	13
2.3 Analyse	14
2.3.1 Ganzheitliche Beurteilung (1).....	14
2.3.2 Nutzungseignungen (2)	19
2.3.3 Szenarien (3)	21
3 Diskussion	23
4 Schlussfolgerungen	23
5 Symbolverzeichnis	24
6 Referenzen	24
7 Anhang	26
7.1 Rangliste	26

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert eine Methodik zur ganzheitlichen Beurteilung des Kleinwasserkraftpotentials (≤ 10 MW) in der Schweiz. Sie erleichtert den kantonalen Behörden unter anderem die Entscheidung über die zahlreichen KEV-Projekte, indem sie vorangehend geeignete Gebiete identifiziert und damit raumplanerische Grundlagen bereitstellt. Zur Bestimmung der Nutzungseignung einzelner Gewässerabschnitte bedient sich die Methodik den Beurteilungen aller Ökosystemfunktionen des Gewässers. Das zentrale Element hierfür ist ein Beurteilungsraster, der zwei sich ergänzende Raumeinheiten mit unterschiedlicher Betrachtungstiefe hinsichtlich ökologischer, kultureller und wirtschaftlicher Ökosystemleistung untersucht. Standardisierte Rangierungsregeln ermöglichen im Anschluss die systematische Priorisierung der für eine Nutzung geeigneten Standorte. Diese Auswahl ist durch die flexibel wählbare Grenze zwischen Schutz und Nutzung beliebig veränderbar und erlaubt eine spezifische Anpassung der Szenarien an die Energienutzungsziele einer Region. Die vorliegende Methodik liefert in diesem Sinne keine fixfertigen Lösungen, sondern dient vielmehr der Vorarbeit und Unterstützung politischer Entscheide. Es gelingt ihr die Interessenskonflikte im Spannungsfeld zwischen Schutz und Nutzung der Gewässer sachlich darzustellen und grossräumige Empfehlungen abzugeben. Hingegen vermag sie die effektive Nutzbarkeit des Wasserkraftpotentials einzelner Gewässerabschnitte nicht abschliessend zu beurteilen. Hierzu sind detaillierte Abklärungen notwendig. Die Beurteilungsmethodik ist als Arbeitsinstrument zu verstehen, das sowohl objektive, nachvollziehbare (Validität) als auch reproduzierbare Ergebnisse liefert.

1 Ausgangslage

1.1 Forschungshintergrund

1.1.1 Energie- und Umweltpolitik

Die Verknappung fossiler Energieträger, die Auswirkungen des Klimawandels und Ereignisse wie die Nuklearkatastrophe in Fukushima 2011 haben längst ein energiepolitisches Umdenken herbeigeführt, so dass heute die Nutzung erneuerbarer Ressourcen klar im Vordergrund steht. Im Wesentlichen sind die aktuellen Energieziele darauf ausgerichtet sowohl der Nachhaltigkeit, der Versorgungssicherheit als auch der Wettbewerbsfähigkeit Rechnung zu tragen. Die EU beispielsweise strebt bis 2020 eine Reduktion der energiegebundenen CO₂-Emissionen von 20 % an sowie ein Anstieg des Anteils erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch von 20 % [1]. Ähnliches zeigen die Energieperspektiven der Schweiz [2], die bis 2030 eine Zunahme der Strommenge aus erneuerbaren Energiequellen von 5'400 GWh vorsehen. Wobei gemäss den neuesten Szenarien davon auszugehen ist, dass sich dieser Anteil noch vergrössern wird [3].

Dennoch scheint sich an der globalen Situation bisher wenig geändert zu haben. Das „Szenario New Policies“ der IEA 2011 [4] weist auf einen weiteren Anstieg der globalen Energienachfrage um einen Drittel von 2010 bis 2035 hin. Der Grund für diese Prognose liegt im anhaltenden Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum. Dasselbe Szenario weist auf zukünftige globale Emissionsmengen hin, die zu einem langfristigen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von mehr als 3.5 °C über den vorindustriellen Level führen und damit die im vierten IPCC-Bericht [5] definierte und im IEA „Szenario 450“ [6] festgelegte 2 °C-Schwelle überschreiten werden. Zudem werden vier Fünftel der gemäss dem „Szenario 450“ bis 2035 insgesamt erlaubten energiegebundenen CO₂-Emissionen bereits heute ausgestossen; d.h. die Kapazität für zusätzliche Kraftwerke und andere Infrastrukturen ist sehr begrenzt, ausser sie seien CO₂-neutral. Trotz Bemühungen einiger Nationen liegen

diese neuesten Zahlen weit entfernt von den vereinbarten globalen Klimaänderungszielen [7]. Entsprechend wenig deutet derzeit auf den dringend nötigen Richtungswechsel der internationalen Energietrends hin [8].

Umso wichtiger erscheint deshalb die Förderung erneuerbarer Energien auf nationaler Ebene. Die positive Wirkung solcher Subventionsmassnahmen dürfte mittlerweile unbestritten sein. Die Folgen der in der Schweiz 2009 eingeführten Kostendeckenden Einspeisevergütung KEV [9] belegen dies exemplarisch: Die nationale Netzwerkgesellschaft Swissgrid verzeichnete umgehend einen bis heute anhaltenden markanten Anstieg an eingereichten Projektgesuchen (18'921 Anmeldungen, Stand 01.12.2011) [10].

Nicht selten stehen solche Projekte jedoch im Widerspruch zur aktuellen Umweltpolitik. Insbesondere der Ausbau der Kleinwasserkraft wird oft als massiver Eingriff in die Naturlandschaft gesehen und vom Naturschutz und Tourismus entsprechend scharf kritisiert. Die Gegenläufigkeit von energiepolitischen Zielen und Schutzregelungen, wie die europäische Wasserrahmenrichtlinie [11] oder die nationalen Gesetze [12, 13, 14, 15], erschweren in diesen Fällen einen eindeutigen Entscheid.

1.1.2 Wasserkraft

Begünstigt durch die Topographie und beträchtliche durchschnittliche Niederschlagsmengen hat die Wasserkraftnutzung in der Schweiz eine lange Tradition, die sich dank der grossen Speicherkraftwerke bis heute halten konnte. Aktuell liegt ihr Anteil am inländisch produzierten Strom bei 56 % [16]. Dieser wird von mehr als 556 Wasserkraftzentralen mit einer maximal möglichen Leistung ≥ 300 kW erzeugt, die vor allem in den Bergkantonen liegen und besonders wertvollen Spitzenstrom liefern. Der Einfluss dieser intensiven Wassernutzung hat, nebst den Gewässerkorrekturen und dem Ausbau des Hochwasserschutzes, die Gewässerlandschaft Schweiz massiv verändert. Experten gehen davon aus, dass insgesamt 90 % der geeigneten Flüsse und Bäche heute bereits elektrizitätswirtschaftlich genutzt werden [17]. Dennoch schätzt das BFE das zusätzlich nutzbare Wasserkraftpotential auf 4.0 TWh. Der grösste Anteil soll vor allem durch Ausrüstungersatz, Erneuerungen und Umbauten bestehender Anlagen sowie durch Neubauten von Grosswasserkraftwerken erreicht werden. Eine Minderproduktion von 2.7 TWh infolge der Umsetzung der Restwasserbestimmungen und der Klimaerwärmung wurden bereits in die Rechnung integriert. Wobei neueste Untersuchungen von Hänggi et al. 2011 [18] der Klimaänderung einen geringeren negativen Einfluss beimessen als angenommen, so dass die Minderproduktion wesentlich kleiner als 2.7 TWh sein dürfte. Gemäss BFE soll der Neubau von Kleinwasserkraftwerken mit einem beachtlichen Anteil von 1.9 TWh zum Gesamtpotential beitragen [19]. Da die Kleinwasserkraft ≤ 10 MW zusätzlich von den KEV-Geldern profitieren kann, ist davon auszugehen, dass sich die Zahl der Projektgesuche noch erhöhen wird.

1.2 Forschungsbeitrag

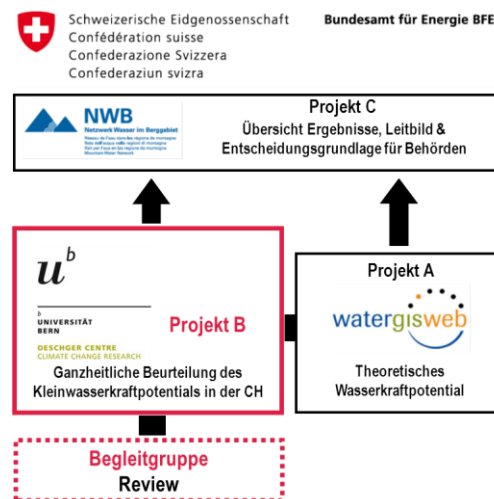
1.2.1 Fehlende Instrumente

Für die kantonalen Behörden stellt diese grosse Anzahl an Projektgesuchen, die alle ein Bewilligungsverfahren durchlaufen müssen, eine riesige Herausforderung dar. Trotz bestehender Richtlinien und Empfehlungen war es bisher nicht möglich, die Kleinwasserkraftprojekte in einem grösseren räumlichen Kontext (regional, kantonal) zu beurteilen. Die Hilfsmittel erlaubten zwar eine Beurteilung der Einzelprojekte hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit [20], ihrer Umweltverträglichkeit [21, 22, 23] oder ihrer technischen Machbarkeit [24], vernachlässigten aber die ganzheitliche Perspektive. In besonders stark betroffenen Kantonen wurde diese Lücke relativ früh erkannt und entsprechende Grundlagen erarbeitet und bereitgestellt [25, 26, 27]. Diese Strategien erlauben bereits im Vorfeld eine erste grobe Auswahl an Projekten, indem sie gewisse Gewässer von einer Nutzung

ausschliessen. Damit wird der Aufwand für die Bewilligungsverfahren deutlich reduziert, was hinsichtlich der steigenden Anmeldezahlen zweifellos als Gewinn zu werten ist. In dieselbe Richtung, jedoch mit wesentlich grösserem Geltungsbereich, weisen die Empfehlungen der Alpenkonvention [28] und des Bundes [29, 30]. Wobei diese allerdings sehr allgemein formuliert und daher kaum direkt anwendbar sind. Insgesamt ist davon auszugehen, dass das Interesse an einer einheitlichen Beurteilungsmethodik, welche sowohl ökologische als auch soziokulturelle und wirtschaftliche Aspekte gleichermaßen berücksichtigt und zugleich innerhalb nützlicher Frist in die Praxis umgesetzt werden kann, nach wie vor gegeben ist.

1.2.2 Projektrahmen

Vor diesem Hintergrund initiierte das BFE 2009 ein Projekt, welches diese Forschungslücke schliessen sollte. Das Projekt „Erhebung des Kleinwasserkraftpotentials in der Schweiz“ wurde in drei Teile gegliedert, wobei sich insbesondere Teil B mit der Ausarbeitung eines Beurteilungsinstrumentes befasste (Fig. 1). Das Teilprojekt B ist denn auch Gegenstand des vorliegenden Berichts. Da diese Studie eine breite Abstützung und Akzeptanz erfordert, wurde eine wissenschaftliche Begleitgruppe bestehend aus Vertretern der Praxis (Raumplanung, Energiewirtschaft, Umweltschutz) und der Wissenschaft (Wassernutzung, Gewässerschutz) zusammengestellt. In halbjährlichem Abstand abgehaltene Sitzungen sorgten für die nötige Transparenz und Abstützung der Methodik in der Praxis. Zudem ermöglichten sie den Teilnehmern eine aktive Partizipation am Entwicklungsprozess der Methodik.



Figur 1 Projektaufbau

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen einer Dissertation [31] am Geographischen Institut der Universität Bern durchgeführt, unterstützt durch die Masterstudenten Iris Baumgartner [32], Daniel Studer [33] und Joëlle Hirschi [34].

2 Ziel der Arbeit

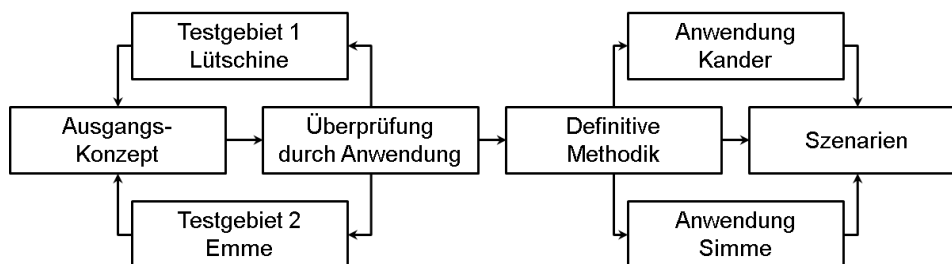
Die Förderung der Kleinwasserkraft ≤ 10 MW führte in der Schweiz zu einem rasanten Anstieg von Projektgesuchen, wodurch sich die Situation im Spannungsfeld zwischen Nutzungs- und Schutzansprüchen an die Ressource Wasser verschärfte. Für die zuständigen Behörden ist es schwierig über die Nutzbarmachung des verbleibenden Wasserkraftpotentials zu entscheiden; nicht zuletzt weil die vorliegenden Hilfsmittel von

unzureichender Beurteilungstiefe sind und ihnen insbesondere die ganzheitliche und regionale Betrachtungsweise fehlt.

Das vorliegende Projekt hat deshalb zum Ziel, ein Beurteilungsinstrument auszuarbeiten, welches die berechneten Daten zum theoretischen Wasserkraftpotential [35, 36] aus einer ganzheitlichen Sichtweise analysiert. Das heisst, es werden in Anlehnung an das Nachhaltigkeitskonzept [37] gleichermassen ökologische, sozio-kulturelle als auch wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt und in einen regionalen Kontext gestellt. Das Ökosystem Gewässer mit seinen vielseitigen Ökosystemfunktionen und entsprechenden Leistungen spielt dabei eine zentrale Rolle. Die Ergebnisse werden in Form von Karten präsentiert und zeigen verschiedene Ausbau-Szenarien für die zukünftige Nutzung der Wasserkraft auf. Das Instrument richtet sich vor allem an kantonale Fachstellen und Behörden, wo es als Entscheidungshilfe eingesetzt werden kann. Als äusserst wichtig wird eine gewisse Flexibilität erachtet, welche es dem Anwender möglich macht, das Ergebnis seinen Bedürfnissen bzw. energiepolitischen Zielen anzupassen.

Der Studie liegen folgende Fragestellungen zu Grunde:

- Welche Ökosystemleistungen sind vorhanden?
- Wie bedeutend sind diese Ökosystemleistungen für den Menschen aus ökologischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Sicht?
- Wo lassen die Ökosystemleistungen eine Nutzung zu?
- Wo überwiegen Schutzinteressen?



Figur 2 Iteratives Vorgehen mit Rückkopplungen

Die Untersuchung der Fragestellungen erfolgte in einem iterativen Prozess (Fig. 2), was eine schrittweise Anpassung und Optimierung der Methodik zuliess. Diese Vorgehensweise war zwar sehr zeitintensiv, hatte aber den Vorteil, dass neue Erkenntnisse und Kritik direkt ins Vorgehen integriert werden konnten. Ebenso war es auf diese Weise möglich, eine Vielzahl an Faktoren detailliert zu überprüfen und falls nötig zu selektieren, so dass sich die vorliegende Auswahl ausschliesslich auf die essentiellen Bausteine beschränkt. Mit der Lüttschine und der Emme konnte die Methodik zudem in hydrogeographisch unterschiedlichen Regionen optimiert werden. Weitere Anwendungen folgten in den Einzugsgebieten der Kander und der Simme.

2.1 Methode

Die Methodik zur ganzheitlichen Beurteilung des Kleinwasserkraftpotentials stellt in der vorliegenden Studie den Hauptgegenstand der Untersuchungen dar und ist deshalb zugleich als Ergebnis zu verstehen. Aus diesem Grund werden nachfolgend methodische Teile mit illustrativen Ergebnisteilen kombiniert, so dass das Ergebniskapitel entfällt.

Das Kapitel Methode ist aus praktischen Gründen in zwei Teile gegliedert:

Der Grundlagenteil gilt als Vorbereitung für den darauffolgenden Analyseteil. Zunächst werden Angaben zur Herleitung der Methodik und den verwendeten Daten sowie der

Bestimmung der Untersuchungseinheiten gemacht. Danach wird das für die Methodik zentrale Hilfsmittel - der Beurteilungsraster - eingeführt. Abschliessend stellt das Unterkapitel ‚Grundlagen‘ die Untersuchungsgebiete vor.

Ausgehend von diesen Grundlagen folgt die Analyse. Sie wird im zweiten Teil dokumentiert. Dabei wird zuerst ausführlich auf die Beurteilung der Raumeinheiten eingegangen, bevor es schliesslich in den Kapiteln Nutzungseignung und Szenarien zur Festlegung geeigneter Gewässerabschnitte kommt.

Damit die folgenden Ausführungen verstanden und eingeordnet werden können, sei hier der Methodenaufbau in Kurzform eingeschoben (Vgl. Fig. 4 und 5):

- **Grundlage:** Bestimmung der Untersuchungseinheiten Gewässerraum GR und Landschaftsraum LR (Schritt 1, Fig. 4)
- **Analyse:** Anwendung der Beurteilungsraster für die Funktionstypen A, B und C (Schritt 1, Fig. 4)
 - Beurteilung der Ökosystemfunktionen im GR
 - Aufbau: Komponenten, Indikatoren
 - Resultat: Teilleistung
 - Skalierung: Wertebereich 1 bis 5
 - Kenngrössen: Median, Sensitivitätsanalyse, Entscheidungsbaum
 - Beurteilung der Ökosystemfunktionen im LR
 - Aufbau: Komponenten, Indikatoren
 - Resultat: Leistung
 - Skalierung: 0 oder 1
 - Kenngrössen: Mindestzahl
 - Synthese der Teilleistungen des GR und der Leistung des LR
 - Resultat: ökologische (A), kulturelle (B) und wirtschaftliche Ökosystemleistung (C)
 - Skalierung: Wertebereich 1 bis 5
 - Kenngrössen: Summe
- **Auswertung:** Festlegung der Nutzungseignung einzelner Gewässerabschnitte durch Rangierung der Ökosystemleistungen ABC (Schritt 2, Fig. 4)
- **Ergebnis:** Bildung regionaler Schutz-/Nutzungs-Szenarien bezüglich Ausbau Wasserkraft (Schritt 3, Fig. 4)

2.2 Grundlagen

2.2.1 Herleitung

Die ganzheitliche Betrachtungsweise, also die Abdeckung aller Teile einer Gesamtheit als auch ihrer Eigenschaften und Beziehungen [38], ist das Hauptanliegen der zusammengestellten Methodik. Sie orientiert sich daher grundsätzlich am Nachhaltigkeitskonzept [37], wonach Ganzheitlichkeit und Nachhaltigkeit erst dann gewährleistet sind, wenn alle drei Dimensionen Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft gleichwertig berücksichtigt werden. Dies kommt insbesondere bei der Auswahl der einzelnen Indikatoren, welche der Beurteilung der Ökosystemfunktionen des Gewässers dienen, zum Ausdruck. Diese Auswahl basiert nämlich weitestgehend auf den Nachhaltigkeitsleitlinien des Bundes [39, 40], des Kantons Bern [41] und auf der kantonalen Nachhaltigkeitsbeurteilung [20], die auf die Kleinwasserkraftnutzung ausgerichtet ist.

Die ausgewählten Indikatoren wurden in Anlehnung an die Ökosystemfunktionstypen im Millennium Ecosystem Assessment [42] und in de Groot et al. [43] in regulierende (Typ A), kulturelle (Typ B) und bereitstellende Funktionen (Typ C) aufgeteilt. Im vorliegenden Bericht werden die Ökosystemfunktionen erst dann als Ökosystemleistungen bezeichnet, wenn ihnen durch die Beurteilung ein Wert zugewiesen wurde. Insgesamt wird unter einer Ökosystemleistung der Nutzen verstanden, welcher der Mensch aus einem Ökosystem

bezieht [42]. Folglich sind Ökosystemleistungen das Mittel zum Zweck oder Ziel, ein nachhaltiges Wohlbefinden des Menschen zu erreichen [44].

Damit sei auch gleich auf den zentralen Gegenstand der Untersuchungen hingewiesen: das Ökosystem Gewässer. Dieser Fokus ist insofern von Bedeutung, als dass die Beurteilungsmethodik gewisse Ökosystemfunktionen unberücksichtigt lässt. Davon betroffen sind Ökosystemfunktionen, die weder einen erkennbaren direkten noch indirekten Bezug zum Gewässer aufweisen, wie z.B. die Regulation der Luftqualität oder die Bereitstellung einer Weidefläche an einem entfernten Bergkamm. Die Beurteilung erfasst ausschliesslich gewässerrelevante (Art) oder gewässernahe (Ort) Ökosystemfunktionen und zwar in einem räumlich begrenzten Bereich.

Eine weitere Einschränkung bildet der Fokus auf den aktuellen Zustand des Gewässers, der als eine Art ‚Schnappschuss‘ der Realität verstanden wird. Damit gelingt es der Beurteilungsmethodik zwar die vorhandenen Ökosystemfunktionen zu lokalisieren und ihre Qualität abzubilden. Die zeitliche Variabilität bzw. die Dynamik der Funktionen hingegen vermag sie nicht zu erfassen.

Die Wissenschaft ist sich dieser wie auch weiterer Schwierigkeiten im Zusammenhang mit Beurteilungsmethoden von Ökosystemfunktionen längst bewusst, was zahlreiche Studien belegen [43, 45, 46]. Auch die vorliegende Arbeit sieht sich mit diesen Schwierigkeiten konfrontiert. Sie ist somit ein weiterer Versuch, Ökosystemfunktionen möglichst umfassend mit dem Fokus Kleinwasserkraft zu beurteilen.

2.2.2 Daten

Zeitstand

Gerade weil sich die Methodik ausschliesslich auf die Beurteilung einer Momentaufnahme des Gewässerzustands konzentriert, ist der Zeitpunkt bzw. Erhebungszeitraum der verwendeten Daten von grundlegender Bedeutung. Der absolut beste Aktualitätsgrad würde durch eine direkte Datenerhebung im Feld unmittelbar vor der Analyse erzielt. Da dies aufgrund der für die Beurteilung benötigten grossen Datenmenge innerhalb eines zeitlich vernünftigen Rahmens nicht möglich ist, baut die Anwendung auf bestehenden Datensätzen auf. Das bedeutet, dass die Ergebnisse nur so aktuell sein können wie die ihnen zugrunde liegenden Daten. Deshalb ist es wichtig, dass vor jeder Wiederholung der Analyse geprüft wird, ob die Daten auf dem denkbar aktuellsten Stand sind.

Anforderungen

Eine Liste aller erforderlichen Datensätze findet sich in [31]. Die Zeitstände der verwendeten Daten reichen von 2006 bis 2011 mit einigen älteren Ausnahmen, die damit aber dennoch das aktuellste Datum aufweisen. Da vorwiegend mit einem GIS (*Esri ArcGIS 10*) gearbeitet wird, sollten die Daten, wenn immer möglich, ein entsprechendes Format aufweisen. Sofern für ein Gebiet einer der geforderten Datensätze nicht vorhanden sein sollte, kann er durch einen ähnlichen ersetzt werden. Allerdings müsste dabei unbedingt darauf geachtet werden, dass er repräsentativ für die zu analysierende Ökosystemfunktion und GIS-kompatibel ist.

Ausgangslage

Die Auswahl und Abgrenzung der zu beurteilenden Gewässerabschnitte beruht auf dem Datensatz zur Ökomorphologie der Fliessgewässer Stufe F 2009 [47, 48, 49, 50] und somit auf dem Gewässernetz 1:25'000 (Stand 2007) [51]. Dieser Datensatz hat den Vorteil, dass er flächendeckend für die ganze Schweiz vorhanden ist. Denn die Kantone sind seit der 1998/99 eingeführten Gewässerschutz- [13] und Wasserbauverordnung [52] verpflichtet, den ökologischen Zustand sowie den Raumbedarf ihrer Gewässer festzuhalten und in periodischen Zeitabständen nachzuführen, wobei einzelne Kantone nach wie vor Defizite aufweisen. Diese Massnahmen sind vergleichbar mit den Vorschriften der europäischen Wasserrahmenrichtlinie [11], welche die Mitgliedstaaten ebenfalls dazu verpflichtet Gewässerzustandsanalysen und Bewirtschaftungspläne für die Einzugsgebiete bis 2012 bereitzustellen und anschliessend alle sechs Jahre zu prüfen. Das Ziel beider Vorgaben ist

denn auch dasselbe, nämlich möglichst viele Gewässer in einen ökologisch und chemisch guten Zustand zu überführen oder sie zumindest in ihrer Klassierung aufzuwerten [11, 13].

Ebenso in die Auswahl der zur Abgrenzung erforderlichen Grundlagen eingeschlossen ist der Datensatz zum Wasserkraftpotential [35]. Dieser ist deshalb von Bedeutung, weil er die Anzahl der Gewässerabschnitte auf jene reduziert, welche tatsächlich ein nutzbares Potential aufweisen bzw. von der *Watergisweb* AG berechnet wurden. Die definitive Auswahl an Gewässerstrecken setzt sich somit aus der Verschneidung der beiden Datensätze Ökomorphologie und Wasserkraftpotential zusammen. Folglich werden Abschnitte, welche durch die Restriktionen des einen oder anderen Datensatzes wegfallen, nicht in die Analyse einbezogen. Folgende Strecken fehlen a) in den Beurteilungen der Ökomorphologie [53] oder b) in den Berechnungen des Wasserkraftpotentials [36]:

- Gewässerabschnitte, die aus Sicherheits- und Effizienzgründen nicht kartiert wurden ^{a)}
- Gewässerabschnitte, die höher als 2'000 m liegen und ein Gefälle > 20 % aufweisen ^{a)}
- Gewässerabschnitte, die sich in den Voralpen befinden und dem Typ Strahler 1 angehören ^{a)}
- Gewässerabschnitte, die aufgrund der vorliegenden Situation und dem persönlichen Ermessensspielraum des Kartierenden nicht aufgezeichnet wurden ^{a)}
- Strecken, die zum Quellbereich gehören, d.h. die ersten 500 m ab Quelle ^{b)}
- Strecken, die anthropogen beeinflusst sind, d.h. gemäss der Produkteinformation des VECTOR 25 [54] unterirdische Gewässer, Suonen, Druckleitungen und Bäche ohne erkennbare/eindeutige Fliessrichtungen sowie Seeachsen (Attributte ObjectVal = Bach_U, Bisse, Druckl_1, Druckl_2, Drucksto, Kanal, Seeachse). ^{b)}

Die Verschneidung der Datensätze zur Ökomorphologie und dem Wasserkraftpotential mittels GIS hat den Vorteil, dass die darin enthaltenen Informationen kombiniert werden können. Wichtige Informationen, wie z.B. die GEWISS-Nr. [55] bleiben erhalten, wohingegen unnötige Parameter gelöscht werden können. Mit diesen Referenzgrössen ist der neu entstehende Datensatz auch für andere Anwendungen interessant.

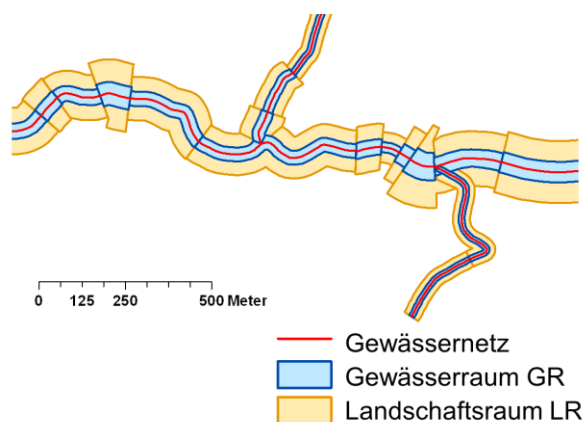
Zusammen mit sämtlichen Indikatoren des Beurteilungsrasters wird der neue Datensatz in eine speziell entwickelte GIS-Datenbank integriert [34]. Damit gelingt die Verknüpfung von Raum und Sachdaten.

2.2.3 Untersuchungseinheiten

Die breiten Anforderungen an die Untersuchungseinheit erschwerten die Suche nach einer Lösung, so dass es erst nach etlichen Versuchen [32, 33] gelang, den holistischen Ansatz zufriedenstellend in die präanalytische Abgrenzung zu integrieren. Obwohl bereits zu Beginn klar war, dass die Abgrenzung zwei verschiedene Betrachtungsebenen und somit mehr als nur die Linie des Gewässers umfassen sollte, wurde die konkrete Dimensionierung der Untersuchungseinheiten doch erst später festgelegt. Die kleinere Einheit, im Folgenden als Gewässerraum (GR) bezeichnet, fokussiert auf den Gewässerlauf per se und den nahegelegenen Uferbereich, wohingegen der Landschaftsraum (LR) das Umfeld mit allen übrigen gewässerrelevanten Ökosystemfunktionen erfasst (Fig. 3). Damit wird eine räumlich differenzierte Charakterisierung der wichtigsten Ökosystemfunktionen eines Gewässers erreicht.

Sowohl die Längen- als auch die Breitenbegrenzung der Untersuchungseinheiten basiert auf dem erwähnten Datensatz zur Ökomorphologie der Fliessgewässer Stufe F 2009 [47]. Da dieser Datensatz durch Feldarbeit erzeugt wurde, weisen die darin verwendeten Abschnittslängen die erwünschte Realitätsnähe auf und können direkt übernommen werden. Die beiden gewählten Einheitsflächen (GR und LR) unterscheiden sich also ausschliesslich in ihrer Breite. Jene des Gewässerraums definiert sich über die Schlüsselkurve [56], d.h. über die Parameter Sohlenbreite und Breitenvariabilitätsfaktor, welche ebenfalls in der Ökomorphologie [47] enthalten sind. Damit entspricht die Breitenbegrenzung den

gesetzlichen Vorgaben zur Sicherstellung der Biodiversität und des Hochwasserschutzes in Schutzgebieten (GSchV, Art. 41a) [13] und kann, falls bereits in die kantonale Gewässernutzungsplanung aufgenommen und entsprechend umgesetzt, übernommen werden.



Figur 3 Abgrenzung der Untersuchungseinheiten

Die Breite des Landschaftsraums hingegen wird - der Einfachheit halber für alle Gewässerabschnitte gleichermassen - über die Pendelbreite festgelegt, die der dreifachen Gewässerraumbreite entspricht. Eine funktionierende Pendelbreite [57] ist deshalb wichtig, weil sie die Selbstreinigung des Wassers und die Filterleistung des Sohlenkörpers sichert; beides sind grundlegende Voraussetzungen für die Erneuerung von Grund- und Trinkwasser.

2.2.4 Beurteilungsraster

Zur Beurteilung der Untersuchungseinheiten werden Indikatoren herbeigezogen. Nebst der Einteilung dieser Indikatoren in regulierende (Typ A), kulturelle (Typ B) und bereitstellende (Typ C) Ökosystemfunktionen wurden in einem weiteren Gliederungsschritt verwandte Indikatoren zu Komponenten zusammengefasst. In der Regel handelt es sich um drei Komponenten pro Funktionstyp. Der Beurteilungsraster wird dadurch übersichtlicher und ermöglicht die anschliessende Synthese.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf einige ausgewählte Einzelheiten des Beurteilungsrasters. Die verwendeten Komponenten und ihre Indikatoren werden lediglich in Tabellenform (Tab. 1-3) aufgelistet. Eine detailliertere Beschreibung findet sich in [31] und [34].

Skalierung

Gemäss König 2011 [58] sind Beurteilungen im Wesentlichen so aufgebaut, dass sie mittels Indikatoren einem Objekt - hier Gewässerabschnitt - in Abhängigkeit seiner Relation zur Referenzgrösse einen Wert auf einer Skala zuordnen. Sie stellen damit eine Verknüpfung zwischen Sach- und Wertebene her. Die Beurteilungsmethode definiert die dazu nötigen Indikatoren und legt die Werteskalen fest. Ebenso bestimmt sie die Regeln für die Synthese, welche von der gewählten Werteskala (Nominal-, Ordinal-, Intervallskala) abhängig sind. Das arithmetische Mittel ist bspw. ausschliesslich bei Intervallskalen zulässig [58].

In der vorliegenden Studie wird für die Beurteilung des Gewässerraums, d.h. seiner Ökosystemfunktionen und damit der Ausprägung seiner Indikatoren, eine fünfstufige Ordinalskala gewählt (Wertebereich 1 bis 5). Zur Bemessung des Erreichungsgrades der einzelnen Indikatoren werden Einheiten wie z.B. Flächengrösse, Anzahl oder Dichte eingesetzt (vgl. Tab. 1-3). Jeder Indikator hat seine eigene Einheit mit ganz spezifischer

Skalierung. Die Festlegung der Werteskalen und die Definition eines Referenzzustandes erübrigte sich in den meisten Fällen, da die Abstände und Verhältnisse zwischen den verschiedenen Ausprägungen der Indikatoren den Datensätzen selbst oder den dazugehörigen Informationen entnommen werden konnten.

Im Gegensatz dazu erfolgt die Beurteilung der Ökosystemfunktionen auf der Landschaftsraumebene einheitlich über ein Bonus-Malus-System, d.h. es wird lediglich geprüft, ob ein Indikator vorhanden ist (1) oder nicht (0). Dieses Vorgehen entspricht einer Nominalskala, d.h. aus den Ausprägungen der Indikatoren lassen sich weder eine Rangfolge noch Ausprägungsabstände ablesen.

Prioritätsräume

Sobald ein GR oder LR in einem gesetzlichen Schutzgebiet gemäss [30] liegt, wird ihm ein Sonderstatus (Wert 9) zugeordnet. Um einerseits vollständige Informationen zu erhalten und andererseits zu ermöglichen, die Ergebnisse auch für andere Fragestellungen anzuwenden, wurden diese Raumeinheiten ebenso vollständig beurteilt. Sie schliessen aber aufgrund ihres Status eine Wasserkraftnutzung mit höchster Wahrscheinlichkeit aus. Die Komponente Prioritätsraum findet sich in allen drei Funktionstypen (A, B und C) wieder, da Schutzgebiete alle drei Arten von Ökosystemfunktionen erfüllen.

Tabelle 1 Regulierende Funktionen (Typ A) des Ökosystems Gewässer

	Komponente	Funktion	Indikator	Einheit	Wertebereich
Gewässerraum	Prioritätsraum	Refugium	Int., nat., kant. Schutzgebiete	Präsenz	{0, 1, 9}
			Natürlichkeitsgrad der Ökomorphologie	Grad	{1, ..., 5}
			Durchgängigkeit (Abstürze)	Anzahl	{1, ..., 5}
	Gewässertyp & Morphologie	Lebensraum, Wasserhaushalt	Natürlichkeit des Geschiebehaushalts (Bauwerke)	Anzahl	{1, ..., 5}
			Einzigartigkeit	Präsenz	{1, 5}
			Renaturierungen	Präsenz	{1, 5}
	Wasserqualität	Nährstoffhaushalt, Lebensraum	Verdünnungsverhältnis ARA	%	{1, ..., 5}
			PO ₄ -P	mg P/l	{1, ..., 5}
			NO ₃	mg N/l	{1, ..., 5}
			NH ₄	mg N/l	{1, ..., 5}
Wasserführung	Wasserregulation, Lebensraum	Schwall-/Sunk-Betrieb Wasserkraft	Typ & Anzahl	{1, ..., 5}	
		Restwasserstrecken	Präsenz	{1, 5}	
Landschaftsraum	Prioritätsraum	Refugium	Int., nat., kant. Schutzgebiete	Präsenz	{0, 1, 9}
	Biodiversität	Biologische & genetische Vielfalt	Artenvielfalt	Anzahl	{0, 1}
			Rote Liste (CR, EN, VU) od. Prioritäre Arten	Anzahl	{0, 1}
	Vernetzung	Lebensraum, Reproduktion	Nat. ökologisches Netzwerk REN	Präsenz	{0, 1}
Zerschneidung der Landschaft			Präsenz	{0, 1}	
Bodenbedeckung	Lebensraum, Lärmschutz	Waldflächen	%	{0, 1}	

Tabelle 2 Kulturelle Funktionen (Typ B) des Ökosystems Gewässer

	Komponente	Funktion	Indikator	Einheit	Wertebereich
Gewässerraum	Prioritätsraum	Ästhet., kultur. Information	Naturerlebnispark, UNESCO-Weltkulturerbe	Präsenz	{0, 1, 9}
	Erschliessung	Erholung, ästeth. Information	Erreichbarkeit & Einsehbarkeit	m/m ²	{1, ..., 5}
	Erlebnischarakter	Erholung, ästeth. Information	Landschaftsästhetische Besonderheit (Wasserfall)	Präsenz	{1, 5}
	Freizeit & Sport	Erholung, Freizeit	Angelfischerei Wassersport (Kanu, Canyoning)	Anzahl Schwierigkeit	{1, ..., 5} {1, 5}
Landschaftsraum	Prioritätsraum	Ästhet., kultur. Information	Naturerlebnispark, UNESCO-Weltkulturerbe	Präsenz	{0, 1, 9}
	Erlebnischarakter	ästhet. Information	Aussichtspunkte	Präsenz	{0, 1}
	Freizeit & Sport	Erholung, ästeth. Information	Wanderwege	Präsenz	{0, 1}
			Velorouten	Präsenz	{0, 1}
			Erholungswert (Gastronomie)	Anzahl	{0, 1}
	Kulturhistorische Objekte	Histor., kultur. Information	Historische Verkehrswege IVA	Präsenz	{0, 1}
			Schützenswerte Ortsbilder ISOS	Präsenz	{0, 1}
			Nat. Kulturgüter KGS	Präsenz	{0, 1}
	Bodennutzung	Erholung, Freizeit	Wohn- & Ferienhäuser	%	{0, 1}
	Tourismus	Erholung, Freizeit	Infrastrukturen (Seilbahn, Skipiste, Schiff)	Präsenz	{0, 1}
Eisenbahnlärm			%	{0, 1}	
Strassenlärm			%	{0, 1}	
Lärmschutz	Erholung	Fluglärm	%	{0, 1}	

Tabelle 3 Bereitstellende Funktionen (Typ C) des Ökosystems Gewässer

	Komponente	Funktion	Indikator	Einheit	Wertebereich
Gewässerraum	Prioritätsraum	Wasserversorgung	Gewässer- & Grundwasserschutzzone S1, S2	Präsenz	{0, 1, 9}
	Rohstoffnutzung	Energiequelle	Wasserentnahme für Wasserkraft	% Q ₃₄₇	{1, ..., 5}
			Wasserentnahme für andere Nutzungen	% Q ₃₄₇	{1, ..., 5}
	Pot. Wasserkraft	Energiequelle	Spezifische Wasserkraftleistung	kW/m	{1, ..., 5}
Risikovorsorge	Schutz, Prävention	Gefahrenzonen Lawinen, Rutschungen & Hochwasser	%	{1, ..., 5}	
Landschaftsraum	Prioritätsraum	Wasserversorgung	Gewässer- & Grundwasserschutzzone S1, S2	Präsenz	{0, 1, 9}
	Rohstoffnutzung	Baustoff	Abbau & Deponie	%	{0, 1}
		Reinigung	ARA	Präsenz	{0, 1}
	Bodeneignung	Bodenverfügbarkeit	techn. Infrastruktur (Bauzonen, Bauten/Anlagen)	Präsenz	{0, 1}
			Steuereinnahmen aus Wasserkraft (Gemeinde)	Präsenz	{0, 1}
Bodennutzung	Bodenverfügbarkeit, -bildung	Industrie & Gewerbe	%	{0, 1}	
		Landwirtschaftsflächen	%	{0, 1}	

2.2.5 Untersuchungsgebiete

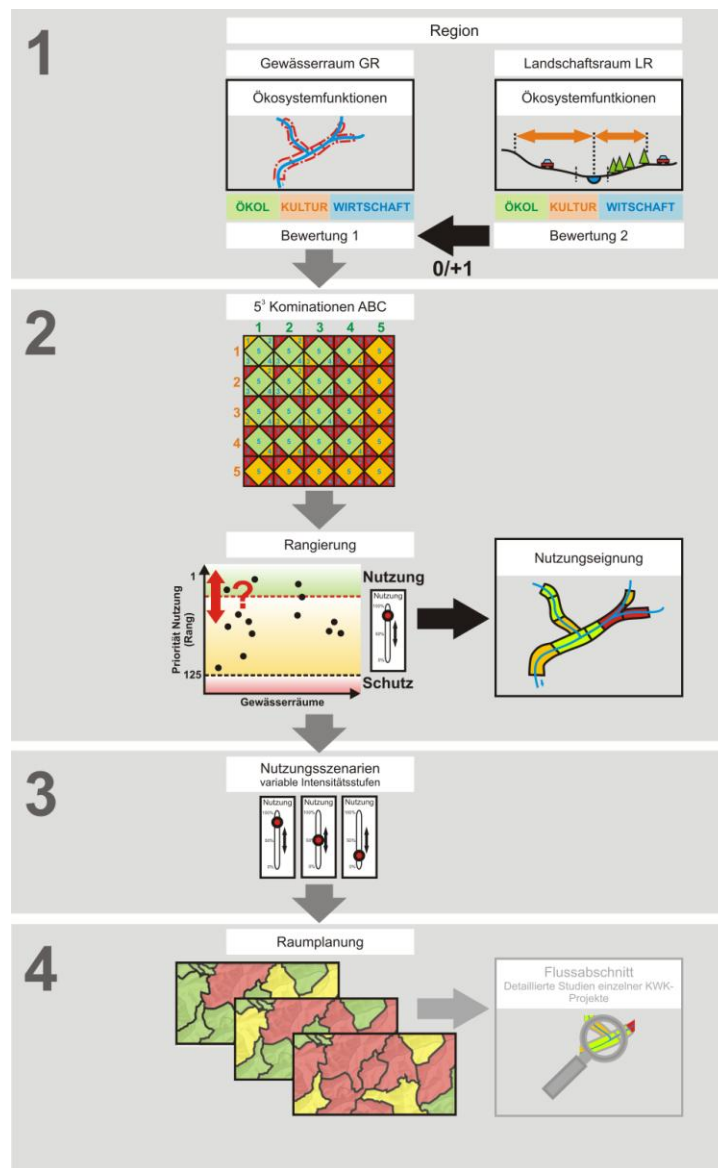
Die Auswahl der Testgebiete (Tab. 4) beschränkt sich aus Gründen der Datenverfügbarkeit und des Anteils an bisher ungenutztem Wasserkraftpotential auf den Kanton Bern. Zudem bietet er dank seiner Grösse und Topographie ein breites Spektrum an verschiedenen Gewässertypen. Die einzelnen Gebiete wurden denn auch so gewählt, dass möglichst viele dieser Gewässertypen vertreten sind. Diese Auswahl soll die Vielfalt der Schweizer Fließgewässer möglichst repräsentativ abbilden.

Tabelle 4 Gebietskenngrößen (HADES Tafel 1.2)

Gewässer	EZG [km ²]	Regime	Höhenstufen	Max Höhe [m]	Min Höhe [m]
Lütschine	380	glazial bis glazio-nival	nival/alpin bis montan	4150	550
Emme	1046	nival bis pluvial	subalpin/montan bis kollin	2250	550
Kander	502	glazial bis nival	nival/alpin bis montan	3850	550
Simme	597	glazial bis nival	alpin bis montan	3250	550

2.3 Analyse

Figur 4 gibt einen Überblick zum Vorgehen der Methodik. Die Schritte von der Einzelbeurteilung (1) bis hin zur Szenarienbildung (3) werden im Folgenden kurz erläutert.



Figur 4 Das Vorgehen der Methodik im Überblick

2.3.1 Ganzheitliche Beurteilung (1)

Die ganzheitliche Beurteilung (Schritt 1, Fig. 4) bildet die Basis der gesamten Methodik und ist damit das zentrale Steuerelement. Sie hat zum Ziel, die Bedeutung der Ökosystemfunktionen für den Menschen in Form von Leistungen möglichst umfassend zu quantifizieren. Die Ökosystemfunktionen werden dazu in die drei Typen regulierende (Typ A), kulturelle (Typ B) und bereitstellende Funktionen (Typ C) aufgeteilt. Entsprechend dreiteilig verläuft die Beurteilung der Funktionen: Jeder Untersuchungseinheit werden in Abhängigkeit von Typ, Anzahl und Leistung der Ökosystemfunktionen drei Werte zugeordnet. Je mehr Funktionen und je grösser deren Leistung, desto höher sind diese Werte und desto bedeutender die beurteilten Funktionen. Sie sind also ein Mass, das die Bedeutung der Ökosystemfunktionen quantifiziert und damit die ökologische, kulturelle und wirtschaftliche Ökosystemleistung jeder Untersuchungseinheit beziffert. Da jede Untersuchungseinheit über einen dreistelligen Wert verfügt, führt dies letztlich zu einer

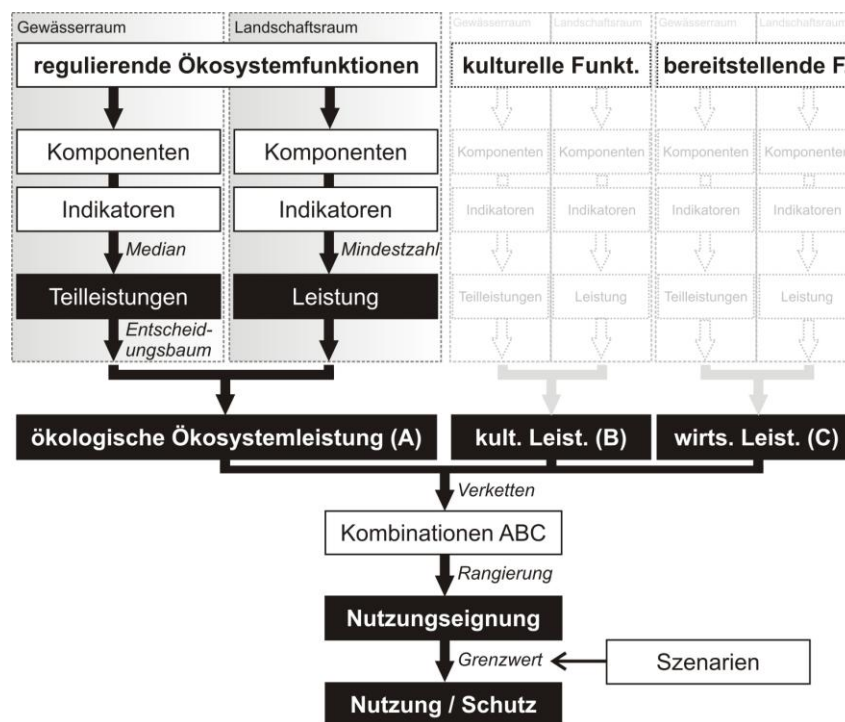
dreifachen Charakterisierung des gesamten Untersuchungsgebietes. Damit resultiert aus Schritt 1 ein Zwischenergebnis (vgl. ökologische Ökosystemleistungen (A), kult. Leist. (B) und wirts. Leist. (C) in Fig. 5), das Schwerpunkte sichtbar macht und sich durchaus für andere Anwendungszwecke einsetzen liesse (z.B. Planung von Revitalisierungen).

2.3.1.1 Datenerhebung

Die Erfassung und Beurteilung der Ökosystemfunktionen sowohl des Gewässerraums als auch des Landschaftsraums erfolgt, wie erwähnt, mithilfe einer speziell entworfenen Datenbank [34] im GIS. Damit gelingt eine Reduktion des Arbeitsaufwandes auf ca. 3-4 Tage pro Untersuchungsgebiet, wobei die Anschaffung und Aufbereitung sämtlicher benötigter Datensätze nicht eingerechnet ist. Obwohl darauf geachtet wurde, dass die verwendeten Datensätze bereits vorhanden sind und zwar möglichst national oder zumindest über ein kantonales Geoportal abrufbar, ist dieses Preprocessing mit einem beachtlichen zusätzlichen Zeitaufwand verbunden.

Die Verwendung einer Datenbank hat den weiteren Vorteil, dass jederzeit zurückverfolgt werden kann, welche Ökosystemfunktionen mit welcher Ökosystemleistung zur Beurteilung einer Untersuchungseinheit (GR und LR) beitragen.

2.3.1.2 Synthese



Figur 5 Teilschritte der Synthese

Nach der systematischen Beurteilung aller Untersuchungseinheiten mithilfe der GIS-Datenbank wird eine Synthese durchgeführt. Die gesamten Beurteilungsergebnisse werden auf die drei Einzelwerte ökologische, kulturelle und wirtschaftliche Ökosystemleistung reduziert. Dadurch wird das Ergebnis einerseits leichter fass- und nutzbar, verliert aber andererseits an Tiefenschärfe, da Einzelheiten verwischen. Dieser Informationsverlust wurde mehrfach kritisiert und diskutiert, doch auch wenn er umstritten bleibt, so zeigte sich doch, dass eine Beurteilung per se immer eine Reduktion komplexer Sachverhalte darstellt. In diesem Sinne wurde das Vorgehen als berechtigt angesehen.

Zur Aggregation der Daten werden verschiedene Methoden der deskriptiven Statistik eingesetzt. Die Abfolge der verwendeten Methoden und ihre Kenngrößen sind in Figur 5 schematisch dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

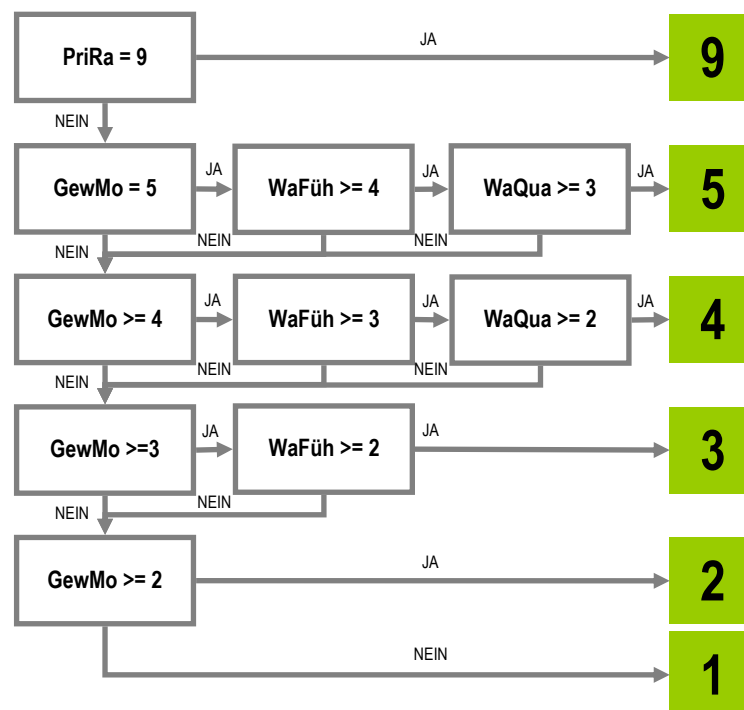
Median

Sobald die Überprüfung der Indikatoren auf Gewässerraumebene abgeschlossen ist, werden ihre Ergebnisse zu den Teilleistungen der Komponenten zusammengefasst. Da es sich bei den Indikorausprägungen um Ordinalskalen handelt, wird dazu der Median eingesetzt. Somit entspricht eine Teilleistung dem Median der Ausprägungen aller Indikatoren einer Komponente. Weil jeder Funktionstyp über drei Komponenten verfügt, resultieren jeweils drei Teilleistungen pro Typ; und zwar bezogen auf den Gewässerraum. Nach diesem ersten Syntheseschritt folgt eine weitere Aggregation der Teilleistungen. Hierfür werden aus Transparenz- und Nachvollziehbarkeitsgründen Entscheidungsbäume verwendet. Eine entscheidende Rolle beim Aufbau des Entscheidungsbaumes spielt die Reihenfolge bzw. die Gewichtung der Teilleistungen.

Sensitivitätsanalyse

Unter der Annahme, dass die Komponenten und damit auch ihre Teilleistungen ungleich bedeutend und voneinander abhängig sind, wurde für die Gewichtung der Ansatz des Sensitivitätsmodells nach Vester 1988 [59] und der Sensitivitätsanalyse nach Messerli 2000 [60] gewählt. Mithilfe dieser Sensitivitätsanalysen wird ermittelt, welche Komponente am stärksten mit den anderen Komponenten desselben Funktionstyps verknüpft ist (Vernetzungsgrad). Ihrer Teilleistung muss beim Entscheidungsbaum besonderes Gewicht beigemessen werden. Auf diese Weise erhielt bspw. die Teilleistung der Komponente *Gewässermorphologie und -typ*, die den regulierenden Ökosystemfunktionen (Typ A) angehört, am meisten Gewicht; d.h. diese Komponente ist am stärksten eingebunden. Die für die vorliegende Studie durchgeführten Sensitivitätsanalysen und die daraus abgeleiteten Gewichtungen stützen sich auf Expertenmeinungen, die unter anderem im Rahmen der Begleitgruppensitzung V vom 17. Mai 2011 eingeholt wurden.

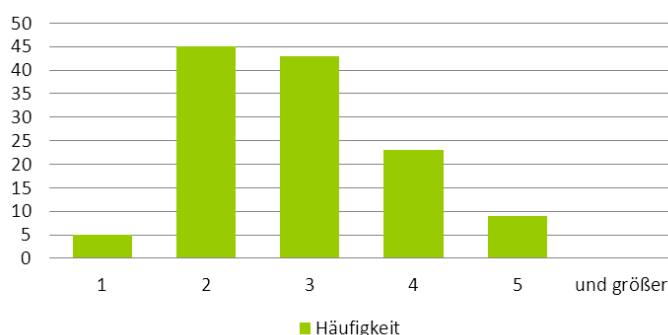
Basierend auf dieser Gewichtung wird nachfolgend ein Entscheidungsbaum aufgebaut.



Figur 6 Entscheidungsbaum für die Teilleistungen der regulierenden Ökosystemfunktionen des Gewässerraums (PriRa = Prioritätsraum; GewMo = Gewässermorphologie und -typ; WaFüh = Wasserführung; WaQua = Wasserqualität)

Entscheidungsbaum

In Figur 6 ist der Entscheidungsbaum für die Teilleistungen der regulierenden Ökosystemfunktionen beispielhaft dargestellt. Die Grundstruktur wurde möglichst einfach und für alle drei Funktionstypen einheitlich gewählt. Dadurch unterscheiden sich die drei Entscheidungsbäume ausschliesslich in der Gewichtung ihrer Teilleistungen. Sollten an der Methodik Anpassungen durchgeführt werden, aus welchem Grunde auch immer, so stellen diese Entscheidungsbäume eine erste Schlüsselstelle dar. Die Struktur des Entscheidungsbaumes wurde so gewählt, dass die Endergebnisse, also die ökologischen, kulturellen und wirtschaftlichen Ökosystemleistungen, möglichst die ganze Bandbreite an Ausprägungen abdecken (Wertebereiche 1 bis 5). Da eine Ansammlung in den mittleren Wertebereichen zwei, drei und vier unerwünscht ist (Mittelung) und dem vorliegenden Entscheidungsbaum die Annäherung an die angestrebte Verteilung am besten gelingt, wird er anderen getesteten Gewichtungsansätzen vorgezogen. Auf der Gewässerraumebene resultiert zwar nach wie vor keine homogene Verteilung der Ergebnisse über die ganze Bandbreite, d.h. die gleiche Anzahl Ergebnisse pro Wert, sondern eine rechtsschiefe Verteilung (Fig. 7). In Anbetracht der Aufwertung durch den folgenden Berechnungsschritt (vgl. Leistung auf Landschaftsraumebene), wird diese Schiefe jedoch als zulässig betrachtet.



Figur 7 Werteverteilung der regulierenden Ökosystemfunktionen auf Gewässerraumebene unter Anwendung des Entscheidungsbaumes in Fig. 6 (neutrale Auswertung der 125 (5^3) möglichen Teilleistungs-Kombinationen, exkl. Landschaftsraum). Diese Verteilung wird sich durch die Beurteilung der regulierenden Ökosystemfunktionen auf Landschaftsraumebene nochmals verändern (vgl. Fig. 8).

Minimale Anzahl (Mindestzahl)

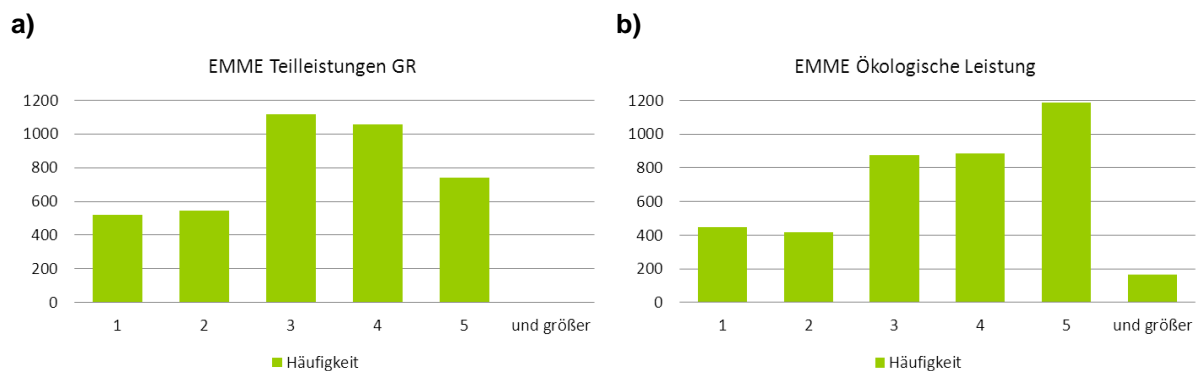
Nachdem alle vorangehenden Syntheseschritte der Zusammenführung der Beurteilungen auf Gewässerraumebene dienten, wird in einem letzten Schritt der Einfluss der Landschaftsräume einbezogen. Für die Aggregation der Ausprägungen der Indikatoren zur Leistung werden auf der Landschaftsraumebene spezifisch für jeden Funktionstyp Grenzwerte bestimmt (vgl. Fig. 5). Obwohl es sich bei der hier verwendeten Werteskala um eine Nominalskala handelt (1 oder 0) und daher ebenfalls eine Median-Mittelung möglich wäre, wurde die Festlegung von individuellen Mindestzahlen als sinnvoller erachtet. Der Grund dafür liegt in den Besonderheiten und Häufigkeiten einzelner Indikatoren im Landschaftsraum, die auf diese Weise angemessener berücksichtigt werden konnten. Sobald also eine bestimmte Anzahl Landschaftsraum-Indikatoren desselben Funktionstyps vorhanden ist, führt dies zu einer Aufwertung (+1) der oben erläuterten Ergebnisse der Gewässerraumebene. D.h. sind in einem Landschaftsraum bspw. mehr als vier von 13 Indikatoren (kulturelle Ökosystemfunktionen) ausgeprägt vorhanden, wird die Beurteilung der kulturellen Ökosystemfunktionen auf Gewässerraumebene um +1 aufgewertet.

Eine Abwertung kann deshalb nicht stattfinden, weil davon ausgegangen wird, dass der IST-Zustand eines Gewässerraumes durch keinen äusseren Faktor verändert werden kann; er wird als starre Grösse angesehen. Allerdings kann dessen Bedeutung bzw. die Bedeutung der darin enthaltenen Ökosystemfunktionen für den Menschen grösser werden, wenn das nahe Umfeld zusätzlich Funktionen mit einer starken Ausprägung aufweist. Für diese Fälle sind die Indikatoren und ihre Skalierungen auf Landschaftsraumebene aber so ausgelegt,

dass keine negativen Einflüsse entstehen können. Enthält das nahe Umfeld einen negativen Faktor wie z.B. Lärm (vgl. Lärmschutz, Tab. 2), wird folglich der Wert der GR-Beurteilung unverändert übernommen. Denn Lärm beeinträchtigt bspw. das Vorhandensein eines Wasserfalls oder einer Bademöglichkeit nicht (vgl. Landschaftsästhetische Besonderheit, Tab. 2); d.h. deren Ausprägung wird durch Lärm weder gesteigert noch vermindert, ihr IST-Zustand bleibt unverändert: entweder sie existieren oder nicht - Lärm hin oder her. Hingegen ändert sich durch Lärm bzw. Ruhe die Bedeutung des Gewässerraums. Ist nämlich kein Lärm vorhanden, werden Wasserfall oder Bademöglichkeit attraktiver; die kulturellen Ökosystemleistungen des Gewässerraums gewinnen an Bedeutung. Oder anders ausgedrückt, die vorherrschende Stille führt zu einer stärkeren Ausprägung der Erholungsfunktion. Der Einfluss auf die kulturellen Ökosystemfunktionen des Gewässerraums fällt entsprechend positiv aus (+1).

Standardisierte Werteverteilung

Dieser letzte Berechnungsschritt führt also die Beurteilungen der Ökosystemfunktionen auf Gewässer- und Landschaftsraumebene zusammen. Weil sich dadurch das Ergebnis auf Gewässerräumebene allenfalls verändert, wirkt sich das, wie angekündigt, ebenso auf die Werteverteilungen aus. Diese Veränderung wird in Fig. 8 anschaulich demonstriert. Zeigte sich vorher (vgl. Fig. 7) noch eine rechtsschiefe Verteilung, so verschieben sich die Häufigkeiten nach der Vereinigung der Beurteilungen auf Gewässer- und Landschaftsraumebene nun eher in Richtung homogene Verteilung. Es muss dabei aber berücksichtigt werden, dass es sich bei Fig. 8 um die Ergebnisse der Emme handelt, wohingegen Fig. 7 die Werteverteilung aller möglichen Ausgänge des Entscheidungsbaumes, also neutrale Ergebnisse abbildet.

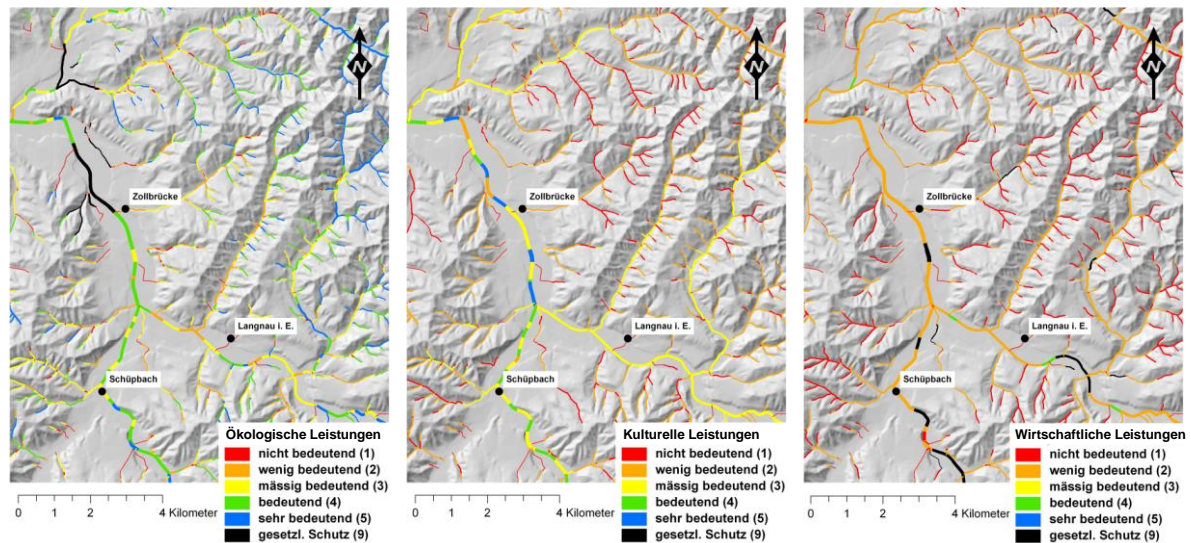


Figur 8 a) Werteverteilung der regulierenden Funktionen der Emme auf Gewässerräumebene unter Anwendung des Entscheidungsbaumes in Fig. 6, wobei der Sonderstatus (9) der Prioritätsräume unberücksichtigt blieb (Spezifische Auswertung der drei Teileleistungen der Komponenten *Gewässermorphologie und -typ*, *Wasserqualität* und *Wasserführung* der Emme). **b)** Werteverteilung der ökologischen Ökosystemleistungen der Emme nachdem den Ergebnissen in a) die Leistung der regulierenden Ökosystemfunktionen des Landschaftsraumes zugeführt wurde (inkl. Prioritätsstatus).

Endergebnis der Synthese

Nach Abschluss aller Syntheseschritte liegen drei Werte vor (vgl. Fig. 5): eine ökologische (A), eine kulturelle (B) und eine wirtschaftliche Ökosystemleistung (C). In Kartenform präsentiert, geben diese Zwischenergebnisse erstmals Auskunft über die Charakteristiken eines Untersuchungsgebietes. Daraus lässt sich bspw. ablesen, ob es sich insgesamt um ein von regulierenden Ökosystemfunktionen (Typ A) geprägtes oder doch eher um ein von bereitstellenden Ökosystemfunktionen (Typ C) dominiertes Gebiet handelt. Ebenfalls werden lokale Schwerpunkte hinsichtlich der drei Funktionstypen sichtbar. Zudem lassen sich die Informationen natürlich jederzeit auch für einzelne Gewässerräume ablesen. Der Gewässerraum dient fortan als Bezugsgröße.

Figur 9 zeigt beispielhaft die Zwischenergebnisse eines Ausschnitts des Untersuchungsgebiets Emme.



Figur 9 Ausprägungsgrad der Ökosystemfunktionen in einem Ausschnitt der Emme (Zwischenergebnis der Synthese).

Durch Verkettung der drei Ökosystemleistungen (A, B, C) entsteht ein dreistelliger Wert (ABC), der aufgrund der gewählten fünfstufigen Werteskala in 125 (5^3) verschiedenen Ausführungen vorkommen kann. Mithilfe dieser Kombinationsmöglichkeiten wird im zweiten Vorgehensschritt die Eignung eines Gewässerraums für eine Kleinwasserkraftnutzung bestimmt.

2.3.2 Nutzungseignungen (2)

Das Ziel des folgenden Schrittes ist es (Schritt 2, Fig. 4), für jeden Gewässerraum festzulegen, ob er sich aufgrund seiner Ökosystembeurteilung für eine Kleinwasserkraftnutzung eignet.

Jede der 125 Kombinationen ABC und somit jeder Gewässerraum hat seine ganz eigene, durch die Beurteilungen der drei Funktionstypen bestimmte Charakteristik und eignet sich dadurch besser oder schlechter für eine Nutzung. Damit diese Eignung möglichst rasch erfasst werden kann, werden die Kombinationen in Abhängigkeit ihrer ökologischen, kulturellen und wirtschaftlichen Ökosystemleistung rangiert. Eine Rangierung gelingt entweder durch die Bildung einer Zahlenreihe, also der Folge von Partialsummen, was im vorliegenden Fall wenig sinnvoll ist, da die Werte durch Verkettung generiert wurden und daher nicht als Ziffern des Dezimalsystems betrachtet werden dürfen. Oder für jede Kombinationen wird aufgrund der Information, die sie enthält, einzeln abgewogen, wie gut sie sich für eine Nutzung eignet. Dazu ist also ein Abwägungsprozess notwendig. Weil mit diesem Ansatz besser auf eine kraftwerksspezifische Beurteilung eingegangen werden kann, eignet er sich besser für die hier vorgestellte Methodik.

Damit dieser Abwägungsprozess nachvollziehbar und transparent bleibt, wurden einerseits Grundsatzregeln formuliert, welche die Entscheidungen objektivieren und standardisieren. Andererseits wurde eine Matrix entworfen, welche die Entscheidung graphisch unterstützt. Sowohl die detaillierte Erläuterung der Regeln wie auch die Matrix finden sich in [31]. Der Vollständigkeit halber werden die Regeln im Folgenden kurz aufgelistet:

- 1) Eine Ökosystemleistung dominiert immer dann, wenn sie mindestens um einen Wert grösser ist als die beiden anderen (z.B.112).

- 2) Die Kombination, welche sich am besten für eine Wasserkraftnutzung eignet, soll Rang eins belegen.
- 3) Das Ziel ist immer eine Nutzenmaximierung unter Kostenminimierung.
- 4) Im Zweifelsfalle wird jene Ökosystemleistung vorrangig behandelt, welche die Grundbedürfnisse des Menschen abdeckt.

Diese Regeln führen dazu, dass jene Kombination Rang eins belegt, welche sich unter minimalem Kostenaufwand am besten für eine Wasserkraftnutzung eignet. Das heisst, die Kombination 115 (vgl. Anhang 7.1) mit schwach ausgeprägter ökologischer und kultureller Ökosystemleistung und gleichzeitig bedeutender wirtschaftlicher Leistung, weist die beste Nutzungseignung auf und erhält somit Rang eins. Der Kombination 551 (vgl. Anhang 7.1) mit der höchsten ökologischen und kulturellen Ökosystemleistung und der geringsten wirtschaftlichen Ökosystemleistung wird hingegen der letzte Rang zugeordnet; d.h. eine Nutzung würde erst dann erfolgen, wenn alle anderen Kombinationen ebenfalls genutzt werden.

Unter konsequenter Anwendung der vier Regeln entsteht die im Anhang 7.1 dargestellte Rangliste aller Kombinationen. Es zeigt sich, dass das Vorgehen mithilfe dieser Grundsatzregeln sowohl das Gütekriterium der Reproduzierbarkeit als auch der Validität erfüllt:

- Eine Wiederholung der Rangierung würde zu demselben Ergebnis führen.
- Die Verknüpfung von Sach- und Wertebene gelingt erfolgreich, da der Rang die gegebenen Charakteristiken, d.h. die unterschiedlich ausgeprägten Ökosystemfunktionen bzw. ihre Leistungen, repräsentativ abbildet.

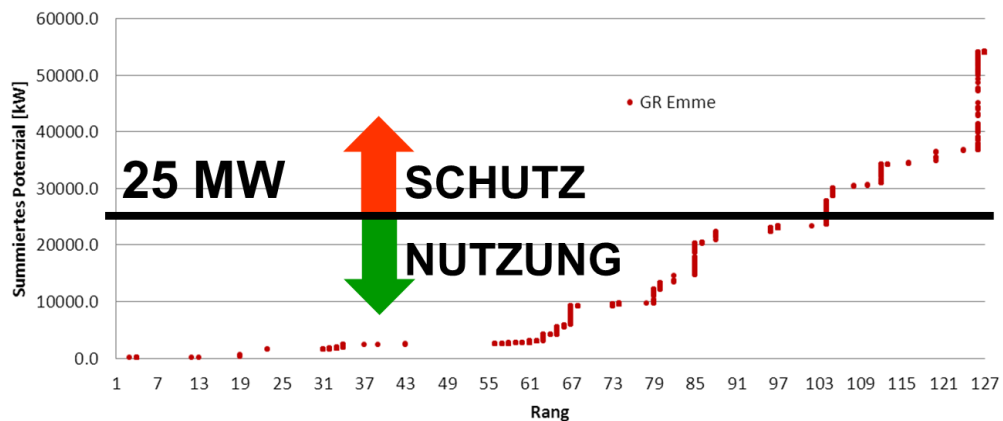
Schliesslich werden die Ränge auf die Beurteilungen der einzelnen Gewässerräume übertragen, so dass jeder Gewässerraum über einen Rang verfügt, der Auskunft über dessen Eignungsgrad für eine Kleinwasserkraftnutzung gibt. Damit ist allerdings noch nicht klar, ob der Gewässerraum in Zukunft auch wirklich genutzt werden soll. Eine eindeutige Empfehlung ist möglich, wenn festgelegt wurde zwischen welchen Rängen sich die Schutz-Nutzungsgrenze befindet. Erst dann wird ersichtlich, welche Ränge zu einer Nutzungsempfehlung (vgl. Fig. 10) führen. Lässt sich diese Grenze zusätzlich flexibel verschieben, so ist die Voraussetzung für beliebige Nutzungsszenarien gegeben.

Rang	ABC
1	115
2	114
3	113
4	112
5	125
6	124
7	123
8	215
9	214
10	213
11	225
12	224
13	223
14	135
15	134
16	315
17	314
18	235
19	234
20	325
21	324
22	335
23	334

Figur 10 Die flexibel wählbare Grenze in der Rangliste entscheidet über die Nutzungseignung der einzelnen Kombinationen ABC bzw. der Gewässerräume und bildet die Grundlage der Szenarien. (ABC = Verkettung der ökologischen (A), kulturellen (B) und wirtschaftlichen (C) Ökosystemleistung; Grün = Nutzung; Rot = Schutz; dargestellt ist ein fiktives Beispiel).

2.3.3 Szenarien (3)

Bei der Ausarbeitung der Methodik wurde von Anfang an grossen Wert darauf gelegt, dass sie sich auf die Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen beschränkt. Politische Entscheide sind daher ausgeschlossen. Dementsprechend sind die nachfolgend präsentierten Ergebnisse als Vorschläge und mögliche Varianten zu verstehen. Der vorliegende Bericht enthält keine definitiven Lösungen.

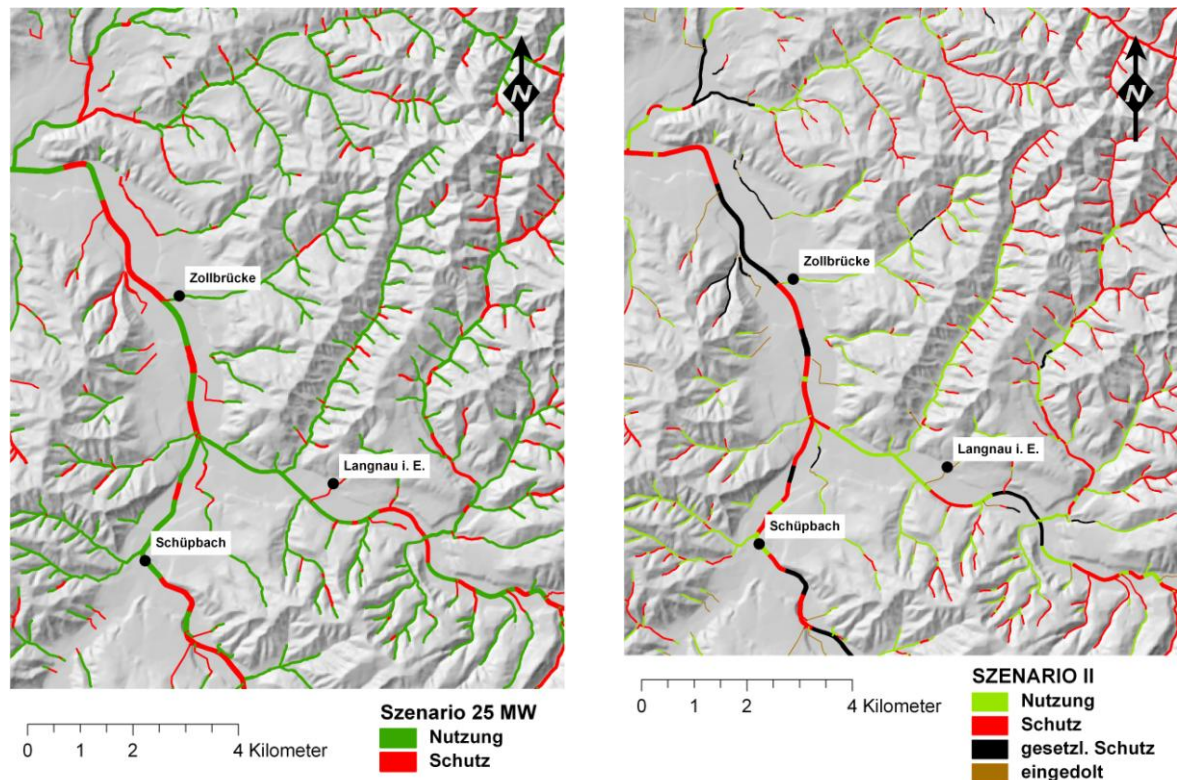


Figur 11 Rangverteilung und Wasserkraftpotential der Gewässerräume der Emme. Dargestellt ist die Schutz- und Nutzungszuweisung bei einem Ausbauziel von 25 MW im EZG der Emme.

Wie bereits angedeutet, lassen sich in der Rangliste der Gewässerräume durch die Verschiebung der Grenze zwischen Schutz und Nutzung unterschiedliche Szenarien erzeugen (vgl. Fig. 10). Da jeder Gewässerraum, nebst seinem Rang, über eine bekannte spezifische Wasserkraftleistung [kW/m] verfügt, besteht die Möglichkeit, die Grenzziehung von der Grösse des Wasserkraft-Ausbauzieles [kW] der untersuchten Region abhängig zu machen (vgl. Fig. 11). Durch Umrechnung der spezifischen Wasserkraftleistung [kW/m] auf den Gewässerraum [kW] und anschliessendem Aufsummieren der Wasserkraftleistungen aller rangierter Gewässerräume [kW] würde sofort ersichtlich, wo die Grenze gesetzt werden müsste, um das Ausbauziel zu erreichen und welche Gewässerräume von einer Nutzung betroffen wären. Dabei sind allerdings zwei Dinge zu bedenken:

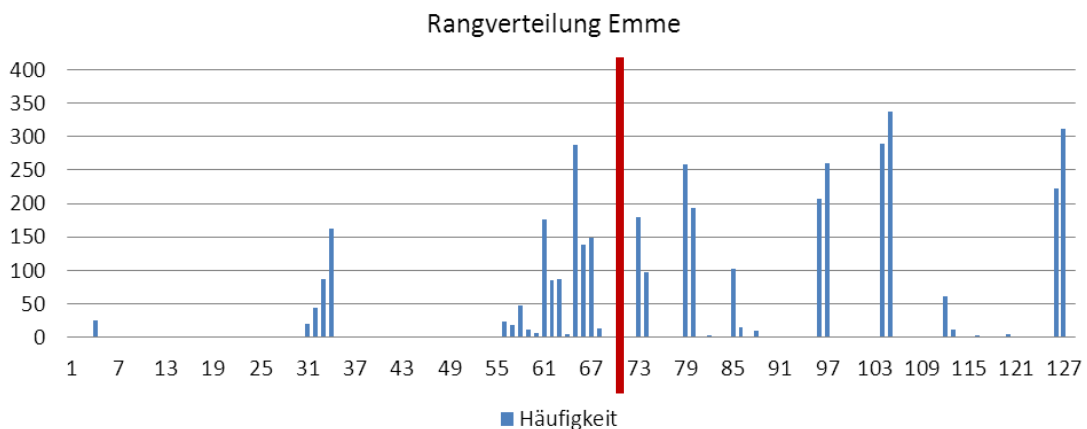
Erstens, je mehr Ränge in den Bereich ‚Nutzung‘ fallen, desto heftiger schlägt sich dies im Szenario nieder: einer Mehrheit der Gewässerräumen würde eine Nutzungsempfehlung zugeordnet und die Intensität der Kleinwasserkraftnutzung in einer Region würde zukünftig zunehmen. Dies kann auch bedeuten, dass Gewässerräume genutzt würden, welche aufgrund ihrer Beurteilung eigentlich als schutzwürdig bezeichnet werden sollten (Fig. 12).

Es wird eindrücklich sichtbar, wie wichtig es ist, die Charakteristiken eines Gebiets zu kennen und zu berücksichtigen, bevor eine Entscheidung getroffen wird. Hierzu bietet die Methodik mit der Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Ränge aller Gewässerräume eines Einzugsgebietes ein geeignetes Hilfsmittel. Mit dieser Rangverteilungskurve gelingt eine repräsentative Typisierung eines Gebietes. Als Beispiel ist in Figur 13 die Rangverteilung der Gewässerräume des Testgebietes Emme dargestellt. Daraus lässt sich bspw. ablesen, ob sich ein Gebiet wirklich für eine intensivere Wasserkraftnutzung eignet: belegt eine Mehrheit der Gewässerräume die hohen Ränge (vgl. Emme), verfügt das Gebiet über besonders ausgeprägte regulierende Ökosystemfunktionen und damit eine bedeutende ökologische Leistung. Eine restlose Ausschöpfung des ohnehin niedrigen Wasserkraftpotentials würde in diesem Fall wenig Sinn machen. Durch den Vergleich mit den Rangverteilungskurven anderer Gebiete, lassen sich damit aber auch regionale Schwerpunkte herausarbeiten. Es könnte anschaulich gezeigt werden, welche Gebiete in Bezug auf eine Nutzung bevorzugt behandelt werden sollten.



Figur 12 Darstellung der Ergebnisse für einen Ausschnitt der Emme bei einem 25 MW-Szenario (links) und einem Szenario (rechts), bei dem auf die spezifischen Charakteristiken (ausgeprägte regulierende Ökosystemfunktionen) des EZG Rücksicht genommen wurde (vgl. Fig. 13).

Zweitens zeigen die Szenarien-Karten lediglich Einzelbeurteilungen der Gewässerräume. Das heisst, es wurde weder überprüft, ob die Abschnittslängen aus technischer Sicht sinnvoll nutzbar sind, noch wurde geschaut, ob sich die Gewässerräume zu grösseren Einheiten aggregieren liessen. Zur Prüfung der technischen Machbarkeit wird auf Umweltverträglichkeitsprüfungen und Expertenwissen verwiesen [21, 22]. Eine räumliche Aggregation wird insbesondere im Rahmen einer regionalen Wassernutzungsplanung empfohlen. Die damit verbundene Anpassung der Szenarien erfolgt im letzten Vorgehensschritt (4) der Methodik (vgl. Fig. 4). Darauf wird in der vorliegenden Studie absichtlich nicht eingegangen, da dies durch Diskussion und Abwägung der verschiedenen Interessensgruppen an einem ‚runden Tisch‘ entschieden werden sollte.



Figur 13 Rangverteilung der Gewässerräume der Emme. Erfolgt die Unterteilung (rote Linie) in Ränge, die sich für eine Nutzung eignen (Rang 1 bis 70) und in schutzwürdige Ränge (Rang 71 bis 127) unter Berücksichtigung der spezifischen Gebieteigenschaften der Emme, ergibt sich ein Szenario wie in Fig. 12 (rechts) dargestellt.

3 Diskussion

Insgesamt wird die Methodik als Erfolg gewertet, weil sie einerseits vergleichbare Ergebnisse erzeugt [25, 61] und andererseits Antworten auf die gestellten Forschungsfragen liefert:

- Sie macht eine ganzheitliche Beurteilung des Ökosystems Gewässer möglich, d.h. alle gewässerrelevanten Ökosystemfunktionen werden erfasst und beurteilt.
- Sie prüft die Eignung einzelner Gewässerabschnitte für eine Kleinwasserkraftnutzung und identifiziert insbesondere die geeignetsten.
- Ergebnisse verschiedener regionaler Entwicklungsszenarien lassen sich kartographisch darstellen und damit aus räumlicher Sicht vergleichend beurteilen.

An dieser Stelle sei erneut betont, dass es sich bei den Szenarien um Empfehlungen handelt. Die definitiven Entscheide werden der Politik überlassen.

Des Weiteren wird nochmals darauf hingewiesen, dass es gerade bei der Planung von Wassernutzungsstrategien wichtig ist, eine regionale bis überregionale Perspektive einzunehmen. Denn es wird immer Gebiete geben, welche sich aufgrund ihrer Charakteristiken insgesamt besser für eine Nutzung eignen als andere.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Szenarien-Karten als solche unfertig sind. Es braucht eine zusätzliche Aggregation einzelner Gewässerräume, damit Strecken entstehen, welche technisch und raumplanerisch sinnvoll nutzbar sind.

Gesamthaft lassen sich die Stärken und Grenzen der Methodik wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 5 Die methodischen Stärken und Grenzen im Überblick

Stärken	Grenzen
Integrale Beurteilung	Aufwand von ca. 5d/Einzugsgebiet (je nach Datenlage)
Regional anwendbar (flächendeckend)	Bedarf an z.T. sehr spezifischen Inputdaten ist gross
Entscheidungshilfe („Wegweiser“)	Ausweisung von geeigneten Gewässerabschnitten; d.h. Einzelstandorte müssten nachträglich noch auf ihre finale Eignung geprüft werden (UVP)
Flexibilität (Entwicklungs-Szenarien)	
Anwendung nicht an Schweiz gebunden	
Beurteilung kann ebenso für andere Zwecke verwendet werden (nicht zwingend für Kleinwasserkraftwerke)	Eingebaute Schlüsselstellen, die das Ergebnis einerseits beeinflussen (z.B. Entscheidungsbäume), gleichzeitig aber auch Anknüpfungspunkt für beliebige Veränderungen bieten
Wiederholte Anwendung mit gleichen Input-Parametern liefert dieselben Resultate (Reproduzierbarkeit)	

4 Schlussfolgerungen

Die Schlussfolgerung wird im Sinne eines Ausblicks formuliert, da dies zum aktuellen Zeitpunkt sinnvoller erscheint.

- Es wird empfohlen die Methodik durch weitere Anwendungen in anderen EZG zu prüfen (möglicherweise sogar im Ausland).
- Weiterführende Arbeiten könnten bspw. die zeitliche Dynamik besser berücksichtigen oder den Aspekt der Klimaveränderung integrieren.
- Die Methodik liefert Grundlagen für den politischen Entscheidungsprozess. Sie benötigen weitergehende Interpretationen und Definitionen.
- Im Frühjahr 2012 ist die Dissertation [31] zu erwarten.
- Zudem ist ein Paper für das Journal of Environmental Management in Vorbereitung.
- Des Weiteren ist im Sommer 2012 eine Abschlussveranstaltung vorgesehen, an der die Methode präsentiert werden soll.

5 Symbolverzeichnis

ABC	:	ökologische (A), kulturelle (B) und wirtschaftliche (C) Ökosystemleistung eines Gewässerraums
EZG	:	Einzugsgebiet
GIS	:	Geographisches Informationssystem
GIUB	:	Geographisches Institut der Universität Bern
GR	:	Gewässerraum
KWK	:	Kleinwasserkraft
LR	:	Landschaftsraum

6 Referenzen

- [1] EC: **Renewable Energy Road Map**, Renewable energies in the 21st century: Building a more sustainable future. Impact Assessment. SEC(2006) 1719, vom 10.01.2007, in: Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Brussels, 2007.
- [2] Schweizerischer Bundesrat: **Energieperspektiven 2050, Analyse der Stromangebotsvarianten des Bundesrats**, Faktenblatt, Bern, 2011.
- [3] BFE: **Energieszenarien für die Schweiz bis 2050 Zwischenbericht I**, Erste Ergebnisse der angepassten Szenarien I und IV aus den Energieperspektiven 2007, Zwischenbericht II: Elektrizitätsangebot. Herausgegeben von BFE, prognos AG, Bern, 2011.
- [4] IEA: **World Energy Outlook**, Executive Summary, International Energy Agency IEA, 2011.
- [5] Metz, B.; Davidson, O. R.; Bosch, P. R.; Dave, R.; Meyer, L. A.: **Climate change 2007 - Mitigation of climate change**, Contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Cambridge University Press, Cambridge UK and New York USA, 2007.
- [6] IEA (2010): **World Energy Outlook 2010**, Zusammenfassung, International Energy Agency IEA, 2010.
- [7] United Nations: **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**, United Nations, Bonn, 1998.
- [8] BAFU: **UNO-Klimakonferenz: Kaum Fortschritte nach der ersten Verhandlungswoche**. Pressemitteilung vom 02.12.2011. Bern.
- [9] BFE: **Richtlinie kostendeckende Einspeisevergütung (KEV)**, Art. 7a EnG, Kleinwasserkraft Anhang 1.1 EnV, Bundesamt für Energie BFE, 2008.
- [10] swissgrid: **Report KEV Warteliste**, Frick, online verfügbar unter: www.swissgrid.ch, 01.12.2011.
- [11] EU: **Richtlinie 2000/60/EG** des europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Europäisches Parlament & Rat der europäischen Union, (Amtsblatt der europäischen Gemeinschaften L327, L 327/1-72), 2000.
- [12] Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft: **Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer** (Gewässerschutzgesetz), GSchG 1991, SR 814.20, vom 01. Jan 2011.
- [13] Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft: **Gewässerschutzverordnung**, 1998 GSchV, SR 814.201, vom 01. Aug 2011.
- [14] Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft: **Bundesgesetz über Natur- und Heimatschutz**, NHG 1966, SR 451, vom 01.01.2008.
- [15] Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft: **Bundesgesetz über die Raumplanung** (Raumplanungsgesetz), RPG 1979, SR 700, vom 01. Juli 2011.
- [16] BFE: **Stand der Wasserkraftnutzung in der Schweiz am 1. Januar 2011**, Bern, 31.03.2011.
- [17] Estoppey, R.; Juillerat, R.: **Wasserkraft: Viel mehr liegt nicht drin**, in Umwelt; BAFU, 2009, H. 02, S. 20–23.
- [18] Hänggi, P.; Balmer, M.; Weingartner, R.: **Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz - Hochrechnung**. In: Wasser-Energie-Luft, Jg. 103, H. 4, S. 300–307, 2011.
- [19] BFE: **Energieperspektiven 2050**, Abschätzung des Ausbaupotentials der Wasserkraftnutzung unter neuen Rahmenbedingungen, Faktenblatt, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 10.06.2011.
- [20] BVE (2010): **Beurteilung von Projekten für Kleinwasserkraftwerke (< 10 MW) aus Sicht der Nachhaltigen Entwicklung. Instrument zur Nachhaltigkeitsbeurteilung auf der Stufe Vorprojekt**, Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern BVE; Amt für Umweltkoordination und Energie AUE, Bern, 2010.

- [21] BAFU: **UVP von Wasserkraftanlagen, Massnahmen zum Schutz der Umwelt. Vollzug Umwelt**, Mitteilungen zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) 8, BAFU, Bern, 1997.
- [22] Verein für umweltgerechte Energie VUE: **Zertifizierungsrichtlinien, Bestimmungen und Kriterien: naturemade star und naturemade basic**, energieschweiz, Version 1.9, 2010.
- [23] WWF Schweiz; Pro Natura: **Kriterienkatalog für ökologische Wasserkraft**, Schlussbericht, Ernst Basler + Partner AG, Zollikon, 2008.
- [24] Pelikan, B.: **Handbuch zur Planung und Errichtung von Kleinwasserkraftwerken**, deutsche Übersetzung der Version Celso Penche et al., ESHA Belgien, 2004.
- [25] AWA: **Wassernutzungsstrategie 2010 des Kantons Bern**, Amt für Wasser und Abfall AWA, Bern, 2010.
- [26] Wasseragenda 21; NWB: **Umgang mit Gesuchen für neue Wasserkraftwerke - Abwägung zwischen Nutzungs- und Schutzbedürfnissen**, Unterlagen zum Seminar, Zürich, 2009.
- [27] Arbeitsgruppe Wasserkraft: **Strategie Wasserkraft Kanton Wallis**, Ziel, Stossrichtungen und Massnahmen, Schlussbericht der Arbeitsgruppe Wasserkraft zuhanden des Staatsrats des Kantons Wallis, Departement für Volkswirtschaft, Energie und Raumentwicklung des Kantons Wallis, S. 41, 2011.
- [28] Platform Water Management in the Alps: **Common Guidelines for the Use of Small Hydropower in the Alpine Region**, Alpine Convention, 2011.
- [29] Bolliger R.; Zysset A.; Winiker M.: **Schutz- und Nutzungsplanung nach Gewässerschutzgesetz**, Erfahrungen, Beurteilungskriterien und Erfolgsfaktoren, Bundesamt für Umwelt. Bern BAFU, Umwelt-Wissen, Nr. 0931, Bern, 2009.
- [30] BAFU; BFE; ARE (Hg.): **Empfehlung zur Erarbeitung kantonaler Schutz- und Nutzungsstrategien im Bereich Kleinwasserkraftwerke**, Bern, 2011.
- [31] Hemund, C.: **Methodik zur ganzheitlichen Beurteilung des Kleinwasserkraftpotentials in der Schweiz**. Dissertation, Bern, in prep.
- [32] Baumgartner, I.: **Methode zur ganzheitlichen Beurteilung von Gewässerräumen. Entwickelt und getestet am Beispiel des Einzugsgebiets der Lütschine im Berner Oberland**, Masterarbeit, Leiter: Prof. Dr. R. Weingartner, Betreut von C. Hemund, Universität Bern, Geographisches Institut, 2010.
- [33] Studer, D.: **Beurteilung von Landschaftsteilräumen. Methodik zur Abgrenzung, Aufnahme, Auswertung und Darstellung des IST-Zustands von Landschaftsteilräumen am Beispiel des Einzugsgebiets der Lütschine**, Masterarbeit, Publikation Gewässerkunde Nr. 458, Leiter: Prof. Dr. R. Weingartner, Betreut von C. Hemund, Universität Bern, Geographisches Institut, 2010.
- [34] Hirschi, J.: **Ganzheitliche Beurteilung von Gewässer- und Landschaftsräumen. Eine GIS-basierte Methodik zur Identifizierung von Gewässerräumen für eine potentielle Kleinwasserkraftnutzung in der Schweiz**. Masterarbeit, Leiter: Prof. Dr. R. Weingartner, Betreut von C. Hemund, Universität Bern, Geographisches Institut, 2011.
- [35] Watergisweb AG: **Wasserkraftpotential Schweiz**, Datenbank, Gewässernetz Schweiz 1:25,000 (swisstopo 2007), Bern, 2010.
- [36] Watergisweb AG: **Erhebung des Kleinwasserkraftpotentials der Schweiz. Ermittlung des hydroelektrischen Potentials für Kleinwasserkraftwerke in der Schweiz**, Jahresbericht, Bundesamt für Energie BFE, 2008.
- [37] United Nations: **42/187 Report of the World Commission on Environment and Development. Herausgegeben von United Nations**, General Assembly, A/RES/42/187, 1987.
- [38] Gloy, K.: **Das Verständnis der Natur. Die Geschichte des ganzheitlichen Denkens**, München, Beck, 1996, Band 2, S. 164.
- [39] Schweizerischer Bundesrat: **Strategie Nachhaltige Entwicklung: Leitlinien und Aktionsplan 2008–2011**, Bericht vom 16. April 2008, Bern, 2008.
- [40] Bundesamt für Raumentwicklung ARE: **Nachhaltigkeitsbeurteilung. Leitfaden für Bundesstellen und weitere Interessierte**, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern, 2008.
- [41] Regierungsrat des Kanton Bern: **Energiestrategie 2006 des Kanton Bern**, Beschlossen vom Regierungsrat am 5. Juli 2006, Bau, Verkehrs- und Energiedirektion Kantons Bern BVE; Amt für Umweltkoordination und Energie, Bern, 2008.
- [42] Millennium Ecosystem Assessment: **Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis**, Resources Institute. World Resources Institute, Washington D.C., 2005.
- [43] de Groot, R.; Wilson, M. A.; Boumas, R. M. J.: **A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services**, in: Ecological Economics, 2002, Jg. 41, H. 3, S. 393–408.
- [44] Constanza, R.: **Ecosystem services: Multiple classification systems are needed**, in: Biological Conservation, 2008, Jg. 141, H. 2, S. 350–352.
- [45] Swetnam, R. D.; Fisher, B.; Mbilinyi, B. P.; Munishi, P. K. T.; Willcock, S.; Ricketts, T.; Mwakalila, S.: **Mapping socio-economic scenarios of land cover change: A GIS method to enable ecosystem service modelling**, in: Journal of Environmental Management, 2011, H. 92, S. 563–573.
- [46] Constanza, R. et al: **The value of the world's ecosystem services and natural capital**, in: Nature, 1997, H. 387, S. 253–260.
- [47] BAFU (2009): **Datenbank Ökomorphologie Stufe F**, Kurzdokumentation, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2009.
- [48] AWA/GBL: **OEKOMORF Ökomorphologie der Fliessgewässer Produktebeschreibung Stufe: J-I**, AWA/GBL Kanton Bern, Bern, 2011.
- [49] Zeh-Weissmann, H.; Könitzer, Ch; Bertiller, A.: **Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie). Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung**, Bern, April 2009, Umwelt-Zustand, Nr. 0926.

- [50] Baumann, P.; Langhans D., S.: *Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Synthese der Beurteilungen auf Stufe F (flächendeckend)*, Entwurf, Bundesamt für Umwelt BAFU, Umwelt-Vollzug, Bern, 2010.
- [51] swisstopo: *Gewässernetz der Schweiz (GWN25)*, Massstab 1:25.000, Geodaten (c) swisstopo, Bern, 2007.
- [52] Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft: *Verordnung über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte (Wasserrechtsverordnung)*, WRV, 2000, SR 721.801, vom 12.09.2006.
- [53] Zeh, Markus: *OEKOMORF_OEM Kt BE*, Bern, Mail an Carol Hemund, Bern, 25.01.2010.
- [54] swisstopo: *VECTOR 25 Das digitale Landschaftsmodell der Schweiz*, Produktinformation, Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern, 2007, Seite 17.
- [55] BAFU: *Strukturierung und Adressierung des Gewässernetzes 1:25'000 nach Modell gwn25-07*, Stand 2005/06, Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wasser, Bern, 2009.
- [56] BWG: *Hochwasserschutz an Fliessgewässern*, Wegleitung des BWG, BAFU, ARE und BLW, Bern, 2001, Seite 19.
- [57] Winter, T.: *Fliessgewässer naturnah pflegen und aufwerten*, Dossier & Praktischer Leitfaden, in: Thema Umwelt - Pusch, 2011, H. 1, S. 18–21.
- [58] König, F.: *Methode zur hydromorphologischen und soziokulturellen Bewertung urbaner Fliessgewässer*, Dissertation, Karlsruhe, 2011.
- [59] Vester, F.; Hesler, A. v.: *Sensitivitätsmodell. Ökologie und Planung in Verdichtungsgebieten*, Forschungsbericht 80-101 040 34, Umlandverband Frankfurt, 2. Aufl., Frankfurt am Main, 1988.
- [60] Messerli, P.: *Use of Sensitivity Analysis to Evaluate Key Factors for Improving Slash-and-Burn Cultivation Systems on the Eastern Escarpment of Madagascar*, in: Mountain Research and Development, 2000, Jg. Vol 20, H. No 1, S. 32-41.
- [61] Wehse, H.: *Methodik zur Bewertung und Klassierung der Nutzungseignung von Fliessgewässerstrecken. Grundlagen für die räumliche Prioritätensetzung bei der Wasserkraftnutzung und dem Schutz von Gewässern*, Schlussbericht, BFE, BAFU, Wasseragenda 21, Bern, 2009.

7 Anhang

7.1 Rangliste

Tabelle 6 Rangierung aller 125 Kombinationen der Ökosystemleistungen ABC

Rang	ABC	Rang	ABC	Rang	ABC	Rang	ABC	Rang	ABC
1	115	26	245	51	355	76	242	101	251
2	114	27	425	52	535	77	241	102	524
3	113	28	345	53	455	78	423	103	523
4	112	29	435	54	545	79	422	104	522
5	125	30	445	55	555	80	421	105	521
6	124	31	111	56	121	81	343	106	354
7	123	32	122	57	211	82	342	107	353
8	215	33	212	58	221	83	341	108	352
9	214	34	222	59	132	84	433	109	351
10	213	35	133	60	131	85	432	110	534
11	225	36	313	61	312	86	431	111	533
12	224	37	233	62	311	87	443	112	532
13	223	38	323	63	232	88	442	113	531
14	135	39	333	64	231	89	441	114	454
15	134	40	144	65	322	90	154	115	453
16	315	41	414	66	321	91	153	116	452
17	314	42	244	67	332	92	152	117	451
18	235	43	424	68	331	93	151	118	544
19	234	44	344	69	143	94	514	119	543
20	325	45	434	70	142	95	513	120	542
21	324	46	444	71	141	96	512	121	541
22	335	47	155	72	413	97	511	122	554
23	334	48	515	73	412	98	254	123	553
24	145	49	255	74	411	99	253	124	552
25	415	50	525	75	243	100	252	125	551