



Heft 57, 2017

WSL Berichte

ISSN 2296-3456

Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung

**Ergebnisse des Schweizerischen
Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET**

Oliver Thees, Vanessa Burg, Matthias Erni,
Gillianne Bowman, Renato Lemm



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
CH-8903 Birmensdorf

Heft 57, 2017

WSL Berichte

ISSN 2296-3456

Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung

**Ergebnisse des Schweizerischen
Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET**

Oliver Thees, Vanessa Burg, Matthias Erni,
Gillianne Bowman, Renato Lemm

Herausgeberin

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
CH-8903 Birmensdorf

Impressum

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe
Prof. Dr. Konrad Steffen, Direktor WSL

Verantwortlich für dieses Heft
Dr. Marco Ferretti, Leiter Forschungseinheit Waldressourcen und Management
Dr. Oliver Thees, Gruppenleiter Forstliche Produktionssysteme

Kontakt

Dr. Oliver Thees, Vanessa Burg, Matthias Erni, Dr. Gillianne Bowman, Dr. Renato Lemm
Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

Review

Prof. Dr. Urs Baier (ZHAW), Michael Gautschi (GEO Partner AG), Jean-Louis Hersener (Ingenieurbüro HERSENER), Cyril Inderbitzin (arv), Dr. Marcus Lingenfelder (Universität Freiburg im Breisgau), Yves Membrez (EREP SA), Prof. Dr. Eberhard Morgenroth (ETH Zürich, Eawag), Werner Riegger (BAFU), Dr. Bernhard Streit (HAFL), Ruedi Taverna (GEO Partner AG), Michael Tobler (Binningen, BL), Dr. Carl Vadenbo (ETH Zürich).

Zitierung

Thees, O.; Burg, V.; Erni, M.; Bowman, G.; Lemm, R., 2017: Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET. WSL Ber. 57: 299 S.

PDF Download www.wsl.ch/Publikationen/pdf/16618.pdf

ISSN 2296-3448 (Print)

ISSN 2296-3456 (Online)

Unser Dank gilt

- dem Swiss Competence Center for Energy Research – Biomass for Swiss Energy Future (SCCER BIOSWEET) für die wertvolle Zusammenarbeit im Netzwerk der Schweizer Biomasse-Energieforschung,
- der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) für die Finanzierung von Mitarbeitenden an der vorliegenden Potenzialstudie,
- den oben genannten Reviewern für ihre konstruktive Kritik,
- der WSL für ihre Unterstützung durch das Forschungsprogramm Energy Change Impact, und namentlich Dr. Golo Stadelmann für die Berechnung der Rohdaten für das Waldholz, Martin Moritz und Fritz Frutig für das Lektorat und Sandra Gurzeler für ihre Hilfe beim Layout und der Drucklegung.



Die Bilder auf dem Deckblatt zeigen Beispiele verholzter und nicht verholzter Biomassen:

Flurholz, Matthias Erni (WSL)

Waldholz, Oliver Thees (WSL)

Altholz, Doris Hölling (WSL)

Grüngut aus Haushalt und Landschaft, Vanessa Burg (WSL)

Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung, Vanessa Burg (WSL)

Klärschlamm aus zentralen Abwasser Reinigungen, Vanessa Burg (WSL)

Organischer Anteil aus Hauskehricht, Vanessa Burg (WSL)

Vorwort

Der vorliegende WSL-Bericht liefert eine grosse Fülle von Daten und Informationen zum Biomasse-Potenzial in der Schweiz, das einer energetischen Nutzung zugeführt werden kann. Die detailliert erhobenen und berechneten Zahlen stellen eine wertvolle Informationsquelle für Forschung, Politik und Wirtschaft dar und ermöglichen die Einordnung des Beitrags der Biomasse zur Energiestrategie 2050 in der Schweiz.

Wenn wir lediglich die Zahlen aus den ermittelten Biomassepotenzialen ins Verhältnis zum Gesamtenergiebedarf setzen, mag das Ergebnis ernüchternd wirken und auch wenn man das energetische Biomassepotenzial mit anderen erneuerbaren Energiequellen wie Sonne und Wind vergleicht, sind die Beiträge bescheiden. Aber das wäre eine zu enge Betrachtungsweise, die die besondere Stellung der Biomasse im Konzert der erneuerbaren Energien nicht ausreichend würdigt. Aristoteles schrieb bereits vor mehr als 2000 Jahren: «Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.» und dieser Satz trifft insbesondere auf die Biomassenutzung zu. Biomasse muss uns in einem zukünftigen erneuerbaren Energiesystem helfen, Zeiten fehlender Sonneneinstrahlung und von Windstille zu überbrücken. Biomasse hat eben über ihren reinen Energiebeitrag hinaus einen Mehrwert für die saisonale Speicherung von Energie, aber dieser Mehrwert wird nur bei der Betrachtung des ganzen Energiesystems ersichtlich.

Dass «das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile», trifft auch auf die möglichen energetischen Nutzungspfade der Biomasse zu, für die ein systemischer Ansatz besonders wichtig ist. Je nachdem, ob wir Biomasse verbrennen, verstromen, in Biogas oder einen flüssigen Treibstoff umwandeln, kann die Nachfrage nach verschiedenen Energieformen in unserer Gesellschaft bedient werden, aber die mögliche Verringerung der CO₂-Emissionen im Gesamtenergiesystem kann sehr unterschiedlich sein. Und schliesslich soll die Biomasse nicht nur zu unserer Energieversorgung beitragen, sondern möglichst auch wertvollen Humus und Nährstoffe liefern oder einen Lebensraum für Tiere bieten, falls sie in der Natur verbleibt. Diese Aspekte müssen bei der energetischen Biomassenutzung berücksichtigt werden, was uns im Idealfall ganz im Sinne von Aristoteles zu einer ganzheitlichen Betrachtung der Biomassenutzung führt, in der alle Stoffkreisläufe geschlossen sind. Der vorliegende WSL-Bericht zu den Biomassepotenzialen der Schweiz trägt dieser Anforderung Rechnung, indem besonderer Wert auf die Bestimmung der nachhaltig nutzbaren Potenziale gelegt wird.

Mit dem vorliegenden Bericht hat die WSL ihre etablierte Kompetenz beim Erheben des Potenzials verholzter Biomasse im Wald auf alle anderen wichtigen Biomassen, auch auf die nicht verholzten erweitert. Die Arbeiten dazu wurden durch das Kompetenzzentrum SCCER BIOSWEET finanziert, das die Energiewende 2050 des Bundes durch angewandte Forschung im Bereich Bioenergie unterstützt. Die Forschung und Entwicklung im Kompetenzzentrum wird von den Potenzialstudien sehr profitieren: Mit Hilfe der bestimmten Biomassepotenziale können wir nun besser die passenden Technologien für die Bioenergiegewinnung in der Schweiz auswählen und deren Beiträge zur Energiewende 2050 genauer bestimmen.

Ich wünsche nun Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, viele gewinnbringende Einsichten – sei es beim Studium von Teilen des Berichts oder der Betrachtung des Ganzen mit Hinblick auf eine nachhaltige energetische Biomassenutzung in der Schweiz.

Prof. Dr. Oliver Kröcher
Leiter des SCCER BIOSWEET
Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen

Inhaltsverzeichnis

Gesamtschau	7
Overview	15
Vue d'ensemble.....	23
Verholzte Biomassen.....	31
Waldholz	33
Flurholz	75
Restholz.....	103
Altholz	127
Nicht verholzte Biomassen.....	151
Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung.....	153
Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau	181
Organischer Anteil Hauskehricht	203
Grüngut aus Haushalt und Landschaft.....	229
Organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe	251
Klärschlamm aus zentralen Abwasserreinigungsanlagen.....	279

Energieeinheiten und Umrechnungen

Dezimalfaktoren

Bezeichnung	Faktor	
Kilo (k)	10^3	1 000
Mega (M)	10^6	1 000 000
Giga (G)	10^9	1 000 000 000
Tera (T)	10^{12}	1 000 000 000 000
Peta (P)	10^{15}	1 000 000 000 000 000

Masseinheiten

Grösse	Masseinheit	Zeichen	Umrechnung
Leistung	Watt	[W]	
Energie	Joule	[J]	
	Wattsekunde Kilowattstunde	[Ws] [kWh]	1 Ws = 1 J 1 kWh = 3 600 000 J = 3.6 MJ

Umrechnungsfaktoren

von:	zu:	J	TJ	kWh	GWh
J		1	1×10^{-12}	0.2778×10^{-6}	0.2778×10^{-12}
TJ		1×10^{12}	1	0.2778×10^6	0.2778
kWh		3.6×10^6	3.6×10^{-6}	1	1×10^{-6}
GWh		3.6×10^{12}	3.6	1×10^6	1

Gesamtschau

Die 2013 in der Schweiz begründeten Swiss Competence Center for Energy Research (SCCER) suchen Lösungen für die technischen, gesellschaftlichen und politischen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Energiewende. In sieben Aktionsfeldern wurden acht SCCER gegründet und vernetzt. Sie betreiben die für die wirksame Umsetzung der Energiestrategie 2050 notwendige Forschung und Entwicklung und stellen den Transfer der Forschungsresultate in die Praxis sicher. Das im Aktionsfeld Biomasse tätige SCCER Biosweet (Biomass for Swiss Energy Future) fokussiert auf Technologien zur Umwandlung von Biomasse in Treibstoffe sowie auf die Herstellung von Elektrizität und Wärme aus Biomasse. Es gilt, effiziente Nutzungstechnologien zu entwickeln und in die Praxis umzusetzen und gleichzeitig Biomasse so einzusetzen, dass die grösstmögliche Einsparung an nicht erneuerbaren Ressourcen bei kleinstmöglicher Umweltbelastung erreicht wird. Bis 2050 soll Biomasse, so die Vision von SCCER Biosweet, 100 Petajoule pro Jahr zur Schweizer Energieversorgung beitragen (Zum Vergleich: Im Jahr 2014 betrug der gesamte Energie-Bruttoverbrauch der Schweiz 1108 PJ [1]).

In diesem Kontext ist es das Ziel der vorliegenden Studie der Eidg. Forschungsanstalt WSL, die Potenziale der wichtigen Biomasseressourcen der Schweiz zu quantifizieren und zu lokalisieren. Im Mittelpunkt steht dabei die Analyse der Ressourcen, vor allem im Hinblick auf ihre nachhaltige Verfügbarkeit. Die Ergebnisse dienen im SCCER Biosweet (i) als Grundlage für die Optimierung der Umwandlungsprozesse im Rahmen der Technologieentwicklung und (ii) zur Identifizierung erfolgversprechender Biomassenutzungspfade und der optimalen Standorte für die Produktion von Energie aus Biomasse. Darüber hinaus ist es der Zweck der Untersuchung, der Forschung, Wirtschaft und Politik eine umfassende und detaillierte Grundlage über die Schweizer Biomassepotenziale zur Verfügung zu stellen.

Mit einem methodisch gleichen Ansatz wurde sowohl die verholzte, als auch die nicht verholzte Biomasse untersucht. Erfasst wurden zehn Biomasse-Kategorien (*Abbildung 1*): das Waldholz, das Flurholz, das Restholz und das Altholz sowie der Hofdünger, die landwirtschaftlichen Nebenprodukte, die organischen Anteile im Kehricht, das Grüngut der Haushalte und der Landschaftspflege, die biogenen Abfälle aus Gewerbe/Industrie und der Klärschlamm. Nicht untersucht wurden Energieholzplantagen auf landwirtschaftlichen Böden und Energiepflanzen, sogenannte Energy crops.

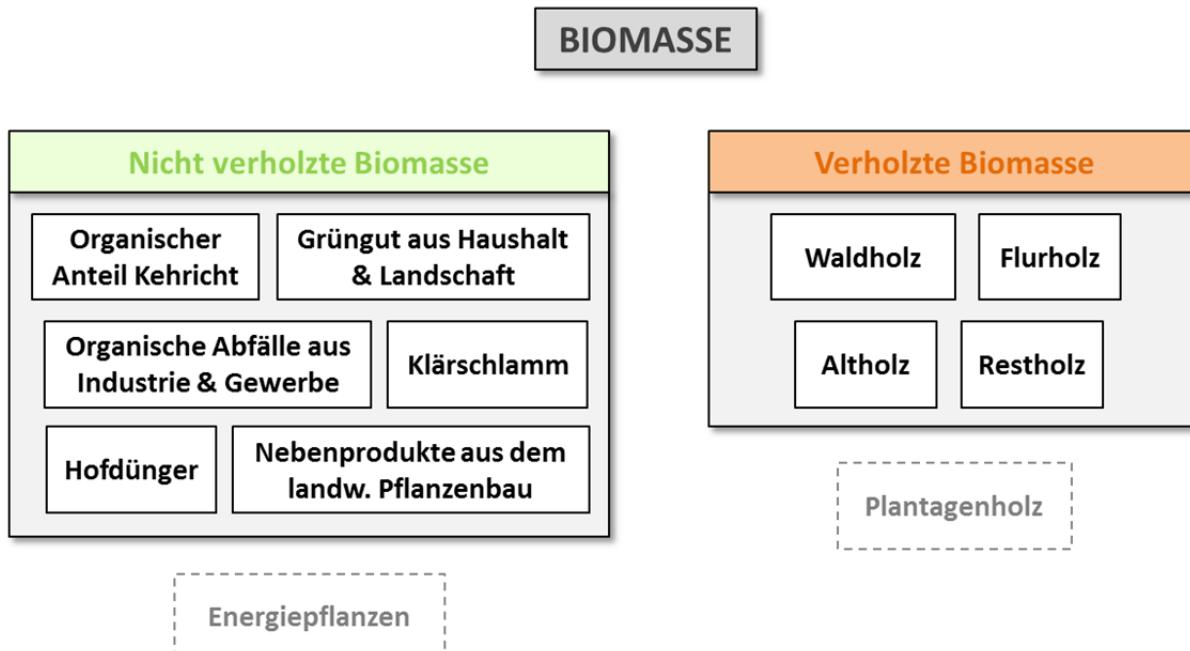


Abbildung: 1: Biomassekategorien (Energiepflanzen und Plantagenholz wurden nicht untersucht).

Für alle Kategorien von Biomasse wurden das theoretische Potenzial, das nachhaltige Potenzial, das bereits genutzte und das zusätzliche Potenzial zum aktuellen Zeitpunkt bestimmt (*Abbildung 2*). Die einheitliche Abgrenzung und der gleiche Erfassungszeitpunkt gewährleisten die Vergleichbarkeit der Potenziale und damit ihre gemeinsame Betrachtung. Durch eine Analyse der räumlichen Verteilung ist es möglich, die regionalen Potenziale zu bestimmen. Das theoretische Potenzial beinhaltet die im Inland erzeugte Biomasse, die maximal genutzt werden könnte. Aus diesem ergibt sich nach Abzug von ökologischen und ökonomischen sowie

rechtlichen und politischen Restriktionen das nachhaltige Potenzial. Das zusätzliche bzw. verbleibende Potenzial errechnet sich, indem man die bereits energetisch genutzte Biomasse vom nachhaltigen Potenzial abzieht. Die konkrete Abgrenzung der Potenzialkategorien bei einer bestimmten Biomasse wird transparent und nachvollziehbar dargelegt. Für jede einzelne Biomasseresource werden die ermittelten Potenziale (i) als physische Mengen in Tonnen Frisch- und Trockensubstanz oder in Kubikmetern sowie (ii) als Energiemengen in Primärenergie (Joule) und wo möglich als Biomethanertrag angegeben.

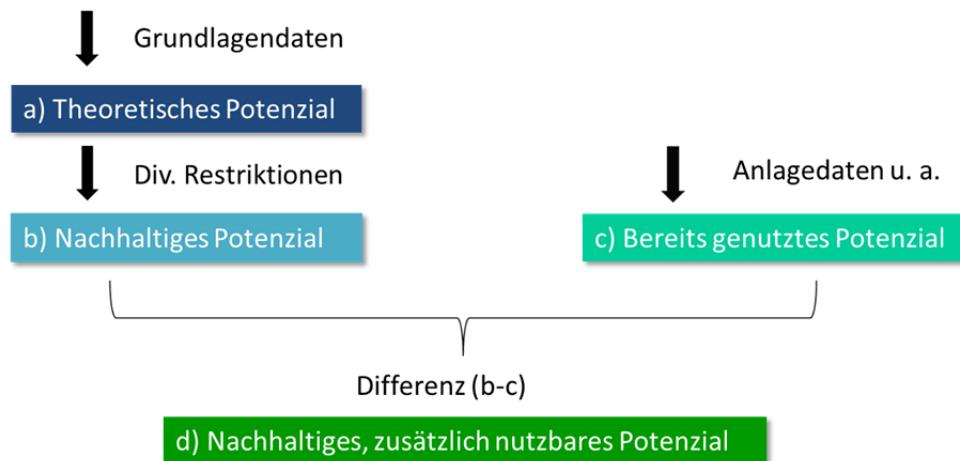


Abbildung 2: Potenzialebenen.

Für die Ermittlung der Potenziale wurden – soweit brauchbar und zugänglich – vorhandene Grundlagen herangezogen. Beim Altholz wurde eine komplett neue Erhebung notwendig.

Bei Grüngut, Kehricht und den organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe erfolgten ergänzende Erhebungen. Bei Hofdünger, landwirtschaftlichen Nebenprodukten, Klärschlamm, Wald-, Flur- und Restholz wurden neue Berechnungen durchgeführt. Im Rahmen des Netzwerkes des SCCER Biosweet unterstützten Spezialisten die Potenzialanalysen.

Der vorliegende WSL-Gesamtbericht ist so aufgebaut, dass für jede untersuchte Biomasse ein Teilbericht vorliegt, in dem die allgemeine Situation von Aufkommen und Verwendung, das methodische Vorgehen bei der Herleitung der Potenziale und insbesondere ihre Abgrenzung und die verwendeten Datenquellen dargelegt werden. Es folgen jeweils die detaillierten Ergebnisse für die einzelnen Potenzialkategorien und ihre räumliche Verteilung. Eine Diskussion und Folgerungen schliessen jeden Teilbericht ab.

Bei der Verwendung der Ergebnisse ist Sorgfalt geboten. (i) Grundsätzlich ist daran zu erinnern, dass die Potenziale als Primärenergie angegeben sind. Die Primärenergie stellt die verfügbare Energie dar, die maximal in einer Ressource enthalten ist. Die Wirkungsgrade der Umwandlungstechnologien sind also noch nicht berücksichtigt, so dass die angegebenen Energiemengen nur teilweise als Endenergie zur Verfügung stehen. (ii) Die tatsächliche Verfügbarkeit der Ressourcen hängt von Markt und Wettbewerb sowie den Technologien und politischen Rahmenbedingungen ab. Diese Situationen können ändern und von denen zum Zeitpunkt der Untersuchung abweichen. (iii) Eine wichtige Voraussetzung bei der Verwendung der Zahlen ist, dass man sich über die Abgrenzung und die Inhalte der betrachteten Biomassapotenziale genau im Klaren ist. Zum Beispiel ist zu beachten, dass eine Addition der theoretischen Potenziale des Waldholzes und des Restholzes zu Doppelzählungen – und damit zu falschen Ergebnissen und Interpretationen – führt. Zum theoretischen Potenzial des energetisch nutzbaren Waldholzes wurde nämlich alles Holz gezählt, das stofflich als Säge- und Industrieholz genutzt wird. Das bedeutet, dass das theoretische Potenzial des Restholzes vollständig im theoretischen Waldholzpotenzial enthalten ist. Auch ist zu berücksichtigen, dass die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit nicht bei allen Biomassen mit der gleichen Differenziertheit und Genaugigkeit wie beim Waldholz ermittelt und berücksichtigt werden konnte. Als Grundlage zur Beurteilung der ökonomischen Nachhaltigkeit erfolgten in allen Landesteilen Kostenschätzungen der Energieholzernte, differenziert nach Geländesituation, Waldbeständen und Ernteverfahren. Außerdem ist bei der ökonomischen Dimension der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen, dass sich diese bei allen Biomassen ausschliesslich auf die Phase der Bereitstellung der Ressource und nicht auf die Phasen ihrer Umwandlung und Nutzung bezieht.

Die Gesamtschau aller 10 Biomassen verdeutlicht Grenzen und Chancen ihrer energetischen Nutzung und beschreibt wichtige Herausforderungen. Die Berechnungsmethoden und Resultate der einzelnen Biomassekategorien werden in den Teilberichten detailliert vorgestellt.

Zusammenfassend zeigt *Abbildung 3* die verschiedenen Potenziale der jährlich anfallenden Biomasse in der Schweiz, umgerechnet in Primärenergie (PJ). Die verschiedenfarbigen Quadrate stellen jeweils das theoretische, das nachhaltige und das zusätzlich nutzbare Potenzial der verschiedenen Biomassen dar. Der Flächeninhalt der Quadrate ist proportional zu den Primärenergiemengen, die sie darstellen.

Gemäss unseren Berechnungen beträgt das theoretische Potenzial von Schweizer Biomasse total 209 PJ Primärenergie pro Jahr, wovon etwa die Hälfte aus Waldholz (108 PJ) und ein Viertel aus Hofdünger (49 PJ) stammt. Diese theoretisch verfügbare Energiemenge aus Biomasse entspricht umgerechnet etwa dem Energieinhalt von 4.8 Millionen Tonnen Rohöl oder rund 19% des totalen Energie-Bruttoverbrauchs der Schweiz (1108 PJ) [1].

Primärenergie (PJ pro Jahr)

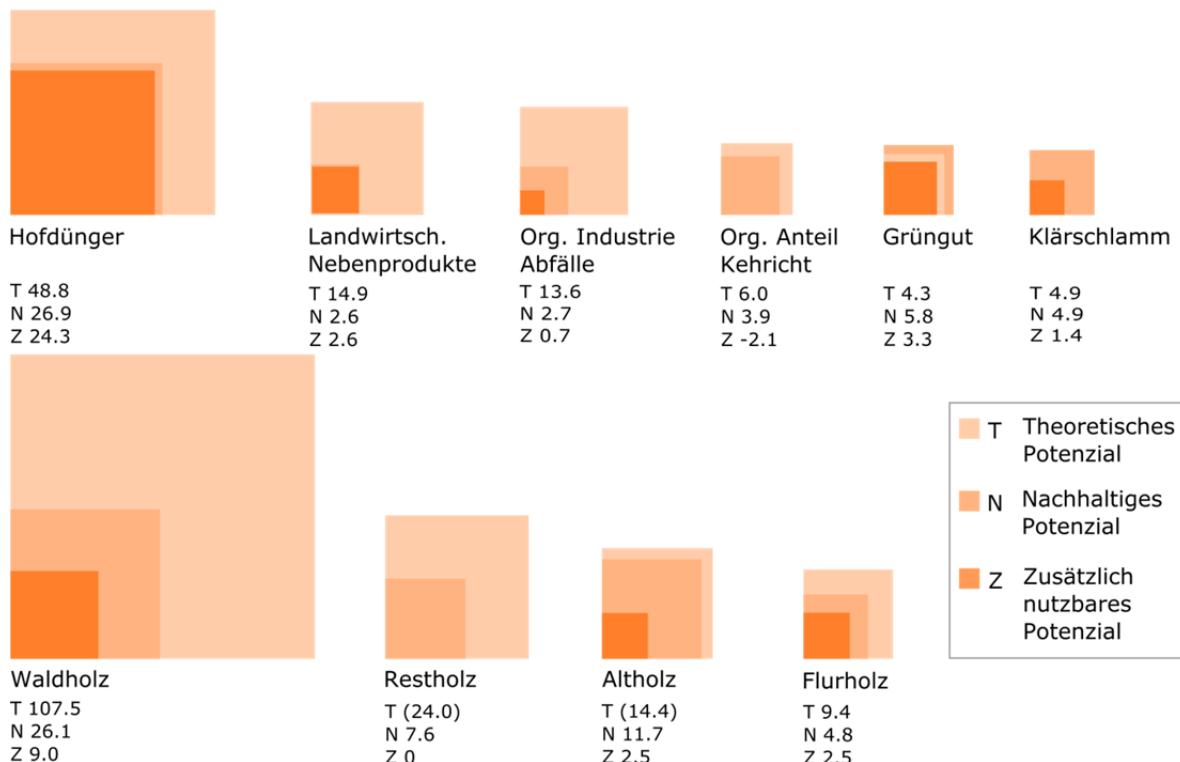


Abbildung 3: Primärenergiepotenziale aller 10 Biomassen in Petajoule (PJ) pro Jahr.

Hauptsächliche Grenzen der nachhaltigen Verfügbarkeit für eine energetische Nutzung sind ökologische oder ökonomisch-technische Restriktionen. Werden sie berücksichtigt, würde gemäss unseren Betrachtungen, jährlich etwa die Hälfte des theoretischen Potenzials für eine energetische Nutzung nachhaltig zur Verfügung stehen (97 PJ). Dabei entfallen auf die verholzte Biomasse 50 PJ und auf die nicht verholzte 47 PJ. Die nachhaltigen Potenziale von Waldholz und Hofdünger tragen zu nahezu gleichen Teilen mit 26 PJ beziehungsweise 27 PJ bei. Zusätzlich haben die Biomassekategorien aus Abfall (Altholz, organische Anteile Kehricht, Grüngut aus Haushalt und Landschaft, organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe, Klärschlamm und Restholz) zusammen ein Potenzial von jährlich 39 PJ.

Die heute bereits energetisch genutzte Menge des Biomassepotenzials beträgt etwa 53 PJ pro Jahr. Zusätzlich verfügbar sind gemäss unseren Berechnungen in der Schweiz jährlich rund 44 PJ Biomasse für eine energetische Nutzung, was ca. 4% des Schweizer Bruttoenergieverbrauchs entsprechen würde. Die Biomasse mit dem grössten zusätzlich nutzbaren Potenzial ist Hofdünger mit 24 PJ, gefolgt von Waldholz mit 9 PJ. Diese zusätzliche Menge könnte zwar ressourcenseitig nachhaltig bereitgestellt werden, wird jedoch für die heutige energetische Nutzung nicht verwendet. Hierfür verantwortlich sind insbesondere ökonomische Gründe bei der Ressourcenbereitstellung oder Energieumwandlung.

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung des theoretischen Potenzials aller 10 Biomassen auf kantonaler Ebene (in Primärenergie PJ). Der Kanton Bern weist mit 36.9 PJ das grösste theoretische Potenzial auf, gefolgt von den Kantonen Waadt (20.7 PJ) und Zürich (17.6 PJ). Dies ist sowohl auf die Kantonsgrösse als auch auf die geographischen Gegebenheiten zurückzuführen.

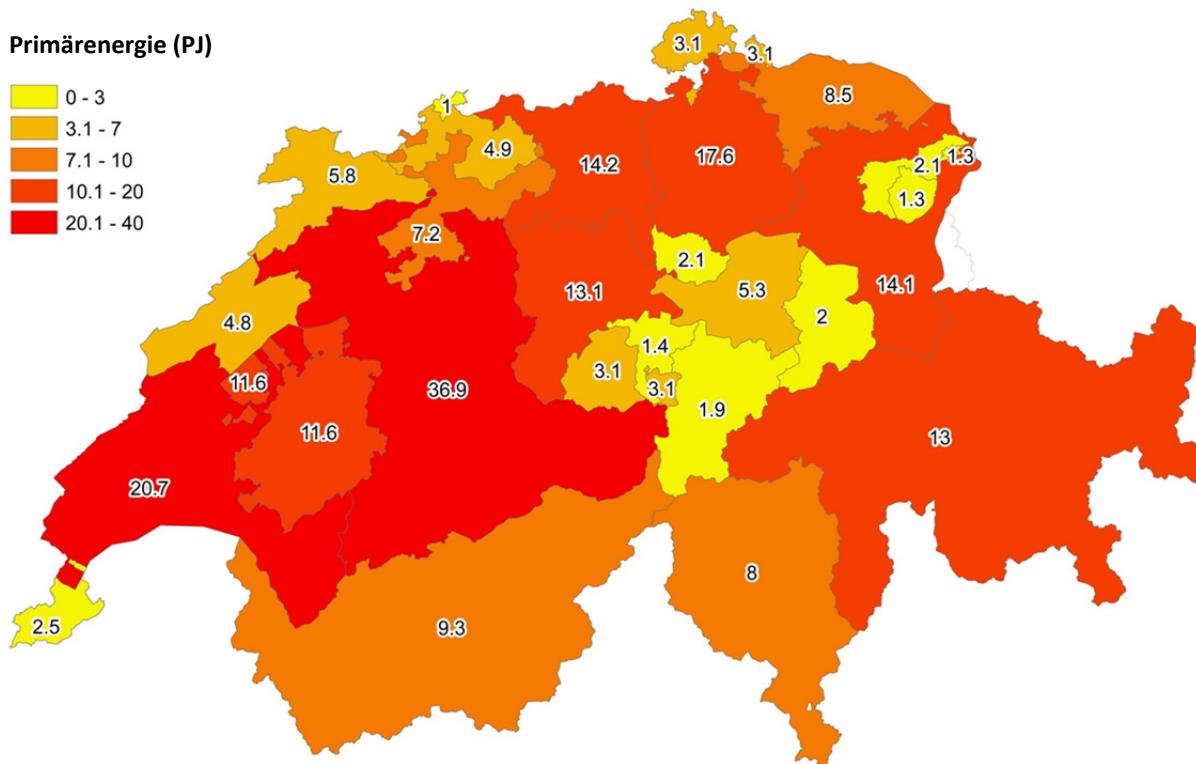


Abbildung 4: Räumliche Verteilung des theoretischen Primärenergiepotenzias aller 10 Biomassen nach Kantonen in Petajoule (PJ) pro Jahr.

Unsere Ergebnisse sind vergleichbar mit den gesamtschweizerischen Resultaten von Steubing [2], liegen jedoch etwa 15% höher und können räumlich differenzierter dargestellt werden. Er hat 2010 ein nachhaltiges Potenzial von 82 PJ und ein zusätzliches Potenzial von 39 PJ ermittelt. Der Unterschied kann durch unser umfassenderes und detaillierteres Vorgehen erklärt werden.

In der Prognos-Studie [3] weisen Kirchner et al. ein «ökologisches» Potenzial von 123 PJ für das Jahr 2003 aus. Davon entfallen 45 PJ auf die «holzige Biomasse aus Wald, Feld und Hecken». Diese Zahlen stimmen mit unseren aktuellen Resultaten recht gut überein. Für das Jahr 2030 prognostizieren Kirchner et al. für diese Kategorie allerdings 111 PJ, die als realisierbares Potenzial bezeichnet werden. Dies stellt eine sehr grosse Energiemenge dar, welche in etwa unserem theoretischen Potenzial (aus Wald- und Flurholz) entspricht. Sie lässt sich aber aus unserer Sicht kaum ausschliesslich für energetische Zwecke nachhaltig nutzen, weil sie keine stoffliche Verwendung des Holzes mehr zulässt (vgl. Teilbericht Waldholz). Da diese Zahlen als Basis für die Ziele der schweizerischen Energiestrategie 2050 verwendet wurden, ist es empfehlenswert, ihre Verlässlichkeit und Belastbarkeit zu überprüfen. Diese Unterschiede zeigen, dass die Potenzialdefinitionen und die den Potenzialermittlungen zugrunde liegenden Annahmen entscheidend sind und zu erheblichen Unterschieden der Resultate führen können. Die Potenziale und ihre Nutzung hängen von mehreren Einflussgrössen ab, die im Zeitablauf ändern können. Auch kurzfristig wirksame Einflüsse, wie beispielsweise der Holzmarkt üben einen starken Einfluss aus. Die Potenziale sind daher keine stabilen Grössen.

Abbildung 5 zeigt die grosse Spanne der Kosten der Ressourcen für die energetische Verwendung. Die Angaben beziehen sich auf das nachhaltige Potenzial der verholzten und der nicht-verholzten Biomassen. Für jede Biomasse wird gezeigt, welche Primärenergiemenge zu welchen Kosten verfügbar ist. Der grösste Teil der verholzten Biomasse ist teurer als die nicht-verholzte, und mit zunehmender Ausschöpfung der Ressourcen steigen die Kosten. Teilmengen einzelner Biomassen sind – meist aus Gründen der Bereitstellung – zu unterschiedlichen Kosten verfügbar. Dies gilt zum Beispiel für das Laubholz aus dem Wald. Für die Haushaltsabfälle und auch für Teile des Altholzes ergeben sich negative Kosten, weil für ihre Entsorgung Gebühren zu zahlen sind.

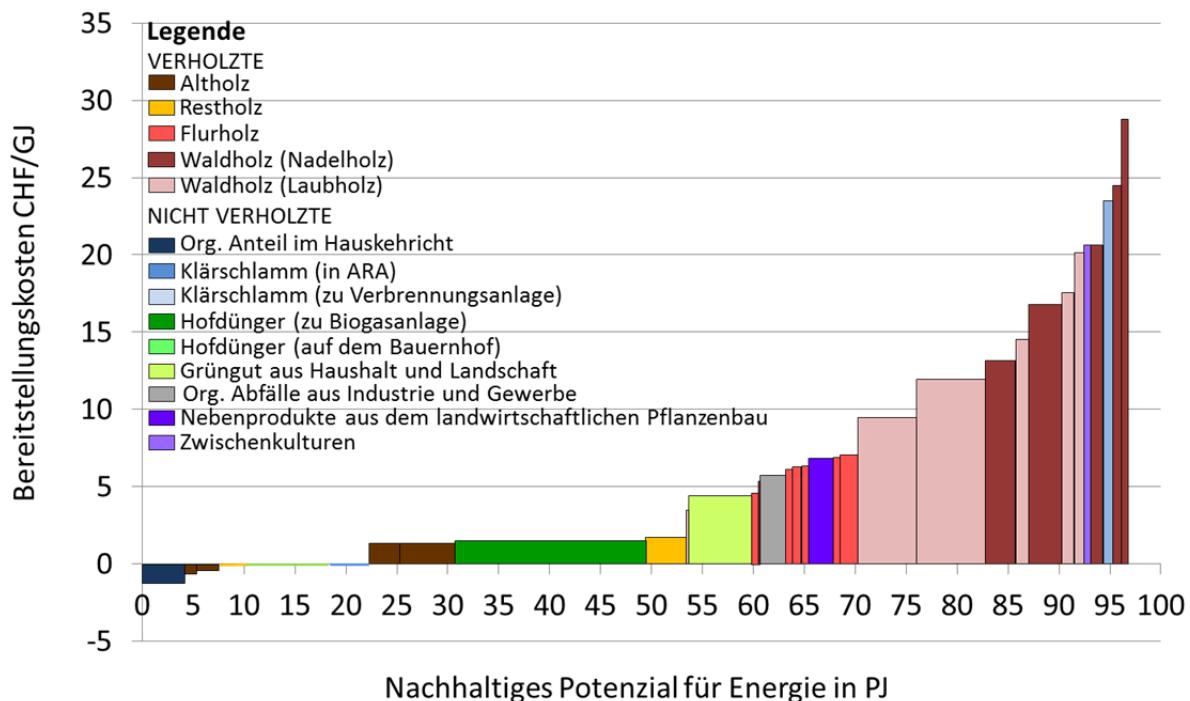


Abbildung 5: Kosten der nachhaltigen Primärenergiepotenziale aller 10 Biomassen in Franken pro Gigajoule.

Die Vision von SCCER Biosweet, bis 2050 mit Biomasse 100 Petajoule pro Jahr zur Schweizer Energieversorgung beizutragen, erscheint bezüglich der im Inland nachhaltig zur Verfügung stehenden Ressourcen her gesehen realisierbar. Das nachhaltige Potenzial liegt in dieser Größenordnung. Es gilt daher, die Biomasse-Energiepotenziale möglichst vollständig, effizient und umweltschonend zu nutzen und hierzu die am besten geeigneten Technologien zu identifizieren, zu entwickeln und zu nutzen sowie die geeigneten Rahmenbedingungen zu schaffen. Dabei ist die gesamte Energieumwandlungskette in Betracht zu ziehen. In der vorliegenden Studie haben wir uns auf die Ressourcen und ihre Bereitstellung beschränkt. In der nächsten Phase von SCCER Biosweet (2017-2020) werden die kompletten Umwandlungs- und Nutzungspfade der Biomassen untersucht.

Tabelle 1 gibt ergänzend einen detaillierteren Überblick zu den ermittelten Potenzialen der jährlich anfallenden heimischen Biomasse. Dabei wird zwischen Frischsubstanz, Trockensubstanz und Primärenergie unterschieden. Die Darstellung der Ressourcenmengen in verschiedenen Einheiten ermöglicht es, grundsätzliche Charakteristiken zu veranschaulichen. Zum Beispiel ist der Unterschied zwischen Frisch- und Trockensubstanz bei der nicht-verholzten Biomasse im Vergleich zur verholzten relativ hoch. Die genauen Zahlen, weitere Detaillierungen sowie Ergebnisse in anderen Einheiten (Kubikmeter, Biomethanertrag) sind online der DOI-Tabelle <http://doi.org/10.16904/18> zu entnehmen (SCCER Biosweet).

Tabelle 1: Biomassepotenziale der Schweiz für eine energetische Nutzung

	Biomasse	Frischsubstanz (Millionen Tonnen FS)	Trockensubstanz (Millionen Tonnen TS)	Primärenergie- inhalt PJ
Theoretisches Potenzial	Waldenergieholz	13.5	7.3	107.5
	Flurholz	1.2	0.6	9.4
	Restholz	(2.5)*	(1.5)*	(24.0)*
	Altholz	(1.0)*	(0.8)*	(14.4)*
	Hofdünger aus der landw. Tierhaltung	24.2	3.1	48.8
	Nebenprodukte aus dem Pflanzenbau	2.8	0.8	14.9
	Org. Anteil im Hauskehricht	0.8	0.4	6.0
	Grüngut aus Haushalt & Landschaft	0.8	0.3	4.3
	Org. Abfälle aus Ind. & Gew.	2.2	1.0	13.6
	Klärschlamm aus zentralen ARA**	8.7	0.3	4.9
Total		54.1	13.8	209.4
Nachhaltiges Potenzial	Waldenergieholz	3.3	1.8	26.1
	Flurholz	0.6	0.3	4.8
	Restholz	0.8	0.5	7.6
	Altholz	0.8	0.7	11.7
	Hofdünger aus der landw. Tierhaltung	14.0	1.7	26.9
	Nebenprodukte aus dem Pflanzenbau	0.2	0.1	2.6
	Org. Anteil im Hauskehricht	0.4	0.2	3.9
	Grüngut aus Haushalt & Landschaft	1.1	0.4	5.8
	Org. Abfälle aus Ind. & Gew.	0.7	0.2	2.7
	Klärschlamm aus zentralen ARA**	8.7	0.3	4.9
Total		30.5	6.3	97.0
Bereits energetisch genutzt	Waldenergieholz	2.2	1.2	17.2
	Flurholz	0.3	0.1	2.3
	Restholz	0.7	0.5	7.8
	Altholz	0.6	0.5	9.2
	Hofdünger aus der landw. Tierhaltung	1.3	0.2	2.6
	Nebenprodukte aus dem Pflanzenbau	0	0	0.0
	Org. Anteil im Hauskehricht	0.8	0.4	6.0
	Grüngut aus Haushalt & Landschaft	0.4	0.2	2.2
	Org. Abfälle aus Ind. & Gew.	0.5	0.2	2.0
	Klärschlamm aus zentralen ARA **	6.2	0.2	3.4
Total		13.1	3.4	52.8
Zusätzlich nutzbares Potenzial	Waldenergieholz	1.1	0.6	8.9
	Flurholz	0.3	0.2	2.5
	Restholz	0.0	0.0	-0.2
	Altholz	0.2	0.1	2.5
	Hofdünger aus der landw. Tierhaltung	12.6	1.5	24.3
	Nebenprodukte aus dem Pflanzenbau	0.2	0.1	2.6
	Org. Anteil im Hauskehricht	-0.4	-0.1	-2.1
	Grüngut aus Haushalt & Landschaft	0.7	0.2	3.5
	Org. Abfälle aus Ind. & Gew.	0.2	0.1	0.7
	Klärschlamm aus zentralen ARA **	2.5	0.1	1.4
Total		17.4	2.8	44.2

(*) Das Restholz und das Altholz haben ihren Ursprung im Waldholz und Flurholz. Um das gesamte theoretische Potenzial von verholzter Biomasse zu berechnen, kann deswegen das theoretische Potenzial von Restholz und Altholz nicht zum theoretische Potenzial von Waldenergieholz und Flurholz addiert werden, da es sonst doppelt gezählt würde. Mehr als das theoretischen Potenzial von Waldenergieholz und Flurholz kann nicht genutzt werden.

(**) ARA: Abwasserreinigungsanlage

Literatur

- [1] BFE, 2015: *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014*.
- [2] Steubing B.; Zah R; Waeger P.; Ludwig C., 2010: Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential. *Renew Sust Energ Rev.* 2010;14(8):2256-2265.
- [3] Kirchner, A.; Bredow, F.; Grebel, T; Hofer, P.; Kemmler, A.; Ley, A.; Piégsa, A. ; Schütz, N.; Strassburg, S.; Struwe, J., 2012: *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000-2050*: 842 S.
- [4] Pauli, P.; Bürgi, P.; Brühlhard, S; Thees, O; Lemm, R.; Rosset, C., 2010: Holz als Rohstoff und Energieträger, Dynamisches Holzmarktmodell und Zukunftsszenarien. *Schlussbericht*: 207 S.

Overview

The Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER), founded in Switzerland in 2013, seek solutions to the technical, social and political challenges posed by the Energy Transition. Eight SCCERs with seven fields of action have been established and interconnected. They carry out the research and development necessary for the effective implementation of Switzerland's Energy Strategy 2050, and ensure the research results are transferred to practitioners. The SCCER with biomass as its field of action is Biosweet (Biomass for Swiss Energy Future). It focuses on technologies to transform biomass into fuels, as well as on the production of renewable electricity and heat from biomass. Efficient applied technologies need to be developed and implemented in practice. Biomass should be used in such a way that the greatest possible reductions in non-renewable resources can be achieved at the least possible cost to the environment. Biomass should, according to SCCER Biosweet's vision, contribute 100 petajoules per year to the Swiss energy supply by 2050. (In comparison, the total gross energy consumption in 2014 in Switzerland was 1108 PJ [1]).

It is in this context that the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL undertook the study presented here to quantify and localise the potential of important biomass resources in Switzerland. The main focus is on the analysis of resources, particularly with regard to their sustainable availability. The results are useful for the SCCER Biosweet as a basis for (i) optimising conversion processes to take into account technological developments, and (ii) identifying promising biomass-use pathways and the best sites for their implementation. The study also aims to make available a comprehensive and detailed information base about the potentials of Swiss biomass to research and development as well as for making economic and political decisions.

Both woody and non-woody types of biomass were investigated using methodically comparable approaches, and classified into ten categories (*Figure 1*): forest wood, wood from landscape maintenance, waste wood and industrial wood residues, as well as manure, agricultural crop by-products, the organic part of household garbage, green waste, the organic residues from industrial waste and sewage sludge. Energy-wood plantations on agricultural land and energy plants, so-called energy crops, were not, however, included in the investigation.

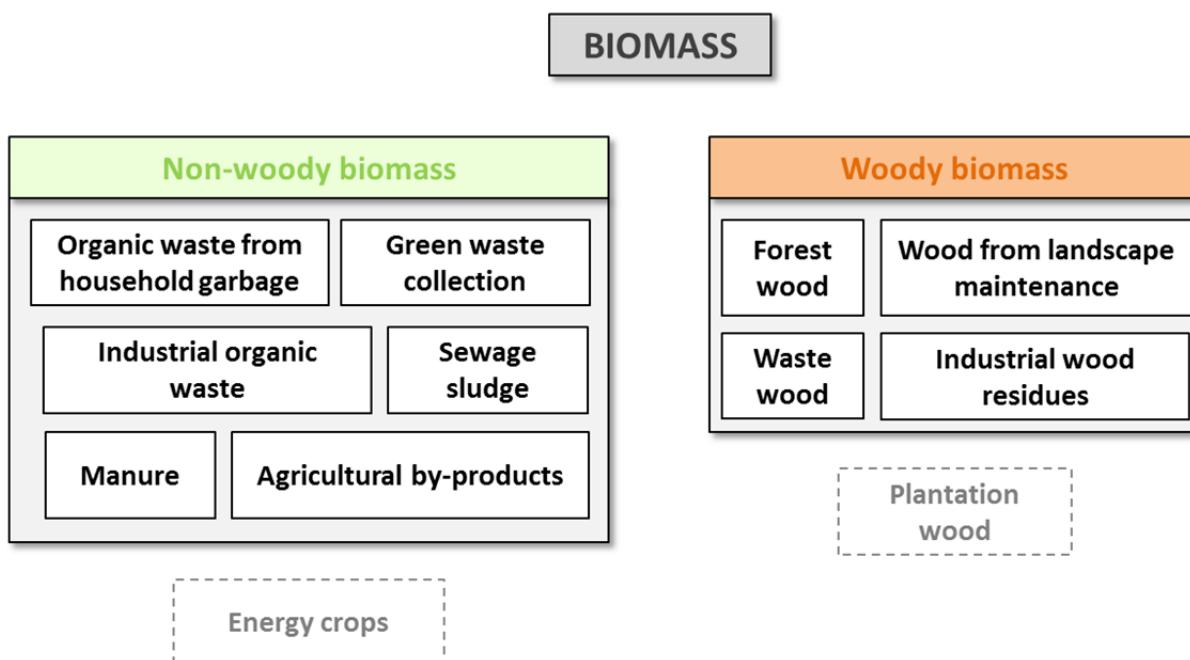


Figure 1: Biomass categories (energy crops and wood from plantations were not investigated).

For all categories of biomass, the current theoretical potential, sustainable potential, already used potential and additional potential were determined (*Figure 2*). By using uniform definitions and the same recording time, it was possible to ensure the potentials could be compared as a basis for an overall assessment. The

assessment is also particularly supported by analysing the potential spatial distribution. The theoretical potential refers to the maximum amount of nationally produced biomass that could be used. The sustainable potential can be derived from this after deducting any ecological, economic, legal and political constraints. The additional or remaining potential is calculated by deducting the biomass already used for energy from the sustainable potential. The concrete definitions of the potential categories for a particular biomass are then described transparently and comprehensively. For each biomass resource, the potentials determined are given as: (i) physical quantities in tonnes of fresh and dry material or in cubic metres, as well as (ii) energy quantities in primary energy (joules) and, if possible, biomethane yields.

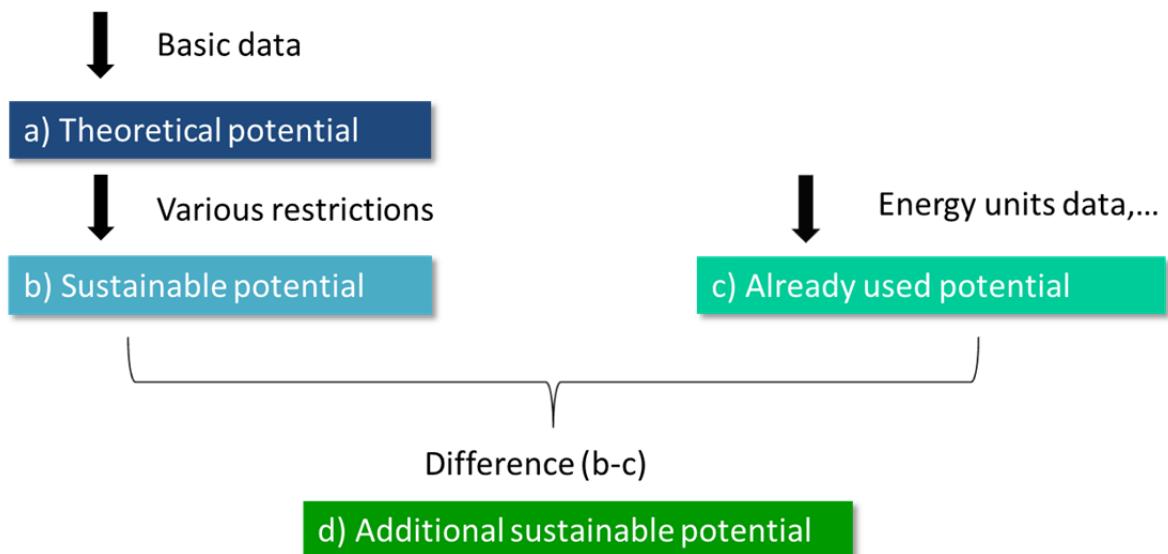


Figure 2: Levels of potential

To determine the potentials, existing data was used – so long as it was usable and accessible. For waste wood, however, a completely new survey was necessary. Supplementary surveys were performed for green waste, municipal waste and the organic residues from industrial waste, and new calculations were made for manure, agricultural crop by-products, sewage sludge, forest wood, wood from landscape maintenance and industrial wood residues. The analyses of the potentials were performed with the help of specialists from the SCCER Biosweet network.

This general WSL report has different sections, with sub-reports for each biomass investigated. The sub-reports provide a general description of the occurrence and use of the biomass/resource, and of the methodological approach used to derive the potentials, specifying how they were defined and which data sources were used. This is followed by the detailed results for each potential category and its spatial distribution. A discussion of the main conclusions and implications completes each section. Care should be taken in using the results.

(i) Generally it should be remembered that the potentials are given as primary energy. The primary energy indicates the maximum amount of energy available in a resource. This does not take into account the efficiency of the conversion technologies, which means the quantities of energy given will only partially be available as end energy.

(ii) How available the resources are in practice depends on the market situation and the competition, as well as on the technology and the political context. These can change and may deviate from the situation prevailing at the time when the investigation was made.

(iii) When referring to the quantities, it is also essential to know exactly how the biomass potentials under consideration were defined and what they refer to. It should be noted, for example, that adding together the theoretical potentials of forest wood and industrial wood residues leads to double counting, i.e. to erroneous results and interpretations, because the theoretical potential of forest wood that can be used for energy includes all wood that is used as material for sawnwood and industrial wood. This means that the full theoretical potential of the industrial wood residues is included in the theoretical forest wood potential. It should also be noted that the economic dimension of sustainability could not be determined, and thus taken

into account, for all types of biomass with the same degree of differentiation and precision as it could for forest wood. With forest wood, the costs of harvesting energy wood were estimated in all regions in Switzerland according to the terrain, forest stands and harvesting methods as a basis for determining its economic sustainability. What should also be considered is that the economic dimension of sustainability for all types of biomass refers only to the supply phase for the resource and not to the phases when it is converted and used.

This section provides a general overview of all 10 types of biomass, specifying the limits and opportunities for producing energy from them and describes the main challenges involved. The sub-reports in the other sections describe in detail for each biomass category separately the calculation methods used and the main results.

Figure 3 summarises the annual potentials of the biomass which occurs annually in Switzerland, converted in primary energy in petajoules (PJ). The different coloured squares indicate the theoretical, sustainable and additional sustainable potential of the different types of biomass. The surface areas of the square are proportional to the primary energy quantities they represent.

According to our calculations, the total theoretical potential of Swiss biomass is 209 PJ per year, of which about half stems from forest wood (108 PJ) and a quarter from manure (49 PJ). This theoretically available quantity of energy from biomass corresponds to an energy equivalent to 4.8 million tonnes of crude oil in total or around 19% of the total gross energy consumption in Switzerland (1108 PJ) [1].

Primary Energy (PJ per year)

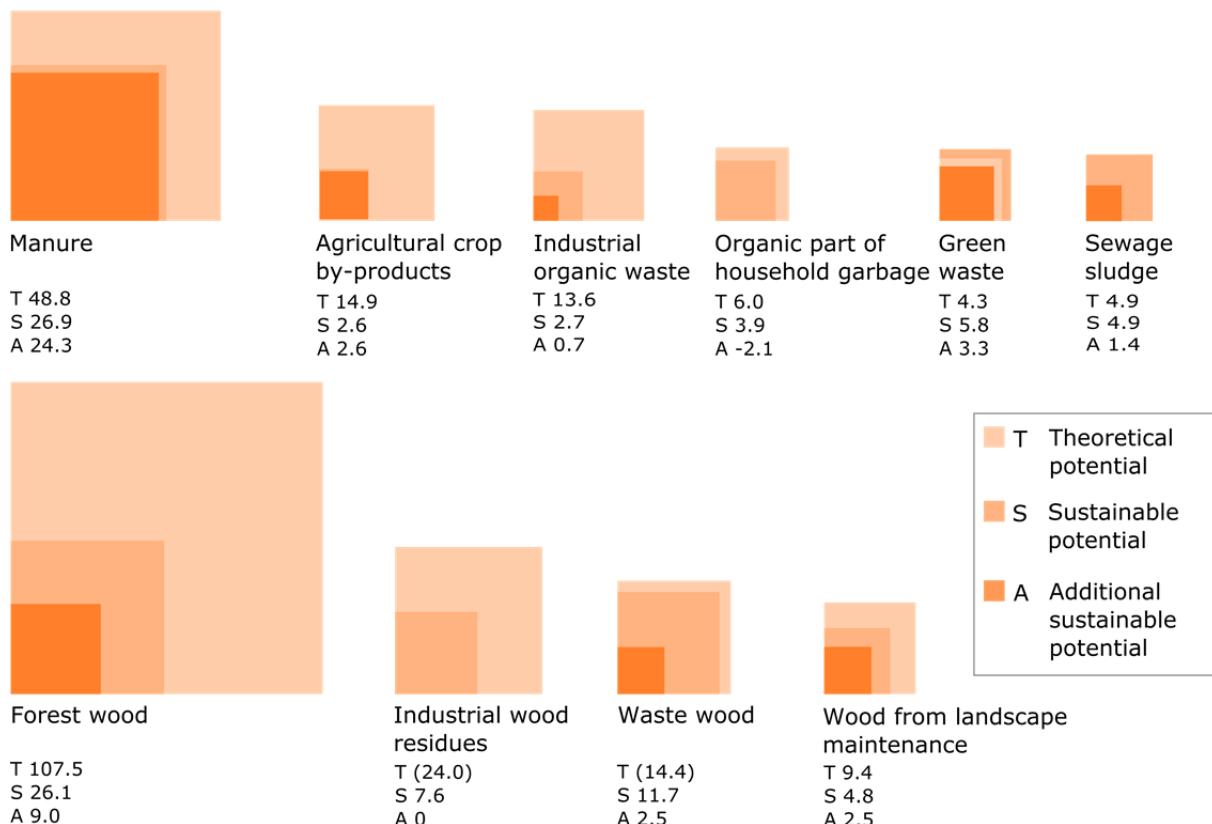


Figure 3: Primary energy potential of all 10 biomass types in petajoules PJ per year.

The main constraints on the sustainable availability of biomass for producing energy are ecological and economic-technical restrictions. If these are taken into consideration, the sustainable theoretical potential for producing energy per year would be roughly halved (97 PJ). Of this sustainable potential 50 PJ comes from woody biomass and 47 PJ of non-woody biomass. The sustainable potentials for forest wood and manure are similar (26 PJ and 27 PJ, respectively). In addition, the biomass categories from waste (industrial wood residues, organic part of municipal waste, green waste from households and landscape maintenance, organic residues from industrial waste, sewage sludge and waste wood) have together an annual potential of 39 PJ.

Today the amount of the biomass potential used to produce energy contributes about 53 PJ per year. In addition, around 44 PJ worth of Swiss biomass is, according to our calculations, available for producing energy, which corresponds to roughly 4% of the gross energy consumption in Switzerland. The biomass with the most additional usable potential is manure (24 PJ), followed by forest wood (9 PJ). While these additional quantities could, from the point of view of resources be made sustainably available, they are not currently used to produce energy. The main reason for not using them is the economic feasibility of supplying the resources or converting them into energy.

Figure 4 provides an overview of the spatial distribution of the theoretical potential of all 10 biomass types at the cantonal level (in petajoules PJ). It shows that Canton Berne has the greatest theoretical potential (36.9 PJ), followed by Canton Vaud (20.7 PJ) and Zurich (17.6 PJ). This is due not only to the size of the cantons but also to the local geographic conditions.

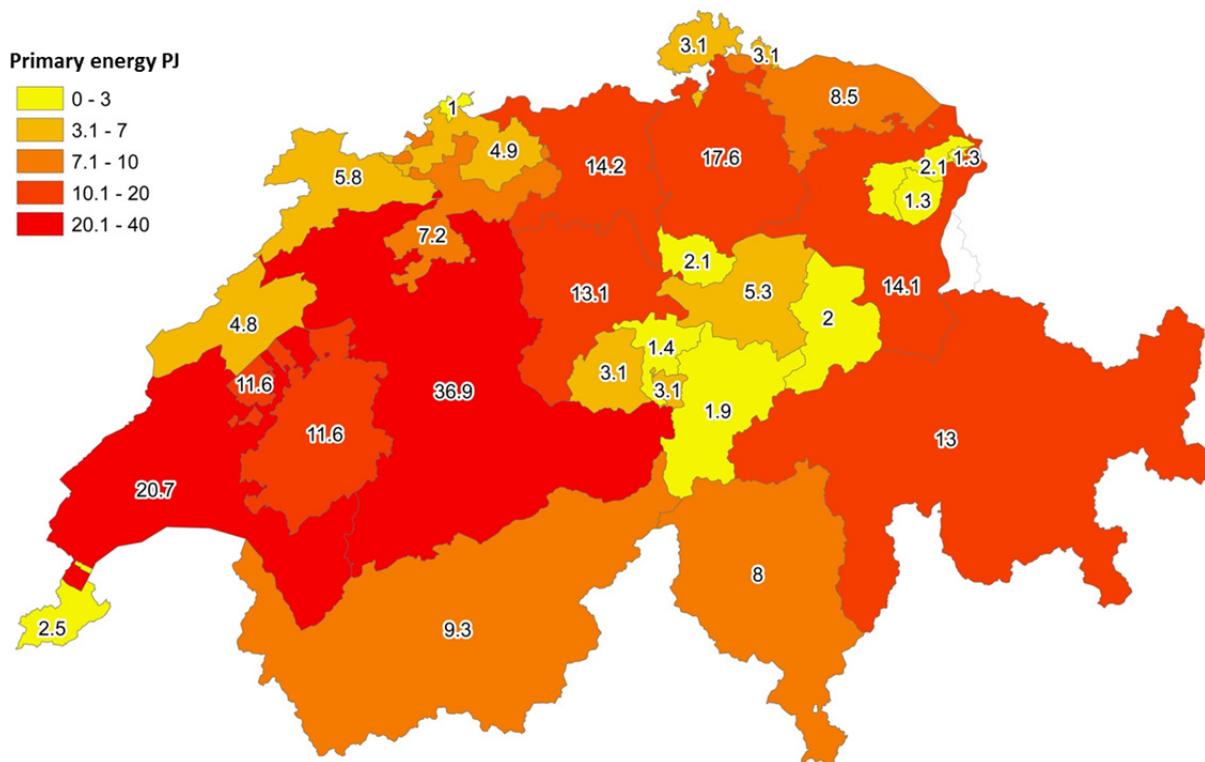


Figure 4: Spatial distribution of the theoretical primary energy potentials in petajoules PJ per year of all 10 biomass types according to canton.

Our results are comparable with those of Steubing [2], but around 15% higher and they can be represented in a more spatially detailed way. He determined the sustainable potential in 2010 to be 82 PJ and the additional potential to be 39 PJ. This difference can be attributed to our more comprehensive and detailed approach.

In their Prognos Study [3] Kirchner et al. estimated the "ecological" potential to be 123 PJ for the year 2003. Of this, 45 PJ are derived from "woody biomass from forest, field and hedges". These figures are quite in line with our current results. However, for the year 2030, they predict 111 PJ for this category, which are described as realizable potential. This represents a very high quantity, which corresponds roughly to our theoretical potential (from forest and landscape maintenance) and which we believe can hardly be used exclusively for producing energy because this would not allow any wood to be used as a material (see part report, forest wood). Since these figures were used as a basis for setting the goals of the Swiss Energy Strategy 2050, we recommend checking their reliability and robustness. These differences show that the assumptions made in defining and determining the potential are crucial and may lead to considerable differences in the results. The potentials and their use depend on several influencing factors, which may change over time. Short-term influencing forces, such as the market for wood, may have a marked impact. This means that the potentials are not stable quantities.

Figure 5 shows the wide range in the cost of using the different resources to produce energy. The figures refer to the sustainable potential of woody and non-woody types of biomass, and indicate how much energy is available for each type of biomass and how much it would cost. They show clearly that it is mostly more expensive to use the woody than the non-woody types of biomass, and that the price rises with increasing exploitation of the resources. Partial quantities of individual biomasses are available at different costs, mostly because of their supply costs. This applies to hardwood from the forest, for example. With household waste and part of the industrial wood residues, the costs are negative because collecting them incurs charges.

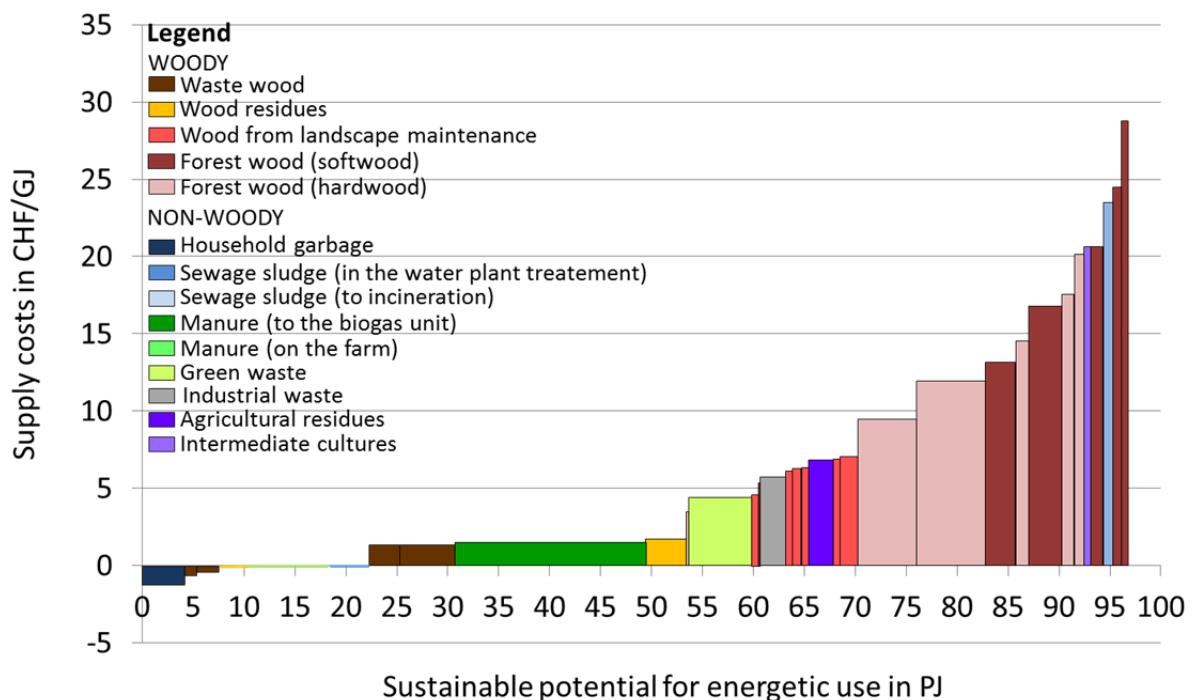


Figure 5: Cost of using the sustainable primary energy potential of all 10 biomass types in Swiss francs per gigawatt hour.

The SCCER Biosweet vision to contribute to the Swiss energy supply by 2050 with 100 petajoule per year coming from the biomass appears to be achievable from the locally sustainable resources available. The sustainable potential lays within this order of magnitude. Therefore, the energy potential of biomass should be used as fully and efficiently as possible and in the most environmentally-friendly way. The most appropriate technologies should be identified, developed and used, and also the appropriate framework should be created. This involves considering the whole energy-conversion chain. In this study we have restricted our focus to the resources and to preparing them for use. In the next phase of SCCER-Biosweet (2017-2020), the full conversion and pathways of use of the different types of biomass will be investigated.

Table 1 provides a further detailed overview of the potentials determined for the annual biomass available in Switzerland per year. In the table, fresh material, dry material and primary energy are distinguished. Presenting the resource quantities in different units allows us to see fundamental characteristics. The difference between the fresh and dry material is, for example, greater for non-woody than woody biomass. For the exact figures, further details and results in other units (cubic metres, biomethane yields), see the DOI-Table online (<http://doi.org/10.16904/18>).

Table 1: Biomass potential in Switzerland for producing energy

	Biomass source	Fresh weight (million tonnes)	Dry weight (million tonnes dw)	Primary energy content (PJ)
Theoretical potential	Animal manure	24.2	3.1	48.8
	Agricultural crop by-products	2.8	0.8	14.9
	Sewage sludge	8.7	0.3	4.9
	Organic fraction of household garbage	0.8	0.4	6.0
	Green waste from households and landscape	0.8	0.3	4.3
	Commercial and industrial organic waste	2.2	1.0	13.6
	Waste wood	(1.0)*	(0.8)*	(14.4)*
	Wood residues	(2.5)*	(1.5)*	(24.0)*
	Forest wood	13.5	7.3	107.5
	Wood from landscape maintenance	1.2	0.6	9.4
Sustainable potential	Total	54.1	13.8	209.4
	Animal manure	14.0	1.7	26.9
	Agricultural crop by-products	0.2	0.1	2.6
	Sewage sludge	8.7	0.3	4.9
	Organic fraction of household garbage	0.4	0.2	3.9
	Green waste from households and landscape	1.1	0.4	5.8
	Commercial and industrial organic waste	0.7	0.2	2.7
	Waste wood	0.8	0.7	11.7
	Wood residues	0.8	0.5	7.6
	Forest wood	3.3	1.8	26.1
Already used potential	Wood from landscape maintenance	0.6	0.3	4.8
	Total	30.5	6.3	97.0
	Animal manure	1.3	0.2	2.6
	Agricultural crop by-products	0	0	0.0
	Sewage sludge	6.2	0.2	3.4
	Organic fraction of household garbage	0.8	0.4	6.0
	Green waste from households and landscape	0.4	0.2	2.2
	Commercial and industrial organic waste	0.5	0.2	2.0
	Waste wood	0.6	0.5	9.2
	Wood residues	0.7	0.5	7.8
Additional sustainable potential	Forest wood	2.2	1.2	17.2
	Wood from landscape maintenance	0.3	0.1	2.3
	Total	13.1	3.4	52.8
	Animal manure	12.6	1.5	24.3
	Agricultural crop by-products	0.2	0.1	2.6
	Sewage sludge	2.5	0.1	1.4
	Organic fraction of household garbage	-0.4	-0.1	-2.1
	Green waste from households and landscape	0.7	0.2	3.5
	Commercial and industrial organic waste	0.2	0.1	0.7
	Waste wood	0.2	0.1	2.5

(*) The wood residues and the waste wood both originate from forest wood and wood from landscape maintenance. To calculate the theoretical potential, the total quantity of forest wood and wood from landscape maintenance is considered to be already used for producing energy. It is not possible to use more than this amount. Industrial wood residues and waste wood should not be included in this sum as it would otherwise involve double counting.

References

- [1] BFE, 2015: *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014*.
- [2] Steubing B, Zah R, Waeger P, Ludwig C, 2010. Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential. *Renew Sust Energ Rev*. 2010;14(8):2256-2265.
- [3] Kirchner, A.; Bredow, F.; Grebel, T; Hofer, P.; Kemmler, A.; Ley, A.; Piégsa, A.; Schütz, N.; Strassburg, S.; Struwe, J., 2012: *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000-2050*: 842p.
- [4] Pauli, P.; Bürgi, P.; Brühlhard, S.; Thees, O.; Lemm, R.; Rosset, C.; 2010: Holz als Rohstoff und Energieträger, Dynamisches Holzmarktmodell und Zukunftsszenarien. Schlussbericht: 207p.

Vue d'ensemble

Le Swiss Competence Center for Energy Research (SCCER), fondé en 2013, cherche des solutions aux défis techniques, sociétaux et politiques posés par la transition énergétique. Huit SCCER ont été créés et mis en réseau dans sept champs d'action. Ils mènent la recherche et le développement indispensable à une mise en œuvre efficiente de la stratégie énergétique 2050 et assurent le transfert des résultats dans la pratique. Le SCCER Biosweet (Biomass for Swiss Energy Future) actif dans le champ d'action «biomasse» met l'accent sur des technologies de transformation de la biomasse en carburants ainsi que sur la production durable d'électricité et de chaleur à partir de la biomasse. Il s'agit de développer des technologies de transformation efficientes et de les planter dans la pratique. La biomasse doit être utilisée de manière à économiser le plus possible de ressources non durables tout en minimisant la charge sur l'environnement. La vision de SCCER Biosweet est de parvenir d'ici 2050 à une contribution de 100 pétajoules par an à l'approvisionnement énergétique de la Suisse. (En comparaison, la consommation brute d'énergie de la Suisse en 2014 était de 1108 PJ [1]).

Dans ce contexte, le but de la présente étude menée par l'Institut fédéral de recherches WSL est de quantifier et de localiser le potentiel des principales ressources en biomasse de la Suisse. L'attention se porte avant tout sur l'analyse des ressources, et sur la question de leur disponibilité durable. SCCER Biosweet s'appuie sur les résultats pour (i) optimiser les processus de transformation dans le cadre de l'évolution technologique et (ii) pour identifier les filières prometteuses de valorisation de la biomasse et optimiser leurs emplacements. Plus largement, l'étude a pour but de livrer à la recherche, à l'économie et à la politique une base complète et détaillée au sujet des potentiels de la biomasse en Suisse.

L'étude a porté autant sur la biomasse ligneuse que non ligneuse, en appliquant la même approche méthodologique. Dix catégories de biomasse ont été définies (*Figure 1*): bois de forêt, bois récolté hors forêt, sous-produits de la transformation du bois et bois usagé, ainsi que les engrains de ferme, les sous-produits de la production végétale, les fractions organiques des déchets ménagers, les déchets verts des ménages et de l'entretien du paysage, les biodéchets de la gastronomie et de l'industrie et les boues d'épuration. L'étude n'a pas inclus les lignicultures sur sols agricoles destinées à la production d'énergie ni les plantes énergétiques (Energy crops).

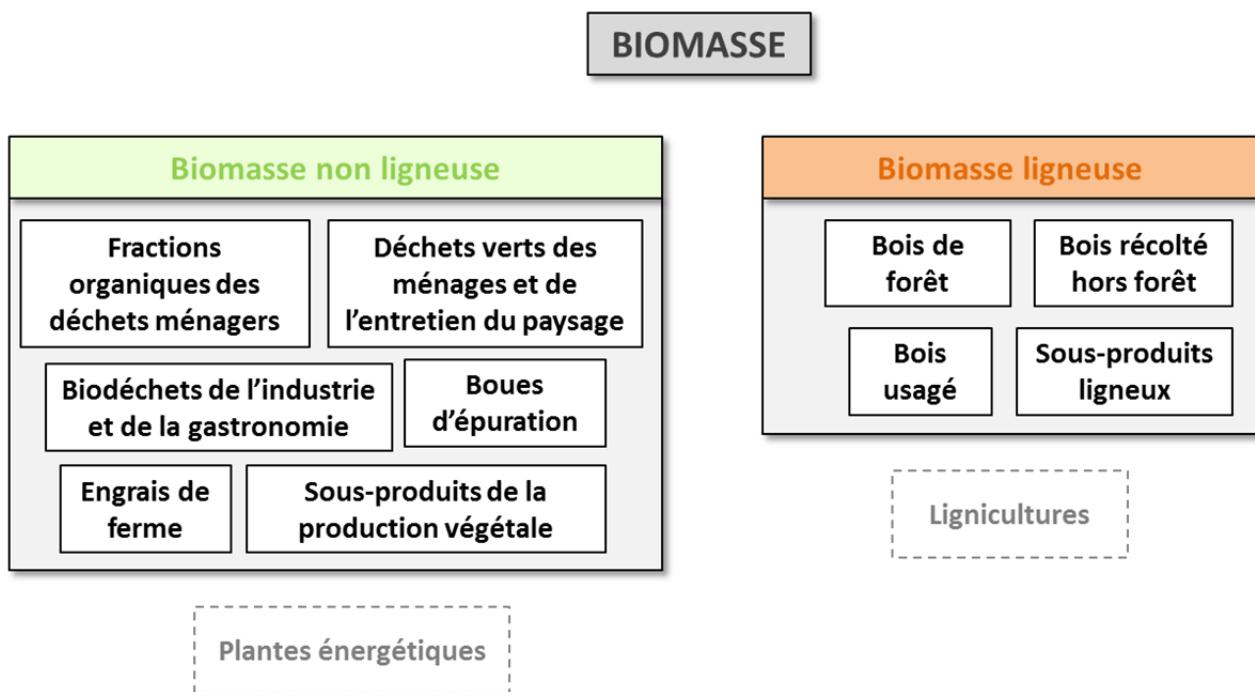


Figure 1: Catégories de biomasse (les plantes énergétiques et les lignicultures n'ont pas été étudiées)

Le potentiel théorique, le potentiel durable, le potentiel déjà exploité et le potentiel supplémentaire durablement exploitable ont été déterminés pour chacune de ces catégories de biomasse (*Figure 2*). La délimitation homogène ainsi que la saisie simultanée des données garantissent la comparabilité des potentiels et donc la vue d'ensemble. Cette dernière est notamment facilitée par une analyse de la répartition spatiale

des potentiels. Le potentiel théorique comprend l'exploitation maximale possible de la biomasse produite dans le pays. Si l'on tient compte des restrictions écologiques, économiques, légales et politiques, on obtient le potentiel durable. Le potentiel supplémentaire encore exploitable s'obtient en soustrayant le potentiel énergétique de la biomasse déjà exploitée du potentiel durable. La délimitation concrète des catégories de potentiels est présentée de façon transparente et intelligible pour chaque biomasse. Pour chaque catégorie, les potentiels sont indiqués (i) en quantités physiques exprimées en tonnes de matière fraîche et sèche ou en mètres cubes et d'autre part (ii) en quantités d'énergie exprimées en énergie primaire (joules) et lorsque cela est possible en équivalent biométhane.

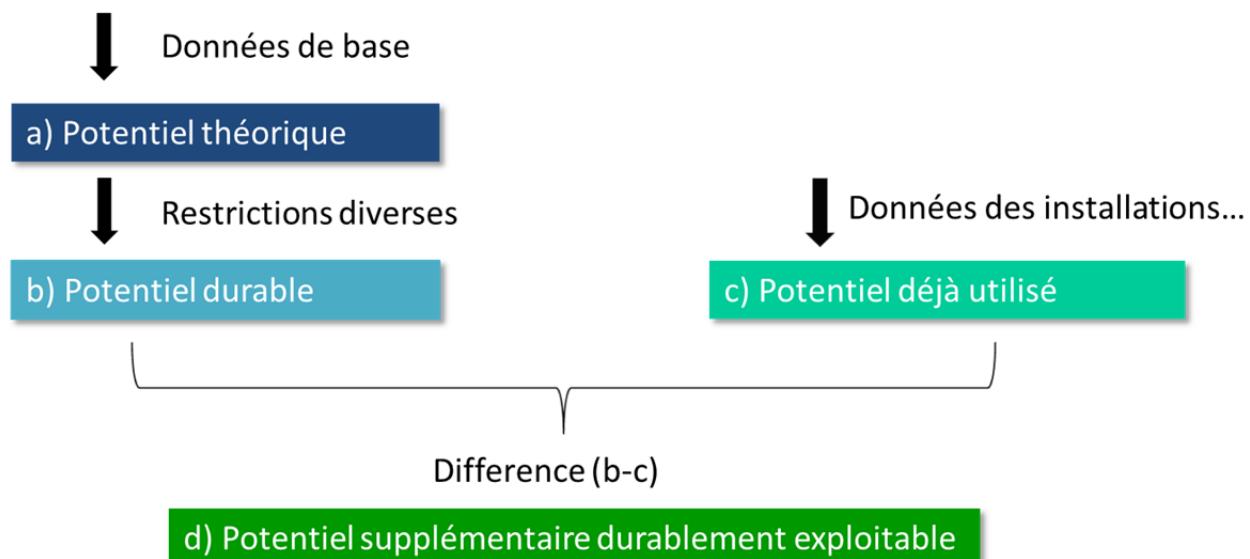


Figure 2: Niveaux de potentiels

Le calcul des potentiels a été réalisé grâce aux données existantes, dans la mesure où elles étaient utilisables et accessibles. Pour le bois usagé, il a cependant fallu réaliser un inventaire complètement nouveau.

Des enquêtes complémentaires ont eu lieu pour les déchets verts, les déchets ménagers et les biodéchets de la gastronomie et de l'industrie. Pour les engrains de ferme, les sous-produits de la production végétale, les boues d'épuration, le bois de forêt, le bois récolté hors forêt, les sous-produits du bois et le bois usagé, de nouveaux calculs ont été réalisés. Des spécialistes apportent leurs connaissances analyses de potentiel dans le cadre du réseau SCCER Biosweet.

Le présent rapport intégral du WSL est structuré de telle façon que chaque biomasse étudiée fait l'objet d'un rapport partiel sur son volume et son utilisation, sur la démarche méthodologique permettant de connaître les potentiels, notamment leurs délimitations et les sources de données utilisées. Suivent les résultats détaillés pour chaque catégorie de potentiels et leur répartition spatiale. Les rapports partiels se terminent par une discussion des résultats et une conclusion.

L'utilisation des résultats doit se faire avec précaution. (i) Il ne faut pas oublier que les potentiels sont indiqués sous forme d'énergie primaire. Celle-ci représente l'énergie maximale disponible dans une ressource. Cela signifie que le rendement propre aux technologies de transformation n'est pas encore pris en compte, si bien que les quantités d'énergie indiquées ne seront qu'en partie disponibles sous forme d'énergie finale. (ii) La disponibilité effective des ressources dépend du marché et de la concurrence, des technologies et du contexte politique. Ces situations peuvent évoluer et s'écartez des conditions prévalant lors de l'étude. (iii) Un autre élément essentiel en vue de l'utilisation des résultats est de bien connaître le contenu des potentiels de biomasse ainsi que leurs délimitations. Par exemple, il faut garder à l'esprit qu'en additionnant les potentiels théoriques du bois de forêt et des sous-produits du bois, on compte la ressource deux fois, ce qui mène à des résultats et à des interprétations erronées. En effet, pour calculer le potentiel énergétique théorique du bois de forêt, on a compté le volume total de bois utilisable pour les sciages et le bois d'industrie. Cela signifie que le potentiel théorique des sous-produits est entièrement compris dans le potentiel théorique du bois de forêt. Il faut aussi prendre en compte que la dimension économique de la durabilité n'a pas pu être calculée pour

toutes les biomasses avec autant de détails et de précision que dans le cas du bois de forêt. Pour intégrer ces aspects économiques, les estimations des coûts de la récolte du bois d'énergie ont été effectuées dans toutes les régions du pays en tenant compte des conditions topographiques, des types de peuplements et des méthodes de récolte. En outre, il faut se souvenir que pour toutes les biomasses, cette dimension économique de la durabilité s'applique exclusivement à la phase de mise à disposition de la ressource mais ni à sa transformation ni à son utilisation.

Le présent chapitre offre une vue synoptique des 10 biomasses, précise les limites et les chances de leur valorisation énergétique et décrit les défis les plus importants. Les méthodes de calcul et les résultats des diverses catégories de biomasse sont présentés en détail dans les rapports partiels

La figure 3 résume les divers potentiels de la biomasse produite annuellement en Suisse convertis en contenu d'énergie primaire (PJ). Les carrés colorés représentent le potentiel théorique, le potentiel durable et le potentiel supplémentaire des diverses biomasses. La surface des carrés est proportionnelle à la quantité d'énergie primaire.

Selon nos calculs, le potentiel théorique de la biomasse se monte en Suisse au total à 209 PJ d'énergie primaire par année, la moitié environ provenant du bois de forêt (108 PJ) et un quart des engrais de ferme (49 PJ). Cette quantité d'énergie, issue de la biomasse et théoriquement disponible, correspond à l'équivalent énergétique de 4.8 millions de tonnes de pétrole brut ou d'environ 19% du total de la consommation brute d'énergie de la Suisse (1108 PJ) [1].

Energie primaire (PJ par an)

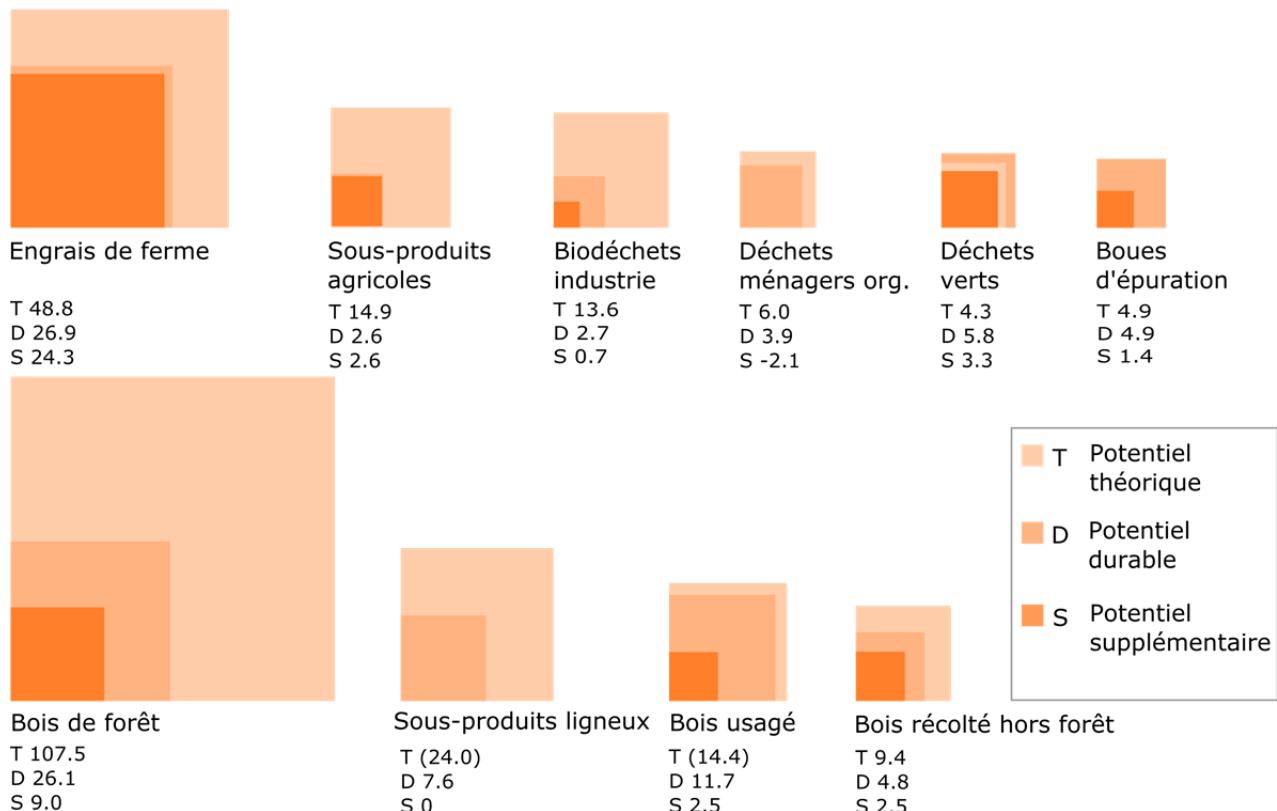


Figure 3: Potentiels d'énergie primaire des 10 catégories de biomasse en pétajoules (PJ) par an.

Les principales restrictions touchant la disponibilité durable des ressources en vue de l'exploitation énergétique sont d'ordre écologique ou technico-économique. Lorsque ces restrictions sont prises en compte, selon nos considérations, la moitié environ du potentiel théoriquement utilisable reste durablement disponible pour l'exploitation énergétique (97 PJ). De ce potentiel durable 50 PJ proviennent de biomasse ligneuse et 47 PJ de biomasse non ligneuse. Les potentiels durables du bois de forêt et des engrais de ferme sont comparables et se montent à respectivement 26 et 27 PJ. Le potentiel des autres catégories de biomasse provenant de déchets atteint au total 39 PJ (bois usagé, fractions organiques des déchets ménagers, déchets verts provenant des ménages et de l'entretien du paysage, déchets organiques de la gastronomie et de l'industrie, les boues

d'épuration et les sous-produits du bois).

La quantité du potentiel de biomasse d'ores et déjà exploitée énergétiquement se monte à 53 PJ par an. Selon nos calculs, environ 44 PJ de biomasse par an sont utilisables énergétiquement en plus, ce qui équivaudrait à quelque 4% de la consommation brute d'énergie en Suisse. Le plus fort potentiel supplémentaire utilisable est celui des engrains de ferme avec 24 PJ, suivi du bois de forêt avec 9 PJ. Cette ressource supplémentaire pourrait être mise durablement à disposition, mais elle n'est pas utilisée actuellement pour la production d'énergie. Ceci est dû notamment à des raisons d'ordre économique en rapport avec la mise à disposition de la ressource ou la transformation de l'énergie.

La figure 4 donne un aperçu de la répartition spatiale du potentiel théorique des 10 biomasses au niveau des cantons (en énergie primaire PJ). Il apparaît que le canton de Berne présente le plus fort potentiel théorique (36.9 PJ), suivi du canton de Vaud (20.7 PJ) et de Zurich (17.6 PJ). Ceci s'explique par l'étendue de ces cantons ainsi que par leurs particularités géographiques.

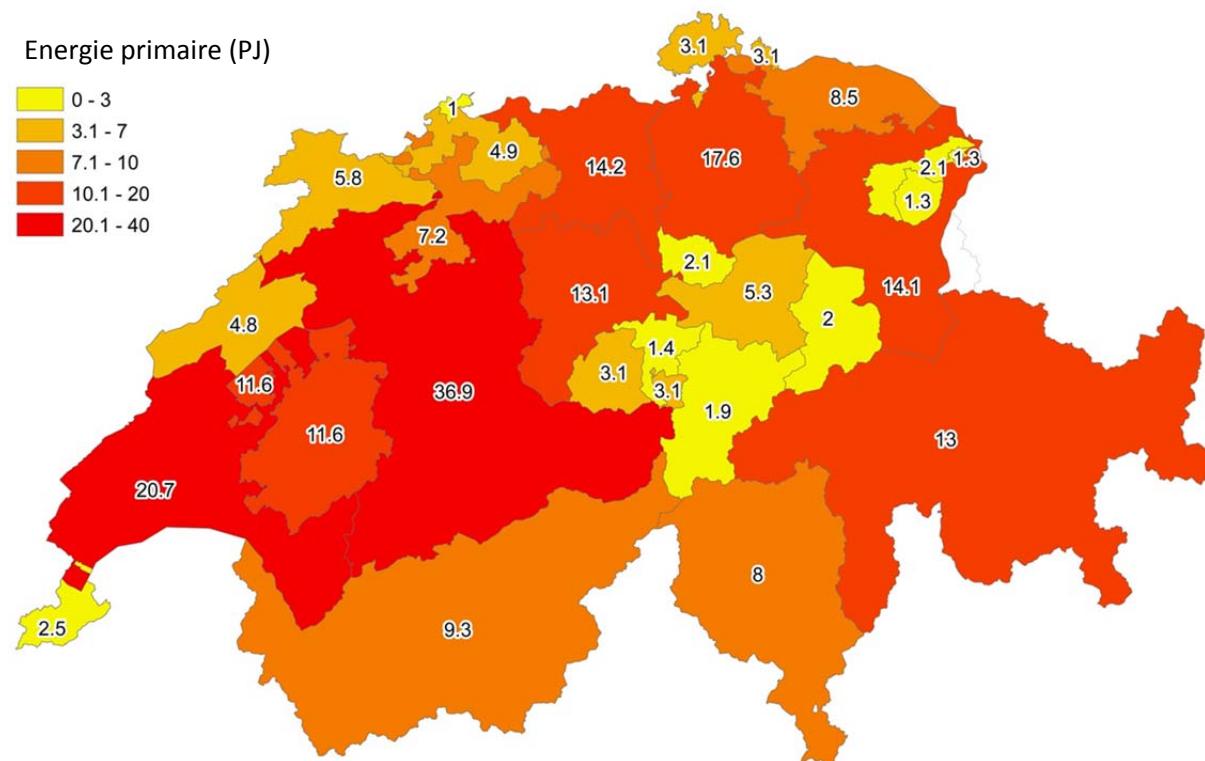


Figure 4: Répartition du potentiel en énergie primaire des 10 biomasses en pétajoules (PJ) par an pour chaque canton.

Nos résultats sont comparables avec ceux de Steubing [2], tout en les dépassant de 15% et peuvent être représentés de façon plus détaillée spatialement. Cet auteur a calculé en 2010 un potentiel durable de 82 PJ et un potentiel supplémentaire de 39 PJ. Cette différence peut s'expliquer par notre démarche plus large et plus détaillée.

Dans leur étude prospective [3] Kirchner *et al.* ont estimé un potentiel «écologique» de 123 PJ pour l'année 2003 – 45 PJ provenant de «biomasse issue de la forêt, bosquets et haies». Ces chiffres coïncident assez bien avec nos résultats actuels. Toutefois Kirchner *et al.* prévoient pour cette même catégorie un potentiel réalisable de 111 PJ pour l'année 2030. C'est là une très haute quantité qui correspond à peu près à notre potentiel théorique (bois de forêt et récolté hors forêt) et qui à nos yeux, ne peut guère être consacrée uniquement à produire de l'énergie, car elle exclurait l'utilisation du matériau bois (cf. rapport partiel sur le bois de forêt). Comme ces chiffres ont servi à définir les objectifs de la stratégie énergétique 2050 pour la Suisse, il est recommandé de vérifier leur fiabilité et leur stabilité. Ces différences révèlent que les hypothèses sous-jacentes à l'étude des potentiels sont décisives et peuvent mener à de fortes différences dans les résultats. Les potentiels et leur exploitation dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent se modifier au cours du temps. Des influences agissant à court terme, par exemple le marché du bois, jouent aussi un rôle important. Les potentiels ne sont donc pas des grandeurs stables.

La figure 5 révèle le large éventail des coûts des ressources destinées à la production énergétique. Les données se rapportent au potentiel durable des biomasses ligneuses et non ligneuses. Elles indiquent, pour chaque biomasse, quelle quantité d'énergie est disponible et à quel coût. Il apparaît aussi clairement que la biomasse ligneuse est nettement plus chère que la non ligneuse et que son coût augmente au fur et à mesure de la progression de son exploitation. Une partie des quantités de certaines biomasses sont disponibles à différents prix – essentiellement à cause de leurs coûts de mise à disposition. Ceci concerne par exemple le bois dur récolté en forêt. Comme des taxes sont prélevées pour leur collecte, les déchets ménagers et une partie du bois usagé entraînent des coûts négatifs, autrement dit des recettes pour les entreprises de collecte ou de transformation.

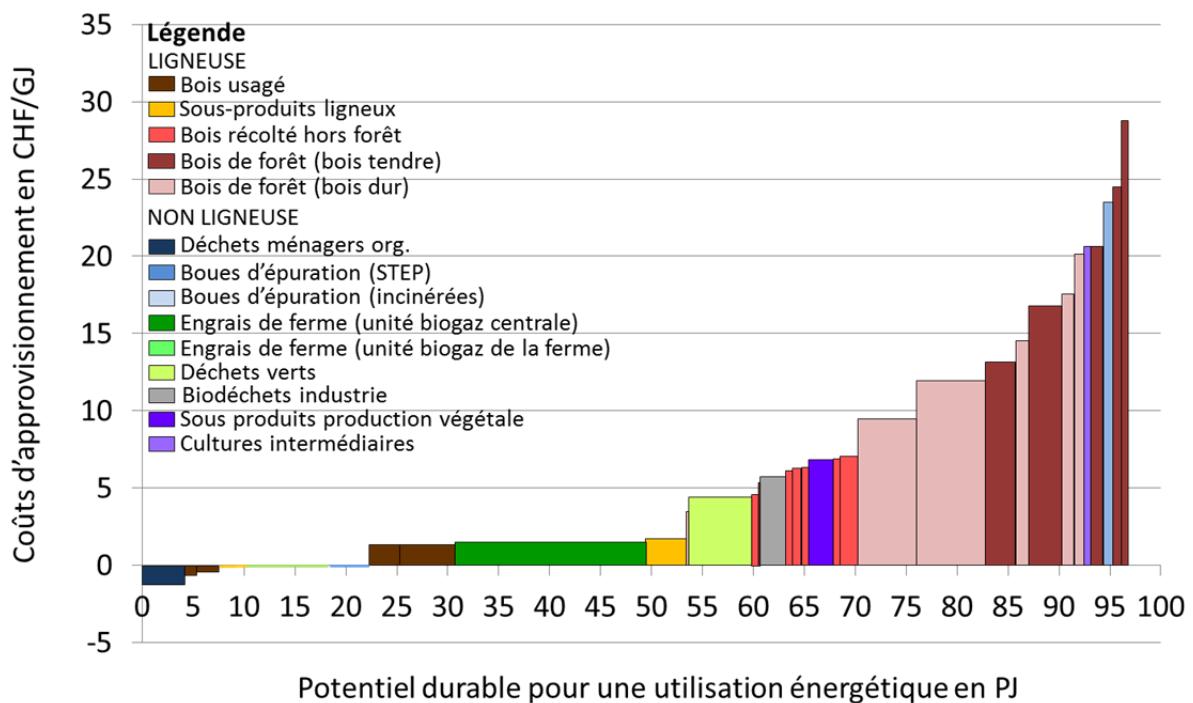


Figure 5: Coûts des potentiels durables d'énergie primaire de chacune des 10 biomasses en francs par gigawattheure.

La vision du SCCER Biosweet, qui est de produire 100 pétajoules d'énergie à partir de la biomasse d'ici à 2050, semble être réalisable au vu des ressources domestiques disponibles pouvant être exploitées durablement. Le potentiel durable est en effet de cet ordre de grandeur. C'est pourquoi l'exploitation des potentiels énergétiques issus de la biomasse doit être aussi complète, efficiente et respectueuse de l'environnement que possible et il faut de plus identifier, développer et utiliser les technologies les plus adaptées ainsi que créer les meilleures conditions cadres pour cette exploitation. Dans ce contexte, l'ensemble de la chaîne de transformation énergétique doit être pris en compte. Pour la présente étude, nous nous sommes limités aux ressources et à leur mise à disposition. Lors de la prochaine phase de SCCER-Biosweet (2017-2020), la chaîne complète de transformation et d'utilisation des biomasses sera examinée.

Le tableau 1 livre un aperçu détaillé des potentiels de biomasse produits chaque année, exprimés en matière fraîche, en matière sèche et en énergie primaire. L'utilisation de différentes unités de mesure pour présenter le volume des ressources permet de faire ressortir des caractéristiques importantes. Par exemple, il est possible de constater la différence relativement nette entre la matière fraîche et sèche dans le cas de la biomasse non ligneuse. Les chiffres exacts ainsi que certains résultats plus détaillés ou indiqués avec d'autres unités de mesure (mètre cube, équivalent méthane) sont disponibles en ligne dans un tableau DOI (<http://doi.org/10.16904/18>).

Tableau 1: Potentiels d'exploitation énergétique de la biomasse en Suisse.

	Biomasse	Matière fraîche (millions de tonnes MF)	Matière sèche (millions de tonnes MS)	Contenu en énergie primaire (PJ)
Potentiel théorique	Bois d'énergie de forêt	13.5	7.3	107.5
	Bois récolté hors forêt	1.2	0.6	9.4
	Sous-produits ligneux	(2.5)*	(1.5)*	(24.0)*
	Bois usagés	(1.0)*	(0.8)*	(14.4)*
	Engrais de ferme (élevage)	24.2	3.1	48.8
	Sous-produits production végétale	2.8	0.8	14.9
	Fractions org. des déchets ménagers	0.8	0.4	6.0
	Déchets verts ménages / espaces verts	0.8	0.3	4.3
	Biodéchets gastronomie et industrie	2.2	1.0	13.6
	Boues d'épuration, STEP centrales	8.7	0.3	4.9
Total		54.1	13.8	209.4
Potentiel durable	Bois d'énergie de forêt	3.3	1.8	26.1
	Bois récolté hors forêt	0.6	0.3	4.8
	Sous-produits ligneux	0.8	0.5	7.6
	Bois usagés	0.8	0.7	11.7
	Engrais de ferme (élevage)	14.0	1.7	26.9
	Sous-produits production végétale	0.2	0.1	2.6
	Fractions org. des déchets ménagers	0.4	0.2	3.9
	Déchets verts ménages / espaces verts	1.1	0.4	5.8
	Biodéchets gastronomie et industrie	0.7	0.2	2.7
	Boues d'épuration, STEP centrales	8.7	0.3	4.9
Total		30.5	6.3	97.0
Potentiel déjà utilisé	Bois d'énergie de forêt	2.2	1.2	17.2
	Bois récolté hors forêt	0.3	0.1	2.3
	Sous-produits ligneux	0.7	0.5	7.8
	Bois usagés	0.6	0.5	9.2
	Engrais de ferme (élevage)	1.3	0.2	2.6
	Sous-produits production végétale	0	0	0.0
	Fractions org. des déchets ménagers	0.8	0.4	6.0
	Déchets verts ménages / espaces verts	0.4	0.2	2.2
	Biodéchets gastronomie et industrie	0.5	0.2	2.0
	Boues d'épuration, STEP centrales	6.2	0.2	3.4
Total		13.1	3.4	52.8
Potentiel supp. exploitable	Bois d'énergie de forêt	1.1	0.6	8.9
	Bois récolté hors forêt	0.3	0.2	2.5
	Sous-produits ligneux	0.0	0.0	-0.2
	Bois usagés	0.2	0.1	2.5
	Engrais de ferme (élevage)	12.6	1.5	24.3
	Sous-produits production végétale	0.2	0.1	2.6
	Fractions org. des déchets ménagers	-0.4	-0.1	-2.1
	Déchets verts ménages / espaces verts	0.7	0.2	3.5
	Biodéchets gastronomie et industrie	0.2	0.1	0.7
	Boues d'épuration, STEP centrales	2.5	0.1	1.4
Total		17.4	2.8	44.2

(*) Les sous-produits ligneux et les bois usagés ont leurs origines dans le bois de forêt et le bois récolté hors forêt. Pour calculer le potentiel théorique, la totalité du bois de forêt et du bois hors forêt a été considérée comme déjà utilisée énergétiquement. Il n'est pas possible d'exploiter davantage que cette quantité. Le bois usagé et les sous-produits ligneux ne peuvent pas s'y ajouter, car il s'agirait d'un double comptage.

Bibliographie

- [1] BFE, 2015: *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014*.
- [2] Steubing B.; Zah R.; Waeger P.; Ludwig C. Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential. *Renew Sust Energ Rev.* 2010;14(8):2256-2265.
- [3] Kirchner, A.; Bredow, F.; Grebel, T.; Hofer, P.; Kemmler, A.; Ley, A.; Piégsa, A.; Schütz, N.; Strassburg, S.; Struwe, J., 2012: *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000-2050*: 842 S.
- [4] Pauli, P.; Bürgi, P.; Brühlhard, S; Thees, O; Lemm, R.; Rosset, C.; 2010: Holz als Rohstoff und Energieträger, Dynamisches Holzmarktmodell und Zukunftsszenarien. Schlussbericht: 207 S.

Verholzte Biomassen

Waldholz



Bild: Fritz Frutig, WSL

Matthias Erni, Oliver Thees, Renato Lemm

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	34
1 Einleitung.....	35
2 Methoden.....	36
2.1 Begriffe	37
2.2 Grundlagen	38
2.2.1 Modell Massimo	38
2.2.2 Waldreservate, Ernteverluste und Anteile der energetischen Nutzung.....	38
2.3 Waldbewirtschaftungsszenarien	38
2.4 Zeitpunkte.....	39
2.5 Ermittlung der Waldenergieholzpotenziale.....	40
2.5.1 Theoretisches Potenzial (TP).....	41
2.5.2 Nachhaltiges Potenzial (NP).....	41
2.5.3 Bereits genutztes Potenzial (BG)	44
2.5.4 Zusätzlich nutzbares Potenzial.....	44
2.6 Aufteilung der Energieholzmengen auf die Kantone.....	44
2.7 Umrechnung von Volumen [m ³] in Energieinhalt [PJ]	45
3 Resultate	46
3.1 Übersicht	46
3.2 Theoretisches Potenzial.....	48
3.3 Nachhaltiges Potenzial	48
3.4 Bereits genutztes Potenzial	53
3.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial.....	53
4 Diskussion und Folgerungen	54
4.1 Vergleich mit anderen Studien	54
4.2 Folgerungen.....	56
5 Anhang	58
5.1 Theoretische Potenziale – nach Kantonen	58
5.2 Nachhaltige Potenziale – nach Kantonen	59
5.2.1 Ökologisch nachhaltige Potenziale	59
5.2.2 Ökologisch-ökonomisch nachhaltige Potenziale gemäss «Marktpreis».....	61
5.2.3 Ökologisch-ökonomisch nachhaltige Potenziale gemäss «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)»	66
5.3 Bereits genutzte Potenziale – nach Kantonen.....	70
5.4 Zusätzlich nutzbare Potenziale – nach Kantonen	71
6 Literatur.....	73

Abkürzungen

a	Jahr	Rp./kWh	Rappen pro Kilowattstunde
BG	Bereits genutztes Potenzial	Srm	Schüttraummeter
BHD	Brusthöhendurchmesser	Szn	Szenario
FS	Forststatistik	TP	Theoretisches Potenzial
Massimo	Management Szenarien Simulation	V1	Variante 1, weniger energieholz-
Modell		freund	liche Holzmarktsituation
LbH	Laubholz	V2	Variante 2, energieholzfreundliche
LFI	Schweizerisches Landesforstinventar		Holzmarktsituation
NdH	Nadelholz	WiReg	Wirtschaftsregion
NP	Nachhaltiges Potenzial	ZP	Zusätzlich nutzbares Potenzial

1 Einleitung

Holz, das nach seiner Ernte im Wald der energetischen Nutzung zugeführt wird, heisst Waldenergieholz. Eine vorherige stoffliche Verwendung findet nicht statt. Waldholz wird energetisch genutzt, wenn es sich aus technischen oder ökonomischen Gründen nicht für eine stoffliche Nutzung eignet. Dies sind vor allem Reisig, Rinde sowie Rundholz mit ungeeigneten Dimensionen und Qualitäten. Bei letzterem handelt es sich um mehr oder weniger grosse Anteile des Schaftderholzes und in der Regel um das komplette Astderholz. Nadeln und Blätter können enthalten sein, wenn auf ihre Nutzung nicht explizit verzichtet wird (in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt).

Waldenergieholz wird in der Schweiz in kleinen (z.B. Kaminöfen), mittleren und grossen Feuerungsanlagen (z.B. Holzheizkraftwerken) verbrannt. Beim Holzverbrauch dominieren Anlagen mit mehr als 50 kW [4]. Zurzeit werden vor allem Wärme und in geringem Umfang Strom erzeugt. Zudem gibt es bereits erste Anlagen zur Holzvergasung [26].

In der Schweiz existieren sowohl auf Landes- wie auch auf regionaler Ebene Untersuchungen zu den Holznutzungs- beziehungsweise Waldenergieholzpotenzialen [12, 14, 23, 21]. In der vorliegenden Studie wurden die neuesten Waldinventurergebnisse verwendet, den veränderten Holzmarktsituationen Rechnung getragen und Potentialkategorien ausgeschieden, die den direkten Vergleich mit anderen Biomassen im Rahmen des SCCER Biosweet ermöglichen. Ausserdem erlauben die neuen Berechnungen Resultate auf kantonaler Auflösungsebene.

Die Berechnung des Waldenergieholzpotenzials erfolgt für verschiedene Strategien der Waldbewirtschaftung und Holzmarktsituationen. Seine Verfügbarkeit wird gemäss «Marktpreis» und «Subventionen im Schutzwald» ermittelt (Kap. 2.5.2.4). Neben der stofflichen Nutzung und der nicht-kostendeckenden Bereitstellung werden auch die Reservatflächen und Ernteverluste einkalkuliert. Untersucht werden die heute verfügbaren Holz- und Energiemengen, ihre räumliche Verteilung und zukünftige Entwicklung. Folgende Fragen stehen im Vordergrund:

- Wie verfügbar ist Waldholz für die energetische Nutzung?
- Wie sind die Waldenergieholzpotenziale räumlich verteilt?
- In welchen Kantonen kann ein zusätzliches Waldenergieholzpotenzial erschlossen werden?
- Gibt es Veränderungen der Waldenergieholzpotenziale im zeitlichen Verlauf?

Theoretisches Potenzial (TP)

Umfasst die energetisch maximal nutzbare Holzmenge, für die man den jährlichen Zuwachs (Derbholznettozuwachs) zuzüglich eines allfälligen Vorratsabbaus, inklusive einem Zuschlag für Reisig, Rinde und Mortalität in einem Wald heranziehen kann. → Kapitel 2.5.1

Ökologisch nachhaltiges Potenzial

Ergibt sich ausgehend vom theoretischen Potenzial nach Abzug der Restriktionen und Nutzungen des theoretischen Potenzials: Mortalität, Vorratsabbau, Reservatflächen, Ernteverluste und stoffliche Nutzung. → Kapitel 2.5.2

Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Potenzial (NP) franko Werk → Kapitel 2.5.2

«Marktpreis»

Ergibt sich ausgehend vom theoretischen Potenzial nach Abzug der Restriktionen: Mortalität, Vorratsabbau, Reservatflächen, Ernteverluste, stoffliche Nutzung und nicht kostendeckende Bereitstellung bis 5.9 Rp/kWh.

«Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)»

Ergibt sich ausgehend vom theoretischen Potenzial nach Abzug der Restriktionen: Mortalität, Vorratsabbau, Reservatflächen, Ernteverluste, stoffliche Nutzung und nicht kostendeckende Bereitstellung unter Berücksichtigung von Subventionen.

Bereits genutztes Potenzial (BG)

Holz aus dem Wald, das 2014 einer energetischen Nutzung zugeführt wurde. → Kapitel 2.5.3

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Ergibt sich aus der Differenz des nachhaltigen ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Potenzial unter Berücksichtigung von Subventionen und des bereits genutzten Potenzials. → Kapitel 2.5.4

2 Methoden

Wie viel Energieholz im Wald produziert wird, hängt einerseits davon ab, wie viel Holz insgesamt genutzt wird und andererseits wie viel davon als Energieholz ausgehalten und verkauft wird. Wieviel Holz insgesamt genutzt wird, hängt von den langfristigen Waldbewirtschaftungsstrategien ab, welche die Art und Umfang der Holzernte bestimmen. Für die Berechnungen wurden drei Waldbewirtschaftungsszenarien und drei Zeiträume zugrunde gelegt. Wie viel Holz als Energieholz ausgehalten wird, hängt von Dimensionen und Qualitäten des Holzes sowie von den Relationen der Waldenergieholzpreise zu den Preisen des stofflich verwendeten Holzes ab. Entsprechend wurden die Potenziale für drei Szenarien gemäss Stadelmann et al. (2016) [20] und für zwei Holzmarktsituationen gemäss Thees et al. (2013) [23] geschätzt.

Die Waldbewirtschaftungsszenarien lauten:

1. «Vorratsanstieg» (weiter wie bisher)
2. «Kontinuierlich hoher Zuwachs» (moderer Vorratsabbau in überalterten Beständen)
3. «Grosse Nachfrage nach Energie- und Chemieholz» (starker Vorratsabbau, Verkürzung der Umtriebszeit)

Die Intensität der Nutzung steigt von Szenario 1 bis Szenario 3.

Für alle Szenarien wurde eine energieholzfreundliche und eine weniger energieholzfreundliche Holzmarktsituation zugrundegelegt. Nach der Marktsituation bestimmt sich der Anteil des energetisch beziehungsweise stofflich genutzten Holzes. Die den Holzmarktsituationen zugrundeliegenden Annahmen wurden mit den forst- und holzwirtschaftlichen Verbänden abgestimmt (*Tabelle 5*). Bei einem energieholzfreundlichen Holzmarkt werden zum Beispiel beim Stammholz der Klasse 3 im Nadelholz 30% und im Laubholz gar 80% ins Energieholz sortiert. Im Vergleich zum weniger energieholzfreundlichen Holzmarkt also die doppelte Menge.

Potenziale beschreiben immer einen Grad der Verfügbarkeit einer Ressource. Deshalb muss man die Abgrenzung der Potenziale genau kennen. Für unsere Betrachtung sind die energetisch nachhaltig nutzbaren Potenziale besonders wichtig. Wir erhalten sie, indem wir vom theoretischen Potenzial das stofflich verwendete und das nicht nutzbare Holz abziehen. Letzteres ergibt sich aus nicht genutzten Waldflächen (Reservate) und Ernteverlusten. Man erhält so in einem ersten Schritt das ökologisch nutzbare Potenzial, unabhängig davon, was die Nutzung des Potenzials kostet. Will man wissen, welches Potenzial in ökologischer und ökonomischer Hinsicht nutzbar ist, muss man die Holzmengen, die nicht kostendeckend bereitgestellt werden können, abziehen. Dabei ist es im Hinblick auf die tatsächliche Verfügbarkeit wichtig, neben den am Markt erzielbaren Holzerlösen auch Subventionen zu berücksichtigen.

2.1 Begriffe

Abgänge: Entspricht der Nutzung zuzüglich der Mortalität. Als Mortalität gelten Bäume, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Inventuren natürlicherweise verschwunden sind, z. B. durch Lawinen, Hangrutsch, Waldbrand.

Holzmarktsituation: Bezieht sich auf die stoffliche und energetische Nutzung des Waldenergieholzes. In der energieholzfrendlichen Variante werden die Holzmengen pro Stärkeklasse stärker energetisch genutzt, als bei der stofflichen. Bei der weniger energieholzfrendlichen Variante werden pro Stärkeklasse kleinere Mengen energetisch genutzt. Die Anteile der Energieholznutzung sind abhängig von der Stärke der einzelnen Sortimente.

Jährliche Mortalität: Schaftholzvolumen in Rinde pro Jahr aller Bäume ab 12 cm BHD, die zwischen zwei Inventuren abgestorben oder verschwunden sind, aber nicht forstlich genutzt wurden.

Jährliche Nutzung an Schaftderbholz lebender Bäume: Schaftholzvolumen von mindestens 7 cm Durchmesser (Derbholzgrenze) ohne Rinde und ohne Stock pro Jahr aller in der Vorinventur lebenden Bäume ab 12 cm BHD, die zwischen zwei Inventuren genutzt wurden.

Jährliche Nutzung von Astderbholz: Holzvolumen der Äste in Rinde mit Durchmesser von mindestens 7 cm Durchmesser (Derbholzgrenze) pro Jahr aller genutzten und bei der Vorinventur lebenden Bäume ab 12 cm BHD.

Jährliche Nutzung von Derbholz: Holzvolumen des Schaftes (ohne Rinde, ohne Stock) und der Äste (in Rinde) von mindestens 7 cm (Derbholzgrenze) pro Jahr der zwischen zwei Inventuren genutzten und in der Vorinventur lebenden Bäume ab 12 cm BHD.

Jährlicher Nettozuwachs: Jährlicher Zuwachs mit Einwuchs abzüglich der jährlichen Mortalität.

Jährlicher Zuwachs: Jährliche Zunahme des Schaftholzvolumens in Rinde der zwischen zwei Inventuren überlebenden Bäume ab 12 cm BHD und der Abgänge, plus das Volumen der Einwüchse.

Vorrat: Schaftholzvolumen in Rinde der lebenden Bäume ab 12 cm BHD. Dieses entspricht international dem "growing stock".

Vorratsabbau: Verminderung des Schaftholzvorrates in Rinde der lebenden Bäume mit erkennbarer Gehölzart ab 12 cm BHD.

Vorratsanstieg: Steigerung des Schaftholzvorrates in Rinde der lebenden Bäume mit erkennbarer Gehölzart ab 12 cm BHD.

Waldbewirtschaftungsszenario: Es wurden drei Waldbewirtschaftungsszenarien betrachtet. «Vorratsanstieg (Szenariencode 822)» (weiter wie bisher), «kontinuierlich hoher Zuwachs (Szenariencode 834)» (moderer Vorratsabbau) und «große Nachfrage nach Energie und Chemieholz (Szenariencode 852)» (starker Vorratsabbau).

Waldenergieholz: Bezeichnet diejenigen Holzsortimente, welche direkt aus dem Wald für eine energetische Nutzung bestimmt sind.

Waldholznutzung: Entspricht dem Nutzungswert an Derbholz zuzüglich der Nutzung an Reisig und Rinde.

Zuwachs (Gesamtaufwuchs): Allgemein (bei Bäumen) Zunahme von Durchmesser, Höhe, Umfang, Grundfläche, Volumen oder Wert in einer bestimmten Zeiteinheit. In diesem Bericht wird unter Zuwachs der Vorratszuwachs verstanden, wenn nichts anderes vermerkt ist.

2.2 Grundlagen

Die Rohdaten wurden mit dem Modell Massimo (Management Szenario Simulation Model, [24]) auf der Grundlage der Landesforstinventare (LFI 2, 3 und 4b) generiert [9, 8, 1]. Diese Berechnungen wurden von der Forschungsgruppe Ressourcenanalyse der Forschungsanstalt WSL durchgeführt (Kap. 2.2.1). Zudem wurden die Forststatistik [5] und weitere Quellen zur Berechnung von Restriktionen genutzt (Kap. 2.2.2).

2.2.1 Modell Massimo

Die Waldentwicklungen in den kommenden Dekaden wurden mit Hilfe des Waldwachstumsmodells MASSIMO (Management Scenario Simulation Model) für die drei Waldbewirtschaftungsszenarien simuliert. Alle Funktionen in Massimo sind mit Schweizer LFI-Daten hergeleitet worden. Näheres dazu findet man bei Thürig et al. (2005) [24] und Stadelmann et al. (2016) [20].

Für jeden 10-Jahres-Schritt werden Informationen zum verbleibenden und zum ausscheidenden Bestand und zu den Kosten der Holzernte generiert. Diese Informationen geben Auskunft über den Nettozuwachs an Derbholz (ohne Rinde), über die Nutzungsmenge pro 25-Franken Kosten- und Stärkeklasse R1 bis R6, über das Astderbholz, das Restderbholz sowie über Reisig und Rinde. Als Auflösungsebene werden die 14 Wirtschaftsregionen der Schweiz gewählt.

Zur Berechnung der Holzerntekosten wurde das Holzernte-Produktivitätsmodell HeProMo [11] in Massimo integriert. Die Erntekosten der zu nutzenden Vorratsmengen wurden für jede LFI-Probefläche und zu den verschiedenen Simulationszeitpunkten einzeln berechnet. Dabei wurden die wichtigsten Ernteverfahren wie «Holzhauerei motormanuell», «Radharvester», «Schlepper», «Forwarder», «konventioneller Seilkran», «Mobilseilkran» und «Helikopter» berücksichtigt. Die so bewerteten Nadel- und Laubholzmengen wurden folgenden Kostenklassen in CHF/m³ zugeordnet: bis 25, 26–50, 51–75, 76–100, 101–125, 126–150, >150. Um die Kosten für die Hackschnitzelbereitstellung franko Werk zu kalkulieren, mussten zu den Kosten für die Ernte die Kosten für das Hacken und den Transport dazugezählt werden. Es wurde mit 16 Franken pro Schüttraummeter oder 40 CHF/m³ für Hacken und Transport gerechnet.

2.2.2 Waldreservate, Ernteverluste und Anteile der energetischen Nutzung

Zur Ermittlung der nachhaltigen Waldenergieholzpotenziale wurden Angaben zu den Waldreservaten [25], zu den Ernteverlusten [13] und zu den Anteilen energetischer und stofflicher Nutzung von Waldholz [23] verwendet. Um das bereits genutzte Potenzial aus der Forststatistik [5] mit den Modellergebnissen aus Massimo zu vergleichen, wurden Korrekturfaktoren [2] genutzt (Kapitel 2.5.).

2.3 Waldbewirtschaftungsszenarien

Mit Massimo (Kap. 2.2.1) wurden drei Waldbewirtschaftungsszenarien berechnet. Die Ergebnisse zeigen den Zuwachs und die Nutzung des Rohstoffs Holz. Die Szenarien sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 1: Übersicht zu den Waldbewirtschaftungsszenarien.

Waldbewirtschaftungsszenario	Vorrats respektive Nutzungsziele	Vorgaben	
Vorratsanstieg («weiter wie bisher», 822) Im Folgenden genannt: « Vorratsanstieg »	Konstante Nutzung wie zwischen LFI 3 (2004/2006) und LFI 4b (2009/2013)	Mortalität:	15%
		Verjüngung:	empfohlene Nadelholzanteile
		Sturm:	ja, Periodizität 15 Jahre
		Reservate:	keine
Kontinuierlich hoher Zuwachs (834) Im Folgenden genannt: « moderer Vorratsabbau »	Vorratsabsenkung auf 300m ³ /ha bis 2046, danach konstanter Vorrat	Mortalität:	15%
		Verjüngung:	empfohlene Nadelholzanteile
		Sturm:	ja, Periodizität 15 Jahre
		Reservate:	keine
Grosse Nachfrage nach Energie und Chemieholz (852) Im Folgenden genannt: « starker Vorratsabbau »	Vorratsabsenkung bis 2046 mit regional unterschiedlichen Vorratszielen (200 bis 300m ³ /ha), danach konstanter Vorrat	Mortalität:	10%
		Verjüngung:	empfohlene Nadelholzanteile
		Sturm:	ja, Periodizität 15 Jahre
		Reservate:	in überalterten Beständen

Die Waldbewirtschaftungsszenarien sind detailliert in Stadelmann et al. (2016) [20] beschrieben.

Das Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg» mit einem «weniger energieholzfreundlichen» Holzmarkt ist wohl das wahrscheinlichste Szenario. Allerdings wird auch das Szenario «moderer Vorratsabbau» insbesondere von der Holzindustrie als realistisch und trotz erhöhten Holzerntemengen als nachhaltig eingeschätzt.

2.4 Zeitpunkte

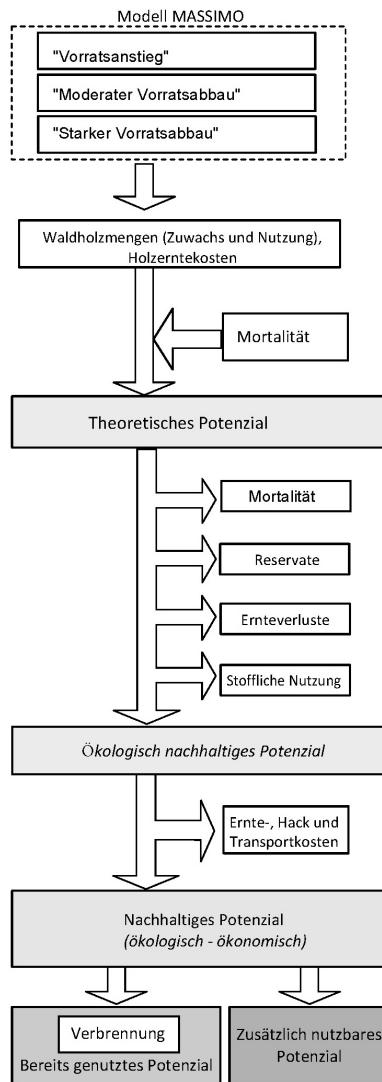
Das bereits genutzte Potenzial wird für den Zeitpunkt 2014 bestimmt und basiert auf der Forststatistik [5]. Für das nachhaltige und das theoretische Potenzial des Waldenergieholzes wurden unterschiedliche Zeitperioden verwendet. Für die Zeitperiode 2017–2026 dienten direkt die Resultate der Periode 2017–2026. Für die nahe Zukunft, 2017–2036 und die ferne Zukunft, 2017–2056 werden arithmetische Mittelwerte aus verschiedenen Zeitperioden gebraucht. Die nahe Zukunft wird aufgrund der Perioden 2017–2026 und 2027–2036 berechnet, die ferne Zukunft zusätzlich aufgrund der Perioden 2037–2046 und 2047–2056. Das zusätzlich nutzbare Potenzial kann als Differenz zwischen dem nachhaltigen, in der vorliegenden Studie ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzial mit Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald und dem bereits genutzten Potenzial für dieselben Zeitperioden berechnet werden. Für das ökologisch-ökonomisch nachhaltige Potenzial mit einer weniger energieholzfreundlichen Holzmarktsituation wird zudem für alle Waldbewirtschaftungsszenarien die Nutzung bei 5.9 Rp./kWh und für einen Rp./kWh mehr für alle 10 Jahres Perioden des MASSIMO (Kap. 2.2.1) simuliert (Abbildung 3). Das theoretische Potenzial wird für die Periode 2017–2026 angegeben (Tabelle 2).

Tabelle 2: Ermittlungszeitpunkte 2017–2026, nahe Zukunft und ferne Zukunft bei den vier Potenzialen.

Potenzial	Theoreti-sches Potenzial	Nachhaltiges Potenzial			Bereits genutztes Potenzial			Zusätzlich nutzbares Potenzial		
Zeitperioden	2017–2026	2017–2026	2017–2036	2017–2056	2017–2026	2017–2036	2017–2056	2017–2026	2017–2036	2017–2056

2.5 Ermittlung der Waldenergieholzpotenziale

Abbildung 1 gibt eine Übersicht, wie die vier Potenziale berechnet wurden. Die Berechnungen der Holz- und der Energiemengen erfolgten für drei Waldbewirtschaftungsszenarien, drei Zeitperioden, fünf Grossregionen, und 26 Kantone nach Holzartengruppe, Holzkompartimenten sowie mit und ohne Berücksichtigung von Subventionen.

*Abbildung 1: Übersicht zur Berechnung der Waldenergieholzpotenziale.*

Theoretisches Potenzial (TP), Nachhaltige Potenziale (NP) (ökologisch und ökologisch-ökonomisch), bereits genutztes (BG) und zusätzlich Nutzbares Potenzial (ZP).

2.5.1 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Waldenergieholzpotenzial ist definiert als die maximal energetisch nutzbare Holzmenge im Wald. Es umfasst den jährlichen Derbholznettozuwachs zuzüglich eines allfälligen *Vorratsabbaus* sowie eines Zuschlages für Reisig, Rinde und Mortalität. Es entspricht dem maximalen Waldholznutzungspotenzial (inklusive der stofflichen Nutzung).

In den Massimo-Resultaten werden Reisig und Rinde nicht separat als Nettozuwachs ausgewiesen. Deswegen wurde für den Nettozuwachs von Reisig und Rinde anteilmässig die gleiche Menge unterstellt, wie sie bei der Nutzung von Derbholz ausgewiesen wird. Nach dem Zuschlag von Reisig und Rinde wurde für jeden Stichprobepunkt die Waldholznutzung mit dem Nettozuwachs (Derbholznettozuwachs und Nettozuwachs von Reisig und Rinde) verglichen und die grössere Holzmenge für die weiteren Berechnungen selektiert.

Die Mortalität wurde in den Massimo-Resultaten zuvor abgezogen. Dementsprechend muss sie für das theoretische Potenzial wieder dazugerechnet werden. Für die Waldbewirtschaftungsszenarien «Vorratsabbau» und «moderer Vorratsabbau» entspricht die Mortalität 15% der Abgänge (Nutzung + Mortalität). Beim Waldbewirtschaftungsszenario «starker Vorratsabbau» entspricht sie 10% der Abgänge.

Schlussendlich wurden die Holzmengen für die Regionen aufsummiert. Eine Übersicht der Resultate der theoretischen Potenziale enthält Kapitel 3.2; die kantonalen Ergebnisse finden sich in *Tabelle 11* im Anhang.

2.5.2 Nachhaltiges Potenzial

Das nachhaltige Waldenergieholzpotenzial wurde in ein rein **ökologisches** und ein **ökologisch-ökonomisches** Potenzial (franko Werk) aufgeteilt. Dadurch lässt sich der Einfluss der Ernte-, Hack- und Transportkosten auf die Verfügbarkeit des Waldenergieholzes abschätzen.

Die beiden nachhaltigen Potenziale umfassen die jährliche Waldenergieholznutzung nach den drei Waldbewirtschaftungsszenarien unter Berücksichtigung verschiedener Abzüge oder Restriktionen. Das ökologisch nachhaltige Waldenergieholzpotenzial bezieht drei Restriktionen in chronologischer Reihenfolge mit ein. Es sind dies die Reservatflächen, die Ernteverluste und die stoffliche Nutzung. Berücksichtigt man anschliessend zusätzlich die kostendeckende Bereitstellung franko Werk ergibt sich das ökologisch-ökonomisch nachhaltige Potenzial. Es wurde gemäss «Marktpreis» und gemäss «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)» berechnet (Kap. 2.5.2.4):

Waldholznutzung nach Massimo

- minus Reservatflächen (Kap. 2.5.2.1)
- minus Ernteverluste (Kap. 2.5.2.2)
- minus stoffliche Nutzung (Kap. 2.5.2.3)

= Ökologisch nachhaltiges Potenzial

- minus Nicht Kostendeckende Bereitstellung (Kap. 2.5.2.4)

= Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Potenzial (franko Werk)

1. «Marktpreis»
2. «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)»

Die Resultate zum ökologischen Potenzial können im Anhang aus *Tabelle 12* bis *14*, jene zum ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzial aus *Tabelle 15* bis *Tabelle 28* entnommen werden.

2.5.2.1 Reservatflächen

Gemäss BAFU [25] liegen die Anteile der Waldreservate an der Waldfläche der Kantone zwischen 0.3% und 25%. Diese Anteile können mit den Anteilswerten der Waldflächen jeder Wirtschaftsregion an den Kantonen (Kap. 2.6) auf die Wirtschaftsregionen (*Tabelle 3*) nach folgender Formel übertragen werden:

$$\text{Waldreservate in WiReg (in %)} = \sum_{KT=1}^{26} (WR_{KT} * AWF WiReg_{KT})$$

Legende

WR_{KT} Waldreservate in einem Kanton in % an der Waldfläche des Kantons (In Formel einzufügen Dezimalzahl der %-Angaben)

$AWF WiReg_{KT}$ Anteil Waldfläche einer Wirtschaftsregion am Kanton

Tabelle 3: Anteil Waldreservate an den Wirtschaftsregionen.

Wirtschaftsregion	Waldreservate (%)
Jura West	4.4
Jura Ost	10.6
Mittelland West	2.4
Mittelland Mitte	3.4
Mittelland Ost	8.4

Wirtschaftsregion	Waldreservate
Voralpen West	1.9
Voralpen Mitte	3.6
Voralpen Ost	9.8
Alpen Nordwest	1.7
Alpen Mitte	7.6

Wirtschaftsregion	Waldreservate (%)
Alpen Nordost	7.7
Alpen Südwest	2.3
Alpen Südost	5.1
Alpensüdseite	3.4

Beim Waldbewirtschaftungsszenario «starker Vorratsabbau» wurden Waldreservate bereits gemäss Stadelmann et al. (2016) [20] abgezogen. Deswegen wurden für diese Waldbewirtschaftung keine weiteren Reservat-flächen mehr berechnet.

2.5.2.2 Ernteverluste

Bei der Nutzung von Waldenergieholz bleibt vorwiegend aus Gründen der Bereitstellungstechnik, der Erntekosten und des Nährstoffentzugsrisikos ein Teil der Biomasse im Bestand. Dies betrifft vor allem das Nichtderbholz (< 7cm mit Rinde), das bei den Bearbeitungs- und Geländetransportprozessen der Holzernte absichtlich oder unabsichtlich vom Stamm getrennt wird. Die entsprechenden Ernteverluste werden in Prozent des Derbholzes oder des Nichtderbholzes angegeben.

Auf der Basis der von Hepperle [13] durchgeföhrten Literaturanalyse zum Ernteverlust bei der Holzernte wurden folgende Ernteverluste für die Potenzialschätzung angenommen (Tabelle 4). Für das Nadelholz wird ein Ernteverlust von 8% beim Derbholz und 58% beim Nichtderbholz unterstellt, für das Laubholz 13% beim Derbholz und 50% beim Nichtderbholz.

Tabelle 4: Ernteverluste. Abgeleitete Werte aus Hepperle et al. (2010) [13].

Ernteverluste			
Nadelholz		Laubholz	
Nichtderbholz	Derbholz	Nichtderbholz	Derbholz
58%	8%	50%	13%

2.5.2.3 Stoffliche Nutzung

Die energetische Nutzung hängt davon ab, wie viel Waldholz für die stoffliche Nutzung ausgehalten und verkauft wird. Durchschnittliche Anteile energetischer Nutzung des Schweizer Waldholzes konnten einer Umfrage aus Thees et al. (2013) [23] entnommen werden (Tabelle 5). Bei einem «weniger energieholzfreundlichen» Holzmarkt werden grössere Anteile des Holzes zunächst stofflich und erst anschliessend energetisch (kaskadisch) genutzt.

Tabelle 5: Energetische Nutzung [23] und abgeleitete stoffliche Verwendung des geernteten Holzes.

Holzkompartiment	in %							
	Nadelholz				Laubholz			
	energetisch		stofflich		energetisch		stofflich	
	V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2
Reisig und Rinde	100		0		100		0	
Restderholz	100	100	0	0	100	100	0	0
Astderbholz	100	100	0	0	100	100	0	0
Rundholz 1 (dünn)	50	70	50	30	100	100	0	0
Rundholz 2	10	25	90	75	45	85	55	15
Rundholz 3	15	30	85	70	40	80	60	20
Rundholz 4	20	40	80	60	40	80	60	20
Rundholz 5	20	40	80	60	50	80	50	20
Rundholz 6 (dick)	20	50	80	50	50	80	50	20

Legende

V1: Weniger energieholz-freundliche Holzmarktsituations

V2: Energieholzfreundliche Holzmarktsituations

2.5.2.4 Nicht kostendeckende Bereitstellung

Die «nicht kostendeckende Bereitstellung» ist eine ökonomische Betrachtung und gibt Auskunft, ob das Waldenergieholz kostendeckend bereitgestellt werden kann. Es wurden zwei ökologisch-ökonomisch nachhaltige Betrachtungen franko Werk erstellt:

1. «Marktpreise»

Nach einer gemeinsamen Empfehlung von Waldwirtschaft Schweiz, Forstunternehmer Schweiz, Holzindustrie Schweiz, Holzenergie Schweiz und der Interessengemeinschaft professioneller Energieholzerzeuger ergeben für 2015/2016 Preise für trockene Schnitzel zwischen 6.2–6.8 Rp./kWh. Grünschnitzel werden für 4.9–5.9 Rp./kWh gehandelt [3]. Da die meisten Holzschnitzel aus dem Wald als Grünschnitzel verkauft werden, wird für eine ökonomisch nachhaltige Nutzung mit einer Obergrenze von 5.9 Rp./kWh für die kostendeckende Bereitstellung gerechnet. Holz das (ohne Subventionen) teurer bereitzustellen wäre, wird nicht geerntet.

Umrechnung von Kosten pro Kubikmeter in Kosten pro kWh

Die Bereitstellungskosten pro Kubikmeter müssen für diese Betrachtung noch in Kosten pro Kilowattstunden umgerechnet werden. Für Laubholz wurde ein Wassergehalt von 50% (waldfrisch) angenommen. Ein Kubikmeter waldfrisches Buchenholz wiegt etwa 1116 kg, waldfrisches Fichtenholz rund 758 kg. Bei einem Energieinhalt von 2.26 kWh/kg [10] und Bereitstellungskosten von 90 CHF/m³ ergibt dies für waldfrisches Fichtenholz Kosten von 5.25 Rp./kWh.

Die Kostenklassen von Laub- und Nadelholz sind in *Tabelle 6* auf Rappen pro kWh umgerechnet. Es wird angenommen, dass die Holzmengen innerhalb der Kostenklassen gleichmäßig verteilt sind. Bei einem Holzpreis von 115–140 CHF/m³ könnte noch alles Laubholz, jedoch gar kein Nadelholz mehr kostendeckend genutzt werden. Der Grund liegt darin, dass ein m³ Nadelholz einen geringeren Heizwert hat, als das Laubholz. In der nächsten Kategorie (165–190 CHF/m³) der Holzerntekosten können auch beim Laubholz nur noch 10% kostendeckend genutzt werden.

Tabelle 6: Kostenklassen für die Bereitstellung von Laub- und Nadelholz (Holzernte inklusive Hacken und Transport) in CHF/m³ und Rp./kWh (Umrechnung Kostenklassen für den Zustand waldfrisch; Schwellenwert 5.9 Rp./kWh).

Kostenklassen (CHF/m ³)	Laubholz		Nadelholz	
	Rp./kWh	kostendeckend	Rp./kWh	kostendeckend
<65	<2.7	100%	3.8	100%
90	3.7	100%	5.3	100%
115	4.8	100%	6.7	45%
140	5.8	100%	8.2	0%
165	6.8	10%	9.6	0%
190	7.9	0%	11.1	0%
>190	>7.9	0%	11.1	0%

2. «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)»

Für die Bewirtschaftung der Schutzwaldflächen werden Subventionen gewährt. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass Waldenergieholz mit Bereitstellungskosten von bis 190 CHF/m³ franko Werk kostendeckend nutzbar ist. Annahme sind 150 CHF/m³ Holzerntekosten [21] und 40 CHF/m³ für Hacken und Transport (Kap. 2.2.1). Für die restlichen Flächen wird mit Holzproduktion bis 120 CHF/m³ franko Werk kostendeckend gerechnet. Diese Menge ergibt sich aus 80 CHF/m³ Holzerntekosten [21] und 40 CHF/m³ für Hacken und Transport (Kap. 2.2.1). Alle Waldflächen wurden in Flächen mit Schutzwald und Flächen ohne Schutzwald gemäss den in Losey und Wehrli 2013 [17] angegebenen Anteilen aufgeteilt. Der Schutzwaldanteil beträgt gesamtschweizerisch 49% der Waldfläche. Der Anteil variiert zwischen wenigen Prozenten im Mittelland (z.B. 3% im Aargau, 5% in Zürich) und grossen Anteilen in den Gebirgsregionen (Obwalden ca. 50%, Graubünden ca. 60%, Wallis ca. 90%) und auf der Alpensüdseite (Tessin ca. 90%).

2.5.3 Bereits genutztes Potenzial

Das bereits genutzte Energieholzpotenzial aus dem Wald wird aus der Forststatistik hergeleitet. Da die Forststatistik die geernteten Mengen nicht vollständig erfasst und so nicht direkt mit den LFI- beziehungsweise mit den Massimo-Ergebnissen vergleichbar ist, werden die Holzmengen der Forststatistik mit folgenden Faktoren nach Altweg et al. (2010) [2] nach oben korrigiert:

Tabelle 7: Korrekturfaktoren zur Umrechnung der Forststatistikangaben zum wahren Wert der Holznutzung [2].

Korrekturfaktor für	Wert in % der Gesamtnutzung der Forststatistik
Rindenanteil am Stammholz	12.3
Zumasse Messvorschriften	7.1
Nicht erfasste Holzmengen im Privatwald	7.0
Nicht erfasste Holzmengen im öffentlichen Wald	2.8

Die Ergebnisse des bereits genutzten Potenzials findet man im Anhang in *Tabelle 29*.

2.5.4 Zusätzlich nutzbares Potenzial

Das zusätzlich nutzbare Potenzial berechnet sich aus der Differenz des ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzials gemäss «Subventionen im Schutzwald» und des bereits genutzten Potenzials. Das zusätzlich nutzbare Potenzial ist abhängig vom gewählten Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg», «moderer Vorratsabbau» und «starker Vorratsabbau» sowie von der Holzmarktsituation «energieholzfreundlich» und «weniger energieholzfreundlich». Für die Berechnung der zusätzlich nutzbaren Potenziale zukünftiger Perioden wird das bereit genutzte Potenzial konstant beziehungsweise fortgeschrieben.

Eine Übersicht der Resultate enthält Kapitel 3.5., die Ergebnisse für die Kantone sind im Anhang Kapitel 5.4, *Tabelle 30* bis *Tabelle 32* abgebildet.

2.6 Aufteilung der Energieholzmengen auf die Kantone

Für das bereits genutzte Potenzial waren die Daten aus der Forststatistik bereits auf Kantonsebene vorhanden. Nicht so für das theoretische und das nachhaltige Potenzial. Im Modell Massimo wurden die Resultate nicht auf Kantonsebene berechnet, da die Fehler zu gross werden. Deswegen wurden kantonale Mengen aufgrund der Waldanteile der Kantone an den Wirtschaftsregionen geschätzt. Dies, indem die Waldenergieholzanteile der Kantone anteilmässig berechnet wurden. *Tabelle 8* zeigt die Anteile der Waldfläche der Kantone an den Wirtschaftsregionen (1=100%).

Tabelle 8: Anteile der Waldfläche der Kantone an den Wirtschaftsregionen [16].

Kantone	Wirtschaftsregion ^{*1}													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ZH					0.416			0.034						
BE	0.168			0.653		0.172	0.487		0.704					
LU				0.219			0.260							
UR									0.629					
SZ								0.272		0.302				
OW								0.184		0.069				
NW								0.070						
GL										0.510				
ZG					0.009			0.071						
FR			0.321			0.593								
SO	0.136	0.059		0.128										
BS		0.005												
BL	0.028	0.320												
SH		0.265												
AR								0.125						
AI								0.076						
SG					0.073			0.422		0.490				
GR											1.00	0.202		
AG		0.352			0.294									
TG					0.209									
TI												0.798		
VD	0.253		0.641			0.234			0.296					
VS											1.00			
NE	0.190													
GE			0.038											
JU	0.224													
Total (in 1000 ha)	153	44	48	72	110	42	97	71	54	23	29	106	134	134

^{*1} Nummern der Wirtschaftsregionen wurden nach Tabelle 10 gewählt (Bsp. 1=Jura West).

^{*2} Beispiel Bern: Es liegen 16.8 % der Waldfläche der Wirtschaftsregion Jura West (1) im Kanton Bern.

2.7 Umrechnung von Volumen [m^3] in Energieinhalt [PJ]

Energieinhalt bei Gewicht x

Berechnet wurde der Primärenergieinhalt der Waldenergieholzmengen. Dazu wurde ein Heizwert für Nadelholz von 2260 [kWh/t] und Laubholz 2160 [kWh/t] verwendet [10]. Dieser Heizwert bezieht sich auf waldfrisches Holz [Wassergehalt 50%].

Umrechnung Volumen in Gewicht

Als Faktoren für die Umrechnung von m^3 in Tonnen wird gemäss Riegger 2004 [19] die Rohdichte 1.1 [t/ m^3] für Laubholz und 0.85 [t/ m^3] für Nadelholz verwendet. Die Verhältnisse von Laub- zu Nadelholz ergeben sich aus den Anteilen für Laub- und Nadelholz und bewegen sich zwischen 3:2 und 5:2. Die genauen Anteile können den Resultattabellen im Anhang entnommen werden. Laubholz hat einen hohen Anteil, weil deutlich mehr Nadelholz stofflich verwendet wird.

Umrechnung von Volumen [m^3] in Energieinhalt [J]

Der Umrechnungsfaktor von kWh in Joule beträgt $3.6 \cdot 10^6$ [J/kWh] [7]. Die Berechnung von Volumen in Energieinhalt kann der folgenden Formel entnommen werden:

Primärenergiemenge in J

$$\begin{aligned}
 &= (\text{Menge Nadelholz} [\text{in } m^3] * \text{Faktor } m^3 \text{ in Tonnen} \left[0.85 \frac{\text{t}}{m^3} \right] * \text{Energieinhalt} \left[2260 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right]) \\
 &+ (\text{Menge LbH} [\text{in } m^3] * \text{Faktor } m^3 \text{ in Tonnen} \left[1.1 \frac{\text{t}}{m^3} \right] * \text{Energieinhalt} \left[2160 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right]) \\
 &\quad * \text{Umrechnungsfaktor kWh in J} [3.6 \cdot 10^6]
 \end{aligned}$$

3 Resultate

3.1 Übersicht

Die Waldenergieholzpotenziale werden für die ganze Schweiz und kantonal und im Fall des nachhaltigen Potenzials (NP) zusätzlich für die fünf Grossregionen Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite ausgewiesen. Wie bereits erwähnt (Kap. 2.5.2), sind die nachhaltigen Potenziale in ein rein ökologisches Potenzial und zwei ökologisch-ökonomische Potenziale aufgeteilt. Alle Ergebnisse werden für drei Bewirtschaftungsszenarien und drei Zeitperioden als Volumen und als Energiemengen angegeben. Die Angaben enthalten keine Stöcke, Wurzeln oder Nadeln und Blätter, wohl aber Rinde und Reisig.

Das theoretische Waldenergieholzpotenzial beträgt je nach Bewirtschaftungsszenario gut 12 bis 16 Mio. m³/a (*Tabelle 9*). Neben dem gesamten Zuwachs und dem allfälligen Vorratsabbau wird auch die Mortalität berücksichtigt. Berücksichtigt man die Szenarien «Vorratsanstieg» und «moderater Vorratsabbau», ist weniger als die Hälfte des theoretischen Potenzials nachhaltig ökologisch nutzbar, nämlich knapp 3.5 bis 5 Mio. m³/a. Berücksichtigt man die Ernte-, Hack- und Transportkosten gemäss «Marktpreisen», ergeben sich zwischen 2 und knapp 3.5 Mio. m³ pro Jahr. Das entspricht rund 15 bis 27 PJ. Werden auch Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect) einbezogen, beträgt die Menge zwischen 2.5 bis 4 Mio. m³ pro Jahr (*Tabelle 9*).

Die grössten ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenziale finden sich gemäss «Marktpreisen» und gemäss «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)» für die Zeitperiode 2017–2026 in den Kantonen Bern, Zürich, Waadt, Aargau, Luzern, Solothurn und Freiburg. Bei Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald können besonders in Bergregionen, wie im Kanton Wallis oder Graubünden deutlich grössere Mengen von über 6-mal mehr Holz bereit gestellt werden (*Abbildung 8*).

Die bereits genutzte Waldenergieholzmenge beläuft sich gesamtschweizerisch auf 2.2 Mio. m³/a. Wird als Waldbewirtschaftungsszenario der «moderate Vorratsabbau» gewählt, ist das zusätzlich nutzbare Potenzial deutlich grösser als beim Szenario «Vorratsanstieg» und beträgt gesamtschweizerisch jährlich für die Zeitperiode 2017–2026 gemäss «Marktpreisen» zwischen fast 0.5 und 1.2 Mio. m³. Gemäss «Marktpreisen» haben Gebirgsregionen und die Alpensüdseite nur sehr kleine oder gar keine ökologisch-ökonomisch zusätzlichen Potenziale – das Mittelland und der Jura dagegen grössere. Bei Berücksichtigung von «Subventionen im Schutzwald» könnten jedoch deutlich grössere zusätzlich nutzbare Waldenergieholzpotenziale von 1.2 bis 2.0 Mio./m³ genutzt werden. Die grössten Mehrnutzungen bei Berücksichtigung von Subventionen gemessen an der nachhaltigen Nutzung gemäss «Marktpreis» befinden sich in den Alpen und auf der Alpensüdseite (*Abbildung 8*).

Tabelle 9 zeigt einen gesamtschweizerischen Überblick zu allen Waldenergieholzpotenzialen in Volumen und Primärenergieinhalt. In den folgenden Abbildungen können nicht immer alle Szenarien, Holzmarktsituationen usw. gezeigt werden.

Tabelle 9: Waldenergieholzpotenziale der Schweiz (gerundete Werte, inkl. Reisig und Rinde, ohne Wurzelstock, Nadeln und Blätter).

Oberer Tabelle: Berücksichtigung des ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzials gemäss «**Marktpreis**».

Untere Tabelle: Berücksichtigung des ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzials gemäss «**Subventionen im Schutzwald**».

Im Anhang sind die Resultate auch für die jeweiligen Kantone abgebildet (ab Kap. 5).

Bewirtschaftungszenario	Einheit	Theoretisches Potenzial	Ökologisch nachhaltiges Potenzial												Zusätzlich nutzbares Potenzial gemäss « Marktpreis »				
			Holzmarktsituation												Holzmarktsituation				
			weniger energieholzfrendlich				energieholzfrendlich				weniger energieholzfrendlich				energieholzfrendlich				
			2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	
Vorratsanstieg	Mio. m ³ /a	12.2	12.1	3.4	3.4	4.2	4.2	4.1	1.9	1.9	2.4	2.4	2.2	-0.26	-0.28	0.27	0.28	0.24	
Moderater Vorratsabbau	Pj ¹ /a	93	93	26.6	26.7	26.4	32.5	32.6	32.3	15.3	15.4	15.0	19.2	19.4	19.0	17.1	0	0	2.5
Starker Vorratsabbau	Mio. m ³ /a	14.1	13.7	5.0	4.9	4.5	6.3	6.1	5.5	2.6	2.6	3.2	3.3	3.3	2.8	2.2	0.48	0.44	0.09
	Pj ¹ /a	108	104	39.3	38.7	34.8	48.5	47.7	42.9	21.0	20.1	17.8	26.7	26.2	22.5	17.1	4.3	4.0	1.1
	Mio. m ³ /a	16.3	14.3	13.5	-	-	7.8	7.5	6.4	-	-	4.2	4.1	3.2	2.2	-	-	-	2.0
	Pj ¹ /a	124	120	102	-	-	60.4	58.3	49.4	-	-	34.4	32.6	25.2	17.1	-	-	-	17.3
																		16.5	
																		8.1	

Bewirtschaftungszenario	Einheit	Theoretisches Potenzial	Ökologisch nachhaltiges Potenzial												Zusätzlich nutzbares Potenzial gemäss « Subventionen im Schutzwald »				
			Holzmarktsituation												Holzmarktsituation				
			weniger energieholzfrendlich				energieholzfrendlich				weniger energieholzfrendlich				energieholzfrendlich				
			2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	
Vorratsanstieg	Mio. m ³ /a	12.2	12.1	3.4	3.4	4.2	4.2	4.1	2.3	2.3	2.9	2.9	2.8	2.2	0.14	0.1	0.7	0.7	1.2
Moderater Vorratsabbau	Pj ¹ /a	93	93	26.6	26.7	26.4	32.5	32.6	32.3	18.1	18.1	17.7	22.4	22.5	22.1	17.1	0.9	1.0	0.6
Starker Vorratsabbau	Mio. m ³ /a	14.1	13.7	5.0	4.9	4.5	6.3	6.1	5.5	3.3	3.3	2.8	4.2	4.1	3.6	2.2	1.2	1.1	1.4
	Pj ¹ /a	108	104	39.3	38.7	34.8	48.5	47.7	42.9	26.1	25.6	22.2	32.6	32.0	27.7	17.1	8.9	8.5	5.0
	Mio. m ³ /a	16.3	14.3	13.5	-	-	7.8	7.5	6.4	-	-	5.4	5.1	4.0	2.2	-	-	3.2	2.9
	Pj ¹ /a	124	120	102	-	-	60.4	58.3	49.4	-	-	42.1	39.5	31.4	17.1	-	-	-	24.9
																		22.3	
																		14.2	

¹ Die Umrechnung von Volumen [m³] in Primärenergieinhalt [J] ist in Kapitel 2.7 beschrieben.

3.2 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Waldenergieholzpotenzial stellt die im Wald jährlich maximal nutzbare Holzmenge dar. Sie ergibt sich, wenn die gesamte Holznutzung aus dem Wald energetisch genutzt würde. Dabei ist allerdings anzumerken, dass dies aus Gründen des Klimaschutzes und der Ressourceneffizienz nicht wünschenswert ist [6]. Gesamtschweizerisch beträgt die theoretische Waldenergieholzmenge für das Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg» für die Zeitperiode 2017–2026 jährlich rund 12.2 Mio. m³. Im Fall des Waldbewirtschaftungsszenarios «moderer Vorratsabbau» erhöhen sich die theoretisch verfügbaren Energieholzpotenziale aus dem Wald um bis zu 1.9 Mio. m³, was einem jährlichen Potenzial von 14.1 Mio. m³ entspräche. Noch grössere Mengen von 16.3 Mio. m³ ergeben sich für das Waldbewirtschaftungsszenario «starker Vorratsabbau». Ein möglicher Vorratsabbau erhöht also nicht nur das nutzbare, sondern auch das theoretische Potenzial.

Die theoretischen Potenziale können nach Kantonen (auch getrennt in Nadel- und Laubholz) und für die ganze Schweiz dem Kapitel 5.1, *Tabelle 11* entnommen werden. Die grössten Potenziale befinden sich im Kanton Bern.

3.3 Nachhaltiges Potenzial

Wegen seiner Relevanz wurde das nachhaltige Potenzial hinsichtlich seiner Struktur und seiner räumlichen Verteilung sehr detailliert untersucht. Es wird ein rein ökologisches und ein ökologisch-ökonomisches nachhaltiges Potenzial unterschieden, welches sich gemäss «Marktpreisen», beziehungsweise gemäss «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)» berechnet (Kap. 2.5.2.4).

Einfluss der Bewirtschaftung

Abbildung 2 zeigt die Energieinhalte für die unterschiedlichen Szenarien und Holzmarktsituationen.

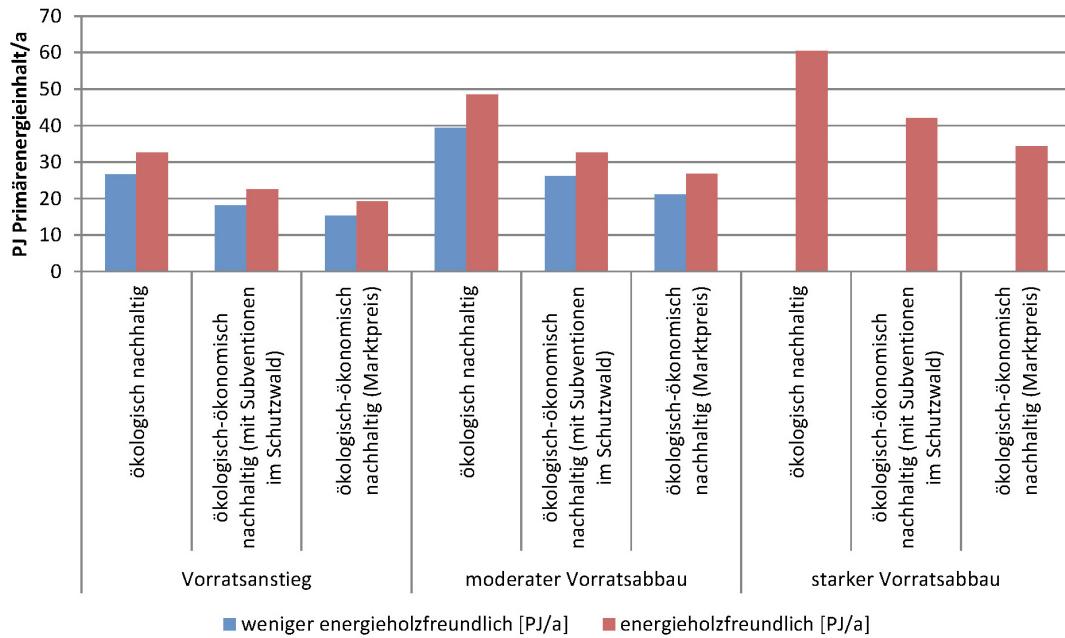


Abbildung 2: Übersicht über die nachhaltigen Potenziale von Waldenergieholz in der Schweiz.

Gezeigt werden die drei Szenarien «Vorratsanstieg», «moderer Vorratsabbau» und «starker Vorratsabbau» für die Zeitperiode 2017 bis 2026. Dargestellt sind die Primärenergiemengen des ökologisch nachhaltigen und die beiden ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenziale gemäss «Subventionen im Schutzwald» und «Marktpreis» (Kap. 2.5.2).

Dabei zeigt sich, dass die Art und Weise der Bewirtschaftung und die Lage auf dem Holzmarkt für die realistischen Szenarien («Vorratsanstieg» und «moderater Vorratsabbau») Differenzen von 1.4 Mio m³ (ca. 11 PJ) bei «Marktpreisen» und fast 2 Mio. m³ (ca. 14 PJ) bei «Subventionen im Schutzwald» bewirken können. Bei Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect) ergeben sich um 0.4 bis 0.9 Mio m³ (ca. 3 bis 6 PJ) höhere nachhaltige Potenzialmengen, als wenn der Marktpreis unterstellt wird (*Tabelle 9*).

Die ökologisch nachhaltigen Waldenergieholzpotenziale «Vorratsanstieg» und «moderater Vorratsabbau», bewegen sich in der Schweiz jährlich zwischen 3 und 6 Mio. m³. Werden die Holzmengen abgezogen, die nicht kostendeckend bereitgestellt werden können, ergeben sich gemäss «Marktpreis» wesentlich kleinere ökologisch-ökonomisch nachhaltig nutzbare Mengen zwischen jährlich knapp 2 und 3 Mio. m³ (*Abbildung 5*). Werden Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect) mitberücksichtigt können jährlich knapp 2.5 bis gut 4 Mio. m³ genutzt werden. Subventionen haben demnach einen grossen Einfluss auf die genutzte Menge und auf die zukünftig nutzbaren Potenziale.

Die Potenziale nehmen im Zeitablauf ab (*Abbildung 3*). Dies liegt daran, dass bei den Szenarien mit Vorratsabbau dieser in den nächsten 30 Jahren stattfindet. Ökologisch und ökonomisch ergeben sich gemäss «Marktpreisen» für das Szenario «starker Vorratsabbau» kurzfristig die grössten Energieholzmengen. Das nachhaltige Potenzial des Szenarios «moderater Vorratsabbau» ist jedoch meist grösser, als bei einer Nutzung gemäss «Vorratsanstieg» und kann langfristig die grössten Waldenergieholzmengen nachhaltig bereitstellen.

Kosten

Abbildung 3 zeigt die langfristige Entwicklung der Waldenergieholzpotenziale. Dargestellt ist die ökologisch-ökonomisch nachhaltige Waldenergieholznutzung gemäss «Marktpreis», also bis zu einer Preisobergrenze von 5.9 Rp. pro kWh. Bei diesem Marktpreis ergeben sich über die nächsten 40 Jahre zwischen knapp 75 («Vorratsanstieg») und 100 Mio. m³ («starker Vorratsabbau») Waldenergieholz. Langfristig übersteigt die Nutzungsmenge des Waldbewirtschaftungsszenarios «moderater Vorratsabbau» diejenigen der anderen Szenarien. Für einen Rappen mehr könnten über die gesamte Zeitspanne bis 2056 eine Mehrnutzung von (i) 20 Mio. m³ gemäss «Vorratsanstieg», (ii) gut 25 Mio. m³ bei einem «moderaten Vorratsabbau» und (iii) knapp 20 Mio. m³ bei einem «starken Vorratsabbau» erreicht werden.

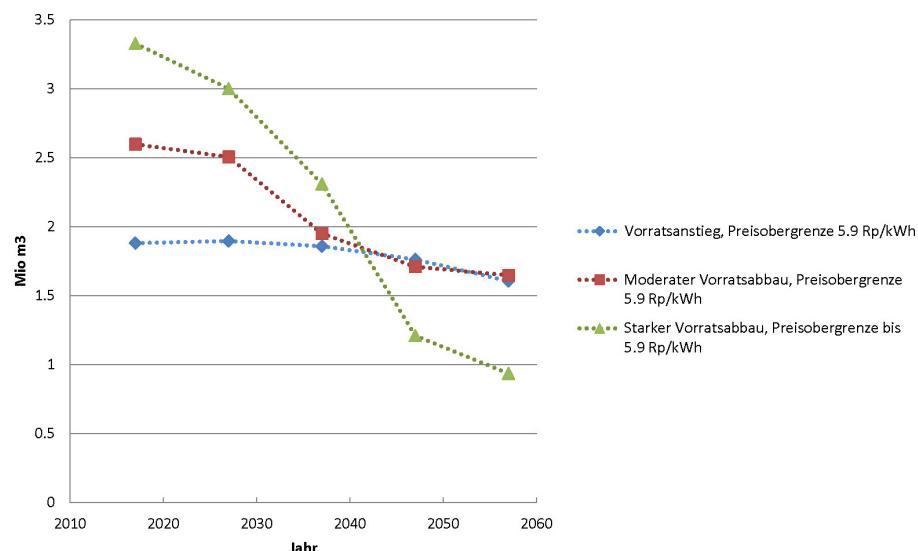
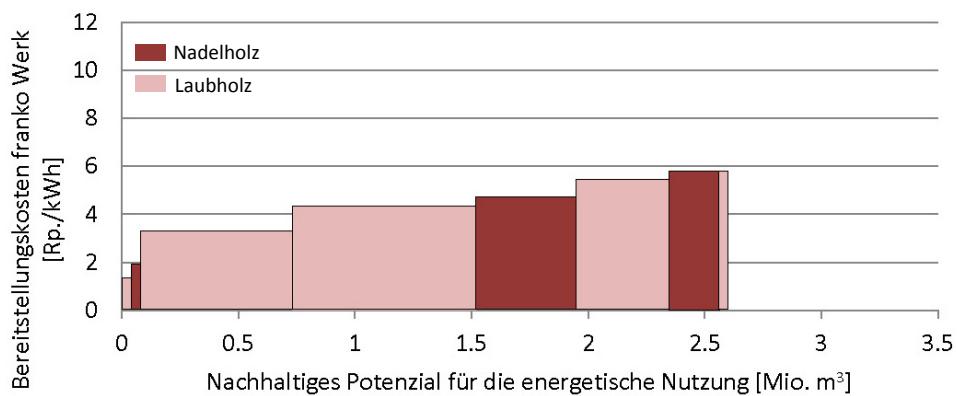


Abbildung 3: Langfristige Entwicklung des ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Waldenergieholzpotenzials der Schweiz bei Marktpreisen und einem weniger energieholzfreundlichen Holzmarkt (V1).

Dargestellt sind jährlich nutzbare Holzmengen für drei Waldbewirtschaftungsszenarien von 2017 bis 2056 bei einer Nutzung des Waldholzes bis 5.9 Rp./kWh franko Werk.

Abbildung 4 zeigt, welche Holzmengen zu welchen Kosten ökologisch und ökonomisch nachhaltig bereitgestellt werden können. Beim nachhaltigen Potenzial gemäss Marktpreisen von maximal 5.9 Rp./kWh sind in der Schweiz jährlich rund 2.6 Mio. m³ einheimisches Waldenergieholz wirtschaftlich nutzbar. Mit Berücksichtigung der Subventionen im Schutzwald ergibt sich eine Menge von gut 3.3 Mio. m³, welche für die energetische Nutzung verfügbar ist.

Bei Marktpreisen



Subventionen im Schutzwald

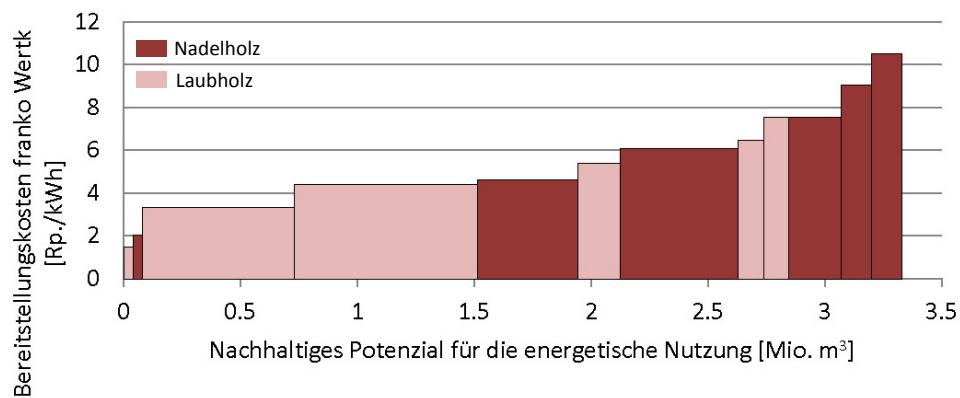


Abbildung 4: Auswirkung der Energieholzpreise und der Subventionen im Schutzwald auf die nachhaltigen Waldenergiedienstleistungen in der Schweiz.

Dargestellt ist das jährlich realisierbare nachhaltige ökologisch-ökonomische Waldholzpotenzial für die energetische Nutzung (aufbereitet als Hackschnitzel) bei einem Waldbewirtschaftungszenario «moderer Vorratsabbau» und der Holzmarktsituation «weniger energieholzfreundlich» (V1) für die Zeitperiode 2017 bis 2026 nach Bereitstellungskosten franko Werk.

Bei Marktpreisen wird ein maximaler Preis für Hackschnitzel von 5.9 Rp./kWh angenommen [3]. Die Potenziale ergeben sich nach Abzug des Holzes von Reservatflächen, der Ernteverluste sowie der stofflichen Nutzung. Unter Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect), erhöht sich die Möglichkeit der kosten-deckenden Bereitstellung deutlich von 2.6 Mio. m³ (Tabelle 18) auf gut 3.3 Mio. m³ (Tabelle 25).

Durch Subventionen werden die Kosten der Ernte im Schutzwald (Flächen gemäss Projekt SilvaProtect-Schweiz) [17] bis zu einer Grenze von 150 CHF/m³ und die Kosten für Hacken und Transport bis zu einer Grenze von 40 CHF/m³ abgegolten.

Regionale Betrachtung

Nachstehend (*Abbildung 5*) geht es um einen Vergleich des ökologisch nachhaltigen Potenzials mit dem ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzial auf regionaler Ebene. Hierzu wurden die 14 Wirtschaftsregionen der Schweiz zu fünf *Produktionsregionen* zusammengefasst (*Tabelle 10*):

Tabelle 10: Produktionsregionen und Wirtschaftsregionen.

Produktions-regionen	Wirtschaftsregionen	Nummer
Jura	Jura West	1
	Jura Ost	2
Mittelland	Mittelland West	3
	Mittelland Mitte	4
	Mittelland Ost	5
Voralpen	Voralpen West	6
	Voralpen Mitte	7
	Voralpen Ost	8
Alpen	Alpen Nordwest	9
	Alpen Mitte	10
	Alpen Nordost	11
	Alpen Südwest	12
	Alpen Südost	13
Alpensüdseite	Alpensüdseite	14

Grosse Mengen des Schweizer Waldenergieholzes befinden sich, bedingt durch den hohen Laubholzanteil, in den Produktionsregionen Jura und Mittelland.

Im *Jura* sind unabhängig von Holzerntekosten beim Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg», ökologisch nachhaltige Mengen zwischen 0.7 und 0.8 Mio. m³/a nutzbar. Bei einem Waldbewirtschaftungsszenario mit «moderatem Vorratsabbau» können die Waldenergieholzmengen bei einer weniger energieholzfrendlichen Holzmarktsituation auf rund 1 Mio. m³/a und bei einem energieholzfrendlichen Markt auf 1.3 Mio. m³/a gesteigert werden. Die Mengen nehmen im Zeitverlauf leicht ab. Werden zusätzlich die Holzerntekosten für Hacken und Transport mitberücksichtigt ergeben sich deutlich geringere Potenziale. Die Reduktion beträgt zwischen 30% und fast 40%. Im Vergleich zu den Gebirgsregionen sind das jedoch eher geringe Abnahmen.

Im *Mittelland* finden sich die grössten nachhaltigen Waldenergieholzpotenziale der Schweiz. Unabhängig von den Holzerntekosten liegen sie, je nach Szenario und Holzmarktsituation bei 1.6 und 2.8 Mio. m³/a. Gemäss «Marktpreis» ergibt sich je nach Zeitpunkt und Waldbewirtschaftungsszenario eine Abnahme um 20 bis 30%. Grosse zusätzliche Potenziale sind jedoch nicht zu erwarten, da hier bereits grosse Mengen genutzt werden.

Grosse zusätzliche Potenziale befinden sich in den Gebirgsregionen, sind aber aus Kostengründen schwer zu realisieren.

Im den *Voralpen* und *Alpen* sind grosse ökologisch nachhaltige Waldenergieholzpotenziale vorhanden. Es handelt sich vor allem um Nadelholz. Allerdings können bei dem angenommenen, beziehungsweise aktuellen Energieholzpreis für Grünschnitzel von 5.9 Rp./kWh nur geringe Anteil von etwa 1/3 in den Voralpen und 1/10 in den Alpen kostendeckend geerntet werden.

Ökologische Mehrmengen können insbesondere in den Voralpen genutzt werden, wenn statt dem Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg» das Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau» umgesetzt wird. Die ökologischen Nutzungsmengen in den Voralpen sind dann sogar vergleichbar mit denjenigen des Waldbewirtschaftungsszenarios gemäss «starkem Vorratsabbau» und betragen für das ökologische Potenzial und die «weniger energieholzfrendliche Holzmarktsituation» zwischen 0.9 und 1.3 Mio. m³/a. Bei einer «energieholzfrendlichen Holzmarktsituation» sind sogar Mengen zwischen 1.3 und gut 1.5 Mio. m³ zu erwarten. In den Alpen betragen die ökologischen Potenziale bei einer «weniger energieholzfrendlichen» Holzmarktsituation zwischen 0.4 und 0.9 Mio. m³/a. Werden allerdings die Holzernte, Hack- und Transportkosten in die Be trachtung einbezogen, so bleibt nur eine sehr geringe Holzmenge für die energetische Nutzung übrig.

Das ökologisch nachhaltige Waldenergieholzpotenzial auf der *Alpensüdseite* beträgt zwischen 0.1 und 0.4 Mio. m³/a. Es handelt sich hauptsächlich um Laubholz. Bei kostendeckender Bereitstellung verringert sich die Menge deutlich und nur wenige zehntausend Kubikmeter verbleiben für die Energieholznutzung.

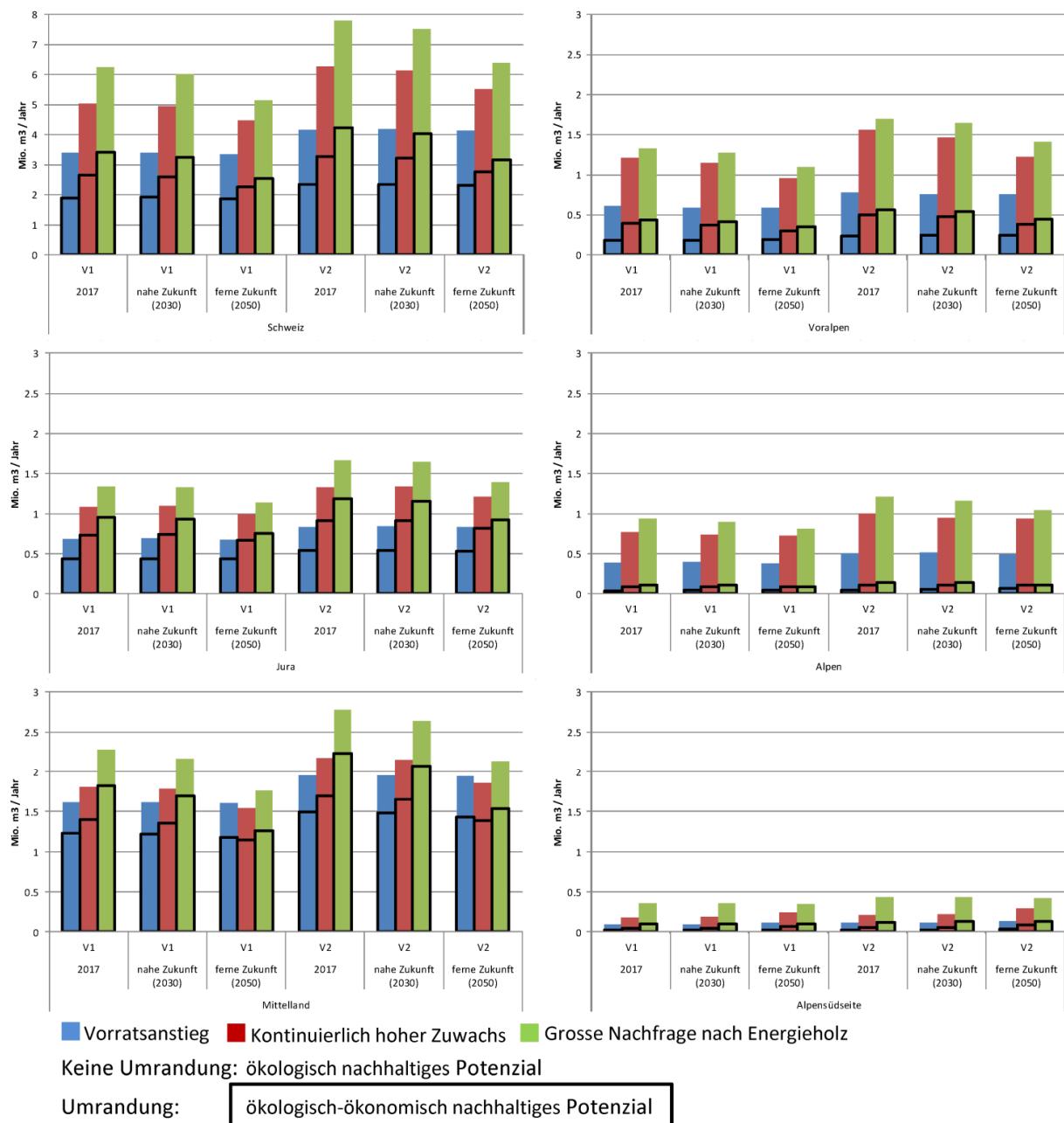


Abbildung 5: Waldenergieholzmengen des ökologisch nachhaltigen und des ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzials gemäss «Marktpreisen».

Dargestellt für die Schweiz und für fünf Grossregionen, drei Waldbewirtschaftungsszenarien («Vorratsanstieg», «moderater Vorratsabbau», «starker Vorratsabbau»), zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1; «energieholzfreundlich», V2) und drei Zeitperioden (2017 bis 2026 → «2017», 2017 bis 2036 → nahe Zukunft «2030», 2017 bis 2056 → ferne Zukunft «2050»).

Die kantonalen Ergebnisse zum **ökologisch** nachhaltigen Potenzial finden sich im Anhang Kapitel 5.2.1, *Tabelle 12 bis Tabelle 14*. Ökologisch-ökonomisch nachhaltige Potenziale gemäss «Marktpreis» sind im Anhang Kapitel 5.2.2, *Tabelle 15 bis Tabelle 21* enthalten. Die ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenziale gemäss «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)» können *Tabelle 22 bis Tabelle 28* entnommen werden.

Geordnet nach Zeitperiode (2017–2026, 2017–2036, 2017–2056) zeigen die Tabellen Mengenwerte für die drei Waldbewirtschaftungsszenarien «Vorratsanstieg», «moderater Vorratsabbau» und «starker Vorratsabbau»

sowie die beiden Holzmarktsituationen «energieholzfreundlich» (V1) und «weniger energieholzfreundlich» (V2). Zudem werden Laub- und Nadelholzanteile am Energieholz ausgewiesen.

3.4 Bereits genutztes Potenzial

Rund zwei Drittel des heute für energetische Zwecke bereits genutzten Waldenergieholzes stammt aus den Kantonen Bern, Waadt, Graubünden, St. Gallen, Tessin, Zürich, Aargau (*Abbildung 6*). Die entsprechenden Waldenergieholzmengen können Kapitel 5.3 entnommen werden, wo auch nach Laub- und Nadelholz sowie nach Stückholz und Holzschnitzel unterschieden wird.

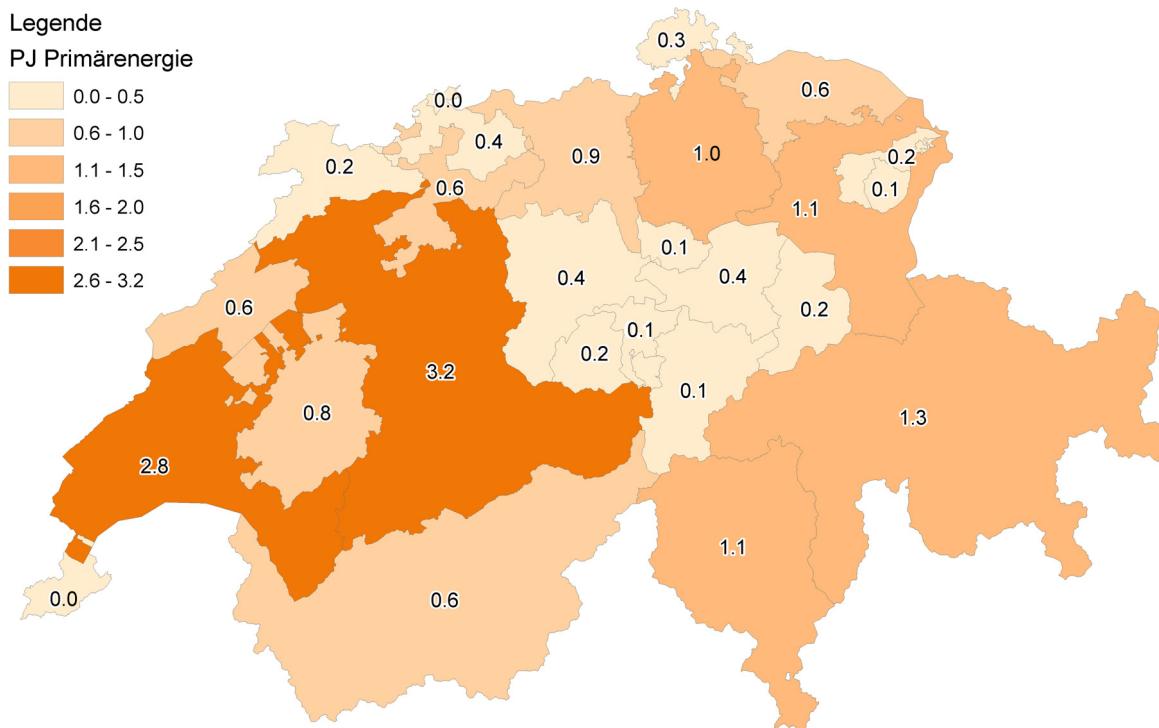


Abbildung 6: Bereits genutztes Waldenergieholzpottenzial in den Kantonen (2014).

3.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial

Betrachtet man die zusätzlich nutzbaren Potenziale, kann einerseits die Differenz zum ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzial gemäss «Marktpreis» und andererseits die Differenz zum ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzial gemäss «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)» berechnet werden. Gemäss «Marktpreis» sind viele Regionen, insbesondere im Gebirge wenig interessant (Kap. 3.3). Daher werden hier die zusätzlichen Waldenergieholzpottenziale unter Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald räumlich dargestellt (*Abbildung 7*). Sie gelten für einen «moderaten Vorratsabbau» bei einem «weniger energieholzfreundlichen» Holzmarkt.

Die negativen Werte in den Südkantonen deuten darauf hin, dass die angenommene Subventionshöhe von 190 CHF inklusiv Ernte-, Hack- und Transportkosten heute in diesen Regionen überschritten werden und auch bereits teureres Holz in schwierigem Gelände genutzt wird.

Die zusätzlichen Waldenergieholzpottenziale unter Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald sind im Detail den *Tabellen 30 bis 32* zu entnehmen.

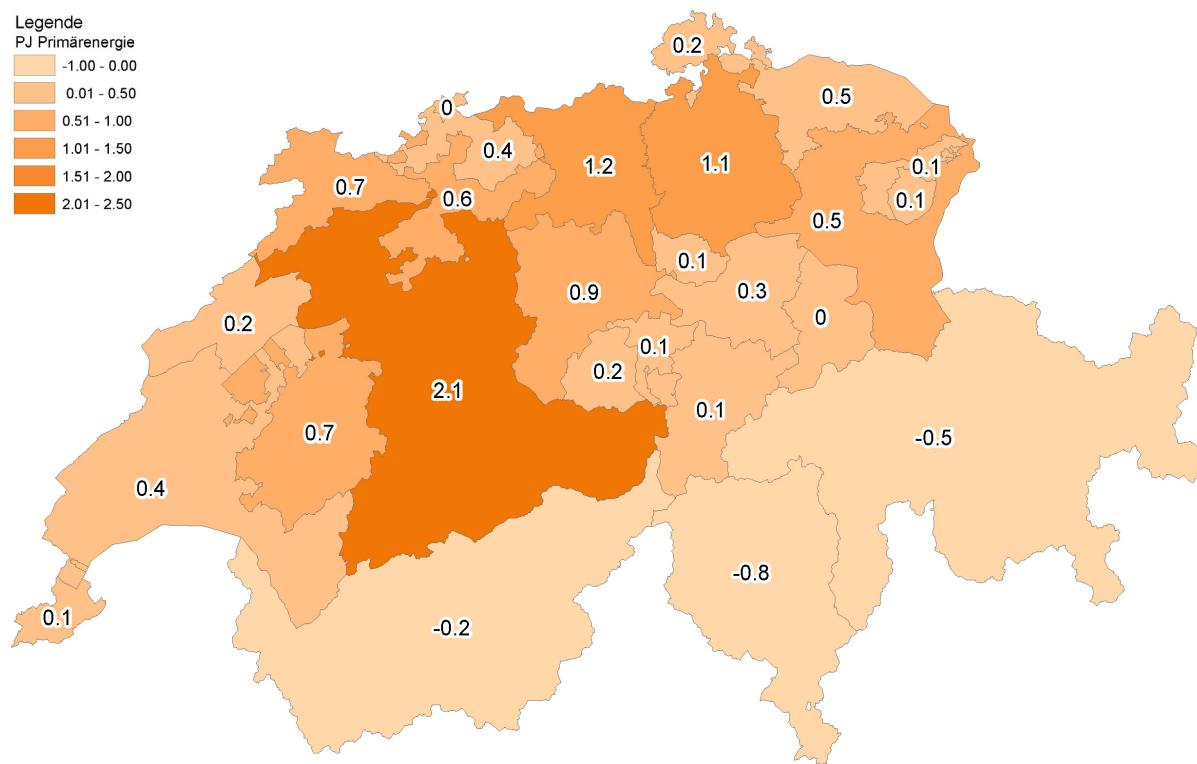


Abbildung 7: Zusätzlich nutzbare Waldenergieholzpotenziale für einen «moderaten Vorratsabbau» bei einer «weniger energieholzfreundlichen» Holzmarktsituation und bei «Subventionen im Schutzwald».

4 Diskussion und Folgerungen

4.1 Vergleich mit anderen Studien

Bei Vergleichen mit anderen Studien ist es wichtig, die zugrunde liegenden Waldbewirtschaftungsstrategien und die Methoden der Potenzialermittlung zu kennen und zu berücksichtigen. Eine besondere Bedeutung kommt dabei den Restriktionen zu.

Vergleich mit Thees et al. (2013) [23]

Vergleich der ökologisch nachhaltigen Potenziale

Die Szenarien «Mehrnutzung 25%» und «Mehrnutzung 50%» aus Thees et al. (2013) [23] beruhen auf anderen Annahmen als diejenigen in der vorliegenden Studie und sind deswegen nicht mit den Szenarien der vorliegenden Studie vergleichbar. Dagegen kann das Szenario «Nutzung wie bisher» [23] mit dem Szenario «Vorratsanstieg» der vorliegenden Studie für den Zeitraum 2017 bis 2026 verglichen werden. «Nutzung wie bisher» hat gemäss Thees et al. (2013) ein Potenzial zwischen 3.1 und 4.4 Mio. m³/a. Es handelt sich um ein rein ökologisch-nachhaltiges Potenzial, bei dem die Reservatflächen enthalten sind. Diese sind in der vorliegenden Studie beim ökologischen Potenzial abgezogen. Für das Szenario «Vorratsanstieg» ergibt sich für die Reservatflächen der ganzen Schweiz eine Menge von knapp 0.4 Mio. m³. Zieht man diese von den Potenzialen aus Thees et al. (2013) [23] ab, erhält man für das Szenario «Nutzung wie bisher» 2.7 beziehungsweise 4.0 Mio. m³. In der vorliegenden Studie beträgt die Menge für das entsprechende Szenario «Vorratsanstieg» 3.4 bis 4.2 Mio. m³ – und ist damit um etwa 0.2 bis 0.5 Mio. m³ höher, als das früher ermittelte Potenzial.

Vergleich der ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenziale gemäss «Marktpreis»

Nimmt man bei Thees et al. (2013) [23] beim Szenario «Nutzung wie bisher» ebenfalls eine Kostengrenze von 5.9 Rp./kWh an, ergibt sich für einen weniger energieholzfreundlichen Holzmarkt eine Menge von 2.5 Mio. m³. Damit werden die Ernte-, Hack- und Transportkosten berücksichtigt. Für den Vergleich müssen wiederum 0.4 Mio. m³ für Reservatflächen abgezogen werden (siehe oben). Damit verbleiben 2.1 Mio. m³ Energieholz. Dieses ist gesamtschweizerisch ökonomisch verfügbar. Die so ermittelte Menge ist 0.2 Mio. m³ beziehungsweise 15% grösser als die in der vorliegenden Studie für das ökologisch-ökonomisch nachhaltige Potenzial gemäss «Marktpreis» von 1.9 Mio. m³.

Die vorliegende Studie konnte methodisch differenzierter und zudem mit den neuesten LFI-Daten durchgeführt werden. Auch sind die Szenarien besser nachvollziehbar und mit der Studie zu den Holznutzungspotenzialen der Schweiz von Taverna et al. (2016) [21] vergleichbar.

Vergleich mit Taverna et al. (2016) [21]

Vergleich des ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzials gemäss «Subventionen im Schutzwald» (SilvaProtect)

Das nachhaltige Waldenergieholzpotenzial von Taverna et al. (2016) [21] berücksichtigt beim nachhaltigen Potenzial Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect). Zudem werden Reservatflächen nicht in Abzug gebracht. Zudem werden die Potenziale für einen «weniger energieholzfreundlichen Holzmarkt» (V1) und für das Szenario «starker Vorratsabbau» für einen «energieholzfreundlichen Holzmarkt» berechnet. Die Ausgangsszenarien «Vorratsanstieg», «moderer Vorratsabbau» und «starker Vorratsabbau» sind dagegen mit der vorliegenden Studie vergleichbar. Werden für die Reservatflächen 0.4 Mio. m³ für «Vorratsanstieg» und 0.6 Mio. m³ für den «moderen Vorratsabbau» abgezogen, so ergeben sich für die beiden Waldbewirtschaftungsszenarien 2.7 Mio. m³, beziehungsweise 3.8 Mio. m³. Diese Potenziale sind um ca. 15% höher als jene der vorliegenden Studie (2.3 Mio. m³), respektive 3.3 Mio. m³ (Tabelle 25). Taverna et al. (2016) [21] berücksichtigen zusätzlich die Waldflächenzunahme. Diese beträgt bis zur Periode 2017 bis 2026 fast 10% der Gesamtmenge. Das heisst, die Potenziale von Taverna et al. (2016) [21] können gegenüber der vorliegenden Studie nochmals um etwa 0.3, bzw. 0.4 Mio. m³ verringert werden und ergeben mit gesamtschweizerisch 2.4 Mio. m³, beziehungsweise 3.4 Mio. m³ praktisch die gleichen Mengen wie in der vorliegenden Studie für das nachhaltig ökologisch-ökonomische Potenzial unter Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald.

Die vorliegende Studie ist also mit den Ergebnissen von Taverna et al. (2016) [21] vergleichbar. Die Potenziale wurden jedoch in der vorliegenden Studie mit räumlich besserer Auflösung regional abgeschätzt und können mit und ohne Subventionen sowie auch auf der Basis der Energiemengen verglichen werden.

Vergleich mit der Energiestrategie 2050 von Prognos [15]

In der Prognos-Studie [15] weisen Kirchner et al. ein «ökologisches» Potenzial von 123 PJ für das Jahr 2003 aus. Davon entfallen 45 PJ auf die «holzige Biomasse aus Wald, Feld und Hecken». Diese Zahlen stimmen mit unseren aktuellen Resultaten recht gut überein. Für das Jahr 2030 prognostizieren Kirchner et al. für diese Kategorie allerdings 111 PJ, die als realisierbares Potenzial bezeichnet werden. Dies stellt eine sehr grosse Energiemenge dar, welche in etwa unserem theoretischen Potenzial (aus Wald- und Flurholz) entspricht. Sie lässt sich aber aus unserer Sicht kaum ausschliesslich für energetische Zwecke nachhaltig nutzen, weil sie keine stoffliche Verwendung des Holzes mehr zulässt.

Vergleich mit BFE (2010) [18]

Gemäss BFE (2010) [18] beträgt die nachhaltig nutzbare Energieholzmenge aus dem Wald etwa 4 Mio. m³. Diese Menge entspricht fast dem ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzial unter Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald für das Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau» (3.3 bis 4.2 Mio. m³).

Im «Trendszenario» prognostiziert die Studie BFE (2010) [18] zudem für 2025 3.35 Mio. m³. Diese Menge entspricht der in der vorliegenden Studie für das Szenario «Vorratsanstieg» ausgewiesenen jährlichen ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Menge (inkl. Subventionen) bei einem weniger energieholzfreundlichen Markt für die Zeitperiode 2017 bis 2026.

Die vorliegende Studie ist also auch mit den Ergebnissen des BFE (2010) [18] vergleichbar.

4.2 Folgerungen

Die Betrachtungen zeigen, dass die Waldenergieholzpotenziale keine festen Grössen sind [22]. Jedes einzelne Potenzial ist von verschiedenen Einflussgrössen abhängig, die im Zeitablauf ändern können. Sie hängen in erster Linie davon ab, wie der Wald bewirtschaftet wird und wie hoch die Preise der verschiedenen Holzsortimente sind. Betrachtet man die Szenarien «Vorratsanstieg» und «moderater Vorratsabbau», bewegt sich das (rein) ökologisch nachhaltige Waldenergieholzpotenzial zwischen 3.5 und 5 Mio. m³ (27 bis 49 PJ) pro Jahr. Beim ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Waldenergieholzpotenzial bei «Marktpreisen» bewegen sich diese Potenziale zwischen 2 und knapp 3.5 Mio. m³ pro Jahr (15 bis 27 PJ) beziehungsweise zwischen 2.5 und 4 Mio. m³ (18 bis 33 PJ) pro Jahr bei Berücksichtigung von «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)».

Das Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg» ist aus gesamtschweizerischer Sicht das wahrscheinlichste. Allerdings wird auf lange Frist das Szenario «moderater Vorratsabbau» von der Wald- und Holzwirtschaft favorisiert, seine Realisierung ist aber aus heutiger Sicht unsicher. Weniger realistisch erscheint das «Szenario starker Vorratsabbau».

Der Übergang vom Szenario «Vorratsanstieg» zum Szenario «moderater Vorratsabbau» führt zu einem Anstieg des zusätzlich nutzbaren Potenzials um etwa eine Mio. m³ (*Tabelle 9*). Die Realisierung der zusätzlich nutzbaren Potenziale ist stark davon abhängig, ob die Ernte des Waldenergieholzes kostendeckend erfolgen kann. Das heisst, die ökonomischen Restriktionen haben einen starken Einfluss insbesondere in den Gebirgsregionen, wo die Holzernte teuer ist.

Mit Subventionen zur Bewirtschaftung des Schutzwaldes werden grössere Energieholzmengen mobilisiert. Gegenüber der Betrachtung gemäss «Marktpreisen» ergibt sich bei einem Szenario «moderater Vorratsabbau» eine jährliche Mehrnutzung von 5 PJ (+24%). Anteilmässig befinden sich die grössten auf Subventionen zurückzuführenden Mehrnutzungen im Südteil der Schweiz sowie in der Zentralschweiz (*Abbildung 8*). Interessant ist die Tatsache, dass zum Beispiel in Bern nur 1.4-mal so viel Energieholz durch Subventionierung gegenüber kostendeckender Marktpreisvariante geerntet werden kann. Der Grund liegt darin, dass der Kanton Bern zu einem grossen Teil auch Mittellandverhältnisse mit entsprechend günstigeren Holzerntekosten aufweist und die Ausgangs(bezugs)mengen für den relativen Vergleich höher sind, so dass die Holzernte dort zu Marktpreisen kostendeckend erfolgen kann. Absolut ist der Zugewinn an Energieholz durch Subventionen grösser als beispielsweise im Kanton Graubünden.

Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 sollten im Hinblick auf die zugrunde gelegten energetisch nutzbaren Waldholzpotenziale überprüft werden.

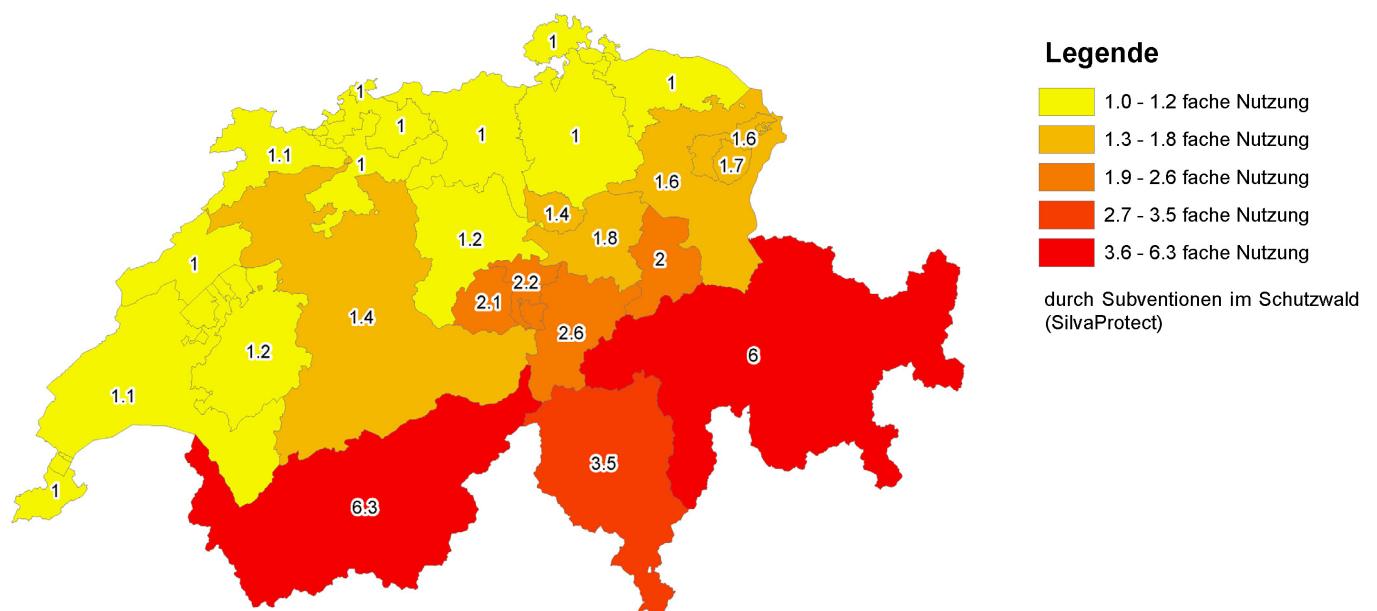
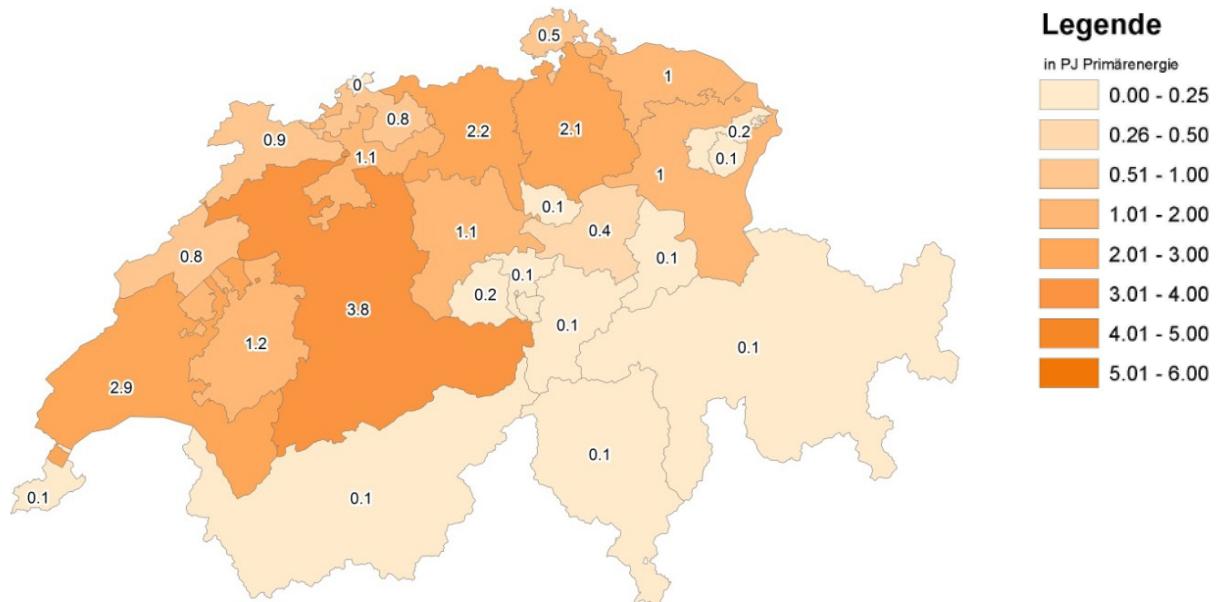


Abbildung 8: Vergleich unterschiedlicher Kostendeckung der jährlich ökologisch-ökonomisch nachhaltig nutzbaren Potenziale. Zugrunde gelegt sind das Szenario «moderater Vorratsabbau» für einen «weniger energieholzfreundlichen Markt (V1)», für die Zeitperiode 2017 bis 2026. Verglichen wird die Variante «Marktpreis» mit der Variante «Subventionen im Schutzwald».

Obere Grafik: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Potenzial in PJ Primärenergie gemäss «Marktpreis».

Untere Grafik: Sie zeigt, wievielmal mehr Energieholz durch die «Subventionen im Schutzwald» gegenüber einer rein marktgerechten Kostendeckung gemäss «Marktpreis» (obere Grafik) aus dem Wald gewonnen werden kann.

5 Anhang

5.1 Theoretische Potenziale – nach Kantonen

Tabelle 11: Jährliches, theoretisches Waldenergieholzpotenzial in den Kantonen und in der Schweiz 2017–2026 nach den drei Szenarien «Vorratsanstieg» (822), «moderer Vorratsabbau» (834), «starker Vorratsabbau» (852). Die Umrechnung von Volumen [m³] in Primärenergieinhalt [J] ist in Kapitel 2.7 beschrieben

In Rinde	2017-2026											
	Vorratsanstieg (822)				Moderater Vorratsabbau (834)				Starker Vorratsabbau (852)			
	Total	Laubholz	Nadelholz	Total	Laubholz	Nadelholz	Total	Laubholz	Nadelholz	Total	Laubholz	Nadelholz
Kanton	Mio.m ³ /a	PJ/a	Mio.m ³ /a	Mio.m ³ /a	PJ/a	Mio.m ³ /a	Mio.m ³ /a	PJ/a	Mio.m ³ /a	PJ/a	Mio.m ³ /a	Mio.m ³ /a
FR	0.499	3.7	0.204	0.294	0.667	5.04	0.261	0.406	0.765	5.78	0.300	0.465
SO	0.471	3.6	0.246	0.225	0.493	3.80	0.240	0.253	0.599	4.61	0.284	0.315
AG	0.801	6.3	0.480	0.321	0.868	6.86	0.522	0.346	1.081	8.55	0.657	0.424
AI	0.070	0.5	0.027	0.044	0.098	0.73	0.034	0.064	0.103	0.78	0.038	0.065
AR	0.114	0.8	0.043	0.071	0.160	1.19	0.056	0.104	0.168	1.27	0.062	0.106
BE	2.165	16.	0.886	1.279	2.550	19.15	0.926	1.624	2.886	21.64	1.028	1.858
BL	0.265	2.1	0.183	0.082	0.309	2.48	0.207	0.103	0.381	3.06	0.258	0.123
BS	0.003	0.0	0.002	0.001	0.004	0.03	0.003	0.001	0.005	0.04	0.003	0.001
GE	0.029	0.2	0.017	0.012	0.036	0.28	0.021	0.015	0.043	0.34	0.026	0.017
GL	0.140	1.0	0.061	0.079	0.180	1.35	0.065	0.115	0.197	1.49	0.077	0.120
GR	0.958	6.9	0.226	0.732	1.067	7.75	0.227	0.839	1.168	8.49	0.249	0.919
JU	0.396	3.0	0.211	0.186	0.432	3.31	0.200	0.232	0.526	4.02	0.234	0.291
LU	0.603	4.5	0.229	0.374	0.724	5.40	0.241	0.483	0.807	6.02	0.267	0.540
NE	0.336	2.6	0.179	0.158	0.366	2.81	0.169	0.197	0.446	3.41	0.199	0.247
NW	0.075	0.5	0.021	0.054	0.111	0.81	0.026	0.085	0.116	0.84	0.026	0.089
OW	0.213	1.5	0.060	0.152	0.310	2.26	0.074	0.236	0.325	2.37	0.078	0.247
SG	0.660	5.0	0.281	0.379	0.858	6.47	0.330	0.528	0.940	7.13	0.384	0.556
SH	0.179	1.4	0.130	0.049	0.212	1.72	0.151	0.061	0.262	2.13	0.190	0.072
SZ	0.324	2.4	0.121	0.203	0.435	3.25	0.150	0.285	0.464	3.49	0.173	0.291
TG	0.400	3.1	0.218	0.182	0.416	3.25	0.228	0.188	0.520	4.06	0.287	0.233
TI	0.664	5.2	0.418	0.247	0.664	5.28	0.422	0.242	0.746	5.97	0.495	0.251
UR	0.156	1.1	0.056	0.100	0.180	1.34	0.059	0.121	0.201	1.52	0.077	0.124
VD	1.165	9.0	0.598	0.567	1.408	10.84	0.670	0.739	1.672	12.87	0.799	0.872
VS	0.580	4.2	0.116	0.464	0.624	4.50	0.117	0.507	0.693	4.99	0.118	0.575
ZG	0.082	0.6	0.034	0.048	0.109	0.82	0.041	0.067	0.118	0.90	0.048	0.071
ZH	0.827	6.4	0.446	0.381	0.872	6.80	0.470	0.402	1.081	8.44	0.588	0.492
CH	12.175	93.	5.492	6.683	14.149	107.53	5.907	8.242	16.313	124.20	6.948	9.365

5.2 Nachhaltige Potenziale – nach Kantonen

Hier werden zunächst die ökologisch nachhaltigen Waldenergieholzpotenziale der Kantone abgebildet (also Potenziale unter Berücksichtigung der Reservatflächen, der Ernteverluste und der stofflichen Nutzung entsprechend Holzmarktsituation). Anschliessend folgen die ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenziale gemäss (i) «Marktpreis» bei Holzerntekosten bis 5.9 Rp./kWh (inklusive Hacken und Transport) und (ii) unter Berücksichtigung von «Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect)». Bei dieser Betrachtung werden für Schutzwaldflächen 190 CHF/m³ und für die restlichen Flächen bis 120 CHF/m³ zur Deckung der Kosten für die Holzernte-, Hack- und Transportkosten angenommen (2.5.2.4). Die Umrechnung von Volumen [m³] in [J] ist in Kapitel 2.7 beschrieben.

5.2.1 Ökologisch nachhaltige Potenziale

Tabelle 12: Ökologisch nachhaltige Waldenergieholzpotenziale 2017–2026 für die drei Szenarien «Vorratsanstieg» (822), «moderer Vorratsabbau» (834) und «starker Vorratsabbau» (852) für zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2) in den Kantonen in Mio. m³ und PJ Primärenergieinhalt.

In Rinde	2017–2026									
	Vorratsanstieg (822)				Moderater Vorratsabbau (834)				Starker Vorratsabbau (852)	
	V1		V2		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.148	1.16	0.184	1.43	0.258	2.00	0.321	2.48	0.384	2.96
SO	0.155	1.22	0.188	1.48	0.196	1.55	0.241	1.89	0.304	2.38
AG	0.287	2.32	0.345	2.77	0.353	2.85	0.425	3.42	0.539	4.34
AI	0.019	0.14	0.023	0.18	0.035	0.27	0.044	0.34	0.047	0.36
AR	0.030	0.23	0.038	0.29	0.057	0.44	0.072	0.55	0.077	0.59
BE	0.700	5.43	0.867	6.69	0.948	7.30	1.187	9.09	1.417	10.83
BL	0.075	0.61	0.090	0.73	0.124	1.01	0.151	1.23	0.189	1.54
BS	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.01	0.002	0.01	0.002	0.02
GE	0.010	0.08	0.012	0.10	0.016	0.13	0.019	0.15	0.024	0.19
GL	0.025	0.20	0.033	0.25	0.055	0.42	0.071	0.54	0.081	0.62
GR	0.125	0.91	0.160	1.16	0.271	1.98	0.350	2.54	0.450	3.28
JU	0.109	0.86	0.134	1.05	0.170	1.34	0.210	1.64	0.263	2.05
LU	0.200	1.55	0.248	1.91	0.269	2.06	0.337	2.57	0.401	3.05
NE	0.093	0.73	0.114	0.89	0.145	1.13	0.178	1.39	0.223	1.74
NW	0.018	0.14	0.024	0.18	0.038	0.29	0.050	0.37	0.055	0.41
OW	0.052	0.39	0.067	0.50	0.107	0.80	0.138	1.02	0.152	1.13
SG	0.181	1.41	0.226	1.75	0.303	2.35	0.383	2.95	0.429	3.32
SH	0.051	0.42	0.061	0.50	0.086	0.70	0.104	0.85	0.130	1.07
SZ	0.081	0.62	0.101	0.78	0.151	1.16	0.192	1.47	0.205	1.57
TG	0.156	1.25	0.187	1.49	0.170	1.36	0.204	1.62	0.260	2.07
TI	0.076	0.62	0.089	0.73	0.139	1.15	0.164	1.34	0.344	2.80
UR	0.030	0.24	0.038	0.29	0.058	0.44	0.073	0.55	0.078	0.60
VD	0.356	2.81	0.436	3.43	0.565	4.46	0.697	5.47	0.858	6.74
VS	0.070	0.51	0.091	0.66	0.136	1.00	0.176	1.27	0.285	2.05
ZG	0.024	0.19	0.030	0.23	0.040	0.31	0.050	0.38	0.055	0.43
ZH	0.318	2.55	0.382	3.05	0.353	2.82	0.425	3.38	0.539	4.29
CH	3.390	26.59	4.168	32.51	5.043	39.32	6.261	48.52	7.792	60.44

Tabelle 13: Ökologisch nachhaltige Waldenergieholzpotenziale 2017–2036 für die drei Szenarien «Vorratsanstieg» (822), «moderer Vorratsabbau» (834) und «starker Vorratsabbau» (852) für zwei Holzmarktsituationen (weniger «energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2) in den Kantonen in Mio. m³ und PJ Primärenergieinhalt.

in Rinde	2017–2036									
	Vorratsanstieg (822)				Moderater Vorratsabbau (834)				Starker Vorratsabbau (852)	
	V1		V2		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.144	1.12	0.178	1.39	0.256	1.99	0.320	2.48	0.366	2.82
SO	0.156	1.23	0.191	1.50	0.195	1.54	0.239	1.88	0.293	2.30
AG	0.286	2.31	0.343	2.76	0.354	2.87	0.426	3.44	0.523	4.20
AI	0.018	0.14	0.023	0.18	0.034	0.26	0.043	0.33	0.048	0.36
AR	0.030	0.23	0.038	0.29	0.055	0.42	0.070	0.54	0.077	0.59
BE	0.693	5.38	0.859	6.63	0.897	6.91	1.120	8.58	1.336	10.20
BL	0.076	0.62	0.090	0.74	0.128	1.05	0.154	1.26	0.188	1.54
BS	0.001	0.01	0.001	0.01	0.002	0.01	0.002	0.02	0.002	0.02
GE	0.011	0.08	0.013	0.10	0.016	0.13	0.019	0.16	0.023	0.18
GL	0.028	0.22	0.036	0.28	0.053	0.41	0.068	0.52	0.079	0.62
GR	0.135	0.99	0.174	1.27	0.254	1.87	0.328	2.38	0.425	3.11
JU	0.113	0.89	0.138	1.08	0.171	1.35	0.211	1.65	0.258	2.01
LU	0.198	1.53	0.246	1.89	0.252	1.93	0.316	2.40	0.376	2.85
NE	0.096	0.75	0.117	0.92	0.145	1.14	0.179	1.40	0.219	1.71
NW	0.018	0.14	0.023	0.17	0.035	0.26	0.045	0.33	0.052	0.38
OW	0.050	0.38	0.065	0.49	0.097	0.73	0.125	0.93	0.144	1.07
SG	0.181	1.42	0.227	1.77	0.296	2.30	0.374	2.89	0.425	3.29
SH	0.051	0.42	0.061	0.50	0.088	0.73	0.106	0.88	0.130	1.07
SZ	0.080	0.62	0.101	0.78	0.148	1.14	0.189	1.45	0.205	1.57
TG	0.155	1.24	0.186	1.49	0.168	1.35	0.202	1.62	0.249	1.98
TI	0.074	0.61	0.087	0.71	0.147	1.21	0.174	1.42	0.345	2.80
UR	0.031	0.24	0.039	0.30	0.058	0.45	0.073	0.56	0.076	0.58
VD	0.359	2.84	0.440	3.47	0.562	4.45	0.693	5.46	0.826	6.48
VS	0.068	0.50	0.089	0.64	0.146	1.07	0.188	1.37	0.277	2.01
ZG	0.024	0.19	0.030	0.23	0.039	0.30	0.049	0.38	0.055	0.42
ZH	0.316	2.54	0.381	3.04	0.350	2.80	0.422	3.36	0.517	4.10
CH	3.391	26.65	4.177	32.62	4.947	38.68	6.136	47.69	7.514	58.26

Tabelle 14: Ökologisch nachhaltige Waldenergieholzpotenziale 2017–2056 für die drei Szenarien «Vorratsanstieg» (822), «moderer Vorratsabbau» (834) und «starker Vorratsabbau» (852) für zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2) in den Kantonen in Mio. m³ und PJ Primärenergieinhalt.

in Rinde	2017–2056									
	Vorratsanstieg (822)				Moderater Vorratsabbau (834)				Starker Vorratsabbau (852)	
	V1		V2		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.143	1.12	0.179	1.39	0.210	1.63	0.262	2.02	0.299	2.28
SO	0.154	1.21	0.188	1.47	0.173	1.37	0.212	1.67	0.245	1.92
AG	0.282	2.27	0.339	2.71	0.319	2.58	0.383	3.08	0.432	3.45
AI	0.018	0.14	0.023	0.18	0.028	0.21	0.035	0.27	0.040	0.30
AR	0.030	0.23	0.038	0.29	0.045	0.35	0.057	0.44	0.065	0.49
BE	0.681	5.27	0.842	6.48	0.790	6.09	0.984	7.54	1.129	8.61
BL	0.073	0.59	0.087	0.71	0.120	0.98	0.145	1.18	0.160	1.30
BS	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.01	0.002	0.01	0.002	0.02
GE	0.011	0.09	0.013	0.10	0.013	0.11	0.016	0.13	0.018	0.14
GL	0.028	0.22	0.036	0.28	0.050	0.39	0.064	0.50	0.066	0.52
GR	0.123	0.92	0.160	1.18	0.266	1.97	0.343	2.52	0.401	2.95
JU	0.111	0.87	0.136	1.07	0.151	1.19	0.187	1.47	0.219	1.71
LU	0.196	1.51	0.243	1.86	0.219	1.68	0.274	2.08	0.318	2.41
NE	0.094	0.74	0.116	0.91	0.128	1.01	0.159	1.24	0.186	1.45
NW	0.018	0.13	0.023	0.17	0.030	0.23	0.039	0.29	0.045	0.34
OW	0.050	0.38	0.065	0.49	0.085	0.64	0.109	0.81	0.126	0.94
SG	0.181	1.42	0.228	1.78	0.251	1.96	0.317	2.45	0.353	2.73
SH	0.049	0.40	0.058	0.48	0.084	0.69	0.101	0.83	0.110	0.90
SZ	0.080	0.62	0.102	0.79	0.124	0.96	0.157	1.20	0.174	1.32
TG	0.154	1.23	0.185	1.47	0.147	1.18	0.177	1.41	0.203	1.60
TI	0.089	0.73	0.107	0.87	0.192	1.57	0.231	1.88	0.332	2.68
UR	0.031	0.24	0.039	0.30	0.054	0.42	0.068	0.52	0.068	0.52
VD	0.355	2.82	0.435	3.44	0.481	3.80	0.593	4.66	0.675	5.26
VS	0.070	0.52	0.093	0.68	0.157	1.16	0.202	1.48	0.260	1.89
ZG	0.024	0.18	0.030	0.23	0.032	0.25	0.040	0.31	0.046	0.35
ZH	0.315	2.51	0.380	3.02	0.305	2.44	0.368	2.92	0.422	3.32
CH	3.358	26.38	4.146	32.35	4.459	34.83	5.524	42.87	6.393	49.39

5.2.2 Ökologisch-ökonomisch nachhaltige Potenziale gemäss «Marktpreis»

Gilt für einen Marktpreis für Hackschnitzel bis zu 5.9 Rp./kWh franko Werk

5.2.2.1 Vorratsanstieg

Tabelle 15: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Marktpreis»), Waldbe-wirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg», 2017–2026 nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2).

in Rinde	Vorratsanstieg (822), 2017–2026											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.083	0.68	0.106	0.86	0.021	0.15	0.062	0.53	0.031	0.21	0.075	0.64
SO	0.108	0.87	0.137	1.10	0.03	0.21	0.078	0.67	0.045	0.31	0.092	0.79
AG	0.213	1.75	0.265	2.17	0.046	0.32	0.167	1.43	0.067	0.46	0.199	1.70
AI	0.006	0.05	0.008	0.06	0.002	0.01	0.004	0.03	0.003	0.02	0.005	0.04
AR	0.010	0.08	0.013	0.10	0.003	0.02	0.007	0.06	0.004	0.03	0.009	0.08
BE	0.395	3.18	0.506	4.02	0.121	0.84	0.274	2.34	0.180	1.24	0.325	2.78
BL	0.053	0.44	0.066	0.54	0.008	0.06	0.045	0.38	0.011	0.08	0.054	0.46
BS	0.001	0.01	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01
GE	0.008	0.07	0.010	0.08	0.002	0.01	0.006	0.05	0.003	0.02	0.007	0.06
GL	0.006	0.05	0.007	0.06	0.002	0.01	0.004	0.03	0.002	0.01	0.005	0.04
GR	0.006	0.05	0.009	0.07	0.004	0.03	0.003	0.03	0.006	0.04	0.003	0.03
JU	0.067	0.54	0.087	0.70	0.019	0.13	0.048	0.41	0.029	0.20	0.058	0.50
LU	0.118	0.94	0.151	1.20	0.037	0.26	0.08	0.68	0.056	0.39	0.095	0.81
NE	0.057	0.46	0.074	0.59	0.016	0.11	0.041	0.35	0.025	0.17	0.049	0.42
NW	0.005	0.04	0.006	0.05	0.002	0.01	0.003	0.03	0.003	0.02	0.003	0.03
OW	0.012	0.09	0.017	0.13	0.005	0.03	0.007	0.06	0.008	0.06	0.009	0.08
SG	0.078	0.63	0.101	0.81	0.021	0.15	0.057	0.49	0.031	0.21	0.07	0.60
SH	0.037	0.31	0.045	0.38	0.004	0.03	0.033	0.28	0.006	0.04	0.039	0.33
SZ	0.022	0.18	0.030	0.24	0.006	0.04	0.016	0.14	0.01	0.07	0.020	0.17
TG	0.117	0.95	0.145	1.17	0.029	0.20	0.088	0.75	0.041	0.28	0.104	0.89
TI	0.006	0.05	0.008	0.07	0.000	0.00	0.006	0.05	0.000	0.00	0.008	0.07
UR	0.003	0.02	0.003	0.03	0.000	0.00	0.002	0.02	0.001	0.01	0.003	0.03
VD	0.220	1.79	0.280	2.26	0.056	0.39	0.164	1.40	0.083	0.57	0.197	1.69
VS	0.004	0.04	0.006	0.05	0.002	0.01	0.003	0.03	0.003	0.02	0.003	0.03
ZG	0.011	0.09	0.014	0.10	0.003	0.02	0.008	0.07	0.004	0.03	0.009	0.08
ZH	0.235	1.92	0.293	2.37	0.058	0.40	0.177	1.51	0.083	0.57	0.210	1.80
CH	1.88	15.28	2.39	19.21	0.50	3.44	1.38	11.84	0.74	5.08	1.65	14.13

Tabelle 16: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Marktpreis»), 2017–2036, Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg», nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2).

in Rinde	Vorratsanstieg (822), 2017–2036											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.082	0.67	0.10	0.84	0.019	0.13	0.063	0.54	0.028	0.19	0.076	0.65
SO	0.108	0.87	0.14	1.11	0.031	0.21	0.077	0.66	0.046	0.32	0.092	0.79
AG	0.209	1.72	0.26	2.12	0.043	0.30	0.166	1.42	0.063	0.44	0.197	1.69
AI	0.007	0.06	0.01	0.07	0.002	0.01	0.005	0.04	0.003	0.02	0.006	0.05
AR	0.011	0.09	0.01	0.11	0.003	0.02	0.008	0.07	0.004	0.03	0.01	0.09
BE	0.394	3.17	0.51	4.03	0.124	0.86	0.27	2.31	0.187	1.29	0.32	2.74
BL	0.050	0.42	0.06	0.51	0.007	0.05	0.043	0.37	0.01	0.07	0.052	0.44
BS	0.001	0.01	0.00	0.01	0	0.00	0.001	0.01	0	0.00	0.001	0.01
GE	0.008	0.07	0.01	0.09	0.002	0.01	0.006	0.05	0.003	0.02	0.008	0.07
GL	0.005	0.05	0.01	0.06	0.002	0.01	0.004	0.03	0.003	0.02	0.005	0.04
GR	0.007	0.05	0.01	0.08	0.004	0.03	0.003	0.03	0.007	0.05	0.004	0.03
JU	0.070	0.57	0.09	0.72	0.019	0.13	0.051	0.44	0.028	0.19	0.062	0.53
LU	0.116	0.93	0.15	1.19	0.038	0.26	0.078	0.67	0.058	0.40	0.092	0.79
NE	0.059	0.48	0.08	0.61	0.016	0.11	0.043	0.37	0.024	0.17	0.052	0.44
NW	0.005	0.04	0.01	0.05	0.002	0.01	0.003	0.03	0.003	0.02	0.004	0.03
OW	0.013	0.10	0.02	0.14	0.005	0.03	0.008	0.07	0.008	0.06	0.01	0.09
SG	0.082	0.67	0.11	0.85	0.021	0.15	0.061	0.52	0.032	0.22	0.074	0.63
SH	0.035	0.29	0.04	0.36	0.004	0.03	0.031	0.27	0.006	0.04	0.037	0.32
SZ	0.025	0.20	0.03	0.27	0.007	0.05	0.018	0.15	0.011	0.08	0.023	0.20
TG	0.116	0.95	0.14	1.17	0.027	0.19	0.089	0.76	0.039	0.27	0.105	0.90
TI	0.006	0.05	0.01	0.06	0	0.00	0.006	0.05	0	0.00	0.007	0.06
UR	0.004	0.03	0.01	0.05	0.001	0.01	0.003	0.03	0.002	0.01	0.004	0.03
VD	0.226	1.85	0.29	2.33	0.052	0.36	0.174	1.49	0.078	0.54	0.209	1.79
VS	0.004	0.03	0.01	0.04	0.001	0.01	0.003	0.03	0.002	0.01	0.003	0.03
ZG	0.011	0.09	0.01	0.11	0.003	0.02	0.008	0.07	0.004	0.03	0.01	0.09
ZH	0.233	1.90	0.29	2.36	0.054	0.37	0.179	1.53	0.079	0.55	0.212	1.81
CH	1.89	15.35	2.40	19.36	0.49	3.37	1.40	11.98	0.73	5.03	1.68	14.33

Tabelle 17: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Marktpreis»), Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg», 2017–2056, nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2).

in Rinde	Vorratsanstieg (822), 2017–2056											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.083	0.68	0.106	0.86	0.017	0.12	0.066	0.56	0.026	0.18	0.079	0.68
SO	0.103	0.83	0.132	1.06	0.030	0.21	0.073	0.62	0.045	0.31	0.087	0.74
AG	0.203	1.67	0.254	2.07	0.043	0.30	0.16	1.37	0.064	0.44	0.190	1.63
AI	0.007	0.06	0.009	0.07	0.002	0.01	0.005	0.04	0.003	0.02	0.006	0.05
AR	0.011	0.09	0.015	0.11	0.003	0.02	0.008	0.07	0.004	0.03	0.010	0.09
BE	0.373	3.00	0.480	3.81	0.120	0.83	0.254	2.17	0.181	1.25	0.299	2.56
BL	0.048	0.40	0.060	0.49	0.006	0.04	0.042	0.36	0.009	0.06	0.050	0.43
BS	0.001	0.01	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01
GE	0.008	0.07	0.010	0.08	0.001	0.01	0.007	0.06	0.002	0.01	0.008	0.07
GL	0.007	0.06	0.009	0.07	0.002	0.01	0.005	0.04	0.003	0.02	0.006	0.05
GR	0.007	0.05	0.010	0.08	0.003	0.02	0.004	0.03	0.005	0.03	0.005	0.04
JU	0.070	0.56	0.090	0.72	0.018	0.12	0.051	0.44	0.028	0.19	0.062	0.53
LU	0.109	0.87	0.140	1.11	0.037	0.26	0.072	0.62	0.056	0.39	0.084	0.72
NE	0.059	0.48	0.076	0.61	0.015	0.10	0.044	0.38	0.024	0.17	0.052	0.44
NW	0.004	0.04	0.006	0.05	0.002	0.01	0.003	0.03	0.003	0.02	0.004	0.03
OW	0.012	0.10	0.017	0.13	0.004	0.03	0.008	0.07	0.007	0.05	0.010	0.09
SG	0.084	0.68	0.109	0.88	0.022	0.15	0.062	0.53	0.033	0.23	0.076	0.65
SH	0.033	0.27	0.040	0.33	0.003	0.02	0.029	0.25	0.005	0.03	0.035	0.30
SZ	0.027	0.22	0.036	0.29	0.007	0.05	0.020	0.17	0.011	0.08	0.025	0.21
TG	0.113	0.92	0.142	1.16	0.027	0.19	0.086	0.74	0.041	0.28	0.102	0.87
TI	0.008	0.07	0.010	0.08	0.000	0.00	0.008	0.07	0.000	0.00	0.009	0.08
UR	0.005	0.04	0.007	0.05	0.001	0.01	0.004	0.03	0.001	0.01	0.005	0.04
VD	0.227	1.86	0.287	2.34	0.048	0.33	0.179	1.53	0.072	0.50	0.215	1.84
VS	0.004	0.03	0.006	0.04	0.001	0.01	0.003	0.03	0.002	0.01	0.003	0.03
ZG	0.011	0.09	0.015	0.12	0.003	0.02	0.008	0.07	0.005	0.03	0.01	0.09
ZH	0.229	1.87	0.287	2.32	0.055	0.38	0.174	1.49	0.082	0.57	0.205	1.75
CH	1.85	15.02	2.35	18.93	0.47	3.25	1.38	11.77	0.71	4.92	1.64	14.01

5.2.2.2 *Moderater Vorratsabbau*

Tabelle 18: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Marktpreis»), Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau», 2017–2026, nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfrendlich», V1 und «energieholzfrendlich», V2).

in Rinde	Moderater Vorratsabbau (834); 2017–2026											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1				V2			
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.141	1.15	0.180	1.46	0.036	0.25	0.105	0.90	0.054	0.37	0.127	1.09
SO	0.138	1.12	0.177	1.42	0.037	0.26	0.101	0.86	0.056	0.39	0.121	1.03
AG	0.267	2.19	0.332	2.71	0.054	0.36	0.212	1.81	0.079	0.55	0.253	2.16
AI	0.013	0.10	0.017	0.14	0.004	0.03	0.009	0.08	0.007	0.05	0.011	0.09
AR	0.021	0.17	0.027	0.22	0.007	0.05	0.014	0.12	0.010	0.07	0.018	0.15
BE	0.472	3.81	0.609	4.85	0.147	1.02	0.326	2.79	0.220	1.52	0.389	3.33
BL	0.092	0.77	0.116	0.96	0.013	0.09	0.079	0.68	0.020	0.14	0.096	0.82
BS	0.001	0.01	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01
GE	0.013	0.11	0.016	0.13	0.003	0.02	0.010	0.09	0.004	0.03	0.012	0.10
GL	0.012	0.10	0.017	0.14	0.004	0.03	0.008	0.07	0.006	0.04	0.011	0.09
GR	0.015	0.12	0.020	0.15	0.007	0.05	0.008	0.07	0.010	0.07	0.010	0.09
JU	0.109	0.88	0.141	1.13	0.029	0.20	0.080	0.68	0.044	0.30	0.097	0.83
LU	0.135	1.09	0.176	1.39	0.046	0.32	0.090	0.77	0.069	0.48	0.107	0.92
NE	0.093	0.75	0.120	0.97	0.025	0.17	0.068	0.58	0.037	0.26	0.083	0.71
NW	0.010	0.08	0.014	0.11	0.004	0.03	0.006	0.05	0.006	0.04	0.008	0.07
OW	0.027	0.22	0.037	0.29	0.011	0.08	0.017	0.15	0.017	0.12	0.020	0.17
SG	0.128	1.03	0.168	1.34	0.039	0.27	0.089	0.76	0.059	0.41	0.109	0.93
SH	0.065	0.54	0.082	0.68	0.008	0.06	0.057	0.49	0.012	0.08	0.070	0.60
SZ	0.050	0.40	0.067	0.52	0.017	0.12	0.033	0.28	0.025	0.17	0.041	0.35
TG	0.128	1.04	0.159	1.29	0.031	0.21	0.097	0.83	0.045	0.31	0.114	0.98
TI	0.011	0.10	0.014	0.12	0.000	0.00	0.011	0.10	0.000	0.00	0.013	0.11
UR	0.007	0.07	0.010	0.08	0.002	0.01	0.006	0.05	0.003	0.02	0.007	0.06
VD	0.360	2.94	0.459	3.71	0.087	0.60	0.273	2.34	0.129	0.89	0.330	2.82
VS	0.008	0.06	0.011	0.08	0.003	0.02	0.005	0.04	0.004	0.03	0.006	0.05
ZG	0.018	0.14	0.023	0.18	0.005	0.03	0.012	0.10	0.008	0.06	0.015	0.13
ZH	0.260	2.12	0.325	2.63	0.064	0.44	0.196	1.68	0.092	0.64	0.233	1.99
CH	2.595	21.09	3.318	26.72	0.683	4.73	1.913	16.37	1.016	7.03	2.302	19.69

Tabelle 19: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Marktpreis»), Waldbewirtschaftungsszenario «moderer Vorratsabbau», Nahe Zukunft 2017–2036, nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2).

in Rinde	Moderater Vorratsabbau (834); 2017–2036											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.144	1.18	0.184	1.49	0.034	0.24	0.111	0.95	0.050	0.35	0.134	1.15
SO	0.135	1.10	0.172	1.38	0.036	0.25	0.099	0.85	0.053	0.37	0.119	1.02
AG	0.266	2.19	0.330	2.71	0.051	0.35	0.215	1.84	0.075	0.52	0.256	2.19
AI	0.013	0.10	0.017	0.14	0.004	0.03	0.009	0.08	0.006	0.04	0.011	0.09
AR	0.021	0.17	0.027	0.21	0.007	0.05	0.014	0.12	0.009	0.06	0.018	0.15
BE	0.443	3.57	0.570	4.54	0.134	0.93	0.309	2.64	0.202	1.40	0.368	3.15
BL	0.094	0.78	0.117	0.97	0.013	0.09	0.081	0.69	0.019	0.13	0.098	0.84
BS	0.001	0.01	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01
GE	0.013	0.11	0.016	0.14	0.003	0.02	0.011	0.09	0.004	0.03	0.013	0.11
GL	0.011	0.09	0.015	0.12	0.003	0.02	0.008	0.07	0.005	0.03	0.010	0.09
GR	0.014	0.11	0.019	0.15	0.006	0.04	0.008	0.07	0.010	0.07	0.009	0.08
JU	0.110	0.90	0.142	1.14	0.029	0.20	0.082	0.70	0.043	0.30	0.099	0.85
LU	0.123	0.99	0.159	1.26	0.040	0.28	0.083	0.71	0.061	0.42	0.098	0.84
NE	0.093	0.76	0.121	0.97	0.024	0.17	0.069	0.59	0.036	0.25	0.084	0.72
NW	0.009	0.07	0.012	0.09	0.003	0.02	0.006	0.05	0.005	0.03	0.007	0.06
OW	0.024	0.19	0.032	0.25	0.009	0.06	0.015	0.13	0.013	0.09	0.019	0.16
SG	0.124	1.00	0.162	1.30	0.035	0.24	0.089	0.76	0.053	0.37	0.109	0.93
SH	0.067	0.56	0.083	0.68	0.008	0.06	0.059	0.50	0.011	0.08	0.071	0.61
SZ	0.049	0.39	0.066	0.53	0.015	0.10	0.034	0.29	0.023	0.16	0.043	0.37
TG	0.126	1.03	0.157	1.27	0.029	0.20	0.097	0.83	0.042	0.29	0.114	0.98
TI	0.012	0.10	0.014	0.12	0.000	0.00	0.011	0.10	0.001	0.00	0.013	0.11
UR	0.010	0.08	0.013	0.11	0.002	0.01	0.008	0.07	0.003	0.02	0.010	0.09
VD	0.366	3.01	0.465	3.78	0.081	0.56	0.286	2.45	0.120	0.83	0.345	2.95
VS	0.009	0.08	0.012	0.10	0.003	0.02	0.007	0.06	0.004	0.03	0.008	0.07
ZG	0.017	0.14	0.022	0.18	0.005	0.03	0.012	0.10	0.008	0.06	0.015	0.13
ZH	0.256	2.09	0.320	2.59	0.059	0.41	0.197	1.69	0.087	0.60	0.233	1.99
CH	2.549	20.81	3.248	26.23	0.633	4.38	1.921	16.43	0.943	6.52	2.305	19.72

Tabelle 20: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Marktpreis»), Waldbewirtschaftungsszenario «moderer Vorratsabbau», ferne Zukunft 2017–2056, nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2).

in Rinde	Moderater Vorratsabbau (834); 2017–2056											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.114	0.93	0.146	1.18	0.028	0.19	0.086	0.74	0.042	0.29	0.104	0.89
SO	0.118	0.96	0.150	1.21	0.031	0.21	0.087	0.74	0.047	0.33	0.103	0.88
AG	0.233	1.91	0.290	2.37	0.046	0.32	0.186	1.59	0.069	0.48	0.221	1.89
AI	0.010	0.08	0.014	0.11	0.003	0.02	0.007	0.06	0.005	0.03	0.009	0.08
AR	0.017	0.13	0.021	0.17	0.005	0.04	0.011	0.10	0.007	0.05	0.014	0.12
BE	0.378	3.04	0.485	3.86	0.112	0.77	0.265	2.27	0.169	1.17	0.315	2.69
BL	0.085	0.71	0.106	0.87	0.012	0.08	0.073	0.62	0.018	0.12	0.087	0.74
BS	0.001	0.01	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01	0.000	0.00	0.001	0.01
GE	0.010	0.08	0.013	0.11	0.002	0.01	0.008	0.07	0.003	0.02	0.010	0.09
GL	0.011	0.09	0.014	0.11	0.003	0.02	0.008	0.07	0.004	0.03	0.010	0.09
GR	0.017	0.13	0.023	0.18	0.007	0.05	0.01	0.09	0.011	0.08	0.012	0.10
JU	0.098	0.80	0.126	1.02	0.025	0.17	0.073	0.62	0.038	0.26	0.088	0.75
LU	0.103	0.83	0.133	1.06	0.033	0.23	0.070	0.60	0.050	0.35	0.083	0.71
NE	0.083	0.68	0.107	0.86	0.021	0.15	0.062	0.53	0.032	0.22	0.075	0.64
NW	0.007	0.06	0.010	0.08	0.002	0.01	0.005	0.04	0.004	0.03	0.006	0.05
OW	0.020	0.15	0.026	0.21	0.006	0.04	0.013	0.11	0.010	0.07	0.016	0.14
SG	0.104	0.84	0.136	1.09	0.029	0.20	0.075	0.64	0.044	0.30	0.092	0.79
SH	0.060	0.50	0.075	0.62	0.007	0.05	0.053	0.45	0.011	0.08	0.064	0.55
SZ	0.039	0.32	0.053	0.42	0.012	0.08	0.028	0.24	0.018	0.12	0.035	0.30
TG	0.108	0.88	0.135	1.09	0.026	0.18	0.082	0.70	0.038	0.26	0.097	0.83
TI	0.017	0.15	0.021	0.18	0.001	0.01	0.016	0.14	0.001	0.01	0.020	0.17
UR	0.007	0.06	0.009	0.07	0.001	0.01	0.006	0.05	0.002	0.01	0.007	0.06
VD	0.305	2.49	0.386	3.13	0.069	0.48	0.235	2.01	0.104	0.72	0.282	2.41
VS	0.010	0.09	0.014	0.11	0.004	0.03	0.007	0.06	0.006	0.04	0.008	0.07
ZG	0.014	0.11	0.018	0.14	0.004	0.03	0.010	0.09	0.006	0.04	0.012	0.10
ZH	0.220	1.79	0.275	2.22	0.053	0.37	0.167	1.43	0.078	0.54	0.197	1.69
CH	2.19	17.82	2.79	22.49	0.54	3.75	1.64	14.07	0.82	5.65	1.97	16.83

5.2.2.3 Starker Vorratsabbau

Tabelle 21: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Marktpreis»), Waldbewirtschaftungsszenario «starker Vorratsabbau», für drei Zeiträume (2017–2026; 2017–2036; 2017–2056), nach Holzmarktsituation («energieholzfreundlich», V2) und Holzart. Da das Szenario eine «starken Vorratsabbau» voraussetzt wird die Holzmarktsituation «weniger energieholzfreundlich» V1 nicht berücksichtigt.

(in Rinde)	2017–2026												2017–2036												2017–2056											
	Total				Nadelholz				Laubholz				Nadelholz				Laubholz				Total				Nadelholz				Laubholz							
	Kanton	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a	Mio.	Pj/a							
FR	0.228	1.84	0.066	0.46	0.162	1.39	0.215	1.73	0.064	0.44	0.151	1.29	0.159	1.26	0.054	1.37	0.054	1.26	0.054	1.29	0.159	1.23	0.174	1.40	0.051	0.42	0.114	0.89								
SO	0.232	1.85	0.078	0.54	0.153	1.31	0.219	1.75	0.075	0.52	0.144	1.23	0.175	1.40	0.061	1.42	0.058	1.40	0.061	1.42	0.061	1.40	0.174	1.54	0.058	0.58	0.129	1.96								
AG	0.441	3.60	0.106	0.73	0.335	2.87	0.419	3.42	0.107	0.74	0.313	2.68	0.314	2.54	0.084	2.54	0.084	2.54	0.084	2.54	0.084	2.54	0.116	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04							
AI	0.020	0.16	0.007	0.05	0.013	0.11	0.020	0.16	0.007	0.05	0.013	0.11	0.016	0.13	0.006	0.13	0.006	0.13	0.006	0.13	0.006	0.13	0.006	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010							
AR	0.031	0.25	0.010	0.07	0.021	0.18	0.031	0.23	0.021	0.14	0.010	0.09	0.025	0.20	0.008	0.20	0.008	0.20	0.008	0.20	0.008	0.20	0.008	0.06	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016						
BE	0.772	6.13	0.288	1.99	0.484	4.14	0.716	5.68	0.273	1.89	0.443	3.79	0.567	4.50	0.216	4.50	0.216	4.50	0.216	4.50	0.216	4.50	0.216	4.50	0.351	3.00	0.351	3.00	0.351	3.00	0.351					
BL	0.152	1.26	0.024	0.17	0.128	1.09	0.147	1.22	0.025	0.17	0.123	1.05	0.113	0.93	0.020	0.93	0.020	0.93	0.020	0.93	0.020	0.93	0.020	0.14	0.092	0.79	0.14	0.092	0.79	0.14	0.092					
BS	0.002	0.02	0.000	0.00	0.002	0.02	0.002	0.02	0.000	0.00	0.002	0.02	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001						
GE	0.021	0.17	0.005	0.03	0.016	0.14	0.020	0.16	0.005	0.03	0.015	0.13	0.014	0.11	0.004	0.11	0.004	0.11	0.004	0.11	0.004	0.11	0.004	0.03	0.010	0.09	0.03	0.010	0.09	0.03	0.010					
GL	0.017	0.14	0.005	0.03	0.012	0.10	0.019	0.16	0.003	0.02	0.016	0.14	0.013	0.11	0.006	0.14	0.006	0.14	0.006	0.14	0.006	0.14	0.006	0.01	0.011	0.09	0.01	0.011	0.09	0.01	0.011					
GR	0.028	0.21	0.015	0.10	0.013	0.11	0.027	0.20	0.013	0.09	0.013	0.11	0.013	0.11	0.009	0.11	0.009	0.11	0.009	0.11	0.009	0.11	0.009	0.029	0.22	0.029	0.22	0.029	0.22	0.029	0.22					
JU	0.185	1.48	0.064	0.44	0.121	1.03	0.181	1.45	0.062	0.43	0.119	1.02	0.150	1.19	0.051	1.19	0.051	1.19	0.051	1.19	0.051	1.19	0.051	0.35	0.098	0.84	0.35	0.098	0.84	0.35	0.098					
LU	0.217	1.72	0.085	0.59	0.132	1.13	0.198	1.56	0.080	0.55	0.118	1.01	0.157	1.25	0.063	1.25	0.063	1.25	0.063	1.25	0.063	1.25	0.063	0.44	0.095	0.81	0.44	0.095	0.81	0.44	0.095					
NE	0.157	1.25	0.054	0.37	0.103	0.88	0.153	1.23	0.053	0.37	0.101	0.86	0.127	1.01	0.043	1.01	0.043	1.01	0.043	1.01	0.043	1.01	0.043	1.01	0.037	0.71	0.083	0.71	0.083	0.71	0.083	0.71				
NW	0.015	0.11	0.006	0.04	0.008	0.07	0.013	0.11	0.006	0.04	0.008	0.07	0.012	0.09	0.004	0.09	0.004	0.09	0.004	0.09	0.004	0.09	0.004	0.03	0.007	0.06	0.03	0.007	0.06	0.03	0.007					
OW	0.040	0.32	0.017	0.12	0.024	0.21	0.036	0.29	0.015	0.10	0.022	0.19	0.032	0.25	0.012	0.25	0.012	0.25	0.012	0.25	0.012	0.25	0.012	0.08	0.020	0.17	0.08	0.020	0.17	0.08	0.020					
SG	0.199	1.60	0.065	0.45	0.134	1.15	0.197	1.57	0.063	0.44	0.133	1.14	0.151	1.21	0.050	1.21	0.050	1.21	0.050	1.21	0.050	1.21	0.050	0.35	0.101	0.86	0.35	0.101	0.86	0.35	0.101					
SH	0.107	0.89	0.014	0.10	0.093	0.80	0.104	0.86	0.014	0.10	0.089	0.76	0.078	0.65	0.012	0.65	0.012	0.65	0.012	0.65	0.012	0.65	0.012	0.08	0.066	0.56	0.08	0.066	0.56	0.08	0.066					
SZ	0.079	0.63	0.027	0.19	0.052	0.44	0.077	0.61	0.026	0.18	0.050	0.43	0.060	0.48	0.021	0.48	0.021	0.48	0.021	0.48	0.021	0.48	0.021	0.15	0.039	0.33	0.15	0.039	0.33	0.15	0.039					
TG	0.212	1.71	0.062	0.43	0.150	1.28	0.200	1.61	0.062	0.43	0.138	1.18	0.149	1.19	0.049	1.19	0.049	1.19	0.049	1.19	0.049	1.19	0.049	0.34	0.100	0.86	0.34	0.100	0.86	0.34	0.100					
TI	0.028	0.23	0.001	0.00	0.027	0.23	0.030	0.21	0.029	0.20	0.001	0.01	0.026	0.22	0.001	0.01	0.026	0.22	0.001	0.01	0.026	0.22	0.001	0.01	0.025	0.22	0.001	0.01	0.025	0.22	0.001	0.025				
UR	0.019	0.15	0.004	0.03	0.014	0.12	0.014	0.11	0.003	0.02	0.011	0.09	0.009	0.07	0.007	0.07	0.009	0.07	0.007	0.07	0.009	0.07	0.007	0.01	0.007	0.06	0.01	0.007	0.06	0.01	0.007					
VD	0.595	4.81	1.16	0.427	3.65	0.570	4.61	0.168	1.16	0.427	3.65	0.403	3.45	0.433	3.48	0.433	3.45	0.433	3.45	0.433	3.45	0.433	3.45	0.139	0.96	2.51	0.139	0.96	2.51	0.139	0.96	2.51				
VS	0.020	0.16	0.009	0.06	0.011	0.09	0.018	0.14	0.008	0.06	0.010	0.09	0.016	0.13	0.007	0.13	0.007	0.13	0.007	0.13	0.007	0.13	0.007	0.05	0.009	0.08	0.05	0.009	0.08	0.05	0.009					
ZG	0.027	0.22	0.009	0.06	0.018	0.15	0.027	0.22	0.009	0.06	0.018	0.15	0.027	0.22	0.009	0.06	0.018	0.15	0.027	0.22	0.009	0.06	0.018	0.15	0.027	0.22	0.009	0.06	0.018	0.15	0.027					
ZH	0.431	3.48	0.127	0.88	0.304	2.60	0.407	3.27	0.127	0.88	0.32	2.74	0.32	9.11	2.74	2.74	9.11	2.74	2.74	9.11	2.74	2.74	9.11	2.74	2.74	9.11	2.74	2.74	9.11	2.74	2.74	9.11				
CH	4.27	34.39	1.32	9.10	2.96	25.29	4.06	32.58	1.32	9.11	2.74	23.47	3.15	25.22	1.03	2.74	23.47	3.15	25.22	1.03	2.74	23.47	3.15	25.22	1.03	2.74	23.47	3.15	25.22	1.03	2.74	23.47				

5.2.3 Ökologisch-ökonomisch nachhaltige Potenziale gemäss «Subventionen im Schutzwald (Silva-Protect)»

5.2.3.1 Vorratsanstieg

Tabelle 22: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Subventionen im Schutzwald»), Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg», 2017–2026 nach Holzart und zwei Holzmarktsituatiosn («weniger energieholzfrendlich», V1 und «energieholzfrendlich», V2).

in Rinde	Vorratsanstieg (822); 2017–2026											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.105	0.831	0.131	1.032	0.043	0.299	0.062	0.532	0.056	0.391	0.075	0.642
SO	0.113	0.893	0.140	1.104	0.045	0.312	0.068	0.581	0.059	0.407	0.081	0.697
AG	0.206	1.657	0.252	2.025	0.062	0.429	0.144	1.228	0.080	0.555	0.172	1.470
AI	0.012	0.089	0.015	0.114	0.006	0.041	0.006	0.049	0.008	0.054	0.007	0.060
AR	0.017	0.134	0.022	0.171	0.009	0.061	0.008	0.073	0.012	0.082	0.010	0.089
BE	0.534	4.171	0.665	5.160	0.244	1.689	0.290	2.482	0.322	2.224	0.343	2.936
BL	0.051	0.411	0.062	0.506	0.013	0.089	0.038	0.322	0.017	0.117	0.046	0.389
BS	0.001	0.005	0.001	0.006	0.000	0.001	0.000	0.004	0.000	0.001	0.001	0.005
GE	0.008	0.063	0.010	0.077	0.002	0.016	0.005	0.046	0.003	0.021	0.007	0.056
GL	0.012	0.094	0.016	0.125	0.007	0.045	0.006	0.049	0.009	0.063	0.007	0.061
GR	0.040	0.289	0.053	0.381	0.032	0.224	0.008	0.065	0.044	0.307	0.009	0.073
JU	0.077	0.602	0.096	0.751	0.034	0.236	0.043	0.367	0.044	0.307	0.052	0.444
LU	0.138	1.075	0.172	1.333	0.062	0.428	0.076	0.647	0.082	0.566	0.090	0.767
NE	0.060	0.473	0.076	0.593	0.027	0.186	0.034	0.287	0.035	0.242	0.041	0.351
NW	0.011	0.084	0.015	0.110	0.008	0.053	0.004	0.031	0.010	0.072	0.004	0.038
OW	0.029	0.218	0.038	0.283	0.020	0.136	0.010	0.081	0.027	0.184	0.012	0.099
SG	0.129	1.014	0.163	1.267	0.057	0.396	0.072	0.618	0.076	0.525	0.087	0.742
SH	0.032	0.259	0.039	0.320	0.007	0.048	0.025	0.211	0.009	0.063	0.030	0.258
SZ	0.049	0.376	0.062	0.478	0.025	0.172	0.024	0.204	0.033	0.230	0.029	0.248
TG	0.119	0.953	0.145	1.160	0.038	0.266	0.080	0.688	0.050	0.343	0.096	0.818
TI	0.020	0.165	0.023	0.195	0.002	0.017	0.017	0.148	0.003	0.023	0.020	0.172
UR	0.012	0.090	0.015	0.116	0.006	0.044	0.005	0.046	0.009	0.062	0.006	0.054
VD	0.246	1.952	0.306	2.419	0.093	0.646	0.153	1.306	0.122	0.841	0.184	1.578
VS	0.027	0.198	0.035	0.259	0.020	0.137	0.007	0.062	0.027	0.189	0.008	0.070
ZG	0.015	0.121	0.019	0.151	0.007	0.047	0.009	0.073	0.009	0.063	0.010	0.089
ZH	0.235	1.886	0.288	2.300	0.076	0.529	0.159	1.357	0.099	0.683	0.189	1.617
CH	2.298	18.105	2.862	22.437	0.947	6.548	1.351	11.557	1.246	8.614	1.616	13.822

Tabelle 23: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Subventionen im Schutzwald»), 2017–2036, Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg», nach Holzart und zwei Holzmarktsituatiosn («weniger energieholzfrendlich», V1 und «energieholzfrendlich», V2).

in Rinde	Vorratsanstieg (822); 2017–2036											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.104	0.822	0.129	1.019	0.041	0.282	0.063	0.540	0.053	0.370	0.076	0.649
SO	0.113	0.889	0.140	1.102	0.046	0.321	0.066	0.568	0.061	0.422	0.080	0.680
AG	0.203	1.638	0.249	2.006	0.059	0.411	0.143	1.227	0.078	0.538	0.172	1.468
AI	0.012	0.090	0.015	0.116	0.006	0.040	0.006	0.050	0.008	0.054	0.007	0.062
AR	0.018	0.136	0.023	0.175	0.009	0.061	0.009	0.075	0.012	0.082	0.011	0.093
BE	0.528	4.115	0.659	5.100	0.247	1.707	0.281	2.407	0.326	2.257	0.332	2.843
BL	0.050	0.404	0.061	0.496	0.012	0.084	0.037	0.319	0.016	0.112	0.045	0.385
BS	0.001	0.005	0.001	0.006	0.000	0.001	0.000	0.004	0.000	0.001	0.001	0.005
GE	0.008	0.065	0.010	0.079	0.002	0.016	0.006	0.049	0.003	0.021	0.007	0.059
GL	0.013	0.100	0.017	0.132	0.007	0.047	0.006	0.053	0.010	0.066	0.008	0.066
GR	0.048	0.346	0.064	0.460	0.038	0.265	0.009	0.081	0.053	0.367	0.011	0.093
JU	0.079	0.623	0.099	0.776	0.034	0.234	0.046	0.389	0.044	0.305	0.055	0.471
LU	0.136	1.056	0.170	1.312	0.064	0.441	0.072	0.615	0.085	0.584	0.085	0.728
NE	0.062	0.488	0.078	0.611	0.027	0.184	0.036	0.304	0.035	0.241	0.043	0.370
NW	0.011	0.082	0.014	0.107	0.007	0.050	0.004	0.033	0.010	0.067	0.005	0.039
OW	0.029	0.215	0.037	0.279	0.019	0.128	0.010	0.087	0.025	0.174	0.012	0.105
SG	0.130	1.021	0.164	1.283	0.056	0.389	0.074	0.633	0.075	0.521	0.089	0.763
SH	0.030	0.250	0.038	0.309	0.006	0.044	0.024	0.206	0.009	0.059	0.029	0.250
SZ	0.050	0.385	0.064	0.494	0.025	0.171	0.025	0.214	0.033	0.231	0.031	0.262
TG	0.118	0.949	0.145	1.157	0.037	0.256	0.081	0.693	0.048	0.334	0.096	0.823
TI	0.021	0.173	0.025	0.206	0.003	0.022	0.018	0.151	0.004	0.030	0.021	0.176
UR	0.014	0.106	0.018	0.138	0.007	0.048	0.007	0.058	0.010	0.068	0.008	0.069
VD	0.250	1.995	0.311	2.467	0.090	0.625	0.160	1.370	0.118	0.818	0.193	1.649
VS	0.025	0.182	0.033	0.239	0.018	0.126	0.006	0.056	0.025	0.176	0.007	0.063
ZG	0.016	0.122	0.020	0.153	0.007	0.047	0.009	0.075	0.009	0.062	0.011	0.091
ZH	0.234	1.879	0.287	2.296	0.074	0.511	0.160	1.368	0.096	0.667	0.190	1.629
CH	2.300	18.132	2.871	22.517	0.941	6.509	1.359	11.623	1.247	8.627	1.624	13.890

Tabelle 24: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Subventionen im Schutzwald»), Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg», 2017–2056, nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfrendlich», V1 und «energieholzfrendlich», V2).

in Rinde	Vorratsanstieg (822); 2017–2056											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a
FR	0.104	0.829	0.131	1.032	0.039	0.269	0.065	0.560	0.052	0.359	0.079	0.673
SO	0.108	0.845	0.134	1.048	0.047	0.323	0.061	0.523	0.061	0.425	0.073	0.624
AG	0.197	1.588	0.244	1.952	0.061	0.419	0.137	1.169	0.080	0.554	0.163	1.398
AI	0.012	0.090	0.015	0.117	0.006	0.039	0.006	0.051	0.008	0.053	0.007	0.063
AR	0.018	0.136	0.023	0.177	0.009	0.059	0.009	0.077	0.012	0.082	0.011	0.095
BE	0.509	3.949	0.634	4.887	0.248	1.717	0.261	2.232	0.328	2.267	0.306	2.621
BL	0.047	0.384	0.059	0.475	0.012	0.080	0.036	0.305	0.015	0.107	0.043	0.368
BS	0.001	0.004	0.001	0.005	0.000	0.001	0.000	0.004	0.000	0.001	0.001	0.004
GE	0.008	0.065	0.010	0.079	0.002	0.014	0.006	0.051	0.003	0.018	0.007	0.061
GL	0.013	0.104	0.018	0.138	0.006	0.042	0.007	0.062	0.009	0.061	0.009	0.077
GR	0.042	0.312	0.057	0.418	0.031	0.213	0.012	0.099	0.044	0.303	0.014	0.116
JU	0.078	0.616	0.099	0.771	0.034	0.232	0.045	0.385	0.044	0.307	0.054	0.464
LU	0.128	0.988	0.160	1.226	0.064	0.441	0.064	0.547	0.084	0.583	0.075	0.643
NE	0.061	0.482	0.078	0.606	0.026	0.183	0.035	0.299	0.035	0.243	0.042	0.363
NW	0.011	0.080	0.014	0.105	0.007	0.048	0.004	0.033	0.009	0.065	0.005	0.039
OW	0.028	0.210	0.037	0.274	0.018	0.122	0.010	0.088	0.024	0.168	0.012	0.106
SG	0.130	1.020	0.165	1.291	0.056	0.384	0.074	0.636	0.075	0.522	0.090	0.769
SH	0.029	0.235	0.036	0.292	0.006	0.040	0.023	0.196	0.008	0.054	0.028	0.239
SZ	0.050	0.387	0.065	0.501	0.024	0.164	0.026	0.223	0.033	0.226	0.032	0.275
TG	0.116	0.928	0.142	1.135	0.039	0.267	0.077	0.661	0.051	0.351	0.092	0.784
TI	0.027	0.228	0.034	0.277	0.004	0.029	0.023	0.198	0.006	0.042	0.027	0.235
UR	0.014	0.110	0.018	0.143	0.006	0.041	0.008	0.069	0.009	0.059	0.010	0.083
VD	0.249	1.990	0.310	2.464	0.086	0.592	0.164	1.399	0.113	0.782	0.197	1.682
VS	0.025	0.187	0.034	0.249	0.019	0.129	0.007	0.058	0.026	0.182	0.008	0.066
ZG	0.015	0.121	0.020	0.154	0.007	0.047	0.009	0.075	0.009	0.063	0.011	0.091
ZH	0.229	1.836	0.283	2.252	0.077	0.531	0.153	1.305	0.101	0.700	0.181	1.552
CH	2.251	17.729	2.818	22.069	0.929	6.427	1.321	11.302	1.240	8.576	1.577	13.493

5.2.3.2 Moderater Vorratsabbau

Tabelle 25: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Subventionen im Schutzwald»), Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau», 2017–2026 nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfrendlich», V1 und «energieholzfrendlich», V2).

in Rinde	Moderater Vorratsabbau (834); 2017–2026											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a
FR	0.181	1.422	0.226	1.773	0.077	0.53	0.104	0.893	0.100	0.69	0.126	1.08
SO	0.143	1.133	0.179	1.408	0.057	0.39	0.086	0.739	0.074	0.51	0.105	0.89
AG	0.260	2.103	0.320	2.578	0.076	0.52	0.185	1.580	0.098	0.68	0.222	1.90
AI	0.023	0.175	0.029	0.224	0.012	0.08	0.011	0.090	0.016	0.11	0.013	0.11
AR	0.035	0.265	0.045	0.341	0.019	0.13	0.016	0.135	0.025	0.17	0.019	0.17
BE	0.680	5.268	0.853	6.576	0.334	2.31	0.346	2.958	0.442	3.05	0.412	3.52
BL	0.092	0.751	0.115	0.932	0.023	0.16	0.069	0.594	0.030	0.21	0.085	0.72
BS	0.001	0.009	0.001	0.012	0.000	0.00	0.001	0.008	0.000	0.00	0.001	0.01
GE	0.013	0.101	0.015	0.124	0.004	0.02	0.009	0.076	0.005	0.03	0.011	0.09
GL	0.026	0.203	0.035	0.268	0.014	0.10	0.012	0.105	0.020	0.14	0.015	0.13
GR	0.100	0.718	0.132	0.948	0.082	0.57	0.017	0.149	0.112	0.78	0.020	0.17
JU	0.124	0.970	0.155	1.214	0.053	0.37	0.070	0.600	0.070	0.48	0.086	0.73
LU	0.165	1.273	0.207	1.595	0.083	0.57	0.082	0.701	0.110	0.76	0.098	0.84
NE	0.098	0.766	0.123	0.963	0.042	0.29	0.055	0.474	0.055	0.38	0.068	0.58
NW	0.024	0.178	0.031	0.231	0.016	0.11	0.008	0.066	0.022	0.15	0.009	0.08
OW	0.062	0.460	0.081	0.597	0.042	0.29	0.020	0.172	0.056	0.39	0.024	0.21
SG	0.214	1.664	0.273	2.107	0.104	0.72	0.110	0.944	0.139	0.96	0.134	1.14
SH	0.061	0.498	0.076	0.620	0.013	0.09	0.048	0.408	0.017	0.12	0.059	0.50
SZ	0.096	0.735	0.124	0.945	0.052	0.36	0.044	0.373	0.071	0.49	0.053	0.46
TG	0.131	1.047	0.159	1.273	0.042	0.29	0.088	0.754	0.055	0.38	0.105	0.89
TI	0.042	0.347	0.050	0.412	0.006	0.04	0.036	0.307	0.008	0.05	0.042	0.36
UR	0.024	0.184	0.032	0.241	0.015	0.11	0.009	0.078	0.021	0.15	0.011	0.10
VD	0.399	3.169	0.497	3.934	0.147	1.02	0.252	2.152	0.192	1.33	0.304	2.60
VS	0.052	0.381	0.068	0.494	0.040	0.28	0.012	0.104	0.054	0.38	0.014	0.12
ZG	0.026	0.199	0.033	0.252	0.013	0.09	0.013	0.112	0.017	0.12	0.016	0.14
ZH	0.262	2.096	0.320	2.555	0.086	0.60	0.175	1.499	0.112	0.77	0.208	1.78
CH	3.331	26.114	4.181	32.618	1.452	10.04	1.879	16.073	1.922	13.29	2.260	19.33

Tabelle 26: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Subventionen im Schutzwald»), Waldbewirtschaftungsszenario «moderate Vorratsabbau», 2017–2036 nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfrendlich», V1 und «energieholzfrendlich», V2).

in Rinde	Moderater Vorratsabbau (834); 2017–2036											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a	Mio.	PJ/a
FR	0.184	1.454	0.231	1.814	0.075	0.52	0.110	0.939	0.098	0.68	0.133	1.14
SO	0.141	1.110	0.176	1.381	0.056	0.39	0.084	0.720	0.074	0.51	0.102	0.87
AG	0.257	2.083	0.317	2.556	0.073	0.50	0.185	1.581	0.095	0.66	0.222	1.90
AI	0.022	0.170	0.029	0.219	0.012	0.08	0.010	0.089	0.016	0.11	0.013	0.11
AR	0.033	0.256	0.043	0.331	0.018	0.12	0.016	0.133	0.024	0.17	0.019	0.16
BE	0.641	4.964	0.804	6.191	0.316	2.19	0.325	2.778	0.419	2.90	0.385	3.30
BL	0.093	0.757	0.115	0.937	0.022	0.15	0.071	0.606	0.029	0.20	0.086	0.74
BS	0.001	0.009	0.001	0.011	0.000	0.00	0.001	0.008	0.000	0.00	0.001	0.01
GE	0.013	0.105	0.016	0.129	0.003	0.02	0.010	0.082	0.004	0.03	0.012	0.10
GL	0.025	0.194	0.033	0.255	0.013	0.09	0.012	0.106	0.018	0.12	0.015	0.13
GR	0.091	0.658	0.121	0.868	0.073	0.50	0.018	0.155	0.100	0.69	0.021	0.18
JU	0.125	0.982	0.157	1.231	0.053	0.37	0.072	0.613	0.070	0.48	0.087	0.75
LU	0.151	1.168	0.190	1.462	0.077	0.53	0.075	0.639	0.102	0.70	0.089	0.76
NE	0.099	0.776	0.125	0.977	0.042	0.29	0.056	0.483	0.056	0.38	0.069	0.59
NW	0.021	0.158	0.028	0.204	0.014	0.10	0.007	0.060	0.019	0.13	0.008	0.07
OW	0.055	0.412	0.072	0.533	0.036	0.25	0.019	0.159	0.049	0.34	0.022	0.19
SG	0.209	1.628	0.267	2.064	0.099	0.69	0.110	0.941	0.134	0.92	0.133	1.14
SH	0.061	0.498	0.075	0.618	0.012	0.08	0.048	0.413	0.016	0.11	0.059	0.51
SZ	0.095	0.729	0.123	0.938	0.050	0.34	0.045	0.385	0.067	0.47	0.055	0.47
TG	0.129	1.033	0.157	1.259	0.041	0.28	0.088	0.751	0.053	0.37	0.104	0.89
TI	0.045	0.374	0.054	0.448	0.007	0.05	0.038	0.326	0.010	0.07	0.045	0.38
UR	0.026	0.202	0.034	0.263	0.013	0.09	0.013	0.113	0.018	0.12	0.016	0.14
VD	0.406	3.236	0.505	4.014	0.142	0.98	0.263	2.254	0.186	1.29	0.319	2.73
VS	0.056	0.408	0.073	0.531	0.041	0.28	0.015	0.127	0.056	0.38	0.017	0.15
ZG	0.025	0.194	0.032	0.246	0.012	0.08	0.013	0.110	0.016	0.11	0.016	0.13
ZH	0.257	2.065	0.316	2.523	0.083	0.57	0.174	1.491	0.109	0.75	0.207	1.77
CH	3.260	25.623	4.093	32.003	1.383	9.56	1.878	16.060	1.837	12.71	2.256	19.30

Tabelle 27: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäss «Subventionen im Schutzwald»), Waldbewirtschaftungsszenario «moderate Vorratsabbau», 2017–2056 nach Holzart und zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfrendlich», V1 und «energieholzfrendlich», V2).

in Rinde	Moderater Vorratsabbau (834); 2017–2056											
	Total				Nadelholz		Laubholz		Nadelholz		Laubholz	
	V1		V2		V1		V1		V2		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.148	1.163	0.185	1.450	0.062	0.43	0.085	0.731	0.083	0.57	0.103	0.88
SO	0.122	0.964	0.153	1.200	0.050	0.35	0.072	0.618	0.066	0.46	0.087	0.74
AG	0.221	1.782	0.272	2.186	0.065	0.45	0.156	1.331	0.086	0.59	0.186	1.59
AI	0.018	0.137	0.023	0.176	0.009	0.07	0.008	0.071	0.013	0.09	0.010	0.09
AR	0.027	0.207	0.035	0.267	0.014	0.10	0.013	0.108	0.019	0.13	0.016	0.13
BE	0.553	4.277	0.692	5.326	0.275	1.90	0.278	2.378	0.363	2.51	0.329	2.81
BL	0.082	0.669	0.102	0.825	0.020	0.14	0.062	0.528	0.027	0.19	0.075	0.64
BS	0.001	0.008	0.001	0.010	0.000	0.00	0.001	0.007	0.000	0.00	0.001	0.01
GE	0.010	0.083	0.013	0.102	0.003	0.02	0.007	0.063	0.004	0.03	0.009	0.08
GL	0.023	0.178	0.030	0.232	0.011	0.08	0.012	0.102	0.015	0.11	0.015	0.13
GR	0.096	0.704	0.128	0.928	0.072	0.50	0.024	0.205	0.100	0.69	0.028	0.24
JU	0.111	0.873	0.140	1.095	0.048	0.33	0.064	0.545	0.063	0.43	0.077	0.66
LU	0.127	0.978	0.159	1.220	0.064	0.44	0.062	0.534	0.085	0.59	0.074	0.63
NE	0.088	0.689	0.111	0.868	0.038	0.26	0.050	0.429	0.050	0.34	0.061	0.52
NW	0.018	0.133	0.023	0.172	0.012	0.08	0.006	0.052	0.016	0.11	0.007	0.06
OW	0.046	0.346	0.060	0.446	0.030	0.21	0.016	0.139	0.040	0.28	0.020	0.17
SG	0.174	1.355	0.222	1.716	0.082	0.57	0.092	0.786	0.111	0.76	0.111	0.95
SH	0.053	0.432	0.065	0.535	0.011	0.08	0.041	0.353	0.015	0.10	0.050	0.43
SZ	0.077	0.589	0.099	0.757	0.040	0.28	0.036	0.312	0.054	0.37	0.045	0.38
TG	0.110	0.882	0.135	1.075	0.037	0.25	0.073	0.628	0.048	0.33	0.087	0.74
TI	0.064	0.528	0.078	0.642	0.012	0.08	0.052	0.445	0.017	0.12	0.062	0.53
UR	0.022	0.174	0.029	0.223	0.011	0.07	0.012	0.099	0.015	0.10	0.014	0.12
VD	0.340	2.699	0.423	3.347	0.125	0.87	0.214	1.832	0.165	1.14	0.258	2.21
VS	0.060	0.442	0.079	0.575	0.043	0.30	0.017	0.147	0.059	0.41	0.020	0.17
ZG	0.020	0.159	0.026	0.202	0.010	0.07	0.011	0.091	0.013	0.09	0.013	0.11
ZH	0.220	1.758	0.270	2.149	0.074	0.51	0.146	1.246	0.097	0.67	0.173	1.48
CH	2.830	22.209	3.552	27.726	1.219	8.43	1.611	13.780	1.624	11.23	1.929	16.50

5.2.3.3 Starker Vorratsabbau

Tabelle 28: Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Waldenergieholzpotenzial (gemäß «Subventionen im Schutzwald»), Waldbewirtschaftungsszenario «Starker Vorratsabbau**», für drei Zeitperioden, nach Holzart und Holzmarktsituation «energieholzfrendlich» (V2). Da das Szenario einen «starken Vorratsabbau» voraussetzt wird die Holzmarktsituation «weniger energieholzfrendlich» (V1) nicht berücksichtigt.**

5.3 Bereits genutzte Potenziale – nach Kantonen

Tabelle 29: Bereits genutztes Waldenergieholzpotenzial in den Kantonen (2014). Die Umrechnung von Volumen [m³] in Primärenergieinhalt [J] ist in Kapitel 2.7 beschrieben.

In Rinde	2014									
	Total					Stückholz			Holzschnitzel	
	Gesamt		NdH		LbH	NdH	LbH	NdH	LbH	
Kanton	Mio. m ³	PJ	Mio. m ³	PJ	Mio. m ³	PJ	Mio. m ³	Mio. m ³	Mio. m ³	Mio. m ³
FR	0.092	0.76	0.018	0.12	0.074	0.63	0.009	0.038	0.009	0.037
SO	0.068	0.56	0.011	0.08	0.057	0.49	0.006	0.029	0.006	0.028
AG	0.106	0.89	0.013	0.09	0.094	0.80	0.006	0.048	0.006	0.046
AI	0.007	0.06	0.006	0.04	0.002	0.02	0.003	0.001	0.003	0.001
AR	0.026	0.19	0.014	0.10	0.011	0.09	0.007	0.006	0.007	0.006
BE	0.407	3.17	0.191	1.32	0.216	1.85	0.095	0.110	0.095	0.106
BL	0.045	0.39	0.004	0.03	0.042	0.36	0.002	0.021	0.002	0.021
BS	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
GE	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
GL	0.022	0.18	0.004	0.03	0.018	0.15	0.002	0.009	0.002	0.009
GR	0.176	1.26	0.150	1.04	0.026	0.22	0.075	0.013	0.075	0.013
JU	0.030	0.25	0.002	0.01	0.028	0.24	0.001	0.014	0.001	0.014
LU	0.055	0.42	0.029	0.20	0.026	0.22	0.014	0.013	0.014	0.013
NE	0.073	0.57	0.033	0.23	0.040	0.34	0.017	0.020	0.017	0.020
NW	0.013	0.11	0.001	0.01	0.012	0.10	0.001	0.006	0.001	0.006
OW	0.028	0.24	0.004	0.03	0.025	0.21	0.002	0.012	0.002	0.012
SG	0.143	1.14	0.051	0.35	0.092	0.79	0.025	0.047	0.025	0.045
SH	0.035	0.29	0.005	0.03	0.030	0.26	0.003	0.015	0.003	0.015
SZ	0.049	0.40	0.014	0.10	0.035	0.30	0.007	0.018	0.007	0.017
TG	0.069	0.56	0.016	0.11	0.053	0.45	0.008	0.027	0.008	0.026
TI	0.142	1.12	0.055	0.38	0.087	0.74	0.027	0.044	0.027	0.043
UR	0.017	0.13	0.007	0.05	0.010	0.09	0.004	0.005	0.004	0.005
VD	0.340	2.76	0.090	0.62	0.250	2.14	0.045	0.127	0.045	0.123
VS	0.077	0.57	0.059	0.41	0.019	0.16	0.029	0.010	0.029	0.009
ZG	0.017	0.14	0.004	0.03	0.013	0.11	0.002	0.007	0.002	0.006
ZH	0.123	1.01	0.024	0.17	0.099	0.85	0.012	0.050	0.012	0.049
CH	2.162	17.17	0.805	5.57	1.357	11.61	0.402	0.690	0.402	0.668

5.4 Zusätzlich nutzbare Potenziale – nach Kantonen

Folgend sind die zusätzlich nutzbaren Potenziale dargestellt (*Tabelle 30 bis 32*). Sie wurden aufgrund der Differenz zwischen dem nachhaltigen (ökologisch-ökonomisches Potenzial gemäss «Subventionen im Schutzwald») und dem bereits genutzten Potenzial berechnet. Je nach *Holzmarktsituation* und Zeitpunkt können unterschiedliche zusätzliche Potenziale ermittelt werden.

Tabelle 30: Zusätzlich nutzbare Potenziale gemäss Waldbewirtschaftungsszenario «Vorratsanstieg» (822) für die zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfrendlich», V1 und «energieholzfrendlich», V2) und drei Zeitperioden 2017–2026, 2017–2036 und 2017–2056.

In Rinde	Vorratsanstieg (822)											
	2017–2026				2017–2036				2017–2056			
	V1		V2		V1		V2		V1		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a										
FR	0.013	0.071	0.039	0.272	0.012	0.062	0.037	0.259	0.012	0.069	0.039	0.272
SO	0.045	0.333	0.072	0.544	0.045	0.329	0.072	0.542	0.04	0.285	0.066	0.488
AG	0.1	0.767	0.146	1.135	0.097	0.748	0.143	1.116	0.091	0.698	0.138	1.062
AI	0.005	0.029	0.008	0.054	0.005	0.03	0.008	0.056	0.005	0.03	0.008	0.057
AR	-0.009	-0.056	-0.004	-0.019	-0.008	-0.054	-0.003	-0.015	-0.008	-0.054	-0.003	-0.013
BE	0.127	1.001	0.258	1.99	0.121	0.945	0.252	1.93	0.102	0.779	0.227	1.717
BL	0.006	0.021	0.017	0.116	0.005	0.014	0.016	0.106	0.002	-0.006	0.014	0.085
BS	0.001	0.005	0.001	0.006	0.001	0.005	0.001	0.006	0.001	0.004	0.001	0.005
GE	0.008	0.063	0.01	0.077	0.008	0.065	0.01	0.079	0.008	0.065	0.01	0.079
GL	-0.01	-0.086	-0.006	-0.055	-0.009	-0.08	-0.005	-0.048	-0.009	-0.076	-0.004	-0.042
GR	-0.136	-0.971	-0.123	-0.879	-0.128	-0.914	-0.112	-0.8	-0.134	-0.948	-0.119	-0.842
JU	0.047	0.352	0.066	0.501	0.049	0.373	0.069	0.526	0.048	0.366	0.069	0.521
LU	0.083	0.655	0.117	0.913	0.081	0.636	0.115	0.892	0.073	0.568	0.105	0.806
NE	-0.013	-0.097	0.003	0.023	-0.011	-0.082	0.005	0.041	-0.012	-0.088	0.005	0.036
NW	-0.002	-0.026	0.002	0	-0.002	-0.028	0.001	-0.003	-0.002	-0.03	0.001	-0.005
OW	0.001	-0.022	0.01	0.043	0.001	-0.025	0.009	0.039	0	-0.03	0.009	0.034
SG	-0.014	-0.126	0.02	0.127	-0.013	-0.119	0.021	0.143	-0.013	-0.12	0.022	0.151
SH	-0.003	-0.031	0.004	0.03	-0.005	-0.04	0.003	0.019	-0.006	-0.055	0.001	0.002
SZ	0	-0.024	0.013	0.078	0.001	-0.015	0.015	0.094	0.001	-0.013	0.016	0.101
TG	0.05	0.393	0.076	0.6	0.049	0.389	0.076	0.597	0.047	0.368	0.073	0.575
TI	-0.122	-0.955	-0.119	-0.925	-0.121	-0.947	-0.117	-0.914	-0.115	-0.892	-0.108	-0.843
UR	-0.005	-0.04	-0.002	-0.014	-0.003	-0.024	0.001	0.008	-0.003	-0.02	0.001	0.013
VD	-0.094	-0.808	-0.034	-0.341	-0.09	-0.765	-0.029	-0.293	-0.091	-0.77	-0.03	-0.296
VS	-0.05	-0.372	-0.042	-0.311	-0.052	-0.388	-0.044	-0.331	-0.052	-0.383	-0.043	-0.321
ZG	-0.002	-0.019	0.002	0.011	-0.001	-0.018	0.003	0.013	-0.002	-0.019	0.003	0.014
ZH	0.112	0.876	0.165	1.29	0.111	0.869	0.164	1.286	0.106	0.826	0.16	1.242
CH	0.136	0.935	0.7	5.267	0.138	0.962	0.709	5.347	0.089	0.559	0.656	4.899

Tabelle 31: Zusätzlich nutzbare Potenziale nach Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau» (834) für die zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2) und die drei Zeitperioden 2017–2026, 2017–2036 und 2017–2056.

in Rinde	Moderater Vorratsabbau (834)											
	2017–2026				2017–2036				2017–2056			
	V1		V2		V1		V2		V1		V2	
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.089	0.662	0.134	1.013	0.092	0.694	0.139	1.054	0.056	0.403	0.093	0.69
SO	0.075	0.573	0.111	0.848	0.073	0.55	0.108	0.821	0.054	0.404	0.085	0.64
AG	0.154	1.213	0.214	1.688	0.151	1.193	0.211	1.666	0.115	0.892	0.166	1.296
AI	0.016	0.115	0.022	0.164	0.015	0.11	0.022	0.159	0.011	0.077	0.016	0.116
AR	0.009	0.075	0.019	0.151	0.007	0.066	0.017	0.141	0.001	0.017	0.009	0.077
BE	0.273	2.098	0.446	3.406	0.234	1.794	0.397	3.021	0.146	1.107	0.285	2.156
BL	0.047	0.361	0.07	0.542	0.048	0.367	0.07	0.547	0.037	0.279	0.057	0.435
BS	0.001	0.009	0.001	0.012	0.001	0.009	0.001	0.011	0.001	0.008	0.001	0.01
GE	0.013	0.101	0.015	0.124	0.013	0.105	0.016	0.129	0.01	0.083	0.013	0.102
GL	0.004	0.023	0.013	0.088	0.003	0.014	0.011	0.075	0.001	-0.002	0.008	0.052
GR	-0.076	-0.542	-0.044	-0.312	-0.085	-0.602	-0.055	-0.392	-0.08	-0.556	-0.048	-0.332
JU	0.094	0.72	0.125	0.964	0.095	0.732	0.127	0.981	0.081	0.623	0.11	0.845
LU	0.11	0.853	0.152	1.175	0.096	0.748	0.135	1.042	0.072	0.558	0.104	0.8
NE	0.025	0.196	0.05	0.393	0.026	0.206	0.052	0.407	0.015	0.119	0.038	0.298
NW	0.011	0.068	0.018	0.121	0.008	0.048	0.015	0.094	0.005	0.023	0.01	0.062
OW	0.034	0.22	0.053	0.357	0.027	0.172	0.044	0.293	0.018	0.106	0.032	0.206
SG	0.071	0.524	0.13	0.967	0.066	0.488	0.124	0.924	0.031	0.215	0.079	0.576
SH	0.026	0.208	0.041	0.33	0.026	0.208	0.04	0.328	0.018	0.142	0.03	0.245
SZ	0.047	0.335	0.075	0.545	0.046	0.329	0.074	0.538	0.028	0.189	0.05	0.357
TG	0.062	0.487	0.09	0.713	0.06	0.473	0.088	0.699	0.041	0.322	0.066	0.515
TI	-0.1	-0.773	-0.092	-0.708	-0.097	-0.746	-0.088	-0.672	-0.078	-0.592	-0.064	-0.478
UR	0.007	0.054	0.015	0.111	0.009	0.072	0.017	0.133	0.005	0.044	0.012	0.093
VD	0.059	0.409	0.157	1.174	0.066	0.476	0.165	1.254	0	-0.061	0.083	0.587
VS	-0.025	-0.189	-0.009	-0.076	-0.021	-0.162	-0.004	-0.039	-0.017	-0.128	0.002	0.005
ZG	0.009	0.059	0.016	0.112	0.008	0.054	0.015	0.106	0.003	0.019	0.009	0.062
ZH	0.139	1.086	0.197	1.545	0.134	1.055	0.193	1.513	0.097	0.748	0.147	1.139
CH	1.169	8.944	2.019	15.448	1.098	8.453	1.931	14.833	0.668	5.039	1.39	10.556

Tabelle 32: Zusätzlich nutzbare Potenziale nach Waldbewirtschaftungsszenario «starker Vorratsabbau» (852) für die zwei Holzmarktsituationen («weniger energieholzfreundlich», V1 und «energieholzfreundlich», V2) und die drei Zeitperioden 2017–2026, 2017–2036 und 2017–2056.

in Rinde	Starker Vorratsabbau (852)					
	2017–2026		2017–2036		2017–2056	
	V2	V2	V2	V2	V2	V2
Kanton	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.197	1.498	0.179	1.358	0.117	0.853
SO	0.171	1.317	0.156	1.19	0.109	0.817
AG	0.323	2.567	0.29	2.289	0.188	1.455
AI	0.025	0.183	0.025	0.186	0.019	0.138
AR	0.022	0.179	0.023	0.184	0.014	0.112
BE	0.652	4.975	0.578	4.392	0.396	2.978
BL	0.105	0.838	0.095	0.749	0.063	0.485
BS	0.002	0.015	0.002	0.014	0.001	0.01
GE	0.021	0.168	0.02	0.158	0.014	0.109
GL	0.021	0.146	0.02	0.147	0.01	0.069
GR	-0.005	-0.027	-0.019	-0.128	-0.026	-0.173
JU	0.178	1.372	0.171	1.316	0.135	1.038
LU	0.201	1.553	0.179	1.373	0.133	1.015
NE	0.095	0.737	0.088	0.686	0.059	0.454
NW	0.022	0.149	0.019	0.128	0.015	0.097
OW	0.062	0.433	0.055	0.375	0.044	0.296
SG	0.171	1.291	0.168	1.267	0.104	0.772
SH	0.065	0.531	0.056	0.454	0.032	0.261
SZ	0.087	0.639	0.085	0.624	0.06	0.433
TG	0.145	1.148	0.13	1.027	0.08	0.618
TI	-0.035	-0.241	-0.04	-0.28	-0.041	-0.299
UR	0.021	0.161	0.015	0.112	0.011	0.083
VD	0.316	2.438	0.285	2.175	0.138	0.985
VS	0.04	0.273	0.034	0.234	0.026	0.177
ZG	0.02	0.147	0.02	0.145	0.013	0.087
ZH	0.306	2.416	0.278	2.173	0.175	1.342
CH	3.225	24.905	2.908	22.346	1.884	14.213

6 Literatur

- [1] Abegg, M.B., Brändli, U.-B.; Cioldi, F., Fischer, C., Herold-Bonardi, A., Huber M., Keller, M.; Meile, R., Rösler, E., Speich, S.; Traub, B.; Vidondo, B., 2014: Viertes Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnistabellen und Karten im Internet zum LFI 2009-2013 (LFI 4b)
- [2] Altwegg, J., Schoop, A., Hofer, P., 2010: Klären von Differenzen zwischen Holznutzungsmengen nach Forststatistik und nach LFI, Technischer Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU): 82 S.
- [3] Anonymous, 2016, Wald und Holz 2016: 48 S.
- [4] BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2016: Jahrbuch Wald und Holz 2015: 162 S.
- [5] BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2015: Jahrbuch Wald und Holz 2014: 162 S.
- [6] BAFU, Bundesamt für Umwelt, Bundesamt für Energie; Staatssekretariat für Wirtschaft, SECO, 2014: Ressourcenpolitik Holz. Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz, Bern: 36 S.
- [7] BFE, Bundesamt für Energie, 2006: Masse, Einheiten, Zahlen: Umrechnungsfaktoren, Masseinheiten und Energieinhalte: 1 S.
- [8] Brändli, U.-B., ed. 2010: Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. ed. L. Schweizerisches Landesforstinventar. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL; Bundesamt für Umwelt, BAFU: Birmensdorf, Bern: 316 S.
- [9] Brassel, P., Brändli, U.-B. , ed. 1999: Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft, WSL, Bundesamt für Umwelt, BAFU: Birmensdorf, Bern: 442 S.
- [10] LWF, Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2014: Merkblatt 12 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: 4 S.
- [11] Frutig, F., Thees, O., Lemm, R., Kostadinov, F., 2009: Holzernteproduktivitätsmodelle HeProMo - Konzeption, Realisierung, Nutzung und Weiterentwicklung. In: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente, Birmensdorf: 441-466 S.
- [12] Hässig, J., Hofer, P., 2010: Holznutzungspotenziale im Schweizer Wald – Berechnung des nutzbaren Potenzials nach Szenarien 2007 bis 2036, Technischer Bericht: 112 S.
- [13] Hepperle, F., 2010: Prognosemodell zur Abschätzung des Regionalen Waldenergieholzpotenzials auf der Grundlage Forstlicher Inventur- und Planungsdaten unter Berücksichtigung ökologischer, technischer und wirtschaftlicher Nutzungseinschränkungen: 165 S.
- [14] Hofer, P., Altwegg, J., Schoop, A., Hässig, J., Rüegg, R., 2011: Holznutzungspotenziale im Schweizer Wald. Auswertung von Nutzungsszenarien und Waldwachstumsentwicklung, Bern: 80 S.
- [15] Kirchner, A., Bredow, F., Grebel, T., Hofer, P., Kemmler, A., Ley, A., Piégsa, A., Schütz, N., Strassburg, S., Struwe, J., 2012: Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000-2050: 842 S.
- [16] LFI, Landesforstinventar, 2015: Waldflächen pro Kanton.
- [17] Losey, S., Wehrli, A., 2013: Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald, Bern: 29 S.

- [18] Pauli, P., Bürgi, P., Brühlhard, S., Thees, O., Lemm, R., Rosset, C., 2010: Holz als Rohstoff und Energieträger, Dynamisches Holzmarktmodell und Zukunftsszenarien, Schlussbericht: 207 S.
- [19] Riegger, W., 2004: Waldmass von Industrieholz, Umrechnungszahlen von Industrieholz. In: Schweizerischer Forstkalender 2005: S. 230-232.
- [20] Stadelmann, G., Herold, A., Markus, D., Vidondo, B., Gomez, A., Thürig, E., 2016: Holzerntepotenzial im Schweizer Wald: Simulation von Bewirtschaftungsszenarien, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 167(3): S. 152-161.
- [21] Taverna, R., Gautschi, M., Hofer, P., 2016: Das nachhaltig verfügbare Holznutzungspotenzial im Schweizer Wald, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 167(3): 162-171.
- [22] Thees, O., Erni, M., Lemm, R., 2016: Wie viel Energieholz liefert der Schweizer Wald, Rahmenbedingungen der Energieholznutzung, Forum WSL Suisse Romande 2016: S. 13-19.
- [23] Thees, O., Kaufmann, E., Lemm, R., Bürgi, A., 2013: Energieholzpotenziale im Schweizer Wald, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 164(12): S. 351-361.
- [24] Thürig, E., Kaufmann, E., Frisullo, R., Bugmann, H., 2005: Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model, Forest Ecology and Management, 204: S. 51-66.
- [25] BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2014: Waldreservate in der Schweiz, Bericht über den Stand Ende 2012, 26 S.
- [26] VSE, Verband schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, 2013: Strom aus Biomasse: 14 S.

Flurholz



Bilder: Matthias Erni, WSL

Matthias Erni, Oliver Thees und Renato Lemm

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	76
1 Einleitung	77
2 Methoden	78
2.1 Begriffe	79
2.2 Datengrundlagen	80
2.3 Auswahl und Einteilung der Flurholzflächen	80
2.4 Bestimmung des Zuwachs.....	81
2.4.1 Verkehrsgrün.....	83
2.4.2 Uferbereich	84
2.4.3 Siedlungsgebiet	84
2.4.4 Hecken.....	85
2.4.5 Landwirtschaftliche Flächen-, Baum und Strauchvegetation.....	85
2.5 Berechnung der Potenziale.....	88
2.5.1 Theoretisches Potenzial	88
2.5.2 Nachhaltiges Potenzial	90
2.5.3 Bereits genutztes Potenzial.....	90
2.5.4 Zusätzlich nutzbares Potenzial	92
2.6 Umrechnungen	92
3 Resultate	93
4 Diskussion und Folgerungen	97
4.1 Vergleich mit anderen Studien	97
4.2 Folgerungen und kritische Anmerkungen	97
5 Anhang	99
6 Literatur.....	101

Abkürzungen

ArcGIS	Geographisches Informationssystem (Software)
AS	Arealstatistik
BG	Bereits genutztes Potenzial
BHD	Brusthöhendurchmesser
BIOSWEET	Biomass for Swiss Energy Future
FS	Frischsubstanz ("waldfrisch")
GIS	Geoinformationssystem
ha	Hektar
J	Joule
KT	Kanton (AG Aargau, AI Appenzell Innerrhoden, AR Appenzell Ausserrhoden, BE Bern, BL Basel-Land, BS Basel-Stadt, FR Fribourg, GE Genève, GL Glarus, GR Graubünden, JU Jura, LU Luzern, NE Neuchâtel, NW Nidwalden, OW Obwalden, SG St. Gallen, SH Schaffhausen, SO Solothurn, SZ Schwyz, TG Thurgau, TI Ticino, UR Uri, VS Valais, VD Vaud, ZG Zug, ZH Zürich)
LFI	Landesforstinventar
Nawaro	Nachwachsende Rohstoffe
NP	Nachhaltiges Potenzial
P	Peta
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SCCER	Swiss Competence Center for Energy Research
TP	Theoretisches Potenzial
TS	Trockensubstanz
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft
ZP	Zusätzlich nutzbares Potenzial

1 Einleitung

Holz, das bei Landschaftspflegearbeiten anfällt, wird als Flurholz bezeichnet. Eine synonyme Bezeichnung ist Landschaftspflegeholz [8]. Es fällt beim Fällen und Schneiden von Bäumen und Sträuchern in der Flur und in *Siedlungsgebieten – also ausserhalb des Waldes – an. Das kann in Parks, auf Friedhöfen, Straßen-/Feldrändern, Uferböschungen, entlang von Eisenbahnlinien, unter Stromleitungen, Obstplantagen, Weingärten, Privat- oder Schrebergärten sein ([4, 8, 11] und Tabelle 1)*. Die Massnahmen erfolgen aus Gründen der Pflege und der Unterhaltung verholzter Pflanzen an den genannten Orten. Eine Nutzung und damit verbundene wirtschaftliche Gründe von Flurholz stehen nicht im Vordergrund. Darin liegt der Unterschied zu den Energieholzplantagen ausserhalb des Waldes, die nicht in die Flurholz-Kategorie fallen.

Flurholz ist für die energetische Nutzung gut geeignet [11]. In der Schweiz, in Deutschland und anderen Ländern, steigt die Nachfrage nach Energieholz [15]. Gegenüber der Plantagenproduktion von nachwachsenden Rohstoffen hat Flurholz den Vorteil, dass es keine zusätzlichen eigenen Flächen beansprucht und sich damit keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion ergibt. Auch deswegen könnte das Interesse an der energetischen Nutzung von Flurholz, die aus wirtschaftlicher Sicht bislang wenig interessant war, in Zukunft deutlich steigen [15].

In der Schweiz führten die Bundesämter für Umwelt und für Energie (2009) [8] mit den «Energieholzpotenzialen ausserhalb des Waldes» eine gesamtschweizerische Mengenabschätzung für Flurholz durch. Diese machte Aussagen auf der Ebene der fünf Produktionsregionen Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen sowie Alpensüdseite. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist, räumlich differenziertere Abschätzungen der Verfügbarkeiten von Energieholz aus der Flur zu ermöglichen. Insbesondere sollten die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie kann das Potenzial des energetisch verwertbaren Flurholzes auf lokaler Ebene ermittelt werden?
- Wie ist das Flurholz in der Schweiz räumlich verteilt und für die energetische Nutzung verfügbar?

Theoretisches Potenzial

Umfasst den gesamten Zuwachs an verholzter Biomasse, der auf den Flurholzflächen innerhalb eines Jahres anfällt. → Kapitel 2.5.1

Nachhaltiges Potenzial

Beinhaltet die verholzte Biomasse, die unter Berücksichtigung ökonomisch-technischer Restriktionen auf Flurholzflächen für die energetische Nutzung zur Verfügung steht. Relevant sind insbesondere Nutzungskosten und Sicherheitsaspekte. Erstere sind von der Erschliessung abhängig, letztere von der Art der Flurholzgruppe (Siedlungsgebiet; Verkehrsgrün; landwirtschaftliche Flächen, Baum- und Strauchvegetation; Hecken; Uferbereich). → Kapitel 2.5.2

Bereits genutztes Potenzial

Bezieht sich auf die energetisch verwertbare Holzmenge, die bei der Bewirtschaftung der Flurholzflächen anfällt.

→ Kapitel 2.5.3

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Entspricht der Differenz zwischen dem nachhaltigen und dem bereits genutzten Potenzial. Es umfasst das liegen gelassene Material und den nicht genutzten Zuwachs innerhalb eines Jahres.

→ Kapitel 2.5.4

2 Methoden

Mit dem Tool Modelbuilder von ArcGIS wurde ein Modell erstellt, das die Ermittlung der verschiedenen Potenziale für die energetische Nutzung von Flurholz erlaubt. Berechnet wird der Zuwachs für jede Flächeneinheit, die als Flurholzfläche identifiziert wurde. Dazu wurden für jeden der etwa 4.1 Mio. Stichprobenpunkte der Arealstatistik (100x100 Meter) die Informationen aus den verschiedenen Datengrundlagen vereint (Kap. 2.2). Darauf basierend erfolgte die Berechnung der vier Potenziale (Kap. 2.5).

Folgende vier Schritte müssen für die Berechnungen und die Darstellung der vier Potenziale durchgeführt werden:

- 1. Auswahl und Einteilung der untersuchten Flurholzflächen (Kap. 2.3):** Aus der Schweizer Arealstatistik mit ihren 72 Grundkategorien wurden diejenigen Flächen ausgewählt, auf denen verholzte Biomasse anfällt und die nicht zur Waldfläche zählen. Dieser Auswahl entsprechen 28 Grundkategorien. Sie gelten als Flurholzkategorien und werden übersichtshalber in fünf Flurholzgruppen unterteilt.
- 2. Bestimmung des Zuwachses (Kap. 2.4):** Für jede Flurholzfläche wird der Zuwachs abgeschätzt. Dazu wird der Zuwachs bei 100% Deckungsgrad reduziert auf den Zuwachs beim tatsächlich gegebenen Deckungsgrad. Dieser Zuwachs wird anschliessend mit der Höhenlage korrigiert und ergibt das theoretische Potenzial pro Flurholzfläche.
- 3. Modellierung der Potenziale (Kap. 2.5):** Ausgehend vom theoretischen Potenzial wird das nachhaltige (NP) und schlussendlich das bereits genutzte (BG) Flurholzpotenzial ermittelt. Dazu werden verschiedene ökonomisch-technische Einschränkungen berücksichtigt. Diese ergeben sich aufgrund der Höhenlage, der Hangneigung, Distanz zu einer Strasse und der stofflichen Nutzung (*Abbildung 1*).
- 4. Aggregation und Darstellung der Resultate pro Kanton (Kap. 3):** Die Ergebnisse sind pro Hektar verfügbar, werden für die vorliegende Studie jedoch nach Kantonen ausgewertet.

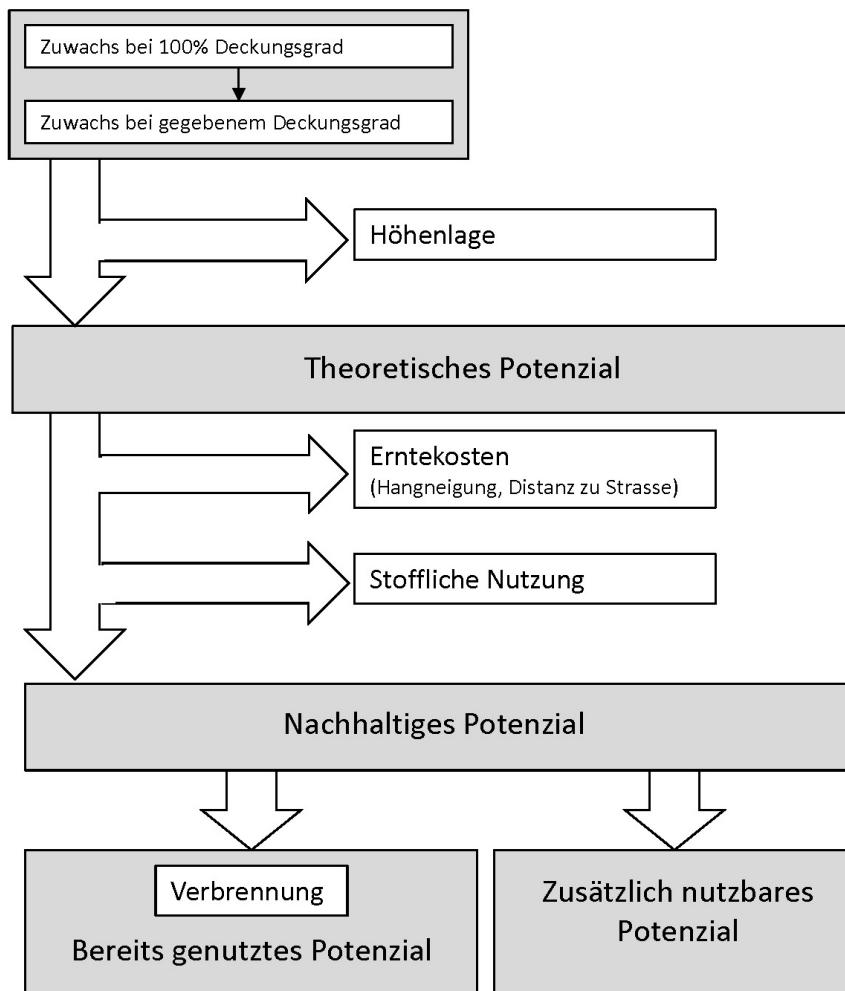


Abbildung 1: Übersicht über die Berechnung der Potenziale des energetisch nutzbaren Flurholzes.

2.1 Begriffe

Bestockung: Allgemeine Bezeichnung für einen Bestand aus Bäumen oder Sträuchern [13].

Deckungsgrad: Verhältnis der durch die vertikalen Kronenprojektionen überschirmten Fläche (mehrfach überschirmte Flächen werden einfach gezählt) zur Gesamtfläche. Im Gegensatz zum Beschirmsgrad kann der Deckungsgrad 100% nicht überschreiten [9].

Grundkategorie: Aus der Schweizer Arealstatistik mit 72 Grundkategorien werden diejenigen Flächen ausgewählt, auf welchen verholzte Biomasse anfällt, die aber nicht zur Waldfläche zählen. Es wurden 28 Flurholzkategorien ermittelt, auf die diese Bedingung zutrifft. Sie werden ihrerseits in fünf Flurholzgruppen eingeteilt (Kap. 2.3).

Zuwachs: Allgemein (bei Bäumen und Sträuchern) Zunahme von Durchmesser, Höhe, Umfang, Grundfläche, Volumen oder Wert in einer bestimmten Zeitspanne. In diesem Teilbericht wird unterschieden zwischen dem «Zuwachs bei 100% Deckungsgrad» und dem «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad»:

- «Zuwachs bei 100% Deckungsgrad»: Entspricht einem Zuwachs an einem optimalen Standort mit 100% Deckungsgrad.
- «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad»: Dient als Eingangswert für die Berechnungen. Er ist meist tief gewählt und basiert auf Literaturwerten oder den auf den gegebenen Deckungsgrad reduzierten Zuwachs (Kap. 2.4).

2.2 Datengrundlagen

Flurholzkategorien

Die Flurholzkategorien werden aufgrund der Arealstatistik [3] ausgeschieden. Die Arealstatistik gibt auf der Grundlage von Luftbildern des Bundesamtes für Landestopographie Auskunft zur Bodennutzung und Bodenbedeckung der Schweiz [7]. In der Arealstatistik werden 28 Grundkategorien, die mit Bäumen und Sträuchern bestockt sind und ausserhalb des Waldes liegen, unterschieden. Sie werden als Flurholzkategorien bezeichnet.

Zuwachs pro Flurholzkategorie

Jeder dieser Flurholzkategorien wurde ein «Zuwachs bei 100% Deckungsgrad» oder bei «gegebenem Deckungsgrad» zugewiesen.

Zuwachs pro Höhenlage und Kanton

Der Zuwachs pro Höhenlage und Kanton wurde dem LFI (2014) [12] entnommen. Die Werte beziehen sich auf den gemeinsam zugänglichen Wald ohne Gebüschwald gemäss LFI1/LFI2/LFI3/LFI4 und die jährliche Zunahme des Schaftholzvolumens in Rinde der zwischen zwei Inventuren überlebenden Bäume und Sträucher ab 12 cm Brusthöhendurchmesser (BHD) [12]. Dabei handelt es sich um Werte, die eigentlich im Wald gelten. Sie wurden gewählt, weil entsprechend detaillierte Werte von der Flur für die ganze Schweiz nicht vorhanden sind. Damit wird angenommen, dass die Zuwächse auf der Flur verhältnismässig zur Höhenlage gleiche Variationen aufweisen wie im Wald. Die Zuwächse pro Höhenlage und Kanton widerspiegeln Informationen zu lokalen Gegebenheiten bezüglich Bodenbeschaffenheit, Sonneneinstrahlung, Niederschlag, etc. [8] und sind deswegen wichtig für die Abschätzung des Zuwachses auf den einzelnen Flurholzflächen (Kap. 2.4 und 2.5).

Das digitale Höhenmodell [1] ist ein Datensatz der Swisstopo. Mit dessen Hilfe kann jedem Stichprobenpunkt der Arealstatistik seine Höhe über Meer zugewiesen werden.

Erntekosten bedingt durch Hangneigung und Distanz zur nächsten Strasse

Da nicht alle mit Flurholz bestockten Stichproben genutzt werden können, weil sie zu steil oder zu weit von der nächsten Abfuhrstrasse entfernt sind, wird die verfügbare Holzmenge um diesen Teil verringert. Die Steilheit wird über die Hangneigung mit dem digitalen Höhenmodell [1] berechnet. Die Erreichbarkeit der nächsten Strasse wird aus Vector25 [16] hergeleitet. Vector25 ist ein digitales Landschaftsmodell der Schweiz und basiert inhaltlich und geometrisch auf der Landeskarte 1:25 000. Es gibt die natürlichen und künstlichen Objekte der Landschaft wieder. Mit Hilfe des darin enthaltenen Strassennetzes wurde die Erreichbarkeit der Stichprobenpunkte für die «Holzernte» bestimmt.

Reduktion wegen stofflicher Nutzung und kantonale Aussagen

Das geerntete Flurholz wird energetisch und stofflich genutzt. Der auf Expertenbefragung beruhende Anteil der stofflichen Nutzung wurde aus der BAFU/BFE Studie übernommen [8] (Kap. 2.5.3). Um kantonale Aussagen zu ermöglichen, wurden die Daten mit den georeferenzierten Gemeinde- und Kantongrenzen kombiniert [5].

2.3 Auswahl und Einteilung der Flurholzflächen

Um Doppelzählungen mit dem Energieholzsortiment Waldenergieholz zu vermeiden, wurden alle bestockten Flächen aus der Arealstatistik mit der LFI Walddefinition gemäss Brassel et al. (2010) [6] (S. 17) hinsichtlich Deckungsgrad, Oberhöhe und Mindestbreite abgeglichen. Handelte es sich nach dieser Definition um eine Waldfläche, wurde die Fläche nicht als Flurholz gezählt. Insbesondere die im Bericht von BAFU und BFE (2009) [8] berücksichtigten Flächen «aufgelöster Wald auf Landwirtschaftsflächen» werden nicht zur Flur gezählt, weil sie mit den Angaben des BFS (2006) [4] (Mindestbreite von 50 Metern, Deckungsgrad 20 bis 60% und Oberhöhe grösser drei Meter) als Wald klassifiziert werden. Die Flurholzkategorien wurden in fünf Flurholzgruppen eingeteilt:

1. *Verkehrsgrün*: Grünflächen entlang von Strassen und Bahnen.
2. *Uferbereich*: An Fliessgewässer oder Seen anstossende Flächen mit Bestockung.

3. *Siedlungsgebiet*: Neben den öffentlichen Grünflächen (z.B. Parkanlagen, Friedhöfe, Sportanlagen) wird auch der Umschwung von Gebäuden (z.B. Wohnhäuser und Industriegebäude) dieser Gruppe zugeordnet. Alleen und Straßenbäume gehören ebenfalls dazu.
4. *Hecken*: Isolierte Bestockungen im Kulturland.
5. *Landwirtschaftliche Flächen, Baum- und Strauchvegetation*: Landwirtschaftlich genutzte Flächen, auf denen holzartige Biomasse anfällt, wie z.B. Obstanlagen und Reben, aber auch verbuschte Flächen und Baumgruppen.

2.4 Bestimmung des Zuwachses

Jeder Flurholzfläche der Arealstatistik wurde basierend auf Literatur (z.B. [11] und [8]) der «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» zugewiesen (*Tabelle 1*). Die Zuwächse liegen zwischen 0.6 bis 4.15 t TS pro Hektare und Jahr. Dieser Zuwachs ergibt sich direkt aus der Literatur oder aufgrund der anteilmässigen Berücksichtigung des «gegebenen Deckungsgrades» am «Zuwachs bei 100% Deckungsgrad» (Kapitel 2.4.1 bis 2.4.5).

Eine Übersicht, welche Grundkategorien der Arealstatistik für die Berechnungen mit welchen Zuwächsen verwendet wurden, gibt *Tabelle 1*.

Für die weiteren Berechnungen wurde der «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» reduziert. Zunächst erhält man so nach Berücksichtigung der Höhenlage das theoretische Potenzial. Von diesem aus erfolgen die weiteren Restriktionen (*Abbildung 1*).

Tabelle 1: Zuwächse bei verschiedenen Deckungsgraden nach Flurholzkategorien und -gruppen.

Flurholzgruppen	Nr. AS	Flurholzkategorien	Zuwachs bei 100% Deckungsgrad [t TS pro ha u. Jahr]	Quelle	Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad [t TS pro ha u. Jahr]	Quelle und gegebener Deckungsgrad
Siedlungsgebiet	2	Umschwung von Industrie- und Gewerbegebäuden	-	-	0.6	Kalschmitt et al. (2009) [11]
	4	Umschwung von Ein- und Zweifamilienhäusern	-	-	0.6	
	6	Umschwung von Reihen- und Terrassenhäusern	-	-	0.6	
	8	Umschwung von Mehrfamilienhäusern	-	-	0.6	
	10	Umschwung von öffentlichen Gebäuden	-	-	0.6	
	12	Umschwung von landwirtschaftlichen Gebäuden	-	-	0.6	
	14	Umschwung von nicht spezifizierten Gebäuden	-	-	0.6	
	17	Strassen, Wege	-	-	0.6	
	31	Öffentliche Parkanlagen	-	-	1.75	
	32	Sportanlagen	-	-	0.6	
	33	Golfplätze	-	-	0.6	
	34	Campingplätze	-	-	1.75	
	35	Schrebergärten	-	-	0.6	
	36	Friedhöfe	-	-	2.25	

Fortsetzung S. 84

Flurholzgruppen	Nr. AS	Flurholzkategorien	Zuwachs bei 100% Deckungsgrad [t TS pro ha u. Jahr]	Quelle	Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad [t TS pro ha u. Jahr]	Quelle und gegebener Deckungsgrad
Verkehrsgrün	16	Autobahngrün	8.3	A.Müller (SBB), A. Bürgi (WSL) in BAFU/BFE (2009)	4.15	Gemäss Arealstatistik in BAFU/BFE (2009) [8] wird von einem Deckungsgrad von 50% ausgegangen.
	18	Strassengrün	8.3	A.Müller (SBB), A. Bürgi (WSL) in BAFU/BFE (2009)	4.15	
	21	Bahngrün	8.3	A.Müller (SBB), A. Bürgi (WSL) in BAFU/BFE (2009)	4.15	
Landwirtschaftliche Flächen, Baum und Strauchvegetation	37	Obstanlagen	-	-	3.5	Kaltschmitt et al. (2009) [11], Deckungsgrad gemäss Arealstatistik in BAFU/BFE (2009) [8] 100%
	38	Feldobst	-	-	0.6	Basierend auf Annahmen Obstanlagen gemäss Kaltschmitt et al. (2009) [11] und Flächenverteilung, bzw. Deckungsgrad (25% Streuobst, 100% geordnete Obstbestände) gemäss Arealstatistik in BAFU/BFE (2009) [8].
	39	Rebbaufächen	-	-	1.5	Kaltschmitt et al., 2009 [11]
	44	Verbuschte Wiesen und Heimweiden	8.3	A. Bürgi, WSL; LFI 2 in BAFU/BFE (2009)	4.15	LFI 2 Wert basierend auf Umrechnungsfaktor BAFU/BFE (2009) ¹ [8] in t TS pro ha Jahr umgerechnet, Deckungsgrad 50% [4]
	47	Verbuschte Alp- und Jurawiesen	6	BAFU/BFE (2009)	3	Deckungsgrad 50% gemäss BFS (2006) [4]
	59	Baumgruppen (auf Landwirtschaftsflächen)	8.3	Mündliche Mitteilung A. Bürgi in BAFU/BFE (2009) nach LFI2	0.8	Deckungsgrad von 10% nach Arealstatistik in BAFU/BFE (2009) [8].
	60	Baumgruppen (auf unproduktiven Flächen)	8.3	Mündliche Mitteilung A. Bürgi in BAFU/BFE (2009) nach LFI2	0.8	Deckungsgrad von 10% nach Arealstatistik in BAFU/BFE (2009) [8].
	64	Gebüsch- und Strauchvegetation	5		3	Eigene Annahme gemäss «Hecken»
Hecken	58	Feldgehölze, Hecken	5	BAFU/BFE (2009)	3	Deckungsgrad von 60% gemäss BFS (2006) [4].
Uferbereich	62	Wasserläufe			3	9 Tonnen TS werden im Bericht Walder et al. (2015) [17] verwendet. BAFU/BFE verwendet für Uferböschungen 9 Tonnen TS. Wasserläufe und Hochwasserbauwerke haben deutlich geringere Bestockungen als Uferböschungen.
	63	Hochwasserbauwerke			3	

¹ BAFU/BFE (2009) geht davon aus, dass ein Kubikmeter Flurholz, 0.6 t TS entsprechen, also eine Tonne TS 1.65 m³ entsprechen.

Nachfolgend werden die in der Modellierung verwendeten Zuwächse der einzelnen Flurholzkategorien, aufgeteilt nach Flurholzgruppen erläutert. Auf allen Flächen fällt verholzte Biomasse in Form von Bäumen oder Sträuchern an. Abschätzungen der Zuwächse für Flächenkategorien sind jedoch schwierig, weil die innerhalb einer Grundkategorie ausgewiesenen Flächen der Arealstatistik bezüglich Bestockung, Altersstruktur sowie Pflegekonzept stark variieren [8] und nur wenige bekannte Werte der Literatur entnommen werden können. Bei den verwendeten Zuwächsen handelt es sich daher um grobe Annahmen. Um eine Überschätzung der Potenziale zu vermeiden, wird jeweils ein geringerer Zuwachs unterstellt. Häufig sind Zuwächse in Frischsubstanz angegeben; für die Modellierung werden Zuwächse in Tonnen TS (Trockensubstanz) verwendet. Angaben von verholzter Frischsubstanz werden in Trockensubstanz, also bei Wassergehalt 0% umgerechnet (Kap. 2.6).

Die einzelnen Flurholzflächen der Arealstatistik [3] wurden gesamtschweizerisch aufsummiert und die Resultate mit den pro Grundkategorie zusammengefassten Angaben des BFS (2004/09) [2] sowie mit ausgewiesenen Flächen vom BAFU/BFE (2009) [8] verglichen. Dabei sind die in BFS (2004/09) [2] ausgewiesenen Flächen in Bezug auf die Kategorisierung identisch mit den Flurholzflächen der Arealstatistik [3]. Deutliche Differenzen ergeben sich allerdings zu den im Bericht BAFU/BFE (2009) [8] ausgewiesenen Flächen. In der vorliegenden Studie werden deswegen nachfolgend die direkt aus [3] aufsummierten Werte gezeigt.

2.4.1 Verkehrsgrün

Zu dieser Gruppe gehören: Grün- oder Steilflächen innerhalb des Wildschutzzauns bei Autobahnen, wie zum Beispiel Böschungen, Grünflächen von Parkplätzen und Raststätten. Ebenfalls gehören Straßen und Wege mit Zufahrten und Bestockungen sowie Gärten, Obstbäume und Reben innerhalb der Flächen dazu. Zudem Rest- oder Steilflächen, die durch den Bau von Straßenanlagen entstanden sind. Ebenso isolierte Grünflächen (Verkehrsinseln, -kreisel), künstliche Böschungen von Einschnitten und Dämmen entlang von Straßen, aber auch Grünstreifen ohne andere Nutzung zwischen Straße und Wald. Zudem durch den Bau von Bahnanlagen entstandene Rest- oder Steilflächen ohne landwirtschaftliche Nutzung oder oft künstliche Böschungen von Einschnitten und Dämmen entlang offener Bahnstrecken [4] (*Tabelle 2*).

Bei 100% Deckungsgrad wird der Zuwachs gemäss BAFU/BFE (2009) [8] von 8.3 t TS pro ha und Jahr² übernommen. Gemäss Arealstatistik [4] beträgt der Deckungsgrad 50%. Dies ergibt für unsere Berechnungen einen «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» von 4.15 Tonnen TS pro ha und Jahr.

Tabelle 2: Flurholzkategorien der Flurholzgruppe «Verkehrsgrün».

Nr. AS	Flurholzkategorie	Fläche (ha)	Fläche an der gesamten Landesfläche in %	Fläche an der gesamten Flurholzfläche der Schweiz in %
16	Autobahngrün	2601	0.06	0.51
18	Strassengrün	7506	0.18	1.46
21	Bahngrün	3347	0.08	0.65

² BAFU/BFE (2009) [8] geht aufgrund mündlicher Mitteilung von Albert Müller (SBB) und Anton Bürgi (WSL) von 8.3 t TS pro ha und Jahr aus, wie dies auf einem Waldstandort üblich ist. Dieser Zuwachs entspricht nach Umrechnung basierend auf BAFU/BFE (2009) ($1 \text{ m}^3 \text{ Flurholz} = 0.6 \text{ t}$)¹ einem Wert für Waldstandorte im Mittelland bis 600 Meter über Meer von 13.8 m^3 pro ha und Jahr. Dabei handelt es sich um den im LFI 2 nach Produktionsregion und Höhenlage maximal ausgewiesenen Zuwachs pro Produktionsregion und Höhenlage (an einem Waldstandort). Er kann deswegen als Richtwert für einen optimalen Standort mit 100% Deckungsgrad angenommen werden. Gemäss LFI [12] ist dieser Wert auch heute noch realistisch. Der höchste Zuwachs im Mittelland liegt zwischen 600 und 1000 Meter über Meer und beträgt 13.2 m^3 pro ha und Jahr (entspricht 7.9 t TS¹) und liegt in einer ähnlichen Größenordnung.

2.4.2 Uferbereich

Zu dieser Gruppe gehören: Dauernd oder periodisch von fliessenden Gewässern (Flüsse, Bäche, Kanäle) überflutete Flächen, befestigte oder begrünte Uferböschungen, Ufer mit oder ohne Vegetation (Sand-, Kiesstrände, Böschung, etc.). Durch Wildbachsperrungen verbaute Fliessgewässer sowie Anlagen, die der Geschiebeablagerung (Geschiebefänger) oder der Verhinderung von Überflutungen (Hochwasserdämme) dienen. Bachbette zwischen zwei Wildbachsperrungen von maximal 50 Meter Abstand, Wildbachsperrungen von Bächen grösser sechs Meter Breite im Wald, bestockte Hochwasserdämme, landwirtschaftlich genutzte oder nicht genutzte Hochwasserdämme, Fuss- und Radwege auf Dämmen, aber auch die Wasserfläche, Bachläufe im Wald, die breiter als sechs Meter sind sowie Geröll, Sand oder Fels im Bach- und Flussbett. Auch Bachbettverbreiterungen (Birnen) und Geschiebeentnahmen mit flexiblen Installationen (Schotterstrassen, Bagger etc.) gehören dazu [4].

Im Bericht von Walder et al. (2015) zum Energieholzpotenzial im Kanton Graubünden werden diese Flächen mit einem Zuwachs von 9 t TS pro ha und Jahr berücksichtigt [17]. Dies basierend auf den Angaben gemäss BAFU/BFE (2009) [8]. Allerdings berücksichtigt der Bericht des BAFU/BFE (2009) [8] nur die Uferböschungen. In der 72er Kategorie der Arealstatistik [3] sind Uferböschungen nicht als einzelne Grundkategorie ausgewiesen, sondern in den beiden Grundkategorien Wasserläufe und Hochwasserverbauungen enthalten. In diesen beiden Kategorien sind jedoch auch viele nicht bestockte Flächen berücksichtigt. Wir gehen davon aus, dass höchstens ein Drittel der Flächen bestockt sind. Deswegen wird hier ein deutlich tieferer Wert für den «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» von 3 t TS pro ha und Jahr verwendet (*Tabelle 3*).

Tabelle 3: Flurholzkategorien der Flurholzgruppe «Uferbereich».

Nr. AS	Flurholzkategorie	Fläche (ha)	Fläche an der gesamten Landes- fläche in %	Fläche an der gesamten Flurholzflä- che der Schweiz in %
62	Wasserläufe	32360	0.78	6.28
63	Hochwasserverbauungen	1815	0.04	0.35

2.4.3 Siedlungsgebiet

Auf Umschwüngen von öffentlichen und privaten Gebäuden und Anlagen sowie Parks, auf Friedhöfen Sportanlagen, Campingplätzen, Strassen und Wegen fällt holzartige Biomasse an. Infolge der unterschiedlichen Bestandesdichte, Altersstruktur der Baum- und Strauchschicht und dem realisierten Pflegekonzept variieren die anfallenden Biomassemengen [8]. Kaltschmitt et al. (2009) [11] schätzen, dass näherungsweise im Durchschnitt in öffentlichen Grünanlagen zwischen 1.8 und 7 Tonnen pro ha und Jahr an verholzter Frischmasse anfällt. Das entspricht 0.9 bis 3.5 t TS pro ha und Jahr³. Umschwünge, Strassen/Wege, Sportanlagen und Schrebergärten werden wie im Bericht BAFU/BFE mit dem Wert 0.6 t TS pro ha und Jahr berücksichtigt, weil auf diesen Flächen gemäss Arealstatistik [4] nur vereinzelte Bäume wachsen. Für Parkanlagen und Camping wird in der Modellierung die Hälfte des höheren Wertes von Kaltschmitt et al. für öffentliche Grünanlagen von 1.75 t TS angenommen.

Auf Friedhöfen fallen näherungsweise Holzmengen zwischen 4.5 und 13 t Frischsubstanz pro ha und Jahr an. Das sind zwischen 2.25 bis 6.5 t TS pro ha und Jahr³. Die geringsten spezifischen Biomassemengen sind auf den oftmals fast baum- und strauchlosen dörflichen Friedhöfen gegeben, während die baumreichen städtischen Waldfriedhöfe meist durch einen deutlich grösseren flächenspezifischen Mengenanfall gekennzeichnet sind [11]. Für die Berechnung wird die untere Grenze von 2.25 t TS pro ha und Jahr berücksichtigt (*Tabelle 4*).

³ Die Umrechnung von Trockensubstanz in Frischsubstanz ist im Kapitel 2.6 beschrieben.

Tabelle 4: Flurholzkategorien der Flurholzgruppe – «Siedlungsgebiet».

Nr. AS	Flurholzkategorie	Fläche (ha)	Fläche an der gesamten Landesfläche in %	Fläche an der gesamten Flur- holzfläche der Schweiz in %
2	Umschwung von Industrie- und Gewerbegebäuden	15168	0.36	2.95
4	Umschwung von Ein- und Zweifamilienhäusern	56211	1.36	10.92
6	Umschwung von Reihen- und Terrassenhäusern	3173	0.08	0.62
8	Umschwung von Mehrfamilienhäusern	20249	0.49	3.39
10	Umschwung von öffentlichen Gebäuden	7145	0.17	1.39
12	Umschwung von landwirtschaftlichen Gebäuden	16683	0.40	3.24
14	Umschwung von nicht spezifizierten Gebäuden	8480	0.21	1.65
17	Strassen, Wege	63294	1.53	12.29
31	Öffentliche Parkanlagen	4095	0.10	0.80
32	Sportanlagen	7930	0.19	1.54
33	Golfplätze	3141	0.08	0.61
34	Campingplätze	1135	0.03	0.22
35	Schrebergärten	1903	0.05	0.37
36	Friedhöfe	1440	0.03	0.28

2.4.4 Hecken

Es handelt sich um isolierte, linienförmige Bestockungen, bestehend aus Waldbäumen, Feldgehölzen und Sträuchern mit einer Maximalbreite von 25 Metern und einer Oberhöhe von mindestens drei Metern. Hecken sind oft isolierte Gehölze mit Abschluss- oder Gliederungsfunktion in der Kulturlandschaft, zum Beispiel als Eigentumsgrenzen, entlang von Fliessgewässern oder Windschutzstreifen [4].

Aufgrund unterschiedlicher Bestockungsdichte, Altersstruktur, Klima- und Bodenbedingungen liegen keine Angaben zum Zuwachs auf den Flächen vor. Die Untersuchung BAFU/BFE (2009) [8] geht von einem Richtwert für den jährlichen Zuwachs von Bäumen und Sträuchern aus. Dieser beträgt 5 t TS pro ha und Jahr bei 100% Deckungsgrad. Gemäss BFS (2006) [4] beträgt der Deckungsgrad mindestens 60%, weswegen hier ein «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» von 3 t TS pro ha und Jahr in der Modellierung angenommen wird (*Tabelle 5*).

Tabelle 5: Flurholzkategorien der Flurholzgruppe «Hecken».

Nr.	Flurholzkategorie	Fläche in (ha)	Fläche an der gesamten Lan- desfläche in %	Fläche an der gesamten Flurholzfläche der Schweiz in %
58	Feldgehölze, Hecken	30716	0.74	5.96

2.4.5 Landwirtschaftliche Flächen-, Baum- und Strauchvegetation

Die landwirtschaftliche Flächen-, Baum- und Strauchvegetation wird in folgende Grundkategorien unterteilt (*Tabelle 6*) und deren Zuwächse ermittelt:

Tabelle 6: Flurholzkategorien der Flurholzgruppe «Landwirtschaftliche Flächen, Baum- und Strauchvegetation».

Nr. AS	Flurholzkategorie	Fläche in (ha)	Fläche an der gesamten Landesfläche in %	Fläche an der gesamten Flurholz- fläche der Schweiz in %
37	Obstanlagen	8563	0.21	1.66
38	Feldobst	22174	0.54	4.31
39	Rebbaufächen	15708	0.38	3.05
44	Verbuschte Wiesen und Heimweiden	2077	0.05	0.40
47	Verbuschte Alp- und Jurawiesen	48004	1.16	9.32
59	Baumgruppen (auf Landwirtschaftsflächen)	39145	0.94	7.60
60	Baumgruppen (auf unproduktiven Flächen)	21818	0.53	4.24
64	Gebüsch, Strauchvegetation	69103	1.67	13.42

Obstanlagen

Bei modernen mitteleuropäischen Anlagen mit 5'000 bis 10'000 Bäumen pro Hektar ergeben sich Holzmengen von 4 bis 12 t Frischmasse (2 bis 6 t TS³) pro ha und Jahr. In älteren Anlagen mit ca. 580 Bäumen pro ha ist das Holzaufkommen mit rund 4.2 t pro ha und Jahr entsprechend geringer. Dabei wird davon ausgegangen, dass es sich um Frischmasse handelt [11]. Dementsprechend sind das 2.1 t TS pro ha und Jahr. Weiteres Holz fällt bei der Rodung der Obstplantagen an. Die Holzmengen liegen bei 80 t pro ha (Frischmasse) für ältere Anlagen. Die Rodung findet nach ungefähr 30 Jahren statt. Das entspricht 2.7 t pro ha und Jahr Frischmasse (1.35 t TS³). Moderne Anlagen werden nach 10 bis 15 Jahren gerodet und ergeben 60 t pro ha (Frischmasse) [11], was pro Jahr rund 4 t Frischmasse pro ha entspricht. Gemäss BFS (2006) [4] müssen auf Obstplantagen nur mindestens 300 Bäume pro Hektar wachsen. Das BAFU/BFE (2009) [8] geht von einem Deckungsgrad von 100% aus. Es wird deswegen gemäss Kaltschmitt et al. (2009) [11] der durchschnittliche Zuwachs für ältere Anlagen berücksichtigt. Mit der holzartigen Biomasse aus der Rodung der Anlagen (gerechnet mit älteren Anlagen) erhält man den «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» von 3.5 t TS pro ha und Jahr.

Feldobst

Hierzu zählen Flächen mit mindestens drei und maximal 25 Meter voneinander entfernt stehenden Hochstammobstbäumen, meist in der Nähe von Siedlungen oder Einzelhöfen, aber auch entlang von Feldwegen. Bestockungen sind Feldobstbäume (Stein-, Kernobst, Nussbäume), sowie Streuobst und geordnete Hoch- und Halbstamm-Baumbestände in Reihenform mit weniger als 300 Bäumen pro Hektar. Geordnete Baumbestände und Streuobst haben unterschiedliche Bestockungen. Aus BAFU/BFE (2009) sind die Flächen bekannt (3324 ha geordnete Obstplantagen, 41912 ha Streuobst, ca. 8% bzw. 92%).

Da hier weniger als 300 Bäume pro ha vorhanden sind, wird ein geringerer Zuwachs verwendet als auf normalen Obstanlagen. Wird der Zuwachs für Obstplantagen proportional zu den auf der Fläche vermuteten Bäumen heruntergebrochen, ergibt sich ein maximaler Wert bei 300 Bäumen von 1.1 t TS pro ha und Jahr. Gemäss Arealstatistik in BAFU/BFE (2009) [8] kann bei Streuobst von einem Deckungsgrad von 25%, bei geordneten Obstbeständen von 100% ausgegangen werden. Auch die Rodung der Flächen wird basierend auf der Baumanzahl proportional zu den Annahmen bei Obstplantagen angenommen (0.7 t TS pro ha und Jahr). Unter Berücksichtigung des Deckungsgrades (25, beziehungsweise 100%) und dem in BAFU/BFE (2009) [8] ausgewiesenen Flächenanteil von geordneten Obstplantagen zu Streuobst (ca. 8% zu 92%) wird der gewichtete Mittelwert in Tonnen TS pro ha und Jahr ermittelt. Dies basierend auf dem proportional zur Baumanzahl berechneten Zuwachs für Obstanlagen (1.08 t TS pro ha und Jahr) sowie der bei der Rodung anfallenden Holzmenge (0.7 t TS pro ha

und Jahr). Das Ergebnis von rund 0.6^4 t TS pro ha und Jahr gilt als «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» auf diesen Flächen.

Rebbauflächen

Gemäss BFS (2006) [4] handelt es sich um landwirtschaftliche Produktionsflächen, die ausschliesslich für den Rebbau in Draht-, Stickel-, Terrassen- oder Hochbauform (Pergola) genutzt werden. Dazu zählen auch Grün- und Restflächen sowie vorübergehend nicht bepflanzte Rebbauflächen. Die Rebstöcke müssen in Reihen von maximal drei Metern Abstand gepflanzt sein. Auch Pergolareben zählen dazu. Sie werden hier jedoch aufgrund ihrer geringen Fläche (110 ha nach Arealstatistik in BAFU/BFE (2009) [8]) nicht separat behandelt. Dem Rebbau dienende Infrastrukturen und Anlagen innerhalb des Areals, vegetationslose, gemähte oder gemulchte Zwischenstreifen und Restflächen innerhalb des Areals zählen dazu.

Die beim jährlichen Schnitt in den Weinbergen anfallende Biomasse ist als Energieträger kaum einsetzbar, da eine Sammlung des Rebschnitts in den zum Teil schwer zugänglichen Weinbergen sehr aufwändig ist und nur wenig holzartige Biomasse anfällt. Der Rebschnitt verbleibt meist in gehäckselter Form als Bodenverbesserer und als Mulch in den Weinbergen. Zusätzlich fällt bei der Rodung von Weingärten Holz an. Eine Neuapfanzung beziehungsweise Rodung des Altbestandes wird im Allgemeinen etwa alle 30 Jahre durchgeführt. Dabei fallen rund 100 t pro Hektar beziehungsweise 3 t pro ha und Jahr (= 1.5 t TS³) an frischem Holz an. Dieses Holz wird heute im Allgemeinen ebenfalls gehäckstet und meist als Mulchmaterial eingesetzt. Kleinere Anteile werden als Brennholz verwendet oder gegebenenfalls stofflich genutzt. Sofern kein Bedarf für eine stoffliche Nutzung besteht, könnte dieses bei der Rodung anfallende Material auch vollständig energetisch genutzt werden [11]. Als «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» wird der von [11] vorgeschlagene Wert von 1.5 t TS pro ha und Jahr verwendet.

Verbuschte Wiesen und Heimweiden

Bezieht sich auf Wies- und Weideland der Dauersiedlungszone, welches mit Gebüsch, Sträuchern oder Jungbäumen von maximal drei Metern Höhe und einem Deckungsgrad der Verbuschung von 50 bis 80% überwachsen ist [4]. Die Zuwächse auf diesen Flächen sind ähnlich denen auf Waldstandorten⁵. Mit einer konservativ angenommenen Bestockung von 50%, ergibt sich ein «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» von 4.15 t TS pro ha und Jahr für die Verwendung im Modell.

Verbuschte Alp und Juraweiden

Hierzu zählen Alpweideflächen, die mit Gebüsch, Zwergräuchern oder Jungbäumen mit einem Deckungsgrad der Verbuschung von 50–80% überwachsen und in ihrer Nutzung stark eingeschränkt sind [4].

Der jährliche Zuwachs ist auf diesen Flächen aufgrund der Strauchvegetation kleiner als auf den Waldstandorten⁵. Es wird von einem maximalen Zuwachs gemäss BAFU/BFE (2009) [8] von 6t TS pro ha und Jahr ausgegangen. Die Bestockung ist meist sehr mager. Deswegen wird von einem Deckungsgrad von 40% ausgegangen und dementsprechend ein «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» von 2.4 t TS pro ha und Jahr angenommen.

⁴ Berechnungsgang: [Anteil Streuobst]*[Zuwachs für 300 Bäume]*[Deckungsgrad]+[Anteil Streuobst]*[Rodung bei 300 Bäumen]*[Deckungsgrad]+[Anteil Obstplantagen]*[Zuwachs für 300 Bäume]*[Deckungsgrad]+ [Anteil Obstplantagen]*[Rodung bei 300 Bäumen]*[Deckungsgrad]

= $0.92 * 1.1[t \text{ TS}] * 0.25 + 0.92 * 0.7[t \text{ TS}] * 0.25 + 0.08 * 1.1[t \text{ TS}] * 1 + 0.08 * 0.7[t \text{ TS}] * 1 = 0.6 \text{ t TS}$

⁵ BAFU/BFE (2009) gehen aufgrund mündlicher Mitteilung von Müller, A. (SBB) und Bürgi, A. (WSL) von einem Zuwachs wie auf einem Waldstandort aus (8.3 t TS pro ha und Jahr). Dieser Zuwachs entspricht nach Umrechnung basierend BAFU/BFE (2009) ($1 \text{ m}^3 \text{ Flurholz} = 0.6 \text{ t}$) einem Wert für Waldstandorte im Mittelland bis 600 Meter über Meer von 13.8 m^3 pro ha und Jahr. Das ist der im LFI 2 nach Produktionsregion und Höhenlage maximal ausgewiesene Zuwachs an einem Waldstandort pro Produktionsregion und Höhenlage. Er kann deswegen als Richtwert für einen optimalen Standort angenommen werden.

Baumgruppen

Hierzu zählen nicht lineare Bestockungen aus Wald- und Obstbäumen mit landwirtschaftlicher Unternutzung [4]. Da es sich häufig um Waldbäume handelt, kann bei 100% Deckungsgrad auch hier von einem Zuwachs wie auf einem Waldstandort ausgegangen werden². Wahrscheinlich ist der Zuwachs sogar noch etwas grösser als an Waldstandorten, da bei der Kategorie Baumgruppen mehr Licht vorhanden ist. Auf den Flächen sind jedoch nur vereinzelt Bäume vorhanden. Beispiele sind Baumgruppen auf Landwirtschaftsflächen im Tal- und Alpgebiet (Wiesen, Weiden). Häufiger sind die Flächen im Bereich der alpwirtschaftlichen Nutzflächen, seltener im Talgebiet anzutreffen. Es müssen mindestens drei Bäume mit höchstens 25 Metern Abstand von Stamm zu Stamm und einer Oberhöhe von mehr als drei Metern vorhanden sein. Der Deckungsgrad muss bei mehr als 50 Meter Breite kleiner als 20% sein. Bei 25–50 Meter Breite muss der Deckungsgrad kleiner 60% sein. Bei einer Breite unter 25 Metern kann der Deckungsgrad beliebig sein [4].

Wie beschrieben sind auf den Flächen nur vereinzelt Bäume anzutreffen. Das BAFU/BFE (2009) [8] geht deswegen von einer Bestockung von 10% aus. Dementsprechend berechnet sich ein «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» von mindestens 0.8 t TS pro ha und Jahr, welcher in der Modellierung berücksichtigt wird.

Gebüsch und Strauchvegetation

Diese Flächen müssen mindestens 625 m² gross sein. Sie sind überwiegend mit Gebüsch, Zwergstrauchvegetation oder einwachsenden Bäumen unter drei Meter Höhe bestockt. Es muss ein Deckungsgrad von mindestens 80% vorhanden sein [4].

Es liegen aufgrund unterschiedlicher Deckungsgrade, Altersstruktur, Klima- und Bodenbedingungen keine Angaben zum Zuwachs auf den Flächen vor. Es wird davon ausgegangen, dass der Zuwachs dem Richtwert für den jährlichen Zuwachs von Bäumen und Sträuchern entspricht. Dieser beträgt 5 t TS pro ha und Jahr bei 100% Deckungsgrad [8]. Es wird von einem «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» von 3 t TS pro ha und Jahr ausgegangen.

2.5 Berechnung der Potenziale

Die Abschätzungen der Potenziale bauen aufeinander auf und berücksichtigen verschiedene Nutzungseinschränkungen. Zuerst wird das theoretische Potenzial, dann das nachhaltige und schliesslich das bereits genutzte Potenzial bestimmt. Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen dem nachhaltigen und dem bereits genutzten Potenzial (*Abbildung 1*).

2.5.1 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial (TP) umfasst den gesamten Zuwachs, der auf einer bestimmten Flurholzfläche innerhalb eines Jahres anfällt. Um den Zuwachs an einem Standort zu bestimmen, wird der maximal verwendete Zuwachs (*Tabelle 1*) gemäss ökologischen Standortfaktoren gewichtet. Als Parameter, der Niederschlag, Bodenbeschaffenheit oder Exposition abbildet, dient der Zuwachs pro Höhenlage gemäss LFI (2014) [12] (*Tabelle 7*). Es wird davon ausgegangen, dass der Zuwachs auf der Flur jenem im Wald entspricht. Die Höhenlage jedes Stichprobenpunktes der Arealstatistik wird dem digitalen Höhenmodell entnommen. Jeder Stichprobenpunkt der Arealstatistik wird den folgenden fünf Höhenklassen zugeordnet: bis 600, >601–1000, >1001–1400, >1401–1800 und über 1800 Meter über Meer. Anschliessend wird der «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» je nach Höhenklasse und Kanton, in welchem er fällt, gewichtet. Für die Gewichtung wird gemäss LFI (2014) [12] (*Tabelle 7*) die Höhenklasse mit dem höchsten Zuwachs gleich 1 gesetzt. Die restlichen Höhenfaktoren werden proportional zum höchsten Zuwachs festgelegt (*Tabelle 8*).

Tabelle 7: Zuwachs in Kubikmeter pro Hektar und Jahr gemäss LFI (2014) [12] in den Kantonen unterteilt nach fünf Höhenklassen.
Die Tabelle bezieht sich auf den gemeinsamen zugänglichen Wald ohne Gebüschwald. Berücksichtigt wurde die jährliche Zunahme des Schaftholzvolumens in Rinde der zwischen zwei Inventuren überlebenden Bäume und Sträucher ab 12 cm Brusthöhendurchmesser (BHD) und der Abgänge, plus das Volumen der ins System einwachsenden Bäume und Sträucher (jährlicher Bruttozuwachs mit Einwuchs).

In m ³ pro ha und Jahr																									
Kanton /Höhe	AG	AI	AR	BE	BL/ BS	FR	GE	GL	GR	JU	LU	NE	NW	OW	SG	SH	SO	SZ	TG	TI	UR	VD	VS	ZG	ZH
über 1800 m				4.4					3.9												3.6			4	
1401–1800 m				6.3	15.6	7	6.6	7.9		9	6.3	4.3				4.9				5.3	7.4	6.7	6.5	0	
1001–1400 m	7.3	12.8	8.4	14.8		7.7	7.5	10.6	10.4	9.8	8	6.8	10.7		7.2	9.8				5	7.7	8.5	6.3	10.9	16.1
601–1000 m	10.1	16.1	17.3	11.8	7.3	12	9.8	6.1	8.1	16	10	13.6	5.3	12.6	11.3	7.5	10.2	14.6	4.8	7.8	10.2	5.3	11.8	11.2	
bis 600 m	10.5			12.9	8.2	12.1	7.9		3.3	11.3	15.5	9.2		15.8	10.2	13.2	10	13.6	14.6	5.8	14.3	10.8	3.8	16.3	10.9

Tabelle 8: Höhenfaktoren zur Gewichtung des Zuwachses nach Höhenklasse für die einzelnen Kantone, basierend auf Tabelle 7.

Verwendete Faktoren																									
Kanton /Höhe	AG	AI	AR	BE	BL/ BS	FR	GE	GL	GR	JU	LU	NE	NW	OW	SG	SH	SO	SZ	TG	TI	UR	VD	VS	ZG	ZH
über 1800 m				0.34					0.52												0.62			0.62	
1401–1800 m				0.49	1.00		0.71	0.88		0.49		0.66	0.40	0.34			0.36			0.91	0.52	0.62	1.00	0.00	
1001–1400 m	0.45	0.74	0.65	0.95		0.79	1.00	0.94	0.65	0.98	0.59	0.43	0.85		0.72	0.72			0.86	0.54	0.79	0.97	0.67	1.00	
601–1000 m	0.96	1.00	1.00	0.91	0.89	0.77	1.00	0.81	0.72	1.00	1.00	0.34	1.00	0.86	0.75	0.75	1.00	0.83	0.55	0.94	0.82	0.72	0.70		
bis 600 m	1.00			1.00	1.00	0.78	1.00		0.44	1.00	0.97	0.92	1.00	0.81	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58	1.00	0.68		

2.5.2 Nachhaltiges Potenzial

Das nachhaltig nutzbare Potenzial (NP) wird durch gesellschaftspolitische und technisch-ökonomische Anforderungen eingeschränkt. Relevant sind insbesondere die Ernte-, Hack- und Transportkosten, die von der Erschließung abhängig sind. Als Parameter dient unter anderem die Hangneigung. Dabei ist der Einsatz von Mulcheräten und Schlegelmähern gemäss BAFU/BFE (2009) [8] bis zu einer Hangneigung von 70% möglich. Für Flächen, die nicht aus Sicherheitsgründen gepflegt und bewirtschaftet werden müssen, wird unterstellt, dass Standorte mit mehr als 70% Hangneigung nicht nutzbar sind. In der Berechnung sind die fünf Flurholzgruppen folgendermassen berücksichtigt:

Tabelle 9: Technische Einschränkungen aufgrund der Hangneigung, verändert gemäss BAFU/BFE (2009) [8].

Flurholzgruppe	Erläuterung	Modellierung
Siedlungsgebiet	Pflege und Bewirtschaftung wegen Sicherheitsaspekten	Für die Berechnung des nachhaltigen Potenzials werden alle Flächen berücksichtigt
Verkehrsgrün		
Landwirtschaftliche Flächen, Baum- und Strauchvegetation	Sicherheit nicht relevant	Für die Berechnung werden nur Flächen unter 70% Hangneigung berücksichtigt
Hecken		
Uferbereich		

Ebenfalls ist für die Bewirtschaftung die Erreichbarkeit der Flächen ein wichtiges Kriterium. Standorte die nicht in der Nähe einer Strasse liegen, werden weniger bewirtschaftet als solche, die gut erschlossen sind. Als Straßen wurden aus dem digitalen Landschaftsmodell der Schweiz [16] Autobahnen, Strassen erster, zweiter, dritter oder vierter Klasse berücksichtigt. Kleinere Feld- oder Fusswege wurden ausgeschlossen. Es wird angenommen, dass die Nutzung des Flurholzes von der Erreichbarkeit abhängt. Wie im Bericht BAFU/BFE (2009) [8] wird davon ausgegangen, dass das Holz aus Flächen unter 50 Meter Distanz zu einer Strasse mit einem Forstraktor gerückt werden kann und deswegen nachhaltig zu 100% genutzt wird. Bei Distanzen zwischen 50 und 150 Meter ist die Ernte mit grösserem Aufwand verbunden. Deswegen wird angenommen, dass hier nur noch 60% des Materials genutzt wird. Weiter entfernte Flächen werden von der Modellierung ausgeschlossen, beziehungsweise nicht genutzt. Anschliessend wird der stofflich genutzte Anteil nach heutigen Nutzungsanteilen abgezogen. Gemäss BAFU/BFE (2009) [8] kann von einem sehr geringen Anteil von ca. 7% (grobe Schätzung) des Materials ausgegangen werden.

2.5.3 Bereits genutztes Potenzial

Für das bereits genutzte Potenzial (BG) gibt es keine offizielle Statistik. Es wird daher wie die übrigen Potenziale modelliert beziehungsweise berechnet. Seine Ermittlung basiert auf der energetisch verwertbaren Menge Holz, die auf Flurholzflächen anfällt und bei denen man davon ausgehen kann, dass sie bewirtschaftet werden. Aus Sicherheitsgründen werden zum Beispiel alle Böschungen an Verkehrswegen oder Flurgehölze im Siedlungsgebiet regelmässig bewirtschaftet. Weitere Beweggründe für einen Unterhalt sind der Hochwasserschutz und der Naturschutz im Uferbereich. Diese Flächen werden deswegen dem nachhaltig nutzbaren Potenzial zugerechnet. Die öffentlichen Finanzen erlauben meist nur einen minimalen Unterhalt dieser Flächen. Auch die Flurholzgruppe «Hecken» sowie «landwirtschaftliche Flächen, Baum- und Strauchvegetation» werden nur zum Teil bewirtschaftet [8]. Deswegen werden die nachhaltig nutzbaren Potenziale aus «Hecken» und «landwirtschaftlichen Flächen, Baum- und Strauchvegetation» mit einem Korrekturfaktor reduziert. Dazu werden die Mengen des nachhaltigen Flurholzpotenzials auf jedem Stichprobenpunkt aufgrund ihrer Zugehörigkeit zu Produktionsregion und Kanton gewichtet. Die Gewichtung basiert auf dem Anteil des genutzten Holzes am nachhaltig nutzbaren Potenzial nach *Tabelle 10*, gemäss BAFU/BFE (2009) [8]. *Tabelle 11* zeigt, in welchen Kantonen welche Flächenanteile zu welcher Produktionsregion gezählt wurden und mit welchem Korrekturfaktor die betroffenen Stichprobenpunkte der Arealstatistik bewertet wurden.

Tabelle 10: Prozentuale Anteile des genutzten Flurholzes gemessen am nachhaltig nutzbaren Flurholzpotenzial (Kategorien: Uferbereich, Hecken, Landwirtschaftliche Flächen, Baum- und Strauchvegetation) nach Produktionsregionen.

Produktionsregion	Anteil vom nachhaltig nutzbaren Potenzial (in %)
Jura	90
Mittelland	100
Voralpen	80
Alpen	40
Alpensüdseite	30

Tabelle 11: Flächenanteile der Produktionsregionen an den Kantonen und dazu gehörende Korrekturfaktoren, welche dem Anteil des aktuell genutzten Flurholzes am nachhaltig nutzbaren Potenzial entsprechen.

Kanton	Produktionsregion	Fläche in %	Korrekturfaktor pro Stichprobenpunkt
Zürich	Mittelland	93%	1.00
	Voralpen	7%	0.80
Bern	Mittelland	28%	1.00
	Jura	9%	0.90
	Alpen	34%	0.40
	Voralpen	29%	0.80
Luzern	Mittelland	53%	1.00
	Voralpen	47%	0.80
Uri	Alpen	100%	0.40
Schwyz	Voralpen	63%	0.80
	Alpen	37%	0.40
Obwalden	Alpen	15%	0.40
	Voralpen	85%	0.80
Nidwalden	Voralpen	99%	0.80
Glarus	Alpen	100%	0.40
Zug	Mittelland	36%	1.00
	Voralpen	64%	0.80
Fribourg	Mittelland	54%	1.00
	Voralpen	46%	0.80
Solothurn	Mittelland	37%	1.00
	Jura	63%	0.90
Basel-Stadt	Jura	100%	0.90
Basel-Landschaft	Jura	100%	0.90
Schaffhausen	Jura	96%	0.90
	Mittelland	4%	1.00
Appenzell Ausserrhoden	Voralpen	100%	0.80
Appenzell Innerrhoden	Voralpen	100%	0.80
St. Gallen	Mittelland	18%	1.00
	Voralpen	56%	0.80
	Alpen	26%	0.40
Graubünden	Alpen	90%	0.40
	Alpensüdseite	10%	0.30
Aargau	Mittelland	71%	1.00
	Jura	29%	0.90
Thurgau	Mittelland	100%	1.00
Ticino	Alpensüdseite	100%	0.30
Vaud	Mittelland	46%	1.00
	Jura	30%	0.90
	Alpen	14%	0.40
	Voralpen	10%	0.80
Wallis	Alpen	100%	0.40
Neuchâtel	Jura	100%	0.90
Genf	Jura	3%	0.90
	Mittelland	97%	1.00
Jura	Jura	100%	0.90

Die gesamte bereits genutzte Menge Flurholz eines Kantons wurde berechnet, indem die Flächen des nachhaltigen Potenzials, welche nicht vollständig genutzt werden (Uferbereich, Hecken, landwirtschaftliche Flächen, Baum- und Strauchvegetation) mit dem ermittelten Korrekturfaktor aus *Tabelle 11* multipliziert, aufsummiert und zu den vollständig genutzten Flächen des nachhaltigen Potenzials (Verkehrsgrün, Siedlungsgebiet) addiert wurden.

Schlussendlich wird davon ausgegangen, dass von der gesamten bereits genutzten Flurholzmenge rund 54% energetisch genutzt werden (grobe Schätzung, gemäss BAFU/BFE (2009) [8]).

2.5.4 Zusätzlich nutzbares Potenzial

Entspricht der Differenz zwischen dem nachhaltigen und dem bereits genutzten Potenzial. Es umfasst das liegen gelassene Material und den nicht genutzten Zuwachs eines Jahres.

2.6 Umrechnungen

Holzgewicht bei unterschiedlicher Feuchte

Um das Holzgewicht bei verschiedener Feuchtigkeit zu bestimmen, beziehungsweise Frischsubstanz in Trockensubstanz umzurechnen und umgekehrt wurden folgende zwei Formeln aus [14] benutzt:

Formel 1:

$$u = \frac{(G_u - G_0)}{G_0} * 100\%$$

Formel 2:

$$x = \frac{(G_u - G_0)}{G_u} * 100\%$$

G_u Gewicht bei u % Feuchtigkeit

u Holzfeuchtigkeit in % des Trockengewichtes (atro Feuchte)

G_0 absolutes Trockengewicht (atro)

x Holzfeuchtigkeit in % des Frischgewichtes (relative Feuchte, Wassergehalt)

Es gilt gemäss [14]:

Atro (absolutes Trockengewicht)

u=0%

x=0%

Lutro (lufttrockenes Holz)

u=18%

x=15%

Waldfrisch (frisch geschlagen)

u=100%

x=50%

Aus Formel 1 und Formel 2 folgt:

Formel 3:

$$G_u = G_0 * (1 + u)$$

Formel 4:

$$G_0 = G_u * (1 - x)$$

Einsetzen von G_0 aus Formel 3 in Formel 4 ergibt

$$1 = (1 - x) * (1 + u) \text{ daraus folgt } \frac{1}{1-x} = 1 + u$$

und damit

$$G_0 = G_u * (1 - x)$$

$$G_0 = G_u * \left(\frac{1}{1+u} \right)$$

$$G_u = G_0 * \left(\frac{1}{1-x} \right)$$

$$G_u = G_0 * (u + 1)$$

Ausgehend vom Gewicht bei waldfrischem Holz kann das absolute Trockengewicht (atro) bestimmt werden und umgekehrt.

Holzgewicht in Primärenergiemenge

Der Primärenergieinhalt bei einem Heizwert für waldfrisches Holz beträgt [10]:

1. für Nadelholz 2.26 kWh/kg
2. für Laubholz 2.16 kWh/kg

Die Berechnung von Joule Primärenergie basiert auf Tonnen Frischsubstanz (zur Umrechnung von t TS in t FS, vergleiche Kap. 2.6). Zudem kann auf der Flur von deutlich mehr Laubholz als Nadelholz ausgegangen werden (Annahme eines Nadel- zu Laubholzanteils von 1 zu 10). Der Umrechnungsfaktor von kWh in Joule beträgt $3.6 \cdot 10^6$ [J/kWh].

Berechnungsgang:
$$\text{Primärenergieinhalt in Joule [J]} = \left(\text{Menge [in kg]} * \text{Energieinhalt} \left(2.26 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] \right) * \text{Anteil Nadelholz [0.1]} + \text{Menge [in kg]} * \text{Energieinhalt} \left(2.16 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] \right) * \text{Anteil Laubholz [0.9]} \right) * \text{Umrechnungsfaktor kWh in J} [3.6 \cdot 10^6]$$
.

3 Resultate

Im Anhang (*Tabelle 14*) sind die Mengenangaben pro Kantone aufgeteilt nach Flurholzgruppen dargestellt. Grundsätzlich können die einzelnen Flächenkategorien für jeden Kanton abgebildet werden, sind hier aber aus Platzgründen nicht gezeigt.

Das theoretische Flurholzpotenzial in der Schweiz beträgt rund 610'000 t TS pro Jahr beziehungsweise 9.4 PJ (*Tabelle 12*). Grosse Anteile haben Gebüsch und Strauchvegetation, Alp-, Jura- und Heimweiden, sowie holzartige Biomasse entlang von Wasserläufen (*Abbildung 3*). Diese theoretisch verfügbaren – jedoch nachhaltig nicht nutzbaren – Mengen sind hauptsächlich in den Kantonen Bern, Graubünden, Tessin und Wallis zu finden (*Tabelle 14*). Kleinere theoretisch verfügbare Flurholzmengen befinden sich in den Kantonen Freiburg, Luzern, Sankt Gallen oder dem Kanton Waadt. Hier handelt es sich vor allem um Feldgehölze, Hecken sowie holzartige Biomasse entlang von Wasserläufen.

Das nachhaltige Potenzial beläuft sich auf 305'000 t TS pro Jahr beziehungsweise 4.8 PJ (*Tabelle 12*). Die grössten Anteile haben die beiden Kategorien Feldgehölze/Hecken und Wasserläufe. Mit deutlichem Abstand folgen die Kategorien Strassen/Wege, Strassengrün und Umschwung von Ein- und Zweifamilienhäusern. Die regelmässig genutzten Potenziale Autobahn- und Bahngrün sind im Vergleich von untergeordneter Bedeutung (*Abbildung 3*).

Die Differenz zwischen dem theoretischen und dem nachhaltigen Potenzial beträgt gut 300'000 Tonnen TS pro Jahr. Viele dieser theoretisch verfügbaren Flächen liegen in steilen Gebieten oder in abgelegenen Tälern und sind nur schwer zugänglich. Besonders in Graubünden, im Tessin, in Bern und im Wallis handelt es sich oft um kaum erreichbare Flächen knapp oberhalb der Baumgrenze.

Heute werden in der Schweiz rund 150'000 t TS pro Jahr (2.3 PJ) an Flurholz energetisch verwendet. Demzufolge ist ein energetisch zusätzlich nutzbares Potenzial von 160'000 t TS pro Jahr (2.4 PJ) vorhanden (Differenz zum nachhaltigen Potenzial). Die grössten zusätzlich nutzbaren Potenziale sind in den Kantonen Graubünden, Wallis, Bern, Tessin, Waadt und Aargau vorhanden (*Tabelle 14*). Es sind hauptsächlich Feldgehölze, Hecken, holzartige Biomasse entlang von Wasserläufen oder Strassen, Baumgruppen auf Landwirtschaftsflächen, Umschwünge von Gebäuden oder Alp-, Jura- und Heimweiden. Im Tessin und im Kanton Waadt sind zusätzliche Flurholzpotenziale auf Rebbauflächen und im Wallis auf Obstgärten und auf Feldobstbeständen vorhanden.

Tabelle 12: Potenziale von Flurholz für die energetische Nutzung in der Schweiz.

Verfügbarkeit Schweiz pro Jahr	Theoretisches Potenzial	Nachhaltiges Potenzial	Bereits genutztes Potenzial	Zusätzlich nutzbares Potenzial
In Tonnen TS ⁶	606'000	305'000	149'000	156'000
In Tonnen FS ³	1'212'000	610'000	298'000	312'000
In m ³ ¹	998'082	503'000	245'000	257'000
In PJ (Primärenergie)	9.4	4.8	2.3	2.4

Betrachtet man die Flurholzgruppen, welche die einzelnen Flurholzkategorien zusammenfassen, ergibt sich ein noch akzentuierteres Bild (*Abbildung 2*). Die weitaus grössten theoretischen Potenziale finden sich in den Flurholzgruppen «Baumgruppen und Strauchvegetation» und «landwirtschaftliche Flächen». Auf den landwirtschaftlichen Flächen ist ein grosser Teil des Potenzials auch nachhaltig verfügbar. Die Potenziale der Gruppe «Baumgruppen und Strauchvegetation» finden sich vor allem im schwierigen Gelände. Entsprechend gering ist das nachhaltige Potenzial. Die grössten nachhaltigen Potenziale finden sich im Verkehrsbereich, in den Siedlungsgebieten, und bei den landwirtschaftlichen Flächen. Hier befinden sich auch die grössten bereits genutzten Potenziale. Die grössten Zusatzpotenziale sind Gruppen «landwirtschaftliche Flächen», Verkehrsgrün und Hecken zu finden. Bei der Gruppe «landwirtschaftliche Flächen» existieren offenbar Zusatzpotenziale, die deutlich grösser sind, als die bereits genutzten.

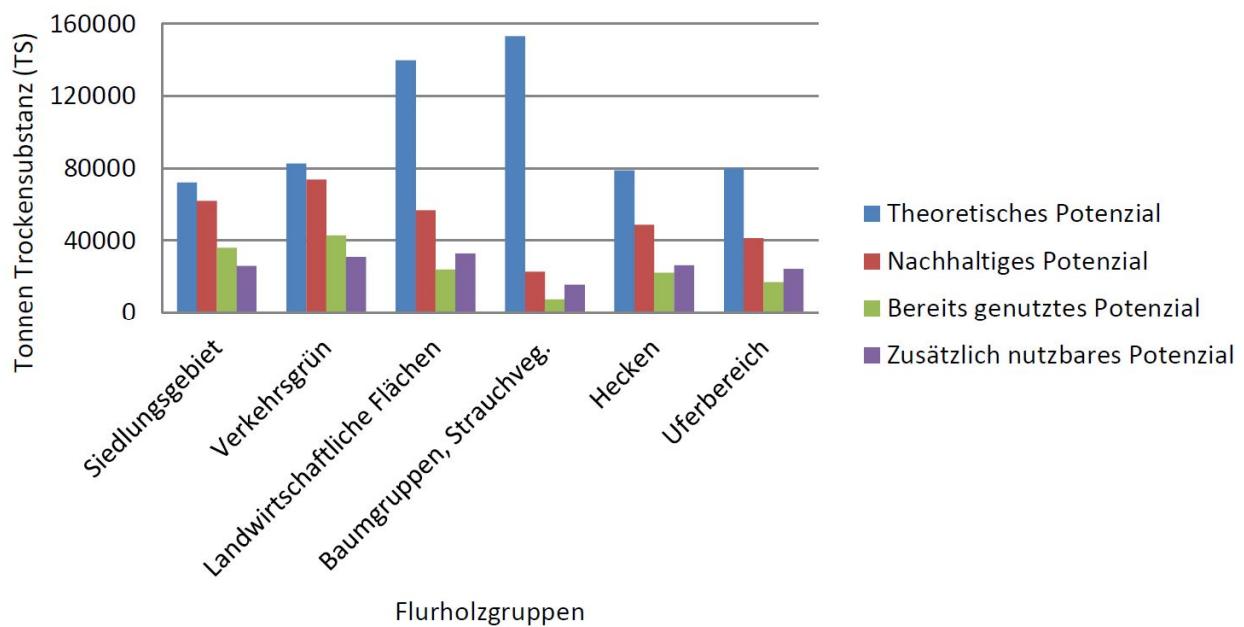


Abbildung 2: Flurholzpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung nach Flurholzgruppen.

⁶ Wert berechnet mit dem Flurholzmodell.

Tabelle 13: Flurholzpotenziale für eine energetische Nutzung in den Kantonen (in t TS/Jahr) und PJ Primärenergie.

KT	Theoretisches Potenzial (TP)		Nachhaltiges Potenzial (NP)		Bereits genutztes Potenzial (BG)		Zusätzlich nutzbares Potenzial (ZP)	
	t TS	PJ	t TS	PJ	t TS	PJ	t TS	PJ
AG	26769	0.42	21656	0.34	12346	0.19	9310	0.15
AI	1193	0.02	751	0.01	380	0.01	371	0.01
AR	2688	0.04	1854	0.03	965	0.02	889	0.01
BE	64910	1.01	39235	0.61	20542	0.32	18693	0.29
BL	9777	0.15	8027	0.13	4440	0.07	3588	0.06
BS	1966	0.03	1574	0.02	892	0.01	682	0.01
FR	17404	0.27	10604	0.17	5911	0.09	4693	0.07
GE	10276	0.16	7411	0.12	4296	0.07	3115	0.05
GL	6424	0.10	1269	0.02	391	0.01	878	0.01
GR	117296	1.83	23687	0.37	7518	0.12	16168	0.25
JU	8767	0.14	6058	0.09	3318	0.05	2740	0.04
LU	20015	0.31	13759	0.21	7596	0.12	6163	0.10
NE	9425	0.15	6514	0.10	3610	0.06	2904	0.05
NW	1778	0.03	420	0.01	206	0.00	213	0.00
OW	3316	0.05	1498	0.02	751	0.01	747	0.01
SG	27155	0.42	17849	0.28	9097	0.14	8752	0.14
SH	4403	0.07	3567	0.06	1971	0.03	1596	0.02
SO	11824	0.18	9353	0.15	5282	0.08	4071	0.06
SZ	9693	0.15	5271	0.08	2457	0.04	2814	0.04
TG	19775	0.31	15237	0.24	8847	0.14	6390	0.10
TI	63541	0.99	18319	0.29	6459	0.10	11860	0.19
UR	7713	0.12	2235	0.03	779	0.01	1456	0.02
VD	45874	0.72	34114	0.53	18436	0.29	15679	0.24
VS	89154	1.39	34140	0.53	10754	0.17	23386	0.37
ZG	3291	0.05	2436	0.04	1361	0.02	1074	0.02
ZH	22453	0.35	18770	0.29	10846	0.17	7923	0.12
CH	606'000	9.4	305'000	4.8	149'000	2.3	156'000	2.4

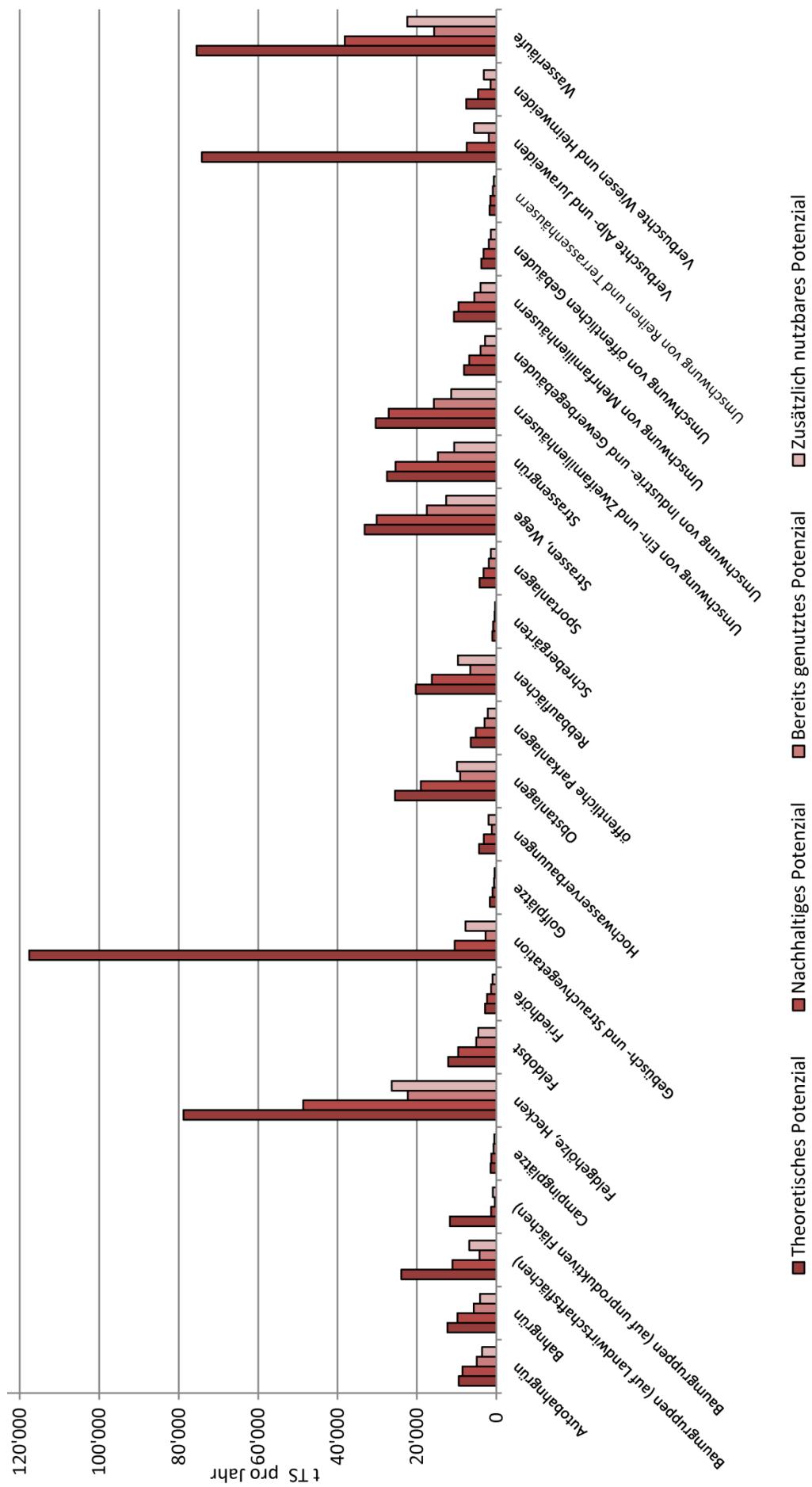


Abbildung 3: Flurholzpotenziale der Schweiz für eine energetische Nutzung nach Flurholzkategorien.

■ Theoretisches Potenzial ■ Nachhaltiges Potenzial ■ Bereits genutztes Potenzial
 □ Zusätzlich nutzbares Potenzial

4 Diskussion und Folgerungen

4.1 Vergleich mit anderen Studien

Gemäss BAFU/BFE (2009) [8] werden rund 190'000 t TS Flurholz energetisch genutzt. Das sind 40'000 t TS beziehungsweise 27% mehr als in der vorliegenden Studie berechnet. Der Unterschied kommt vor allem daher, dass in der vorliegenden Studie der aufgelöste Wald auf Landwirtschaftsflächen als Wald und nicht als Flurholzfläche berücksichtigt wird, weil der aufgelöste Wald gemäss LFI Definition [6] zum Waldholz gehört und bereits beim Waldenergieholz berücksichtigt wird. Damit entfällt eine Fläche von rund 23'000 ha [7]. Geht man von einem Zuwachs ähnlich einem Waldstandort aus, ergäbe sich ein «Zuwachs bei gegebenem Deckungsgrad» von 2.1 t TS/ha und Jahr. Daraus resultiert auf der ganzen Fläche eine Menge von gut 45'000 Tonnen TS pro Jahr. Dabei sind weder die Höhenlage noch ökonomisch-technische Restriktionen berücksichtigt, weshalb diese Menge einer Obergrenze entspricht und eigentlich noch zu reduzieren wäre. Weiter konnten einige Zuwächse aufgrund neuerer Quellen differenzierter abgeschätzt werden. Beispielsweise wurden für Campingplätze, Friedhöfe oder öffentliche Parkanlagen gemäss Kaltschmitt et al. (2009) [11] etwas höhere Zuwächse gewählt als beim BAFU/BFE-Bericht (2009) [8]. Berücksichtigt man diese unterschiedlichen Annahmen, kann im Vergleich zu BAFU/BFE (2009) [8] von einer zusätzlichen Menge von 10'000 t TS für die ganze Schweiz ausgegangen werden. Damit wird deutlich, dass man die Differenz von 40'000 Tonnen TS erklären kann und die Ursache in der Definition des Flurholzes liegt.

Walder et al. (2015) [17] haben im Rahmen einer kantonalen Studie für Graubünden einen Zuwachs von 39'000 t TS³ (65'000 m³) pro Jahr gefunden. Das ist deutlich weniger als das theoretische Potenzial für Graubünden von 117'000 t TS in der vorliegenden Studie. Dieser extreme Unterschied könnte daran liegen, dass Walder et al. (2015) [17] Flächen wie «verbuschte Wiesen und Heimweiden», «verbuschte Alp und Jurawiesen» und «Baumgruppen auf Landwirtschaftsflächen» nicht mit in ihre Berechnungen einbezogen haben. Diese Flächen werden gemäss Brassel et al. (2010) [6] nicht als Wald bezeichnet und gelten deswegen als Flurholz. Insbesondere in abgelegenen Bergregionen machen diese Flächen einen grossen Anteil aus. Im Kanton Graubünden ergeben die drei Flurholzkategorien eine Flurholzmenge von fast 45'000 t TS pro Jahr. Betrachtet man das nachhaltig nutzbare Potenzial in dieser Studie von 23'700 t TS, so ist dies bedeutend weniger. Grosse Teile der «Gebüscht- und Strauchvegetation» sind nicht nachhaltig nutzbar, weil sie in abgelegenen Tälern liegen und sich im Kanton Graubünden meist knapp oberhalb der Baumgrenze befinden. Für eine nachhaltige energetische Nutzung kommen sie nicht in Frage. Im Kanton Graubünden erklären diese Flächen zusammen mit den «Landwirtschaftlichen Flächen» einen grossen Anteil der Differenz zwischen dem theoretischen und dem nachhaltigen Potenzial (*Tabelle 14*).

4.2 Folgerungen und kritische Anmerkungen

Flurholz fällt bei der Pflege von Bäumen und Sträuchern an und muss, sofern es nicht auf der Fläche belassen wird, entsorgt werden. Beim Fällen und Schneiden von Bäumen und Sträuchern auf Flurholzflächen steht nicht die Nutzung des Rohstoffes im Vordergrund, sondern verschiedene andere Gründe, wie beispielsweise Sicherheitsaspekte, die Steigerung der Biodiversität, der Biotopthalt oder der Hochwasserschutz.

Heute trägt Flurholz mit 2.3 PJ beziehungsweise bereits 6% zur Energieversorgung mit inländischem Holz bei. Diese Menge liesse sich durch die Nutzung des zusätzlich nutzbaren Potenzials verdoppeln. Dieses zusätzlich nutzbare Flurholzpotenzial stellt gemessen am gesamten Zusatzpotenzial Holz (14 PJ) mit 17% ein nennenswertes Potenzial für die energetische Nutzung dar. Die grössten zusätzlich nutzbaren Flurholzpotenziale finden sich in den Kantonen Graubünden, Wallis, Bern, Tessin, Waadt und im Aargau. Es sind hauptsächlich Feldgehölze, Hecken, holzartige Biomasse entlang von Wasserläufen und Baumgruppen auf Landwirtschaftsflächen. Im Tessin und im Kanton Waadt sind zusätzliche Flurholzpotenziale auf Rebbauflächen und im Wallis auf Obstgärten und Feldobstbeständen vorhanden.

Es bestehen Chancen, aber auch Probleme, diese Zusatzpotenziale zu realisieren. Ökonomische und technische aber auch ökologische Aspekte spielen dabei eine Rolle. Der Preis des Flurholzes für die energetische Verwendung ist im Vergleich zu Waldholz geringer. Dies vor allem deshalb, weil das anfallende Material ansonsten gegen Gebühr entsorgt werden müsste. Gleichwohl setzt der geringere Preis der wirtschaftlichen Bereitstellung des Flurholzes aber auch Grenzen. Oft hat Flurholz gegenüber Waldholz einen geringeren Brennwert des Rundholzes aufgrund eines höheren Wassergehaltes und eines höheren Fein- und Rindenanteils. Die Flurholzgruppe Verkehrsgrün (2.6 % aller Flurholzflächen) weist spezifische technische und ökonomische Charakteristika auf, welche die energetischen Nutzungsmöglichkeiten von Verkehrsgrün einschränken können: Es fällt zwar regelmässig, aber nur saisonal im Frühjahr an. Seine Ernte an Bahnanlagen und Autobahnen ist ausgesprochen teuer. Im Falle von Autobahn- und Strassengrün ist eine Kontaminierung mit Schwermetallen [11] und mit Salzen [8] nicht auszuschliessen. Letzteres kann bei hohen (effizienten) Verbrennungstemperaturen zu technischen Problemen bei den Öfen führen (Korrosionsschäden durch Salzsäure). Daher ist eine zwecks Identifizierung getrennte Lagerung des Flurholzes nach Herkunft und eine Verwendung des Materials in geeigneten Anlagen unbedingt erforderlich. Rechtliche Einschränkungen der energetischen Verwendungsmöglichkeiten des Verkehrsgrüns sind in Zukunft nicht auszuschliessen.

Die in der vorliegenden Studie verwendete Geländetransportdistanz von 50 Meter erscheint hoch, so dass eine Überschätzung des Potenzials vermutet werden könnte (Geländetransportdistanz: Distanz zwischen dem Standort des Baumes und der Erschliessungslinie, auf der sich die für den Vortransport vorgesehene Maschine – zum Beispiel Schlepper mit Winde oder Kran befindet). Flächen im Siedlungsgebiet liegen jedoch kaum außerhalb der 50 Meter Grenze zu einer Strasse. Verkehrsgrün wird in der Praxis eher nur bis zu einer Distanz von 12 bis 25 Metern von der Strasse aus gerückt. Hang abwärts kann von grösseren Distanzen ausgegangen werden. Zwischen 25 und 50 Metern sind die Kosten jedoch deutlich höher. Zwischen 50 und 150 Metern wird nur auf einigen Flächen genutzt, wie beispielsweise entlang von Uferböschungen, im Rebbau und auf Obstplantagen. Nur 60% dieser Flächen werden bei der Berechnung des nachhaltigen Potenzials berücksichtigt. Zusätzlich wird angenommen, dass nur 54% der auf den Flächen verfügbaren Flurholzmenge energetisch genutzt wird. Dementsprechend wird die gewählte Geländetransportdistanz von 50 Metern bzw. 150 Metern relativiert. Für eine Diversifizierung der Geländetransportdistanzen für die einzelnen Flurholzkategorien fehlen die nötigen Angaben. Das Modell wurde gemäss den heutigen Marktbedingungen erstellt. Falls sich der Energieholzpreis ändert, müssten die Korrekturfaktoren (Deckungs- und Nutzungsgrade, Anteile der stofflichen Nutzung) ebenfalls angepasst werden, da mehr oder weniger Flurholz genutzt würde.

Die Bestimmung der Zuwächse für die Flurholzkategorien ist schwierig, weil die innerhalb einer Grundkategorie ausgewiesenen Flächen der Arealstatistik bezüglich der Bestockung, der Altersstruktur sowie der Pflegekonzepte sehr stark variieren können [8]. Die Zuwächse des Flurholzes mussten mit sehr groben Annahmen und basierend auf wenigen bekannten Werten aus der Literatur und Experteninterviews abgeschätzt werden. Für eine genauere und zuverlässige Bestimmung der Flurholzpotenziale sollten die Zuwächse eigens untersucht beziehungsweise gemessen werden. Gleches gilt für die Deckungs- und Nutzungsgrade, die Anteile der stofflichen Nutzung sowie für die Parameter, welche die Kosten der Erntemassnahmen beeinflussen. Dabei stellt sich die Frage der Verhältnismässigkeit, so dass man Schwerpunkte setzen und sich zum Beispiel auf ausgewählte Flurholzkategorien konzentrieren könnte.

5 Anhang

Tabelle 14: Flurholzpotezziale für die energetische Nutzung nach Kantonen, Flurholzgruppe und verschiedenen Verfügbarkeiten (Theoretisches Potenzial (TP), Nachhaltiges Potenzial (NP), Bereits genutztes Potenzial und Zusätzlich nutzbares Potenzial (ZP) in t TS pro Jahr.

KT	Flurholzflächen	TP	NP	BG	ZP
AG	Alle Flurholzflächen	26769	21656	12347	9309
	Siedlungsgebiet	6306	5577	3238	2339
	Verkehrsrgrün	6418	5839	3391	2449
	Landwirtschaftliche Flächen	3653	2948	1630	1318
	Baumgruppen und Strauchvegetation	649	508	284	224
	Hecken	4144	3190	1791	1399
	Uferbereich	5601	3592	2013	1579
AI	Alle Flurholzflächen	1186	746	376	369
	Siedlungsgebiet	155	133	77	56
	Verkehrsrgrün	142	129	75	54
	Landwirtschaftliche Flächen	110	58	26	31
	Baumgruppen und Strauchvegetation	119	48	22	26
	Hecken	411	219	102	117
	Uferbereich	248	160	74	86
AR	Alle Flurholzflächen	2590	1773	925	848
	Siedlungsgebiet	500	446	259	187
	Verkehrsrgrün	480	423	246	177
	Landwirtschaftliche Flächen	291	135	63	72
	Baumgruppen und Strauchvegetation	172	88	41	47
	Hecken	856	535	248	286
	Uferbereich	289	146	68	78
BE	Alle Flurholzflächen	64630	38999	20405	18594
	Siedlungsgebiet	9135	7885	4579	3307
	Verkehrsrgrün	11552	10337	6002	4335
	Landwirtschaftliche Flächen	9039	3716	1839	1877
	Baumgruppen und Strauchvegetation	10739	2368	978	1390
	Hecken	13223	7942	3801	4142
	Uferbereich	10942	6746	3205	3541
BL	Alle Flurholzflächen	9756	8009	4429	3580
	Siedlungsgebiet	2641	2323	1349	974
	Verkehrsrgrün	2064	1874	1088	786
	Landwirtschaftliche Flächen	2391	1877	980	897
	Baumgruppen und Strauchvegetation	411	306	159	147
	Hecken	1488	1106	578	528
	Uferbereich	760	525	274	251
BS	Alle Flurholzflächen	1966	1574	892	682
	Siedlungsgebiet	949	784	455	329
	Verkehrsrgrün	450	408	237	171
	Landwirtschaftliche Flächen	40	32	16	15
	Baumgruppen und Strauchvegetation	11	7	4	4
	Hecken	39	32	17	15
	Uferbereich	477	310	161	148
FR	Alle Flurholzflächen	17404	10604	5911	4692
	Siedlungsgebiet	2664	2296	1333	963

KT	Flurholzflächen	TP	NP	BG	ZP
	Verkehrsrgrün	3976	3527	2048	1479
	Landwirtschaftliche Flächen	1723	762	420	342
	Baumgruppen und Strauchvegetation	2100	388	194	193
	Hecken	4877	2623	1387	1236
	Uferbereich	2065	1007	529	478
GE	Alle Flurholzflächen	10276	7411	4296	3115
	Siedlungsgebiet	3283	2637	1531	1106
	Verkehrsrgrün	1943	1734	1007	727
	Landwirtschaftliche Flächen	2694	1815	1052	763
	Baumgruppen und Strauchvegetation	179	120	70	50
	Hecken	1065	660	379	281
	Uferbereich	1110	445	257	188
GL	Alle Flurholzflächen	6424	1269	392	878
	Siedlungsgebiet	120	100	58	42
	Verkehrsrgrün	206	177	103	74
	Landwirtschaftliche Flächen	1745	128	30	99
	Baumgruppen und Strauchvegetation	2835	242	56	186
	Hecken	544	266	62	204
	Uferbereich	975	356	83	274
GR	Alle Flurholzflächen	117296	23687	7518	16169
	Siedlungsgebiet	2433	2038	1183	854
	Verkehrsrgrün	4686	4000	2323	1677
	Landwirtschaftliche Flächen	36595	3751	856	2895
	Baumgruppen und Strauchvegetation	51786	4985	1130	3855
	Hecken	6116	3541	807	2733
	Uferbereich	15679	5372	1218	4153
JU	Alle Flurholzflächen	8767	6058	3318	2740
	Siedlungsgebiet	1146	992	576	416
	Verkehrsrgrün	2050	1783	1035	748
	Landwirtschaftliche Flächen	592	387	201	185
	Baumgruppen und Strauchvegetation	918	451	236	215
	Hecken	3233	1825	952	873
	Uferbereich	829	621	318	304
LU	Alle Flurholzflächen	20015	13759	7596	6163
	Siedlungsgebiet	3226	2757	1601	1156
	Verkehrsrgrün	3323	2937	1705	1232
	Landwirtschaftliche Flächen	3597	2384	1331	1053
	Baumgruppen und Strauchvegetation	1410	515	262	253
	Hecken	5814	3420	1790	1630
	Uferbereich	2646	1747	908	840
NE	Alle Flurholzflächen	9425	6514	3610	2904
	Siedlungsgebiet	1818	1567	910	657
	Verkehrsrgrün	2202	1959	1137	821
	Landwirtschaftliche Flächen	1133	856	447	408
	Baumgruppen und Strauchvegetation	1346	559	292	267
	Hecken	2394	1236	646	590
	Uferbereich	531	337	177	160
NW	Alle Flurholzflächen	1778	419	206	213
	Siedlungsgebiet	36	30	17	12
	Verkehrsrgrün	80	67	39	28
	Landwirtschaft-	492	59	28	31

KT	Flurholzflächen	TP	NP	BG	ZP
	liche Flächen				
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	657	60	29	32
	Hecken	287	133	62	71
	Uferbereich	228	70	32	37
O W	Alle Flurholzflächen	3316	1498	751	747
	Siedlungsgebiet	305	265	154	111
	Verkehrsrgrün	369	326	190	137
	Landwirtschaftliche Flächen	605	142	66	76
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	839	128	58	70
	Hecken	465	246	110	135
	Uferbereich	733	390	174	216
SG	Alle Flurholzflächen	27155	17849	9097	8751
	Siedlungsgebiet	4463	3849	2235	1614
	Verkehrsrgrün	4631	4068	2362	1706
	Landwirtschaftliche Flächen	4139	2078	1004	1073
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	3204	936	387	549
	Hecken	6110	3696	1697	1999
	Uferbereich	4607	3222	1412	1810
SH	Alle Flurholzflächen	4403	3567	1971	1596
	Siedlungsgebiet	846	737	428	309
	Verkehrsrgrün	986	884	513	371
	Landwirtschaftliche Flächen	984	866	455	411
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	119	93	50	43
	Hecken	612	473	248	225
	Uferbereich	858	514	278	237
SO	Alle Flurholzflächen	11824	9353	5282	4071
	Siedlungsgebiet	3011	2642	1534	1108
	Verkehrsrgrün	2627	2388	1387	1002
	Landwirtschaftliche Flächen	1241	911	494	417
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	530	324	172	151
	Hecken	2436	1691	920	771
	Uferbereich	1979	1397	776	621
SZ	Alle Flurholzflächen	9693	5271	2457	2814
	Siedlungsgebiet	1214	1031	599	433
	Verkehrsrgrün	1414	1246	724	523
	Landwirtschaftliche Flächen	1684	631	216	415
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	1931	370	134	236
	Hecken	2029	1124	442	682
	Uferbereich	1420	867	343	524
TG	Alle Flurholzflächen	19775	15237	8847	6390
	Siedlungsgebiet	3005	2588	1503	1085
	Verkehrsrgrün	3337	2980	1730	1250
	Landwirtschaftliche Flächen	8516	6180	3588	2592
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	393	297	172	124
	Hecken	2532	1870	1086	784
	Uferbereich	1992	1322	768	555
TI	Alle Flurholzflächen	63541	18319	6459	11860
	Siedlungsgebiet	4568	3843	2231	1611
	Verkehrsrgrün	4678	4198	2438	1760
	Landwirtschaftliche Flächen	11983	3434	598	2836
	Baumgruppen	31012	2211	386	1825

KT	Flurholzflächen	TP	NP	BG	ZP
	und Strauch-vegetation				
	Hecken	2370	1457	254	1204
	Uferbereich	8929	3177	554	2623
UR	Alle Flurholzflächen	7713	2235	779	1456
	Siedlungsgebiet	344	293	170	123
	Verkehrsrgrün	522	452	262	190
	Landwirtschaftliche Flächen	2027	282	65	217
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	3132	313	72	241
	Hecken	391	215	50	165
	Uferbereich	1298	681	158	523
VD	Alle Flurholzflächen	45874	34114	18436	15679
	Siedlungsgebiet	8151	6864	3986	2879
	Verkehrsrgrün	11649	10580	6143	4437
	Landwirtschaftliche Flächen	11549	8443	4270	4173
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	3478	1275	576	699
	Hecken	8102	4974	2572	2402
	Uferbereich	2944	1977	888	1089
VS	Alle Flurholzflächen	89154	34140	10754	23386
	Siedlungsgebiet	3696	3148	1828	1320
	Verkehrsrgrün	5509	4959	2879	2079
	Landwirtschaftliche Flächen	29696	12495	2902	9593
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	34660	5762	1338	4424
	Hecken	5944	3624	842	2782
	Uferbereich	9646	4152	964	3188
ZG	Alle Flurholzflächen	3291	2436	1361	1074
	Siedlungsgebiet	792	670	389	281
	Verkehrsrgrün	741	653	379	274
	Landwirtschaftliche Flächen	661	451	246	205
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	83	49	25	24
	Hecken	532	344	178	166
	Uferbereich	481	269	145	124
ZH	Alle Flurholzflächen	22453	18769	10846	7923
	Siedlungsgebiet	7455	6366	3696	2670
	Verkehrsrgrün	6525	5906	3429	2477
	Landwirtschaftliche Flächen	2524	2037	1165	872
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	531	396	228	168
	Hecken	2821	2193	1255	938
	Uferbereich	2597	1871	1074	798
CH	Alle Flurholzflächen	606'000	305'000	149'000	156'000
	Siedlungsgebiet	72262	61863	35920	25942
	Verkehrsrgrün	82560	73834	42871	30962
	Landwirtschaftliche Flächen	139704	56855	23988	32866
	Baumgruppen und Strauch-vegetation	153244	22800	7356	15444
	Hecken	78835	48633	22275	26358
	Uferbereich	79864	41272	16850	24422

6 Literatur

- [1] BFS, Bundesamt für Statistik, 1979/85: GEOSTAT, Datensatz Digitales Höhenmodell (100m).
- [2] BFS, Bundesamt für Statistik, 2004/2009: Arealstatistik Schweiz, Nomenklatur Standard, Datensatz, Schweiz/Kantone.
- [3] BFS, Bundesamt für Statistik, 2004/2009: Arealstatistik Schweiz, Nomenklatur Standard, Datensatz, Hektarebene.
- [4] BFS, Bundesamt für Statistik, 2006: Arealstatistik Schweiz, Nomenklatur Standard, Detailbeschreib.
- [5] BFS, Bundesamt für Statistik, 2014: Datensatz zu den generalisierten Kantons- und Gemeindegrenzen.
- [6] Brassel, P., Brändli U.B., Ginzler, C., Lanz, A., Meile, R., Müller, K., Rösler, E., Speich, S., 2010: Das Landesforstinventar, Walddefinition, in Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006., 312 S.
- [7] BFS, Bundesamt für Statistik, 2015: Arealstatistik nach Kantonen 2004/2009, 72 Grundkategorien.
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/02/03/blank/data/01.html>.
- [8] BAFU, Bundesamt für Umwelt, BFE Bundesamt für Energie, 2009: Energieholzpotenziale ausserhalb des Waldes, 82 S.
- [9] Schweizerischer Arbeitskreis für Forsteinrichtungen, 1986: Forsteinrichtungsbegriffe, Merkblatt Nr. D1.
- [10] LWF, Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2014: Merkblatt 12 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.
- [11] Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. , 2009: Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 1030 S.
- [12] LFI, Landesforstinventar, 2014: Zuwachs pro Kanton und Höhenlage, Gemeinsamer zugänglicher Wald ohne Gebüschwald nach LFI1/LFI2/LFI3/LFI4
- [13] LFI, Landesforstinventar, 2017: LFI Wörterbuch und Glossar; Auch auf:
https://www.lfi.ch/glossar/glossar.php?frmWordList=1800_Gloss
- [14] Rutschmann, C., 2008: Holz, Energie, die nachwächst, Schweizerischer Forstkalender 2010 Anhang, Taschenbuch für Forstwesen, Holzgewerbe, Jagd.
- [15] Stegner, J., Kleinknecht, U., Lakner, S., Fleischer, K., Chamsa, C. , 2010: Rahmenkonzept zur energetischen Verwertung von Biomasse aus der Landschaftspflege im Freistaat Sachsen, Abschlussbericht, 144 S.
- [16] Swisstopo, Bundesamt für Landestopographie, 2007: Digitales Landschaftsmodell der Schweiz, Vector 25, Datensatz.
- [17] Walder, R., Taverna, R., Hofer, P., Angleitner J., Bühler, R., Gautschi M., 2015: Energieholzpotenzial Kanton Graubünden, Schlussbericht, 146 S.

Restholz



Bild: Thomas Fillbrandt, Universität Freiburg im Breisgau

Matthias Erni, Oliver Thees und Renato Lemm

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	104
1 Einleitung	105
2 Methoden	106
2.1 Überblick	106
2.2 Grundlagen.....	107
2.2.1 Modell MASSIMO.....	107
2.2.2 Forststatistik	107
2.2.3 Restholzmodell	108
2.3 Das theoretische Restholzpotenzial.....	111
2.4 Das nachhaltige Restholzpotenzial.....	111
2.5 Das bereits genutzte Restholzpotenzial	111
2.6 Umrechnung von Restholzvolumen in Energieinhalt.....	112
3 Resultate	113
4 Diskussion und Folgerungen	116
5 Anhang	119
5.1 Waldholznutzungspotenziale – nach Kantonen	119
5.1.1 Theoretische Waldholznutzungspotenziale.....	119
5.1.2 Nachhaltige Waldholznutzungspotenziale.....	120
5.1.3 Bereits genutzte Waldholznutzungspotenziale	121
5.2 Restholzpotenziale für eine energetische Nutzung – nach Kantonen	121
5.2.1 Theoretische Restholzpotenziale.....	121
5.2.2 Nachhaltige Restholzpotenziale (mit Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect))	122
5.2.3 Bereits genutzte Restholzpotenziale	123
5.2.4 Zusätzlich nutzbare Restholzpotenziale.....	123
6 Literatur.....	124

Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFS	Bundesamt für Statistik
HIS	Holzindustrie Schweiz
KT	Kanton (AG Aargau, AI Appenzell Innerrhoden, AR Appenzell Ausserrhoden, BE Bern, BL Basel-Land, BS Basel-Stadt, FR Fribourg, GE Genève, GL Glarus, GR Graubünden, JU Jura, LU Luzern, NE Neuchâtel, NW Nidwalden, OW Obwalden, SG St. Gallen, SH Schaffhausen, SO Solothurn, SZ Schwyz, TG Thurgau, TI Ticino, UR Uri, VS Valais, VD Vaud, ZG Zug, ZH Zürich)
Kap.	Kapitel
LFI	Schweizerisches Landesforstinventar
MASSIMO	Management Szenario Simulation Modell
SCCER BIOSWEET	Swiss Competence Center for Energy Research Biomass for Swiss Energy Future
VZA	Vollzeitäquivalent

1 Einleitung

Restholz entsteht in holzbe- und verarbeitenden Betrieben. Es fällt neben dem gewünschten Hauptprodukt vor allem in Säge-, Hobel- und Leimholzwerken sowie in den Zimmereien und Schreinereien an. In Sägewerken werden Halbfertigprodukte wie Schnittholz und Kantholz erzeugt. Diese Produkte werden in den Hobel- und Leimholzwerken zum Beispiel zu Nut- und Federbrettern oder zu Brettschichtholz weiterverarbeitet. In Zimmereien und Schreinereien werden Fertigprodukte, wie Dachstühle und Möbel hergestellt. Bei den Nebenprodukten (Holzreste) handelt es sich vor allem um Schwarten, Spreissel, Kappstücke, Säge- und Hobelspäne sowie Sägemehl. Die Nebenprodukte werden energetisch und stofflich vor allem zur Herstellung von Spanplatten verwertet. Im Restholz ist auch ein beachtlicher Rindenanteil enthalten. Die energetische Nutzung von Restholz erfolgt heute vor allem in betrieblichen Feuerungsanlagen und Holzheizkraftwerken. Dabei wird Wärme beziehungsweise Wärme und Strom produziert.

Restholz ist eng mit der Nutzung von Waldholz verbunden. Je mehr Waldholz in den Sägereien und in der Weiterverarbeitung stofflich genutzt wird, desto mehr Restholz fällt an. Ob das dabei anfallende Restholz energetisch oder stofflich genutzt wird, hängt von der Art und dem Umfang des betrieblichen Eigenverbrauchs und von den Marktbedingungen, insbesondere von den Preisen der konkurrierenden Nutzungen ab [22].

Ziel des vorliegenden Teilberichts ist es, das gesamte Restholzaufkommen für die energetische Verwendung in der Schweiz abzuschätzen. Es werden verschiedene Verfügbarkeiten und zukünftige Entwicklungen aufgezeigt. Folgende Fragen stehen dabei im Vordergrund:

- Über welche Restholzpotenziale verfügt die Schweiz und wie verfügbar sind diese für die energetische Nutzung?
- Wie ist das Restholz räumlich verteilt und wo sind zusätzliche Potenziale zu erwarten?

Theoretisches Potenzial

Aus der Verarbeitung des theoretischen Waldholznutzungspotenzials in einem Jahr anfallendes Restholz.

→ Kapitel 2.3

Nachhaltiges Potenzial

Aus der Verarbeitung des nachhaltigen Waldholznutzungspotenzials in einem Jahr anfallendes Restholz.

→ Kapitel 2.4

Bereits genutztes Potenzial

Aus der Verarbeitung des bereits genutzten Waldholznutzungspotenzials in einem Jahr anfallendes Restholz.

→ Kapitel 2.5

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Differenz zwischen dem nachhaltigen und dem bereits genutzten Restholzpotenzial.

→ Kapitel 2.5

2 Methoden

2.1 Überblick

Das Restholzaufkommen in der Schweiz wird in Form des bereits genutzten Potenzials jährlich auf Kantonsebene erhoben. Diese Erhebung wird vom Bundesamt für Statistik (BFS) durchgeführt. Allerdings bezieht sie sich nur auf den Restholzanfall und dessen Verwertung in Sägewerken. Hier wurde die letzte Vollerhebung 2012 durchgeführt. In den Statistiken des BFS fehlen daher entsprechende Angaben zu den Hobelwerken, den Brettschichtproduzenten sowie den Zimmereien und Schreinereien, weshalb diese Statistik für die vorliegende Potenzialanalyse nicht verwendet wurde.

Im vorliegenden Teilbericht hat man eine Methode zur Potenzialschätzung des Restholzes gewählt, die dem Zusammenhang seines Aufkommens mit der Waldholznutzung Rechnung trägt und eine konsistente Ableitung aller Potenziale aus denselben Rohdaten der Waldholznutzung ermöglicht.

Die Basis zur Ermittlung der energetisch genutzten Restholzpotenziale bilden zwei Modelle und die Forststatistik: (i) das Modell MASSIMO der WSL (Management Szenario Simulation Model) [23] wird zur Bestimmung der Waldholznutzungsmenge bei verschiedenen Waldbewirtschaftungsstrategien eingesetzt, während (ii) die Forststatistik [9] die heute bereits genutzte Holzmenge liefert. Das Modell (iii) «Holzflüsse in der Schweiz» des BAFU wird genutzt, um zu bestimmen, welche Holzmengen in welche Verwendungen gelangen und welche Anteile davon als energetisches Restholz ausgewiesen werden. Dabei wird der Import und Export berücksichtigt und zwischen stofflicher und energetischer Nutzung unterschieden. Eingangsgröße für das Holzflussmodell bildet bei allen Potenzialkategorien die jährlich insgesamt genutzte Holzmenge im Wald (Waldholznutzungspotenzial). Diese Holzmenge wird mit Hilfe von MASSIMO für das theoretische und das nachhaltige Potenzial und mit der Forststatistik für das bereits genutzte Potenzial berechnet. Beide Modelle sind in der Wald- und Holzbranche der Schweiz etabliert.

Einen Überblick zu dieser Abschätzung zeigt *Abbildung 1*. In der Kopfzeile sind die Ausgangsdaten dargestellt. Nach verschiedenen Zuschlägen beziehungsweise Abzügen ergeben sich das Waldholznutzungspotenzial als Eingangsgröße zur Abschätzung der Restholzmenge für die energetische Nutzung, gemäß den gemittelten Werten der «Holzflüsse der Schweiz» [4, 5, 6, 7, 8].

Bei den Potenzialstudien im Rahmen des SCCER Biosweet wird bezüglich der Verfügbarkeit zwischen theoretischem, nachhaltigem, bereits genutztem und zusätzlich nutzbarem Potenzial unterschieden.

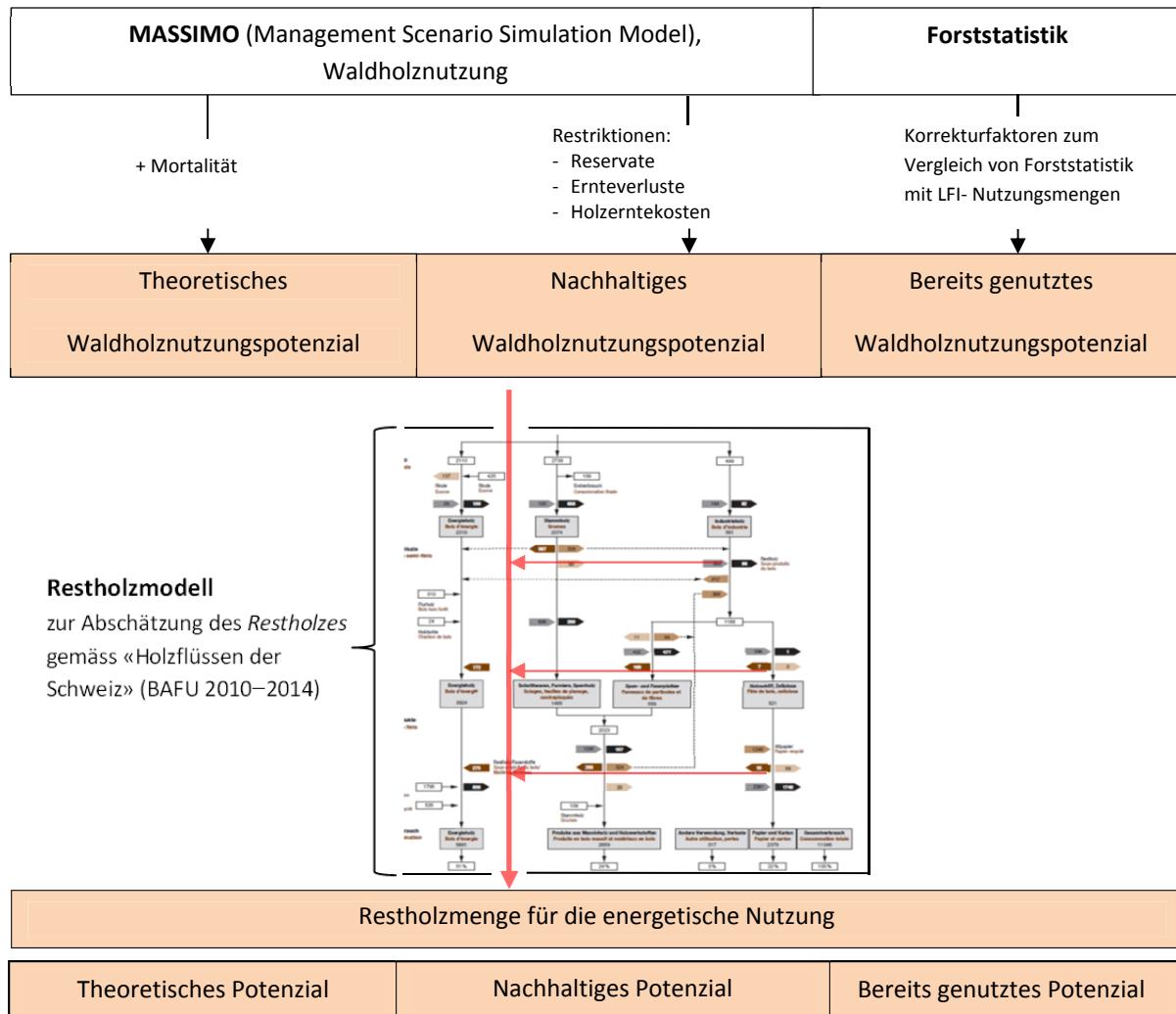


Abbildung 1: Schematischer Ablauf zur Berechnung der Restholzmenge für die energetische Nutzung.

2.2 Grundlagen

2.2.1 Modell MASSIMO

Mit dem Waldbewirtschaftungsmodell MASSIMO (Management Scenario Simulation Model) können Waldentwicklungen der kommenden Dekaden für die drei Waldbewirtschaftungsszenarien «Vorratsanstieg», «moderner Vorratsabbau» und «starker Vorratsabbau» simuliert werden. Das Modell MASSIMO beruht auf LFI-Daten [23]. Bei der Simulation werden für jeden 10-Jahres-Schritt Informationen zum verbleibenden und zum ausscheidenden Bestand und zu den Kosten der Holzernte generiert. Diese beziffern den Nettozuwachs an Derbholz ohne Rinde, die Nutzungsmenge pro 25 Franken-Kostenklasse, pro Stärkeklasse von Derbholz (R1 bis R6), pro Restderbholz, die Menge an Reisig, die Rinde und das Astderbholz. Auflösungsebene sind die 14 Wirtschaftsregionen der Schweiz. Eine genaue Beschreibung (insbesondere zu den Holzerntekosten) gibt der Teilbericht Waldholz Kapitel 2.

Mit den Resultaten von MASSIMO wurde, wie in Abbildung 1 dargestellt, das theoretische und das nachhaltige Waldholznutzungspotenzial hergeleitet.

2.2.2 Forststatistik

Die Forststatistik (z.B. [3]) erscheint jährlich im Jahrbuch Wald und Holz, herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt (BAFU). Sie informiert ausführlich über die Waldressourcen, die Holznutzung, die Leistungen und Pro-

dukte des Waldes, die Zertifizierung, die Holzverarbeitung und den Handel mit Holz und Holzprodukten der Schweiz. Die meisten Daten stammen aus Erhebungen des Bundesamtes für Statistik (BFS) und des BAFU. Mit den Nutzungsdaten der Forststatistik [9] wurde das bereits genutzte Waldholznutzungspotenzial berechnet. Um die Werte der Forststatistik mit jenen der MASSIMO-Simulation zu vergleichen, wurden die statistischen Werte mit Korrekturfaktoren gemäss Altwegg et al. (2010) [2] korrigiert (Kap. 2.5).

2.2.3 Restholzmodell

Die mit MASSIMO und der Forststatistik berechneten Waldholznutzungspotenziale (theoretisches, nachhaltiges und bereits genutztes Waldholz) dienten als Eingangsgrössen ins Restholzmodell, welches seinerseits aus den «Holzflüssen der Schweiz» [4, 5, 6, 7, 8] hergeleitet wurde.

Die «Holzflüsse der Schweiz» werden vom BAFU jährlich im Jahrbuch Wald und Holz abgebildet. Mit den entsprechenden Daten der Jahre 2009–2013 [4, 5, 6, 7, 8] wurde ein dynamisches Modell erstellt, womit auf-grund einer vorgegebenen Holzerntemenge (Waldholznutzungspotenzial) das energetisch genutzte Restholz berechnet werden kann. Dazu wurden die Werte aus den Abbildungen «Holzflüsse in der Schweiz» [4, 5, 6, 7, 8] über die letzten fünf Jahre gemittelt. Diese gemittelten absoluten Werte der Stoffströme wurden in entsprechende Anteile (relative Werte) der durchschnittlichen Holzernte für dieselbe Zeitspanne umgerechnet. Diese Anteile wurden anschliessend verwendet, um die Holzerntemengen auf die verschiedenen Stoffströme der Holzverwertung (Stamm-, Industrie- und Energieholz) zu verteilen und die Restholzmengen abzuschätzen (*Abbildung 2*).

Die «Holzflüsse in der Schweiz» teilen die Waldholznutzungspotenziale in Energie-, Stamm- und Industrieholz. Interessant für die Nutzung von Restholz sind die Stoffströme Stammholz und Industrieholz. Beim Rundholzeinschnitt entsteht eine grosse Menge Restholz (knapp 40% des Stammholzes). Rund die Hälfte davon wurde im Durchschnitt zwischen 2009–2013 energetisch genutzt. Auf der Stufe der Halbfabrikate entsteht auch beim Industrieholz Restholz für eine energetische Nutzung. Es stammt hauptsächlich aus der Produktion von Span- und Faserplatten. Bei der Produktion von Massivholz und Holzwerkstoffen fallen je rund 15% der Schnittwaren, Furniere, Sperrholz, Span- und Faserplatten als Restholz für eine energetische beziehungsweise stoffliche Nutzung an (Durchschnittswert der letzten fünf Jahre aus: [4, 5, 6, 7, 8]). Hinzu kommen geringe energetisch verwendete Mengen aus der Holzschliff- und Zelluloseproduktion sowie der anschliessenden Produktion von Papier und Karton. Die einzelnen Restholzanteile der verschiedenen Verwertungsströme sind in *Abbildung 2* rot umrandet.

Das gesamte Restholzpotenzial für die energetische Nutzung berechnet sich durch Aufsummieren der energetisch verwendeten Restholzmengen.

Für die Zeitperiode 2017–2026 dienten direkt die Resultate der Periode 2017–2026. Für die nahe Zukunft, 2017–2036 und die ferne Zukunft, 2017–2056 werden arithmetische Mittelwerte von verschiedenen Zeitperioden verwendet. Die nahe Zukunft wird aufgrund der Perioden 2017–2026 und 2027–2036 berechnet, die ferne Zukunft zusätzlich aufgrund der Perioden 2037–2046 und 2047–2056. Das zusätzlich nutzbare Potenzial kann als Differenz zwischen dem nachhaltigen, im vorliegenden Teilbericht und dem ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzial mit Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald und dem bereits genutzten Potenzial für dieselben Zeitperioden berechnet werden. Das theoretische Potenzial wird für die Periode 2017–2026 ermittelt (*Tabelle 1*).

Tabelle 1: Ermittlungszeitpunkte der vier Potenziale.

Potenzial	Theoretisches Potenzial	Nachhaltiges Potenzial			Bereits genutztes Potenzial			Zusätzlich nutzbares Potenzial		
Zeitperioden	2017 – 2026	2017 – 2026	2017 – 2036	2017 – 2056	2017 – 2026	2017 – 2036	2017 – 2056	2017 – 2026	2017 – 2036	2017 – 2056

Das Restholzmodell beinhaltet folgende Annahmen:

Die Holzflüsse, die im Fünfjahresmittel über die ganze Schweiz berechnet wurden, bleiben konstant und werden so für die weiteren Prognosen verwendet. Für die Resultate auf Kantonsebene wird der Handel zwischen den Kantonen nicht berücksichtigt. Für das theoretische Restholzpotenzial gilt zusätzlich, dass auch für deutlich grössere Waldholznutzungspotenziale die für seine Verarbeitung notwendige Industrie im Inland vorhanden ist.

Die Rinde wird hier nicht zum Restholzpotenzial gezählt. Sie wird bereits beim energetisch nutzbaren Waldholzpotenzial berücksichtigt, beziehungsweise ist in diesem enthalten (Teilbericht Waldholz Kap. 2.5). Trotzdem werden in *Tabelle 5* die Restholzpotenziale zu Vergleichszwecken zusätzlich inklusive Rinde ausgewiesen, weil die Rinde in den Werken anfällt und hier über ihre Verwendung entschieden wird. Ausserdem ist die Rinde bei den «Holzflüssen der Schweiz» separat ausgewiesen (*Abbildung 2*).

Gemäss den «Holzflüssen der Schweiz» ist «Restholz aus der Verarbeitung von Industrieholz» nicht klar als energetische oder stoffliche Nutzung klassifizierbar. Für die Berechnung des nachhaltigen und des bereits genutzten Restholzpotenzials wurde daher für Industrierestholz angenommen, dass es zu gleichen Anteilen wie bisher in den Sägewerken stofflich und energetisch genutzt wird. Der Anteil energetischer Nutzung beträgt nach Holzverarbeitungserhebung für das Jahr 2012¹ etwa 40% [12]. Zur Berechnung des theoretischen Restholzpotenzials wurde das gesamte «Industrierestholz» als energetisch nutzbar betrachtet.

Holz aus Import und Export kann im Modell unterschiedlich berücksichtigt werden. Grundsätzlich soll hier aber das inländische Potenzial von Restholz ermittelt werden. Deswegen wird bei der Berechnung des theoretischen und des nachhaltigen Restholzpotenzials der Import nicht genutzt und der Export inländisch verwendet. Dies gilt nicht nur für das Restholz selbst, sondern für alle Holzsortimente, aus denen Restholz entstehen kann. Beim bereits genutzten Potenzial dagegen, wird der Import und Export, als Fünfjahresmittelwert der Erhebungsjahre 2009–2013 [4, 5, 6, 7, 8] berücksichtigt.

¹ Es wurde das Jahr 2012 gewählt, weil damals eine Vollerhebung in den Sägewerken durchgeführt wurde.

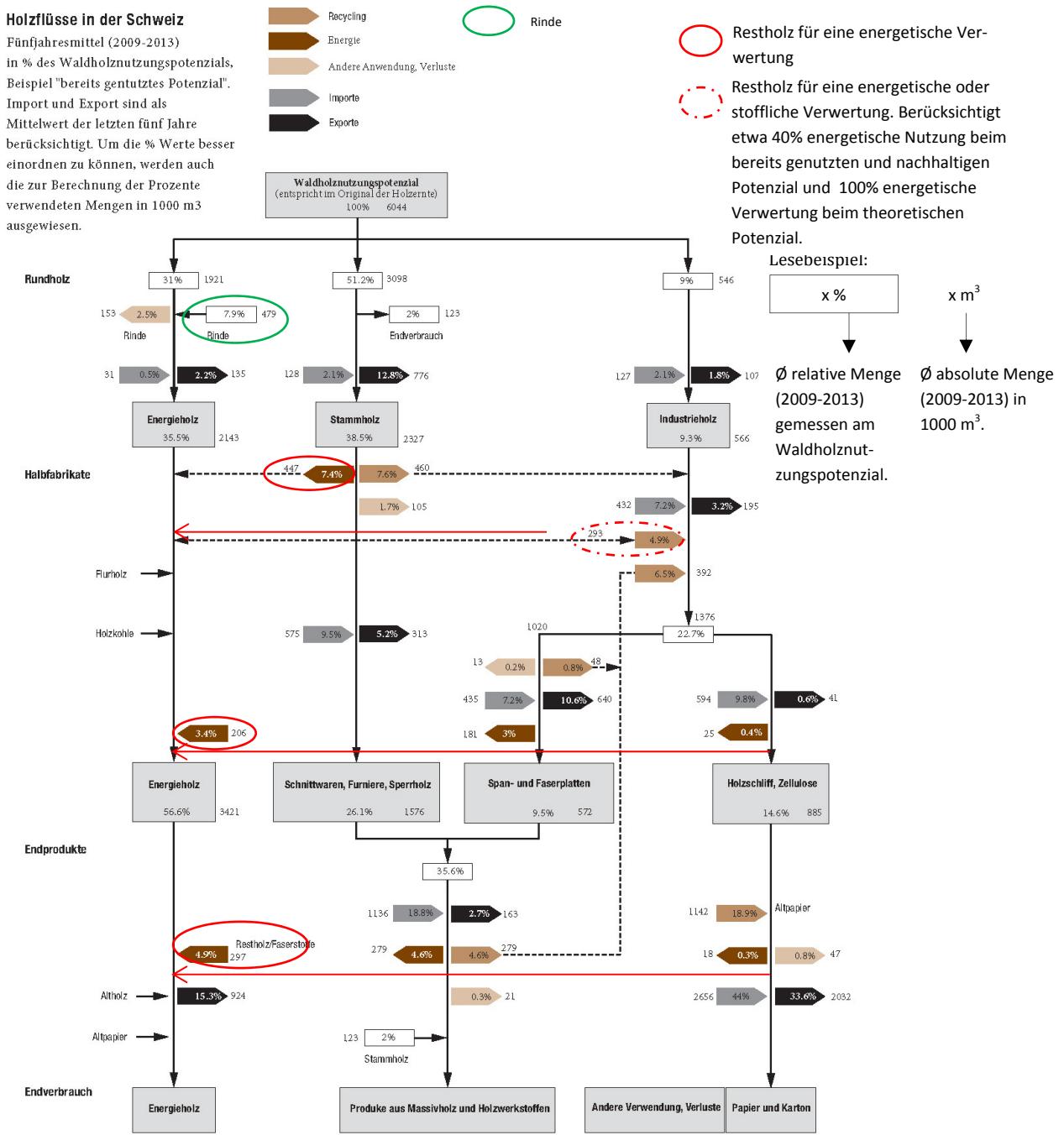


Abbildung 2: Durchschnittliche Holzflüsse und energetische Restholzverwendung in der Schweiz.

Berechnung aufgrund BAFU 2010–2014 [4, 5, 6, 7, 8], «Holzflüsse der Schweiz». Dargestellt sind die Anteile der bereits genutzten Restholzmengen bezogen auf das Waldholznutzungspotenzial. Rot markiert sind die Mengen, welche zum Restholz gezählt und energetisch genutzt werden können. Sie betragen für das bereits genutzte Restholzpotenzial rund 17.5% des Waldholznutzungspotenzials (Berechnungsgang: $7.4\% + [0.4 \cdot 4.9\%] + 3.4\% + 4.9\%$). Für die Berechnung des theoretischen und des nachhaltigen Restholzpotenzials wurden die Exporte im Inland verwendet und Importe negiert. Die Rinde wurde nicht zum Restholzpotenzial gezählt. Sie wurde bereits beim energetisch genutzten Waldholzpotenzial berücksichtigt. Die Rinde entspricht etwa 8% des Waldholznutzungspotenzials und ist hier grün umrandet. In Tabelle 5 sind die Restholzpotenziale zusätzlich inklusive Rinde ausgewiesen.

2.3 Das theoretische Restholzpotenzial

Für die Berechnung des theoretischen Restholzpotenziales wurde das theoretische Waldholznutzungspotenzial (Kap. 5.1.1) als Eingangsgröße in das Restholzmodell verwendet. Das theoretische Waldholznutzungspotenzial umfasst den jährlichen Derbholznettozuwachs zuzüglich eines allfälligen Vorratsabbaus, inklusive einem Zuschlag für Reisig und Rinde sowie der Mortalität. Seine Berechnung ist im Teilbericht Waldholz, Kapitel 2.5.1, beschrieben. Das theoretische Waldholznutzungspotenzial bezieht sich auf das Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau» und die Daten aus dem Modell MASSIMO (Teilbericht Waldholz Kap. 2.2). Die wichtigsten Nutzungsziele und Vorgaben sind nochmals in *Tabelle 2* zusammengestellt. Detaillierte Informationen zum Waldbewirtschaftungsszenario können Stadelmann et al. (2016) [20] entnommen werden.

Tabelle 2: Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau» gemäss MASSIMO.

Szenario	Vorrats respektive Nutzungsziele	Vorgaben
«Kontinuierlich hoher Zuwachs» Hier bezeichnet als «moderater Vorratsabbau»	Vorratsabsenkung auf 300 m ³ /ha bis 2046, danach konstanter Vorrat.	Mortalität: 15% Verjüngung: empfohlene Nadelholzanteile Sturm: ja, Periodizität 15 Jahre

2.4 Das nachhaltige Restholzpotenzial

Für die Berechnung des nachhaltigen Restholzpotenziales für die energetische Nutzung wurde das nachhaltige Waldholznutzungspotenzial (Kap. 5.1.2) mit dem Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau» als Eingangsgröße in das Restholzmodell verwendet. Es umfasst die jährliche Waldholznutzung unter Berücksichtigung verschiedener Abzüge (Restriktionen). Es sind dies die Reservatsflächen (Teilbericht Waldholz, Kap. 2.5.2.1), Ernteverluste (Teilbericht Waldholz, Kap. 2.5.2.2) und Holzerntekosten.

Die Holzerntekosten basieren auf Berechnungen des LFI, wobei pro Stichprobenpunkt die Holzerntekosten mit HeProMo [15] berechnet wurden. Die sich ergebenden Holzerntekosten für Waldholz wurden in 25-CHF-Klassen zusammengefasst. Flächen mit Schutzwald (SilvaProtect) und Flächen ohne Schutzwald wurden gemäss Anteilen von Losey und Wehrli 2013 [16] aufgeteilt. Für Schutzwaldflächen gelten bis 150 CHF/m³ Holzerntekosten (bzw. 190 CHF/m³ inklusive Hack- und Transportkosten) und für die restlichen Flächen der Holzproduktion bis 80 CHF/m³ (120 CHF/m³ inklusive Hack- und Transportkosten) als kostendeckend [21]. Die Schutzwaldanteile in den Kantonen schwanken zwischen wenigen Prozenten im Mittelland (z.B. Aargau 3%, Zürich 5%) und grossen Anteilen in den Gebirgsregionen (Obwalden ca. 50%, Graubünden ca. 60%, Wallis und Tessin ca. 90%).

Grundsätzlich sollen die inländischen Potenziale von Restholz ermittelt werden. Deswegen werden beim theoretischen und nachhaltigen Restholzpotenzial jeweils Import und Export im Modell «null» gesetzt. Das heisst, Import findet nicht statt und die bisherigen Exportmengen können inländisch genutzt werden.

Die Resultate zum nachhaltigen Waldholznutzungspotenzial können dem Anhang (*Tabelle 7*) entnommen werden. Der Übertrag des theoretischen und nachhaltigen Waldholznutzungspotenzials auf die Kantone erfolgte, wie es im Teilbericht Waldholz, Kapitel 2.6, für Energieholz aus dem Wald beschrieben wird.

2.5 Das bereits genutzte Restholzpotenzial

Für die Berechnung des bereits genutzten Restholzpotenziales wurde das bereits genutzte Waldholznutzungspotenzial (Kapitel 5.1.3) als Eingangsgröße in das Restholzmodell verwendet. Import und Export werden hier als Fünfjahresmittelwert der Erhebungsjahre 2009–2013 [4, 5, 6, 7, 8] berücksichtigt. Die Nutzungsmengen des bereits genutzten Waldholzes konnten der Forststatistik [9] entnommen werden. Da die Forststatistik wegen methodischen Differenzen nicht direkt mit den Ergebnissen des LFI vergleichbar ist, wurden die folgenden Korrekturen gemäss Altwege et al. (2010) [2] durchgeführt:

Tabelle 3: Korrekturfaktoren zur Umrechnung der Forststatistikangaben [2].

Korrekturfaktor für	Wert in % der Gesamtnutzung der Forststatistik
Rindenanteil am Stammholz	12.3
Zumasse Messvorschriften	7.1
Nicht erfasste Holzmengen im Privatwald	7.0
Nicht erfasste Holzmengen im öffentlichen Wald	2.8

Aus der Differenz zwischen dem nachhaltigen Restholzpotenzial und dem bereits genutzten Restholzpotenzial resultiert das zusätzlich nutzbare Restholzpotenzial.

2.6 Umrechnung von Restholzvolumen in Energieinhalt

Für die Umrechnung der Holzmengen in Energiemengen wird für das Restholzaufkommen in den Sägewerken für den waldfrischen Zustand ein Wassergehalt von 50% und für das Aufkommen in den weiterverarbeitenden Betrieben der lufttrockene Zustand mit Wassergehalt 15% verwendet. Folgend die Annahmen zur Umrechnung von Volumen [m^3] in Primärenergieinhalt [PJ]:

Energieinhalt bei unterschiedlichen Wassergehalten

Tabelle 4: Energieinhalt bei waldfrisch und lufttrockenem Holz.

Heizwerte	Nadelholz	Laubholz	Quelle
Waldfrisch (Wassergehalt 50%)	2260 [kWh/t]	2160 [kWh/t]	LWF, 2014 [14]
Lufttrocken (Wassergehalt 15%)	4320 [kWh/t]	4150 [kWh/t]	

Dichte bei unterschiedlichen Wassergehalten

Als Faktoren für die Umrechnung des Restholzes von m^3 in Tonnen wird gemäss Riegger 2004 der Umrechnungsfaktor 1.1 t/ m^3 waldfrisch und 0.63 für absolut trockenes Laubholz, bzw. 0.85 t/ m^3 und 0.44 t/ m^3 für Nadelholz verwendet [17], [18]. Für die Berechnung bei lufttrockenem Zustand beträgt der Umrechnungsfaktor 0.52 t/ m^3 für Nadelholz und 0.74 t/ m^3 für Laubholz. Die Umrechnungsfaktoren ergeben sich nach Berechnung gemäss Schardt 2006 [19]:

$$\text{Wassergehalt } x [\%] = \frac{\text{Gewicht bei } u [\%] \text{ Feuchtigkeit} - \text{absolutes Trockengewicht}}{\text{Gewicht bei } u [\%] \text{ Feuchtigkeit}} * 100\%$$

Einschnitt von Nadelholz und Laubholz

Aus dem Nadel-/Laubholz-Verhältnis des Rundholzeinschnittes gemäss BFS 2013 [12] basierend auf der Vollerhebung 2012, Restholzproduktion der Sägereien, ergibt sich ein Nadelholz-zu Laubholzverhältnis von 20 zu 1. Dieses Verhältnis wird auch für Restholz aus holzbearbeitenden Betrieben angenommen.

Berechnung des Primärenergieinhaltes [PJ]

Die «Anteile m^3 waldfrisch [%]» und « m^3 lufttrocken [%]» wurden aus dem erstellten Restholzmodell berechnet, indem das Verhältnis zwischen energetisch verwertetem Holz in Sägewerken zu energetisch verwertetem Holz in den weiterverarbeitenden Betrieben gebildet wurde. Dies ergibt für das:

- Theoretische Potenzial: 66% waldfrisch (aus Sägewerken), 34% lufttrocken aus weiterverarbeitenden Betrieben.
- Nachhaltige Potenzial: 60% waldfrisch (aus Sägewerken), 40% lufttrocken aus weiterverarbeitenden Betrieben).
- Bereits genutzte Potenzial: 51% waldfrisch (aus Sägewerken), 49% lufttrocken aus weiterverarbeitenden Betrieben.

Die Differenzen ergeben sich durch die unterschiedliche Berücksichtigung von Import und Export, sowie die unterschiedliche Nutzung des Industrierestholzes (Kap. 2.2.3).

Der Umrechnungsfaktor von kWh in Joule beträgt $[3.6 \cdot 10^6 \text{ J/kWh}]$ [10]. Folgend wird die Formel zur Berechnung des Energieinhaltes gezeigt:

$$\text{Energiemenge [PJ] waldfrisches bzw. lufttrockenes Holz} = (Am^3wf \text{ bzw. } Am^3lt * (ANDh [95\%] * VNdh [m3] * DNdh \left(wf \left[0.85 \frac{t}{m^3} \right], lt \left[0.52 \frac{t}{m^3} \right] \right) * ENdh \left(wf \left[2260 \frac{kWh}{t} \right], lt \left[4320 \frac{kWh}{t} \right] \right)) + (ALbh [5\%] * VLbh [m^3] * DLbh \left(wf [1.1 t/m^3], lt [0.74 t/m^3] \right) * ELbh \left(wf \left[2160 \frac{kWh}{t} \right], lt [4150 kWh/m^3] \right)) * U \text{ kWh in J} [3.6 * 10^6]) / 10^{15}$$

Legende:

ALbh	Anteil Laubholz	DNdh	Dichte Nadelholz	VLbh	Volumen Laubholz
Am ³ lt	Anteil m ³ lufttrocken	ELbh	Energieinhalt Laubholz	VNdh	Volumen Nadelholz
Am ³ wf	Anteil m ³ waldfrisch	ENDh	Energieinhalt Nadelholz	wf	waldfrisch
ANDh	Anteil Nadelholz	lt	lufttrocken		
DLbh	Dichte Laubholz	U	Umrechnungsfaktor		

Berechnung der Rinde von Volumen [m³] in Energieinhalt [PJ]

Gemäss Restholzmodell (Kap. 2.2.3) können vom Waldholznutzungspotenzial knapp 8% (*Abbildung 2*) Rinde angenommen werden. AEA 2009 [1] gibt für Rinde mit Wassergehalt 50% einen Umrechnungsfaktor von m³ in GJ, ausgehend vom Reziprokwert von ca. 6.5 [GJ/m³] an.

3 Resultate

Wenn nicht wie in *Tabelle 5* explizit auf die Berücksichtigung der Rinde hingewiesen wird, beziehen sich die Resultate auf Holzmengen ohne Rinde.

Gesamte Schweiz

Das theoretische Restholzpotenzial der energetischen Nutzung in der Schweiz beträgt 3.2 Mio. m³ pro Jahr (Kap. 5.2.1). Dieses Potenzial gilt bei einem «moderaten Vorratsabbau» des Waldholzes, beziehungsweise setzt diesen voraus.

Das nachhaltige Restholzpotenzial für die energetische Nutzung in der Schweiz beträgt in der Periode 2017–2026 jährlich gut 1.0 Mio. m³. Das Resultat ergibt sich bei Kosten für die Holzernte, Hacken und Transport (i) auf Holzproduktionsflächen bis 120 CHF/m³ und (ii) auf Schutzwaldflächen (SilvaProtect) bis 190 CHF/m³. Im Zeitablauf nimmt das Potenzial wegen des sich vermindernden Holzanfalls im Szenario «moderer Vorratsabbau» leicht ab und beträgt bei langfristiger Betrachtung für die Periode von 2017–2056 jährlich noch zwischen 0.8 und 1.0 Mio. m³ (Kap. 5.2.2).

Die bereits genutzte Restholzmenge entspricht mit gut 1.0 Mio. m³ pro Jahr dem nachhaltigen Restholzpotenzial. Zusätzlich nutzbare Restholzpotenziale sind dementsprechend kaum vorhanden. Für eine langfristige Betrachtung ist es wichtig, die getroffenen Annahmen zu berücksichtigen, welche sich stark an der Ist-Situation orientieren. Sie sind in Kapitel 2.2.3 beschrieben; ihre Auswirkungen werden in Kapitel 4 diskutiert.

Die in Energiemengen ausgedrückten Potenziale widerspiegeln die Holzmengen nicht eins zu eins, weil sich das Restholz in den bearbeitenden Betrieben von demjenigen in den verarbeitenden Betrieben hinsichtlich des Energieinhaltes massgeblich unterscheidet (Kap. 2.6). Das theoretische Potenzial beläuft sich auf 24.0 PJ ohne die Rinde und auf 32.6 PJ mit der Rinde. Das nachhaltige Potenzial beträgt für die Periode 2017–2026, 7.6 PJ ohne Rinde bzw. 10.6 PJ in Rinde. Der Anteil Rinde beläuft sich also auf etwa 30%.

Tabelle 5 zeigt die verschiedenen Potenziale für die ganze Schweiz für verschiedene Zeitabschnitte. Die Angaben erfolgen ohne/mit Berücksichtigung der Rinde.

Kantone

Die räumliche Verteilung der Restholzpotenziale zeigt einen Schwerpunkt im Mittelland, insbesondere im Nordosten der Schweiz; in den Regionen Jura, Alpen und Tessin sind die Potenziale geringer: *Abbildung 3* zeigt das nachhaltige Potenzial für die energetische Nutzung sowie die Lage der Betriebsstätten der Holzbe- und verarbeitung, wo die Ressource anfällt. Deutlich wird auch, dass die eine Hälfte des Restholzpotenzials relativ konzentriert in den Sägewerken, und die andere Hälfte zerstreut in einer Vielzahl weiterverarbeitender Betriebe anfällt.

Für die Periode 2017–2026 ergibt sich ein grosses theoretisches Potenzial von jährlich 0.6 Mio. m³ im Kanton Bern. In den Kantonen Waadt, Graubünden, Zürich, Aargau sowie Sankt Gallen kann mit jährlichen theoretischen Potenzialen um 0.2 bis 0.3 Mio. m³ Restholz gerechnet werden (*Tabelle 9*).

Das grösste nachhaltige Potenzial findet sich mit gut 0.2 Mio. m³ im Kanton Bern für die Periode 2017–2026, 0.12 Mio. m³ sind im Kanton Waadt möglich. Nennenswerte nachhaltige Restholzpotenziale ergeben sich auch in den Kantonen Zürich, Aargau, Sankt Gallen oder Graubünden (*Tabelle 10*).

Die grössten bereits genutzten Restholzpotenziale befinden sich mit 0.2 Mio. m³ ebenfalls im Kanton Bern. Auch Waadt, Graubünden, Zürich, Aargau, Sankt Gallen, Luzern und Freiburg nutzen grössere Mengen Restholz (zwischen 0.05 und 0.1 Mio. m³). Kleinere Mengen stehen in den Kantonen Jura, Neuchâtel und Solothurn (*Tabelle 11*) zur Verfügung.

Die grössten zusätzlich nutzbaren Potenziale befinden sich im Kanton Waadt und Bern.

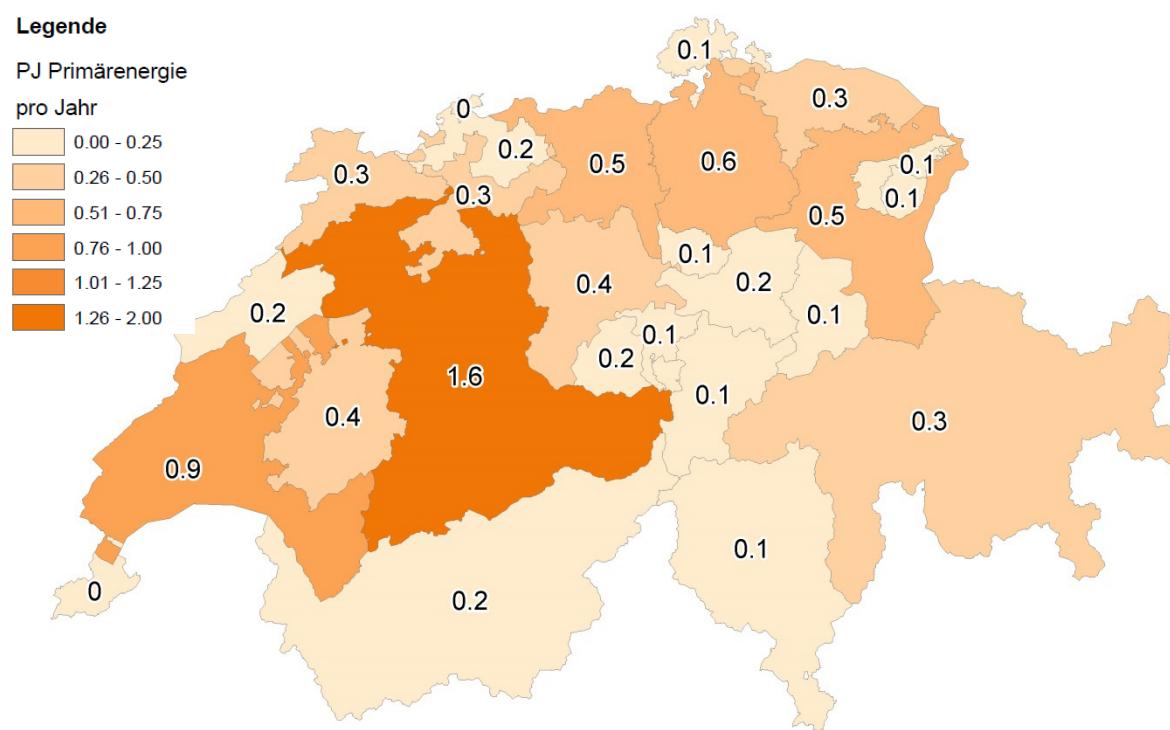
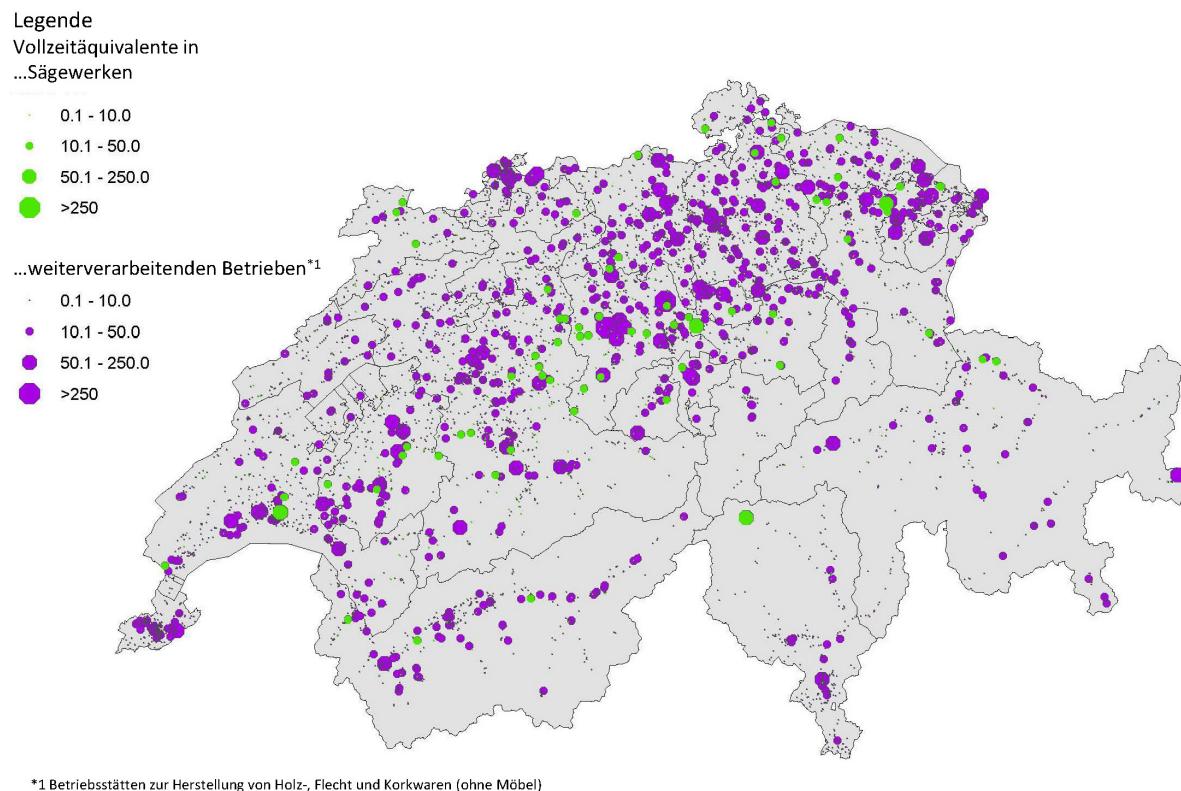


Abbildung 3: Oben: Vollzeitäquivalente (VZA) in den Sägewerken beziehungsweise in weiterverarbeitenden Betrieben basierend BFS 2012 [11]. Unten: Nachhaltiges Restholzpotenzial bei Holzernte, Hack- und Transportkosten bis 120 CHF/m³ und bis 190 CHF/m³ im Schutzwald.

Tabelle 5: Restholzpotenziale für die energetische Nutzung in der Schweiz.

	Theore-tisches Potenzial ^{*1} pro Jahr	Nachhaltiges Potenzial ^{*2} pro Jahr				Bereits genutzt ^{*3} pro Jahr	Zusätzlich nutzbares Potenzial ^{*4} pro Jahr		
		2017–2026	2017–2026	2017–2036	2017–2056		2014	2017–2026	2017–2036
Mio. m ³ ohne Rinde	3.2	1.0	1.0	0.9	1.0	0.0	0.0	-0.2	
PJ ^{*3} ohne Rinde	24.0	7.6	7.4	6.4	7.8	-0.2	-0.4	-1.4	
Mio. m ³ mit Rinde ^{*5}	4.3	1.5	1.4	1.3	1.5	0.0	-0.1	-0.2	
PJ ^{*5} mit Rinde ^{*6}	31.3	10.6	10.4	9.0	10.8	-0.2	-0.4	-1.8	

Legende

*1 Berechnung basierend auf Waldbewirtschaftungsszenario «moderer Vorratsabbau». Für den Wert «mit Rinde» Zuschlag gemäss *6.

*2 Berechnung basierend auf Waldbewirtschaftungsszenario «moderer Vorratsabbau» mit Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald. Für den Wert «mit Rinde» Zuschlag gemäss *6.

*3 Berechnung basierend auf Forststatistik [9]. Für den Wert «mit Rinde» Zuschlag gemäss *6.

*4 Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial.

*5 Siehe Kapitel 2.6.

*6 Schätzung der Rinde basierend auf [4],[5],[6],[7],[8]. Die Rinde entspricht ca. 8% der Holzernte (*Abbildung 2*).

Hinweis: Zu negativen Werten Vergleiche Kapitel 4 «Negative Werte».

4 Diskussion und Folgerungen

Potenziale

Zur Beurteilung und Interpretation der Verfügbarkeit des energetisch nutzbaren Restholzes muss man die Faktoren, die sein Aufkommen beeinflussen, und deren Zusammenwirken kennen:

Das inländische Restholzpotenzial hängt grundsätzlich (i) vom Umfang der Holznutzung im Wald und (ii) von der Art der anschliessenden Verwendung des Holzes ab. Je mehr Waldholz stofflich genutzt wird, desto mehr Restholz fällt an und umgekehrt. Es entsteht im Zuge bei der Be- und Verarbeitung des Waldholzes. Ungefähr die Hälfte des Restholzaufkommens fällt in den Sägewerken (n=520, VAE=2854, Bearbeitung [11]) und die andere Hälfte in den weiterverarbeitenden Betrieben (n=7200, VAE=34000 Verarbeitung [11]) an. Von dieser Gesamtmenge Restholz, die in den Sägewerken anfällt, wird ungefähr ein Drittel und in den weiterverarbeitenden Betrieben gut die Hälfte energetisch genutzt (vgl. *Abbildung 2*). Diese Anteile hängen ab von den Preisen des Restholzes sowie von Grösse und Auslastung der vorhandenen Anlagenkapazitäten zur Energiegewinnung in den Betrieben, in denen das Restholz anfällt. Import und Export von Waldholz und Schnittholz/Halbfabrikaten können das Potenzial erheblich beeinflussen: Auf der Stufe der Bearbeitung (v.a. Sägewerke) bewirkte der bisher nicht unerhebliche Export von Sägerundholz (ca. jährlich zwischen 0.5 bis 1.0 Mio. m³/Jahr) eine Minderung des Restholzanfalls im Inland. Mit jedem exportierten Kubikmeter Stammholz werden etwa 0.4 Kubikmeter Restholz exportiert. Auf der Stufe der Verarbeitung bewirkt der bisher nicht unerhebliche Import von Halbfabrikaten/Schnittholz (ca. jährlich zwischen 0.3 bis 0.6 Mio. m³) eine Mehrung des Restholzanfalls im Inland. Das Restholz aus dem Import von Schnittholz und Halbfertigprodukten ist nur im bereits genutzten Potenzial enthalten, hier aber nicht quantifiziert. Im theoretischen und nachhaltigen Potenzial wird davon ausgegangen, dass kein Restholz importiert wird (Kap. 2.2.3).

Wegen der Abhängigkeit des Restholzaufkommens vom Einschlag gelten das theoretische und das nachhaltige Restholzpotenzial nur für den Fall, dass auf eine intensivere Waldbewirtschaftung mit «moderatem Vorratsabbau» umgeschwenkt wird (Kap. 2.2.1). Sollte das Waldholz im Umfang «wie bisher» (Teilbericht Waldholz Kap. 2.3, Waldbewirtschaftungsszenario: «weiter wie bisher») genutzt werden, trifft diese eher optimistische Annahme nicht zu und es ist für ein theoretisches Potenzial mit um etwa 10% und beim nachhaltigen Potenzial mit um knapp 30% geringeren Potenzialen zu rechnen.

Zusammenfassend hängt das Restholzaufkommen auch von der Holzmarktsituation ab, welche über die stoffliche oder energetische Verwendung des Waldholzes und somit auch über das Restholzaufkommen entscheidet.

Methoden und Annahmen

In den folgenden Abschnitten werden die Auswirkungen methodischer Ansätze und Annahmen (siehe Kapitel 2.2.3) auf die Ergebnisse diskutiert.

- i) Bei der Ableitung des Restholzpotenzials aus der Waldnutzung wird das Szenario eines «moderaten Vorratsabbaus» unterstellt. Dies ist zwar aus Sicht der Forst-Holzwirtschaft und -politik wünschenswert und für die objektive Bestimmung eines nachhaltigen Waldenergieholzpotenzials, wie auch eines nachhaltigen Restholzpotenzials zielführend. Angesichts der seit Jahren stagnierenden Einschlagsentwicklung handelt es sich jedoch wahrscheinlich um eine optimistische Annahme.
- ii) Die Ableitung des Restholzpotenzials aus der Waldholznutzung hat im Hinblick auf die hier beabsichtigte Ermittlung des inländischen Potenzials den Vorzug, dass die Potenziale in Beziehung zu ihrer originären Quelle gesetzt werden können. Sie führt aber auch dazu, dass diese Potenziale nicht in direkter Beziehung zu den holzbe- und verarbeitenden Betrieben stehen, in denen sie de facto anfallen. Abgesehen vom bereits genutzten Potenzial aus der Forststatistik kann der Restholzanfall aus importiertem Rohholz, Halbfertig- und Fertigprodukten nicht erfasst werden. Dies beeinflusst die Ermittlung des theoretischen und des nachhaltigen Potenzials nicht, führt aber zu einem zu geringen zusätzlich nutzbaren Potenzial, weil sich letzteres aus der Subtraktion des bereits genutzten Potenzials (inklusiv Import) vom nachhaltigen Potenzial (exklusiv Import) ergibt.
- iii) Ferner ist zu erwähnen, dass das Restholzmodell, beziehungsweise das Downscaling der Restholzpotenziale auf die Kantone entsprechend der kantonalen Waldnutzung die regionalen Holzmärkte zwischen den Kantonen nicht berücksichtigt: In der Modellrechnung verbleiben das Waldholz und somit auch das Restholz im Ursprungskanton. Dies kann bei den kantonalen Restholzpotenzialen zu Ungenauigkeiten führen. Zu grosse Potenziale sind vermutlich dort zu erwarten, wo in Realität grosse Teile des geernteten Waldholzes ausserkantonal be- und verarbeitet werden. Im Mittelland werden wahrscheinlich tendenziell zu geringe kantonale Potenziale ausgewiesen.
- iv) In den Berechnungen des vorliegenden Teilberichts werden Holzflüsse unterstellt, die dem gesamtschweizerischen Fünfjahresmittel von 2009-2013 entsprechen. Für die Betrachtung der nahen Zukunft stellt diese Annahme kein Problem dar, solange nicht aussergewöhnliche Ereignisse stattfinden. Allerdings ist es nicht möglich, auf der Grundlage dieser starren deterministischen Vorgaben des Restholzmodells die Holzflüsse für Marktsituationen, die weit in der Zukunft liegen, verlässlich abzuschätzen.
- v) Es wird davon ausgegangen, dass der zukünftige Einschlag auch in der Schweiz verarbeitet werden kann². Dies gilt auch für eine erhöhte Holzerntemenge, die sich zum Beispiel bei der Nutzung des nachhaltigen Waldholznutzungspotenzials von rund 6 Mio. m³ ergibt. Derzeit werden aber lediglich etwa 5 Mio. m³ genutzt [3]. Es wird unterstellt, dass entsprechende Einschnittskapazitäten in den Sägewerken vorhanden sind. Trotz der seit Jahren rückläufigen Zahl der Sägewerke in der Schweiz ist die Einschnittskapazität der Sägeindustrie gleich geblieben, so dass davon ausgegangen werden kann, dass kurzfristig ein grössere Menge im oben genannten

² Ist dies nicht der Fall oder besteht keine Nachfrage, entfällt die Bearbeitung in den Sägewerken und daher auch die folgenden verarbeitenden Schritte, beispielsweise in den Hobelwerken, Zimmereien und Schreinereien usw.. Somit fällt weniger Restholz im Inland an. Das bereits geerntete Stammholz wird gegebenenfalls exportiert. Dabei wandert neben der Wertschöpfung auch das anhängende, beziehungsweise bei der späteren Verarbeitung anfallende Restholz ins Ausland ab. Andererseits kann bei fehlender Nachfrage das Holz auch nicht geerntet und im Wald belassen werden, was sich aber ebenfalls negativ auf den kurzfristigen Restholzanfall auswirkt.

Rahmen eingeschnitten werden kann. Dass man aber langfristig nicht unbedingt von gleichbleibenden oder genügenden Kapazitäten ausgehen kann, zeigt zum Beispiel die über Jahre zu beobachtende Abwanderung der Holzindustrien (Zellstoff, Platte, Papier,) ins Ausland. Als Folge lässt sich sagen, dass die Nutzung des nachhaltigen Potenzials heute möglich erscheint, dass aber bei den langfristigen Betrachtungen beziehungsweise stark steigenden Waldholznutzungsmengen diese Annahme nicht mehr gelten muss.

In den «Holzflüssen der Schweiz» beziehungsweise im Restholzmodell können die Hobelwerke, die Brettschichtholzproduzenten und die Verpackungsindustrie nicht eindeutig zugeordnet werden. Bezogen auf die Art und Weise der Darstellung ist anzunehmen, dass diese Verarbeiter auf der Stufe der Endprodukte anzusiedeln sind.

Bei der Ermittlung der Restholzpotenziale ist zu berücksichtigen, dass die Volumenmasse von Waldholz in der Regel für seinen waldfrischen Zustand gelten, und dass das aus dem Waldholz erzeugte Restholz auf der Stufe der Bearbeitung und besonders auf der Stufe der Verarbeitung trocknet und bis zu seinem lufttrockenen Zustand um rund 3 bis 5% schwindet [13]. Dieser Schwindung ist bei Ableitung von Restholzvolumen aus dem Waldholzvolumen Rechnung zu tragen; berücksichtigt man dies nicht, werden die Restholzvolumen entsprechend überschätzt. Wenn anschliessend die im Restholz enthaltenen Energiemengen zu berechnen sind, muss das infolge der Trocknung kleinere Holzvolumen und auch der aus gleichem Grund höhere Energieinhalt berücksichtigt werden. Das Schwinden des Holzes ist bei den Angaben zum Restholz in den jährlich veröffentlichten «Holzflüssen der Schweiz», aus denen unser Restholzmodell abgeleitet wurde, berücksichtigt (Kap. 2.2.3).

In der Summe ist aufgrund der genutzten Methoden und getroffenen Annahmen zu schliessen,

- i) dass es sich um eine ausgewogene Schätzung handelt (optimistisch ist die Annahme des Vorratsabbaus und die ausreichende Verarbeitungskapazität bei grösseren Holzmengen; konservativ wirkt die Herleitung des Restholzes aus der Waldholznutzung und bezüglich der Restholzmengen die Berücksichtigung der Schwindung);
- ii) dass die Ergebnisse nicht als Prognosen für die ferne Zukunft dienen können. Die langfristigen Simulationsergebnisse stellen grobe Abschätzungen dar.

Negative Werte

Ist das bereits genutzte Restholzpotenzial grösser als das nachhaltige, führt dies bei der Berechnung des zusätzlich nutzbaren Restholzpotenzials zu negativen Werten. Gründe können beispielsweise (i) ein Vorratsabbau, (ii) die unterschiedliche Berücksichtigung von Import und Export oder (iii) die Annahmen zum Wassergehalt sein. Der (i) Vorratsabbau ist aufgrund des verwendeten Szenarios zur Berechnung des nachhaltigen Potenzials gemäss «moderater Vorratsabbau» gegeben. Überwiegt beim bereits genutzten Potenzial der (ii) Import, kann sich das bereits genutzte Potenzial gegenüber dem nachhaltigen Potenzials ebenfalls erhöhen. Der (iii) Wassergehalt wird je nach Potenzial und Prozessstufe (aus Sägewerken oder aus weiterverarbeitenden Betrieben) unterschiedlich berücksichtigt (Kap. 2.6).

Potenziale ohne Rinde

Die Potenziale des Restholzes sind im vorliegenden Teilbericht, welche mehrere verholzte und auch nicht verholzte Biomassen umfasst, grundsätzlich ohne Rinde angegeben. Der Grund besteht darin, dass die Rinde bereits im Potenzial des Waldholzes enthalten ist – die energetische Waldholznutzung erfolgt mit anhängender Rinde. Andernfalls würde zum Beispiel eine Addition der nachhaltigen Potenziale des Waldholzes und des Restholzes zu Doppelzählungen führen. Ergänzend werden aber gleichwohl Restholzpotenziale inklusive der Rinde mitgeteilt (*Tabelle 5*), um bei weiterführenden Betrachtungen des Restholzes berücksichtigen zu können, dass bei stofflicher Waldholznutzung die Rinde in den Sägewerken anfällt.

5 Anhang

Hier werden die Eingangsgrössen für die Berechnungen (Waldholznutzungspotenziale) sowie die Ergebnisse der berechneten Restholzpotenziale tabellarisch für alle Kantone und die ganze Schweiz dargestellt.

5.1 Waldholznutzungspotenziale – nach Kantonen

5.1.1 Theoretische Waldholznutzungspotenziale

Es werden die Werte des Waldbewirtschaftungsszenarios «moderater Vorratsabbau» ausgewiesen. Sie dienen zur Berechnung des Restholzpotenzials. Als Vergleich werden zusätzlich die Werte des Szenarios «Vorratsanstieg» (weiter wie bisher) abgebildet (zur Ermittlung des theoretischen Waldholznutzungspotenzials vergleiche Kap. 2.3).

Tabelle 6: Jährliche theoretische Waldholznutzungspotenziale in Mio. m³ bei den Waldbewirtschaftungsszenarien «Vorratsanstieg» (weiter wie bisher) und «moderater Vorratsabbau». Neben dem Total sind die Mengen getrennt nach Laub- (LbH) und Nadelholz (NdH) für die Periode 2017–2026 dargestellt. Die Werte beinhalten Mortalität, Reisig und Rinde und enthalten keine Abzüge für Reservatsflächen, Ernteverluste, die stoffliche Nutzung oder Holzerntekosten.

Szenario	Theoretisches Waldholznutzungspotenzial (in Mio. m ³ , mit Rinde)					
	2017–2026					
KT	Vorratsanstieg		Moderater Vorratsabbau			
	Total	LbH	NdH	Total	LbH	NdH
FR	0.499	0.204	0.294	0.667	0.261	0.406
SO	0.471	0.246	0.225	0.493	0.240	0.253
AG	0.801	0.480	0.321	0.868	0.522	0.346
AI	0.070	0.027	0.044	0.098	0.034	0.064
AR	0.114	0.043	0.071	0.160	0.056	0.104
BE	2.165	0.886	1.279	2.550	0.926	1.624
BL	0.265	0.183	0.082	0.309	0.207	0.103
BS	0.003	0.002	0.001	0.004	0.003	0.001
GE	0.029	0.017	0.012	0.036	0.021	0.015
GL	0.140	0.061	0.079	0.180	0.065	0.115
GR	0.958	0.226	0.732	1.067	0.227	0.839
JU	0.396	0.211	0.186	0.432	0.200	0.232
LU	0.603	0.229	0.374	0.724	0.241	0.483
NE	0.336	0.179	0.158	0.366	0.169	0.197
NW	0.075	0.021	0.054	0.111	0.026	0.085
OW	0.213	0.060	0.152	0.310	0.074	0.236
SG	0.660	0.281	0.379	0.858	0.330	0.528
SH	0.179	0.130	0.049	0.212	0.151	0.061
SZ	0.324	0.121	0.203	0.435	0.150	0.285
TG	0.400	0.218	0.182	0.416	0.228	0.188
TI	0.664	0.418	0.247	0.664	0.422	0.242
UR	0.156	0.056	0.100	0.180	0.059	0.121
VD	1.165	0.598	0.567	1.408	0.670	0.739
VS	0.580	0.116	0.464	0.624	0.117	0.507
ZG	0.082	0.034	0.048	0.109	0.041	0.067
ZH	0.827	0.446	0.381	0.872	0.470	0.402
CH	12.175	5.492	6.683	14.149	5.907	8.242

5.1.2 Nachhaltige Waldholznutzungspotenziale

Tabelle 7: Jährliche nachhaltige Waldholznutzungspotenziale (in Mio. m³). Mortalität, Reservatsflächen, Ernteverluste und Holzerntekosten sind in Abzug gebracht, beziehungsweise berücksichtigt. Die Potenziale beziehen sich auf das Waldbewirtschaftungszenario «moderater Vorratsabbau».

Kantone	Waldholznutzungspotenzial (in Mio. m ³ , mit Rinde)		
	2017-2026		2017-2036
	Mio. m ³ /a	Mio. m ³ /a	Mio. m ³ /a
FR	0.317	0.320	0.258
SO	0.244	0.240	0.208
AG	0.416	0.410	0.353
AI	0.044	0.043	0.034
AR	0.067	0.064	0.052
BE	1.227	1.154	0.986
BL	0.146	0.146	0.129
BS	0.002	0.002	0.002
GE	0.020	0.020	0.016
GL	0.055	0.051	0.046
GR	0.233	0.210	0.218
JU	0.215	0.218	0.193
LU	0.299	0.274	0.227
NE	0.171	0.173	0.154
NW	0.049	0.043	0.036
OW	0.127	0.112	0.092
SG	0.397	0.386	0.319
SH	0.095	0.094	0.082
SZ	0.186	0.182	0.146
TG	0.209	0.207	0.177
TI	0.060	0.066	0.058
UR	0.052	0.051	0.043
VD	0.673	0.676	0.569
VS	0.117	0.123	0.133
ZG	0.047	0.046	0.038
ZH	0.422	0.416	0.356
CH	5.890	5.750	4.964

5.1.3 Bereits genutzte Waldholznutzungspotenziale

Tabelle 8: Bereits genutzte Waldholznutzungspotenziale in der Schweiz.

Kanton	Jahr 2014	Bereits genutztes Waldholznutzungspotenzial (in Mio. m ³ , mit Rinde)
FR		0.281
SO		0.210
AG		0.414
AI		0.027
AR		0.063
BE		1.156
BL		0.148
BS		0.003
GE		0.012
GL		0.060
GR		0.482
JU		0.215
LU		0.283
NE		0.215
NW		0.030
OW		0.079
SG		0.341
SH		0.092
SZ		0.141
TG		0.160
TI		0.109
UR		0.036
VD		0.564
VS		0.136
ZG		0.064
ZH		0.467
CH		5.790

5.2 Restholzpotenziale für eine energetische Nutzung – nach Kantonen

5.2.1 Theoretische Restholzpotenziale

Tabelle 9: Jährlich anfallende theoretische Restholzpotenziale für die energetische Nutzung nach dem Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau». Die Restholzmengen enthalten keine Abzüge der Mortalität, Reservatsflächen, Ernteverluste oder Holzerntekosten.

Kanton	Szenario Kontinuierlich hoher Zuwachs (moderater Vorratsabbau) 2017-2026	Jährlich theoretisches Restholzpotenzial (ohne Rinde)	
		Mio.m ³ /a	Pl/a
FR		0.15	1.13
SO		0.11	0.84
AG		0.20	1.47
AI		0.02	0.16
AR		0.04	0.27
BE		0.58	4.32
BL		0.07	0.53
BS		0.00	0.01
GE		0.01	0.06
GL		0.04	0.30
GR		0.24	1.81
JU		0.10	0.73
LU		0.17	1.22
NE		0.08	0.62
NW		0.03	0.19
OW		0.07	0.53
SG		0.20	1.45
SH		0.05	0.36
SZ		0.10	0.73
TG		0.10	0.70
TI		0.15	1.13
UR		0.04	0.30
VD		0.32	2.39
VS		0.14	1.06
ZG		0.03	0.19
ZH		0.20	1.47
CH		3.24	23.96

5.2.2

Nachhaltige Restholzpotenziale (mit Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect))

Tabelle 10: Jährliche nachhaltig anfallende Restholzpotenziale für die energetische Nutzung, gemäss Waldbewirtschaftungsszenario «moderater Vorratsabbau» mit Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect).

Jahr	Jährlich nachhaltige Restholzpotenziale für die energetische Nutzung (ohne Rinde mit Berücksichtigung von Subventionen im Schutzwald (SilvaProtect))						
	Kanton	2017–2026	2017–2036	2017–2056			
		Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a
FR		0.055	0.41	0.055	0.41	0.045	0.33
SO		0.042	0.32	0.042	0.31	0.036	0.27
AG		0.072	0.54	0.071	0.53	0.061	0.46
AI		0.008	0.06	0.007	0.06	0.006	0.04
AR		0.012	0.09	0.011	0.08	0.009	0.07
BE		0.212	1.59	0.200	1.49	0.171	1.28
BL		0.025	0.19	0.025	0.19	0.022	0.17
BS		0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
GE		0.003	0.03	0.004	0.03	0.003	0.02
GL		0.010	0.07	0.009	0.07	0.008	0.06
GR		0.040	0.30	0.036	0.27	0.038	0.28
JU		0.037	0.28	0.038	0.28	0.033	0.25
LU		0.052	0.39	0.047	0.35	0.039	0.29
NE		0.030	0.22	0.030	0.22	0.027	0.20
NW		0.008	0.06	0.007	0.06	0.006	0.05
OW		0.022	0.16	0.019	0.15	0.016	0.12
SG		0.069	0.51	0.067	0.50	0.055	0.41
SH		0.017	0.12	0.016	0.12	0.014	0.11
SZ		0.032	0.24	0.032	0.24	0.025	0.19
TG		0.036	0.27	0.036	0.27	0.031	0.23
TI		0.010	0.08	0.011	0.09	0.017	0.13
UR		0.009	0.07	0.009	0.07	0.007	0.06
VD		0.116	0.87	0.117	0.87	0.098	0.74
VS		0.020	0.15	0.021	0.16	0.023	0.17
ZG		0.008	0.06	0.008	0.06	0.007	0.05
ZH		0.073	0.55	0.072	0.54	0.062	0.46
CH	1.019	7.62	0.991	7.41	0.859	6.42	

5.2.3 Bereits genutzte Restholzpotenziale

Tabelle 11: Bereits genutzte Restholzpotenziale für eine energetische Nutzung. Umrechnung in PJ gemäss Kapitel 2.6.

Bereits genutzte Restholzpotenziale für die energetische Nutzung (ohne Rinde)		
Kanton	2014 Mio. m ³	PJ
FR	0.050	0.38
SO	0.037	0.28
AG	0.073	0.55
AI	0.005	0.04
AR	0.011	0.08
BE	0.205	1.56
BL	0.026	0.20
BS	0.000	0.00
GE	0.002	0.01
GL	-0.001	-0.01
GR	-0.045	-0.34
JU	-0.001	-0.01
LU	0.002	0.01
NE	-0.008	-0.07
NW	0.003	0.02
OW	0.008	0.05
SG	0.009	0.05
SH	0.001	0.00
SZ	0.007	0.05
TG	0.008	0.06
TI	-0.009	-0.06
UR	0.003	0.02
VD	0.016	0.11
VS	-0.004	-0.03
ZG	-0.003	-0.02
ZH	-0.01	-0.08
CH	-0.006	-0.16

5.2.4 Zusätzlich nutzbare Restholzpotenziale

Tabelle 12: Jährlich zusätzlich nutzbare Restholzpotenziale für eine energetische Nutzung.

Jahr	jährlich zusätzlich nutzbare Restholzpotenziale für die energetische Nutzung (ohne Rinde)				
	Kantone	2017–2026 Mio. m ³ /a	PJ/a	2017–2036 Mio. m ³ /a	PJ/a
FR	0.005	0.03	0.005	0.03	-0.005
SO	0.005	0.04	0.005	0.03	-0.001
AG	-0.001	-0.01	-0.002	-0.02	-0.012
AI	0.003	0.02	0.002	0.02	0.001
AR	0.001	0.01	0.000	0.00	-0.002
BE	0.007	0.03	-0.005	-0.07	-0.034
BL	-0.001	-0.01	-0.001	-0.01	-0.004
BS	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
GE	0.001	0.01	0.002	0.01	0.001
GL	-0.001	-0.01	-0.002	-0.01	-0.003
GR	-0.045	-0.34	-0.049	-0.37	-0.047
JU	-0.001	-0.01	0.000	-0.01	-0.005
LU	0.002	0.01	-0.003	-0.03	-0.011
NE	-0.008	-0.07	-0.008	-0.07	-0.011
NW	0.003	0.02	0.002	0.02	0.001
OW	0.008	0.05	0.005	0.04	0.002
SG	0.009	0.05	0.007	0.04	-0.005
SH	0.001	0.00	0.000	0.00	-0.002
SZ	0.007	0.05	0.007	0.05	0.000
TG	0.008	0.06	0.008	0.06	0.003
TI	-0.009	-0.06	-0.008	-0.05	-0.002
UR	0.003	0.02	0.003	0.02	0.001
VD	0.016	0.11	0.017	0.11	-0.002
VS	-0.004	-0.03	-0.003	-0.02	-0.001
ZG	-0.003	-0.02	-0.003	-0.02	-0.004
ZH	-0.01	-0.08	-0.011	-0.09	-0.021
CH	-0.006	-0.16	-0.034	-0.37	-0.166

6 Literatur

- [1] AEA, Austrian Energy Agency, 2009: Empfohlene Umrechnungsfaktoren für Energierohholzsortimente bei Holz bzw. Energieholzbilanzrechnungen, 19 S.
- [2] Altwegg, J., Schoop, A., Hofer, P., 2010: Klären von Differenzen zwischen Holznutzungsmengen nach Forststatistik und nach LFI. Technischer Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), 82 S.
- [3] BAFU, Bundesamt für Umwelt 2016: Jahrbuch Wald und Holz 2015, Bern, 162 S.
- [4] BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2010: Jahrbuch Wald und Holz 2009, Bern, 162 S.
- [5] BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2011: Jahrbuch Wald und Holz 2010, Bern, 162 S.
- [6] BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2012: Jahrbuch Wald und Holz 2011, Bern, 162 S.
- [7] BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2013: Jahrbuch Wald und Holz 2012, Bern, 162 S.
- [8] BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2014: Jahrbuch Wald und Holz 2013, Bern, 162 S.
- [9] BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2015: Jahrbuch Wald und Holz 2014, Bern, 162 S.
- [10] BFE, Bundesamt für Energie, 2006: Masse, Einheiten, Zahlen: Umrechnungsfaktoren, Masseinheiten und Energieinhalte, 1 S.
- [11] BFS, Bundesamt für Statistik, 2012: Statistik der Unternehmensstruktur.
- [12] BFS, Bundesamt für Statistik, 2013: Restholzverwertung in den Sägereien nach Kantonen 2012, Tab 7.3.5.3.
- [13] DIN, Deutsches Institut für Normung, 2004: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau, Beuth Verlag, 235 S.
- [14] LWF, Bayrische Landesanstalt für Forstwirtschaft, 2014: Merkblatt 12 der Bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 4 S.
- [15] Frutig, F., Thees, O., Lemm, R., Kostadinov, F., 2009: Holzernteproduktivitätsmodelle HeProMo - Konzeption, Realisierung, Nutzung und Weiterentwicklung. In Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, 441-466 S.
- [16] Losey, S., Wehrli, A., 2013: Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald, 29 S., Bern.
- [17] Riegger, W., 2004: Waldmass von Industrieholz, Umrechnungszahlen von Industrieholz; in Schweizerischer Forstkalender 2005, 230-232 S.
- [18] Riegger, W., 2008: Umrechnungsfaktoren Waldholz und Restholz, 4 S., Online: http://www.holz-bois.ch/fileadmin/his/Dokumente/Verband/FG_Industrieholz/Umrechnungsfaktoren-IGIH08_D.pdf.
- [19] Schardt, M., 2006: Das Problem mit der «Holzfeuchte» und dem «Wassergehalt», LWF aktuell, 54, S. 50-51.
- [20] Stadelmann, G., Herold, A., Didion, M., Vidondo, B., Gomez, A., Thürig, E., 2016: Holzerntepotenzial im Schweizer Wald: Simulation von Bewirtschaftungsszenarien, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 167 (3): S. 152-161.

- [21] Taverna, R., Gautschi, M., Hofer, P., 2016: Das nachhaltig verfügbare Holznutzungspotenzial im Schweizer Wald, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 167 (3): S. 162-171.
- [22] Thees O., Lemm, R., Erni, M., Balmer, I., 2014: Potenziale, Chancen und Risiken der Energieholznutzung. Zur Rolle des Holzes im Schweizer Energiesystem, WSL Berichte, 21: S. 29-42.
- [23] Thürig, E., Kaufmann, E., Frisullo, R., Bugmann, H., 2005: Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model, Forest Ecology and Management. 204: S. 51-66.

Altholz



Bild: Oliver Thees, WSL

Matthias Erni, Oliver Thees, Renato Lemm

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	128
1 Einleitung.....	129
2 Methoden.....	130
2.1 Begriffe	130
2.2 Definition Altholz	131
2.3 Überblick Datenerhebung und Auswertung	132
2.4 Erstellen der Adressdatenbank.....	132
2.5 Durchführung der Befragung.....	133
2.5.1 Schriftliche Befragung	133
2.5.2 Telefonische Befragung.....	134
2.6 Erfasste Daten und Hochrechnung	134
2.6.1 Ermittlung von Altholzentsorgern, Ausschliesslichen Altholztransporteuren, Keinen Altholzentsorgern/-transporteuren	135
2.6.2 Ermittlung des Altholzaufkommens.....	137
2.7 Erläuterungen der Auswertungsgrössen	138
2.8 Umrechnung von Gewicht in Energieinhalt.....	139
3 Resultate	140
3.1 Schweiz	140
3.2 Kantone.....	141
4 Diskussion und Folgerungen.....	144
4.1 Vergleich mit anderen Studien	144
4.2 Folgerungen	145
5 Anhang	147
5.1 Fragebogen zu Altholzaufkommen und -vertrieb in der Schweiz	147
6 Literatur.....	149

Abkürzungen

A	Von den Betriebsstätten an <i>andere Altholzentsorger oder -transporteure</i> weiter vertriebene Altholzmengen
AE	Altholzentsorger
arv	Baustoffrecycling Schweiz
AT	Ausschliessliche Altholztransporteure
BbA	Beseitigung von belastetem Altholz (im In- und Ausland)
BFS	Bundesamt für Statistik
BG	Bereits genutztes Potenzial
eAHM	Erfasste Altholzmengen
FS	Frischsubstanz
HS	Herstellung von Spanplatten (im In- und Ausland)
HV	Handelsvolumen
ibN	innerbetriebliche Nutzung
J	Joule
KAEAT	Kein Altholzentsorger oder kein ausschliesslicher Altholztransporteur
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
KT	Kanton (AG Aargau, AI Appenzell Innerrhoden, AR Appenzell Ausserrhoden, BE Bern, BL Basel-Land, BS Basel-Stadt, FR Fribourg, GE Genève, GL Glarus, GR Graubünden, JU Jura, LU Luzern, NE Neuchâtel, NW Nidwalden, OW Obwalden, SG St. Gallen, SH Schaffhausen, SO Solothurn, SZ Schwyz, TG Thurgau, TI Ticino, UR Uri, VS Valais, VD Vaud, ZG Zug, ZH Zürich)
KVA	Kehrichverbrennungsanlage
kWh	Kilowattstunde

MEI	Menge an Endverwertern im Ausland
MV	Marktvolumen
NP	Nachhaltiges Potenzial
PJ	Petajoule
t	Tonnen Frischsubstanz (FS) (Annahme lufttrocken), sofern nichts anderes vermerkt
TelB	Telefonische Befragung
TP	Theoretisches Potenzial
VeVA	Verordnung über den Verkehr mit Abfällen
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft
WT	Weitertransport
ZP	Zusätzlich Nutzbares Potenzial

1 Einleitung

Als Altholz gekennzeichnet sind in der Schweiz gemäss den Listen über den Verkehr von Abfällen (VeVA, 2005 [12]):

- Verpackungen aus Holz
- Altholz von Baustellen, Abbrüchen, Renovationen, Umbauten
- zerkleinerte Holzabfälle, deren Schadstoffgehalte die Richtwerte für die stoffliche Verwertung oder für Altholzfeuerungen einhalten, inklusive Siebüberlauf

Aus Unternehmenssicht wird oft sämtliches Holz, das bereits einmal in Gebrauch war, als Altholz verstanden [8]. Dazu gehören auch die problematischen Holzabfälle und Sperrmüll aus Holz, die zwar in der VeVA-Liste aufgeführt, aber nicht explizit als Altholz gekennzeichnet sind. In der vorliegenden Studie wird der Begriff Altholz auch in diesem Sinne verwendet. Nicht zum Altholz zählen insbesondere Abfälle von naturbelassenem Waldholz, mechanisch bearbeitetes Industrierestholz oder Baum- und Strauchschnitt.

Altholz ist ein gefragter Rohstoff. Häufig wird das Altholz exportiert oder als Energienholz eingesetzt, wobei der Markt durch umwelt- und energiepolitische Gesetzgebungen beeinflusst wird. In der Schweiz untersuchten bisher Taverna et al. (2010) [11] und Lehner et al. (2014) [6] die Altholzmengen. Taverna et. al. (2010) [11] schätzten die heutige gesamtschweizerische Altholzmenge auf rund eine Million Tonnen und konnten einen leicht steigenden Trend bis 2020 feststellen. Auf eine ähnliche Größenordnung kommen Lehner et al. (2014) [6].

Diese Abschätzungen basieren auf älterem Datenmaterial und haben das Thema nicht im Detail behandelt. So fehlen vor allem differenzierte Angaben zur Verfügbarkeit und Verwendung sowie zur räumlichen Verteilung des Altholzaufkommens. Folgende Fragen stehen im Vordergrund:

- Wie gross ist das heutige Altholzaufkommen und wie ist es räumlich verteilt?
- Welche Altholzmengen fliessen heute in welche Verwendungen und wie sieht die Verfügbarkeit für die energetische Verwendung aus?
- Wie könnte sich die Verfügbarkeit in Zukunft ändern? Welche Altholzmengen werden heute im Ausland genutzt und wie viel davon könnte zukünftig im Inland verwendet werden?

Die folgenden Ausführungen basieren auf einem ausführlichen Untersuchungsbericht, der als Heft 52 in der gleichen Publikationsreihe der WSL veröffentlicht wurde [4].

Theoretisches Potenzial

Entspricht dem Marktvolumen. Das Marktvolumen gibt die im Markt maximal verfügbare Menge wider. Es enthält die innerbetrieblich verwendeten Mengen sowie die Mengen, welche im Ausland an Endverwerter vertrieben werden.

Nachhaltiges Potenzial

Berücksichtigt die kaskadische und damit auch die stoffliche Nutzungsart des Altholzes sowie die sachgerechte Entsorgung von belastetem Altholz im In- und Ausland.

Bereits genutztes Potenzial

Entspricht der zur Energieerzeugung inländisch im Jahr 2014 verwendeten Menge Altholz.

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Entspricht der Differenz zwischen dem nachhaltigen und dem bereits genutzten Altholz. Das Potenzial besteht aus Altholz, welches heute hauptsächlich im Ausland für die Energieerzeugung eingesetzt wird.

→ siehe jeweils Kapitel 2.7

2 Methoden

Die Untersuchung der Biomasse Altholz basiert auf einer eigens durchgeführten Befragung der Altholzentsorger und Altholztransporteure in der Schweiz und wurde als Vollerhebung mittels Befragung konzipiert. Da ein von der Universität Hamburg bereits erprobter Ansatz vorlag, mit dem die oben genannten Fragen beantwortet werden können, wurden die Methoden der Studie «Altholz im Entsorgungsmarkt, Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010» von Mantau et al. (2012) [7] für die Ermittlung energetischer Potenziale für die vorliegende Studie verwendet und angepasst.

2.1 Begriffe

Altholzentsorger (AE): Er nutzt den Grossteil seiner umgesetzten Altholzmenge im eigenen Betrieb für energetische Zwecke, zur Herstellung von Spanplatten, die Beseitigung (Deponie) oder andere Zwecke, wie etwa Kompostierung. AE können jedoch auch einen Teil ihrer Altholzmenge weiter vertreiben.

Altholztransporteur (AT): Ein Altholztransporteur kann mit einem ausschliesslichen Altholztransporteur gleichgesetzt werden. Sie vertreiben 100% ihrer umgesetzten Altholzmenge weiter.

Antwortausfälle: Darunter fallen Betriebsstätten ohne Antworten. Es sind Betriebsstätten, welche keine Antworten geben wollten oder Interesse zeigten, jedoch innerhalb der Frist keine Angaben machten.

Antwortlücken: Darunter fallen Betriebsstätten, welche den Fragebogen zwar mehrheitlich ausfüllten, jedoch einzelne Fragen nicht oder fehlerhaft beantworteten.

Beseitigung: Entsorgung von Altholz auf einer Deponie.

Betriebsstätte: Jede Betriebsstätte kann einer Adresse zugeordnet werden. Insgesamt wurden 567 Betriebsstätten in der ganzen Schweiz angeschrieben. Sie stellen die Grundgesamtheit der Umfrage dar.

Eindeutige Antworten: Diejenigen Antworten, welche in der Befragung tatsächlich gegeben wurden. Es sind also *keine* hochgerechneten Antworten enthalten.

Endverwerter: Betriebsstätte, welche Altholz innerbetrieblich zur Energieproduktion, Herstellung von Spanplatten, Beseitigung oder für andere Zwecke (z.B. Kompostierung) nutzt.

Geschätzte Menge: Stellt die Differenz zwischen den hochgerechneten Werten und den Werten der eindeutigen Antworten.

Handelsvolumen: Stellt die Altholzmenge dar, die von den Betriebsstätten 2014 erfasst wurde. Das Handelsvolumen enthält auch den *Intrahandel*, also diejenigen Mengen, die innerhalb der Branche gehandelt wurden und damit mehrfach gezählt werden [7].

Hochgerechnete Werte: Sie zeigen die geschätzte Extrapolation des Gesamtergebnisses aus den eindeutigen Antworten.

Imputationsverfahren: Statistisches Verfahren, womit für fehlende Werte Ersatzwerte generiert werden können [10].

Intrahandel: Menge, welche innerhalb der Branche gehandelt und damit mehrfach gezählt wurde [7].

Kein Altholzensorger/Altholztransporteur (KAEAT): Einerseits zählen dazu Betriebsstätten, welche explizit angaben, weder in der Entsorgung, Sammlung, Aufbereitung noch im Transport von Altholz tätig zu sein. Andererseits gehören Betriebsstätten dazu, welche trotz mehrmaligen Kontaktversuchen nicht erreichbar waren, still gelegt wurden oder aus sonstigen Gründen keine Auskünfte geben konnten. In *Tabelle 4* sind die entsprechenden Felder grau hinterlegt.

Marktvolumen: Gibt die im Markt maximal verfügbare Menge wieder. Es enthält die intern verwendeten Mengen sowie die Mengen, welche im Ausland an Endverwerter vertrieben werden. Das Marktvolumen enthält keine Mengen mehr, welche innerhalb der Branche gehandelt und deswegen mehrfach gezählt werden. Es entspricht dem theoretischen Potenzial (vgl. Kap. 2.7).

Vertrieb von Altholz: Gemeint ist die Weitergabe von Altholz an andere Altholzensorger und Transporteure.

Vollerhebung: Es wurden alle Betriebsstätten, welche mit Altholz in Kontakt sind, angeschrieben und oder telefonisch angefragt, an der Studie teil zu nehmen.

Weitertransport: Entspricht der von den Betriebsstätten weiter vertriebenen Menge an Altholz, also jener Menge, welche nicht innerbetrieblich genutzt wird, sondern an andere Altholzensorger oder -transporteure geht.

2.2 Definition Altholz

Wenn es um Altholzmengen und deren Verwendung beziehungsweise Entsorgung geht, ist es wichtig, genau zu definieren, was unter Altholz verstanden wird. Denn die Gesetzgebungen der Länder kennen unterschiedliche rechtliche Definitionen, welche die Zusammensetzung und Qualität des Altholzes beziehungsweise der Holzabfälle differenzierter beschreiben.

In der Schweiz sind gemäss den Listen über den Verkehr von Abfällen [12] Verpackungen aus Holz (Abfallcode 15 01 03), Altholz von Baustellen, Abbrüchen, Renovationen, Umbauten (Abfallcode 17 02 97), zerkleinerte Holzabfälle, deren Schadstoffgehalte die Richtwerte für die stoffliche Verwertung oder für Altholzfeuerungen einhalten, inklusive Siebüberlauf (Abfallcode 19 12 98) als Altholz gekennzeichnet. Aus Unternehmenssicht gelten auch problematische Holzabfälle (Abfallcodes 03 03 04, 17 02 98, 19 12 06 und 20 01 37) sowie Sperrmüll aus Holz (Abfallcode 20 03 07) als Altholz [8]. Diese Definition wird auch in der vorliegenden Studie verwendet und entspricht der Definition von «Gebrauchtholz» in Deutschland (*Abbildung 1*). Nicht zum Altholz zählen insbesondere Abfälle von naturbelassenem Waldholz, Industrierestholz oder Baum- und Strauchschnitt.

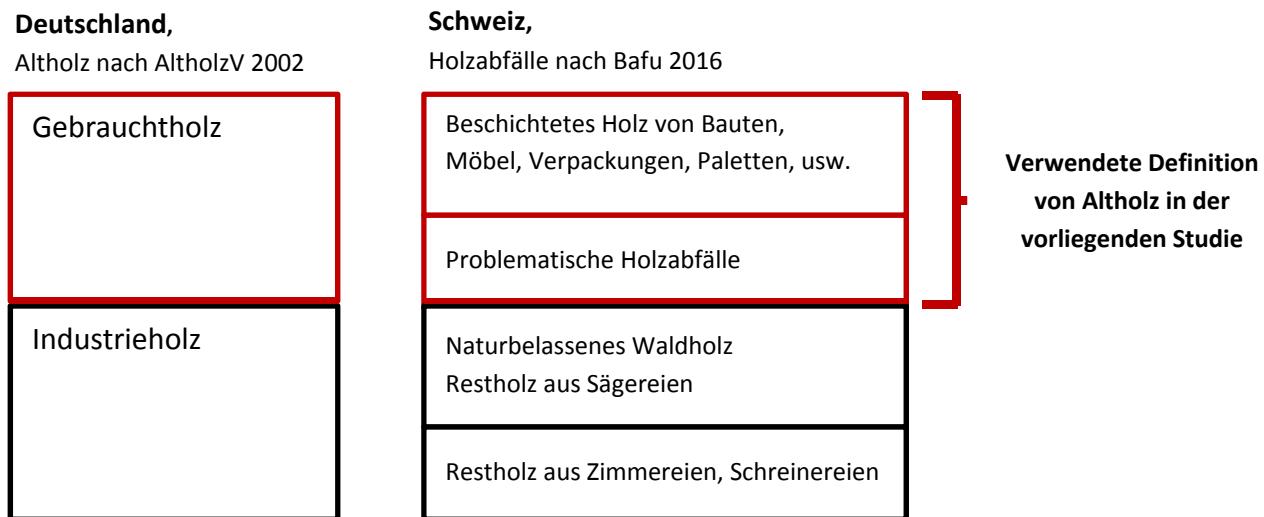


Abbildung 1: Altholzdefinition in Deutschland (AltholzV, 2002) [1], in der Schweiz (VeVA, 2005) [12] und in der vorliegenden Studie (rot umrandet).

Nach deutschem Recht wird gemäss Altholzverordnung [1] neben Gebrauchtholz auch Industrierestholz zum Altholz gezählt. Deswegen ist ein direkter Vergleich der Altholzmengen mit Deutschland nicht möglich. In der Schweiz muss dafür das Restholz aus Sägereien, Schreinereien und Zimmereien addiert werden.

2.3 Überblick Datenerhebung und Auswertung

Zur Erhebung der Daten wurden Fragebogen an Betriebsstätten versandt. Die Betriebsstätten wurden nach ihren Aktivitäten beim Transport und in der Entsorgung von Altholz im Jahre 2014 befragt. Das wesentliche Erhebungsmerkmal war die jährlich an der Betriebsstätte umgesetzte Altholzmenge und ihre (energetische) Verwendung. Durch dieses Vorgehen konnten Doppelzählungen vermieden werden, welche durch Betreiber mehrerer Anlagen auftreten können. Um die Befragung durchführen zu können, war es notwendig, eine vollständige Adressdatenbank zu erstellen.

Die Befragung wurde in zwei Schritten ausgeführt. Im ersten Schritt wurden alle Betriebsstätten schriftlich gebeten, den Fragebogen auszufüllen. Danach erfolgte eine telefonische Befragung derjenigen Betriebsstätten, die nicht geantwortet hatten. Die Daten wurden erfasst und für die nicht antwortenden Betriebsstätten hochgerechnet (Kap. 2.6). Dazu war es notwendig, die Anzahl hochzurechnenden Altholzensorger (AE) und Altholztransporteure (AT) sowie fälschlich angeschriebene Betriebsstätten (KAEAT) zu kennen. Damit Gemeinsamkeiten zwischen den Altholzensorgern/-transporteuren besser ausgewertet werden konnten, erfolgte anschliessend die Einteilung in Betriebsgrößenklassen. Ziel war, eine vollständige Datentabelle für die Auswertung zu erstellen. Dafür mussten Antwortlücken (Kap. 2.6.2.2) und Antwortausfälle (Kap. 2.6.2.3) ermittelt und mit Mengenwerten aufgefüllt werden.

2.4 Erstellen der Adressdatenbank

Ausgangspunkt war das Erstellen einer Adressdatenbank, die alle zur Grundgesamtheit zählenden Betriebsstätten enthielt. Zur gesuchten Grundgesamtheit zählen alle Betriebsstätten, die Altholz umsetzen – also transportieren oder verwerten. Die Adressquellen wurden identifiziert, die Adressen ermittelt und anschliessend bereinigt.

Alle Adressdoppel und alle weiteren Anschriften, die offensichtlich nicht dem Altholzmarkt zuzuordnen waren, wurden entfernt. In einer zweiten Überprüfung wurden die Adressen nochmals auf Doppel kontrolliert und ergänzende Recherchen bezüglich der Aktualität der Betriebsnamen und der Anschriften vorgenommen.

Tabelle 1: Adressquellen und Adressüberarbeitung.

Quelle	Anzahl	Anteil (%)
Informatikprogramm für den Vollzug der Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVA online)	479	44.2
Abfallinfo Schweiz	440	40.6
Mitgliederlisten von Verbänden	35	3.2
Internet	78	7.2
Behörden	52	4.8
Summe nach Recherche	1084	100.0
Summe nach 1. Überarbeitung	770	71.0
Summe nach Schlussüberarbeitung	567	52.3

2.5 Durchführung der Befragung

Mitte März 2015 wurden 567 recherchierte Adressen angeschrieben mit der Bitte den Fragebogen für das Jahr 2014 auszufüllen. Mitte April erfolgte ein Erinnerungsschreiben an die Betriebsstätten, welche noch nicht geantwortet hatten. Im Anschluss an die schriftliche Befragung fand bei denjenigen ohne Antwort eine telefonische Befragung statt. Dazu wurde zuerst eine qualifizierende Frage zur Identifikation potenzieller Altholzentsorger gestellt. Handelte es sich um einen Altholzentsorger, erfolgte anschliessend eine Detailbefragung mit dem Ziel, den Fragebogen telefonisch zu beantworten und alle noch offenen Betriebsstätten zu kategorisieren. Der Aufbau des Fragebogens kann *Abbildung 5* und *Tabelle 9* im Anhang entnommen werden.

Der Ablauf der Befragung erfolgte in zwei Schritten.

1. Schriftliche Befragung
2. Telefonische Befragung
 - a. Qualifizierende Frage (einfache Umfrage: «Haben Sie 2014 Altholz entgegen genommen oder weiter vertrieben?»)
 - b. Detailumfrage

2.5.1 Schriftliche Befragung

Tabelle 2: Rücklaufübersicht der schriftlichen Befragung.

Rücklaufkategorie	Schriftliche Befragung	
	Betriebsstätten	%
N		
Altholzentsorger (AE) mit Daten	49	17.4
Ausschliesslicher Transport (AT) von Altholz	166	58.9
Keine Altholzentsorgung	41	14.5
Betrieb stillgelegt	4	1.4
Adressdoppel	0	0
Nicht zustellbar/ erreicht/ erreichbar	15	5.3
Sonstiges	7	2.5
Rücklauf	282	100.0%

Von den schriftlich erfassten Betriebsstätten waren gut 75% (AE + AT in *Tabelle 2*) in der Entsorgung oder als Transporteur von Altholz tätig. 166 gaben an, Altholz ausschliesslich zu transportieren. 14.5% gaben an, dass sie sich *nicht* mit der Entsorgung, Sammlung, Aufbereitung oder Transport von Altholz beschäftigen. Ausserdem konnten vier stillgelegte Betriebsstätten ausfindig gemacht werden. Die Adressdoppel wurden bereits im Voraus entfernt. Im Verlauf der Umfrage konnten keine weiteren Adressdoppel identifiziert werden. Sieben Betriebsstätten vermerkten sonstige Gründe, weshalb sie den Fragebogen nicht ausgefüllt hatten oder sie

machten widersprüchliche Angaben. Nach Abschluss der schriftlichen Befragung lagen noch 285 «ungeklärte Antworten der Adressaten» vor.

2.5.2 Telefonische Befragung

Die telefonische Befragung erfolgte in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wurden potenzielle Altholzentsorger (mit einer einfachen qualifizierenden Frage: «Haben Sie 2014 Altholz entgegen genommen oder weiter vertrieben?») identifiziert. Auf diese Weise konnten 13 Betriebsstätten als nicht zur Grundgesamtheit gehörend ermittelt werden, da sie angaben, nicht in der Altholzbranche tätig zu sein. Zudem waren 23 nicht erreichbar, 84 konnten auch nach zahlreichen Anrufversuchen keine Auskunft geben oder eine Antwort war gar nicht möglich (z.B. wegen Brand in der Betriebsstätte) oder weil Daten für 2014 teilweise gar noch nicht vorlagen. Ebenfalls in diese Kategorie fielen zehn Betriebsstätten aus der italienischsprachigen Schweiz. Sie erhielten zwar einen Fragebogen und ein Erinnerungsschreiben, fanden aber in der telefonischen Umfrage keine Berücksichtigung. 85 der angerufenen Betriebsstätten wurden zwar telefonisch erreicht, wollten jedoch keinerlei Angaben machen und standen für eine weitere detaillierte Befragung nicht zur Verfügung.

Für den zweiten Schritt, die Detailbefragung blieben demzufolge 164 Betriebsstätten übrig, bei denen versucht wurde, einen Mitarbeitenden zu erreichen, der die relevanten Fragen beantworten konnte. Im Rahmen der Detailbefragung konnten 19 Altholzentsorger und 61 ausschliessliche Altholztransporteure ermittelt und befragt werden.

Tabelle 3: Rücklaufstatistik der gesamten Befragung.

Spalte Rücklaufkategorie	Schriftliche Befragung	Telefonische Befragung		Rücklauf Gesamt	
	1 Rücklauf N	2 Einfache Umfrage N	3 Detailbefragung N	4	5
				N	%
Potenzielle Zielgruppe	567	285	164	567	
Altholzentsorger	49		19	68	12.0%
Ausschliesslicher Transport von Altholz	166		61	227	40.0%
Keine Altholzentsorgung	41	13		54	9.5%
Betrieb stillgelegt	4			4	0.7%
Adressdoppel	0			0	0.0%
Nicht zustellbar/ erreicht/ erreichbar	15	23		38	6.7%
Sonstiges	7			7	1.2%
Interesse			84	84	14.8%
keine Angaben		85		85	15.0%
Rücklauf	282	121	164	567	100.0%
Übertrag nächster Befragungsschritt	285	164	0		

2.6 Erfasste Daten und Hochrechnung

Grundsätzlich können für die Behandlung von einzelnen fehlenden Antworten (Antwortlücken) und ganzen Betriebsstätten ohne Antworten (Antwortausfällen) Imputationsverfahren angewendet werden [10]. Bei solchen statistischen Verfahren werden für die fehlenden Antworten Ersatzwerte hergeleitet. Dabei kann die Schätzgenauigkeit durch die Bildung homogener Teilgruppen (z.B. Betriebsklassengrösse) erheblich erhöht werden [7].

Es wurde zunächst die Grundgesamtheit der Altholzentsorger und ausschliesslichen Altholztransporteure geschätzt (Kap. 2.6.1). Sämtlichen Betriebsstätten konnte eine Adresse zugeordnet und damit ihre räumliche Lage bestimmt werden. Anschliessend wurden Betriebsstätten, welche einzelne Fragen nicht beantwortet oder keinen Fragebogen ausgefüllt hatten, Mengenwerte gemäss Kap. 2.6.2 zugewiesen.

Die Hochrechnung wurde in zwei Schritten durchgeführt:

1. Ermittlung der Grundgesamtheit der Altholzentsorger, der Ausschliesslichen Altholztransporteure und der Gruppe Keine Altholzentsorger/Transporteure (Kap. 2.6.1)
 - a. Gesamtschweizerisch
 - b. Kantonal
2. Ermittlung des Altholzaufkommens in der Schweiz (Kap. 2.6.2)
 - a. Bildung homogener Teilgruppen
 - b. Antwortlücken (einzelne fehlende Werte)
 - c. Antwortausfälle (Betriebsstätten ohne Antwort)

Die kantonale Grundgesamtheit baut auf der gesamtschweizerischen auf. Mit der kantonalen Grundgesamtheit aus Schritt eins wird das Altholzaufkommen ermittelt.

Tabelle 4: Darstellung der Hochrechnung der Betriebsstätten für die ganze Schweiz. Keine Altholzentsorger/-transporteure sind grau Hinterlegt.

Spalte	Rücklaufübersicht Schriftliche Befragung 1 N	Telefonische Befragung			Hochrechnung und Tel. Befr. 5 N	Hoch- rechnung 6 N	
		2	3	4		7	
		N	N	%		Rest- rechnung	Gesamt
		einfache Umfrage	Detail- umfrage	tel. identifiz. Adressen			
Potenzielle Zielgruppe	567	285	164		234		
Altholzentsorger	49		19	23.8%	56	37	105
Ausschliessliche Altholztransporteure	166		61	76.2%	178	117	344
Keine Altholzentsorger/-transporteure	41	13				5	59
stillgelegt	4						4
Adressdoppel	0						0
Nicht zustellbar / nicht erreichbar	15	23				10	48
Sonstiges	7						7
Interesse			84				0
Wollen keine Angaben machen		85					0
Noch offen	285	85	84				
Zusammenfassung							
Altholzentsorger (AE)	49		19			37	105
Ausschliessliche Altholztransporteure	166		61			117	344
Keine Altholzentsorger/-transporteure	67	36	0			15	118
Summe, identifiziert	282	36	80	100.0%	234	169	567

2.6.1 Ermittlung von Altholzentsorgern, Ausschliesslichen Altholztransporteuren, Keinen Altholzentsorgern/-transporteuren

Nachfolgend wird die Grundgesamtheit der Altholzentsorger und der Ausschliesslichen Altholztransporteure geschätzt. Zuerst ermittelte man gesamtschweizerisch die Grundgesamtheit nach Kategorien. Das heisst nach Altholzentsorger, ausschliesslichen Altholztransporteuren und Keine Altholzentsorger/-transporteure (Tabelle 4). Um auch kantonale Aussagen machen zu können, wurden die Altholzentsorger und Ausschliesslichen Altholztransporteure ohne Angaben aufgrund einer Namensprüfung und Internetrecherche sowie der gesamtschweizerischen und kantonalen eindeutigen Antworten den Kantonen zugeteilt (Kap. 2.6.1.2).

2.6.1.1 Ermittlung gesamtschweizerisch

Wie in Kapitel 2 erläutert, ist die Befragung in zwei Erhebungsschritte gegliedert: die schriftliche Befragung und die telefonische. Diese wiederum erfolgte als einfache telefonische Umfrage und als telefonische Detailbefragung. Bei den schriftlichen Antworten lagen keine Antwortausfälle vor. Das gesamtschweizerische

Schätzverfahren zur Ermittlung der Grundgesamtheit jeder Kategorie bezieht sich deshalb nur auf die telefonischen Befragungen.

In *Tabelle 4* (Spalten 1–3) sind die zusammengefassten Ergebnisse der Gesamtbefragung aus *Tabelle 3* dargestellt. Die nachfolgenden Spalten zeigen das Vorgehen zur Schätzung der Grundgesamtheit. Nicht zur Grundgesamtheit gehörende Betriebsstätten der Hochrechnung sind in der Position Keine Altholzentsorger/Transporteure zusammengefasst (*Tabelle 4*, grau hinterlegte Felder). Die unterstrichenen Felder gehen in die Zeilensumme «Gesamt» (Spalte 7) ein. Sie dokumentiert die Einordnung aller Betriebsstätten zu den Rücklaufkategorien. Im unteren Teil der *Tabelle 4* (Zusammenfassung) ist die zusammenfassende Zuordnung Altholzentsorger und Ausschliesslich Altholztransporteure und Keine Altholzentsorger/Transporteure sowie die Gesamtsumme von jedem Arbeits- und Hochrechnungsschritt dokumentiert.

Mit der schriftlichen Befragung konnten 282 Adressen eindeutig zugeordnet werden. Der noch offene Bestand von 285 Adressen wurde anschliessend telefonisch abgeklärt. Bei der einfachen telefonischen Qualifizierung konnten 36 Betriebsstätten als nicht zur Zielgruppe gehörend identifiziert werden. Weitere 85 wollten keinerlei Angaben machen. Nach Abzug dieser 121 Betriebsstätten blieben für die Detailbefragung noch 164 Betriebsstätten übrig. In der telefonischen Detailbefragung konnten von diesen 164 Betriebsstätten 19 Altholzentsorger und 61 Ausschliessliche Altholztransporteure identifiziert und befragt werden. Weitere 84 Betriebsstätten signalisierten zwar Interesse an der Umfrage, gaben jedoch während des Erhebungszeitraums trotz mehrmaliger Anrufe und einem zusätzlichen Versand des Fragebogens per E-Mail keinerlei Auskünfte.

Das Schätzergebnis der einfachen Umfrage bildete die Grundlage für die Hochrechnung der Detailbefragung (*Tabelle 4*). Dies bedeutete, dass 85 Betriebsstätten, welche nach der einfachen telefonischen Umfrage keine Angaben machen wollten und dementsprechend noch offen waren, aufgrund der antwortenden Betriebsstätten der einfachen Umfrage, unter Auslassung der 85 Antwortausfälle, auf die 285 Adressen der telefonischen Befragung übertragen wurden. Das heisst, von den 85 noch offenen Betriebsstätten wurden fünf als Keine Altholzentsorger/-transporteure und zehn als nicht zustellbar/nicht erreichbar eingeteilt. Die verbleibenden 70 gehen als Altholzentsorger, respektive Ausschliessliche Altholztransporteure in die weitere Hochrechnung der Grundgesamtheit ein. Zusammen mit den 164 identifizierten Betriebsstätten der Detailbefragung ergibt sich daraus ein Schätzwert für die hochgerechnete potenzielle Zielgruppe von 234 Betriebsstätten für die Detailbefragung.

Auf die geschätzte potenzielle Zielgruppe von 234 Betriebsstätten wurde anschliessend die Verteilung der Altholzentsorger und Ausschliessliche Altholztransporteure der 80 antwortenden Betriebsstätten der telefonischen Detailbefragung übertragen. Dadurch ergibt sich in der Hochrechnung eine Gesamtanzahl von 56 Altholzentsorgern und 178 Ausschliesslichen Altholztransporteuren. In den 234 potenziellen Betriebsstätten für die Detailbefragung sind auch die 19 Altholzentsorger und 61 Altholztransporteure enthalten, welche in der detaillierten Befragung bereits identifiziert und befragt wurden. Von den insgesamt 169 Adressen ohne Angaben sind somit 37 Altholzentsorger und 117 Ausschliessliche Altholztransporteure. Die restlichen 15 (5+10) wurden - wie im vorherigen Abschnitt beschrieben - der Kategorie Keine Altholzentsorger/-transporteure zugeordnet. Insgesamt errechnete sich damit schweizweit eine Grundgesamtheit von 105 Altholzentsorgern und 344 Ausschliesslichen Altholztransporteuren .

2.6.1.2 Ermittlung der Grundgesamtheit in den Kantonen

In Kapitel 2.6.1.1 wurde die gesamtschweizerische Aufteilung der 169 Betriebsstätten ohne Angaben in Kategorien ermittelt. Aufgrund der Adressdatenbank konnte jede der 169 Betriebsstätten zugeordnet werden. Es stellt sich jedoch die Frage nach der Zuteilung der Kategorien innerhalb der Kantone. Diese Information ist für die spätere kantonsweise Berechnung der Altholzmengen (Kap. 2.6.2) sehr wichtig. Deswegen erfolgte eine Zuweisung der Kategorien in zwei Schritten.

1. Namensprüfung und Internetrecherche
2. Verteilung aufgrund der *eindeutigen Antworten* aus der Befragung

Die beiden Schritte bauen aufeinander auf. Zunächst wurden aufgrund der Namensprüfung und Internetrecherchen eindeutige Altholzentsorger auch als solche zugeordnet. Dabei handelte es sich vornehmlich um Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA). In einem zweiten Schritt wurde allen hochzurechnenden Betriebsstätten die gleiche Verteilung der Kategorien unterstellt, wie sie sich aus den eindeutigen Antworten für die einzelnen Kantone ergaben. Standen aufgrund der Namensprüfung in einem Kanton bereits die notwendigen oder sogar mehr (also «zusätzliche») Altholzentsorger fest, wurden keine weiteren mehr zugeteilt. Da die Grundgesamtheit der Altholzentsorger und Ausschliesslichen Altholztransporteure nicht veränderbar ist, gingen (aufgrund der Namensprüfung) ermittelte «zusätzliche» Altholzentsorger den Altholztransporteuren ab. Es wurde jener *Altholztransporteur* entfernt, der nach oben und unten am wenigsten ins Gewicht fiel.

Schlussendlich ergaben sich aufsummiert über alle Kantone 38 Altholzentsorger und 116 Altholztransporteure. Diese hochzurechnenden Betriebsstätten wurden nach Kapitel 2.6.2.1 homogenen Teilgruppen (Betriebsgrössenklassen) zugeordnet.

2.6.2 Ermittlung des Altholzaufkommens

Für die Ermittlung des Altholzaufkommens wurde angenommen, dass sich die Anzahl einzelner Befragungsschritte der *Altholzentsorger* und der *Ausschliesslichen Altholztransporteure* deutlich unterscheiden. Deswegen wurde das nachfolgend beschriebene Imputationsverfahren zur Ermittlung des Altholzaufkommens für die beiden Gruppen separat durchgeführt. Es waren jeweils drei Schritte notwendig: zuerst Bildung homogener Teilgruppen (Kap. 2.6.2.1, *Tabelle 5*); darauf aufbauend Auffüllen der Antwortlücken (Kap. 2.6.2.2; solche lagen bei Nichtbeantwortung oder fehlerhafter Beantwortung einzelner Fragen vor). Schlussendlich wurden, ebenfalls aufgrund der homogenen Teilgruppen, Antwortausfälle, also Betriebsstätten ohne Angaben, behandelt (Kap. 2.6.2.3). Eine Ausnahme bildeten die Kehrichtverbrennungsanlagen. Ihnen konnte die zusätzliche Information zum Anlagentyp zugeordnet werden. Deswegen wurde ihr Altholzaufkommen separat nach Kapitel 2.6.2.4 berechnet.

2.6.2.1 Bildung homogener Teilgruppen (Betriebsgrössenklassen)

Um die Genauigkeit von Imputationsverfahren zu optimieren, eignet sich die Bildung homogener Teilgruppen [7]. Voraussetzung für diese Vorgehensweise war ein Merkmal, von dem die übrigen Merkmale sehr stark und möglichst konsistent abhängen. Diese Eigenschaft wurde im vorliegenden Fall von der erfassten Altholzmenge abgeleitet. Mit den Angaben der antwortenden Betriebsstätten konnten Betriebsgrössenklassen ermittelt und auf die Betriebsstätten ohne Angaben übertragen werden. Die Betriebsstätten ohne Angaben wurden aufgrund der Verteilung, wie sie sich aus den eindeutigen Antworten in jedem Kanton ergab, zugewiesen (*Tabelle 5*). Folgende Gruppen wurden gebildet:

Tabelle 5: Homogene Teilgruppen (Betriebsgrössenklassen)

Betriebsgrössenklassen (in t Altholz)
kein Altholz
1–499
500–999
1'000–2'499
2'500–4'999
5'000–9'999
10'000–19'999
über–20'000

2.6.2.2 Antwortlücken (Nicht beantwortung einzelner Fragen)

Für einzelne nicht beantwortete Fragen wurde die gleiche Altholzmenge unterstellt, wie sie sich aus den Mittelwerten der eindeutigen Antworten innerhalb der homogenen Teilgruppen (Kap. 2.6.2.1.) ergab. War innerhalb einer Gruppe (Kanton und Betriebsgrößenklasse) keine Antwort vorhanden, wurde der Mittelwert des jeweiligen Kanton eingesetzt.

2.6.2.3 Antwortausfälle

Für Betriebsstätten, welche keine Angaben gemacht hatten, wurden die gleichen Altholzmengen unterstellt, wie sie sich aus den Mittelwerten der eindeutigen Antworten im jeweiligen Kanton und innerhalb der homogenen Teilgruppen (Kap. 2.6.2.1) ergaben. Dabei wollten die Betriebsstätten entweder explizit keine Angaben machen oder zeigten zwar Interesse, konnten jedoch nicht innerhalb der vorgegebenen Frist antworten.

2.6.2.4 Behandlung der Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA)

Aufgrund der Namensprüfung und Internetrecherche konnten alle 29 KVA der Schweiz identifiziert werden. Die eindeutigen Antworten zeigten, dass sie den Altholzentsorgern zugeordnet werden können. Die KVA nutzen ihre Altholzmengen mehrheitlich innerbetrieblich. Nur eine von 11 antwortenden KVA gab an, einen Teil ihres Altholzes weiterzuvertrieben. Das Altholzaufkommen und andere in den KVA erhobene Merkmale variierten deutlich weniger, als bei anderen Altholzentsorgern. Deswegen wurde das Altholzaufkommen der KVA aufgrund der eindeutigen Antworten aller schweizerischen KVA ermittelt.

Demnach wurden die KVA als eigene homogene Gruppe betrachtet und gesamtschweizerisch in die jeweiligen Betriebsgrößenklassen nach Kapitel 2.6.2.1 eingeteilt. Für Betriebsstätten, welche eine Antwortlücke (Kap. 2.6.2.2) aufwiesen oder keine Angaben gemacht hatten (Antwortausfälle, Kap. 2.6.2.3) wurden die gleichen Altholzmengen unterstellt, wie sie sich aus den Mittelwerten der gesamtschweizerisch eindeutigen Antwortenden KVA innerhalb jeder Betriebsgrößenklasse ergaben. Damit Aussagen auf kantonaler Ebene gemacht werden konnten, wurde mit einem Zufallsgenerator [4] für jede Anlage bestimmt, in welche Betriebsgrößenklasse sie fällt.

2.7 Erläuterungen der Auswertungsgrößen

Es wurden verschiedene Verfügbarkeiten der energetischen Nutzung, das theoretische Potenzial (Marktvolumen), das nachhaltige, das bereits genutzte und das zusätzlich nutzbare Potenzial sowie das Handelsvolumen und die von den Betriebsstätten weiter vertriebenen Mengen (Weitertransport) bestimmt. Bei den Potenzialen schliesst jede Ebene verschiedene Restriktionen mit ein.

Das Handelsvolumen (HV, Formel 1) entspricht der Menge, die in den Betriebsstätten 2014 erfasst wurde. Die Menge enthält auch den Intrahandel, also diejenigen Mengen, die innerhalb der Branche gehandelt wurden und damit mehrfach gezählt werden. Das theoretische Potenzial (TP) entspricht dem Marktvolumen (MV, Formeln 2.1 und 2.2). Das Marktvolumen gibt die im Markt maximal verfügbare Menge wieder. Es enthält die innerbetrieblich verwendeten Mengen sowie die Mengen, welche im Ausland an Endverwerter vertrieben werden. Das Marktvolumen enthält also keinen Intrahandel und damit bereits keine Mengen mehr, die innerhalb der Betriebsstätten gehandelt und deswegen mehrfach gezählt werden.

$$\text{Formel 1} \quad HV = \text{Summe eAHM 2014}$$

$$\text{Formel 2.1} \quad MV \text{ oder } TP = ibN + MEI$$

$$\text{Formel 2.2} \quad MV \text{ oder } TPHV = HV - (VaAEAT + MEI)$$

HV	Handelsvolumen
eAHM	Erfasste Altholzmengen
ibN	Innerbetriebliche Nutzung
MEI	Menge an Endverwerter im Ausland

MV	Marktvolumen
TP	Theoretisches Potenzial an Altholz für die energetische Nutzung
VaAEAT	Vertrieb an andere Altholzentsorger oder Altholztransporteure

Das nachhaltige Potenzial (NP, Formel 3) berücksichtigt die kaskadische und damit auch die stoffliche Nutzungsart des Altholzes sowie die sachgerechte Entsorgung von belastetem Altholz im In- und Ausland. Deswegen wurde vom Marktvolumen (MV, TP) die Menge zur Herstellung von Spanplatten sowie die Beseitigung von belastetem Altholz abgezogen. Nicht abgezogen dagegen wurde Altholz, welches man einer anderweitigen Nutzung zuführte. Denn häufig konnten die Betriebsstätten nicht angeben, für welche Zwecke dieses Material verwendet wurde. Nach Mantau et al. (2012) [7] kann vermutet werden, dass dieses Material bis anhin kompostiert wurde. Ob eine Kompostierung des Materials oder eine energetische Nutzung nachhaltiger ist, kann hier nicht abschliessend beurteilt werden. Es handelt sich jedoch um eine sehr kleine Altholzmenge. Ebenso sind die angegebenen Importmengen sehr gering und werden deswegen in der Formel nicht berücksichtigt. Übrig bleibt die bereits energetisch genutzte Menge Altholz im Inland und die aus der Schweiz exportierte Altholzmenge, welche im Ausland energetisch genutzt wird.

$$\text{Formel 3} \quad NP = MV - HS - BbA$$

BbA	Beseitigung von belastetem Altholz (im In- und Ausland)
MV	Marktvolumen, maximal verfügbare Menge oder theoretisches Potenzial (TP)
NP	Nachhaltiges Potenzial
HS	Herstellung von Spanplatten (im In- und Ausland)

Das bereits genutzte Potenzial (BG, Formel 4) entspricht der zur Energieerzeugung inländisch im Jahr 2014 verwendeten Menge Altholz.

$$\text{Formel 4} \quad BG = \text{zur Energieerzeugung inländisch im Jahr 2014 verwendete Menge Altholz}$$

BG	Bereits genutztes Potenzial
----	-----------------------------

Das zusätzlich nutzbare Potenzial (ZP, Formel 5) entspricht der Differenz zwischen dem nachhaltigen und dem bereits genutzten Altholz. Das Potenzial besteht aus Altholz, welches heute hauptsächlich im Ausland für die Energieerzeugung eingesetzt wird.

$$\text{Formel 5} \quad ZP = NP - BG$$

BG	Bereits genutztes Potenzial
NP	Nachhaltiges Potenzial
ZP	Zusätzlich nutzbares Potenzial

Der Weitertransport (WT, Formel 6) entspricht der von den Betriebsstätten weiter vertriebenen Menge Altholz. Diese Menge entspricht auch jener Menge, welche nicht innerbetrieblich genutzt, sondern an andere Altholzentsorger, -sampler, -aufbereiter oder -transporteure weiter vertrieben wird.

$$\text{Formel 6} \quad WT = A$$

A	Von den Betriebsstätten an <i>andere Altholzentsorger oder -transporteure</i> weiter vertriebene Altholzmengen
WT	Weitertransport

2.8 Umrechnung von Gewicht in Energieinhalt

Der Primärenergieinhalt wurde mit einem Heizwert für Nadelholz von 4.02 kWh/kg und Laubholz von 3.86 kWh/kg [10] berechnet. Dieser Heizwert bezieht sich auf lufttrockenes Holz (Wassergehalt 20%). Da deutlich mehr Nadelholz als Bauholz verwendet wird, gilt die Annahme eines Nadel- zu Laubholzanteils von 80 zu 20%. Der Umrechnungsfaktor von Joule in kWh beträgt gemäss BFE 2006 [11], $3.6 \cdot 10^6$.

$$\text{Formel 7}$$

$$\begin{aligned} \text{Energiemenge in J} &= \{\text{Menge Altholz [in kg]} * \text{Energieinhalt (4.02 [kWh/kg])} * \text{Anteil Nadelholz (0.8)} \\ &\quad + \text{Menge Altholz [in kg]} * \text{Energieinhalt (3.86 [kWh/kg])} * \text{Anteil Laubholz (0.2)}\} \\ &\quad * \text{Umrechnungsfaktor kWh in Joule } [3.6 \cdot 10^6]. \end{aligned}$$

3 Resultate

In der vorliegenden Studie beziehen sich alle Gewichtsangaben auf das Gewicht bei der Erfassung. Für weitere Berechnungen (z.B. Energieinhalt) wird von lufttrockenem Altholz ausgegangen.

3.1 Schweiz

In *Tabelle 6* sind die Ergebnisse der eindeutigen Antworten aus der Befragung (Kap. 2.5) und der Hochrechnung (Kap. 2.6) dargestellt. Es wird unterschieden zwischen den Untersuchungsschritten (schriftlich, telefonisch und zugeschätzte Menge) und den drei Kategorien, Altholzensorger, Ausschliesslicher Altholztransporteur und Kein Altholzensorger/Altholztransporteur. Die Zeile Gesamtmenge Schweiz zeigt die auf die Zielgruppe hochgerechneten Mengen.

Gesamthaft kann von einer verfügbaren Altholzmenge (Marktvolumen oder theoretisches Potenzial, TP) von 0.998 Mio. Tonnen ausgegangen werden. Das entspricht 14.3 PJ Primärenergie. Davon sind 32% geschätzt (d.h. 0.324 Mio. Tonnen oder 4.6 PJ). Das Handelsvolumen (1.018 Mio. Tonnen) entspricht nicht der verfügbaren Menge. Denn es enthält auch Altholz, welches gehandelt und deswegen mehrmals erfasst wird.

Das nachhaltige Potenzial beläuft sich auf 0.817 Mio. Tonnen Altholz (11.7 PJ). Davon sind 32.5% geschätzt oder 0.266 Mio. Tonnen (3.8 PJ). Die Menge besteht aus dem bereits innerbetrieblich energetisch genutzten Material und dem Energieholz, welches an Endverwerter im Ausland vertrieben wird. Nicht enthalten ist Altholz zur Herstellung von Spanplatten und belastetes Material, welches speziell entsorgt werden muss. Die Differenz zum theoretischen Potenzial beträgt 0.181 Mio. Tonnen Altholz und wird mit fast 0.160 Mio. Tonnen hauptsächlich im Ausland zur Herstellung von Spanplatten genutzt.

Bereits genutztes Potenzial: In der Schweiz werden innerbetrieblich insgesamt 0.669 Mio. Tonnen Altholz verwendet. Davon wird der grösste Teil energetisch zur Energieerzeugung (0.644 Mio. Tonnen oder 9.2 PJ) und wesentlich geringere Mengen für die Produktion von Spanplatten (0.021 Mio. Tonnen) genutzt. Der Rest wird für andere Zwecke verwendet (z.B. Kompostierung) und ein ganz kleiner Teil auf Deponien beseitigt. Der Weitertransport (WT) beläuft sich auf 0.814 Mio. Tonnen Altholz (*Tabelle 7*).

Das zusätzlich nutzbare Potenzial für die Energienutzung beträgt 0.174 Mio. Tonnen (2.5 PJ). Der geschätzte Anteil beläuft sich auf 38% oder 0.066 Mio. Tonnen (0.95 PJ). Es handelt sich um Altholz, welches heute hauptsächlich im Ausland für die Energieerzeugung eingesetzt wird.

Tabelle 6: Altholz für die energetische Nutzung in der Schweiz.

Gegenüberstellung der gesamtschweizerisch eindeutigen Antworten aus der Befragung (Bezugsjahr 2014) und den geschätzten Mengen.

Untersuchungsschritt		Anzahl Betriebs-stätten	Handels-volumen	Markt-volumen/ Techn. Potenzial	Nach-haltiges Potenzial	Bereits genutztes Potenzial	Zusätzlich nutzbares Potenzial
			Mio. t	Mio. t	Mio. t	Mio. t	Mio. t
Schriftlich erfasst	Altholzensorger	49	0.307	0.301	0.278	0.275	0.003
	Altholztransport.	166	0.412	0.148	0.062	0	0.062
Telefonisch erfasst	Altholzensorger	19	0.190	0.186	0.180	0.169	0.011
	Altholztransport.	61	0.109	0.039	0.032	0	0.032
Geschätzte Menge	Altholzensorger	38(KT)	0.230	0.229	0.211	0.200	0.011
	Altholztransport.	116(KT)	0.236	0.095	0.055	0	0.055
Kein Altholzensorger und Altholztransporteur		118	-	-	-	-	-
Gesamtmenge Schweiz		567	1.484	0.998	0.817	0.644	0.174
Primärenergiemenge		-	-	14.3 PJ	11.7 PJ	9.2 PJ	2.5 PJ
% -Anteil geschätzte Menge	Altholzensorger	6.5%	15.5%	22.9%	25.8%	31%	6.3%
	Altholztransport.	20.6%	15.9%	9.5%	6.7%	0%	31.6%

3.2 Kantone

Tabelle 7 und Abbildung 2 geben einen Überblick zu den Auswertungsgrössen auf Kantonsebene in Tonnen Altholz und Primärenergieinhalt (PJ).

Betrachtet man die absoluten Mengen in den Kantonen, befindet sich das grösste energetisch nutzbare Altholzpotenzial (MV, TP) im Kanton Bern. Wobei heute der grösste Teil bereits lokal energetisch verwertet wird. Auch das nachhaltige Potenzial für die Energieerzeugung ist hier gross und beläuft sich auf 0.180 Mio. Tonnen. Dementsprechend werden im Kanton Bern nur geringe Mengen ins Ausland exportiert und dort energetisch oder für die Herstellung von Spanplatten genutzt. Ebenfalls grosse theoretisch und nachhaltig verfügbare Mengen befinden sich in den Kantonen Zürich, St. Gallen, Luzern und Solothurn. Diese Kantone nutzen jedoch deutlich kleinere Anteile selber energetisch. Es werden grössere Mengenanteile exportiert und anschliessend im Ausland zur Energieproduktion oder zur Herstellung von Spanplatten eingesetzt.

In der Innerschweiz (NW, OW, SZ, UR, ZG), in den beiden Appenzell (AR, AI) und im Jura (JU) waren die theoretisch und nachhaltig verfügbaren Mengen, sowie das bereits genutzte Potenzial am kleinsten (*Abbildung 3*). Der Weitertransport war in diesen Kantonen meist vergleichsweise gross. Das könnte darauf hinweisen, dass neben den ausgewiesenen Auslandsexporten auch ein Transport in umliegende Kantone stattfindet. Flächenmässig sind dies kleine Kantone mit geringer Bevölkerungsdichte und kleinen Ballungszentren sowie Industriegebieten. Bei letzteren handelt es sich um Faktoren, welche auch die «Ländlichkeit» bestimmen und deswegen gemäss Nigg et al. (2012) [9] einen deutlichen Einfluss auf die Altholzmengen haben können. Verteilt man die theoretisch verfügbare Altholzmenge jedes Kantons gleichmässig auf seine Einwohner (*Abbildung 4*), so variiert die Altholzmenge pro Einwohner zwischen wenigen Kilogramm in den Kantonen Appenzell Innerrhoden/Ausserrhoden, Zug, Uri, Freiburg, Genf, Neuenburg, Schwyz und Tessin und ca. 300 kg in den Kantonen Solothurn, St. Gallen und Graubünden. Die sehr grossen absolut verfügbaren Altholzmengen (vgl. erster Teil des Abschnitts) der Kantone Bern, Zürich und Luzern (*Abbildung 3*) schrumpft bei dieser relativen Betrachtung deutlich. Beispielsweise entspricht die theoretisch verfügbare Altholzmenge im Kanton Zürich noch ungefähr dem gesamtschweizerischen Durchschnittswert von 122 kg¹ pro Einwohner.

¹Berechnungsgang: *Altholzmenge pro Einwohner* = $\frac{TP \text{ der Schweiz}}{\text{Einwohnerzahl der Schweiz}} = \frac{0.998 \text{ Mio t}}{8.2 \text{ Mio Einwohner}}$. Die 0.998 Mio. Tonnen entsprechen dem Marktvolumen oder dem theoretischen Potenzial (TP). Die Einwohnerzahl von 8.2 Mio. wurde dem BFS (2014), Datensatz «Ständige Wohnbevölkerung nach Geschlecht, Staatsangehörigkeitskategorie und Kanton am 31.12.2014», entnommen.

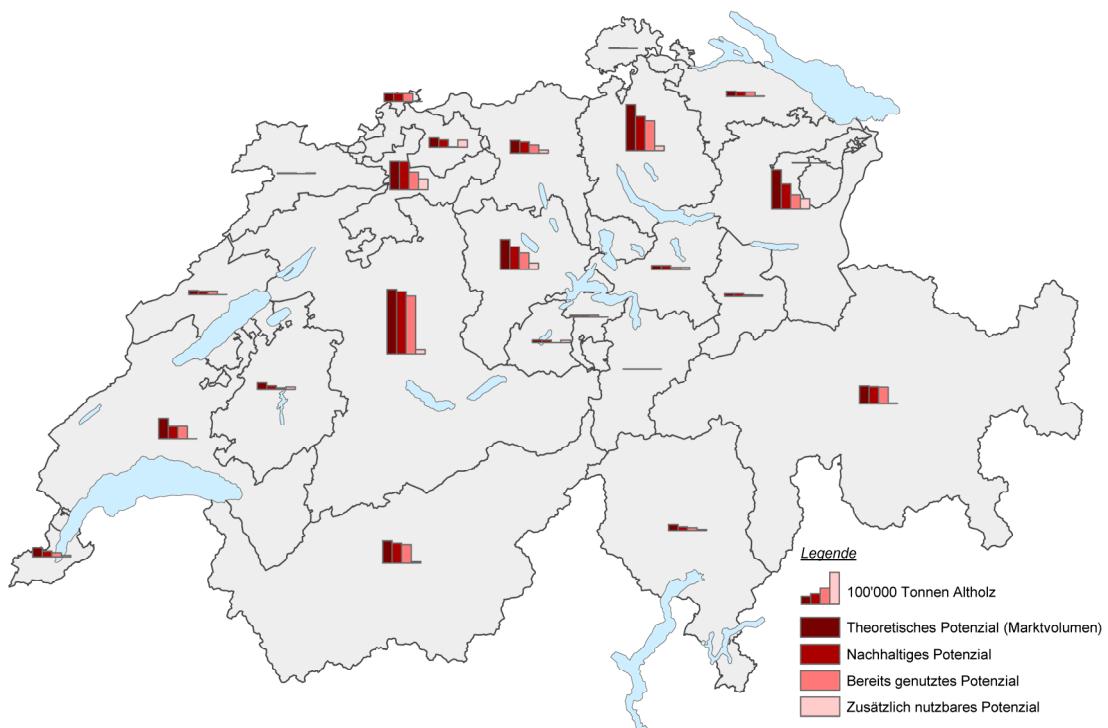


Abbildung 2: Energieholzpotenziale aus Altholz in der Schweiz.

Tabelle 7: Altholzpotenziale für die energetische Nutzung nach Kantonen (in t Altholz und Primärenergie in PJ). Angegeben ist auch der Weitertransport an andere Altholzensorger und Transporteure.

KT	Handelsvolumen	Marktvolumen, Theoretisches Potenzial		Nachhaltiges Potenzial		Bereits genutztes Potenzial		Zusätzlich nutzbares Potenzial		Weiter Transport
		t	t	PJ	t	PJ	t	PJ	t	
AG	83'653	37'298	0.54	32'513	0.47	23'421	0.34	9'092	0.13	60'232
AI	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
AR	1'019	613	0.01	613	0.01	0	0.00	613	0.01	1'019
BE	302'613	189'657	2.72	183'020	2.63	170'339	2.45	12'681	0.18	132'265
BL	57'896	27'939	0.40	21'717	0.31	1'040	0.01	20'677	0.30	55'394
BS	27'493	23'846	0.34	23'846	0.34	23'846	0.34	0	0.00	3'647
FR	37'954	19'603	0.28	10'640	0.15	3'956	0.06	6'684	0.10	33'998
GE	54'271	25'929	0.37	16'020	0.23	11'846	0.17	4'214	0.06	32'556
GL	13'652	7'380	0.11	7'380	0.11	3'956	0.06	3'424	0.05	9'696
GR	61'755	51'890	0.74	49'592	0.71	48'198	0.69	1'394	0.02	13'556
JU	2'893	1'650	0.02	1'650	0.02	0	0.00	1'650	0.02	2'893
LU	172'335	87'638	1.26	66'066	0.95	48'084	0.69	17'982	0.26	124'251
NE	16'835	11'882	0.17	9'867	0.14	9'867	0.14	0	0.00	6'968
NW	4'990	4'984	0.07	4'984	0.07	4'984	0.07	0	0.00	6
OW	14'039	7'723	0.11	7'023	0.10	0	0.00	7'023	0.10	14'039
SG	127'630	113'003	1.62	71'738	1.03	41'217	0.59	30'521	0.44	80'422
SH	4'804	2'511	0.04	356	0.01	356	0.01	0	0.00	4'448
SO	84'546	82'125	1.18	81'423	1.17	50'709	0.73	30'714	0.44	33'537
SZ	18'192	11'271	0.16	11'271	0.16	5'664	0.08	5'606	0.08	12'528
TG	24'509	14'576	0.21	12'664	0.18	12'186	0.17	478	0.01	12'321
TI	43'435	17'004	0.24	10'685	0.15	8'202	0.12	2'483	0.04	35'233
UR	1'970	50	0.00	50	0.00	50	0.00	0	0.00	1'920
VD	75'794	59'998	0.86	36'360	0.52	36'343	0.52	18	0.00	35'368
VS	68'729	63'314	0.91	56'276	0.81	52'090	0.75	4'187	0.06	16'612
ZG	2'511	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2'511
ZH	180'000	136'045	1.95	101'303	1.45	87'698	1.26	13'605	0.20	88'404
CH	1'484'000	998'000	14.3	817'000	11.7	644'000	9.2	173'000	2.5	814'000

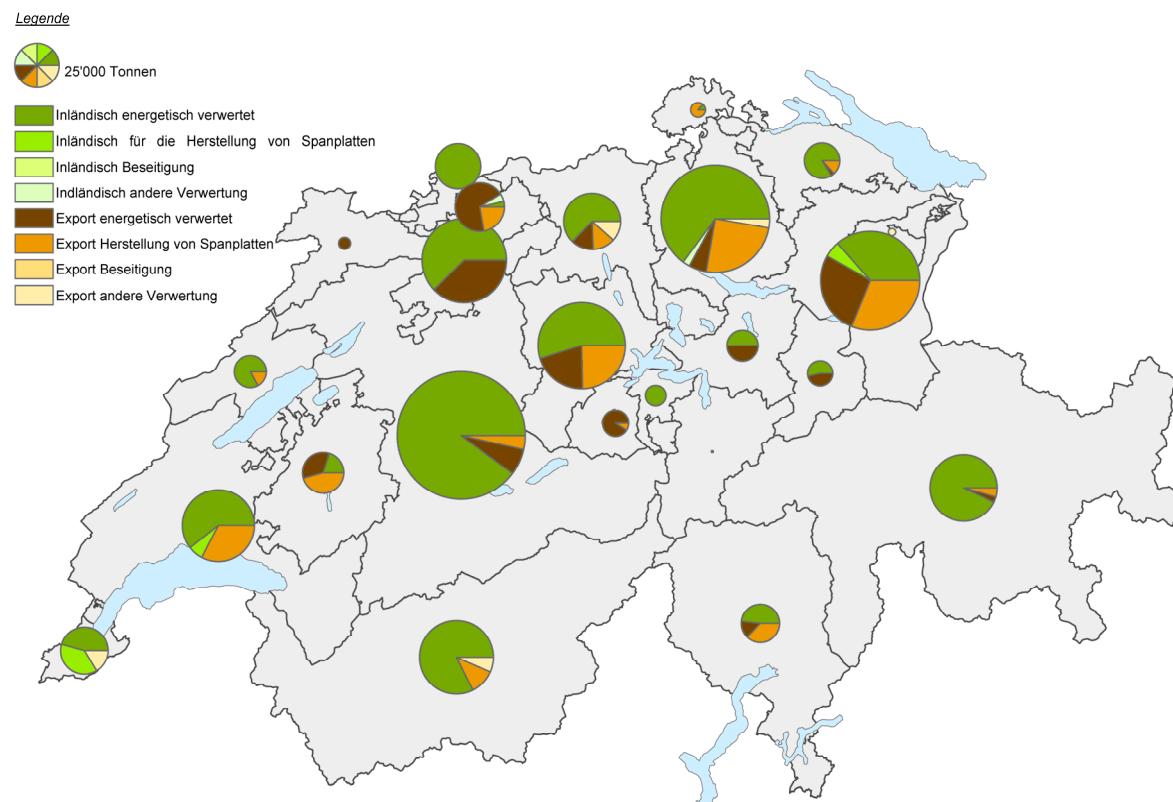


Abbildung 3: Räumliche Verteilung des Marktvolumentes beziehungsweise des Theoretischen Potenzials und seine Verwertung 2014.

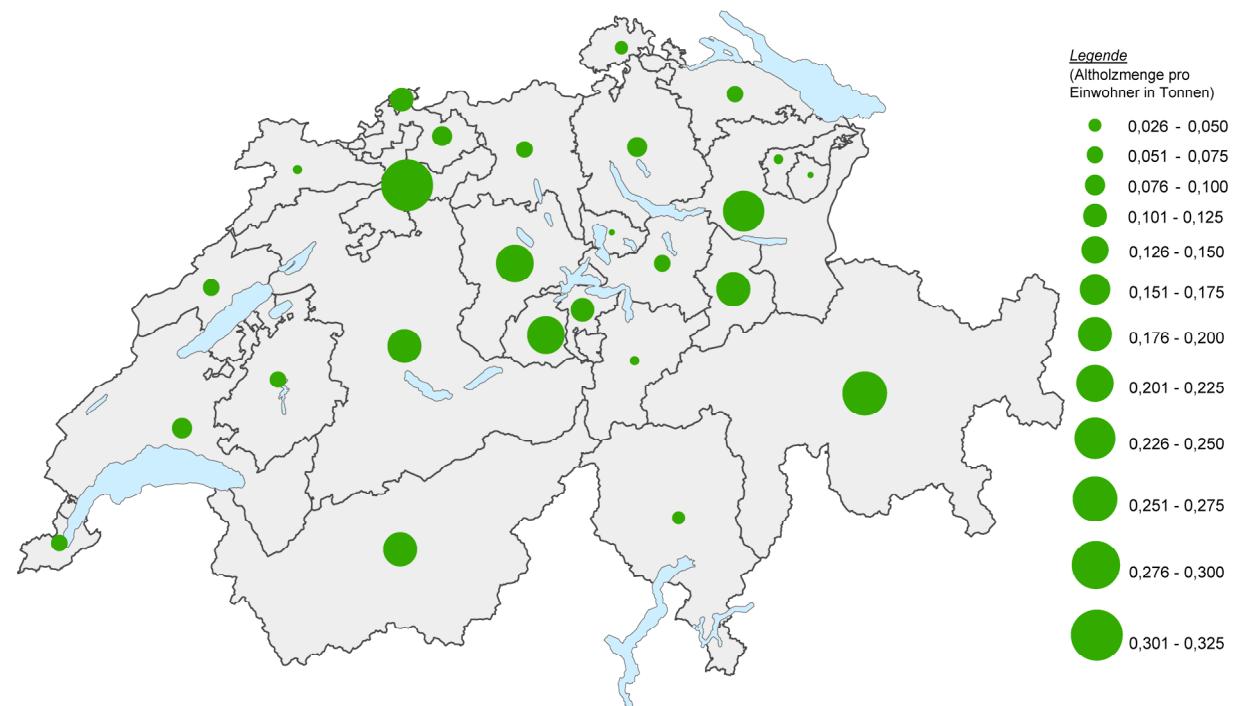


Abbildung 4: Räumliche Verteilung des Marktvolumentes beziehungsweise Theoretischen Potenzials pro Einwohner 2014 (Mittelwert über die Schweiz ca. 0.122t Altholz / Person).

4 Diskussion und Folgerungen

4.1 Vergleich mit anderen Studien

Für das Jahr 1990 weisen Taverna et al. (2010) [11] für die Schweiz eine Altholzmenge von 0.8 Mio. Tonnen, für das Jahr 2010 1.0 Mio. Tonnen Altholz aus. Das Potenzial von 2010 entspricht dem in der vorliegenden Studie ausgewiesenen Marktvolumen oder theoretischen Potenzial für das Jahr 2014 von 0.998 Mio. Tonnen. In 2020 rechnen Taverna et al. (2010) [11] mit einer Menge von 1.1 Mio. Tonnen Altholz. Lehner et al. 2014 [6] weisen gesamtschweizerische Werte zum Altholzaufkommen für das Jahr 2011 aus. Um einen übersichtlichen Vergleich mit der vorliegenden Studie machen zu können, wurden hier alle Werte gemäss Fussnote 2 von Volumen in Gewicht (Mio. Tonnen) umgerechnet. Demnach schätzen Lehner et al. (2014) [6] das Altholzaufkommen 2011 auf 1.015² Mio. Tonnen Altholz. Diese Menge kann als Marktvolumen oder theoretisches Potenzial betrachtet werden. Eine Übersicht zu den energetisch verfügbaren Potenzialen in der Schweiz gibt *Tabelle 8*. Die neuen Ergebnisse der WSL-Vollerhebung bestätigten die vorhandenen Schätzungen des theoretischen Potenzials in der Vergangenheit. Der Vorteil der WSL-Ergebnisse liegt darin, dass aktuelle, räumlich differenzierte Ergebnisse vorliegen. Zudem konnte über das theoretische Potenzial hinaus auch erstmals das Handelsvolumen sowie das nachhaltige, das bereits genutzte und das zusätzlich nutzbare Potenzial in der Schweiz für eine energetische Nutzung beziffert werden.

Ein Vergleich mit Deutschland ist aufgrund der unterschiedlichen Definitionen schwierig (Kap. 2.2). Rechnet man in der Schweiz für Restholz rund 0.45 Mio. Tonnen³ und bedenkt, dass die Einwohnerzahl von Deutschland fast zehnmal grösser ist (81 Mio. [3]), zeigt sich, dass das Marktvolumen pro Einwohner hierzulande gut doppelt so hoch ist⁴. Denn gemäss Mantau et al. [7] beträgt das Marktvolumen in Deutschland 6.3 Mio. Tonnen. Für die Schweiz kann in der vorliegenden Studie für 2014 ein durchschnittliches Altholzaufkommen pro Einwohner von ca. 120 Kilogramm festgestellt werden. Für Deutschland geben Mantau et al. (2012) [7] und Kaltschmitt et al. (2009) [5], rund 80 beziehungsweise 95 Kilogramm pro Einwohner an. Aufgrund unterschiedlicher Definitionen müsste in Deutschland gemäss AltholzV 2002 [1] auch Industrierestholz inbegriffen sein (Kap. 2.2). Umso erstaunlicher ist, dass die Werte trotzdem tiefer sind als in der Schweiz. Ursachen für sonstige Differenzen könnten verschiedene Untersuchungszeitpunkte, Unterschiede in der Bautätigkeit und im Konsumentenverhalten liegen.

² Umrechnungsfaktor m³ in Tonnen nach BAFU 2015: 1/1.85= 0.54.

³ Aufgrund der Ergebnisse des Teilberichts Restholz, kann von etwa 0.9 bis 1.2 Mio. m³. Restholz in der Schweiz ausgegangen werden. Umrechnung von Volumen in Gewicht: Annahmen: 1. Nadelholz/Laubholz, 1/20 (Berechnet gemäss BFS 2013 basierend der Vollerhebung 2012, Tabelle 11.4, Restholzproduktion der Sägereien), 2. Gewicht Nadelholz 0.44 t/m³, Gewicht Laubholz 0.63 t/m³. Berechnungsgang: (1 Mio. m³)*(19/20)*Gewicht Nadelholz+ (1 Mio. m³)*(1/20)*Gewicht Laubholz = 1*0.95*0.44+1*0.05*0.63 =0.45 Mio. Tonnen.

⁴ Berechnungsgang: ((Marktvolumen Altholz + Restholz (bereits genutztes Potenzial))/Einwohner Schweiz)/(Altholz Deutschland/Einwohner Deutschland) = ((1 Mio. t + 0.45³ Mio. t) / 8.2 Mio. Einwohner)/((6.3 Mio. Tonnen / 81 Mio. Einwohner)= 2.5

Tabelle 8: Umgesetzte Menge (Handelsvolumen) und Verfügbarkeit von Altholz für die energetische Nutzung in der Schweiz. Verschiedene Studien im Vergleich.

Angaben in Mio. Tonnen Altholz	Handels- volumen	Theoretisches Potenzial (TP), Marktvolumen	Nachhaltiges Potenzial (NP)	Bereits genutztes Potenzial (BG)	Zusätzlich nutzbares Potenzial (ZP)
Taverna <i>et al.</i> (2010) [11] Werte 2010 bis 2020	-	1.000-1.100	-	-	-
Lehner <i>et al.</i> (2014) [6] Werte 2011	-	1.015 ²	-	0.442 ² stofflich und energetisch eingesetzt	-
WSL Werte 2014	1.484	0.998	0.817	0.644	0.174

4.2 Folgerungen

Aufkommen und Verfügbarkeit von Altholz für die energetische Nutzung relevant

Die gesamte Altholzmenge (Marktvolumen, theoretisches Potenzial für die energetische Nutzung) betrug 2014 knapp eine Million Tonnen beziehungsweise 14.3 PJ. Das zusätzlich nutzbare Potenzial des Altholzes beträgt 2.5 PJ und entspricht damit einem Fünftel des gesamten zusätzlich für die energetische Nutzung verfügbaren Holzpotenzials. Zudem trug Altholz 2014 zu einem Viertel (9.2 PJ) zur Energieproduktion aus verholzter Biomasse bei (*Tabelle 6*).

Das grösste theoretische (Marktvolumen) und das grösste nachhaltige Potenzial für die energetische Nutzung ergaben sich im Kanton Bern. Davon wurden jedoch bereits grosse Mengen lokal genutzt. Zusätzlich nutzbare Mengen ergaben sich hauptsächlich in den Kantonen St. Gallen, Solothurn, Luzern, Basel-Land und Zürich.

Kaum kaskadische Nutzung

Die energetische Nutzung von Altholz ist zwar grundsätzlich erfreulich, jedoch ist vor einer energetischen Verwertung aus Gründen des Klimaschutzes zusätzlich eine oder mehrere stoffliche Nutzungen anzustreben [2]. Diese kaskadische Nutzung findet heute in der Schweiz praktisch nicht statt. Im Inland wurde 2014 das meiste Altholz (99%) direkt einer energetischen Nutzung zugeführt und nur gut 1% stofflich genutzt. Der hohe Anteil von energetisch verwertetem Altholz ist wahrscheinlich zu einem Teil auf die «Kostendeckende Einspeisevergütung» (KEV)⁵ zurückzuführen, welche die energetische Verwertung fördert. Das führt dazu, dass die für eine optimale Nutzung angestrebte kaskadische Nutzung des Altholzes gemäss BAFU, BFE, SECO (2014) [2] praktisch nicht stattfindet. Deshalb sollten konkrete Rahmenbedingungen für eine nochmalige stoffliche Nutzung geschaffen werden.

⁵ Die KEV (Kostendeckende Einspeisevergütung) ist ein Instrument des Bundes, welches zur Förderung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird. Insbesondere gehören dazu auch Biomasse und Abfälle aus Biomasse. Sie deckt die Differenz zwischen Produktionskosten und Marktpreis und garantiert damit einen Preis, welcher den Produktionskosten entspricht.

Hoher Exportanteil

Fast ein Drittel des Altholzes (0.320 Mio. Tonnen) wurde 2014 exportiert und im Ausland zur einen Hälfte stofflich, zur anderen Hälfte energetisch genutzt. Das entspricht rund 88% des gesamten stofflich genutzten und einem Viertel des energetisch genutzten Schweizer Altholzes. Viele der Befragten würden das exportierte Altholz gerne in der Schweiz nutzen und sehen darin eine grosse Chance. Aufgrund der heutigen Situation sind sie jedoch gezwungen, das Altholz in den Export zu geben. Denn eine Entsorgung in der Schweiz sei zu teuer und es fehle an Abnehmern, weil Biomasse(heiz)kraftwerke teilweise nicht für die Nutzung des Altholzes ausgelegt sind. Sie verfügen gemäss den Befragten beispielsweise über zu tiefe Temperaturen für eine Verbrennung oder sind nicht mit den notwendigen Filteranlagen ausgestattet. Zudem ist die Nachfrage im Ausland gefestigt und hat eine gewisse Kontinuität. Für die italienischen Transporteure bedeutet der schweizerische Altholzexport eine gute Auslastung durch Rückfuhren. Angestrebt wird eine inländische oder lokale Nutzung des Altholzes [11]. Dabei könnten Transportkosten und klimaschädliche Abgase reduziert werden und die Wertschöpfung lokal stattfinden.

Ungenauigkeiten

Die vorliegende Studie enthält verschiedene Unsicherheiten, die sich nicht quantifizieren lassen. So füllten die Befragten den Fragebogen selber aus, die Richtigkeit dieser Angaben konnte allerdings nur in Extremsfällen (deutlich abweichende Werte, Ausreisser) überprüft werden. Dazu wurden Vollzeitäquivalente sowie die Internetseite des Unternehmens überprüft und gegebenenfalls bei der Betriebsstätte direkt nachgefragt, ob die Angaben korrekt waren. Teilweise konnten nur Schätzwerte für das Jahr 2014 angegeben werden. Zudem ist es möglich, dass einzelne Betriebsstätten nicht in Adressverzeichnissen, bei Ämtern oder im Internet gefunden wurden. Demzufolge konnten sie nicht befragt werden. Angaben von nicht antwortenden Betriebsstätten wurden mittels Imputationsverfahren (Kap. 2.6) ermittelt. Zudem nutzen Privathaushalte gebrauchtes Holz. Auch sie konnten nicht befragt werden. Die Hochrechnung wurde kantonal durchgeführt. Jedoch gehen viele Handelsbewegungen über kantonale Grenzen hinaus. Die Verlässlichkeit der vorliegenden Resultate könnte noch verbessert werden, indem Teilgebiete betrachtet und die Resultate geprüft werden. Je weniger Werte in den Kantonen vorhanden waren, desto unsicherer sind auch die Abschätzungen. Es gilt die Annahme, dass die nicht antwortenden Betriebsstätten die gleiche Verteilung der Mengen zeigen, wie die antwortenden.

Offene Fragen, weiterer Forschungsbedarf

Die Ressource Altholz ist heute bereits knapp. Deswegen erscheint es sinnvoll, auch die zusätzlich nutzbaren Potenziale voll auszuschöpfen. Interessant wäre es, festzustellen, wie sich eine Mobilisierung dieses Potenzials (energetisch genutztes Altholz im Export) realisieren liesse.

Da die kaskadische Nutzung des Altholzes aus Gründen der CO₂-Reduktion und der Wertschöpfung sinnvoll und wünschenswert ist, aber in der Schweiz kaum stattfindet, sollten die Möglichkeiten ihrer technischen und ökonomischen Umsetzung besser untersucht werden. Um bessere Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Altholzmengen machen zu können, müssten weitere Mengenabschätzungen und Analysen der Einflussfaktoren in den kommenden Jahren durchgeführt werden.

5 Anhang

5.1 Fragebogen zu Altholzaufkommen und -vertrieb in der Schweiz

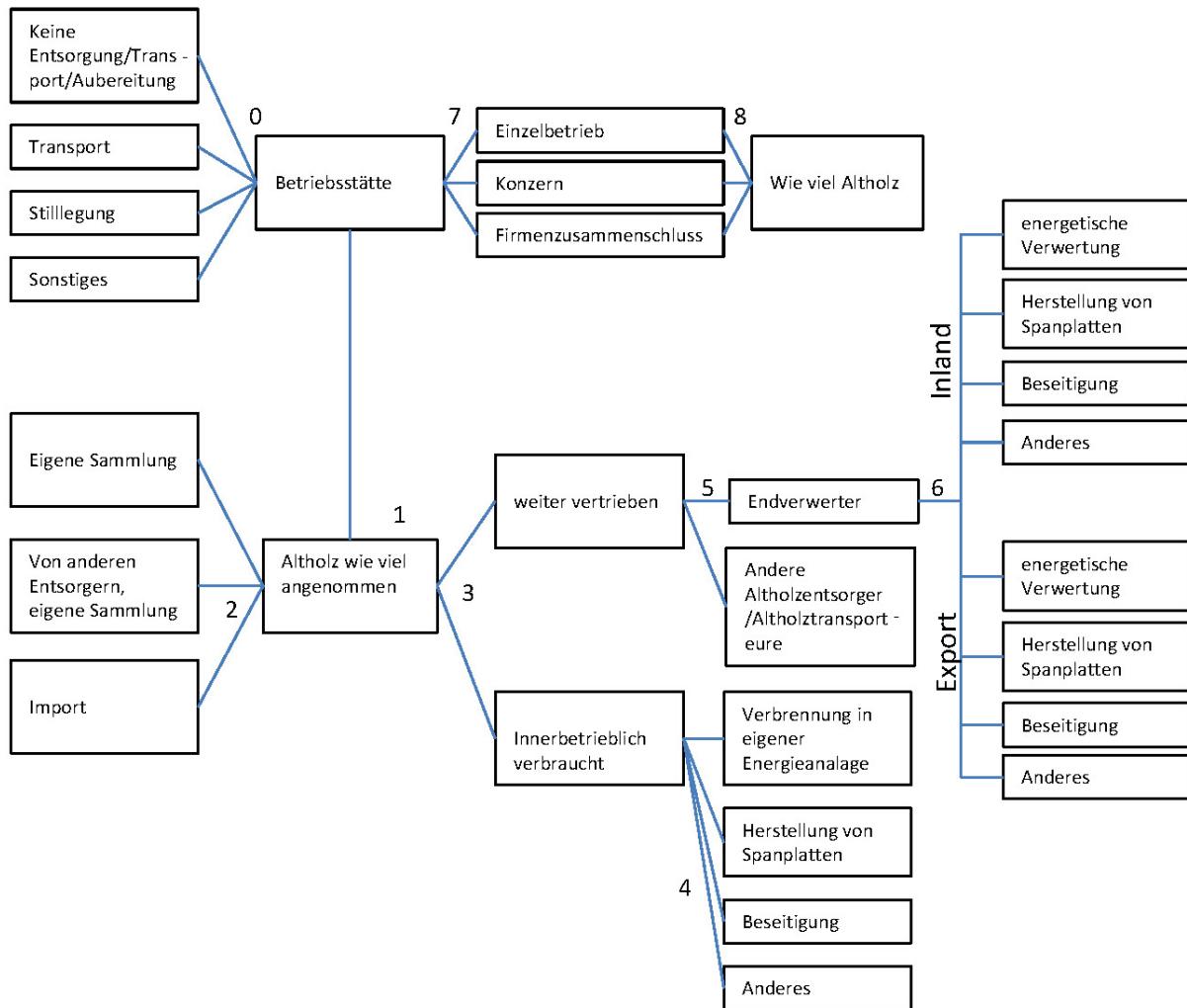


Abbildung 5: Aufbau des Fragebogens. Die Nummern zeigen die Fragen des Fragebogens, die Kästchen die Antwortmöglichkeiten.

Tabelle 9: Fragebogen zu Altholzaufkommen und -vertrieb in der Schweiz

Adresse	«Bezeichnung» «Strasse» «PLZ» «Ort»	3. Wie verfahren Sie mit dem in diesem Betrieb anfallenden Altholz?	5. Wenn Sie Altholz weiter vertrieben, wie viel von dieser Menge (3a) liefern Sie an
0/1	0	a. Es wird weiter vertrieben (verarbeitet oder unverarbeitet) 10/ _____ %	a. Endverbeiter/Endnutzer 16/ _____ %
0/2	0	b. Es handelt sich um eine im Betrieb umgesetzte Menge zur Produktion von Energie, Spanplatten, zur Beseitigung oder Anderes 11/ _____ %	b. Andere Altholzaufbereiter (Sammler/Sortierer) 17/ _____ % 100%
Bitte korrigieren sie ggf. Ihre Adresse. Bei Interesse an der Studie, teilen Sie uns bitte Ihre e-Mail-Adresse mit:			
Machen Sie die folgenden Angaben bitte nur zum im Adressfeld oben angegebenen Betrieb. Falls Sie den Fragebogen nicht beantworten können, kreuzen Sie bitte an, warum (Bitte auch dann in jedem Fall zurücksenden):			
1.	Wie viel Altholz haben Sie 2014 in diesem Betrieb angenommen/erfasst? Im Jahr 2014: <u>1/</u> Tonnen Altholz, davon Nadelholz <u>2/</u> %	6.	An welche Endverarbeiter wird das Altholz von Ihnen weiter vertrieben (Menge aus 5a)?
0/4	0	Im Inland zur: Herstellung von Spanplatten Energetischen Verwertung Beseitigung Anderes: Export zur: Herstellung von Spanplatten Energetischen Verwertung Beseitigung Anderes:	26/ 0 Einzelbetrieb 27/ 0 Konzern/Unternehmensgruppe (rechtlich selbstständig) zugehörig Name: Firmenzusammenschlusses (rechtlich nicht selbstständig) Name:
0/3	0	Anteil Klasse A1 (naturbelassenes Holz)	22/ _____ %
0/4	0	Anteil Klasse A2 (verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes Altholz)	23/ _____ %
1.			
2.			
2. Aus welchen Quellen stammt das im Jahr 2014 in diesem Betrieb angenommene Altholz?			
4. Wie teilt sich die Altholzmenge aus 3b auf?			
Eigene Sammlung <u>7/</u> % (vom Abfallerzeuger, inkl. eigene Produktion) Von anderen Entsorgungsbetrieben <u>8/</u> % (auch von Betriebsstätten des eigenen Unternehmens) Import <u>9/</u> % <u>100%</u>			
5. Ist Ihr Betrieb ein Einzelunternehmen oder einem Konzern zugehörig?			
Im Jahr 2014: <u>29/</u> Tonnen Altholz			
6.			
7.			
7. Ist Ihr Betrieb ein Einzelunternehmen oder einem Konzern zugehörig?			
Im Jahr 2014: <u>29/</u> Tonnen Altholz			
8.			
9.			
9. Für eine Tonne Altholz erhielten wir 2014 durchschnittlich (Antwort freiwillig)			
für die Klasse A1 (naturbelassenes Holz) für die Klasse A2 (verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes Altholz) für die Klasse A3 (Altholz mit halogenorganischen Verbindungen z.B. PVC beschichtet) für die Klasse A4 (Behandeltes Altholz) 30/ _____ CHF/t 31/ _____ CHF/t 32/ _____ CHF/t 33/ _____ CHF/t 100%			
10.			

Zusätzlich wurde noch ein Feld für allgemeine **Bemerkungen zur Verfügung gestellt. Aus Platzgründen wird dieses hier nicht gezeigt.**

6 Literatur

- [1] AltholzV, Altholzverordnung, 2002: Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz, 16 S.
- [2] BAFU, Bundesamt für Umwelt, BFE, Bundesamt für Energie; SECO, Staatssekretariat für Wirtschaft, 2014: Ressourcenpolitik Holz, Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz, Bern, 36 S.
- [3] DEStatis, Statistisches Bundesamt, 2015: Ergebnisse der Bevölkerungsfortschreibung auf Grundlage des Zensus 2011.
- [4] Erni, M., Thees, O., Lemm, R., 2017: Altholzpotenziale in der Schweiz für die energetische Nutzung., WSL Bericht, 69 S.
- [5] Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. , 2009: Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 1030 S.
- [6] Lehner, L., Kinnunen, U., Weidner, J., Lehner, J., Pauli, B., Menk, J., et al., 2014: Branchenanalyse, Analyse und Synthese der Wertschöpfungskette (WSK) Wald und Holz in der Schweiz, 345 S.
- [7] Mantau, U., Weimar, H., Kloock, T., 2012: Standorte der Holzwirtschaft, Holzrohstoffmonitoring, Altholz im Entsorgungsmarkt, Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010, 30 S.
- [8] Murer, R., 2015: Entsorgen um zu Versorgen, In: 8. Tagung Holzenergie, Berner Fachhochschule, Die Fachveranstaltung zu aktuellen Themen effizienter Holzenergiegewinnung aus Unternehmenssicht, Biel, 11.02.2015, S. 151-160.
- [9] Nigg, H., Hofer, P., Taverna, R. , 2012: Energieholzpotenzial AR + AI, Schlussbericht, 65 S.
- [10] Schnell, R., Hill, P., Esser, E., 2005: Methoden der Empirischen Sozialforschung, 589 S.
- [11] Taverna, R., Meister, R., Hächler, K. , 2010: Abschätzung des Altholzaufkommens und des CO₂-Effektes aus seiner energetischen Verwertung, Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU): 63 S.
- [12] VeVA, Verordnung über den Verkehr mit Abfällen, 2005: (Fassung Juli 2016).

Nicht verholzte Biomassen

Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung



Bild: Vanessa Burg, WSL

Vanessa Burg

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	154
1 Einleitung.....	155
1.1 Zielsetzung und Überblick	155
1.2 Aktuelle Situation Schweiz.....	156
2 Methoden.....	159
2.1 Datengrundlage und Kenngrössen	159
2.2 Theoretisches Potenzial.....	161
2.3 Nachhaltiges Potenzial	163
2.4 Bereits genutztes Potenzial	164
2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial.....	164
3 Resultate	165
3.1 Theoretisches Potenzial.....	165
3.2 Nachhaltiges Potenzial	168
3.3 Gesamtschau der Potenziale	173
4 Diskussion und Folgerungen	176
Literatur	177
Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene	178
Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz	180

Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt	KEV	Kostendeckende
BFE	Bundesamt für Energie		Einspeisevergütung
BFS	Bundesamt für Statistik	kW _{el}	Kilowatt elektrisch
BioSweet	Biomass for Swiss Energy Future	NI	Normliter
FS	Frischsubstanz	oTS	Organische Trockensubstanz
GJ	Gigajoule (10^9)	PJ	Petajoule (10^{15})
GIS	Geoinformationssystem	SCCER	Swiss Competence Center for
GRUDAF	Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau	TJ	Energy Research
GVE	Grossviecheinheiten	TS	Terajoule (10^{12})
Hu	Unterer Heizwert		Trockensubstanz

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung und Überblick

Unter *Hofdünger* werden zusammenfassend alle Ausscheidungen (sowohl in flüssiger als auch in fester Form) aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung verstanden. Kot und Harn der Nutztiere bilden die Grundbestandteile dieser Biomassekategorie. Je nach Stallsystem fallen sie ohne sonstige Zusatzstoffe an, ausser eventuell Wasser. Man spricht in diesem Fall von *Gülle* bzw. *Vollgülle* (unverdünnt). Oder sie werden mit dem Einstreumaterial gemischt, dann spricht man von *Mist*.

Um eine mit den anderen Biomasseressourcen vergleichbarere Basis zu schaffen, werden sowohl die anfallende Menge (Frischsubstanz, Trockensubstanz, organische Trockensubstanz) als auch der Energieinhalt (Primärenergieinhalt, potenzieller Biomethanertrag) und die räumliche Verteilung abgeschätzt. Untersucht wird das Potenzial, das in der Ressource steckt. Nicht Teil dieser Arbeit ist die Möglichkeit einer besseren Energieausbeute durch optimierte Prozesse bei der Bereitstellung oder der Umwandlung, wie zum Beispiel durch Vorbehandlung des Materials. Die Potenzialebenen in diesem Teilbericht sind wie folgt definiert und quantifiziert:

Theoretisches Potenzial

Gesamter Hofdünger (Gülle und Mist), der aktuell in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung der Schweiz in einem Jahr anfällt («Jährliches Aufkommen»). → Kapitel 2.2

Nachhaltiges Potenzial

Gesamter Hofdünger, der aktuell vom Landwirt zentral gesammelt wird (Abzug von Verlusten durch Stallabwesenheit der Tiere durch Weidegang oder Alpsömmierung) und für eine energetische Verwertung mobilisierbar wäre. Zudem wurde eine Mindestmenge Hofdünger für die energetische Umwandlung gemäss heute verfügbarer Technologie festgelegt und Gebiete mit zu geringen Tierbeständen ausgeschlossen.

→ Kapitel 2.3

Bereits genutztes Potenzial

Anteil Hofdünger, der heute in der Schweiz bereits energetisch genutzt wird. Dieser Anteil ist sehr gering, wobei die energetische Verwertung aktuell durch Vergärung erfolgt. → Kapitel 2.4

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial. → Kapitel 2.5

1.2 Aktuelle Situation Schweiz

In der Schweiz werden fast 14 Mio. Nutztiere gehalten. Geflügel macht mit einem Bestand von über 10 Mio. den mit Abstand grössten Anteil aus, gefolgt von Rindvieh (1.6 Mio.), Schweinen (1.5 Mio.) und Schafen (0.4 Mio.) [6]. Ziegen und Pferde (Equiden) machen mit je ca. 80'000 Tieren einen verhältnismässig geringen Anteil aus. Der Tierbestand wird häufig in Grossvieheinheiten (GVE) ermittelt. Eine GVE entspricht dem Futterverzehr und Hofdüngeranfall einer 650 kg schweren Kuh und dient als Umrechnungsschlüssel zum Vergleich verschiedener Nutztiere [9]. Das Rindvieh macht drei Viertel aller Grossvieheinheiten in der Schweiz aus (*Abbildung 1*), wobei fast die Hälfte davon Milchkühe sind [6]. Kühe prägen die Schweizer Landwirtschaft wie kein anderes Tier und machen aus dem Grasland Schweiz ein Milchland. So werden jährlich mehr als 4 Mia. kg Milch produziert und rund 1/3 des in der Schweizer Landwirtschaft erwirtschafteten Ertrages kommt aus der Rindviehhaltung (davon 2/3 Milch und 1/3 Fleisch) [9].

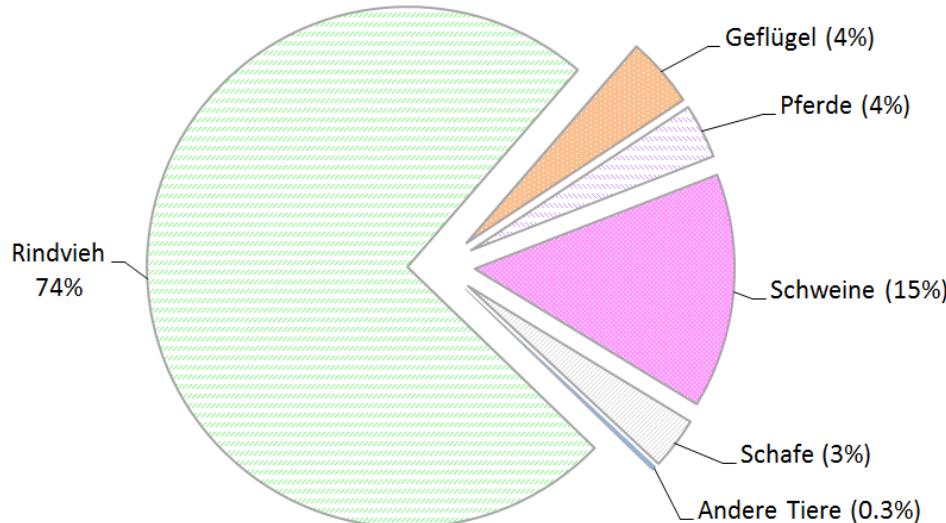


Abbildung 1: Tierbestand in der Schweiz, ausgedrückt in Grossvieheinheiten (2013, BFS) [6].

Jährlich wird vom BFS eine landwirtschaftliche Betriebszählung durchgeführt, welche hauptsächlich auf Daten basiert, die im Rahmen des Vollzugs von Direktzahlungen gesammelt werden. Gemäss Erhebungen nimmt die Zahl der landwirtschaftlichen Betriebe seit mehreren Jahrzehnten stetig ab, wobei sich ein Trend zu grösseren Betrieben beobachten lässt: Im Jahr 2000 wurden noch über 70'000 Betriebe gezählt, im Jahr 2015 waren es noch rund 55'000 [7]. Nur ca. 15% der Betriebe halten gar keine Nutztiere und sind einzig im Pflanzenbau tätig. Die Mehrheit – d.h. 70% der rund 47'000 Betriebe mit Nutztierhaltung – ist auf Weidevieh spezialisiert [9].

Im Mittel wurden im Jahr 2013 rund 24 GVE pro Betrieb gehalten [6]. Dabei halten die Hälften der Betriebe weniger als 20 GVE, während rund 10'000 mehr als die Hälfte des gesamten Nutztierbestands besitzen. Die Struktur der Schweizer Nutztierhaltung ist somit typischerweise von kleinen Betrieben geprägt. Daneben nimmt die Zahl der Biobetriebe seit Jahren tendenziell zu. 2015 zählte die Schweiz über 6'200 Biobetriebe, vor 20 Jahren waren es noch rund halb so viele [7]. Gemessen an allen Landwirtschaftsbetrieben entspricht dies einem Anteil von 12%. Die Entwicklung des Schweizer Tierbestandes über die letzten 20 Jahre ist in *Abbildung 2* dargestellt [8]. Den Marktbedürfnissen entsprechend hat der Geflügelbestand stark zugenommen, was auf die Erhöhung der Produktion von Mastpoulets zurückzuführen ist. Der Rindviehbestand hat sich seit dem Jahr 2000 zwischen 1.5 Mio. und 1.6 Mio. Tieren eingependelt. Schweine, Ziegen und Schafe erreichten vor ca. 10 Jahren einen Höchstbestand und sind seither tendenziell abnehmend.

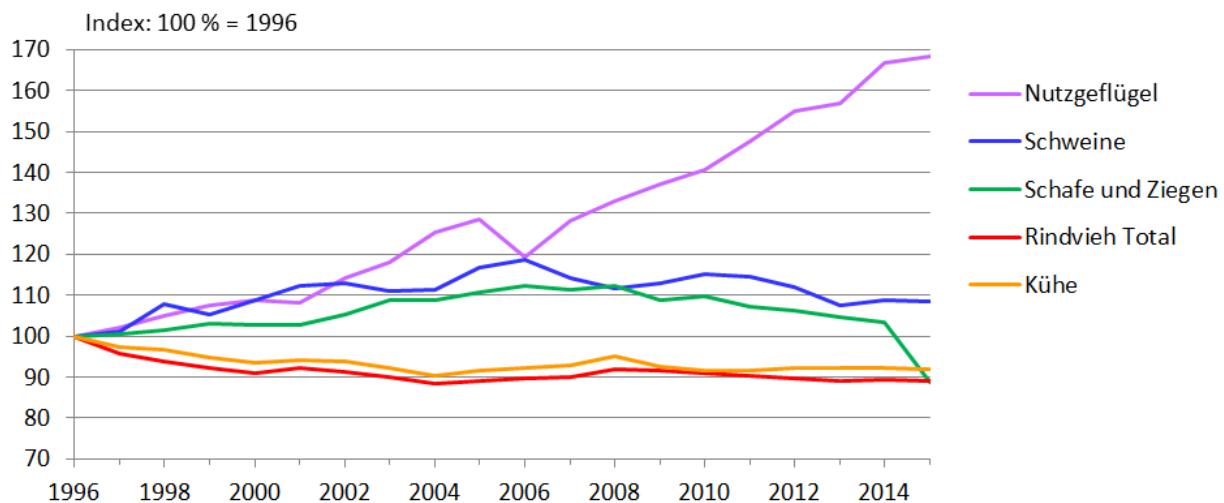


Abbildung 2: Entwicklung der Anzahl Nutztiere in der Schweiz zwischen 1996 und 2015 gemäss BFS [8].

Weitere Praxisinformationen wie Stallsysteme und Weidegang werden vom BFS anhand regelmässiger Stichproben durch Zusatzerhebungen ermittelt. In den letzten Jahren lässt sich so ein deutlicher Trend zu Laufställen erkennen. 1990 wurden noch 97% der Milchkühe in Anbindeställen gehalten [15]. Im Jahr 2010 waren es gemäss BFS-Zusatzerhebung nur noch 56% – bei den Mutterkühen gar unter 10% [5] (Abbildung 3). Dabei liegt bei den Milchkühen der Anteil Stallsysteme mit Produktion von Vollgülle über 50%, bei den Mutterkühen unter 30%. Stallsysteme mit Produktion von Vollgülle waren 1990 noch deutlich weniger verbreitet und machten bei den Milchkühen einen Anteil von rund 30% aus [5].

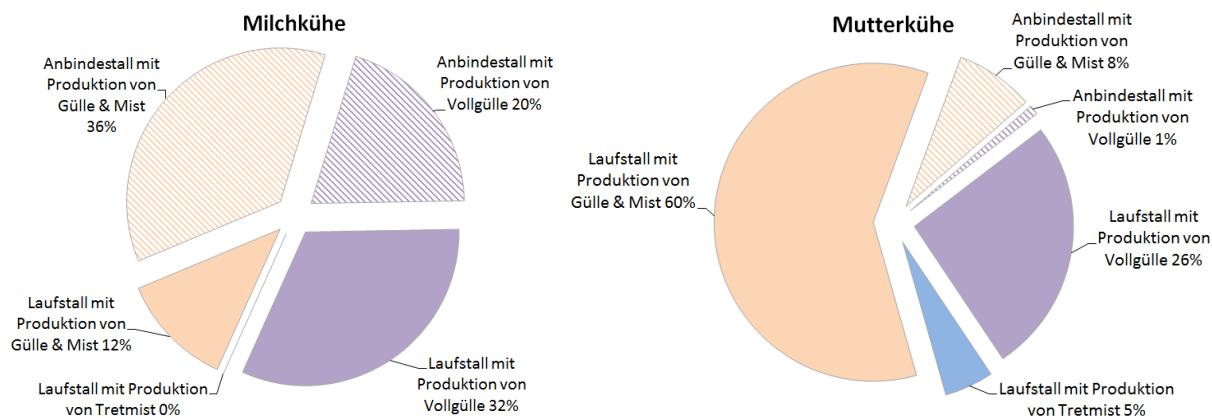


Abbildung 3: Stallsysteme von Milch- und Mutterkühen (BFS 2010) [5].

Bei den Legehennen hat sich die Freilandhaltung durchgesetzt, wobei in den Ställen sogenannte Volieren-Systeme mit Kotbandentmistung installiert sind (vgl. Abbildung 4). In der Schweineproduktion haben Stallsysteme mit Tretmist und Freilandhaltung keine grosse Bedeutung. In den letzten Jahren konnte jedoch ein Trend zu mehr tierfreundlichen «Labelställen» mit besseren Haltebedingungen beobachtet werden.

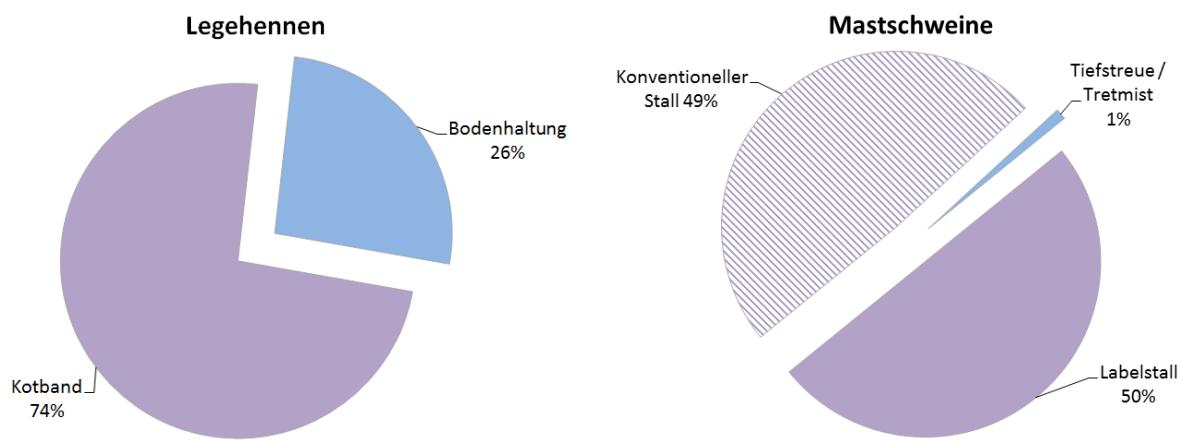


Abbildung 4: Stallsysteme von Legehennen- und Mastschweinen (BFS 2010) [5].

Aufgrund der Förderung von tiergerechten Haltungssystemen und verschärften Anforderungen der Tierschutzgesetzgebung haben sich der Anteil von Tieren mit Zugang zu einer Weide sowie die Weidedauer in den letzten Jahren für alle Tierkategorien erhöht. So haben beispielsweise über 90% der Milch- und Mutterkühe Zugang zur Weide, ebenso über 70% der Legehennen [5] (vgl. Tabelle 1). Bei den Masttieren ist der Anteil deutlich tiefer.

Tabelle 1: Weidegang von ausgewählten Nutztieren (BFS 2010) [5].

	Anteil der Tiere mit Weidegang	Weidetage pro Jahr	Weidestunden pro Tag
Milchkühe	95%	158	8.6
Mutterkühe	92%	151	15.1
Mastkälber	10%	16	1.6
Legehennen	71%	Freier Zugang	
Mastpoulets	15%	Freier Zugang	
Mastschweine	1%	Freier Zugang	
Pferde	90%	224	8.9
Schafe	91%	201	9.4
Ziegen	75%	176	7.1

Gülle und Mist fallen ständig an. Ist ein Stall nicht dauernd belegt (Weidegang, Alpung), sind die anfallenden Hofdüngermengen entsprechend der tatsächlichen Aufenthaltsdauer geringer. Weidegang findet mehrheitlich in den Sommermonaten statt, die im Stall anfallende Hofdüngermenge im Winter ist grösser. Gemäss der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (Anhang 2.6 Ziffer 3.2.1) [11] darf Gülle nur bei Pflanzenbedarf ausgebracht werden und unter der Voraussetzung, dass der Boden saug- und aufnahmefähig ist, also weder wassergesättigt, gefroren, schneebedeckt oder ausgetrocknet. Obwohl es im Winter in der Schweiz kein ausdrückliches Güllenverbot gibt, wird deshalb meistens eine «Winterpause» eingehalten. Während dieser Zeit ist ein vorausschauendes Hofdünger-Management mit einem genügend grossen Lagerraum erforderlich.

2 Methoden

2.1 Datengrundlage und Kenngrößen

Jährlich wird vom Bundesamt für Statistik BFS eine landwirtschaftliche Betriebsstrukturerhebung durchgeführt und dabei die Grundinformationen sämtlicher Landwirtschaftsbetriebe erfasst [6]. Dazu gehören beispielsweise die Zahl der Beschäftigten, der Tierbestand und die landwirtschaftliche Nutzfläche. Diese Erhebung basiert hauptsächlich auf Daten, die im Rahmen des Vollzugs von Direktzahlungen und anderen Verwaltungstätigkeiten gesammelt werden. Diese detaillierte Erhebung diente als Startpunkt zur Ermittlung des theoretischen Potenzials von Hofdünger für die energetische Nutzung in der Schweiz (Kapitel 2.2). Mit einer Stichprobe von über 15'000 Betrieben hat das BFS im Jahr 2010 eine statistische Zusatzerhebung durchgeführt [5]. Die zusätzlich erhobenen Variablen geben Auskunft über die Betriebsführung, die Hofeinrichtungen und die Diversifikation. Aus dieser Erhebung konnten Angaben zu den Stallsystemen und zum Weidegang entnommen werden.

Für alle Biomassenpotenziale werden sowohl die Ressourcenmenge als auch der Energieinhalt berechnet. Um die verschiedenen Biomassen miteinander vergleichen zu können, werden in einem ersten Schritt die Mengen jeweils in Tonnen Frischsubstanz und Trockensubstanz angegeben. Zur Umrechnung der verschiedenen Hofdünger-Frischsubstanzen auf Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS) wurden die Richtwerte aus den Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF 2009 [13], Tabelle 2) verwendet.

Tabelle 2: Richtwerte der Gehalte an Trockensubstanz (TS) und organischer Trockensubstanz (oTS) von Hofdüngern verschiedener Nutztierarten gemäss GRUDAF 2009 [13].

Tierart / Hofdüngerart	Gehalte (kg/m^3 Gülle bzw. kg/t Mist)		Organischer Anteil der Trockensubstanz (%)
	TS	oTS	
Rindvieh			
Milchvieh / Aufzucht, Vollgülle	90	70	77.7
Milchvieh / Aufzucht, Laufstallmist	210	175	83.3
Rindviehmast, Vollgülle	90	65	72.2
Rindviehmast, Laufstallmist	210	155	73.8
Schweine			
Schweinegülle Mast	50	36	72.0
Schweinegülle Zucht	50	33	66.0
Pferde			
Pferdemist	350	300	85.7
Schafe / Ziegen			
Schaf-/Ziegenmist	270	200	74.1
Geflügel			
Hennenkot (Kotband)	350	250	71.4
Hennenmist (Bodenhaltung)	500	330	66.0
Trutenmist	600	400	66.6

In einem zweiten Schritt wurde die in der Biomasse enthaltene Energie – die sogenannte Primärenergie – berechnet. Die so berechnete Energiemenge bezieht sich auf den unteren Heizwert (Hu) der Trockensubstanz und ist unabhängig von Nutzungspfaden. Somit wird die gesamte in den Energieträgern enthaltene Energiemenge angegeben. Der Heizwert von Hofdünger hängt in erster Linie vom Anteil organischer Substanz in der Trockensubstanz ab. Für 100% organische Substanz kann dabei ein unterer Heizwert von 21 MJ/kg zugrunde gelegt werden [18]. Auf diese Weise wurde beispielweise beim Milchvieh mit einem organischen Anteil der Trockensubstanz von 77% ein unterer Heizwert von etwa 19.4 MJ/kg bestimmt.

$$\text{Energieinhalt}_{\text{TS}} [\text{MJ}] = \text{Masse}_{\text{TS}} [\text{kg}] \times \text{Unterer Heizwert} [\text{MJ/kg}_{\text{TS}}]$$

Bei den vergärbaren Biomassen wurde zudem auch der potenzielle Biomethanertrag in Normliter (NL) ermittelt. Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Methanertrag}_{TS} [\text{NL}] \\ = \text{Masse}_{TS} [\text{kg}] \times \text{Anteil Organisch}_{TS} [-] \times \text{Biogasertrag}_{oTS} [\text{NL/kg oTS}] \times \text{Methangehalt} [-] \end{aligned}$$

Zur Abschätzung der Gasausbeute wurden wenn vorhanden die Richtwerte des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) verwendet, ansonsten wurden eigene Annahmen getroffen (*Tabelle 3*) [16]. Mit einem unteren Heizwert für Methan von 35.883 MJ/m³ [10] lässt sich auch der Energieinhalt des Methanertrags berechnen.

Tabelle 3: Untere Heizwerte berechnet aufgrund der organischen Trockensubstanz und verwendete Ktbl [16]. Richtwerte für die Gasausbeute des Hofdüngers verschiedener Nutztiere.

Tierart / Hofdüngerart	Unterer Heizwert bezogen auf die Trockensubstanz (MJ / kg TS)	Methanertrag (NL / kg oTS)
Rindvieh		
Milchvieh / Aufzucht, Vollgülle	16.3	150 (Rindergrüle)
Milchvieh / Aufzucht, Laufstallmist	17.5	250 (Rindermist)
Rindviehmast, Vollgülle	15.2	150 (Rindergrüle)
Rindviehmast, Laufstallmist	15.5	250 (Rindermist)
Schweine		
Schweinegrüle Mast	15.1	250
Schweinegrüle Zucht	13.9	
Pferde		
Pferdemist	18	255
Schafe / Ziegen		
Schaf-/Ziegenmist	15.6	240 (Annahme ≈ Schafmist)
Geflügel		
Hennenkot (Kotband)	15.0	290
Hennenmist (Kotgrube, Bodenhaltung)	13.9	280 (Geflügelmist)
Trutenmist	14.0	

2.2 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial bezieht sich auf die gesamte anfallende Biomasse ohne Berücksichtigung von nutzungsbedingten Einschränkungen. Das theoretische Potenzial entspricht somit dem Hofdünger, der aktuell aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung der Schweiz in einem Jahr maximal anfällt («Jährliches Aufkommen»).

Als Startpunkt zur Berechnung des theoretischen Potenzials wurde der Tierbestand (Tierzahlen und Kategorie) gemäss landwirtschaftlicher Betriebsdatenerhebung des Jahres 2013 verwendet [6] (*Abbildung 5*). Folgende Nutztiere wurden berücksichtigt: Rindvieh (Milchkühe, übrige Kühe, Kälber und andere < 1-jährige Rinder, übriges Rindvieh), Schweine (Mutterschweine, Eber, übrige Schweine), Equiden (Pferde, Ponys, Esel, Maultiere), Schafe, Ziegen und Geflügel (Legehennen, Mastpoulets, Truten). Übrige Tiere wie Bisons, Kaninchen oder Neuweltkameliden wurden vernachlässigt.

Je nach Stallsystem entstehen unterschiedliche Mengen von Gülle und Mist. Die Aufteilung der Tierkategorien nach Stallsystem wurde aufgrund der Zusatzerhebung BFS 2010 vorgenommen [5] (vgl. *Abbildung 3* für Milch- und Muttermutterkühe). Beim Rindvieh wurden drei verschiedene Varianten von Hofdüngeranfall differenziert: i) Nur Gülle, ii) nur Mist oder iii) Gülle und Mist. Schweine produzieren sowohl im «Labelstall» als auch im konventionellen Stall ausschliesslich Vollgülle. Bei Pferden, Schafen und Ziegen fällt nur Mist an. Beim Geflügel wurde zwischen Bodenhaltung und Kotband unterschieden (*Abbildung 4*).

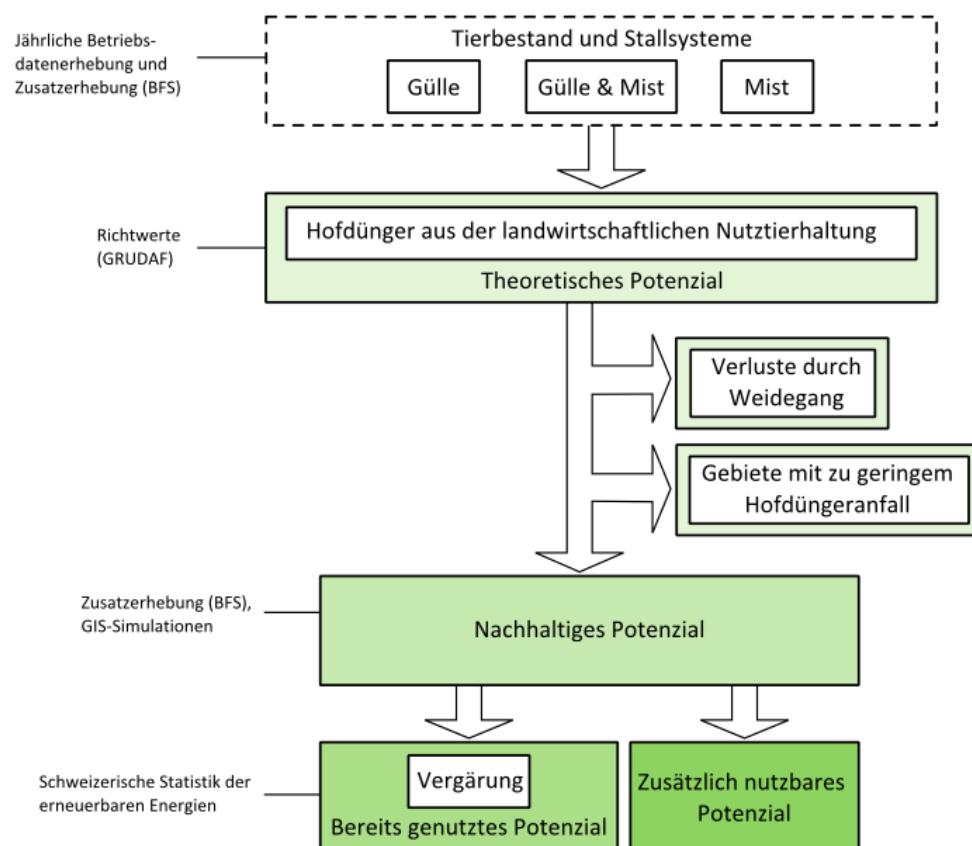


Abbildung 5: Modellansatz zur Ermittlung der energetischen Potenziale von Hofdünger aus der CH-Nutztierhaltung.

Die Richtwerte für die jährliche Menge an Gülle und Mist der verschiedenen Tierkategorien stammen aus den Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau [13] (GRUDAF 2009, *Tabelle 4*). Für Anbinde- und Laufställe kann mit den gleichen Mengen gerechnet werden. Die angegebenen Mengen beziehen sich auf eine mittlere Leistungsstufe. Bei höherer Produktionsintensität ist die anfallende Hofdüngermenge entsprechend höher. Die Göllemengen beziehen sich alle auf unverdünnte Gülle (ohne Zufuhr von Wasser). In der aufgeführten Mistmenge sind Lagerungsverluste berücksichtigt.

Durch Kombination der erhobenen Tierzahlen und der ausgewiesenen Hofdünger-Richtwerte je Stallsystem kann für jede Tierkategorie die jeweils zu erwartende Menge Gülle und Mist berechnet werden. Es gilt:

$$Menge_{Mist,Gülle} [\text{kg}] = \text{Anzahl Tiere[ANZ]} \times \text{Anteil Stallsystem}_{Mist,Gülle} [-] \times \text{Richtwert}_{Mist,Gülle} [\text{kg/Tier}]$$

Die Grundlagen zur Umrechnung der so berechneten Mengen in Trockensubstanz und org. Trockensubstanz, sowie zur Berechnung der Energieinhalte sind im Kapitel 2.1 aufgeführt.

Tabelle 4: Richtwerte für den jährlichen Anfall von Gülle und Mist pro Tier in Abhängigkeit des Stallsystems (GRUDAF 2009) [13].

Tierkategorie	Nur Gülle ¹ (m ³ /Jahr)	Gülle / Mist		Nur Mist (t/Jahr)	Bemerkung
		Gülle ¹ (m ³ /Jahr)	Mist (t/Jahr)		
Rindvieh					
Milchkühe	23	11.5	8.9	21	-
Übrige Kühe	15.5	8	6	14	Annahme ≈ Mutterkuh
Kälber und andere < 1-jährige Rinder	5.5	2.7	2	5	Annahme ≈ Aufzuchtrind < 1-jährig
Übriges Rindvieh	8	Je nach Stall ²		7	Annahme ≈ Rindviehweidemastplatz
Schweine					
Mutterschweine	6	Je nach Stall ²		3.4	Annahme ≈ Zuchtschweineplatz
Eber				1.2	Annahme ≈ Mastschweineplatz
Übrige Schweine	1.6				
Equiden					
Pferde	-	-	-	12	Frischmist
Ponys, Esel, Maultiere	-	-	-	12	Annahme ≈ Pferde
Schafe / Ziegen					
Ziegen	-	-	-	1.6	-
Milchschafe	-	-	-	2.3	-
Übrige Schafe	-	-	-	1.7	-
Geflügel					
Legehühner	2.7	Kotband		Bodenhaltung / Kotgrube	
Masthühner	-			1.5	100 Legehennenplätze
Trutten	-			0.8	100 Mastpouletplätze
	-			3	100 Masttrutenplätze

¹ Das spezifische Gewicht von Gülle wurde hierbei mit 1.0 t/m³ angenommen.

² In diesen Ställen entsteht in der Regel je auf einem Teil der Fläche Vollgülle bzw. Laufstallmist. Die Aufteilung kann überschlagsmäßig anhand des Flächenanteils bestimmt werden.

2.3 Nachhaltiges Potenzial

Die verfügbare Biomasse und damit das theoretische Potenzial in der Schweiz wird durch verschiedene Restriktionen eingeschränkt. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen erhält man das nachhaltige Potenzial für die energetische Nutzung der Biomasse (vgl. Einleitung des Gesamtberichtes).

Reduktion durch Stallabwesenheit (Weidegang)

Gemäss heutiger Praxis verbleiben die Ausscheidungen der Tiere beim Weidegang oder während der Alpsommerung auf der Wiese und werden nicht zentral gesammelt. Entsprechend reduziert sich der energetisch nutzbare Anteil (vgl. Abbildung 5). Die Weidedauer und der damit in Verbindung stehende Verlust an Hofdünger wurde aufgrund der Zusatzerhebung BFS 2010 für jede Tierkategorie mit einem konstanten Faktor berücksichtigt (vgl. Tabelle 1). Es gilt:

$$\text{Reduktionsfaktor } [-] = \text{Anteil Tiere mit Weidegang } [-] \times \frac{\text{Weidetage / Jahr } [d]}{365 \text{ d}} \times \frac{\text{Weidestunden / Tag } [h]}{24h}$$

Reduktion durch Gebiete mit zu geringer Hofdüngerverfügbarkeit

Auf dem europäischen Markt werden heute hauptsächlich Systeme mit einer elektrischen Leistung über 30 kW_{el} angeboten [17]. Das Angebot an Kleinstbiogasanlagen ist in den letzten Jahren immer breiter und innovativer geworden. Jedoch nur sehr wenige Hersteller bieten Mini-Anlagen unter 10 kW_{el} an. Zu nennen sind z.B. Biolectric in Belgien sowie Seab Energy und QUBE Renewables in Grossbritannien. In der Schweiz, wie im benachbarten Ausland, existieren nur sehr wenige Kleinstbiogasanlagen. Von den über hundert Biogasanlagen, die von der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) profitieren, haben nur gerade neun Anlagen eine elektrische Leistung unter 40 kW_{el} [1].

Den Angaben zu kW_{el} liegt meist ein Wirkungsgrad von 0.35 - 0.38 zugrunde [17]. Bei einer Laufzeit von rund 8000 h pro Jahr würde eine 10 kW_{el} Leistung einem Biomethanertrag von etwa 790 GJ entsprechen. Diese Grösse wurde als minimale Untergrenze für einen *Einzelbetrieb* gemäss heute verfügbarer Technologie festgelegt. Diese Mindestmenge entspricht dem Biomethanertrag von etwas über 75 GVE. In der Schweiz sind sehr viele kleinere landwirtschaftliche Betriebe vorhanden (Kapitel 1.2). Gemeinschaftsanlagen, die den Hofdünger mehrerer Betriebe verarbeiten, stellen somit eine weitere Nutzungsmöglichkeit dar. Im Sinne eines Zusammenschlusses der räumlich engen Nachbarschaft wurde eine maximale Distanz von 1 km mit einer gemeinsamen Klein-Biogasanlage von 40 kW_{el} (ca. 3150 GJ Biomethanertrag) angenommen. Die Distanz-Analyse wurde mittels Geoinformationssystem (GIS) rechnerisch durchgeführt.

Bemerkung zur Nährstoffbilanz

Gemäss heutiger Praxis erfolgt die energetische Verwertung von Hofdünger durch Vergärung. Abgesehen von organischem Kohlenstoff, der teilweise zu CO₂ und CH₄ umgewandelt wird, verbleiben die Nährstoffe im Gängut, welches anschliessend wieder auf den Feldern ausgebracht werden kann. Auf diese Weise werden die Nährstoffe fast vollständig wieder in Umlauf gebracht. Falls durch technologische Fortschritte, z.B. durch eine vorgesetzte Vorbehandlung des Hofdüngers oder durch hydrothermale Vergasung, künftig eine effizientere energetische Nutzung erreicht wird, muss unbedingt auch der Einfluss auf die Nährstoffbilanz berücksichtigt werden (ökologische Restriktion).

2.4 Bereits genutztes Potenzial

Bisher wird Hofdünger in der Schweiz nur sehr bedingt als Energieträger verwendet. Gemäss aktueller Praxis erfolgt die energetische Nutzung dabei durch Vergärung. Das anfallende Biogas kann anschliessend in einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage zu Strom und Wärme umgewandelt werden. Um die Biogasproduktion zu steigern, werden oft auch externe organische Abfälle mitvergoren. Man spricht dann von Co-Vergärung. Durch die höheren Biogaserträge und die Verarbeitungsgebühren wird die Wirtschaftlichkeit der Anlage verbessert. Vergärungsanlagen gelten als landwirtschaftlich, wenn gemäss Raumplanungsverordnung (Art. 34a RPV) mehr als die Hälfte des vergorenen Materials (bezogen auf die Frischsubstanz) landwirtschaftlicher Herkunft ist. Um den Landwirtschaftsbonus der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) zu erhalten, muss der Anteil nichtlandwirtschaftlicher Co-Substrate sogar $\leq 20\%$ betragen [3]. Gemäss der Schweizerischen Statistik der erneuerbaren Energien [2] gab es im Jahr 2014 in der Schweiz 98 landwirtschaftliche Biogasanlagen, welche insgesamt 953.8 TJ Biogas produziert haben. Die entsprechende Hofdüngermenge (ca. 160'000 Tonnen TS oder rund 1.3 Mio. Tonnen Frischsubstanz) wurde durch Näherung aufgrund der verwendeten Richtwerte für die Gasausbeute (*Tabelle 3*) zurückgerechnet. Meistens werden die landwirtschaftlichen Biogasanlagen jedoch nicht nur mit Hofdünger betrieben. Im Sinne einer konservativen Betrachtung stellen die so berechneten Werte die obere Grenze der bereits genutzten Hofdüngermenge dar. Als Vergleich hat das Inspektorat der Kompostier- und Vergäranlagen der Schweiz die durch Vergärung genutzte Hofdüngermenge im Jahr 2014 bei lediglich etwa 0.5 Mio. Tonnen abgeschätzt [14]. *Abbildung 6* zeigt die räumliche Verteilung der landwirtschaftlichen Biogasanlagen, die KEV [1] beziehen oder gemäss Ökostrom Schweiz [12] auf dem freien Strommarkt sind.

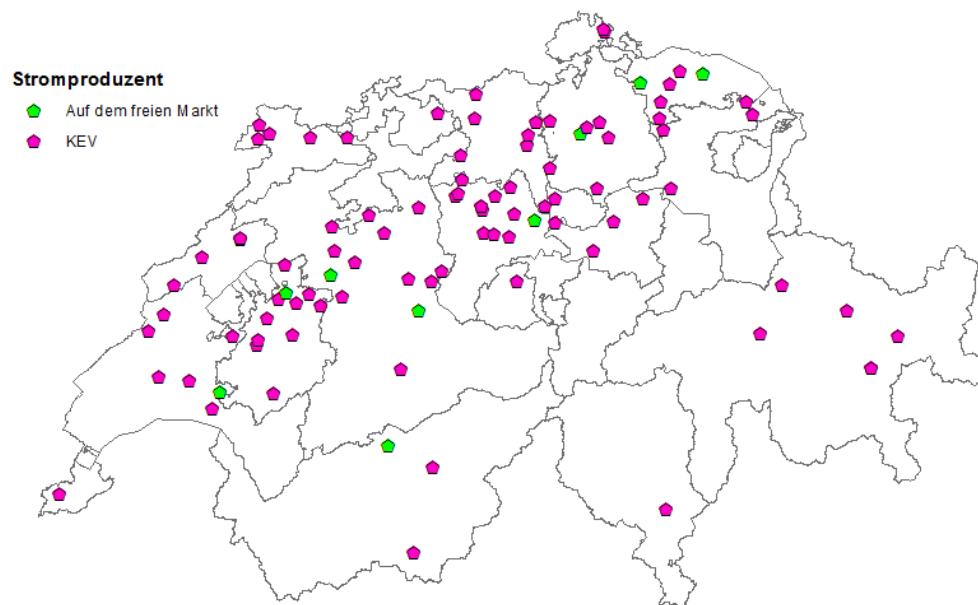


Abbildung 6: Standorte der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Schweiz (Stand 2014).

2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial

Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial - dies bedeutet die Hofdüngermenge, welche i) vom Landwirt gesammelt wird (Abzug von Verlusten durch Weidegang) und ii) für eine energetische Verwertung mobilisierbar wäre (Ausschluss von Gebieten mit zu geringen Tierbeständen oder Hofdüngermengen), jedoch aktuell nicht energetisch genutzt wird.

3 Resultate

3.1 Theoretisches Potenzial

Ressourcenmenge

Die durchschnittlich jährlich zu erwartende Hofdüngermenge wurde für jede Tierkategorie in Tonnen Frischsubstanz berechnet, wobei je nach Stallsystem zwischen Gülle und Mist unterschieden wurde (vgl. Kapitel 2.2). Nachfolgend wurde die so berechnete Frischsubstanz aufgrund von Kenngrössen in Trockensubstanz und in organische Trockensubstanz umgerechnet. Auf diese Weise wurde eine Gesamtmenge von über 3 Mio. Tonnen TS Hofdünger pro Jahr ermittelt. *Abbildung 7* zeigt den berechneten Hofdüngeranfall in den einzelnen Tierkategorien. Ersichtlich ist, dass der grösste Anteil mit Abstand aus der Rindviehhaltung kommt (2.3 Mio. Tonnen TS), wobei Milchkühe wiederum bei weitem den grössten Anteil darstellen, gefolgt vom «übrigen Rindvieh» (Mast/Aufzucht) und von den Jungtieren. Neben der Rindviehhaltung spielen die anderen Tierkategorien eine untergeordnete Rolle. Die Resultate sind in *Tabelle 5* zusammengefasst, wobei die Haupttierkategorien einfachheitshalber zusammengezählt wurden. *Abbildung 9* gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung des gesamten Hofdüngers. Erwartungsgemäss ist das Aufkommen im Schweizer Mittelland sowie in den Tälern im Gebirge klar höher als in urbanen Gebieten um Zürich und Bern.

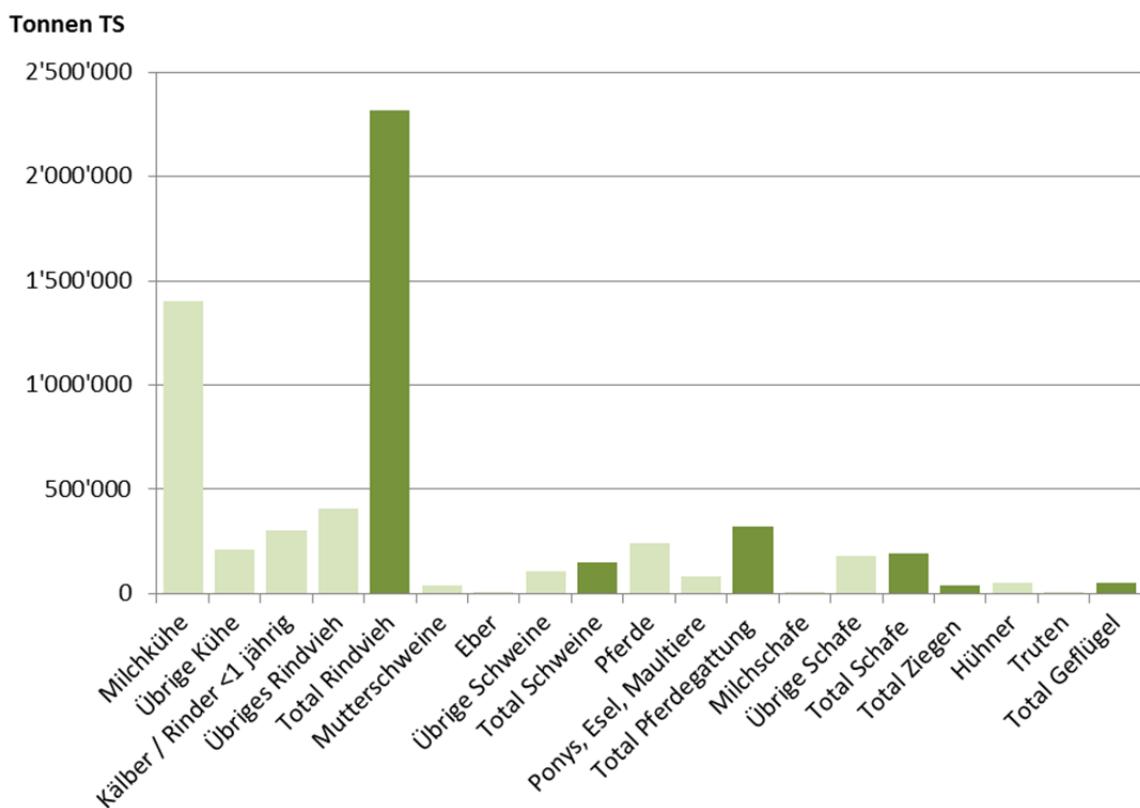


Abbildung 7: Theoretisches Potenzial Hofdüngermenge aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in der Schweiz, aufgeteilt nach Tierkategorie (Tonnen Trockensubstanz pro Jahr).

Abbildung 8 zeigt die relative Verteilung des anfallenden Hofdüngers der verschiedenen Haupttierkategorien untereinander. Als Bezugsgröße wurden sowohl Frisch- als auch Trockensubstanz gewählt, da sie verschiedene Charakteristiken veranschaulichen. So macht die Schweinegülle 12% der anfallenden Frischsubstanz, jedoch nur rund 5% der Trockensubstanz aus. Im Gegenteil bildet Pferdemist nur 4% der anfallenden Frischsubstanz, jedoch aber 10% der Trockensubstanz.

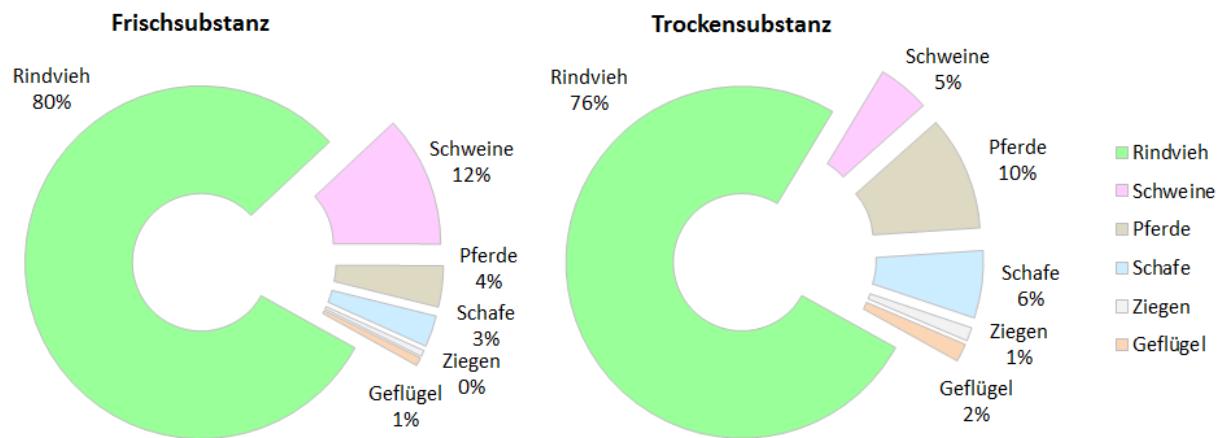


Abbildung 8: Theoretisches Potenzial, Relative Verteilung der anfallenden Hofdüngermenge (bezogen auf die Frischsubstanz links und die Trockensubstanz rechts) zwischen den verschiedenen Haupttierkategorien.

Tabelle 5: Theoretisches Potenzial, Hofdüngermenge aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in der Schweiz, aufgeteilt nach Haupttierkategorie (Tonnen Trockensubstanz pro Jahr).

	Gülle (Tonnen TS)		Mist (Tonnen TS)		Total Hofdünger (Tonnen TS)
Rindvieh	746'750 (Vollgülle)	435'220 (Mischsystem)	1'032'890 (Mischsystem)	96'710 (Nur Mist)	2'311'570
	Tot: 1'181'970		Tot: 1'129'600		
Schweine	146'580		-		146'580
Pferdegattung	-		321'960		321'960
Schafe	-		189'540		189'540
Ziegen	-		37'880		37'880
Geflügel	12'860		38'100		50'960
Total CH	1'341'410		1'717'080		3'058'490



Abbildung 9: Theoretisches Potenzial, Räumliche Verteilung des Hofdüngers aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in 1 x 1 km-Auflösung (Tonnen Trockensubstanz).

Energieinhalt

Zusätzlich zur Ressourcenmenge wurde auch die gesamte im Hofdünger enthaltene Energie – bzw. der Primärenergieinhalt – berechnet. Die Berechnung erfolgte durch Zuordnung der vorgängig ermittelten Trockensubstanzen auf charakteristische Heizwerte (vgl. Kapitel 2.1). Gemäss Berechnungen beträgt der theoretische Primärenergiegehalt des Hofdüngers aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung der Schweiz somit total 48.8 PJ pro Jahr. Dabei stammt rund drei Viertel – sprich 36.7 PJ – aus der Rindviehhaltung (*Abbildung 10*). Gemäss heutiger Praxis erfolgt die energetische Nutzung von Hofdünger mittels anaerober Vergärung. Somit wurde auch der potenzielle Methanertrag berechnet bzw. der potenzielle Energieinhalt aufgrund des Heizwertes von Methan. Gemäss Berechnungen beträgt der potenzielle Biomethanertrag des Hofdüngers aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung der Schweiz somit total 17.9 PJ pro Jahr. Die Aufteilung zwischen den verschiedenen Tierkategorien kann der *Abbildung 10* entnommen werden.

Abbildung 11 gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung des berechneten Primärenergieinhaltes auf kantonaler Ebene. Die Werte sind dem Anhang 1 zu entnehmen. Ersichtlich ist, dass der Kanton Bern mit 9.5 PJ das grösste theoretische Potenzial aufweist, gefolgt vom Kanton Luzern (4.8 PJ), St. Gallen (4.3 PJ) und Freiburg (3.8 PJ). Dies ist sowohl auf die Kantonsgrösse als auch auf die geographischen Gegebenheiten und die damit verbundene Anzahl gehaltene Nutztiere zurückzuführen. So werden Rindvieh und insbesondere Milchkühe, die den grössten Anteil des theoretischen Potenzials ausmachen, mehrheitlich in den Kantonen Bern, Luzern und St. Gallen gehalten.

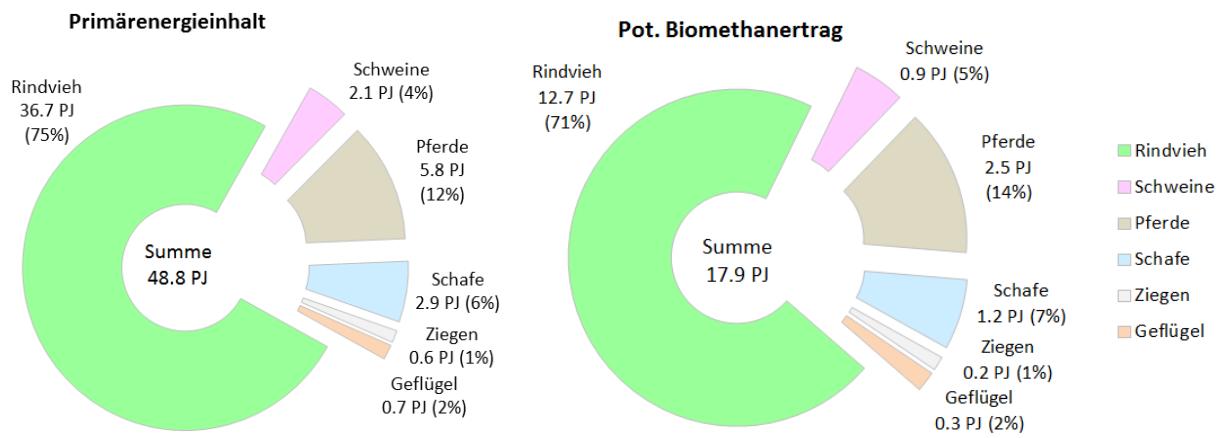


Abbildung 10: Theoretisches Potenzial, Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in der Schweiz, Primärenergieinhalt und potenzieller Biomethanertrag (Petajoule pro Jahr).

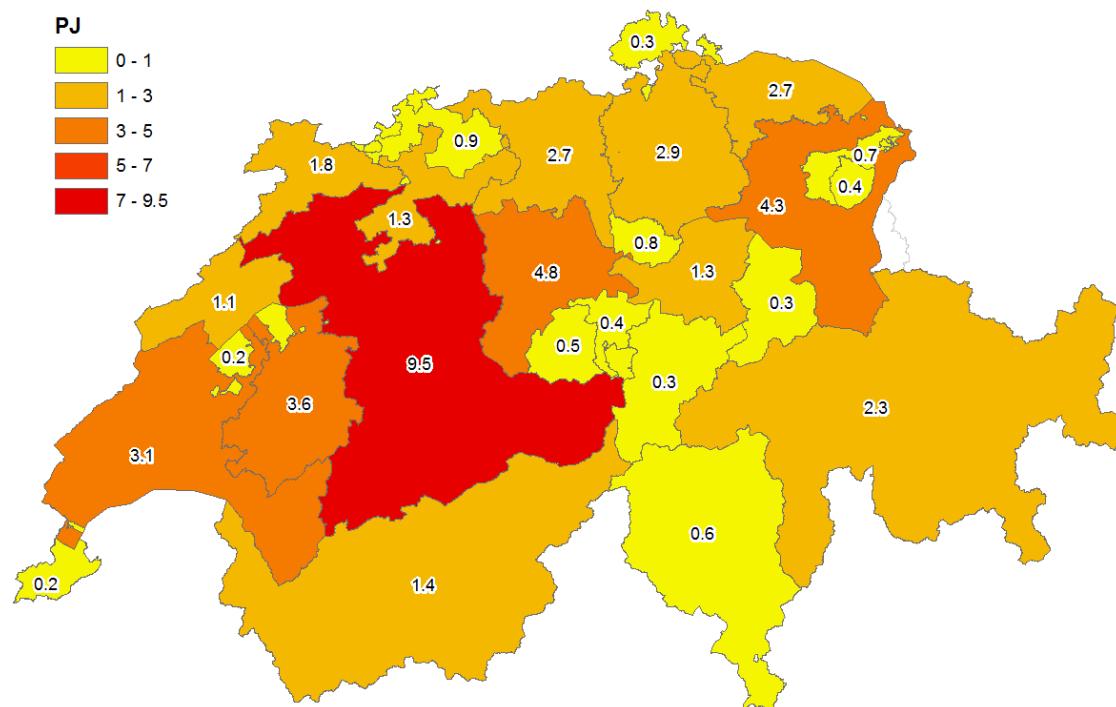


Abbildung 11: Theoretisches Potenzial, kantonale Verteilung des Primärenergieinhalts des Hofdüngers aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in der Schweiz (Petajoule pro Jahr).

3.2 Nachhaltiges Potenzial

Aufgrund verschiedener Restriktionen verringert sich das theoretische Potenzial um diejenige Menge, welche nach heutigem Stand, voraussichtlich nicht energetisch nutzbar ist. In einem ersten Schritt wurde die Hofdüngermenge, die bei Stallabwesenheit auf der Weide verbleibt, berechnet und vom theoretischen Potenzial abgezogen (vgl. Kapitel 2.3). Das so ermittelte Zwischenpotenzial stellt die effektiv gesammelte resp. verfügbare Hofdüngermenge dar. Nachfolgend wurde eine Mindestmenge Biomethanertrag für den erfolgreichen Betrieb einer Biogasanlage nach heutigem Technologiestand angenommen. Entsprechend wurde das Zwischenpotenzial mit einer GIS-basierten Analyse untersucht und die Gebiete mit zu niedrigem Hofdüngeranfall abgezogen.

Reduktion durch Stallabwesenheit (Weidegang)

Unter Berücksichtigung der Hofdünger-Verluste durch Weidegang wurde ein Zwischenpotenzial von total 2.7 Mio. Tonnen TS resp. 42.2 PJ Primärenergieinhalt ermittelt. Dies stellt eine Gesamtreduktion des theoretischen Potenzials um 14% dar. Grösste Reduktionen zeigen sich mit jeweils etwa 20% bei den Pferden und Schafen. Bei den Schweinen sind die Verluste durch Weidegang hingegen vernachlässigbar (vgl. Kapitel 2.3). Beim Rindvieh resultiert eine mittlere Reduktion von 13% (resp. 15% für die Milchkühe). Gemäss heutiger Praxis erfolgt die energetische Nutzung von Hofdünger mittels anaerober Vergärung. Nach unseren Berechnungen beträgt der potenzielle Biomethanertrag des ermittelten Zwischenpotenzials 15.4 PJ. Die Resultate sind in der Tabelle 6 zusammengefasst. Die räumliche Verteilung in 1 x 1 km-Auflösung ist in Abbildung 12 dargestellt.

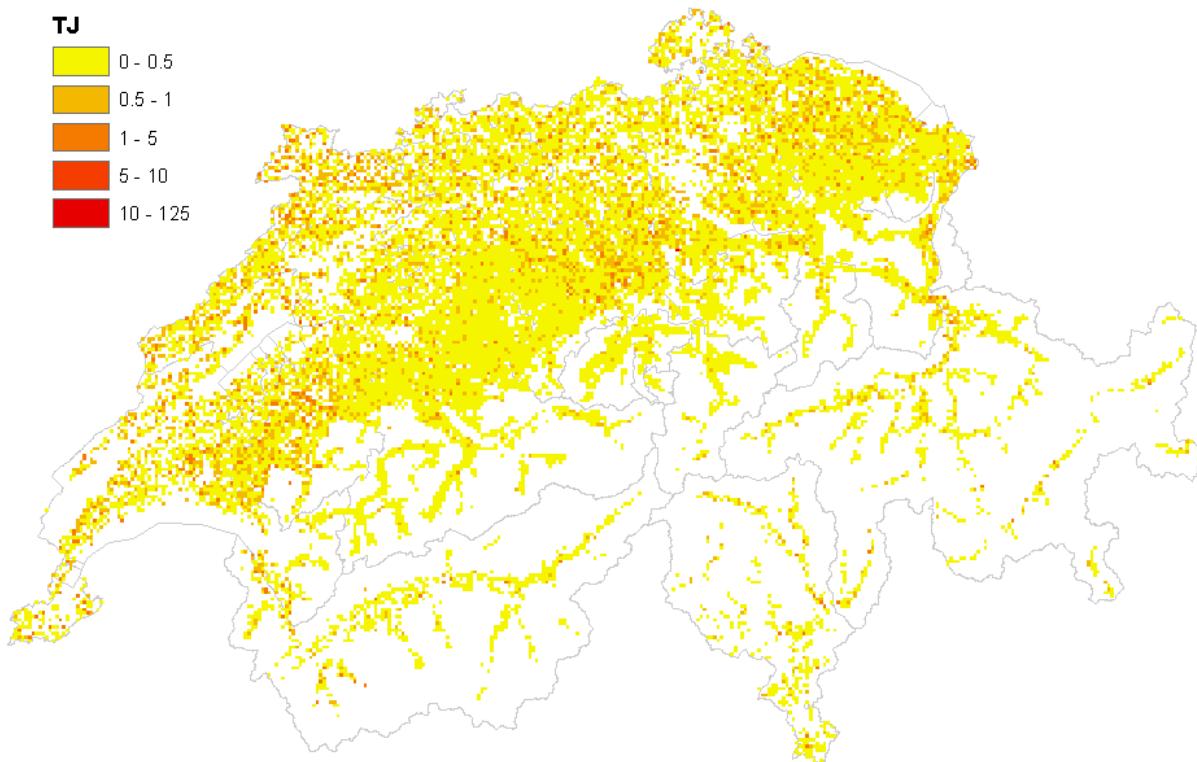


Abbildung 12: Zwischenpotenzial, potenzieller Biomethanertrag (Terajoule) der jährlich in der Schweiz anfallenden Hofdüngermenge aus der Nutztierhaltung nach Abzug von Verlusten durch Weidegang in 1 x 1 km-Auflösung.

Tabelle 6: Zwischenpotenzial, Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in der Schweiz nach Abzug von Verlusten durch Weidegang, aufgeteilt nach Haupttierkategorie (Tonnen Trockensubstanz und Energieinhalt PJ pro Jahr).

	Trockensubstanz (Tonnen TS)	Primärenergieinhalt (PJ)	Pot. Biomethanertrag (PJ)
Rindvieh	2'005'800	31.82	11.02
Schweine	146'580	2.08	0.89
Pferdegattung	259'550	4.67	2.04
Schafe	151'910	2.36	0.97
Ziegen	33'920	0.53	0.22
Geflügel	50'960	0.72	0.35
Total CH	2'648'720	42.18	15.48

Gebiete mit zu geringer Hofdüngerverfügbarkeit

Als Basis zur Untersuchung der räumlichen Hofdünger-Verfügbarkeit diente das vorstehend berechnete Zwischenpotenzial (theoretisches Potenzial minus Verluste durch Weidegang). Dabei wurde ein verfügbarer hofeigener Biomethanertrag von mindestens 790 GJ pro Jahr als Untergrösse für den Einzelbetrieb einer Biogasanlage nach heutigem Stand angenommen (resp. eine elektrische Leistung von ca. 10 kW_{el}, vgl. Kapitel 2.3). Ein solches Potenzial haben gemäss Berechnungen nur rund 6% der Bauernhöfe, also etwa 2'800 Betriebe (siehe Abbildung 13), wobei diese zusammen 20% des schweizweit verfügbaren Energieinhaltes ausmachen (8.5 PJ Primärenergieinhalt oder 3.2 PJ Biomethanertrag (Abbildung 14)). Der arithmetische Mittelwert des potenziellen Biomethanertrags eines Einzelbetriebes in der Schweiz liegt bei 332 GJ. Die Hälfte aller Betriebe weisen jedoch einen potenziellen Biomethanertrag von weniger als 263 GJ auf (Median) und machen zusammen nur knapp 25% des schweizweiten potenziellen Biomethanertrages aus. Dies zeigt die Bedeutung der Entwicklung von Mini-Biogas-Anlagen. Bei Installationen mit einer elektrischen Leistung von 5 kW_{el} (395 GJ Biomethanertrag) würden nämlich bereits rund 30% der Betriebe über genügend Hofdünger verfügen, um eine solche Biogasanlage zu betreiben. Zusammen könnten sie bereits über die Hälfte des verfügbaren Hofdüngers energetisch nutzen. Bei einer Leistung von mindestens 2 kW_{el} könnten sogar über 90% des ermittelten Zwischenpotenzials oder 80% des theoretischen Potenzials ausgeschöpft werden.

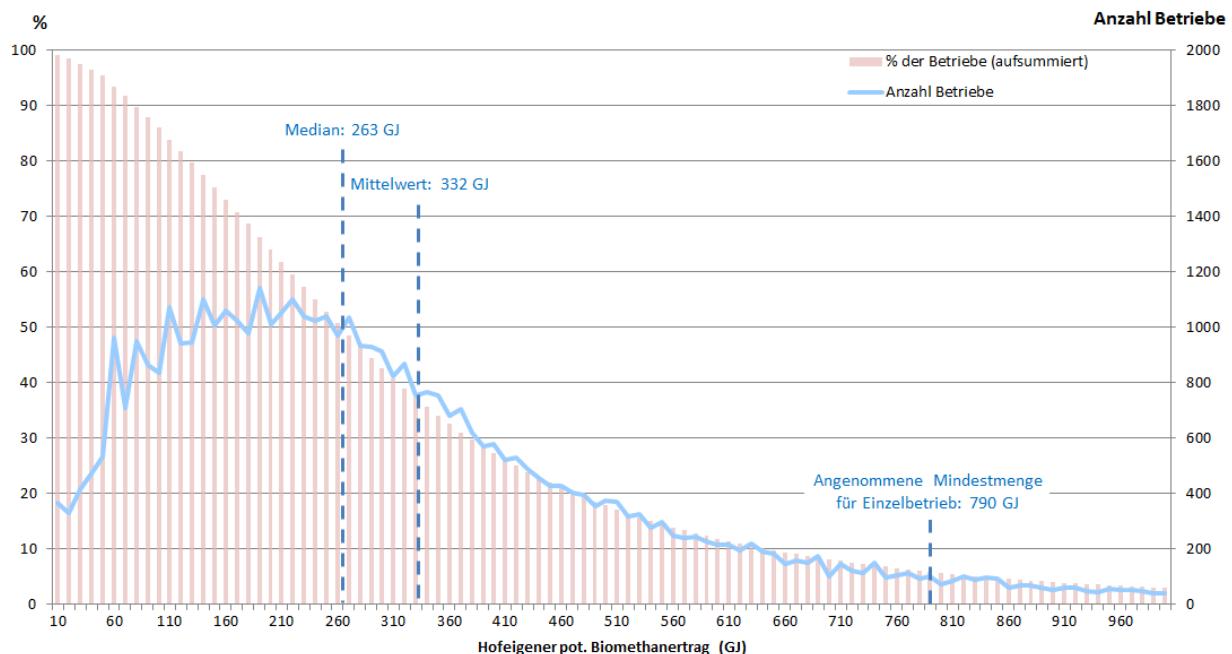


Abbildung 13: Anzahl landwirtschaftliche Betriebe in Abhängigkeit des potenziellen hofeigenen Biomethanertrages nach Abzug von Verlusten durch Weidegang.

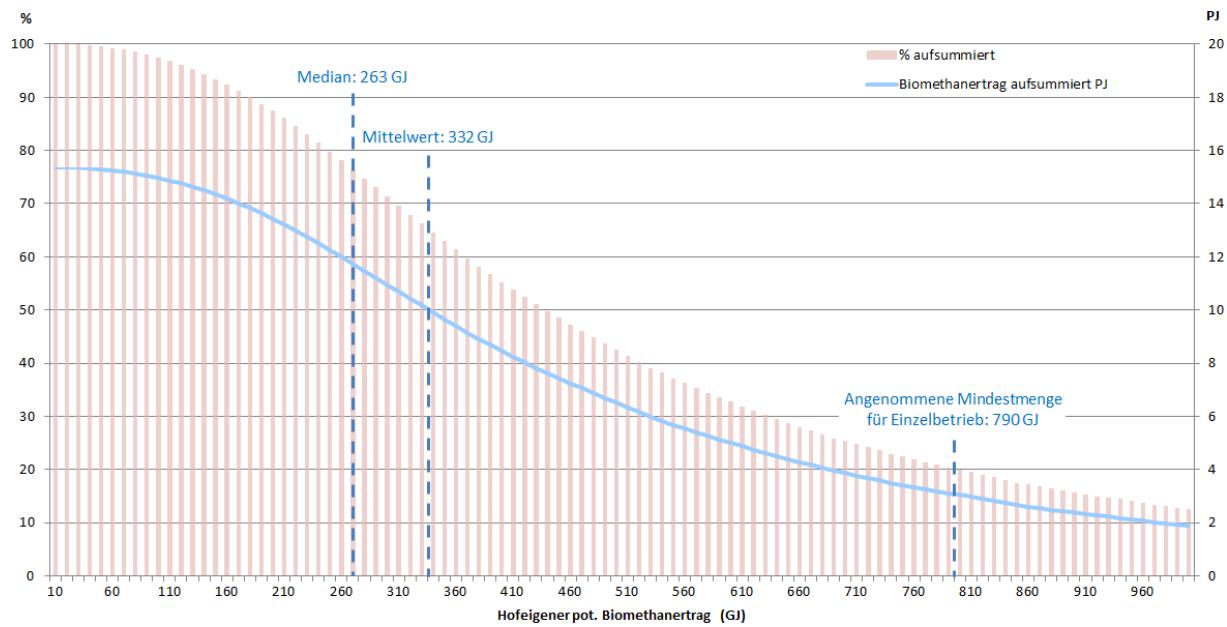


Abbildung 14: Aufsummierter potenzieller Biomethanertrag in Abhängigkeit des hofeigenen energetischen Potenzials aus Hofdünger nach Abzug von Verlusten durch Weidegang.

Eine weitere Möglichkeit ist der Zusammenschluss verschiedener landwirtschaftlicher Betriebe. Abbildung 15 zeigt die Anzahl Betriebe im Vergleich zum Abstand zum nächsten Nachbarn. Ersichtlich ist, dass die Bauernhöfe in der Schweiz im Normalfall nahe beieinanderliegen. Laut GIS-Analyse beträgt die durchschnittliche, mittlere Entfernung zum nächsten Nachbar 282 m. Entsprechend gross ist das Optimierungspotenzial, um mehrere landwirtschaftliche Betriebe zusammenzuschliessen und grössere Biogasanlagen zu betreiben. In dieser Studie wurde eine maximale Distanz von 1 km zu einer gemeinsamen, mittelkleinen Biogasanlage mit einer elektrischen Leistung von 40 kW_{el} (ca. 3150 GJ Biomethanertrag) angenommen.

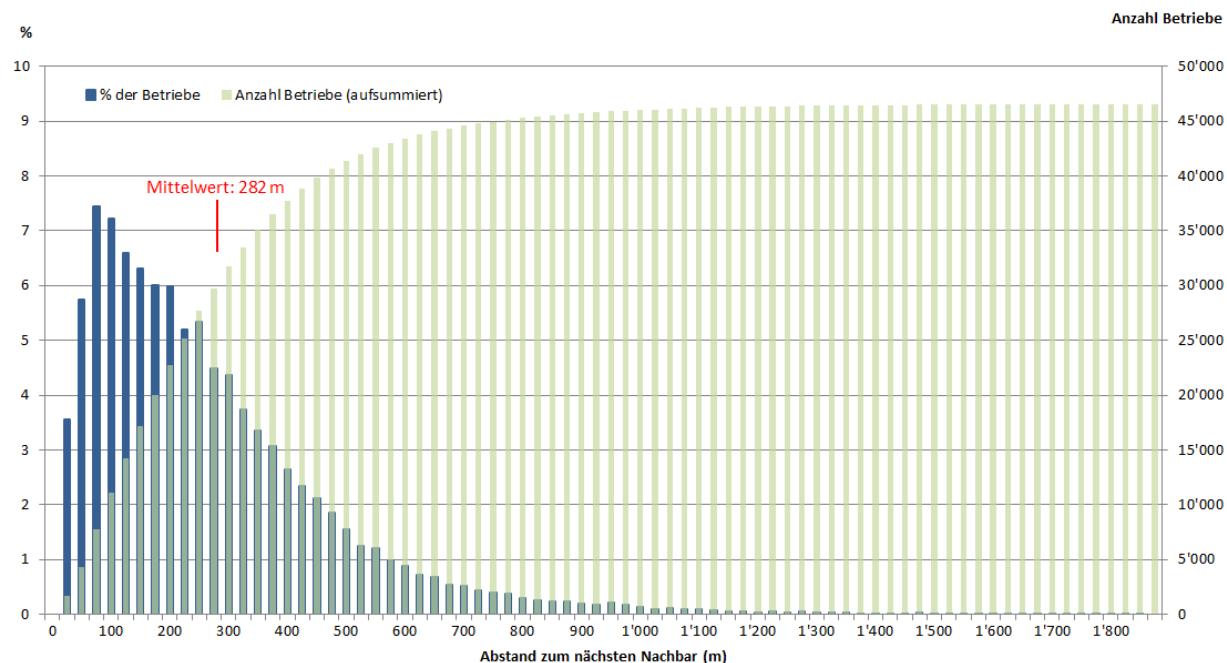


Abbildung 15: Anzahl landwirtschaftliche Betriebe in Abhängigkeit des Abstands zum nächsten Nachbar (m).

Unter Berücksichtigung der zwei definierten Nutzungsmöglichkeiten nach Abzug von Verlusten durch Weidegang – sprich entweder Einzelbetrieb mit über 790 GJ pot. Biomethanertrag oder gemeinsamer Biomethanertrag von über 3150 GJ in maximal 1 km Distanz – wurde ein nachhaltiges Potenzial von total 1.7 Mio Tonnen TS resp. 26.9 PJ Primärenergieinhalt ermittelt (*Tabelle 7*). Dabei könnte etwas über 30% des ermittelten nachhaltigen Potenzials durch Einzelbetriebe ausgeschöpft werden, die restlichen 70% nur durch Zusammenführen des lokal verfügbaren Hofdüngers in einer gemeinsamen Anlage.

Abbildung 16 gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung des berechneten potenziellen Biomethanertrages auf kantonaler Ebene.

Tabelle 7: Nachhaltiges Potenzial (Abzug von Verlusten durch Weidegang und Gebieten mit zu geringem Hofdüngeranfall), aufgeteilt nach Haupttierkategorie (Tonnen Trockensubstanz und Energieinhalt PJ pro Jahr).

	Gülle (Tonnen TS)	Mist (Tonnen TS)	Total (Tonnen TS)	Primärenergie- inhalt (PJ)	Pot. Biomethan- ertrag (PJ)
Rindvieh	635'140	622'470	1'257'610	19.95	6.89
Schweine	118'320	-	118'320	1.68	0.72
Pferdegattung	-	169'060	169'060	3.04	1.33
Schafe	-	91'010	91'010	1.42	0.58
Ziegen	-	16'790	16'790	0.26	0.11
Geflügel	10'160	29'990	40'150	0.57	0.28
Total CH			1'692'940	26.92	9.90

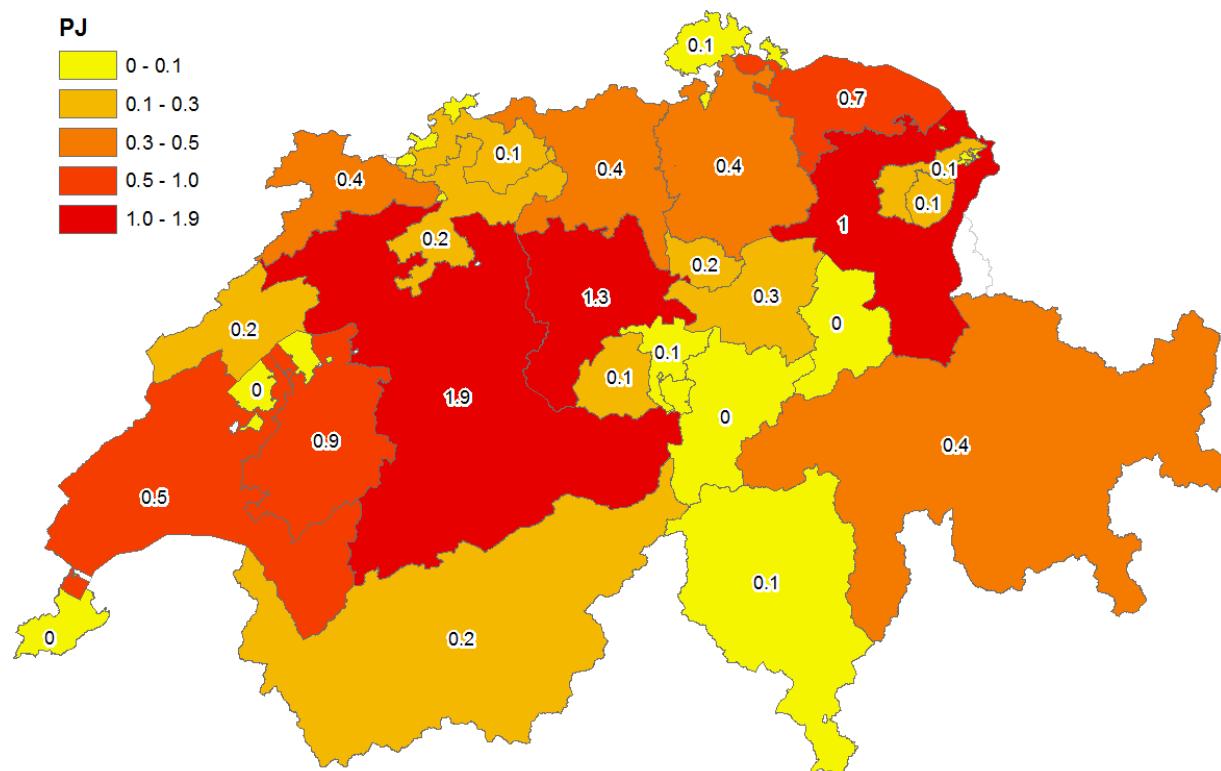


Abbildung 16: Nachhaltiges Potenzial (Abzug von Verlusten durch Weidegang und Gebiete mit zu geringem Hofdüngeranfall), kantonale Verteilung des potenziellen Biomethanertrags des Hofdüngers aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in der Schweiz (Petajoule pro Jahr).

3.3 Gesamtschau der Potenziale

In den vorgängigen Kapiteln wurden das theoretische (3.1) und das nachhaltige Potenzial (3.2) der jährlich anfallenden Hofdüngermenge aus der Nutztierhaltung in der Schweiz ermittelt. Das bereits genutzte Potenzial wurde aufgrund der Schweizerischen Statistik der erneuerbaren Energien [2] abgeschätzt, welche für das Jahr 2014 eine Bruttoproduktion von Biomethan durch landwirtschaftliche Biogasanlagen von insgesamt 953.8 TJ (resp. 0.954 PJ) angibt (Kapitel 2.4). Diese Menge Biomethan entspricht umgerechnet etwa einer Trockensubstanz von rund 160'000 Tonnen Hofdünger beziehungsweise 1.3 Mio. Tonnen Frischsubstanz. Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial. Die verschiedenen Potenziale werden in diesem Kapitel dargestellt.

Zusammenfassend zeigt *Abbildung 17* die verschiedenen Potenziale der jährlich anfallenden Hofdüngermenge aus der Nutztierhaltung in der Schweiz. Dabei wird zwischen Frischmasse, Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz unterschieden. Die Darstellung der Ressourcenmengen in verschiedenen Einheiten ermöglicht die grundsätzlichen Charakteristiken (wie z.B. den Wassergehalt) zu veranschaulichen. Somit ist der Unterschied zwischen Frisch- und Trockensubstanz im Vergleich zu anderen trockenen Biomassen, wie beispielsweise Holz, beim Hofdünger relativ hoch. So verfügt die Schweiz über ein theoretisches Potenzial von rund 24 Mio. Tonnen Frischsubstanz Hofdünger, was rund 3 Mio. Tonnen Trockensubstanz entspricht. Die genauen Zahlen sind dem Anhang 2 zu entnehmen.

Die Betrachtung je Potenzialebene ermöglicht Rückschlüsse auf die maximal mögliche Nutzung (theoretisches Potenzial), die aus heutiger Sicht nachhaltige Nutzung (nachhaltiges Potenzial), die heutige Nutzung (bereits genutztes Potenzial) sowie zukünftige Ausbaumöglichkeiten (zusätzlich nutzbares Potenzial). Zudem wurde auch ein Zwischenpotenzial ausgewiesen, bei dem nur Verluste durch Weidegang berücksichtigt wurden. Zur Ermittlung des nachhaltigen Potenzials wurde dieses Zwischenpotenzial um die Hofdüngermenge aus Gebieten mit zu geringem Aufkommen reduziert. Gemäss Berechnungen wurde ein zusätzlich nutzbares Potenzial von 13 Mio. Tonnen Frischsubstanz beziehungsweise 1.5 Mio. Tonnen Trockensubstanz Hofdünger ermittelt.

In *Abbildung 18* werden Primärenergieinhalt und potentieller Biomethanertrag der verschiedenen Potenziale nebeneinander gestellt. Der Primärenergieinhalt des theoretischen Potenzials von Hofdünger beträgt 48.8 PJ. Nach Abzug der genannten Nachhaltigkeitsrestriktionen sowie des bereits energetisch genutzten Hofdüngers wurde ein zusätzlich nutzbarer Primärenergieinhalt aus Schweizer Hofdünger von 24.3 PJ ermittelt. Dies entspricht einem zusätzlich nutzbareren Biomethanertrag von 8.9 PJ.

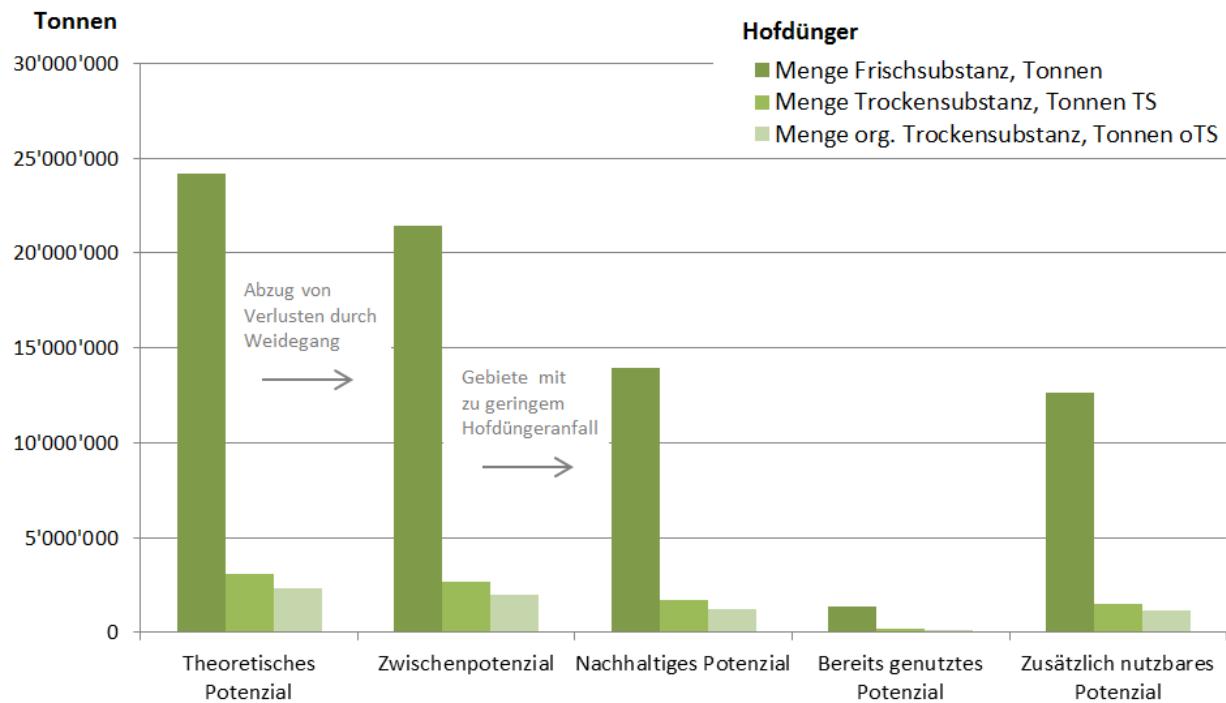


Abbildung 17: Potenzialanalyse der Menge Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung der Schweiz.

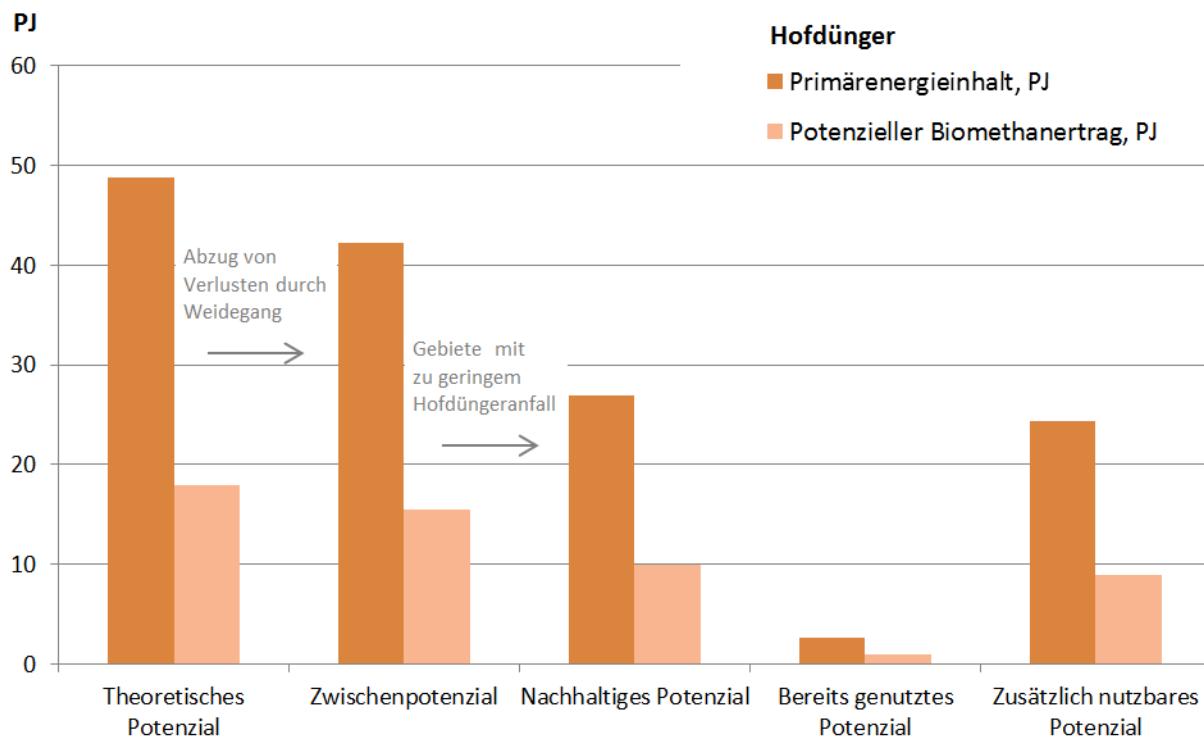


Abbildung 18: Potenzialanalyse des Hofdüngers aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung der Schweiz.

Abbildung 19 zeigt die Verteilung des theoretischen Potenzials des Hofdüngers auf die verschiedenen ermittelten Potenziale resp. Restriktionen. Die Angaben betreffen jeweils den Primärenergiegehalt (PJ), wobei die relative Verteilung resp. die Prozentangabe auch für die Ressourcenmenge (in Tonnen TS) gültig ist. Das zusätzlich nutzbare Potenzial wurde unterteilt, je nachdem ob die Nutzung bereits durch Einzelbetrieb in > 10 kW_{el} Anlagen und nur durch Kombination in Gemeinschaftsanlagen > 40 kW_{el} möglich ist. Dabei wurde angenommen, dass die energetische Nutzung heute durch Einzelbetrieb erfolgt. Das ermittelte zusätzlich nutzbare Potenzial von total 24.3 PJ Primärenergiegehalt Hofdünger entspricht etwa 50% des theoretischen Potenzials. Dabei sind gemäss heutiger Technologie noch ungefähr 5.9 PJ durch Einzelbetriebe verwertbar, die restlichen 18.4 PJ nur durch gemeinsame Verwertung des verfügbaren Hofdüngers mit anderen Landwirten aus der näheren Umgebung. Gemäss Berechnungen machen die Verluste durch Stallabwesenheit der Tiere (Restriktion Weidegang) 14% des theoretischen Potenzials von Hofdünger aus. Die grösste Restriktion ist aber die sehr dezentrale Verteilung des anfallenden Hofdüngers.

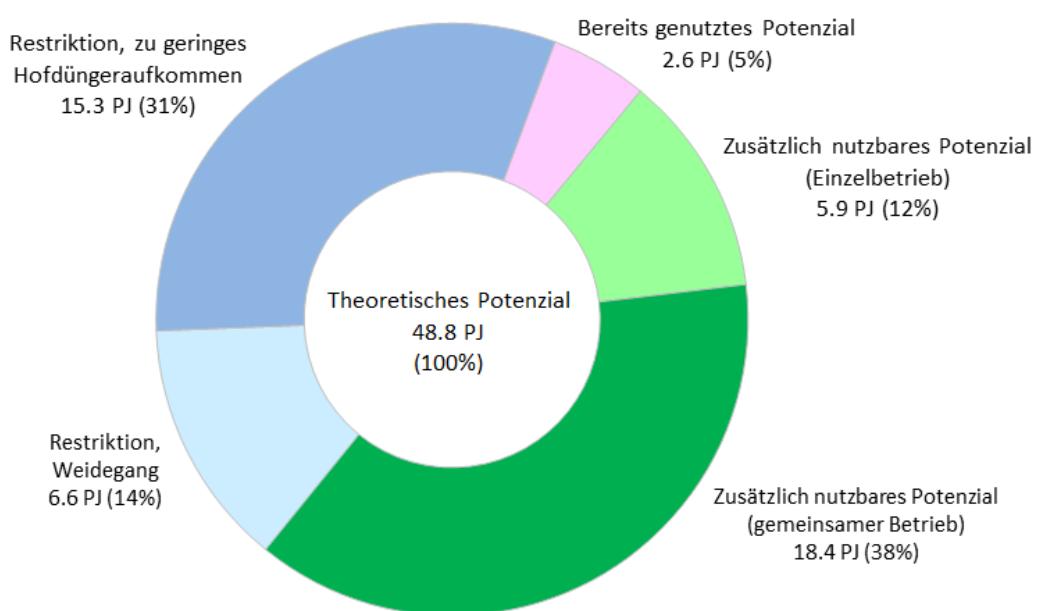


Abbildung 19: Verteilung des theoretischen Potenzials von Hofdünger in der Schweiz auf die verschiedenen ermittelten Restriktionen resp. Potenziale (Primärenergieinhalt, Petajoule).

4 Diskussion und Folgerungen

Die Tierhaltung ist ein wichtiger Teil der Schweizer Landwirtschaft. 2014 machte sie rund die Hälfte der landwirtschaftlichen Gesamtproduktion von 10.6 Milliarden Franken aus [9]. Dabei prägen die Kühe die Nutztierhaltung der Schweiz. Drei Viertel aller Grossvieheinheiten in der Schweiz sind Rinder, wovon fast die Hälfte Milchkühe sind [6].

Die Haltung der Tiere ist durch das Tierschutzgesetz genau geregelt. Je nach Stallsystem entstehen unterschiedliche Mengen Gülle und Mist. Gemäss unseren Berechnungen beträgt das theoretische Hofdünger-Potenzial total 48.8 PJ Primärenergieinhalt pro Jahr, wovon etwa 75% aus der Rindviehhaltung stammen. Diese Energiemenge entspricht umgerechnet etwa dem Energieinhalt von 1.1 Millionen Tonnen Rohöl oder 1.3 Milliarden Liter (Annahme, Heizwert von Rohöl = 43.2 MJ/kg) oder 4.4% des totalen Energie-Bruttoverbrauchs der Schweiz (1108 PJ) [4].

Nach Abzug der Hofdünger-Verluste durch Weidegang wurde ein Zwischenpotenzial von total 42.2 PJ Primärenergieinhalt ermittelt. Aufgrund der Förderung von tiergerechten Haltungssystemen haben sich Auslauf und Weidezugang in den letzten Jahren für alle Tierkategorien erhöht. So haben heute über 90% der Kühe Weidezugang [5]. Es ist davon auszugehen, dass sich der Trend zu mehr tiergerechter Haltung auch künftig fortsetzen wird. Daneben hängt die Berechnung des Hofdünger-Potenzials auch vom Konsum an Tierprodukten ab und von den gehaltenen Tierarten. Wesentliche Änderungen sind kurzfristig nicht zu erwarten, langfristig aber nicht ausgeschlossen.

Im Mittel wurden im Jahr 2013 rund 24 GVE pro Betrieb gehalten [6]. Die Struktur der Schweizer Nutztierhaltung ist somit typischerweise von kleinen und kleinsten Betrieben geprägt. Für den erfolgreichen Betrieb einer Biogasanlage nach heutigem Technologiestand (10 kW_{el} für einen Einzelbetrieb oder 40 kW_{el} in 1 km Distanz für einen gemeinsamen Betrieb) wurde eine entsprechende Mindestmenge an verfügbarem Hofdünger angenommen. Obwohl hierbei die Rede von Kleinstbiogasanlagen ist, entsprechen diese Angaben gemäss Berechnungen dem Biomethanertrag von rund über 75 GVE resp. 300 GVE. Dieses Kriterium ist massgebend und führt dazu, dass nur rund die Hälfte des theoretischen Potenzials energetisch nutzbar ist. Seit mehreren Jahrzehnten nimmt die Zahl der landwirtschaftlichen Betriebe stetig ab, wobei sich ein Trend zu grösseren Betrieben beobachten lässt [6]. Entsprechend ist zu erwarten, dass die Limitierung aufgrund der Anlagengrösse künftig tendenziell weniger einschneidend ausfallen wird. Nach Abzug der genannten Nachhaltigkeitsrestriktionen sowie des bereits energetisch genutzten Hofdüngers wurde ein zusätzlich nutzbarer Primärenergieinhalt aus Schweizer Hofdünger von 24.3 PJ ermittelt. Umgerechnet entspricht dies den Energieinhalt von rund 659 Millionen Liter Rohöl oder 2% des totalen Energie-Bruttoverbrauchs der Schweiz. Gemäss heutiger Praxis erfolgt die energetische Verwertung des Hofdüngers durch (Co-)Vergärung zusammen mit anderen biogenen Rückständen. Bei der Vergärung wird wertvolles Biogas gewonnen, welches sowohl im Strom-, als auch im Wärme- und Kraftstoffbereich einsetzbar ist. Darüber hinaus ist es speicherbar und kann die Fluktuation der Erneuerbaren Energien aus Wind und Sonne ausgleichen. Abgesehen von organischem Kohlenstoff der teilweise zu CO₂ und CH₄ umgewandelt wird, verbleiben die Nährstoffe im Gärgut, welches anschliessend wieder auf den Feldern ausgebracht werden kann. So werden die Nährstoffe fast vollständig wieder in Umlauf gebracht.

Gemäss Untersuchung wäre nur rund ein Viertel des zusätzlich nutzbaren Potenzials durch Einzelbetriebe beziehungsweise einzig durch Nutzung des hofeigenen Hofdüngers auszuschöpfen. Der Rest müsste durch gemeinsame Verwertung des lokal verfügbaren Hofdüngers erfolgen. Dafür müssten Kleinstanlagen besser etabliert und verbreitet sein und Gemeinschaftsanlagen gefördert werden. Die Lösung von Akzeptanzproblemen und Lenksysteme wären dabei ein geeigneter Denkansatz.

Literatur

- [1] BFE, 2014: Liste aller KEV-Bezüger im Jahr 2014,
http://www.bfe.admin.ch/themen/00612/02073/index.html?dossier_id=02166&lang=de.
- [2] BFE, 2014: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2013, 86 S.
- [3] BFE, 2015: Richtlinie kostendeckende Einspeisevergütung (KEV), Art. 7a EnG, Biomasse Anhang 1.5 EnV.
- [4] BFE, 2015: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014, 64 S.
- [5] BFS, 2010: Schweizer Landwirtschaft - Ergebnisse der Zusatzerhebung 2010, 36 S.,
http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/01/new/nip_detail.html?gnpID=2011-740.
- [6] BFS, 2013: Einzelbetriebliche Daten aus der landwirtschaftlichen Betriebsstrukturerhebung.
- [7] BFS, 2015: Anzahl Landwirtschaftsbetriebe. Online:
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/03/blank/ind24.indicator.240201.2402.html> (Stand 01.08.2016).
- [8] BFS, 2015: Entwicklung der Nutztierbestände. Online:
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/03/blank/ind24.indicator.240205.2402.html> (stand 01.08.2016).
- [9] BFS, 2015: Schweizer Landwirtschaft, Taschenstatistik 2015, 36 S.
- [10] Cerbe, G., 2008: Grundlagen der Gastechnik, Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung, 653 S.
- [11] Der Schweizerische Bundesrat, 2005: Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV), 8. Mai 2005 (Stand 01.01.2016).
- [12] Genossenschaft Ökostrom Schweiz. 2014: Biogasanlagenbetreiber. Online:
<http://www.oekostromschweiz.ch/web/de/oekostrom-vom-bauernhof/biogasanlagenbetreiber>.
- [13] GRUDAF, 2009: Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau, 40 S.
- [14] Inspektorat der Kompostier- und Vergärbranche der Schweiz, 2014: Jahresbericht 2014, Ergebnisse von 243 inspizierten Anlagen in 20 Kantonen, 11 S.
- [15] Kupper, T.; Bonjour, C.; Achermann, B.; Rihm, B.; Zaucker, F.; Menzi, H., 2013: Ammoniakemissionen in der Schweiz 1990-2010 und Prognose bis 2020, 110 S.
- [16] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), 2013: Faustzahlen Biogas, 360 S.
- [17] Membrez, Y.; Bakx, T.; Boéchat, S.; Léon, J., 2014: Mini Biogaz, développement de petites unités de biogaz en agriculture, 85 S.
- [18] Spliethoff, H., 2010: Power Generation from Solid Fuels, 674 S.

Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene

Theoretisches Potenzial von Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung (A)

NAME	Rinder (Gülle) t TS	Rinder (Mist) t TS	Rinder (Total) t TS	Rinder (Gülle) t OS	Rinder (Mist) t OS	Rinder (Total) t OS	Rinder Primärenergie GJ	Rinder Methanertrag m³	Rinder Methanertrag GJ	Pferde (Mist) t TS	Pferde (Mist) t OS	Pferde Primärenergie GJ
AARGAU	59497	59291	118788	41475	48168	89643	1882505	18263265	655341	25612	21953	461009
APPENZELL A.RH.	17966	16270	34236	12707	13156	25863	543121	5195030	186413	2104	1804	37876
APPENZELL I.RH.	11715	10332	22047	8294	8363	16657	349799	3334888	119666	739	634	13306
BASEL-LANDSCHAFT	20450	20036	40487	14356	16214	30570	641971	6206918	222723	8362	7168	150520
BASEL-STADT	196	246	442	132	202	333	6998	70144	2517	160	137	2873
BERN	242368	227123	469491	171065	183545	354610	7446807	71545980	2567284	59476	50980	1070572
FREIBURG	101171	97394	198565	71736	78273	150010	3150200	30328731	1068286	18388	15761	330977
GENF	1383	1900	3283	958	1519	2477	52009	523366	18780	5867	5029	105613
GLARUS	8891	8470	17361	6297	6818	13116	275426	2649158	95060	941	806	16934
GRAUBUENDEN	45346	51847	97193	31651	41705	73356	1540472	15173850	544483	14729	12625	265129
JURA	38769	42345	81114	27203	34034	61237	1285972	12588915	451728	20929	17939	376715
LUZERN	121251	109654	230905	85217	89161	174378	3661931	35072733	1258515	16884	14472	303912
NEUENBURG	29935	29865	59800	21190	23983	45173	948635	9174290	329201	7127	6109	128293
NIDWALDEN	10281	9119	19400	7267	7389	14657	307788	2937401	105403	769	659	13835
OBWALDEN	14726	13291	28017	10465	10707	21172	444609	4246451	152375	1235	1058	22226
SCHAFFHAUSEN	8942	10108	19051	6151	8210	14361	301576	2975086	106755	2633	2257	47401
SCHWYZ	33193	31751	64943	23473	25583	49056	1030179	9916735	355842	5582	4784	100472
SOLOTHURN	32373	31441	63814	22784	25407	48191	1012007	9769288	350551	12970	11117	233453
ST. GALLEN	111622	100438	212059	78849	81342	160191	3364010	32162830	1154099	18089	15505	325609
TESSIN	7913	7318	15231	5566	5938	11504	241581	2319365	83226	8547	7326	153846
THURGAU	68475	55347	123822	48274	45268	93542	1964373	18557988	665916	16443	14094	295974
URI	8221	8089	16310	5795	6521	12317	258649	2499635	89694	366	331	6955
WAADT	75123	79311	154434	52955	63664	116619	2448995	23859206	856140	27934	23944	502816
WALLIS	22501	22624	45125	15886	18196	34082	715721	6931863	248736	11714	10040	210848
ZUERICH	71554	66096	137650	50156	53771	103927	2182461	20966110	752327	29329	25139	527915
ZUG	18981	20856	39838	13585	16522	30107	632237	6168141	221331	3944	3380	70988
TOTAL CH	1182842	1130564	2313405	833487	913657	1747144	36690031	353437368	12682393	320893	275051	5776067

(Fortsetzung)

NAME	Pferde Methanertrag m³	Pferde Methanertrag GJ	Schafe (Mist) t TS	Schafe (Mist) t OS	Schafe Primärenergie GJ	Schafe Methanertrag m³	Schafe Methanertrag GJ	Ziegen (Mist) t TS	Ziegen (Mist) t OS	Ziegen Primärenergie GJ
AARGAU	5597964	200872	10009	7414	155696	1779379	63849	836	620	13010
APPENZELL A.RH.	459918	16503	3554	2632	55280	631766	22670	642	476	9986
APPENZELL I.RH.	161568	5798	1320	978	20537	234710	8422	400	297	6229
BASEL-LANDSCHAFT	1827738	65585	3597	2664	55947	639389	22943	378	280	5873
BASEL-STADT	34884	1252	7	5	114	1306	47	4	3	60
BERN	12999798	466472	27187	20138	422905	4833197	173430	6713	4973	104429
FREIBURG	4019004	144214	6895	5107	107250	1225709	43982	1457	1079	22667
GENF	1282446	46018	1089	807	16944	193651	6949	93	69	1452
GLARUS	205632	7379	1362	1009	21183	242088	8687	638	473	9925
GRAUBUENDEN	3219426	115523	23118	17124	359607	4109789	147472	4999	3703	77757
JURA	4574394	164143	2645	1960	41152	470309	16876	931	689	14475
LUZERN	3690360	132421	8197	6072	127504	1457184	52288	1938	1436	30146
NEUENBURG	1557846	55900	999	740	15532	177514	6370	277	205	4308
NIDWALDEN	167994	6028	1673	1239	26018	297350	10670	682	505	10604
OBWALDEN	269892	9685	1445	1070	22472	256824	9216	440	326	6848
SCHAFFHAUSEN	575586	20654	1201	890	18680	213480	7660	43	32	665
SCHWYZ	1220022	43778	9409	6970	146363	1672718	60022	1650	1222	25664
SOLOTHURN	2834784	101721	4070	3015	63312	723562	25964	502	372	7809
ST. GALLEN	3953826	141875	18192	13475	282983	3234091	116049	3083	2284	47961
TESSIN	1868130	67034	7047	5220	109625	1252862	44956	5142	3809	79988
THURGAU	3593970	128962	9382	6950	145940	1667890	59849	482	357	7493
URI	84456	3031	3606	2671	56086	640982	23000	785	582	12217
WAADT	6105618	219088	5825	4315	90618	1035638	37162	1064	788	16545
WALLIS	2560302	91871	26079	19318	405668	4636205	166361	2848	2110	44305
ZUERICH	6410394	230024	8083	5987	125730	1436914	51561	1051	779	16350
ZUG	862002	30931	2801	2075	43565	497890	17866	508	376	7903
TOTAL CH	70137954	2516760	188788	139843	2936710	33562397	1204319	37586	27841	584667

Theoretisches Potenzial von Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung (B)

NAME	Ziegen Methanertrag m3	Ziegen Methanertrag GJ	Schweine (Gülle) t TS	Schweine (Gülle) t OS	Schweine Primärenergie GJ	Schweine Methanertrag m3	Schweine Methanertrag GJ	Geflügel t TS	Geflügel t OS
AARGAU	148685	5335	9302	6278	131844	1569568	56321	5707	3868
APPENZELL A.RH.	114125	4095	1992	1344	28229	336055	12059	543	370
APPENZELL I.RH.	71194	2555	2237	1515	31810	378695	13589	890	610
BASEL-LANDSCHAFT	67123	2409	1148	787	16527	196754	7060	886	606
BASEL-STADT	691	25	5	3	67	792	28	5	4
BERN	1193472	42825	25858	17501	367528	4375330	157000	8061	5418
FREIBURG	259046	9295	7376	4950	103944	1237423	44402	6913	4612
GENF	16589	595	131	88	1845	21959	788	26	18
GLARUS	113434	4070	179	119	2493	29674	1065	147	101
GRAUBUENDEN	886653	31888	471	315	6621	78823	2828	566	382
JURA	165427	5936	1383	937	19676	234235	8405	870	588
LUZERN	344525	12363	41885	28362	595610	7090596	254432	5463	3675
NEUENBURG	49229	1766	672	452	9492	113002	4055	530	361
NIDWALDEN	121190	4349	1029	690	14486	172447	6188	391	267
OBWALDEN	78259	2808	928	621	13035	155182	5568	332	225
SCHAFFHAUSEN	7603	273	1937	1309	27479	327126	11738	1354	911
SCHWYZ	293299	10524	1822	1225	25732	306330	10992	938	636
SOLOTHURN	89242	3202	2724	1847	38791	461798	16571	1096	736
ST. GALLEN	548122	19668	16782	11301	237319	2825221	101377	4365	2949
TESSIN	914150	32802	319	219	4594	54694	1963	70	48
THURGAU	85632	3073	18185	12266	257582	3066450	110033	4874	3278
URI	139622	5010	187	124	2597	30918	1109	57	39
WAADT	189082	6785	4248	2869	60246	717210	25736	3501	2344
WALLIS	506342	18169	154	105	2203	26230	941	349	239
ZUERICH	186854	6705	3873	2629	55213	657300	23586	2679	1820
ZUG	90317	3241	1892	1282	26924	320522	11501	494	335
TOTAL CH	6681907	239767	146716	99137	2081884	24784333	889336	51107	34438

(Fortsetzung)

NAME	Geflügel Primärenergie GJ	Geflügel Methanertrag m3	Geflügel Methanertrag GJ	Total TS	Total OS	Total Primär- energieinhalt GJ	Total Methan- ertrag m3	Total Methan- ertrag GJ
AARGAU	81218	1096159	39333	170254	129775	2725281	28455019	1021051
APPENZELL A.RH.	7766	104962	3766	43071	32488	682257	6841856	245506
APPENZELL I.RH.	12801	173561	6228	27634	20690	434482	4354615	156257
BASEL-LANDSCHAFT	12726	172447	6188	54858	42074	883564	9110370	326907
BASEL-STADT	75	1020	37	623	485	10187	108837	3905
BERN	113770	1529683	54890	596786	453619	9526009	96477459	3461901
FREIBURG	96847	1297514	46559	239593	181518	3811883	38367428	1376738
GENF	380	5158	185	10490	8488	178243	2043169	73315
GLARUS	2111	28657	1028	20627	15623	328073	3268642	117289
GRAUBUENDEN	8026	108185	3882	141075	107505	2257612	23578725	846075
JURA	12341	166340	5969	107872	83349	1750331	18199620	653057
LUZERN	77167	1037983	37246	305271	228394	4796269	48693381	1747265
NEUENBURG	7582	102559	3680	69405	53040	1113842	11174439	400972
NIDWALDEN	5599	75794	2720	23943	18016	378330	3772176	135357
OBWALDEN	4731	63903	2293	32396	24472	513922	5070511	181945
SCHAFFHAUSEN	19127	257256	9231	26219	19758	414928	4356138	156311
SCHWYZ	13364	180460	6475	84344	63894	1341774	13589565	487634
SOLOTHURN	15453	207683	7452	85176	65277	1370823	14086356	505461
ST. GALLEN	61931	834601	29948	272571	205705	4319813	43558691	1563017
TESSIN	1008	13662	490	36357	28126	590643	6422864	230472
THURGAU	68835	925785	33220	173188	130486	2740197	27897715	1001054
URI	822	11155	400	21332	16063	337326	3406769	122245
WAADT	49228	660720	23709	197006	150878	3168447	32567474	1168619
WALLIS	5019	68051	2442	86268	65894	1383764	14728993	528520
ZUERICH	38229	516565	18536	182664	140281	2945898	30174137	1082739
ZUG	7040	95121	3413	49476	37555	788658	8033993	288284
TOTAL CH	723197	9734983	349320	3058496	2323455	48792556	498338943	17881896

Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz

Potenzialanalyse des Hofdüngers aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung der Schweiz

Hofdünger	Menge Frischsubstanz (Tonnen)	Menge Trockensubstanz (Tonnen TS)	Menge org. Trockensubstanz (Tonnen oTS)	Primär-energieinhalt (PJ)	Potenzieller Biomethanertrag (PJ)	Bemerkung
Theoretisches Potenzial	24'218'000	3'058'000	2'323'500	48.8	17.9	jährlich total anfallende Hofdüngermenge aus der Nutztierhaltung in der Schweiz
Zwischenpotenzial	21'414'100	2'649'300	1'963'200	42.2	15.5	Abzug von Verlusten durch Weidegang
Nachhaltiges Potenzial	13'964'300	1'692'900	1'254'500	26.9	9.9	Abzug von Gebieten mit zu geringem Hofdüngeranfall
Bereits genutztes Potenzial	1'345'600	163'100	122'200	2.6	1.0	Biomethanertrag gemäss der Schweizerischen Statistik der erneuerbaren Energien 2013
Zusätzlich nutzbares Potenzial	12'618'700	1'529'800	1'132'300	24.3	8.9	

Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau



Bild: Vanessa Burg, WSL

Vanessa Burg

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	182
1 Einleitung.....	183
1.1 Zielsetzung und Überblick	183
1.2 Aktuelle Situation Schweiz.....	184
2 Methoden.....	185
2.1 Datengrundlage und Kenngrössen	185
2.2 Theoretisches Potenzial.....	186
2.3 Nachhaltiges Potenzial	189
2.4 Bereits genutztes Potenzial	190
2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial.....	191
3 Resultate	191
3.1 Theoretisches Potenzial.....	191
3.2 Nachhaltiges Potenzial	194
3.3 Gesamtschau der Potenziale	196
4 Diskussion und Folgerungen	198
Literatur	200
Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene	201
Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz	202

Abkürzungen

BFE	Bundesamt für Energie	KEV	Kostendeckende
BFS	Bundesamt für Statistik		Einspeisevergütung
BioSweet	Biomass for Swiss Energy Future	NI	Normliter
DÜV	Düngerverordnung	oTS	Organische Trockensubstanz
FS	Frischsubstanz	PJ	Petajoule (10^{15})
GRUDAF	Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau	RPV	Raumplanungsverordnung
HAFL	Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften	SCCER	Swiss Competence Center for Energy Research
Hu	Unterer Heizwert	TJ	Terajoule (10^{12})
		TS	Trockensubstanz

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung und Überblick

Unter «Nebenprodukten aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau» werden die Rückstände nach der Ernte des eigentlichen Hauptproduktes sowie integrierte Zwischenkulturen verstanden. Zu den Ernterückständen gehören beispielweise verschiedene Stängel-, Kraut- oder Stroharten. Diese werden gemäss heutiger Praxis teilweise einer weiteren Verwertung zugeführt (z.B. als Futter oder Einstreu für die Tierhaltung), grösstenteils jedoch auf dem Feld liegen gelassen und durch den Einsatz von Bodenfräse, Grubber oder Pflug in den Boden eingearbeitet. Der Anbau von Zwischenkulturen zur Bedeckung des Bodens nach der Ernte des Hauptproduktes stellt, neben den klassischen Funktionen, wie der Reduktion von Nitratauswaschungen, Erosion, und der Rückführung von organischer Substanz, ein zusätzliches Potenzial dar.

Um eine mit den anderen Biomasserressourcen vergleichbarere Basis zu schaffen, werden sowohl anfallende Menge (Frischsubstanz, Trockensubstanz, organische Trockensubstanz) als auch Energieinhalt (Primärenergieinhalt, potenzieller Biomethanertrag) und räumliche Verteilung abgeschätzt. Untersucht wird die Energiemenge, die in der Ressource steckt. Nicht Teil dieser Arbeit ist die Möglichkeit einer besseren Energieausbeute durch Vorbehandlung, Effizienzsteigerung oder optimierte Prozesse. Die Potenzialebenen in diesem Teilbericht sind wie folgt definiert und quantifiziert:

Theoretisches Potenzial

Gesamte Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau, die neben der Ernte des Hauptproduktes in einem Jahr in der Schweiz anfallen («Jährliches Aufkommen»). Es ist zu bemerken, dass Heu (Weiden, Wiesen) sowie Getreide-Stroh, welche derzeit in erster Linie zur Tierfütterung oder als Einstreu verwendet werden, nicht eingerechnet wurden. Im Sinne einer Kaskadennutzung wird diese Biomasse zunächst der Tierhaltung zugeführt und das energetische Potenzial als Teil der Ausscheidungen ausgewiesen (siehe Teilbericht «Hofdünger»). Eine Anrechnung zum theoretischen Potenzial würde zu einem Nutzungskonflikt respektive zu einer Doppelzählung führen. Integrierte Zwischenkulturen wurden gemäss heutiger Praxis berücksichtigt. → Kapitel 2.2

Nachhaltiges Potenzial

Theoretisches Potenzial nach Abzug der Menge, welche aufgrund nutzungsbedingter Einschränkungen nach heutigem Stand nicht für eine energetische Verwertung mobilisierbar ist. → Kapitel 2.3

Bereits genutztes Potenzial

Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau, welche heute in der Schweiz bereits energetisch genutzt werden. Dieser Anteil ist sehr gering, wobei die energetische Verwertung aktuell durch Vergärung erfolgt. → Kapitel 2.4

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial. → Kapitel 2.5

1.2 Aktuelle Situation Schweiz

Die Landwirtschaft trägt zur Versorgung der Bevölkerung mit Lebensmitteln bei und hat eine hohe Verantwortung für die Umwelt und die Landschaft. Gegenwärtig bewirtschaften die Schweizer Landwirte über eine Million Hektar Land (25% der Landesfläche) [6], wobei diese Fläche in den letzten Jahren leicht abgenommen hat (22'000 ha weniger zwischen 2000 und 2013) [7].

Wegen der klimatischen und topografischen Verhältnisse ist die Schweiz ein typisches Grasland. Mehr als zwei Drittel der landwirtschaftlichen Nutzfläche sind Weiden oder Wiesen [6] (siehe Abbildung 1). Diese Grünfläche dient als Hauptfutterquelle für die Tierhaltung und besteht wiederum zu 83% aus Naturwiesen und -weiden [5]. Naturwiesen werden über mehrere Jahre ohne Neuansaat genutzt. Die Weiden sind Grünflächen, die nicht gemäht werden, sondern den Tieren als Futtergrundlage im Freien dienen. Beim Rest handelt es sich um Kunstwiesen, die nur während einer oder zwei Vegetationsperioden futterbaulich genutzt werden und in der ackerbaulichen Fruchtfolge integriert sind. Der Anbau von Ackerkulturen erfolgt auf etwa einem Viertel der Fläche in den tieferen Lagen des Mittellandes [5, 6]. Bei den Ackerkulturen ist Getreide mit 147'000 ha die hauptsächlich angebaute Kulturart, wobei Weizen die wichtigste Getreidesorte darstellt (Abbildung 1). Auf den restlichen Flächen wachsen Dauerkulturen wie Reben oder Obst.

Seit mehreren Jahrzehnten nimmt die Zahl der landwirtschaftlichen Betriebe stetig ab. Im Jahr 2000 wurden noch über 70'000 Betriebe gezählt, im Jahr 2013 waren es noch rund 55'000 [8]. Dabei besteht ein Trend zu grösseren Betrieben. Die durchschnittliche landwirtschaftliche Nutzfläche pro Betrieb nahm zwischen 2000 und 2013 von 15 ha auf 19 ha zu [7].

Der Nahrungsbedarf der inländischen Wohnbevölkerung wurde im Jahr 2013 zu 60% durch pflanzliche und tierische Nahrungsmittel aus der Schweizer Landwirtschaft gedeckt (Selbstversorgungsgrad brutto) [8]. In der Nutztierhaltung wurden 15% des gesamten Futterangebotes importiert [11].

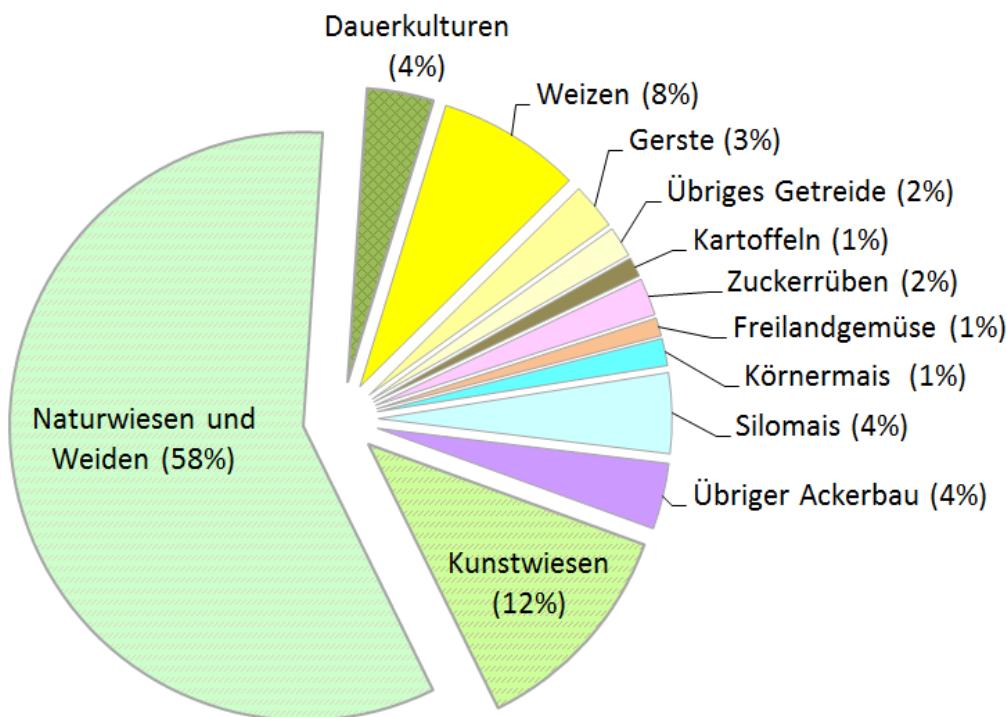


Abbildung 1: Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Nutzfläche 2013 [5].

2 Methoden

2.1 Datengrundlage und Kenngrößen

Jährlich wird vom Bundesamt für Statistik (BFS) eine umfassende landwirtschaftliche Betriebsstrukturerhebung durchgeführt und die Grundinformationen sämtlicher Landwirtschaftsbetriebe erfasst [5]. Dazu gehören beispielsweise die Nutzungsrichtung, die landwirtschaftliche Nutzfläche oder die angebauten Kulturpflanzen. Diese Grundinformationen basieren hauptsächlich auf Daten, die im Rahmen des Vollzugs von Direktzahlungen und anderer Verwaltungstätigkeiten gesammelt werden. Diese detaillierte Erhebung diente als Startpunkt zur Ermittlung des theoretischen Potenzials von Nebenprodukten aus dem Ackerbau für die energetische Nutzung in der Schweiz (Kapitel 2.2). Mit einer Stichprobe von über 15'000 Betrieben hat das BFS im Jahr 2010 eine statistische Zusatzerhebung durchgeführt [4]. Die zusätzlich erhobenen Variablen geben Auskunft über Betriebsführung, Winterbodenbedeckung und Bodenbearbeitung. Aus dieser Erhebung konnten Angaben zum Anbau von Zwischenkulturen entnommen werden.

Für alle Biomassenpotenziale werden sowohl Ressourcenmenge als auch Energieinhalt berechnet. Um die verschiedenen Biomassen miteinander vergleichen zu können, werden die Mengen nicht nur in Tonnen Frischsubstanz, sondern jeweils auch in Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz angegeben. Zur Umrechnung der Frischsubstanz auf Trockensubstanz (TS) wurden die Richtwerte aus den Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau verwendet [12] (GRUDAF 2009, vgl. Tabelle 1). Zur Abschätzung der organischen Trockensubstanz (oTS) dienten die Erfahrungswerte des «Grünen Buches» der Forschungsanstalt Agroscope [1] (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Typische Gehalte an Trockensubstanz (TS) [12] und organischer Trockensubstanz (oTS) [1] der landw. Nebenprodukte in der Schweiz.

Nebenprodukt	Gehalte in % der bei der Ernte anfallenden Nebenprodukte)		Annahme
	TS	oTS	
<i>Getreide</i>			
Weizen	85	79	-
Gerste	85	80	-
Hafer	85	77	-
Roggen	85	79	-
Triticale	85	81	-
Dinkel und übrige Getreide	85	80	Annahme oTS ≈ Gerste
<i>Übrige Ackerpflanzen</i>			
Eiweißerbsen	85	78	Annahme oTS ≈ Ackerbohnen
Ackerbohnen	85	78	-
Lupinen	85	78	Annahme oTS ≈ Ackerbohnen
Körnermais	85	81	-
Rübenkraut	15	12	Blätter und Köpfe
Kartoffelkraut	8	7	Nur Kraut
Raps	85	73	-
Soja, Tabak	85	73	Annahme ≈ Raps
Sonnenblume	60	52	-
Freilandgemüse	20	19	Annahme ≈ Grüne Erbsen
Hanf, Lein	60	52	Annahme ≈ Sonnenblume
Zwischenkulturen	20	19	Annahme ≈ Grüne Erbsen

In einem zweiten Schritt wurde die in der Biomasse enthaltene Energie – die Primärenergie – berechnet. Diese Energiemenge bezieht sich auf den unteren Heizwert (Hu) der Trockensubstanz und ist unabhängig von Nutzungspfaden. Somit wird die gesamte enthaltene Energiemenge der Energieträger angegeben. Die

Berechnung erfolgte rein rechnerisch über die Zuweisung von charakteristischen TS- und oTS-Werten [1]. Der Heizwert der verschiedenen landwirtschaftlichen Ernterückstände wurde aufgrund der organischen Trockensubstanz abgeschätzt. Für 100% organische Substanz wurde dabei ein unterer Heizwert von 21 MJ/kg angenommen [19]. Auf diese Weise wurde beispielweise bei Weizen mit einem Gehalt an organischer Substanz von 925 g/kg TS einen unterer Heizwert von 19.4 MJ/kg bestimmt.

$$Energieinhalt_{TS} [MJ] = Masse_{TS} [kg] \times \text{Unterer Heizwert} [MJ/kg_{TS}]$$

Bei den vergärbaren Biomassen wurde zudem auch der potenzielle Biometanertrag in Normliter (NL) ermittelt. Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Methanertrag}_{TS} [NL] \\ = Masse_{TS} [kg] \times \text{Anteil Organisch}_{TS} [-] \times \text{Biogasertrag}_{oTS} [NL/kg\ oTS] \times \text{Methangehalt} [-] \end{aligned}$$

Zur Abschätzung der Gasausbeute wurden, wenn vorhanden, die Richtwerte des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) [16] verwendet, ansonsten wurden eigene Annahmen getroffen (*Tabelle 2*). Mit einem unteren Heizwert für Methan von 35.883 MJ/m³ [9] lässt sich auch der Energieinhalt des Methanertrags berechnen.

Tabelle 2: Untere Heizwerte (berechnet aufgrund der organischen Trockensubstanz) und verwendete Ktbl [16]-Richtwerte für die Gasausbeute von landw. Nebenprodukten.

Nebenprodukt	Unterer Heizwert Hu bezogen auf die Trockensubstanz	Methanertrag
	(MJ/kg TS)	(l/kg oTS)
<i>Getreide</i>		
Weizen (Stroh)	19.4	208 (kurzgehäckselt)
Gerste (Stroh)	19.7	194
Hafer (Stroh)	18.9	Annahme ≈ Gerstenstroh (194)
Roggen (Stroh)	19.5	
Triticale (Stroh)	20.0	
Dinkel und übrige Getreide (Stroh)	19.7	
<i>Übrige Ackerpflanzen</i>		
Eiweißerbsen (Stroh)	19.3	Annahme ≈ Weizenstroh (208)
Ackerbohnen (Stroh)	19.3	
Lupinen (Stroh)	19.3	
Körnermais (Stroh)	20.1	250
Rübenkraut	17.2	345
Kartoffelkraut	17.2	231
Raps (Stroh)	18.1	339
Tabak (Stroh)	18.1	Annahme ≈ Raps (339)
Soja (Stroh)		
Sonnenblume (Stroh)	18.1	285
Freilandgemüse (Stroh)	19.5	Annahme Weizenstroh (208)
Hanf (Stroh)	18.1	Annahme ≈ Sonnenblume (285)
Lein (Stroh)		
Zwischenkulturen	19.5	Annahme ≈ Gerstenstroh (194)

2.2 Theoretisches Potenzial

Unter dem theoretischen Potenzial wird das gesamte jährliche Aufkommen an Nebenprodukten aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau verstanden, die neben der Ernte des Hauptproduktes in einem Jahr in der

Schweiz anfallen. Biomasse, die in erster Linie zur Tierfütterung oder als Einstreu verwendet wird – respektive Heu aus Wiesen und Weiden sowie bereits geerntetes Getreidestroh – wurde nicht eingerechnet. Im Sinne einer Kaskadennutzung wird diese Biomasse zunächst der Tierhaltung zugeführt und das energetische Potenzial als Teil der Ausscheidungen ausgewiesen (siehe Teilbericht «Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung»). Eine Anrechnung zum theoretischen Potenzial aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau würde zu einem Nutzungskonflikt beziehungsweise zu einer Doppelzählung führen.

Als Startpunkt zur Berechnung des theoretischen Potenzials wurde die Grösse der landwirtschaftlichen Nutzfläche und die dabei angebaute Pflanzenart gemäss landwirtschaftlicher Betriebsdatenerhebung des Jahres 2013 verwendet [5] (vgl. Abbildung 2). Folgende Ackerkulturen wurden berücksichtigt: Getreide (Weizen, Gerste, Hafer, Roggen, Triticale, Dinkel und übrige Getreide), Kartoffeln, Rüben, Körnermais, Hülsenfrüchte (Eiweisserbsen, Ackerbohnen, Lupinen), Raps, Sonnenblume, Tabak, Soja, Freilandgemüse, Lein und Hanf. Silo- und Grünmais wurden nicht eingerechnet, da angenommen wurde, dass diese Biomasse in erster Linie der Tierhaltung zugeführt wird. Dauerkulturen wie Obstanlagen, Reben, Zierbäume oder Spargeln wurden vernachlässigt.

Eine (teilweise) Ernte von Stroh mit dem Ziel einer Nutzung findet momentan in der Regel nur beim Getreidestroh statt, das verglichen mit den anderen Sortimenten (Ölsaaten, Mais und Leguminosen) in der Schweiz und in Europa mengenmässig die grösste Bedeutung hat [15]. Hier sind auch die jeweils eingesetzten Verfahren für Ernte bzw. Bergung am besten erprobt. Entsprechend wurde bei den Getreiden nur die sogenannte Spreu als Nebenprodukt berücksichtigt, welche gemäss heutiger Praxis ungenutzt auf dem Feld liegen bleibt. Gemäss Feldversuchen der Berner Fachhochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) fallen rund 0.6 und 1.1 Tonnen Spreu pro Getreide-Hektar an [17] (Tabelle 3). Das sind 5 bis 10% der gesamten Pflanzenmasse.

Die Richtwerte für den jährlichen Ertrag der verschiedenen Kulturen in der Schweiz stammen aus den Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau [12] (GRUDAF 2009, Tabelle 3). Die angegebenen Werte entsprechen den geernteten Erträgen des Hauptproduktes (ohne unvermeidbare Ernteverluste) und den durchschnittlich anfallenden Nebenprodukten. Der angegebene Referenzertrag (Tonnen/Hektar) wird dabei von den meisten Betrieben im Durchschnitt der Jahre erreicht und wird mit einem erntefrisch üblichen Wassergehalt angegeben. Neben halmartigen Substanzen (Getreide, Ölpflanzen, Körnermais, Hülsenfrüchte) fallen bei der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion weitere, meist relativ feuchte Erntereste an. So wird bei der Erzeugung von Hackfrüchten (z.B. Kartoffeln, Zuckerrüben) nur ein Teil als Lebensmittelprodukt genutzt, während 30 bis 40% der gesamten auf der Anbaufläche gewachsenen Biomasse als Ernterückstand zurückbleibt. Das Potenzial von integrierten Zwischenkulturen wurde gemäss heutiger Bewirtschaftung berücksichtigt. Gemäss BFS-Zusatzerhebung 2010 wurden knapp 90'000 ha identifiziert, die entweder i) bereits als Zwischenkultur zur Gründüngung genutzt werden (54%) oder ii) aktuell im Winter vegetationslos oder als Schwarzbrache stehen und als Zwischenkultur nutzbar wären (46%) [4]. Zwischenkulturen sind mit zahlreichen Vorteilen verbunden [18]. Sie dämmen das Unkraut ein, fördern die Bodenfruchtbarkeit, machen Nährstoffe besser verfügbar und verringern die Erosionsgefahr. Als Referenzertrag wurde ein in der Schweiz durchschnittlich zu erwartender Wert von 2.5 Tonnen TS pro Hektar und Zwischennutzung angenommen [12].

Durch Kombination der erhobenen Nutzflächen und der ausgewiesenen Referenzerträge kann für jede Kultur der jeweils zu erwartende Ertrag an Nebenprodukten berechnet werden. Es gilt:

$$\text{Ertrag}_{\text{Nebenprodukt}} [\text{t}] = \text{Fläche}_{\text{Kulturpflanze}} [\text{ha}] \times \text{Referenzertrag}_{\text{Nebenprodukt}} [\text{t}/\text{ha}]$$

Die Grundlagen zur Umrechnung der so berechneten Erträge in Trockensubstanz und organische Trockensubstanz sowie zur Berechnung der Energieinhalte sind im Kapitel 2.1 aufgeführt.

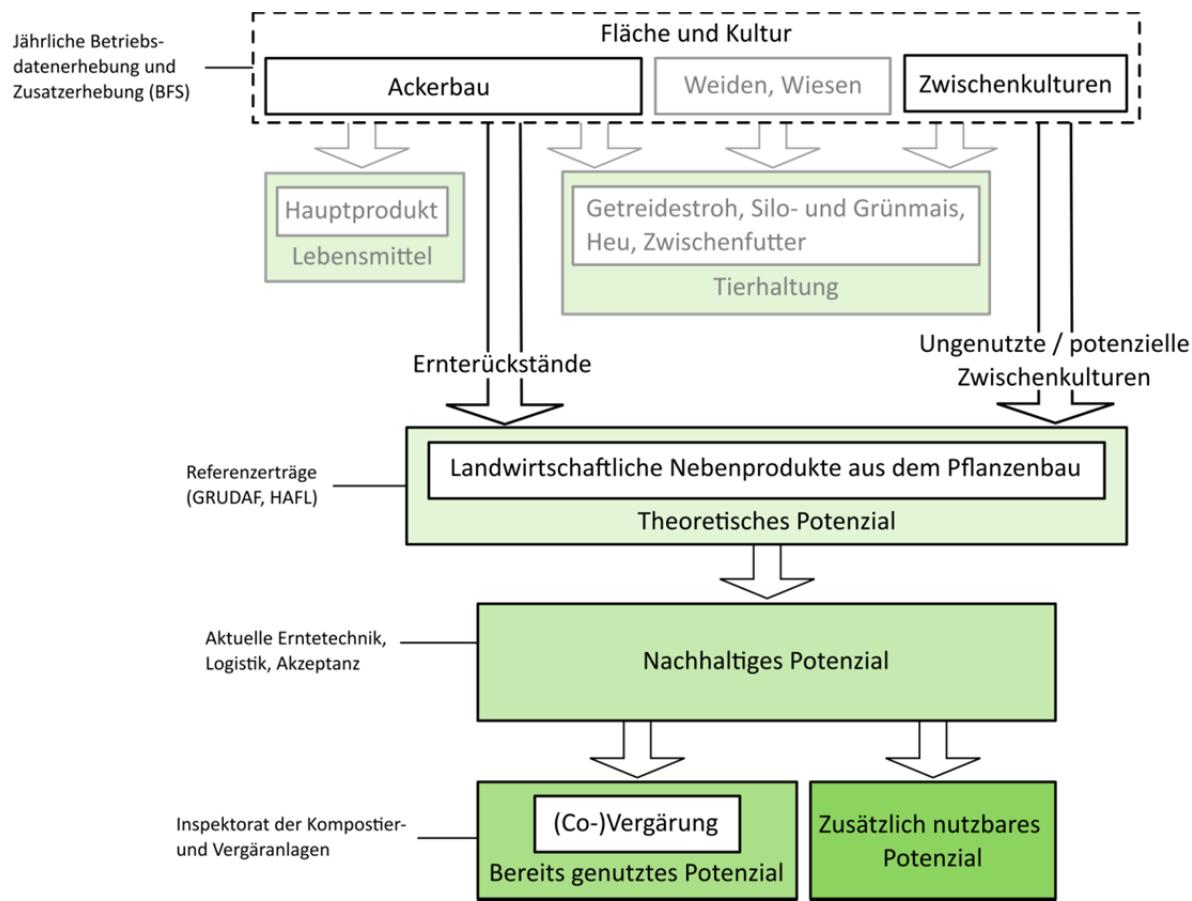


Abbildung 2: Modellansatz zur Ermittlung der energetischen Potenziale von landw. Nebenprodukten aus dem Pflanzenbau der Schweiz.

Tabelle 3: Richtwerte für den jährlichen Referenzertrag verschiedener Kulturen, unterteilt in Haupt- und Restpflanze (GRUDAF 2009) [12], sowie Angaben zur Getreidespreu (HAFL 2013) [17].

Kultur	Produkt	Referenzertrag (Tonnen /ha)	Nebenprodukt (Tonnen /ha)	Bemerkung
Weizen	Körner	5.5	1.1 (Spreu)	Ø Winter-, Sommer- und Futterweizen
	Restpflanze	6.5		
	Total	12		
Gerste	Körner	5.5	0.6 (Spreu)	Ø Winter- und Sommergerste
	Restpflanze	6		
	Total	11.5		
Hafer	Körner	5.5	0.6 (Spreu)	Annahme Spreu ≈ Gerste
	Restpflanze	7		
	Total	12.5		
Roggen	Körner	6	0.6 (Spreu)	Annahme Spreu ≈ Gerste
	Restpflanze	7.25		
	Total	13.25		
Triticale	Körner	5.75	1.0 (Spreu)	
	Restpflanze	7.25		
	Total	13		
Dinkel	Körner	7.5	0.6 (Spreu)	Annahme Spreu ≈ Gerste
	Restpflanze	7		
	Total	14.5		

Übrige Getreide	Körner	2.5	0.6 (Spreu)	Annahme Spreu ≈ Gerste
	Restpflanze	4.5		
	Total	7		
Kartoffeln	Knollen	45	20 (Kraut)	Speisekartoffeln
	Kraut	20		
	Total	65		
Rüben	Rüben	75	50 (Kraut / Köpfe)	Zuckerrüben
	Kraut / Köpfe	50		
	Total	125		
Mais	Körner	9.5	10.5 (Stängel / Blätter)	Nur Körnermais
	Stängel / Blätter	10.5		
	Total	20		
Silo- und Grünmais	Ganzpflanze	11.8	-	-> Tierhaltung
Raps	Körner	3	5.5 (Stängel / Blätter)	Ø Winter- und Sommerraps
	Stängel / Blätter	5.5		
	Total	8.5		
Sonnenblume	Körner	3	6 (Stängel / Blätter)	
	Stängel / Blätter	6		
	Total	9		
Eiweisserbsen	Körner	4	5 (Stängel / Blätter)	
	Stängel / Blätter	5		
	Total	9		
Ackerbohnen	Körner	4	4.5 (Stängel / Blätter)	
	Stängel / Blätter	4.5		
	Total	8.5		
Lupinen zu Futterzwecken	Körner	3	3 (Stängel / Blätter)	
	Stängel / Blätter	3		
	Total	6		
Freilandgemüse	Hauptprodukt	4	4.5 (Stängel / Blätter)	Annahme ≈ Ackerbohnen
	Stängel / Blätter	4.5		
	Total	8.5		
Hanf	Hauptprodukt	5.65	5 (Nebenprodukt)	Ø Faser- und Ölhanf
	Nebenprodukt	5		
	Total	10.65		
Lein	Hauptprodukt	3.25	2 (Nebenprodukt)	Ø Faser- und Ölein
	Nebenprodukt	2		
	Total	5.25		
Zwischenkultur	Ganzpflanze	2.5	2.5 (Ganzpflanze)	(in Tonnen TS)

2.3 Nachhaltiges Potenzial

Die verfügbare Menge an Biomasse und damit das theoretische Potenzial in der Schweiz wird durch verschiedene Restriktionen eingeschränkt. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen erhält man das nachhaltige Potenzial für die energetische Nutzung der Biomasse (vgl. Einleitung des Gesamtberichtes).

Heute verbleibt der Grossteil der landwirtschaftlichen Ernterückstände auf den Feldern und wird in den Boden eingearbeitet. Dies trägt zur Schliessung der Nährstoffkreisläufe bei sowie zur Erhaltung des Humusgehaltes im Boden. Humus dient als Nährstoffspeicher und spielt für die Bodenfruchtbarkeit eine zentrale Rolle. Durch die Bodenbearbeitung im landwirtschaftlichen Pflanzenbau wird der Humusabbau verstärkt, weshalb eine

ausreichende Zufuhr an organischer Substanz erfolgen muss. Gegebenenfalls kann der Abtransport der Biomasse durch den Anbau von Zwischenfrüchten ausgeglichen werden [15]. Da die Nebenprodukte saisonal anfallen, müsste eine entsprechende Lager- oder Anlagekapazität geschaffen werden, um eine energetische Nutzung zu ermöglichen. Aufgrund aktueller Erntetechnik, konkurrierender Nutzung (stoffliche Nutzung, Tierhaltung), Logistik und Kosten lassen sich die landwirtschaftlichen Nebenprodukte generell nur sehr bedingt energetisch nutzen.

Rübenblätter, Kartoffelkraut

Rübenblätter und Kartoffelkraut werden bei den aktuellen Ernteverfahren mehrheitlich vernichtet. Dieses Biomasseaufkommen könnte nur mit grossem technischem und logistischem Aufwand verfügbar gemacht werden. Für eine energetische Nutzung treten zudem mehrere Schwierigkeiten auf. Zum einen müsste das Substrat von anhaftender Erde befreit werden. Zum anderen ist die Lagerfähigkeit aufgrund der im Regelfall niedrigen Trockensubstanzgehalte und des saisonalen Anfalls schwierig [10]. Hierzu kommen noch konkurrierende Nutzungen (Tierfutter) und Akzeptanzprobleme. Aus diesen Gründen wurde angenommen, dass das nachhaltige Potenzial dieser Nebenprodukte zur energetischen Nutzung in der Schweiz gemäss heutiger Technik insgesamt betrachtet vernachlässigbar ist. Unter den jeweils spezifischen Rand- und Rahmenbedingungen ist ein sinnvoller beziehungsweise verhältnismässiger Einsatz als Energieträger im Einzelfall jedoch nicht auszuschliessen.

Getreidespreu

Getreidespreu, die heute ungenutzt auf den Feldern liegen bleibt, könnte entsprechend neuer Kenntnisse mit relativ geringem Mehraufwand gewonnen werden [20]. Somit wurde in dieser Studie angenommen, dass diese Biomasse grösstenteils für eine energetische Nutzung verwendet werden könnte. Aufgrund allfälliger Akzeptanz-Probleme und Nutzungskonflikte wurde jedoch eine Reduktion des theoretischen Potenzials um 20% angenommen. Der Abtransport dieses Materials, das aus Spelzen, Ährenspindeln, Unkrautsamen, Bruchkörnern und Kurzstrohteilchen besteht, müsste gegebenenfalls durch Massnahmen zur Nährstoffanreicherung (z.B. Zwischenfruchtanbau, Austrag von Gärgut usw.) ausgeglichen werden.

Übrige Ackerpflanzen und Zwischenkulturen

Die Ernte übriger Rückstände von strohliefernden Ackerpflanzen (Körnermais, Leguminosen, Ölsaaten) ist in der konventionellen Landwirtschaft nicht üblich, jedoch technisch möglicherweise durchführbar [15]. Unter Berücksichtigung aktueller Randbedingungen (Ernteverfahren, konkurrierende Nutzung, saisonaler Anfall, Logistik und Kosten) wurde angenommen, dass im Mittel rund 10% der anfallenden Nebenprodukte der übrigen Ackerpflanzen und Zwischenkulturen energetisch nutzbar sind [15].

2.4 Bereits genutztes Potenzial

Bisher werden landwirtschaftliche Nebenprodukte aus dem Pflanzenbau in der Schweiz nur sehr bedingt als Energieträger verwendet. Gemäss aktueller Praxis erfolgt die energetische Nutzung dabei durch Vergärung in sogenannten Biogasanlagen. Das anfallende Biogas kann anschliessend in einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage zu Strom und Wärme umgewandelt werden. Vergärungsanlagen gelten als landwirtschaftlich, wenn gemäss Raumplanungsverordnung (Art. 34a RPV) mehr als die Hälfte des vergorenen Materials (bezogen auf die Frischsubstanz) landwirtschaftlicher Herkunft ist. Das Inspektorat der Kompostier- und Vergäranlagen der Schweiz kontrolliert die Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften von Bund und Kantonen bei der Verwertung von biogenen Abfällen. Gleichzeitig werden auch Mengenstatistiken und Stoffflüsse erfasst. Im Jahre 2014 wurden total 243 Verwertungsanlagen – davon rund 45 landwirtschaftliche Biogasanlagen – in 20 Kantonen kontrolliert [14]. Dabei haben 11 Anlagenbetreiber angegeben, insgesamt rund 3800 Tonnen landwirtschaftliche Nebenprodukte zu vergären. Meistens wurden sie als Co-Substrat zusammen mit Hofdünger vergärt.

2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial

Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial – das ist die Menge Ernterückstände, die für eine energetische Verwertung mobilisierbar wäre, jedoch aktuell nicht energetisch genutzt wird.

3 Resultate

3.1 Theoretisches Potenzial

Ressourcenmenge

Die durchschnittlich pro Jahr zu erwartende Menge an anfallenden Nebenprodukten wurde für jede Ackerkultur in Tonnen Frischsubstanz berechnet (vgl. Kapitel 2.2). Die so berechnete Frischsubstanz wurde dann aufgrund von Kenngrössen in Trockensubstanz und in organische Trockensubstanz umgerechnet. Auf diese Weise wurde eine Gesamtmenge von knapp 580'000 Tonnen TS Ernterückstände pro Jahr ermittelt, was etwa 1.8 Mio. Tonnen Frischsubstanz entspricht. Der grösste Anteil besteht aus Rübenkraut, Getreidespreu und Maisstroh (*Abbildung 3*). Bei den Zwischenkulturen wurde zudem ein theoretisches Potenzial von total 210'000 Tonnen TS pro Jahr ermittelt.

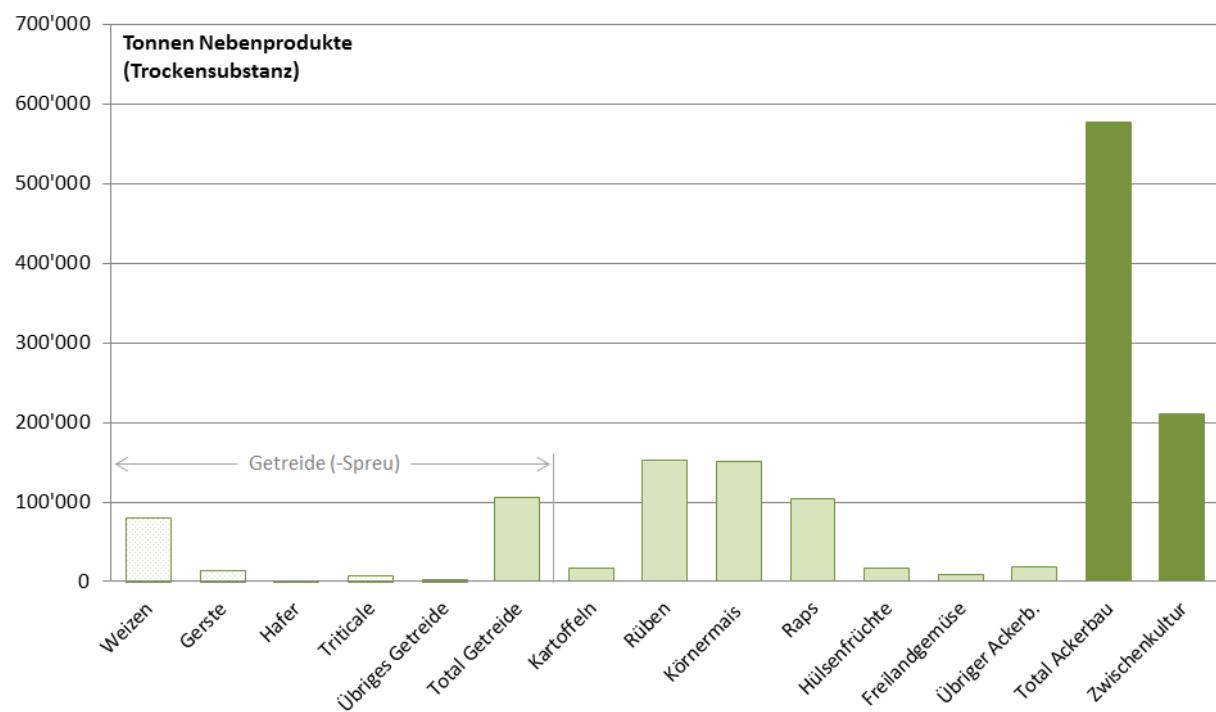


Abbildung 3: Theoretisches Potenzial der Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz, aufgeteilt nach Kulturpflanzen (Tonnen Trockensubstanz pro Jahr).

Das theoretische Potenzial der Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau der Schweiz beträgt somit total 790'000 Tonnen TS pro Jahr. Die Resultate sind in *Tabelle 4* zusammengefasst. Die Ernterückstände von Kartoffeln, Freilandgemüsen, Hülsenfrüchten und übrigen Ackerpflanzen wurden einfachheitshalber zusammengezählt. *Abbildung 4* gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung der gesamten Nebenprodukte. Erwartungsgemäss ist ein klar höheres Aufkommen im Schweizer Mittelland sowie in den Tälern zu erkennen.

Tabelle 4: Theoretisches Potenzial der Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz, Tonnen (t) pro Jahr.

	Frischsubstanz (t)	Trockensubstanz (t)	Org. Trockensubstanz (t)
Getreide	124'800	106'100	99'000
Rüben	1'019'700	153'000	122'400
Körnermais	177'000	150'500	143'400
Übriger Ackerbau	437'900	167'000	145'600
Ackerbau	1'759'400	576'600	510'400
Zwischenkulturen	1'051'600	210'300	189'300
Total Nebenprodukte	2'811'000	786'900	699'700



Abbildung 4: Theoretisches Potenzial und räumliche Verteilung der Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz in 1-km Auflösung (Tonnen Trockensubstanz).

Energieinhalt

Zusätzlich zur Ressourcenmenge wurde auch die gesamte in den Nebenprodukten enthaltene Energie – der Primärenergieinhalt – berechnet. Die Berechnung erfolgte durch Zuordnung der vorgängig ermittelten Trockensubstanzen auf charakteristische Heizwerte (vgl. Kapitel 2.1). Gemäss Berechnungen beträgt der Primärenergiegehalt der Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau der Schweiz somit total 14.9 PJ pro Jahr (*Tabelle 5*).

Tabelle 5: Theoretisches Potenzial, Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz, Energieinhalt (Petajoule PJ) pro Jahr.

	Primärenergieinhalt PJ	Pot. Biomethanertrag PJ
Getreide	2.068	0.726
Rüben	2.631	1.515
Körnermais	3.024	1.286
Übriger Ackerbau	3.041	1.574
Summe Ackerbau	10.764	5.101
Zwischenkulturen	4.101	1.318
Total Nebenprodukte	14.865	6.419

Abbildung 5 gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung auf kantonaler Ebene. Die Zahlen sind dem Anhang 1 zu entnehmen. Ersichtlich ist, dass der Kanton Waadt mit total 3.5 PJ (3.37+0.18) das grösste theoretische Potenzial aufweist, gefolgt von den Kantonen Bern (2.5 PJ), Zürich (1.8 PJ) und Aargau (1.4 PJ). Dies ist sowohl auf die Kantonsgrösse respektive die landwirtschaftliche Nutzfläche als auf die angebauten Kulturen zurückzuführen. So werden Getreide, Zuckerrüben und Körnermais, die den grössten Anteil des theoretischen Potenzials ausmachen, mehrheitlich in den Kantonen Waadt und Bern angebaut.

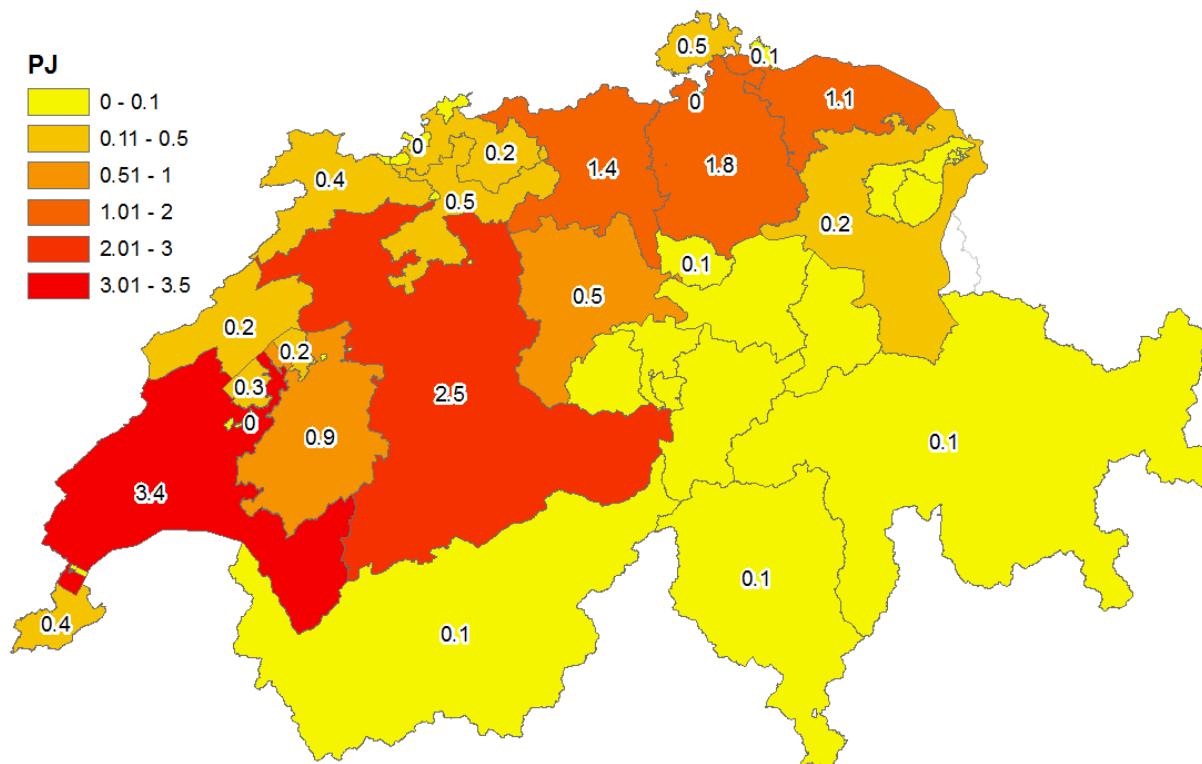


Abbildung 5: Theoretisches Potenzial und räumliche Verteilung des Primärenergieinhalts (Petajoule PJ) der Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz auf kantonaler Ebene.

Gemäss heutiger Praxis erfolgt die energetische Nutzung landwirtschaftlicher Nebenprodukte mittels anaerober Vergärung. Deshalb wurde auch der potenzielle Methanertrag der Nebenprodukte berechnet bzw. der potenzielle Energieinhalt aufgrund des Heizwertes von Methan. Gemäss Berechnungen beträgt der potenzielle Biomethanertrag der Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau der Schweiz total 6.4 PJ pro Jahr. Abbildung 6 zeigt die räumliche Verteilung auf kantonaler Ebene.

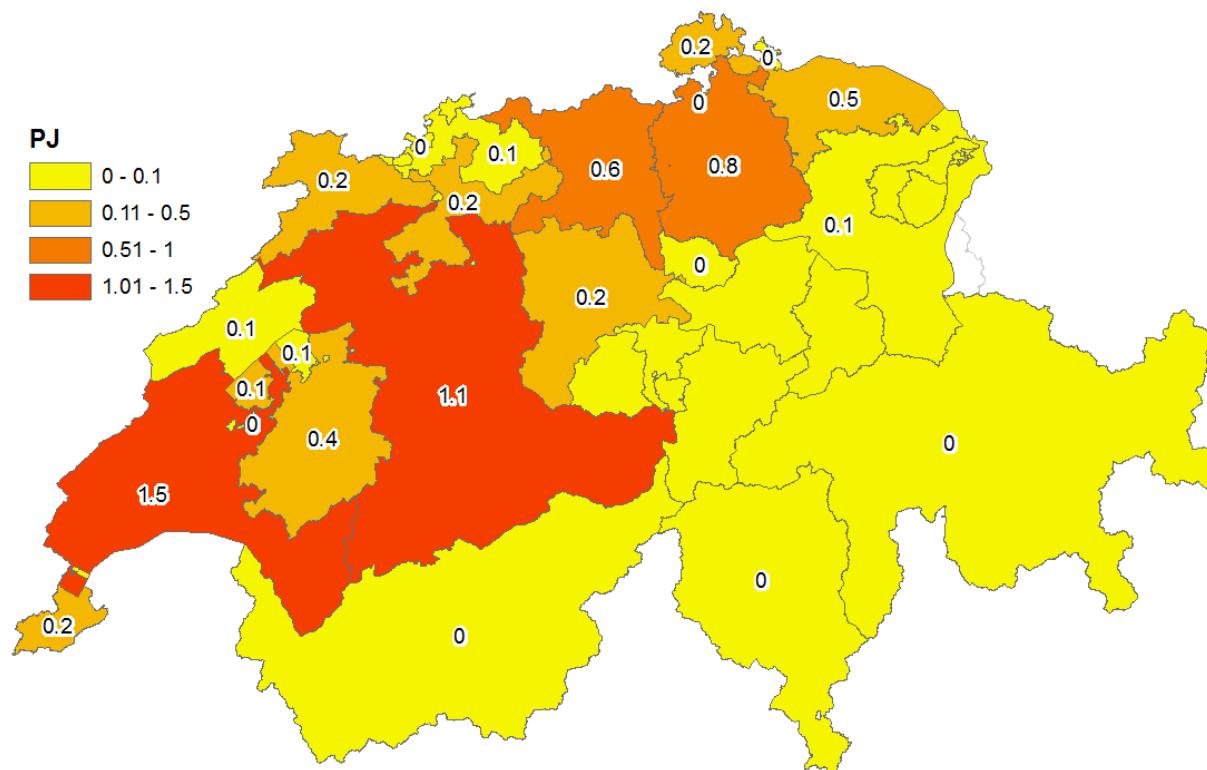


Abbildung 6: Theoretisches Potenzial und räumliche Verteilung des pot. Biomethanertrages (Petajoule PJ) der Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz auf kantonaler Ebene.

3.2 Nachhaltiges Potenzial

Aufgrund verschiedener Restriktionen verringert sich das theoretische Potenzial um diejenige Menge, die nach heutigem Stand voraussichtlich nicht energetisch nutzbar ist. Aufgrund der aktuellen Rahmenbedingungen in der Schweiz – sprich Erntetechnik, nutzungsbedingte Konkurrenzen (Tierhaltung, Bodenfruchtbarkeit), Logistik, Kosten und Akzeptanz – lassen sich die anfallenden Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau, wie bereits erwähnt, heute nur bedingt als Energieträger nutzen (vgl. Kapitel 2.3). Unter Berücksichtigung dieser nutzungsbedingten Restriktionen wurde ein nachhaltiges Potenzial von total 134'500 Tonnen TS respektive 2.6 PJ Primärenergieinhalt ermittelt (*Tabelle 6*).

Tabelle 6: Nachhaltiges Potenzial der Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz, Menge Trockensubstanz und Energieinhalt (Petajoule PJ) pro Jahr.

	Trockensubstanz Tonnen	Primärenergieinhalt PJ	Pot. Biomethanertrag PJ
Getreide	84'900	1.654	0.581
Körnermais	15'000	0.302	0.129
Übriger Ackerbau	28'600	0.576	0.273
Ackerbau	113'500	2.230	0.854
Zwischenkulturen	21'000	0.410	0.132
Total Nebenprodukte	134'500	2.641	0.986

Der grösste Anteil des ermittelten nachhaltigen Potenzials besteht aus der heute ungenutzten Getreidespreu und Zwischenkulturen (*Abbildung 7*).

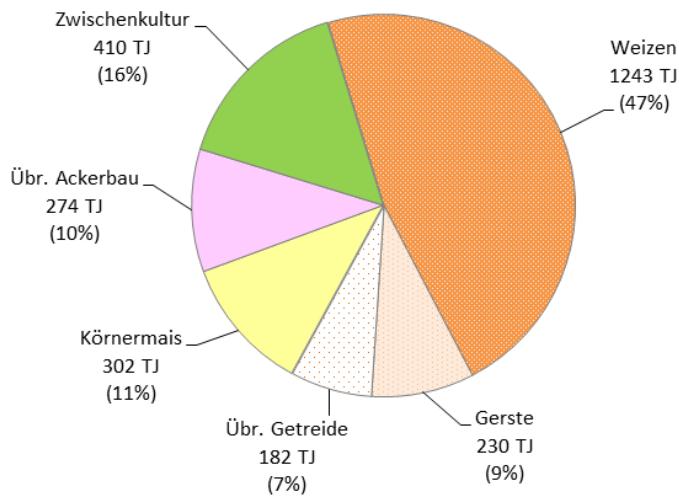


Abbildung 7: Nachhaltiges Potenzial, Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz, aufgeteilt nach Kulturpflanze (Primärenergieinhalt Terajoule TJ pro Jahr).

Abbildung 8 gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung auf kantonaler Ebene (Menge Trockensubstanz TS). Wie beim theoretischen Potenzial weist auch beim nachhaltigen Potenzial der Kanton Waadt (29'800 Tonnen TS) das grösste Potenzial auf, gefolgt vom Kanton Bern (22'000 Tonnen TS) und Zürich (13'600 Tonnen TS).

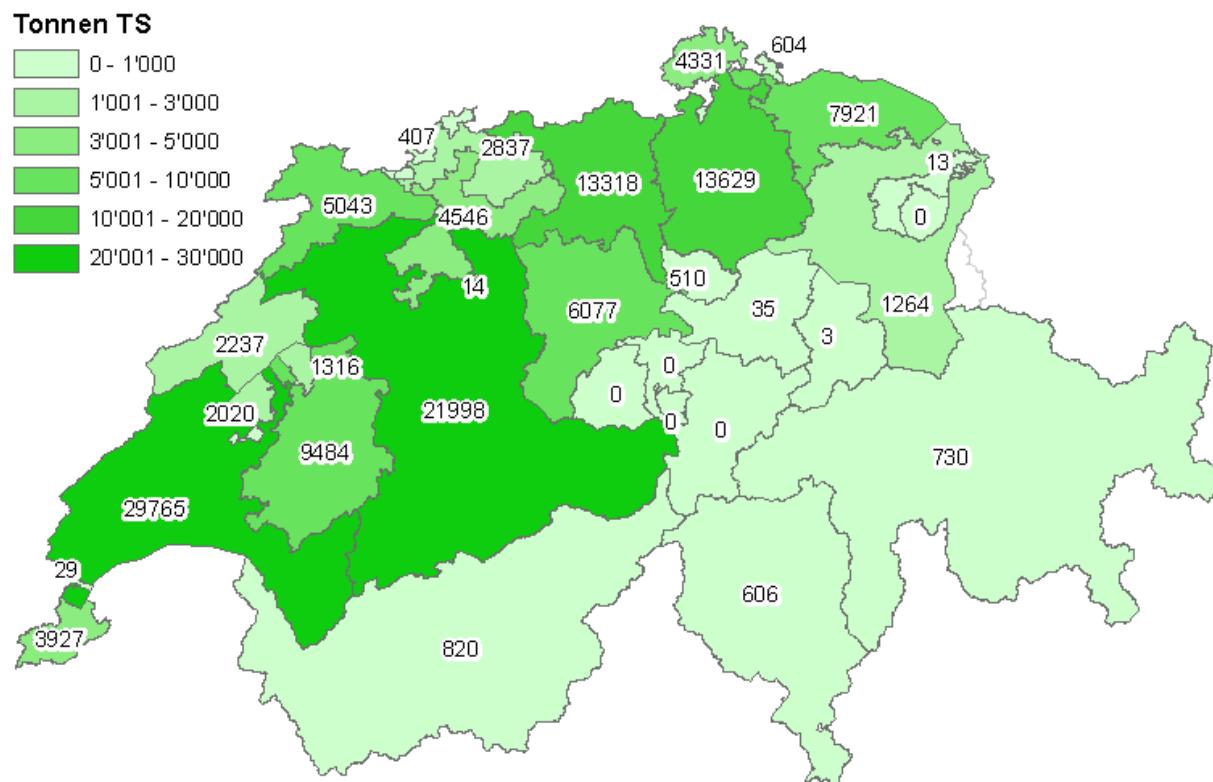


Abbildung 8: Nachhaltiges Potenzial und räumliche Verteilung der Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz auf kantonaler Ebene (Tonnen Trockensubstanz).

3.3 Gesamtschau der Potenziale

In den vorgängigen Kapiteln wurden das theoretische (3.1) und das nachhaltige Potenzial (3.2) der Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau der Schweiz ermittelt und dargestellt. Das bereits genutzte Potenzial wurde aufgrund der Erhebung im Jahr 2014 des Inspektorates der Kompostier- und Vergäranlagen der Schweiz abgeschätzt, bei der die rund 45 kontrollierten landwirtschaftlichen Biogasanlagen angegeben haben, insgesamt 3800 Tonnen landwirtschaftliche Nebenprodukte zu vergären [14]. Gemäss Schweizerischer Statistik der erneuerbaren Energien [3] gab es im 2014 total 98 landwirtschaftliche Biogasanlagen. Es wurde somit angenommen, dass schweizweit insgesamt 8000 Tonnen landwirtschaftliche Nebenprodukte bereits energetisch verwertet werden. Diese Menge Frischsubstanz entspricht umgerechnet etwa einer Menge Trockensubstanz von rund 2200 Tonnen Ernterückständen. Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial. Im Sinne einer Gesamtschau werden die verschiedenen Potenziale in diesem Kapitel nebeneinandergestellt.

Zusammenfassend zeigt *Abbildung 9* die verschiedenen Potenziale der ermittelten Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau in der Schweiz. Dabei wird zwischen Frischmasse, Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz unterschieden. Die Darstellung der Ressourcenmengen in verschiedenen Einheiten ermöglicht die Veranschaulichung grundsätzlicher Charakteristiken (wie beispielsweise dem Wassergehalt). Somit ist der Unterschied zwischen Frisch- und Trockensubstanz im Vergleich zu anderen trockenen Biomassen, wie z.B. Holz, bei den landwirtschaftlichen Nebenprodukten relativ hoch. Die genauen Zahlen sind dem Anhang 2 zu entnehmen.

Die Betrachtung je Potenzialebene ermöglicht Rückschlüsse auf die maximal mögliche Nutzung (theoretisches Potenzial), die aus heutiger Sicht nachhaltige Nutzung (nachhaltiges Potenzial), die heutige Nutzung (bereits genutztes Potenzial) sowie zukünftige Ausbaumöglichkeiten (zusätzlich nutzbares Potenzial). Gemäss Berechnungen wurde ein zusätzlich nutzbares Potenzial von knapp 240'000 Tonnen Frischsubstanz oder 130'000 Tonnen Trockensubstanz ermittelt.

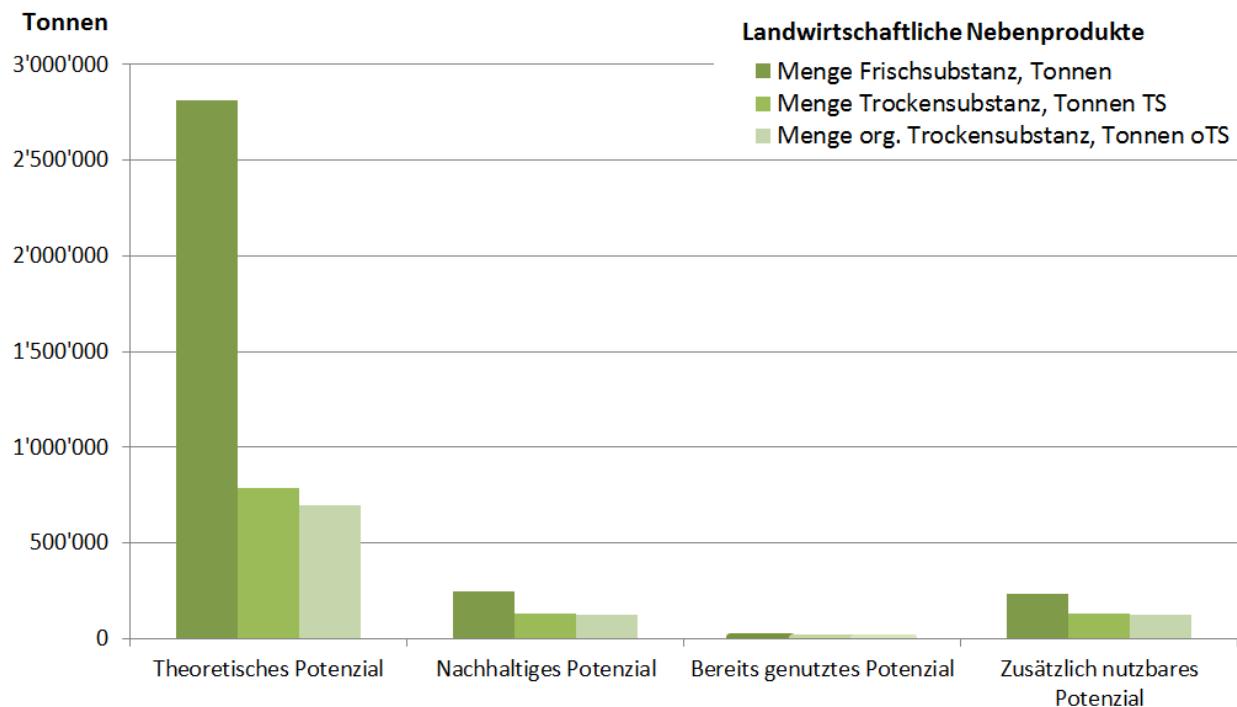


Abbildung 9: Potenzialanalyse der Menge Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz.

In *Abbildung 10* werden Primärenergieinhalt und potentieller Biomethanertrag der verschiedenen Potenziale nebeneinandergestellt. Der Primärenergieinhalt des theoretischen Potenzials von Ernterückständen beträgt

14.9 PJ. Nach Abzug der genannten Nachhaltigkeitsrestriktionen sowie der bereits energetisch genutzten Ernterückstände wurde ein zusätzlich nutzbarer Primärenergieinhalt von 2.6 PJ ermittelt. Dies entspricht einem zusätzlich nutzbaren Biomethanertrag von 0.97 PJ.

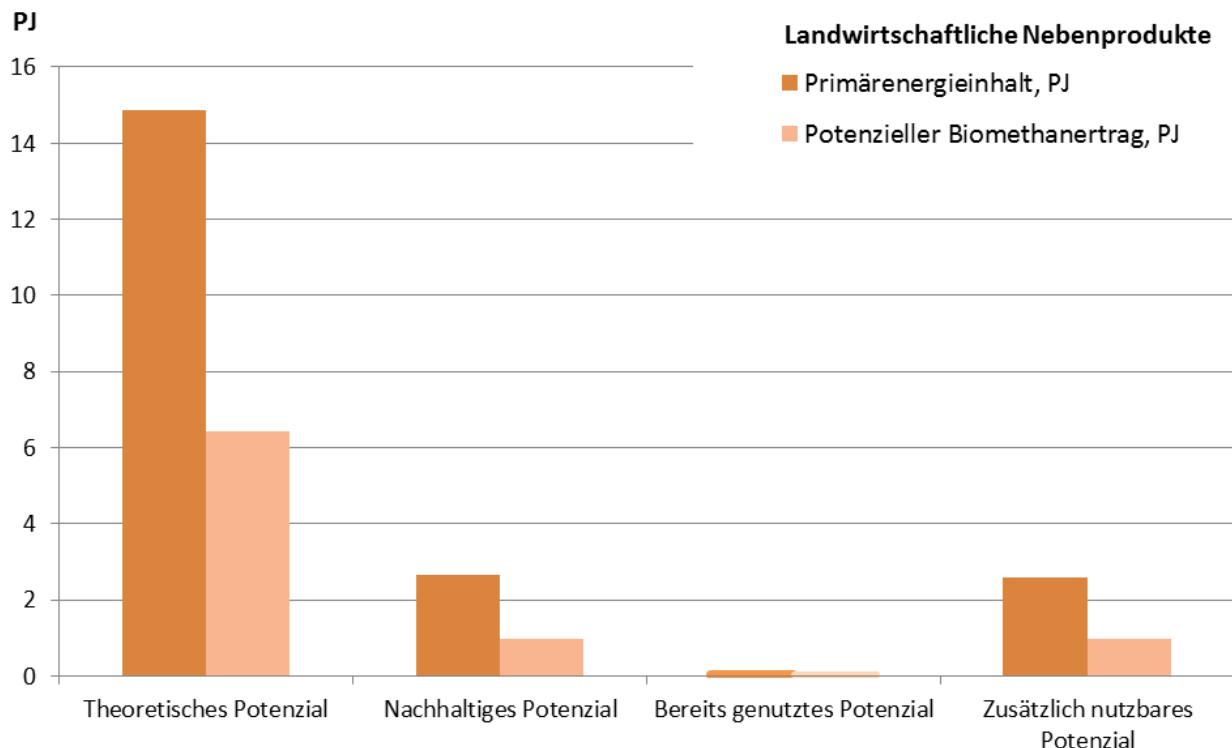


Abbildung 10: Potenzialanalyse der Energieinhalte der Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz.

Abbildung 11 zeigt die Verteilung des theoretischen Potenzials der landwirtschaftlichen Nebenprodukte auf die verschiedenen ermittelten Potenziale resp. Restriktionen. Die Angaben betreffen jeweils den Primärenergiegehalt (PJ), wobei die relative Verteilung resp. die Prozentangabe auch für die Ressourcenmenge gültig ist. Zur Veranschaulichung sind die blau dargestellten Restriktionen wiederum in verschiedene Hauptkulturen unterteilt. Ersichtlich ist, dass Rüben und Zwischenkulturen ein enormes zurzeit nicht energetisch nutzbares Potenzial aufweisen (zusammen 6.3 PJ bzw. 43% des theoretischen Potenzials). Dies hat sowohl mit den gängigen Ernteverfahren zu tun, als auch mit Konkurrenznutzungen, Akzeptanzproblemen und Logistik-Kosten (siehe Kapitel 2.3). Ersichtlich ist, dass das bereits genutzte Potenzial von Ernterückständen fast vernachlässigbar ist und weniger als 1% des theoretischen Potenzials entspricht. Das zusätzlich nutzbare Potenzial beträgt etwa 17% oder 2.6 PJ.

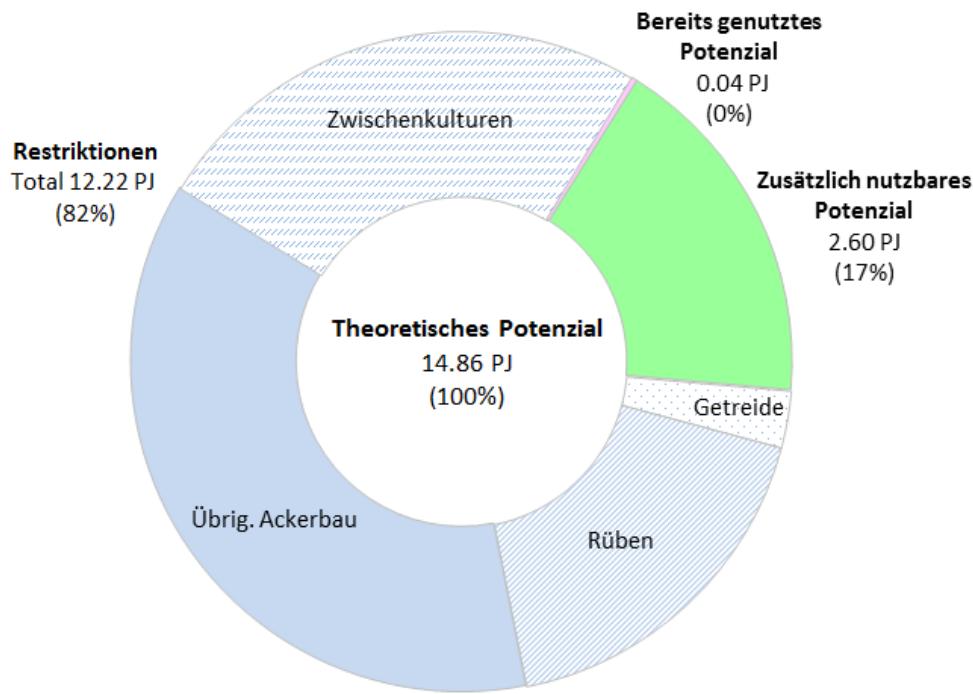


Abbildung 11: Aufteilung des theoretischen Potenzials der Nebenprodukte aus dem landw. Pflanzenbau in der Schweiz auf die verschiedenen ermittelten Restriktionen und die Potenziale «bereits genutzt» sowie «zusätzlich nutzbar» (Primärenergieinhalt, Petajoule PJ).

4 Diskussion und Folgerungen

Aktuell wird rund ein Viertel der Landesfläche landwirtschaftlich genutzt [6]. Entsprechend hoch ist die Verantwortung für die nachhaltige Bewirtschaftung dieser Flächen. Hauptaufgabe der Landwirtschaft ist die Versorgung der Schweizer Bevölkerung mit Lebensmitteln. In dieser Studie werden nur die Nebenprodukte, die neben der Ernte des Hauptproduktes anfallen, als theoretisches Potenzial für eine energetische Nutzung berücksichtigt. Hauptprodukte, die dem Konsum dienen, sowie Heu (Weiden, Wiesen) und Getreide-Stroh, welche derzeit in erster Linie zur Tierfütterung oder als Einstreu verwendet werden, wurden nicht als potenzielle Energieträger gezählt. Im Sinne einer Kaskadennutzung wird diese Biomasse zunächst stofflich genutzt und das energetische Potenzial als Teil der Ausscheidungen ausgewiesen. Eine Anrechnung zum theoretischen Potenzial würde zu einem Nutzungskonflikt resp. Doppelzählung führen. Integrierte Zwischenkulturen wurden gemäss heutiger Praxis berücksichtigt. Weitere Möglichkeiten wie die Nutzung eines Teils der Grünlandfläche zur Energiegewinnung oder Anbausysteme mit Energiepflanzen wurden in dieser Studie nicht untersucht.

Gemäss unseren Berechnungen beträgt das theoretische Potenzial von landwirtschaftlichen Nebenprodukten total 14.9 PJ Primärenergieinhalt pro Jahr, wobei diese Menge etwa zu 70% aus Ernterückständen aus dem Ackerbau besteht und zu 30% aus der potenziellen Nutzung von Zwischenkulturen. Als Vergleich entspricht dies umgerechnet dem Energieinhalt von 344'000 Tonnen Rohöl (Annahme, Heizwert von Rohöl = 43.2 MJ/kg) oder 1.34% des totalen Energie-Bruttoverbrauchs der Schweiz (1108 PJ) [2]. Anzumerken ist, dass das Potenzial bei den Zwischenkulturen nach Ansicht eines Sachverständigen überschätzt wird [21].

Die landwirtschaftliche Nutzfläche hat in den letzten Jahren leicht abgenommen, wobei ein Trend zu weniger jedoch grösseren Betrieben beobachtet wird [7]. Das theoretische Potenzial hängt auch vom Konsum ab, resp. von den angebauten Hauptprodukten sowie der Nutzung in der Tierhaltung. Eine wesentliche Änderung ist künftig jedoch aus heutiger Sicht nicht zu erwarten.

Heute verbleibt der Grossteil der landwirtschaftlichen Ernterückstände auf den Feldern und wird in den Boden eingearbeitet. Dies trägt zur Schliessung der Nährstoffkreisläufe bei sowie zur Erhaltung des Humusgehaltes im Boden. Nur ein sehr kleiner Anteil wird bisher für eine energetische Nutzung verwendet (0.04 PJ). Gemäss heutiger Praxis erfolgt die energetische Verwertung der landwirtschaftlichen Nebenprodukte in der Schweiz durch (Co-) Vergärung zusammen mit Hofdünger aus der Nutztierhaltung. Bei der Vergärung wird wertvolles Biogas gewonnen, das sowohl im Strom-, als auch im Wärme- und Kraftstoffbereich einsetzbar ist. Darüber hinaus ist es speicherbar und kann die Fluktuation der erneuerbaren Energien aus Wind und Sonne ausgleichen. Nach der Vergärung kann das Gärgut anschliessend wieder auf den Feldern ausgebracht werden und damit zumindest ein Teil der Nährstoffe wieder in Umlauf gebracht werden.

Aufgrund aktueller Erntetechnik, konkurrierender Nutzung (stoffliche Nutzung, Tierhaltung), Logistik und Kosten, lassen sich die landwirtschaftlichen Nebenprodukte generell somit nur bedingt energetisch nutzen. Gemäss unseren Berechnungen sind nur 18% des theoretischen Potenzials aus heutiger Sicht schätzungsweise nachhaltig energetisch nutzbar (2.6 PJ resp. 250'000 Tonnen Frischsubstanz pro Jahr). Dieser im Mittel nutzbare Anteil stimmt gut mit den allgemeinen Schätzungen von Kaltschmitt überein (10-25%) [15]. Die Organisation AgroCleanTech hatte das nutzbare Potenzial von Ernterückständen (40%) und Zwischenfrüchten (60%) in der Schweizer Landwirtschaft bis 2030 bei rund 0.9 Mio. Tonnen Frischmasse pro Jahr abgeschätzt [13]. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass hier angenommen wurde, dass generell 30% der anfallenden Rückstände energetisch genutzt werden könnten, sowie 50% des Potenzials von Zwischenfrüchten. Entsprechend höher ist das resultierende nutzbare Potenzial. Diese unterschiedlichen Angaben zeigen, dass bei der Quantifizierung des Potenzials dieser Biomasse noch Unsicherheiten bestehen. Künftig könnten auch gewisse Nebenprodukte wie Rübenblätter oder Zwischenkulturen durch neue Erntetechniken allenfalls besser mobilisierbar gemacht werden, womit sich das nachhaltig energetisch nutzbare Potenzial entsprechend erhöhen würde.

Literatur

- [1] Agroscope-Posieux, 1999: Fütterungsempfehlungen und Nährwerttabellen für Wiederkäuer (Grünes Buch).
- [2] BFE, 2015: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014.
- [3] BFE, 2015: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2014,
http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/?dossier_id=00772&lang=de.
- [4] BFS, 2010: Schweizer Landwirtschaft - Ergebnisse der Zusatzerhebung 2010, 36 S.,
http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/01/new/nip_detail.html?gnpID=2011-740.
- [5] BFS, 2013: Einzelbetriebliche Daten aus der landwirtschaftlichen Betriebsstrukturerhebung,
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/03.html>.
- [6] BFS, 2014: Landwirtschaftliche Nutzfläche. Ohne Sömmereungsweiden 1985-2013,
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/03/blank/ind24.indicator.240204.2402.html>.
- [7] BFS, 2014: Landwirtschaftsbetriebe, Beschäftigte, Nutzfläche nach Kanton 2000-2013,
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/03/blank/ind24.indicator.240204.2402.html>.
- [8] BFS, 2015: Schweizer Landwirtschaft, Taschenstatistik 2015, 36 S.
- [9] Cerbe, G., 2008: Grundlagen der Gastechnik, Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung, 653 S.
- [10] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010: Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung, 272 S.
- [11] Giuliani, S., 2015: Futtermittelbilanz 2013, Agristat Aktuell, 3 S.
- [12] GRUDAF, 2009: Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau, 40 S.
- [13] Henzen, C.; Angele, H.-C.; Maerki, A.; Meyer, A.; Meyer, R.; Steiner, R.; Hersener, J.-L., 2012: Ressourcen- und Klimaeffizienz in der Landwirtschaft: Potenzialanalyse, 118 S.
- [14] Inspektorat der Kompostier-und Vergäranlagen der Schweiz, 2015: Jahresbericht 2015, Ergebnisse von 229 inspizierten Anlagen in 20 Kantonen, 12 S.
- [15] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H., 2009: Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 1030 S.
- [16] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), 2013: Faustzahlen Biogas, 360 S.
- [17] Marti, F., 2013: Récolte des menues-pailles, résultats et expériences de 3 années d'essais à l'HAFL. In Journées Technique Agricole (20.06.2013).
- [18] Quae, 2013: Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable, 112 S.
- [19] Spliethoff, H., 2010: Power Generation from Solid Fuels, 674 S.
- [20] Streit, B., 2011: Spreu ist mehr wert, Menue paille – grande valeur, 2 S.
- [21] Streit, B. (HAFL), 2016: Email "AW: Review, Teilbericht "Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau".

Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene

Theoretisches Potenzial der Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau

NAME	Tonnen TS Ernterückstände Getreide(-Spreu)	Tonnen TS Ernterückstände Rüben	Tonnen TS Ernterückstände Körnermais	Tonnen TS Ernterückstände Übriges Ackerbau	Tonnen TS Ernterückstände Total
AARGAU	10'247	9'568	18'033	15'168	53'015
APPENZELL A.RH.	14	0	0	1	15
APPENZELL I.RH.	0	0	0	0	0
BASEL-LANDSCHAFT	2'487	398	2'230	2'629	7'744
BASEL-STADT	75	0	120	18	213
BERN	18'105	31'822	23'834	22'625	96'386
FREIBURG	10'083	11'608	9'342	13'144	44'177
GENF	3'022	370	2'688	8'660	14'740
GLARUS	3	0	0	0	3
GRAUBUENDEN	677	165	258	623	1'723
JURA	4'575	2'892	1'272	5'628	14'366
LUZERN	4'934	1'810	6'951	6'131	19'824
NEUENBURG	2'051	398	478	2'657	5'585
NIDWALDEN	0	0	0	3	3
OBWALDEN	0	0	0	1	1
SCHAFFHAUSEN	4'088	8'367	3'547	8'076	24'079
SCHWYZ	25	0	48	39	111
SOLOTHURN	4'260	4'690	3'957	5'655	18'562
ST. GALLEN	743	1'182	3'148	1'571	6'645
TESSIN	232	11	2'901	564	3'709
THURGAU	5'782	18'545	13'595	8'302	46'224
URI	0	0	0	1	1
WAADT	23'877	37'482	32'850	47'866	142'075
WALLIS	592	705	1'718	656	3'671
ZUERICH	9'883	22'896	22'297	16'664	71'739
ZUG	364	44	1'199	356	1'962
CH TOTAL	106'118	152'953	150'466	167'038	576'575

(Fortsetzung)

NAME	Tonnen TS Zwischenkulturen	Tonnen TS Tot. Nebenprodukte	Primärenergie TJ Tot. Nebenprodukte	Pot. Biomethanertrag TJ Tot. Nebenprodukte
AARGAU	20'176	73'191	1'397	591
APPENZELL A.RH.	19	34	1	0
APPENZELL I.RH.	0	0	0	0
BASEL-LANDSCHAFT	4'008	11'751	226	91
BASEL-STADT	109	322	6	2
BERN	37'256	133'642	2'515	1'076
FREIBURG	18'582	62'759	1'185	500
GENF	5'949	20'689	394	165
GLARUS	4	6	0	0
GRAUBUENDEN	1'121	2'844	55	21
JURA	7'340	21'706	410	172
LUZERN	8'627	28'452	547	226
NEUENBURG	3'161	8'746	167	68
NIDWALDEN	3	6	0	0
OBWALDEN	1	3	0	0
SCHAFFHAUSEN	8'117	32'196	600	272
SCHWYZ	74	185	4	1
SOLOTHURN	7'660	26'222	495	212
ST. GALLEN	2'460	9'105	175	72
TESSIN	856	4'565	90	37
THURGAU	13'371	59'594	1'117	500
URI	1	2	0	0
WAADT	47'329	189'404	3'565	1'571
WALLIS	1'403	5'074	98	40
ZUERICH	22'026	93'766	1'767	781
ZUG	663	2'625	51	21
CH TOTAL	210'316	786'891	14'865	6'419

Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz
Potenzialanalyse der Nebenprodukte aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau in der Schweiz

Landwirtschaftliche Nebenprodukte	Menge Frischsubstanz (Tonnen)	Menge Trockensubstanz (Tonnen TS)	Menge org. Trockensubstanz (Tonnen oTS)	Primärenergieinhalt (PJ)	Potenzieller Biomethanertrag (PJ)
Theoretisches Potenzial	2'810'981	786'891	699'698	14.9	6.4
Nachhaltiges Potenzial	244'442	134'485	125'476	2.6	1.00
Bereits genutztes Potenzial	8'000	2'239	1'991	0.04	0.02
Zusätzlich nutzbares Potenzial	236'442	132'245	123'485	2.6	1.0

Organischer Anteil im Hauskehricht



Bild: Vanessa Burg, WSL

Vanessa Burg

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	204
1 Einleitung.....	205
1.1 Zielsetzung und Überblick	205
1.2 Aktuelle Situation Schweiz.....	206
2 Methoden.....	208
2.1 Datengrundlage und Kenngrössen	208
2.2 Theoretisches Potenzial.....	210
2.3 Nachhaltiges Potenzial	212
2.4 Bereits genutztes Potenzial	213
2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial.....	213
3 Resultate	214
3.1 Theoretisches Potenzial.....	214
3.2 Nachhaltiges Potenzial	219
3.3 Gesamtschau der Potenziale	220
4 Diskussion und Folgerungen	223
Literatur	224
Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene	225
Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbeachtung Schweiz	227

Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt	KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
BioSweet	Biomass for Swiss Energy Future	NI	Normliter
BFE	Bundesamt für Energie	oTS	Organische Trockensubstanz
BFS	Bundesamt für Statistik	PJ	Peta (10^{15}) Joule
ChemRRV	Chemikalien-Risiko Reduktionsverordnung	SCCER	Swiss Competence Center for Energy Research
DÜV	Dünger-Verordnung	TJ	Tera (10^{12}) Joule
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	TS	Trockensubstanz
EW	Einwohner	TVA	Technische Verordnung über Abfälle
FS	Frischsubstanz	USG	Umweltschutzgesetz
Hu	Unterer Heizwert	VVEA	Verordnung über die Vermeidung
IfU	Institut für Umweltingenieur- Wissenschaften, ETHZ		und die Entsorgung von Abfällen

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung und Überblick

Unter *Hauskehricht* werden allgemein von Haushalten stammende, vermischt Siedlungsabfälle verstanden, die nicht getrennt gesammelt oder stofflich verwertet werden. Dazu gehören auch Kleinmengen vergleichbarer Abfälle von Unternehmen, die der gewöhnlichen Hauskehrichtabfuhr der Gemeinde angeschlossen sind. Nicht in diese Kategorie fallen Abfälle aus der industriellen oder gewerblichen Produktion (siehe Teilbericht «Organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe») sowie Klärschlamm (Teilbericht «Klärschlamm»), Bauabfälle und Sonderabfälle. Die Hauskehricht-Entsorgung erfolgt durch die öffentliche Hand. Die Kantone sind für die Planung zuständig (Richtpläne, Nutzungspläne) und die Gemeinden für die Ausführung. Zum *organischen* Anteil gehören alle Materialien pflanzlicher, tierischer oder mikrobieller Herkunft, die im Hauskehricht landen. Weil rund die Hälfte des Heizwerts von Kehricht aus organischen Abfällen stammt, wird 50% des Stroms, der in Kehrichtverbrennungsanlagen produziert wird, als erneuerbarer Strom gezählt [5].

Um eine mit den anderen Biomasseressourcen vergleichbarere Basis zu schaffen, werden sowohl die anfallende Menge (Frischsubstanz, Trockensubstanz, organische Trockensubstanz) als auch der Energieinhalt (Primärenergieinhalt, potenzieller Biomethanertrag) und die räumliche Verteilung des organischen Hauskehrichts abgeschätzt. Untersucht wird die Energie, die in der Ressource steckt. Nicht Teil dieser Arbeit ist die Möglichkeit einer effizienteren Energieausbeute durch verbesserte Technologie oder optimierte Prozesse. Zum Überblick werden die Potenzialebenen in diesem Teilbericht wie folgt definiert und quantifiziert:

Theoretisches Potenzial

Gesamte organische Abfälle im Hauskehricht, welche aktuell in der Schweiz in einem Jahr anfallen («Jährliches Aufkommen»). → Kapitel 2.2

Nachhaltiges Potenzial

Gesamter Anteil organischer Abfälle im Hauskehricht (theoretisches Potenzial) nach Abzug der Menge Bio-Abfälle, welche nach heutigem Stand so weit wie möglich und sinnvoll stofflich zu verwerten wäre (VVEA, Art. 13). Aufgrund der aktuellen Lage wurde angenommen, dass bis zu 80% der Bio-Abfälle getrennt gesammelt werden könnten. Es handelt sich in diesem Fall um eine Verschiebung aus dem Kehricht zu den separat gesammelten biogenen Abfällen (Grüngut). → Kapitel 2.3

Bereits genutztes Potenzial

Gesamter organischer Hauskehrichtanteil, welcher heute energetisch genutzt wird. Da in der Schweiz sämtlicher Kehricht in geeigneten Anlagen verbrannt werden muss (VVEA, Art. 10), gilt heute auf Ressourcenebene: theoretisches Potenzial = bereits genutztes Potenzial. → Kapitel 2.4

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial. Da die Hauskehrichtmenge, die heute verbrannt wird (bereits genutztes Potenzial) grösser ist als das ermittelte nachhaltige Potenzial, resultiert ein negatives zusätzlich nutzbares Potenzial, wobei diese Differenz der Separatsammlung (Grüngut) zugeführt wird. → Kapitel 2.5

1.2 Aktuelle Situation Schweiz

Die Schweiz verfügt im Umgang mit Abfällen über klare gesetzliche Bestimmungen und hohe Entsorgungsstandards. Gemäss Umweltschutzgesetz (USG) Art. 30, Absatz 1 ist die Erzeugung von Abfällen grundsätzlich soweit möglich zu vermeiden [11]. Anfallende Abfälle müssen gemäss Absatz 2 in erster Linie verwertet werden. Absatz 3 regelt sodann, dass Abfälle umweltverträglich entsorgt werden müssen. Diese Abfall-Hierarchie gilt auch in der europäischen Abfallgesetzgebung (Richtlinie 2008/98/EG, Art. 4) [14].

Für die Entsorgung von Siedlungsabfällen sind gemäss USG Art. 31b die Kantone zuständig [11]. Gemäss heutiger Praxis bezeichnen Siedlungsabfälle generell die aus Haushalten stammenden Abfälle sowie andere Abfälle vergleichbarer Zusammensetzung (Technische Verordnung über Abfälle [TVA] Art 3, beziehungsweise neu seit 2016 Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen [VVEA] Art. 19) [12, 13]. Ab 2019 soll der Begriff eingeengt werden und neu «Abfälle aus Haushalten sowie aus Unternehmen *mit weniger als 250 Vollzeitstellen*, deren Zusammensetzung betreffend *Inhaltsstoffe und Mengenverhältnisse* mit Abfällen aus Haushalten vergleichbar sind» bezeichnen (VVEA, Art. 3) [13]. Gemäss VVEA Art. 13 sind verwertbare Abfallanteile (z.B. Glas, Papier, Karton, Metalle, Grünabfälle) so weit wie möglich getrennt zu sammeln und stofflich zu verwerten [13]. Eine direkte Deponierung ist in der Schweiz komplett verboten. Stofflich nicht verwertbare Siedlungsabfälle müssen seit dem Jahr 2000 in geeigneten Anlagen thermisch behandelt werden (TVA, Art. 11) [12]. Somit wird heute sämtlicher Kehricht in sogenannten Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) verbrannt. In der Schweiz sind heute 30 KVA in Betrieb (*Abbildung 1*). Aus der freiwerdenden Energie entsteht Dampf, welcher der Stromproduktion und der Erzeugung von Fernwärme dient.

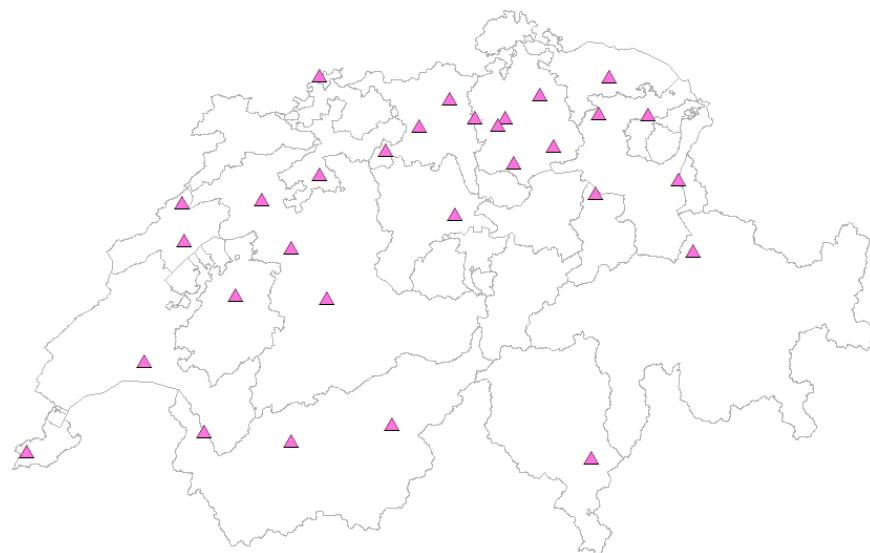


Abbildung 1: Standorte der Kehrichtverbrennungsanlagen in der Schweiz (Stand 2016).

Gemäss Bundesamt für Statistik (BFS) fielen im Jahr 2014 in der Schweiz total sechs Mio. Tonnen Siedlungsabfälle an [9]. Etwas mehr als die Hälfte wurde separat gesammelt und dem Recycling zugeführt. Der Rest – sprich 2.8 Mio. Tonnen – wurde in einer KVA verbrannt [9]. Es wird geschätzt, dass davon etwa 60% aus kommunalem Hauskehricht stammen und die anderen 40% aus Gewerbe- und Industrieabfällen. Als Folge von Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum hat sich die gesamte Siedlungsabfallmenge in den letzten 30 Jahren fast verdoppelt (*Abbildung 2*) [2, 3]. Die durch Verbrennung oder Deponierung entsorgte Siedlungsabfallmenge nahm bis Ende der 80er-Jahre zu und stabilisierte sich in der Folge bei über 2.5 Mio. Tonnen pro Jahr. Dies ist unter anderem auf die Einführung verschiedener Entsorgungsgebühren und die Förderung der Separatsammlungen zurückzuführen. Folglich hat die Menge Siedlungsabfall, die stofflich verwertet wird, massiv zugenommen.

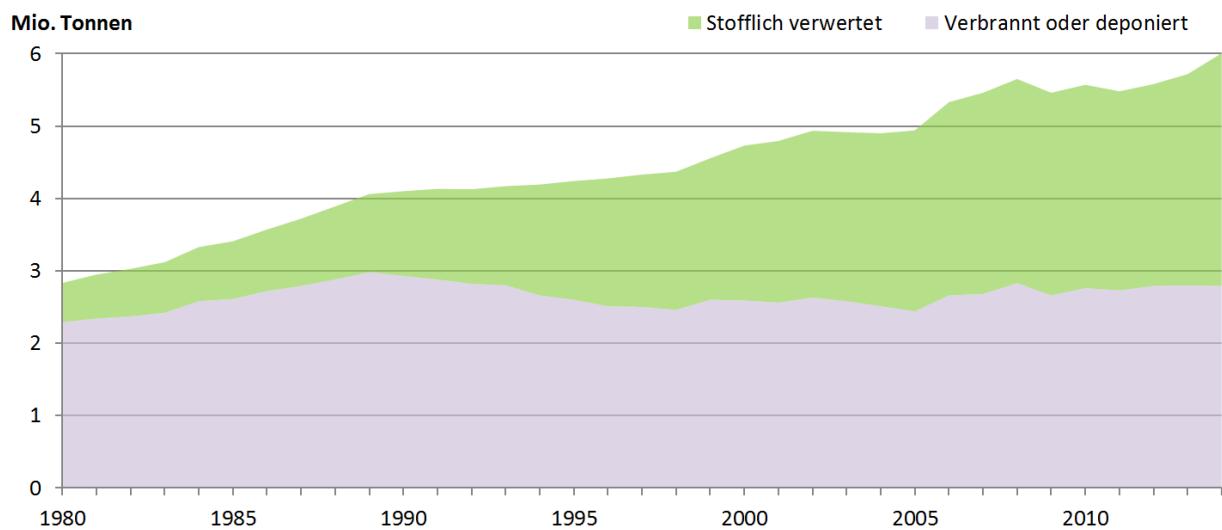


Abbildung 2: Entwicklung der Siedlungsabfallmenge seit 1980 in der Schweiz (verwertet oder entsorgt) [3, 9].

2 Methoden

2.1 Datengrundlage und Kenngrößen

Im Herbst 2012 wurden Menge und Zusammensetzung des schweizerischen Hauskehrichts im Rahmen einer umfassenden BAFU-Studie ermittelt [1]. Dabei wurde die Kehrichtmenge von 33 Schweizer Gemeinden im Detail untersucht, wobei ihre Strukturmerkmale und Gebührensysteme berücksichtigt wurden. Zwischen den pro Person und Jahr anfallenden Kehrichtmengen der verschiedenen Gemeinden wurden zum Teil markante Unterschiede beobachtet. So haben ländlich geprägte Gemeinden geringere Kehrichtmengen unterhalb des Durchschnitts, touristisch geprägte dafür höhere. Zudem entsorgen Gemeinden mit verursachergerechtem Gebührensystem gemäss Erhebung deutlich weniger Kehricht als Gemeinden ohne. Gemäss Untersuchung wurden durchschnittlich 207 kg Kehricht pro Einwohner und Jahr entsorgt. Mit rund acht Mio. Einwohner, ergibt dies hochgerechnet auf die ganze Schweiz total etwa 1.6 Mio. Tonnen Hauskehricht pro Jahr. Weiter wurde die Zusammensetzung des Kehrichts analysiert, indem der Inhalt der Kehrichtsäcke sortiert wurde. Der organische Anteil Kehricht wurde in die folgenden Stoffgruppen unterteilt:

- *Bio-Abfälle*: Nicht-verholzte Gartenabfälle, Rüstabfälle, Rückstände von Lebensmitteln, inkl. Speisereste, etc.
- *Papierähnliches Material*: Zeitungen, Kataloge, Papier, Taschentücher, Karton, Schachteln, etc.
- *Org. Naturprodukte*: Naturbelassenes Holz, Zündhölzer, Holzkohle, Kork, etc.

Die Erhebung ergab, dass im Schnitt 33% des entsorgten Kehrichts aus Bio-Abfällen besteht und 17% aus Papier und Karton. Weitere 2% sind ebenfalls organischer Herkunft und stammen aus verschiedenen Naturprodukten wie Kork oder Holz. Diese Studie gibt einen guten und detaillierten Einblick über die *qualitative Zusammensetzung* des Schweizer Hauskehrichts. Eine neue, eigene Sortierkampagne durchzuführen um den Inhalt des Kehrichts in einem grösseren Umfang zu untersuchen ist nicht zweckmässig und hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

Bezüglich der *quantitativen Hochrechnung* stellt sich die Frage, ob die punktuelle Kehrichtsack-Analyse von 33 Gemeinden genügend breit abgestützt ist. Zudem sind biogene Abfälle, die im Hauskehricht landen und die, welche separat gesammelt werden, eng miteinander verbunden. Aus diesen Gründen wurde entschieden, eine neue, einheitliche und breite Datengrundlage zu schaffen. Durch eine bottom-up-Betrachtung sollten auch strukturelle sowie räumliche Eigenschaften der Gemeinden berücksichtigt werden. Daher wurde im Sommersemester 2015 von der WSL zusammen mit dem Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU) der ETH Zürich eine Bachelorarbeit begleitet, im Rahmen derer eine Erhebung der jährlich anfallenden Hauskehrichtmenge auf Gemeindeebene durchgeführt wurde [15]. Parallel dazu wurde auch die getrennt gesammelte Menge Grüngut aus Haushalt und Landschaft erhoben. Herrmann (2015) konnte somit die Daten von insgesamt 1372 Gemeinden aus 17 Kantonen auswerten (Bezugsjahr 2013). Diese machen 59% aller 2324 Schweizer Gemeinden aus. Mit den erhaltenen Daten wurde auch der Einfluss der Gemeindestruktur auf das Entsorgungsverhalten der Bevölkerung untersucht. Die so erhobenen Daten geben jedoch nur Aufschluss über die Menge des Kehrichts, nicht aber über die Zusammensetzung.

Für alle Biomassen werden die Potenziale sowohl in Ressourcenmenge als auch in Energieinhalt angegeben. Bei der Angabe der Mengen sind je nach Ressource unterschiedliche Einheiten üblich. Um die verschiedenen Biomassen miteinander vergleichen zu können, werden die Mengen jeweils in Tonnen Frischsubstanz und Trocksubstanz angegeben. Beim Kehricht spielen die Zusammensetzung und ihr Anteil am Abfall sowie die Eigenschaften dieser verschiedenen Stoffe eine entscheidende Rolle. Zur Charakterisierung der verschiedenen Stoffe wurden die Kennwerte von typischem Kehricht gemäss aktueller Abfalltechnik verwendet [18] (*Tabelle 1*). Für die Stoffgruppe «papierähnliches Material» wurden die Werte von Papier und Karton gemittelt.

Tabelle 1: Typische Eigenschaften von Hauskehricht aufgeteilt nach den verschiedenen organischen Fraktionen [18].

	Trocken-substanz TS (%)	Inert (% der TS)	Kohlenstoff C (% der TS)	Wasserstoff H (% der TS)	Sauerstoff O (% der TS)	Stickstoff N (% der TS)	Schwefel S (% der TS)
Bio-Abfälle	36	13.9	39.0	5.6	39.0	2.2	0.06
Papier	70	5.7	49.6	5.7	38.3	0.4	0.04
Karton	60	3.3	51.2	6.6	38.0	0.5	0.03
Naturprodukte	77	3.9	52.2	7.1	36.1	0.5	0.04

Der Heizwert biogener Festbrennstoffe lässt sich aus deren Elementarzusammensetzung abschätzen. Zur Berechnung wurde die Näherungsformel nach Boie verwendet, bei der ein mittlerer Fehler von 4% zu erwarten ist [16]. Demnach errechnet sich der untere Heizwert biogener Festbrennstoffe im wasserfreien Zustand in MJ/kg aus den Elementgehalten von Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) sowie den Hauptnährstoffen Schwefel (S) und Stickstoff (N), in % der Trockenmasse:

$$\text{Unterer Heizwert}_{TS} = 34.8 \times C + 93.9 \times H + 10.5 \times S + 6.3 \times N - 10.8 \times O$$

Tabelle 2 zeigt die mit der Formel nach Boie berechneten Heizwerte der organischen Fraktionen im Hauskehricht.

Tabelle 2: Berechnete untere Heizwerte der organischen Hauskehrichtfraktionen.

	Unterer Heizwert Hu bezogen auf die TS (MJ/kg TS)
Bio-Abfälle	14.7
Papier	18.5
Karton	20.0
Naturprodukte	21.0

In einem zweiten Schritt wurde die in der Biomasse enthaltene Energie – die sogenannte Primärenergie – der verschiedenen organischen Kehrichtfraktionen berechnet. Die so berechnete Energiemenge bezieht sich auf den unteren Heizwert (Hu) der Trockensubstanz (TS).

$$\text{Energieinhalt}_{TS} [\text{MJ}] = \text{Masse}_{FS} [\text{kg}] \times \text{Anteil Trockensubstanz}_{FS} [-] \times \text{Unterer Heizwert} [\text{MJ/kg}_{TS}]$$

Für die Bio-Abfälle wurde auch der potenzielle Biomethanertrag in Normliter (NL) ermittelt. Die organische Trockensubstanz (oTS) ist der Anteil der organischen Bestandteile eines Stoffes, nach vollständigem Entzug von Wasser und aller mineralischer Bestandteile (inert). Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Methanertrag}_{TS} [\text{NL}] \\ = \text{Masse}_{TS} [\text{kg}] \times \text{Anteil Organisch}_{TS} [-] \times \text{Biogasertrag}_{oTS} [\text{NL/kg oTS}] \times \text{Methangehalt} [-] \end{aligned}$$

Zur Abschätzung der Gasausbeute wurden die Richtwerte des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) entsprechend *Tabelle 3* verwendet [17]. Mit einem unteren Heizwert für Methan von 35.883 MJ/m³ [10] lässt sich auch der Energieinhalt des Methanertrags berechnen.

Tabelle 3: Richtwerte für die Gasausbeute aus Bio-Abfällen [17].

	Biogasertrag (NL/kg oTS)	Methangehalt (%)	Methanertrag (NL/kg oTS)
Bio-Abfälle	615	60	370

2.2 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial bezieht sich auf die gesamte anfallende Biomasse ohne Berücksichtigung von nutzungsbedingten Einschränkungen (vgl. Einleitung des Gesamtberichtes). Das theoretische Potenzial beinhaltet somit den gesamten organischen Anteil im Hauskehricht, welcher aktuell in der Schweiz in einem Jahr anfällt («Jährliches Aufkommen»).

Als Startpunkt zur Ermittlung des theoretischen Potenzials diente die IfU Bachelorarbeit von Herrmann (2015) [15], im Rahmen derer, wie oben erwähnt, eine umfassende Erhebung der Hauskehrichtmenge auf Gemeindeebene durchgeführt wurde. Das Bundesamt für Statistik (BFS) hat alle Schweizergemeinden aufgrund bestimmter Kriterien wie zum Beispiel Bevölkerungsstruktur, Reichtum und Zentrumsfunktion in 22 Gemeindetypen klassiert [7]. Das Spektrum reicht von Grosszentren (Typ 1) bis zu Gemeinden mit starkem Bevölkerungsrückgang (Typ 22). Darauf aufbauend hat Hermann die erhobenen Kehrichtmengen von über 1300 Gemeinden, den 22 BFS-Typen zugeordnet und gemittelt [15]. Auf diese Weise wird der Einfluss der Gemeindestruktur auf die Kehrichtmenge berücksichtigt. Zusätzlicher Vorteil der Einteilung in die Gemeindetypen ist die vollständige Anonymisierung der Daten, was meistens eine Bedingung bei der Datenabgabe darstellt. *Tabelle 4* zeigt die auf diese Weise ermittelte mittlere Hauskehrichtmenge der verschiedenen Gemeindetypen pro Einwohner und Jahr. Sperrgut (siehe Teilbericht Altholz) und private Direktanlieferungen sind nicht in diesen Zahlen enthalten.

Tabelle 4: Mittlere Hauskehrichtmenge der 22 BFS-Gemeindetypen [7] gemäss Datenerhebung [15].

Gemeindetyp	Mittlere Hauskehrichtmenge (kg/EW/a)
1 Grosszentren	191.8
2 Mittelzentren	208.1
3 Kleinzentren	203.6
4 Peripheriezentren	177.7
5 Einkommensstarke Gemeinden	198.4
6 Touristische Gemeinden	330.9
7 Semitouristische Gemeinden	217.3
8 Gemeinden mit Heimen und Institutionen	189.2
9 Arbeitsplatzgemeinden metropolitaner Regionen	150.8
10 Suburbane Gemeinden metropolitaner Regionen	170.0
11 Periurbane Gemeinden metropolitaner Regionen	148.0
12 Arbeitsplatzgemeinden nicht-metropolitaner Regionen	151.6
13 Suburbane Gemeinden nicht-metropolitaner Regionen	169.0
14 Periurbane Gemeinden nicht-metropolitaner Regionen	187.4
15 Wegpendlergemeinden mit hoher Zuwanderung	150.8
16 Wegpendlergemeinden mit geringer Zuwanderung	169.0
17 Industriell-tertiäre Gemeinden	172.4
18 Industrielle Gemeinden	183.0
19 Agrar-industrielle Gemeinden	177.1
20 Agrar-tertiäre Gemeinden	141.4
21 Agrarische Gemeinden	155.2
22 Gemeinden mit starkem Bevölkerungsrückgang	243.5

Auf dieser Basis kann die mittlere Hauskehrichtmenge pro Einwohner auf alle Schweizer Gemeinden des gleichen Typs übertragen werden. Zur Hochrechnung der in der Gemeinde total anfallenden Kehrichtmenge wurde die ständige und nichtständige Wohnbevölkerung gemäss BFS für das Jahr 2013 verwendet [8]. Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Kehrichtmenge}_{\text{Gemeinde}} & [\text{kg}/\text{a}] \\ &= \text{Anzahl Einwohner}_{\text{Gemeinde}} [\text{EW}] \times \text{Kehrichtmenge pro Einwohner}_{\text{Gemeindetyp}} [\text{kg}/\text{EW} \cdot \text{a}] \end{aligned}$$

Als Basis zur Abschätzung des organischen Anteils diente die BAFU Studie von 2012 [1], bei welcher der Inhalt des Hauskehrichts von 33 Gemeinden im Detail untersucht wurde. Da eine Einteilung in 22 Typen für diese Datengrundlage zu feingliedrig ist, wurden die Gemeinden aufgrund von Strukturmerkmalen in 11 Hauptgruppen klassiert, welche mit der BFS-Typologie verglichen werden können. Es wurden drei organische Fraktionen – sprich Bio-Abfälle, papierähnliches Material und organische Naturprodukte – unterschieden (siehe Kapitel 2.1). *Tabelle 5* zeigt die mittlere organische Zusammensetzung des Kehrichts für die 11 Gemeindetypen gemäss BAFU Studie [1].

Tabelle 5: Anteil organische Fraktionen im Hauskehricht der 11 Gemeindetypen gemäss 2012 BAFU Studie [1].

Gemeindetypen	Entsprechende BFS-Typologie	Anteil im Hauskehricht (%)		
		Bio-Abfälle	Papierähnliches Material	Organische Naturprodukte
1 Grosszentren	1	38.0	17.4	0.6
2 Mittel- und Kleinzentren	2, 3	33.0	17.1	0.5
3 Einkommensstarke Gemeinde	5	35.4	19.5	0.9
4 Arbeitsplatz-Gemeinden	9, 12	33.4	16.2	1.9
5 Suburbane Gemeinden	10, 13	35.7	18.1	1.7
6 Periurbane Gemeinden	11, 14	32.2	17.6	2.8
7 Nicht-städtische-Wegpendler Gemeinden	15, 16	29.3	16.5	3.1
8 Touristische Gemeinden	6, 7	33.8	12.9	2.2
9 Industrielle und tertiäre Gemeinden	17, 18, 4, 8	36.5	12.7	0.8
10 Semiagrarische Gemeinden	19, 20	24.9	18.6	3.9
11 Agrarische Gemeinden	21, 22	24.7	17.1	1.4

Aufgrund der berechneten Kehrichtmenge und der abgeschätzten Kehrichtzusammensetzung der verschiedenen Gemeindetypen, kann folglich die Menge des organischen Hauskehrichts aller Schweizer Gemeinden ermittelt werden. Für alle Kehrichtfraktionen gilt:

$$\text{Menge Fraktion}_{\text{Gemeinde}} [\text{kg/a}] = \text{Kehrichtmenge}_{\text{Gemeinde}} [\text{kg/a}] \times \text{Anteil Fraktion}_{\text{Gemeindetyp}} [-]$$

Die Kenngrössen zur Umrechnung der so berechneten Menge Trockensubstanz in organische Trockensubstanz und in Frischsubstanz, sowie zur Berechnung der Energieinhalte sind im Kapitel 2.1 aufgeführt. *Abbildung 3* fasst das allgemeine Vorgehensmodell zur Ermittlung der energetischen Potenziale von organischem Hauskehricht zusammen.

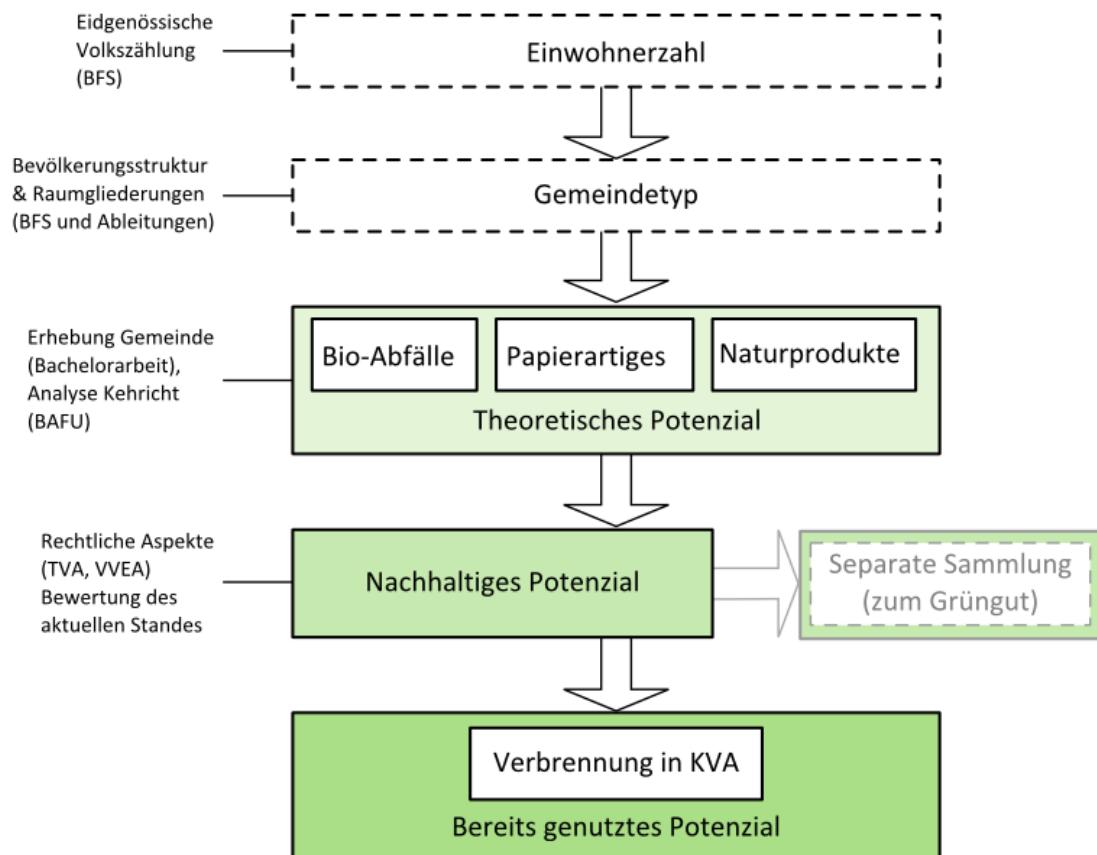


Abbildung 3: Modellansatz zur Ermittlung der energetischen Potenziale von organischem Hauskehricht.

2.3 Nachhaltiges Potenzial

Aufgrund verschiedener Restriktionen verringert sich das theoretische Potenzial um diejenige Menge, welche nach heutigem Stand nicht nutzbar ist. Gründe sind unausgereifte Technologien, ökologische Aspekte, politische/gesellschaftliche Akzeptanzprobleme, wirtschaftliche Hemmnisse oder rechtliche Bestimmungen. Diese unterschiedlichen Restriktionen sind teilweise schwer voneinander abzugrenzen und beeinflussen sich gegenseitig. Das Potenzial mit Berücksichtigung der verschiedenen Restriktionen wird nachhaltiges Potenzial genannt.

Sämtlicher Schweizer Kehricht muss heute in geeigneten Anlagen – sprich Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) – verbrannt werden (TVA, Art. 11, vgl. Abschnitt 2.4). Die anfallende Schlacke wird anschliessend in eine sogenannte Reaktordeponie geführt. Gemäss VVEA sind Siedlungsabfälle «so weit wie möglich und sinnvoll» getrennt zu sammeln und stofflich zu verwerten (Art. 13 Abs. 4). Diese neue Regelung tritt am 01.01.2019 in Kraft (Art. 49). Bio-Abfälle haben einen hohen Gehalt an wertvollen Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff, so dass eine separate Sammlung aus heutiger Sicht anzustreben ist, da der Nährstoffkreis durch Verbrennung in einer KVA unterbrochen wird. Durch Vergärung von Bio-Abfällen fällt neben dem energetisch nutzbaren Biogas, Gärresten an. Diese Gärreste dürfen als Dünger genutzt werden, sofern die Dünger-Verordnung (DÜV) und die Chemikalien-Risiko-Reduktionsverordnung (ChemRRV) eingehalten sind. Zusätzlicher Vorteil der Vergärung ist die vielseitige energetische Anwendbarkeit des anfallenden Biogases, welches sowohl als Treibstoff als auch zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden kann. Durch die leichte Speicherbarkeit bietet Biogas zudem die Möglichkeit der bedarfsgerechten Energieerzeugung als Ergänzung zu den fluktuierenden erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne. Aufgrund der aktuellen Lage wurde angenommen, dass theoretisch bis zu rund 80% der Bio-Abfälle getrennt gesammelt werden könnten [1]. Auf diese Weise erfolgt eine Verschiebung dieser Menge Bio-Abfall aus dem Hauskehricht zu den separat gesammelten Bio-Abfällen (vgl. Teilbericht «Grüngut aus Haushalt und Landschaft»).

2.4 Bereits genutztes Potenzial

Seit dem Jahr 2000 ist eine direkte Deponierung von Kehricht in der Schweiz komplett verboten (TVA, Art. 11) [12]. Seitdem muss sämtlicher Kehricht in geeigneten Kehrichtverbrennungsanlagen vorbehandelt werden. Die durch die Verbrennung freiwerdende Energie wird zur Erzeugung von Strom und Fernwärme verwendet. Auf Ressourcenebene gilt für den organischen Hauskehricht somit grundsätzlich heute: Theoretisches Potenzial = Bereits genutztes Potenzial (*Abbildung 4*). Es ist jedoch zu erwähnen, dass in der KVA – anders als bei der Vergärung – der Wassergehalt erst verdampft werden muss, bevor Energie aus der Biomasse gewonnen werden kann. Trockene Biomasse, wie Papier oder Holz, ist somit besonders geeignet für die Verbrennung. Hingegen lassen sich feuchte Bio-Abfälle, die einen hohen Wassergehalt von über 60% aufweisen (vgl. *Tabelle 1*), durch Mitverbrennung in der KVA kaum effizient energetisch nutzen. Neben der Energieeffizienz bietet die Vergärung von Bio-Abfällen den zusätzlichen Vorteil das Gärgut als Dünger einsetzen zu können, wodurch regionale Nährstoffkreisläufe geschlossen werden.

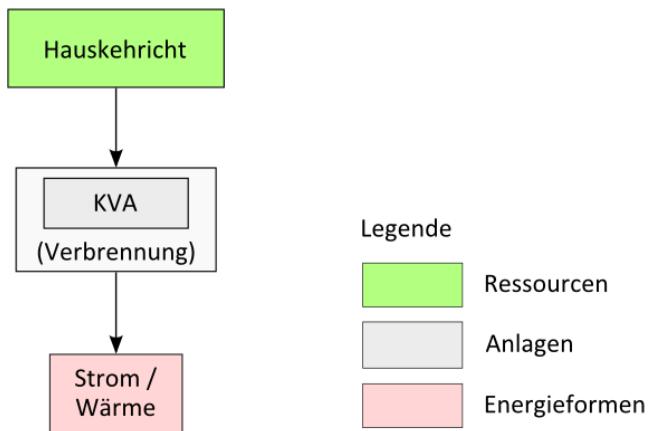


Abbildung 4: Aktuelle Verwertung resp. Entsorgung von Hauskehricht in der Schweiz.

2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial

Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial. Da eine stoffliche Verwertung oder getrennte Sammlung der Bio-Abfälle aus ökologischen und rechtlichen Gründen, wenn möglich und sinnvoll zu bevorzugen ist, ist der organische Anteil Hauskehricht, der heute in KVA verbrannt wird (bereits genutztes Potenzial) grösser als das ermittelte nachhaltige Potenzial. Es resultiert somit ein negatives zusätzlich nutzbares Potenzial, wobei diese Menge den *separat gesammelten biogenen Abfällen* beziehungsweise dem Grüngut zugeführt wird (vgl. *Abbildung 3*).

3 Resultate

3.1 Theoretisches Potenzial

Ressourcenmenge

Gemäss Methode wird die zu erwartende kommunale Hauskehrichtmenge in Tonnen Frischsubstanz aufgrund des Gemeindetyps und der Anzahl Einwohner berechnet (*Abbildung 5*). Durch Aufsummieren der jeweiligen Gemeindezahlen lässt sich die Kehrichtmenge auch auf kantonaler oder nationaler Ebene angeben. Gemäss Berechnungen beträgt die gesamte von den Gemeinden gesammelte Menge Hauskehricht in der Schweiz total etwa **1.46 Mio. Tonnen (=179 kg pro Jahr und Einwohner)**. Sperrgut (Altholz) oder private Direktanlieferungen aus Gewerbe und Industrie sind nicht in dieser Zahl enthalten und werden in den entsprechenden Teilberichten behandelt.

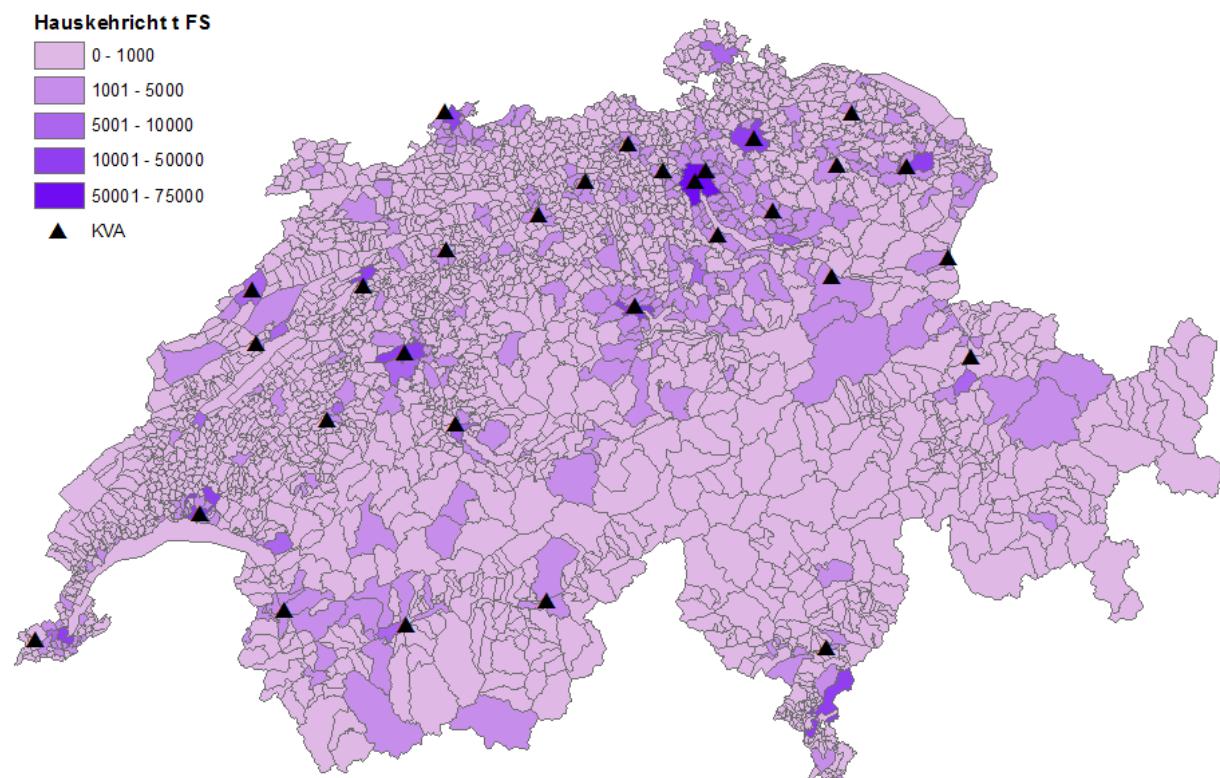


Abbildung 5: Berechnete Hauskehrichtmenge auf Gemeindegrenze (Tonnen Frischsubstanz / Jahr) und Standort der 30 Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA).

Aufgrund der berechneten gesamten Kehrichtmenge wird nachfolgend die organische Zusammensetzung des Kehrichts der verschiedenen Gemeinden abgeschätzt (vgl. Methode Abschnitt 0). Dabei wurden die Bio-Abfälle, papierähnliches Material und organische Naturprodukte unterschieden.

Gemäss unseren Berechnungen werden jährlich total etwa **491'000 Tonnen Bio-Abfälle** im Schweizer Hauskehricht entsorgt (=60 kg pro Jahr und Einwohner). Über die ganze Schweiz gemittelt, machen Bio-Abfälle somit etwa 34% der Kehrichtmenge aus. Die Frischsubstanz kann auch in Trockensubstanz (TS) und in organischer Trockensubstanz (oTS) angegeben werden (siehe *Tabelle 6*). *Abbildung 6* zeigt die räumliche Verteilung der berechneten Menge Trockensubstanz Bio-Abfälle im Hauskehricht auf Kantonsebene.

Tabelle 6: Total pro Jahr anfallende Menge organischer Abfälle im Hauskehricht der Schweiz.

	Tonnen Frischsubstanz	Tonnen Trockensubstanz	Tonnen organische Trockensubstanz
Bio-Abfälle	491'000	177'000	152'000
Papierähnliches Material	243'000	158'000	151'000
Org. Naturprodukte	23'000	18'000	17'000
Total org. Anteil im Hauskehricht	757'000	353'000	320'000

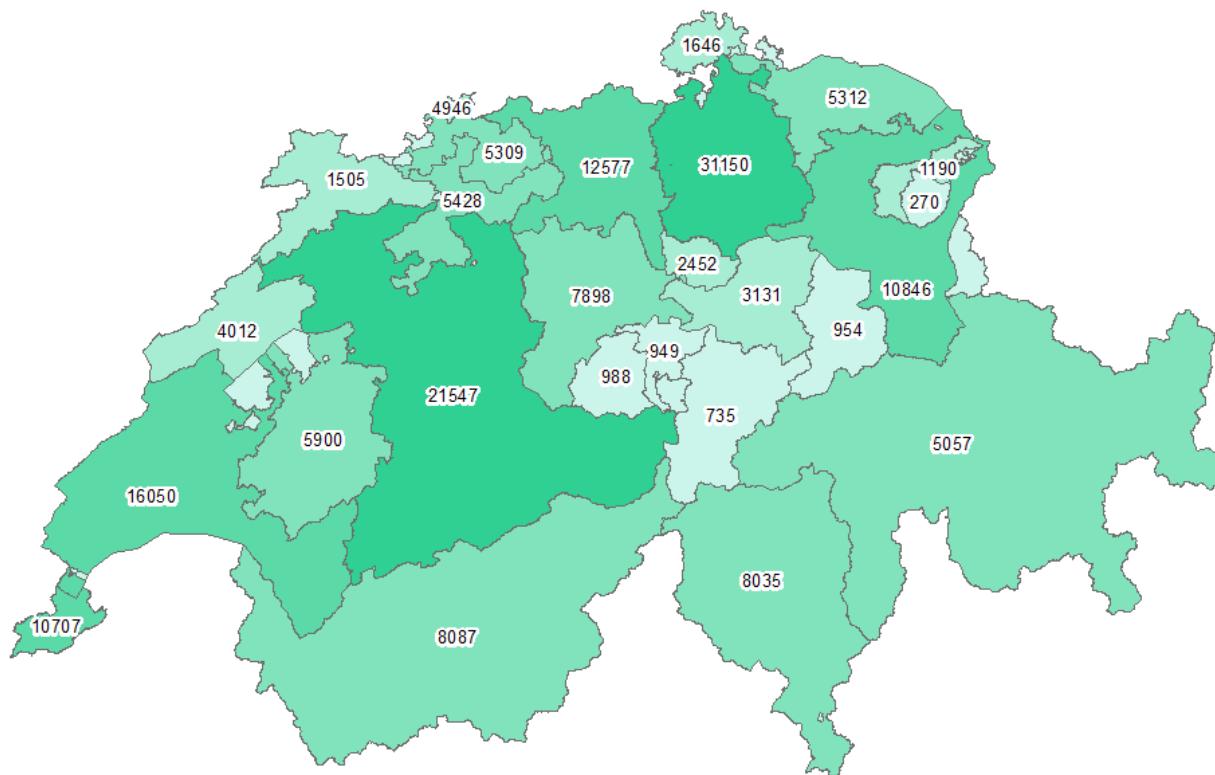


Abbildung 6: Theoretisches Potenzial, Menge Bio-Abfälle im Hauskehricht auf kantonaler Ebene (Tonnen Trockensubstanz pro Jahr).

Jährlich werden etwa 67'000 Tonnen Zeitungen, 128'000 Tonnen Papier und 48'000 Tonnen Karton (bzw. total 243'000 Tonnen papierähnliches Material) im Schweizer Hauskehricht entsorgt. Papierähnliches Material macht somit 17% der Hauskehrichtmenge aus (resp. durchschnittlich ca. 30 kg pro Jahr und Einwohner) und entspricht einer Trockensubstanz von 158'000 Tonnen TS (Tabelle 6). Abbildung 7 zeigt die räumliche Verteilung der berechneten Menge «papierähnliches Material» (Total Zeitungen, Papier und Karton) im Hauskehricht durch Aufsummierung der entsprechenden Gemeinden auf kantonaler Ebene.

Eine weitere organische Fraktion im Hauskehricht stellen die organischen Naturprodukte dar, zu denen beispielsweise naturbelassenes Holz, Zündhölzer, Holzkohle und Kork gehören. Gemäss Berechnungen werden jährlich etwa **23'000 Tonnen organische Naturprodukte** im Schweizer Hauskehricht entsorgt (= 18'000 Tonnen TS). Insgesamt macht diese Fraktion somit etwa 1.5% der Schweizer Hauskehrichtmenge aus (bzw. durchschnittlich knapp drei kg pro Jahr und Einwohner). Die räumliche Verteilung ist in Abbildung 8 dargestellt.

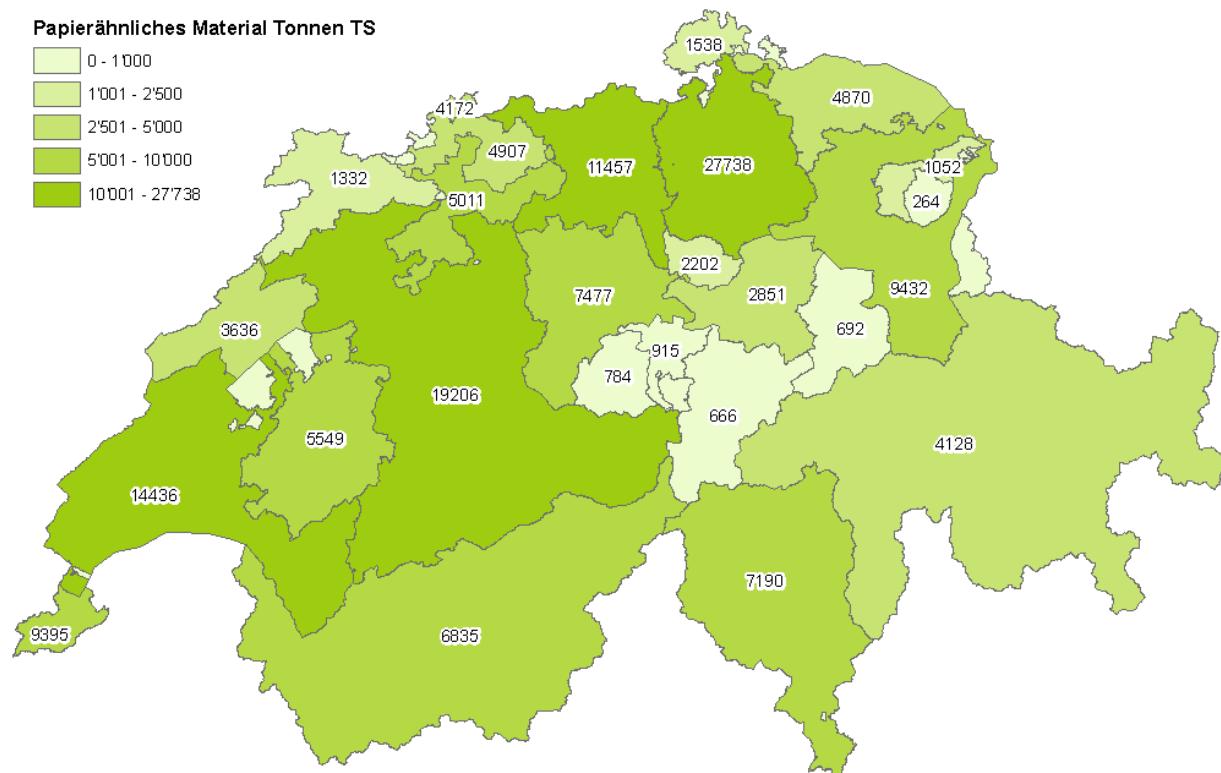


Abbildung 7: Theoretisches Potenzial, Menge von papierähnlichem Material (Total Zeitungen, Papier und Karton) im Hauskehricht auf kantonaler Ebene (Tonnen Trockensubstanz / Jahr).

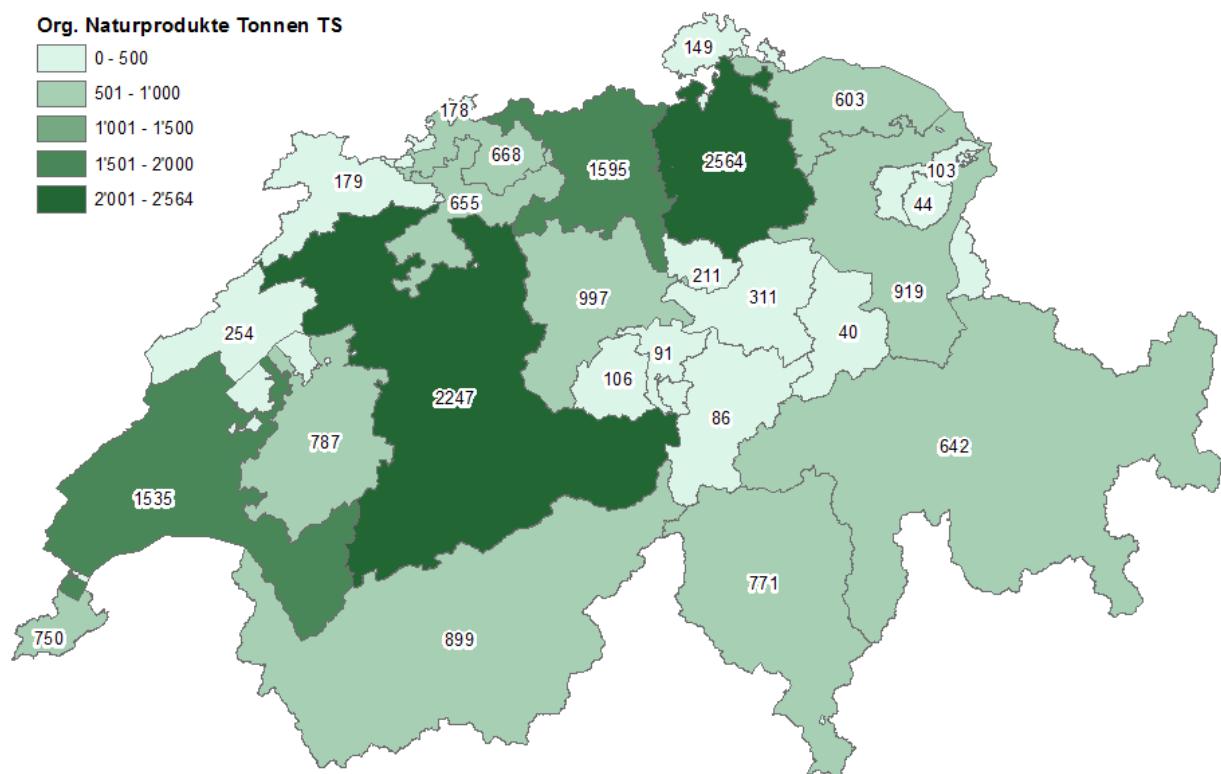


Abbildung 8: Theoretisches Potenzial, Menge organischer Naturprodukte im Hauskehricht auf kantonaler Ebene (Tonnen Trockensubstanz / Jahr).

Abbildung 9 vermittelt einen Gesamteindruck über die relative Verteilung der anfallenden Ressourcenmenge der verschiedenen organischen Kehrichtfraktionen untereinander. Als Bezugsgröße wurden sowohl Frisch- als auch Trockensubstanz gewählt, da die Wassergehalte verschiedene Charakteristiken veranschaulichen. So machen die Bio-Abfälle 65% der anfallenden Frischsubstanz, jedoch nur rund 50% der Trockensubstanz aus. Im Gegenteil bildet Papierähnliches Material nur 32% der anfallenden Frischsubstanz, jedoch aber 45% der Trockensubstanz.

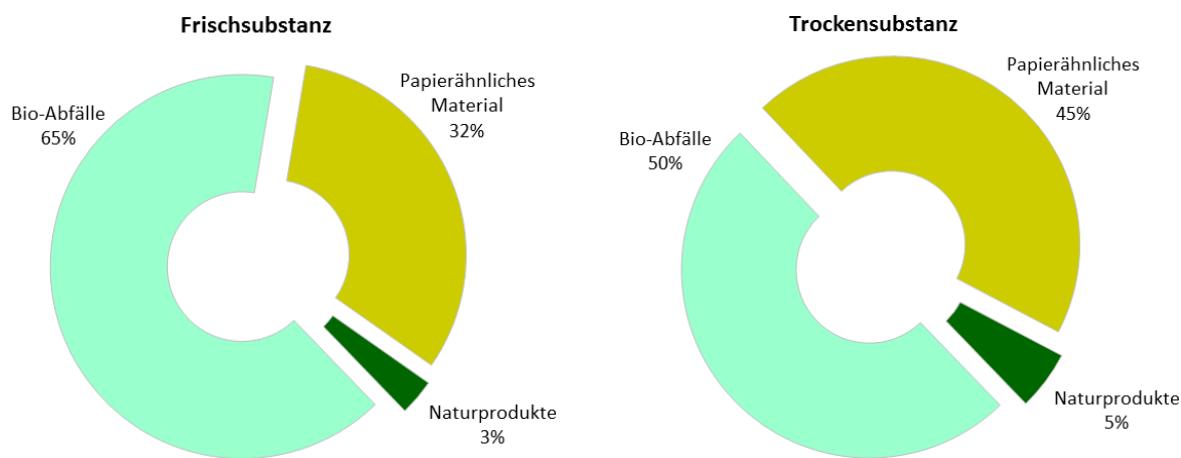


Abbildung 9: Theoretisches Potenzial, Relative Verteilung der anfallenden organischen Hauskehrichtmenge (bezogen auf die Frischsubstanz links und die Trockensubstanz rechts) zwischen den verschiedenen Fraktionen.

Durch Addieren der drei soeben ermittelten organischen Fraktionen lässt sich der gesamte organische Anteil im Hauskehricht berechnen (Tabelle 6, Abbildung 10). Es wurde eine Gesamtmenge *Hauskehricht organischer Herkunft* von 757'000 Tonnen pro Jahr ermittelt (= 353'000 Tonnen TS).

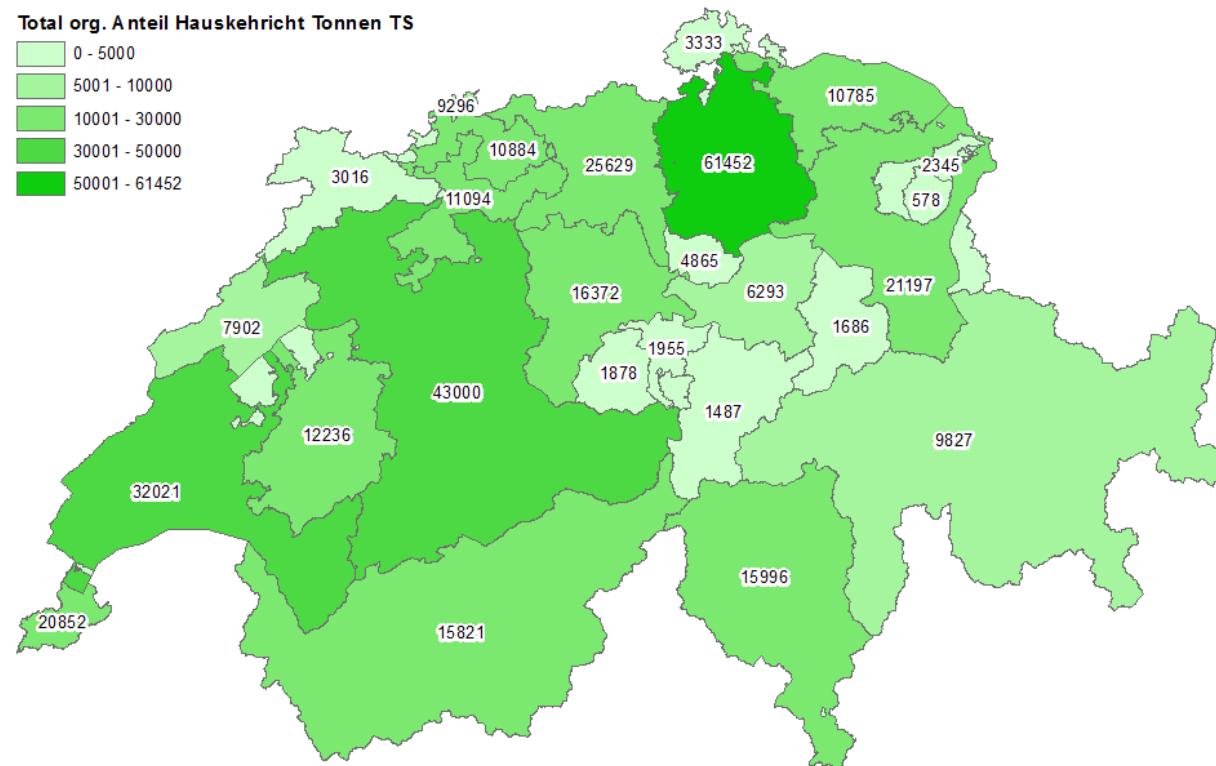


Abbildung 10: Theoretisches Potenzial, Gesamtmenge aller organischen Produkte im Schweizer Hauskehricht auf kantonaler Ebene (Tonnen Trockensubstanz / Jahr).

Energieinhalt

Der Primärenergieinhalt der verschiedenen Kehrichtfraktionen bezieht sich auf die Trockensubstanz und stellt die maximal verfügbare Energiemenge in der Biomasse dar. Die Berechnung des Primärenergiegehalts erfolgte rein rechnerisch über die Zuweisung von charakteristischen TS- und Heizwerten (vgl. Abschnitt 2.1). *Abbildung 11* zeigt den berechneten jährlichen Primärenergieinhalt der organischen Fraktionen des Schweizer Hauskehrichts. *Abbildung 12* gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung des Primärenergieinhaltes der total anfallenden Gesamtmenge an organischen Produkten im Hauskehricht. Ersichtlich ist, dass der Kanton Zürich mit 1.05 PJ das grösste theoretische Potenzial aufweist, gefolgt vom Kanton Bern (0.73 PJ) und Waadt (0.55 PJ). Dies ist vor allem auf die demografischen Gegebenheiten und die Kantonsgrösse zurückzuführen.

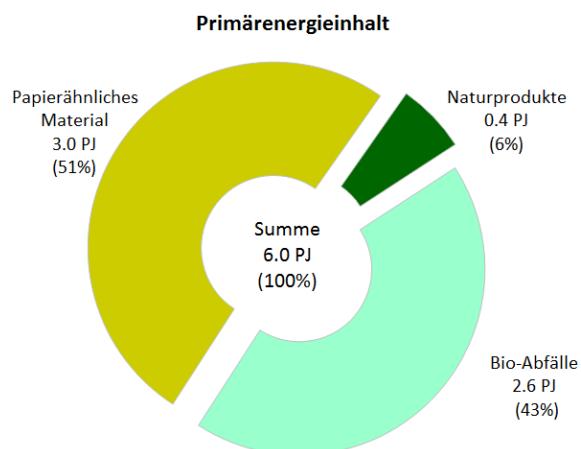


Abbildung 11: Theoretisches Potenzial, Jährlicher Primärenergieinhalt des org. Anteils Hauskehricht in der Schweiz.

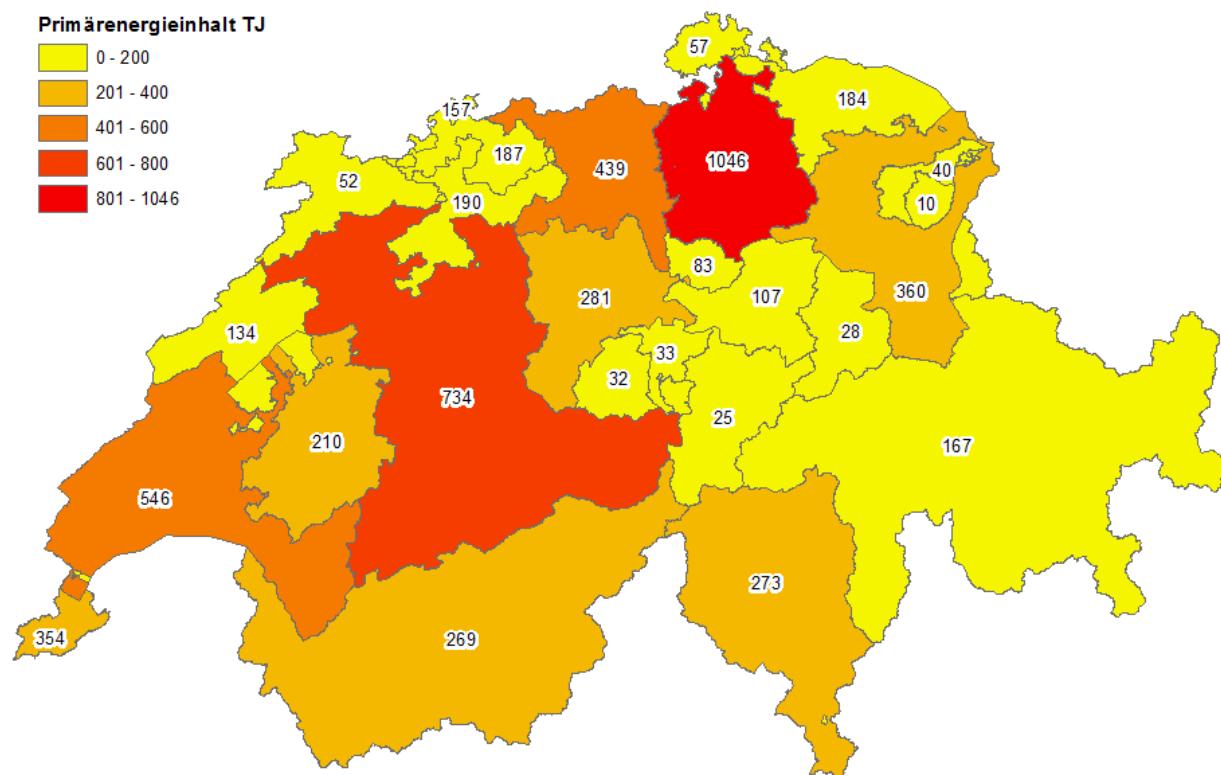


Abbildung 12: Theoretisches Potenzial, Primärenergieinhalt aller organischen Produkte im Schweizer Hauskehricht auf kantonaler Ebene (TJ/Jahr).

Für die Bio-Abfälle im Hauskehricht wurde auch der potenzielle Methanertrag durch anaerobe Vergärung berechnet bzw. der potenzielle Energieinhalt aufgrund des Heizwertes von Methan. Gemäss Berechnungen beträgt der potenzielle Biomethanertrag 2.02 PJ.

3.2 Nachhaltiges Potenzial

Da der Nährstoffkreis durch Verbrennung in einer KVA unterbrochen wird, ist aus heutiger Sicht eine separate Sammlung von Bio-Abfällen – wenn möglich und sinnvoll – anzustreben (vgl. Kapitel 2.3). Aufgrund der aktuellen Lage wurde angenommen, dass bis zu 80% dieser Bio-Abfälle getrennt gesammelt werden könnten [1]. Auf diese Weise reduziert sich das nachhaltige Potenzial um diese Menge, welche der Separatsammlung zugeführt wird. Die Resultate sind in der nachfolgenden *Tabelle 7* zusammengefasst. *Abbildung 13* und *Abbildung 14* zeigen die räumliche Verteilung des ermittelten nachhaltigen Potenzials von organischem Hauskehricht.

Tabelle 7: Nachhaltiges Potenzial, Gesamtmenge org. Produkte im Schweizer Kehricht sowie deren Energieinhalt.

	Kehrichtfraktionen			Total organischer Anteil im Kehricht
	Bio-Abfälle	Papierähnliches Material	Org. Naturprodukte	
Frischsubstanz, Tonnen	98'200	243'000	23'000	364'200
Trockensubstanz, Tonnen	35'400	158'000	18'000	211'400
Org. Trockensubstanz, Tonnen	30'400	151'000	17'000	198'400
Primärenergieinhalt, PJ	0.519	3.036	0.365	3.920
Pot. Biomethanertrag, PJ	0.403	-	-	0.403

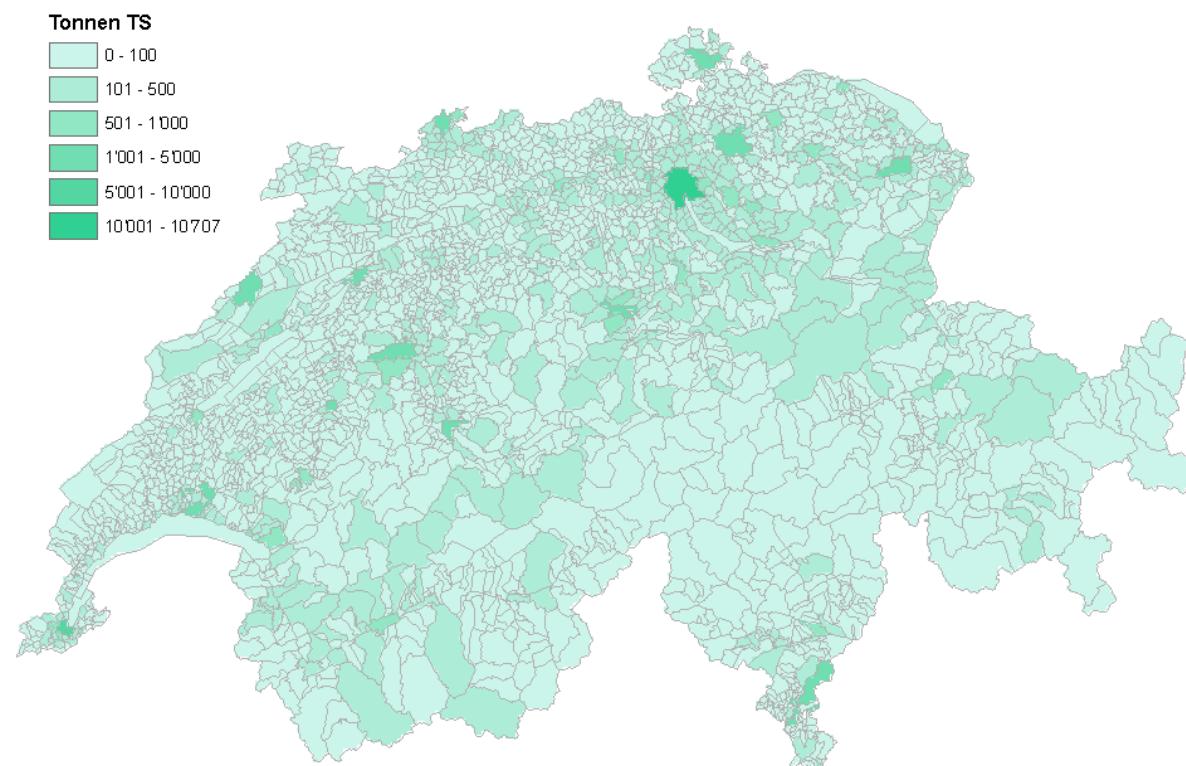


Abbildung 13: Nachhaltiges Potenzial, Gesamtmenge aller organischen Produkte im Schweizer Hauskehricht auf Gemeindeebene (Tonnen Trockensubstanz / Jahr).

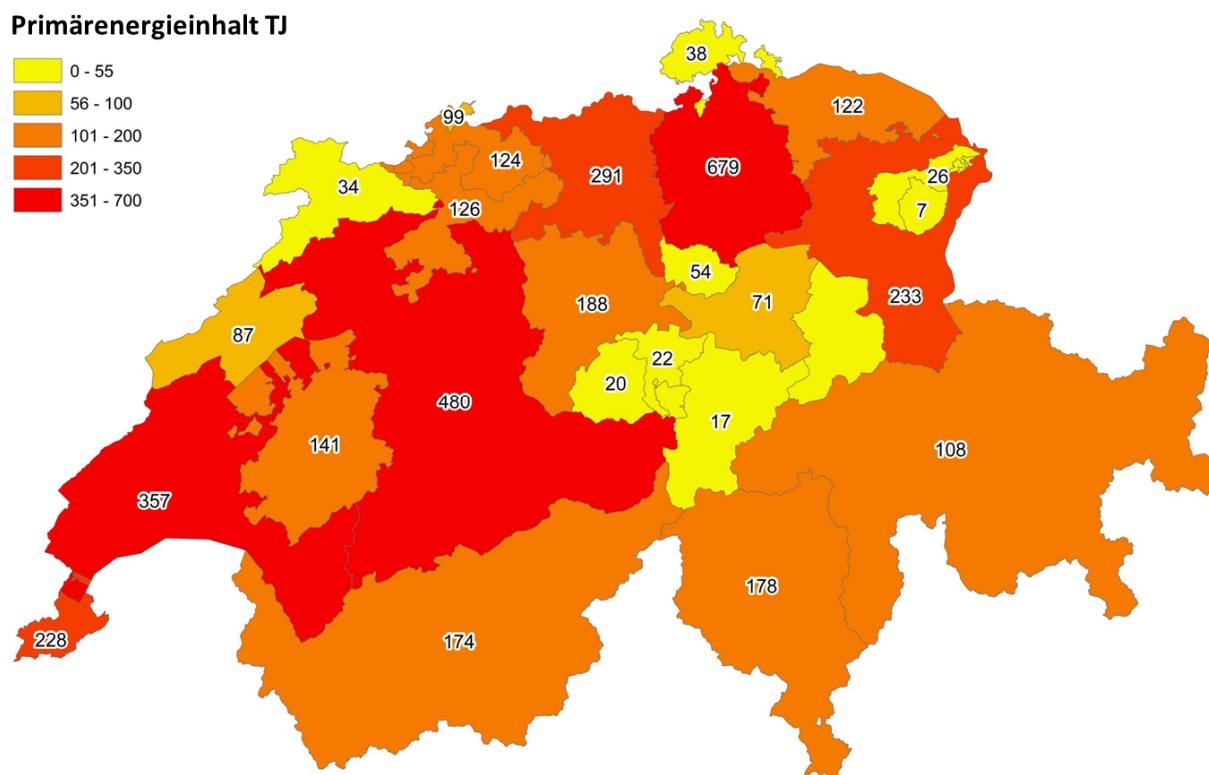


Abbildung 14: Nachhaltiges Potenzial, Primärenergieinhalt aller organischen Produkte im Schweizer Hauskehricht auf kantonaler Ebene (TJ/Jahr).

3.3 Gesamtschau der Potenziale

Zusammenfassend zeigt Abbildung 15 die verschiedenen Potenziale des gesamten organischen Anteils im Hauskehricht der Schweiz (Summe der Fraktionen «Bio-Abfälle», «papierähnliches Material» und «organische Naturprodukte»). Dabei wird zwischen Frischmasse, Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz unterschieden. In Abbildung 16 werden Primärenergieinhalt und potenzieller Biomethanertrag der verschiedenen Potenziale nebeneinander gestellt. Der potenzielle Biomethanertrag stammt nur aus Bio-Abfällen, da papierähnliches Material und organische Nebenprodukte als schlecht vergärbar gelten. Die Werte sind dem Anhang 2 zu entnehmen. Auf Ressourcenebene gilt:

Theoretisches Potenzial = Bereits genutztes Potenzial

Aufgrund verschiedener Restriktionen wird das theoretische Potenzial um diejenige Ressourcenmenge reduziert, die nach heutigem Stand voraussichtlich nicht nutzbar ist. Insbesondere Bio-Abfälle haben einen hohen Gehalt an wertvollen Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff. Somit ist aus heutiger Sicht eine stoffliche Verwertung der Bio-Abfälle so weit möglich und sinnvoll anzustreben (vgl. Kapitel 2.3). Dabei wurde angenommen, dass bis zu 80% der Bio-Abfälle, die im Hauskehricht landen, getrennt gesammelt werden könnten. Auf Ressourcenebene gilt:

(Theoretisches Potenzial =) Bereits genutztes Potenzial > Nachhaltiges Potenzial

Da das bereits genutzte Potenzial – also die organische Kehrichtmenge, die heute in KVA verbrannt wird – grösser ist als das ermittelte nachhaltige Potenzial, resultiert ein negatives zusätzlich nutzbares Potenzial, wobei diese Menge der Separatsammlung resp. dem Grüngut zugeführt wird (vgl. Kapitel 2.5 und Teilbericht «Grüngut aus Haushalt und Landschaft»).

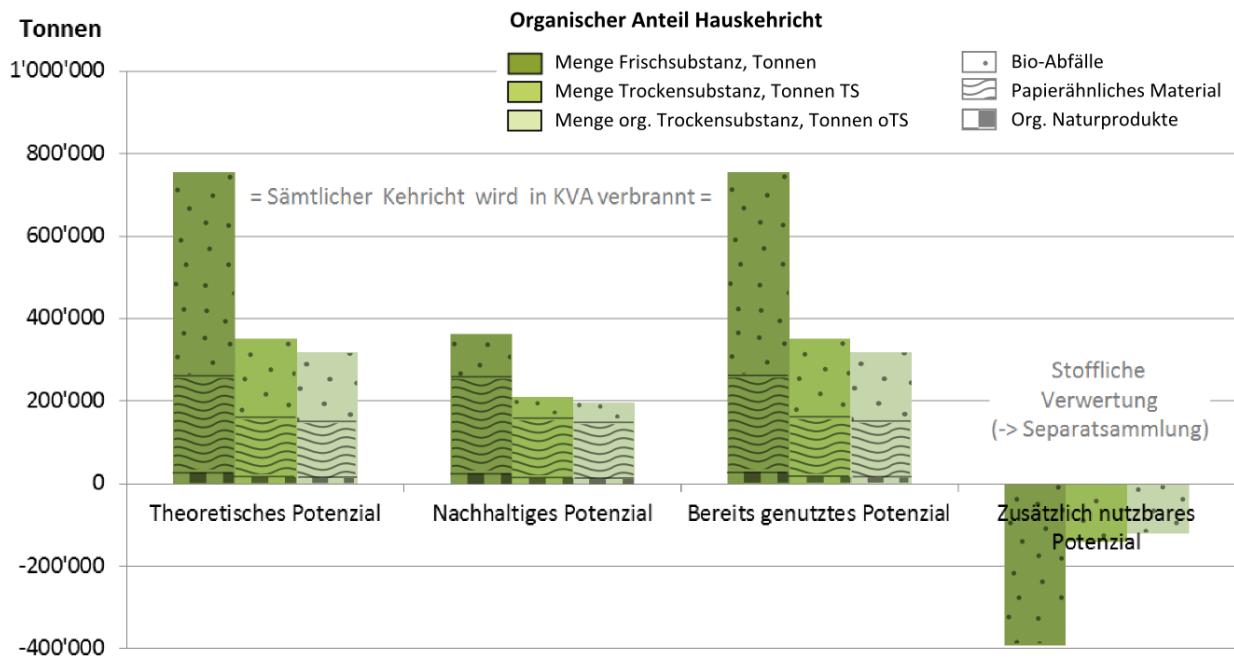


Abbildung 15: Potenzialanalyse der jährlich anfallenden organischen Hauskehrichtmenge in der Schweiz (aufgeteilt nach den verschiedenen Fraktionen: Bio-Abfälle, papierähnliches Material, org. Naturprodukte).

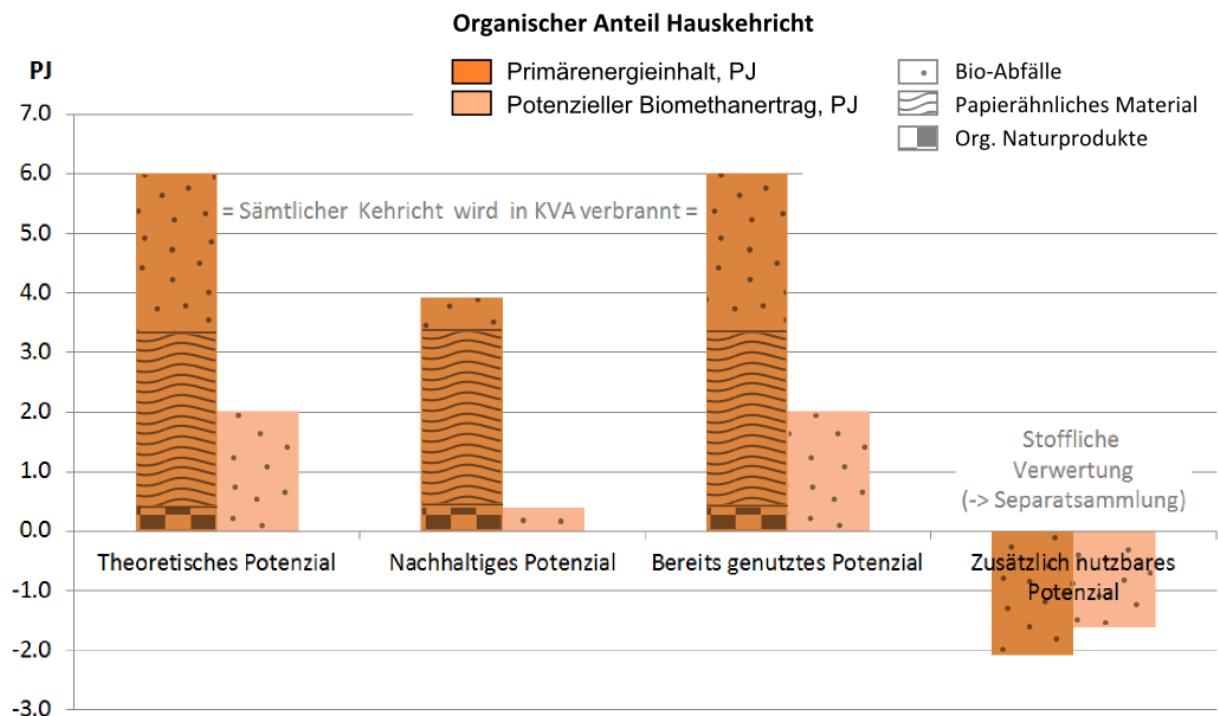


Abbildung 16: Potenzialanalyse des Energieinhaltes der jährlich anfallenden organischen Hauskehrichtmenge in der Schweiz (aufgeteilt nach den verschiedenen Fraktionen: Bio-Abfälle, papierähnliches Material, org. Naturprodukte).

Zur Veranschaulichung zeigt *Abbildung 17* die Verteilung des theoretischen Potenzials von organischem Hauskehricht auf das ermittelte nachhaltige Potenzial resp. Restriktion. Die Angaben betreffen jeweils Tonnen Trockensubstanz und Primärenergieinhalt.

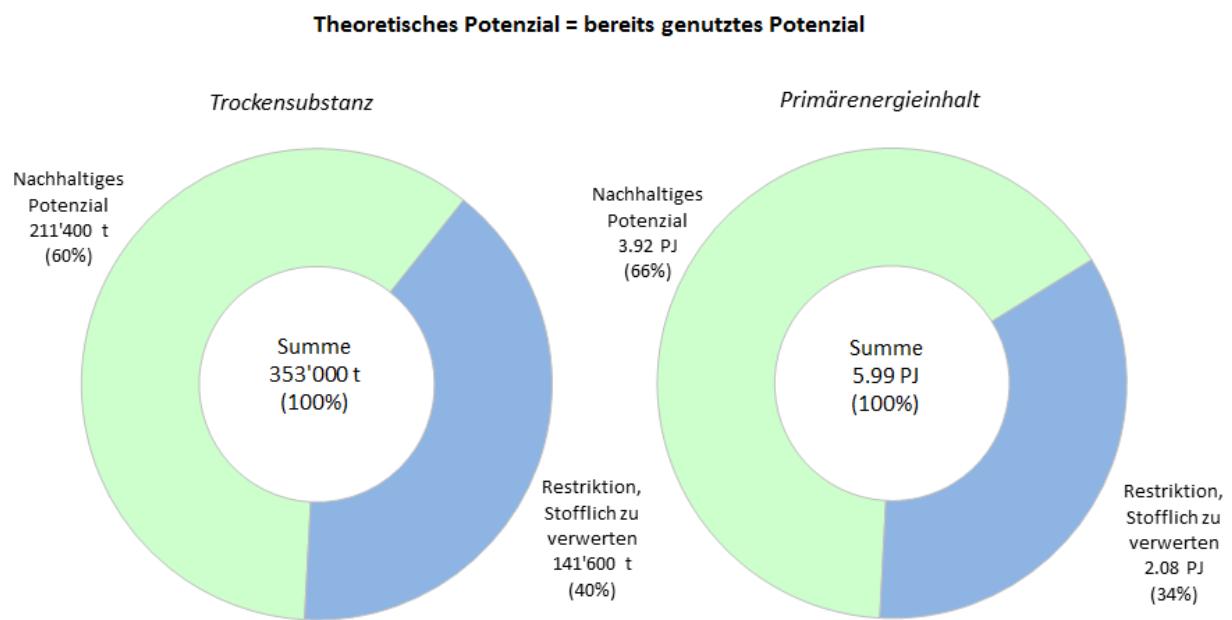


Abbildung 17: Verteilung des theoretischen Potenzials von organischem Kehricht in der Schweiz auf das ermittelte nachhaltige Potenzial resp. Restriktion (Tonnen Trockensubstanz und Primärenergieinhalt PJ).

4 Diskussion und Folgerungen

Produktions-, Konsum- und Entsorgungsverhalten der Schweizer Bevölkerung verursachen jährlich 6 Mio. Tonnen Siedlungsabfälle, die sachgerecht beseitigt werden müssen. Im Sinne einer Entwicklung von einer Abfall- zu einer Ressourcenwirtschaft werden in der Schweizer Abfallverordnung (VVEA) folgende Grundprinzipien festgehalten: Abfälle vermeiden, soweit möglich verwerten und umweltgerecht im Inland entsorgen [13]. Etwa die Hälfte des Siedlungsabfalls wird heute wiederverwertet, die andere Hälfte wird in einer Kehrichtverbrennungsanlage verbrannt [9].

Gemäss unseren Berechnungen wurde im Jahr 2013 eine Menge Hauskehricht organischer Herkunft von total 757'000 Tonnen von den Gemeinden entsorgt, wobei dieser Anteil etwa die Hälfte des gesamten Schweizer Hauskehrichts ausmachte (1.5 Mio. Tonnen). Diese Zahl stimmt etwa mit der BAFU-Abschätzung von total 1.6 Mio. Tonnen Hauskehricht im Jahr 2012 überein [1]. Mögliche Gründe hierfür resultieren aus Unsicherheiten im Rahmen der Datenerfassung oder unterschiedlichen Ansätzen. Trotz Bevölkerungswachstum und steigendem Konsum konnte die verbrannte Kehrichtmenge in den letzten Jahren aufgrund zunehmender Recycling-Quote relativ konstant gehalten werden [3]. Aufgrund der Richtlinien der VVEA ist auch künftig mit einer Steigerung der Separatsammlung beziehungsweise mit einer weiterhin relativ konstanten Kehrichtmenge zu rechnen. Eine wesentliche Änderung der Hauskehrichtmenge ist langfristig aber nicht ausgeschlossen. Insbesondere Nahrungsmittelabfälle sind heutzutage nicht mehr gesellschaftlich akzeptiert und mehrere Studien wurden in den letzten Jahren durchgeführt mit dem Ziel, diesen Abfallstrom stark zu reduzieren [4, 19].

Nach unseren Berechnungen beträgt der Primärenergieinhalt des organischen Hauskehrichtanteils rund sechs PJ pro Jahr. Als Vergleich entspricht dies umgerechnet dem Energieinhalt von etwa 139'000 Tonnen Rohöl (Annahme, Heizwert von Rohöl = 43.2 MJ/kg) oder 0.54% des totalen Energie-Bruttoverbrauchs der Schweiz (1108 PJ) [6]. Heute wird bereits der gesamte Hauskehricht durch Verbrennung in einer KVA als erneuerbarer Energieträger zur Strom- und Fernwärmeproduktion genutzt. Bezüglich Ressourcenmenge ist somit kein zusätzliches Potenzial vorhanden. Vielmehr strebt die VVEA eine Verminderung und Verwertung durch Separatsammlung der Abfälle an [13]. An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich feuchte Bio-Abfälle generell ohnehin schlecht als Brennstoff eignen, da die Verbrennungseffizienz durch die hohe Feuchtigkeit gemindert wird. Neben der Energieeffizienz bietet die Vergärung von Bio-Abfällen die zusätzliche Möglichkeit, das Gärget als Dünger einzusetzen, wodurch regionale Nährstoffkreisläufe geschlossen werden können. Gemäss unseren Berechnungen beträgt der potentielle Biogasertrag total zwei PJ. Aus dem entstehenden Biogas lassen sich sowohl Wärme, als auch Strom und Treibstoff produzieren. Darüber hinaus ist es speicherbar und kann die Fluktuation der erneuerbaren Energien aus Wind und Sonne ausgleichen. Es wurde angenommen, dass bis zu 80% der Bio-Abfälle, die heute im Hauskehricht landen, separat gesammelt werden könnten [1]. Auf diese Weise resultiert einerseits ein negatives zusätzliches Potenzial des organischen Anteils im Hauskehricht und andererseits eine Verschiebung dieser Ressourcenmenge zu den separat gesammelten biogenen Abfällen (sogenanntes Grüngut). In anderen Ländern wie Dänemark werden zurzeit jedoch versuchsweise auch andere Ansätze der Vergärung ohne Separatsammlung geprüft [20]. Vorteile wären geringere Kosten und eine vereinfachte Logistik.

Eine quantitative Erhöhung der Ressourcennutzung ist beim Hauskehricht nicht gegeben. Eine bessere Energiebilanz durch Optimierung der Prozesskette, Steigerung der KVA-Effizienz oder durch neue Verfahren kann jedoch durchaus erzielt werden (nicht Teil dieser Studie). Diesbezüglich fordert die VVEA eine Verwertung der Abfälle nach dem Stand der Technik (Art. 12) [13].

Literatur

- [1] BAFU, 2012: Erhebung der Kehrichtzusammensetzung 2012, 63 S.
- [2] BAFU, 2012: Gesamtmenge der Siedlungsabfälle und Recyclingquote 2012, 4 S.
- [3] BAFU, 2014: Gesamtmenge der Siedlungsabfälle und Recyclingquote 2014,
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/02/06/ind17.indicator.1300209.13002.html>.
- [4] Beretta, C.; Stoessel, F.; Baier, U.; Hellweg, S., 2013: Quantifying food losses and the potential for reduction in Switzerland, Waste Management, (33): 764-773.
- [5] BFE, 2010: Berechnung der Referenzanlagen KVA für die kostendeckende Einspeisevergütung, 22 S.
- [6] BFE, 2015: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014.
- [7] BFS, 2005: Eidgenössische Volkszählung 2000, Die Raumgliederungen der Schweiz, 232 S.
- [8] BFS, 2013: Tabelle Ständige und Nichtständige Wohnbevölkerung nach institutionellen Gliederungen, Geschlecht, Nationalität und Alter. 1991-2013,
http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/01/02/blank/key/raeumliche_verteilung/kantone_gemeinden.html.
- [9] BFS, 2014: Siedlungsabfälle (je-d-02.03.05.02).
- [10] Cerbe, G., 2008: Grundlagen der Gastechnik, Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung, 653 S.
- [11] Der Schweizerische Bundesrat, 1983: Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG), 7. Oktober 1983 (Stand 01.08.2016).
- [12] Der Schweizerische Bundesrat, 1990: Technische Verordnung über Abfälle (TVA), 10.12.1990 (Stand 2011).
- [13] Der Schweizerische Bundesrat, 2015: Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA), 4.12.2015 (Stand 1.2016).
- [14] Europäisches Parlament-Rat der Europäischen Union, 2008: Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle vom 19. November 2008.
- [15] Herrmann, V., 2015: Beurteilung des Potenzials von biogenen Abfällen aus Haushalten sowie Grüngut aus der kommunalen Landschaftspflege, Bachelor Thesis. Institute of Environmental Engineering (IfU), EHTZ, Switzerland, 50 S.
- [16] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H., 2009: Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 1030 S.
- [17] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), 2013: Faustzahlen Biogas, 360 S.
- [18] Lemann, F.; Neumann, W., 2012: Abfalltechnik, 411 S.
- [19] Projektgruppe Food Waste; BLW; BAFU; BLV; DEZA, 2015: Bilanz Stakeholderdialog 2013 - 2014 und weitere Arbeiten der Projektgruppe Food Waste des Bundes, 42 S.
- [20] Tonini, D.; Dorini, G.; Fruergaard Astrup, T., 2014: Bioenergy, material and nutrients recovery from household waste: Advanced material, substance, energy and cost flow analysis of a waste refinery process, Applied Energy. 121: 64-78.

Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene
Theoretisches Potenzial des organischen Hauskehrichtanteils, Referenzjahr 2013 (A)

NAME	Total Kehricht			Fraktion Bio-Abfälle			Fraktion papierähnliches Material		
	t FS	t TS	t oTS	Primärenergie TJ	Pot. Biomethan TJ	t FS	t TS	t oTS	Primärenergie TJ
Aargau	106759	34936	12577	10816	185	144	17627	11457	10942
Appenzell Ausserrhoden	9943	3305	1190	1023	17	14	1619	1052	1005
Appenzell Innerrhoden	2542	750	270	232	4	3	407	264	252
Basel-Landschaft	44160	14748	5309	4566	78	61	7549	4907	4686
Basel-Stadt	36449	13740	4946	4254	73	56	6419	4172	3984
Bern / Bern	179818	59854	21547	18531	317	246	29548	19206	18342
Fribourg / Freiburg	51341	16389	5900	5074	87	67	8536	5549	5299
Genève	82668	29742	10707	9208	157	122	14453	9395	8972
Glarus	7501	2649	954	820	14	11	1064	692	660
Graubünden	42827	14047	5057	4349	74	58	6350	4128	3942
Jura	13035	4181	1505	1295	22	17	2050	1332	1272
Luzern	69294	21939	7898	6792	116	90	11503	7477	7140
Neuchâtel	33351	11144	4012	3450	59	46	5594	3636	3473
Nidwalden	7792	2637	949	816	14	11	1407	915	874
Obwalden	8276	2744	988	849	15	11	1207	784	749
Schaffhausen	14146	4572	1646	1415	24	19	2367	1538	1469
Schweiz	26143	8698	3131	2693	46	36	4386	2851	2723
Solothurn	45867	15078	5428	4668	80	62	7709	5011	4786
St. Gallen	90247	30129	10846	9328	159	124	14510	9432	9007
Thurgau	46008	14756	5312	4569	78	61	7492	4870	4651
Ticino	67019	22319	8035	6910	118	92	11062	7190	6867
Uri	6488	2041	735	632	11	8	1025	666	636
Valais / Wallis	131205	44582	16050	13803	236	183	22209	14436	13786
Vaud	68080	22463	8087	6955	119	92	10515	6835	6527
Zug	20186	6811	2452	2109	36	28	3387	2202	2102
Zürich	247074	86527	31150	26789	458	356	42674	27738	26490
CH total	1458219	490781	176681	151946	2597	2017	242669	157735	150636

Theoretisches Potenzial des organischen Hauskehrichtanteils, Referenzjahr 2013 (B)

NAME	Fraktion org. Naturprodukte				Total org. Kehrichtanteil		
	t FS	t TS	t OTS	Primärenergie TJ	t FS	t TS	Primärenergie TJ
Aargau	2072	1595	1533	33	54635	25629	439
Appenzell Ausserrhoden	134	103	99	2	5058	2345	40
Appenzell Innerrhoden	58	44	43	1	1215	578	10
Basel-Landschaft	868	668	642	14	23165	10884	187
Basel-Stadt	232	178	171	4	20391	9296	157
Bern / Bern	2918	2247	2159	47	92320	43000	734
Fribourg / Freiburg	1023	787	757	17	25948	12236	210
Genève	975	750	721	16	45170	20852	354
Glarus	52	40	39	1	3765	1686	28
Graubünden	834	642	617	13	21231	9827	167
Jura	232	179	172	4	6463	3016	52
Luzern	1295	997	959	21	34737	16372	281
Neuchâtel	330	254	244	5	17068	7902	134
Nidwalden	118	91	87	2	4162	1955	33
Obwalden	137	106	102	2	4088	1878	32
Schaffhausen	193	149	143	3	7132	3333	57
Schwyz	404	311	299	7	13488	6293	107
Solothurn	851	655	630	14	23638	11094	190
St. Gallen	1194	919	883	19	45833	21197	360
Thurgau	783	603	580	13	23031	10785	184
Ticino	1001	771	741	16	34382	15996	273
Uri	111	86	82	2	3177	1487	25
Valais / Wallis	1993	1535	1475	32	68784	32021	546
Vaud	1167	899	864	19	34145	15821	269
Zug	274	211	203	4	10472	4865	83
Zürich	3330	2564	2464	54	132531	61452	1046
CH total	22579	17384	16709	365	756029	351800	5999

Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz
Potenzialanalyse organischen Hauskehrichtanteils in der Schweiz

Organischer Anteil Hauskehricht	Menge Frischsubstanz (Tonnen)	Menge Trockensubstanz (Tonnen TS)	Menge org. Trockensubstanz (Tonnen oTS)	Primärenergieinhalt (PJ)	Potenzieller Biomethanertrag (PJ)	Bemerkung
Theoretisches Potenzial	756'000	351'800	319'300	6.0	2.0	
Nachhaltiges Potenzial	363'400	210'500	197'700	3.9	0.4	
Bereits genutztes Potenzial	756'000	351'800	319'300	6.0	2.0	
Zusätzlich nutzbares Potenzial	-392'600	-141'300	-121'600	-2.1	-1.6	Verschiebung von 80% der Kategorie biogener Anteil Kehricht zum Grüngut

Grüngut aus Haushalt und Landschaft



Bild: Vanessa Burg, WSL

Vanessa Burg

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	230
1 Einleitung.....	231
1.1 Zielsetzung und Überblick	231
1.2 Aktuelle Situation Schweiz.....	232
2 Methoden.....	234
2.1 Datengrundlage und Kenngrössen	234
2.2 Theoretisches Potenzial.....	235
2.3 Nachhaltiges Potenzial	237
2.4 Bereits genutztes Potenzial	238
2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial.....	238
3 Resultate	239
3.1 Theoretisches Potenzial.....	239
3.2 Nachhaltiges Potenzial	242
3.3 Gesamtschau der Potenziale	243
4 Diskussion und Folgerungen	246
Literatur	247
Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene	248
Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz	249

Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt	KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
BioSweet	Biomass for Swiss Energy Future	NI	Normliter
BFS	Bundesamt für Statistik	oTS	Organische Trockensubstanz
ChemRRV	Chemikalien-Risiko Reduktionsverordnung	PJ	Petajoule (10^{15}) Swiss Competence Center for Energy Research
DÜV	Dünger-Verordnung	SCCER	Terajoule (10^{12})
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	TJ	Trockensubstanz
EW	Einwohner	TS	Technische Verordnung über Abfälle
FS	Frischsubstanz	TVA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen
GIS	Geoinformationssystem	VVEA	
Hu	Unterer Heizwert		
IfU	Institut für Umweltingenieur- Wissenschaften, ETHZ		

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung und Überblick

Unter *Grüngut* werden allgemein nicht-verholzte, *biogene Abfälle* verstanden, die aus den *Haushalten* oder aus der *Landschaftspflege* stammen und im Rahmen der kommunalen Abfallwirtschaft *separat gesammelt* werden. Kleinmengen vergleichbarer Abfälle von Unternehmen, die der gewöhnlichen Separatsammlung der Gemeinde angeschlossen sind, gehören auch dazu. Nicht in diese Kategorie fallen spezifische Abfälle aus der industriellen oder gewerblichen Produktion, sowie gemischte Siedlungsabfälle respektive Kehricht. Verholzte Gartenabfälle werden im Teilbericht «Flurholz» behandelt. Aktuell sind die Sammlung und Verwertung von biogenen Abfällen in der Schweiz in jeder Gemeinde anders geregelt. Ebenso lässt sich die Unterhaltspraxis der Grünflächen nicht generalisieren. Theoretisch zusätzliche Möglichkeiten aufgrund veränderter Bewirtschaftung der öffentlichen Grünflächen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Um eine mit den anderen Biomasseressourcen vergleichbarere Basis zu schaffen, werden sowohl die anfallende Menge (Frischsubstanz, Trockensubstanz, organische Trockensubstanz) als auch der Energieinhalt (Primärenergieinhalt, potenzieller Biomethanertrag) und die räumliche Verteilung des Grüngutes abgeschätzt. Untersucht wird die Energie, die in der Ressource steckt. Nicht Teil dieser Arbeit ist die Möglichkeit einer effizienteren Energieausbeute durch verbesserte Technologie.

Zum Überblick werden die Potenzialebenen in diesem Teilbericht wie folgt definiert und quantifiziert:

Theoretisches Potenzial

Gesamte Menge Grüngut aus Haushalt und Landschaft, welche aktuell in der Schweiz in einem Jahr getrennt gesammelt wird («Jährliches Aufkommen»). → Kapitel 2.2

Nachhaltiges Potenzial

Zum bereits getrennt gesammelten Grüngut (= theoretisches Potenzial) wird die Menge Bio-Abfälle hinzugerechnet, die heute im Hauskehricht landet, jedoch nach gegenwärtigem Stand stofflich zu verwerten wäre (VVEA, Art. 13). Bei dieser Menge handelt es sich um eine Verschiebung aus dem gemischten Hauskehricht zum getrennt gesammelten Grüngut. Um eine Doppelzählung bei der Gesamtbetrachtung der theoretischen Potenziale zu verhindern, wird diese Menge dem nachhaltigen Potenzial hinzugefügt (Zwischenpotenzial). Überdies wird der Anteil biogener Abfälle abgezogen, welcher unter den aktuellen Gegebenheiten vorzugewiesen durch dezentrale Kompostierung möglichst am Ort ihrer Entstehung zu verwerten ist.

Auf Ressourcenebene gilt heute: nachhaltiges Potenzial > theoretisches Potenzial. → Kapitel 2.3

Bereits genutztes Potenzial

Anteil Grüngut, welcher heute bereits energetisch genutzt wird. Da getrennt gesammelte biogene Abfälle in der Schweiz entweder kompostiert oder vergärt werden, handelt es sich um den Anteil, der aktuell durch Vergärung sowohl stofflich als auch energetisch verwertet wird. → Kapitel 2.4

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial. → Kapitel 2.5

1.2 Aktuelle Situation Schweiz

Biogene Abfälle können nur dann einer sinnvollen Verwertung zugeführt werden, wenn sie getrennt gesammelt werden. Bedingt durch eine unzureichend getrennte Sammlung landet ein Gutteil der biogenen Haushaltsabfälle im Kehricht und wird zusammen mit dem restlichen Hausabfall in einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) verbrannt (vgl. Teilbericht «Organischer Anteil im Hauskehricht»). Die anfallende KVA-Schlacke wird anschliessend deponiert und der Nährstoffkreislauf somit unterbrochen. In der Schweiz sind Sammlung und Verwertung von Grüngut in jeder Gemeinde anders geregelt. Heutzutage bieten die meisten Gemeinden eine separate Sammlung von Bio-Abfällen an. Die Zusammensetzung der aktuell gesammelten Abfälle kann jedoch sehr unterschiedlich sein. So sind biogene Abfälle aus der Küche hygienisch problematischer als aus Gärten und Grünflächen und zum Teil nicht in der Grüntonne erlaubt.

Gemäss Bundesamt für Statistik (BFS) fielen im Jahr 2014 in der Schweiz total 6 Mio. Tonnen Siedlungsabfälle an [7] (vgl. Abbildung 1). Etwas mehr als die Hälfte wurde separat gesammelt und dem Recycling zugeführt. Gemäss Schätzungen des Bundesamt für Umwelt (BAFU) wurden dabei etwa 1.25 Mio. Tonnen Bio-Abfälle aus Haushalten und Gewerbe separat gesammelt, wobei sich die gesammelte Menge in den letzten 20 Jahren mehr als verdreifacht hat [7]. Gemäss BAFU korreliert die Sammlungszunahme mit dem erhöhten Anfall Siedlungsabfälle, welcher durch die wachsende Bevölkerung, die Wirtschaft und das Konsumverhalten verursacht wird [1]. Durch die verbesserte Separierung der verwertbaren Fraktionen konnten die verbrannte Kehrichtmenge relativ konstant gehalten und die verwerteten Mengen gesteigert werden.

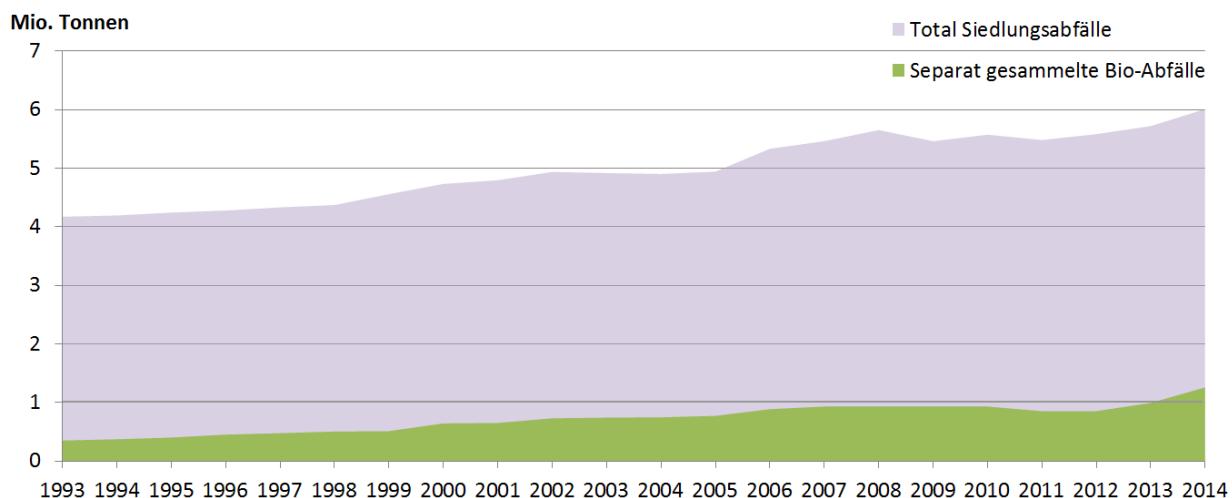


Abbildung 1: Entwicklung der total entsorgten Siedlungsabfälle [7] und der separat gesammelten Bio-Abfälle [7] seit 1993 in der Schweiz.

Die Verwertung von getrennt gesammeltem Grüngut aus Haushalt und Landschaft hat zwei grosse Konkurrenten: die Kompostierung und die Vergärung. Bei der Kompostierung findet eine rein stoffliche Verwertung als Dünger statt. Vorteil der Vergärung ist, dass zusätzlich zu den stofflich nutzbaren Gärresten, auch energetisch nutzbares Biogas anfällt. Dabei kann das anfallende Biogas sowohl als Treibstoff als auch zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden. Es sei auch darauf hingewiesen, dass Biogas, durch seine leichte Speicherbarkeit, die Möglichkeit der bedarfsgerechten Energieerzeugung als Ergänzung zu den fluktuiierenden erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne bietet. Gemäss Inspektorat der Kompostier-und Vergäranlagen der Schweiz wurden im Jahr 2013 41% der gesamten separaten gesammelten biogenen Abfälle vergärt, 11% co-vergärt und 48% kompostiert [12]. Dabei hat die Bedeutung der Vergärung in den letzten Jahren stark zugenommen (vgl. Abbildung 2).

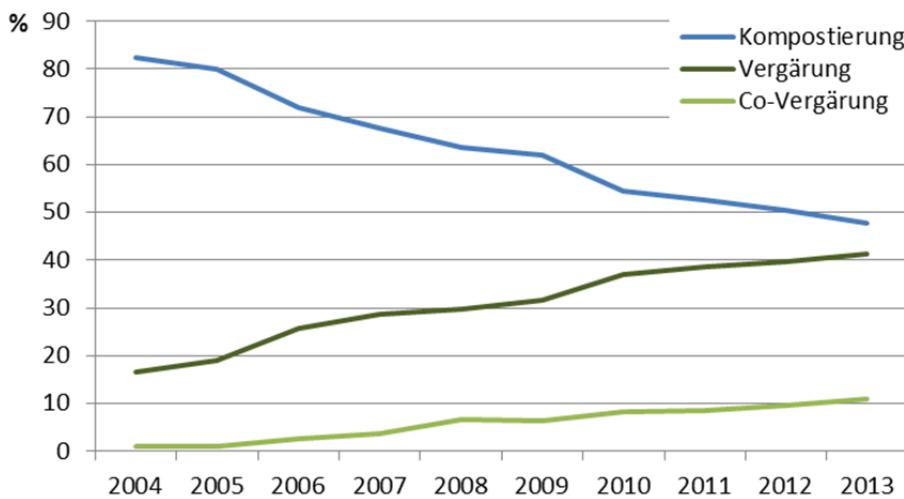


Abbildung 2: Verwertung von Bio-Abfällen in Kompostier- und Vergärungsanlagen der Schweiz (2004–2013) [12].

Am 1. Januar 2016 ist die Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) in Kraft getreten, welche die bisherige Technische Verordnung über Abfälle (TVA) vom Jahr 1990 ersetzt. Hauptziel der Verordnungsrevision ist, die Schonung der natürlichen Ressourcen und die Abfallwirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln. Zu den wichtigsten Neuerungen gehören konkrete Regelungen über die Verwertung. So sind biogene Abfälle in Zukunft so weit wie möglich und sinnvoll getrennt zu sammeln und stofflich zu verwerten (VVEA, Art. 13 und 14) [10]. Die Kantone sind verantwortlich bis Januar 2019 dafür zu sorgen (Art. 13 und 49). Die konkreten Auswirkungen der neuen VVEA resp. des Gebotes zur Getrenntsammlung auf die aktuellen Entsorgungswege der Bio-Abfälle (Abbildung 3) lassen sich somit noch nicht exakt aufzeigen und werden sich erst in den nächsten Jahren zeigen.

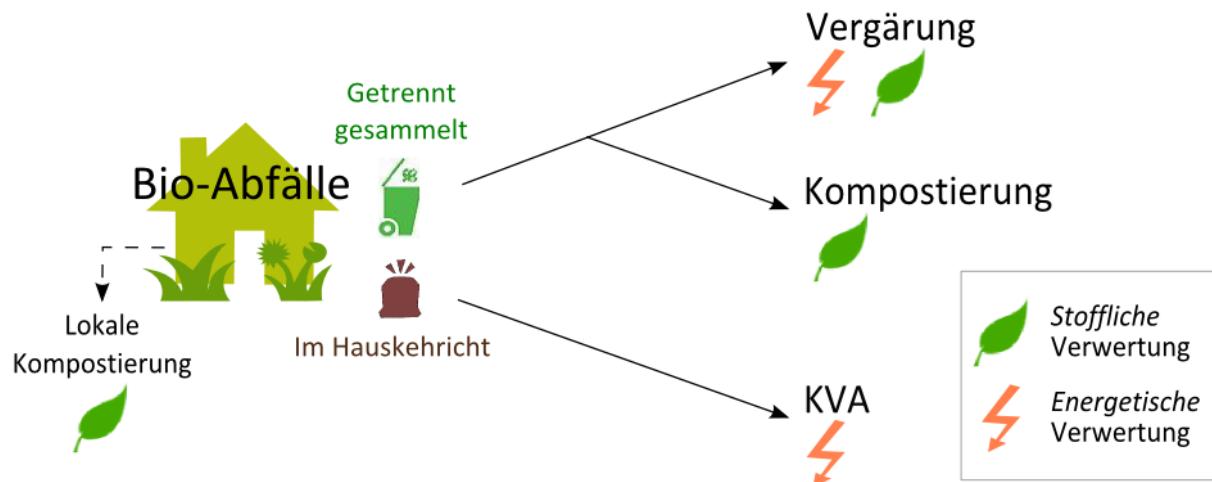


Abbildung 3: Aktuelle Entsorgungswege von Bio-Abfällen in der Schweiz.

2 Methoden

2.1 Datengrundlage und Kenngrößen

Existierende Datengrundlage

Im Jahr 2014 hat das Inspektorat der Kompostier- und Vergär Anlagen der Schweiz über 240 Verwertungsanlagen in 20 Kantonen kontrolliert [12]. Dabei wurden unter anderem auch die Verwertungsmengen der inspizierten Betriebe erhoben. Durch Hochrechnung der erhobenen Zahlen auf die gesamte Schweiz wurde eine Menge an verwerteten biogenen Abfällen (ohne Hofdünger) von total knapp 1.3 Mio. Tonnen geschätzt [2, 13]. Diese Gesamtmenge beinhaltet biogene Abfälle aus den Haushalten, aus der Landschaftspflege, sowie auch aus Industrie und Gewerbe. Gemäss Erhebung stammte dabei die grosse Mehrheit resp. mehr als die Hälfte aus Haushalten und etwa einen Viertel aus der Landschaftspflege (zusammen also hochgerechnet rund 1 Mio. Tonnen). Der Rest stammte aus der Industrie und dem Gewerbe.

Daneben wurden gemäss Statistik des Bundes im Jahr 2014 in der Schweiz total 1.25 Mio. Tonnen kompostierbare und vergärbare Abfälle aus Haushalt und Gewerbe separat verwertet [7]. Diese Gesamtmenge wurde nicht gemessen, sondern beruht auf Schätzungen. Als Vergleich wurden im Jahr 2013 etwa 20% weniger resp. rund 1 Mio. Tonnen und im Jahr 2009 etwa 0.9 Mio. Tonnen ausgewiesen.

Die Organisation Kommunale Infrastruktur (OKI) hat im Jahr 2009 eine landesweite Umfrage über die kommunale Abfallwirtschaft durchgeführt [17]. 377 Gemeinden, Städte und Abfallzweckverbände aus nahezu allen Kantonen haben teilgenommen. Aus den erhobenen Daten wurde eine durchschnittliche Menge von 67 kg gesammeltes Grüngut pro Einwohner und Jahr ermittelt. Das würde hochgerechnet einer Gesamtmenge von 520'000 Tonnen entsprechen.

Neue Erhebung

Da sich die Studien auf unterschiedliche Untersuchungsansätze, Bezugsgrößen und Zeitpunkte beziehen, sind auch die ermittelten Bio-Abfallmengen nicht direkt vergleichbar. Dies gilt umso mehr als in den letzten Jahren eine dynamische Entwicklung bei der Entsorgung und Verwertung der biogenen Abfälle beobachtet werden konnte. Aufgrund der engen Verbindung zwischen den biogenen Abfällen die im Hauskehricht landen und denen, welche separat gesammelt werden, wurde entschieden, eine neue, einheitliche und breite Datengrundlage zu schaffen. Durch eine bottom-up-Betrachtung sollen auch strukturelle, sowie räumliche Eigenschaften berücksichtigt werden. Zusammen mit dem Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU) der ETH Zürich wurde 2015 eine Bachelorarbeit begleitet, im Rahmen derer eine Erhebung zum kommunalen Entsorgungsverhalten durchgeführt wurde [11]. Dabei wurden sowohl die Menge gesammeltes Grüngut aus Haushalten und Landschaftspflege als auch entsorgerter Hauskehricht nachgefragt. Daten von insgesamt 1372 Gemeinden aus 17 Kantonen wurden ausgewertet (Referenzjahr 2013). Grüngut nach der Herkunft – resp. aus den Haushalten oder der öffentlichen Landschaftspflege – separat zu erheben und zu analysieren war jedoch nicht möglich. Es konnte nur eine Gesamtmenge angegeben werden. Für weiterführende Informationen wird auf die entsprechende Arbeit verwiesen.

Kenngrößen

Für alle Biomassenpotenziale werden sowohl Ressourcenmenge als auch Energieinhalt berechnet. Bei der Angabe der Mengen sind je nach Ressource unterschiedliche Einheiten üblich. Um die verschiedenen Biomassen miteinander vergleichen zu können, werden die Mengen jeweils in Tonnen Frischsubstanz und Trockensubstanz angegeben. Zur Charakterisierung des Schweizer Grüngutes wurden die Werte entsprechend den typischen mitteleuropäischen Eigenschaften gemäss aktueller Abfalltechnik verwendet [16] (*Tabelle 1*).

Tabelle 1: Angenommene physikalische und chemische Eigenschaften von Grüngut (biogene Abfälle) [16].

Trockensubstanz TS (%)	Inert (% der TS)	Kohlenstoff C (% der TS)	Wasserstoff H (% der TS)	Sauerstoff O (% der TS)	Stickstoff N (% der TS)	Schwefel S (% der TS)
36	13.9	39.0	5.6	39.0	2.2	0.06

Der Heizwert biogener Festbrennstoffe lässt sich aus der Elementzusammensetzung abschätzen. Zur Berechnung wurde die Näherungsformel nach Boie verwendet, bei der ein mittlerer Fehler von 4% zu erwarten ist [14]. Demnach errechnet sich der untere Heizwert biogener Festbrennstoffe im wasserfreien Zustand in MJ/kg aus den Elementgehalten von Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) sowie den Nährstoffen Schwefel (S) und Stickstoff (N), in % der Trockensubstanz:

$$\text{Unterer Heizwert}_{TS} = 34.8 \times C + 93.9 \times H + 10.5 \times S + 6.3 \times N - 10.8 \times O$$

Gemäss Berechnung mit der Formel nach Boie [14] weist Grüngut einen Heizwert von 14.7 MJ/kg TS auf.

In einem zweiten Schritt wurde die in der Biomasse enthaltene Energie – die sogenannte Primärenergie – der biogenen Abfälle berechnet. Die so berechnete Energiemenge bezieht sich auf den unteren Heizwert (der Trockensubstanz (TS)).

$$\text{Energieinhalt}_{TS} [\text{MJ}] = \text{Masse}_{FS} [\text{kg}] \times \text{Anteil Trockensubstanz}_{FS} [-] \times \text{Unterer Heizwert} [\text{MJ}/\text{kg}_{TS}]$$

Zudem wurde auch der potenzielle Biomethanertrag in Normliter (NL) ermittelt. Die organische Trockensubstanz (oTS) ist der Anteil der organischen Bestandteile eines Stoffes nach vollständigem Entzug von Wasser und aller mineralischer Bestandteile (inert). Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Methanertrag}_{TS} [\text{NL}] \\ = \text{Masse}_{TS} [\text{kg}] \times \text{Anteil Organisch}_{TS} [-] \times \text{Biogasertrag}_{oTS} [\text{NL}/\text{kg}_{oTS}] \times \text{Methangehalt} [-] \end{aligned}$$

Mit einem unteren Heizwert für Methan von 35.883 MJ/m³ [8] lässt sich auch der Energieinhalt des Methanertrags berechnen. Zur Berechnung des potenziellen Biogas- resp. Methanertrages des nicht-verholzten, getrennt gesammelten Grüngutes wurden die Richtwerte gemäss *Tabelle 2* verwendet (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, KTBL) [15].

Tabelle 2: Verwendete Zahlen zur Abschätzung des potenziellen Gasertrages aus Grüngut (biogene Abfälle) [15].

Biogasertrag (NL/kg oTS)	Methangehalt (%)	Methanertrag (NL/kg oTS)
615	60	370

2.2 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial bezieht sich auf die gesamte anfallende Biomasse ohne Berücksichtigung von nutzungsbedingten Einschränkungen (vgl. Einleitung des Gesamtberichtes). Das theoretische Potenzial beinhaltet somit das gesamte Grüngut, das aktuell in der Schweiz in einem Jahr getrennt gesammelt wird («Jährliches Aufkommen»). Unter Grüngut werden allgemein *nicht-verholzte, biogene Abfälle* verstanden, die aus den *Haushalten* oder aus der *Landschaftspflege* stammen und im Rahmen der kommunalen Abfallwirtschaft *separat gesammelt* werden. Verholztes Material wird im Teilbericht «Flurholz» berücksichtigt.

Als Startpunkt zur Ermittlung des theoretischen Potenzials diente die IfU Bachelorarbeit von Herrmann (2015) im Rahmen derer eine umfassende Erhebung der erfassten Grüngutmenge auf Gemeindeebene durchgeführt wurde [11]. Das Bundesamt für Statistik (BFS) hat alle Schweizergemeinden aufgrund bestimmter Kriterien wie zum Beispiel Bevölkerungsstruktur, Einkommen und Zentrumsfunktion in 22 Gemeindetypen klassiert [4]. Das

Spektrum reicht von Grosszentren (Typ 1) bis zu Gemeinden mit starkem Bevölkerungsrückgang (Typ 22). Darauf aufbauend wurden die erhobenen Grüngut-Mengen von über 1300 Gemeinden den 22 BFS-Typen zugeordnet und gemittelt [11]. Auf diese Weise kann der Einfluss der Gemeindestruktur auf die Menge des gesammelten Grüngutes berücksichtigt werden. Zusätzlicher Vorteil der Einteilung in die Gemeindetypen ist die vollständige Anonymisierung der Daten – meistens eine Bedingung für die Offenlegung der Daten. *Tabelle 3* zeigt die auf diese Weise ermittelte mittlere Grüngutmenge aus Haushalt und Landschaft der verschiedenen Gemeindetypen pro Einwohner und Jahr.

Die höchste kommunal gesammelte Menge Grüngut pro Einwohner wurde bei einkommensstarken Gemeinden ermittelt. Konsumverhalten sowie grössere Garten- und Grünflächen wurden hierbei als mögliche Ursachen identifiziert. Die tiefsten Raten wurden bei den Grosszentren sowie ländlich geprägten Gemeinden festgestellt. Mögliche Ursachen in den Grosszentren sind, dass weniger private Grünflächen vorhanden sind und dass die separate Sammlung von Küchenabfällen noch nicht überall verbreitet ist. Bei den ländlichen Gemeinden ist anzunehmen, dass ein grosser Teil der biogenen Abfälle in die private Kompostierung geht und die gesammelte Menge geringer ausfällt.

Tabelle 3: Mittlere Menge Grüngut aus Haushalt und Landschaft der 22 BFS-Gemeindetypen [4] gemäss Datenerhebung Bachelorarbeit [11].

Gemeindetyp	Mittlere Grüngutmenge aus Haushalt und Landschaft (kg/EW·a)
1 Grosszentren	41.6
2 Mittelzentren	77.4
3 Kleinzentren	102.5
4 Peripheriezentren	95.9
5 Einkommensstarke Gemeinden	160.2
6 Touristische Gemeinden	95.5
7 Semitouristische Gemeinden	71.7
8 Gemeinden mit Heimen und Institutionen	127.4
9 Arbeitsplatzgemeinden metropolitaner Regionen	103.1
10 Suburbane Gemeinden metropolitaner Regionen	99.9
11 Periurbane Gemeinden metropolitaner Regionen	118.1
12 Arbeitsplatzgemeinden nicht-metropolitaner Regionen	131.0
13 Suburbane Gemeinden nicht-metropolitaner Regionen	125.9
14 Periurbane Gemeinden nicht-metropolitaner Regionen	133.7
15 Wegpendlergemeinden mit hoher Zuwanderung	99.6
16 Wegpendlergemeinden mit geringer Zuwanderung	121.9
17 Industriell-tertiäre Gemeinden	101.1
18 Industrielle Gemeinden	143.5
19 Agrar-industrielle Gemeinden	95.6
20 Agrar-tertiäre Gemeinden	102.0
21 Agrarische Gemeinden	56.3
22 Gemeinden mit starkem Bevölkerungsrückgang	56.1

Auf dieser Basis kann die pro Einwohner anfallende mittlere Grüngutmenge auf alle Schweizer Gemeinden des gleichen Typs übertragen werden. Zur Berechnung der in einer Gemeinde total anfallenden Menge Grüngut wurde die ständige und die nichtständige Wohnbevölkerung gemäss BFS für das Jahr 2013 verwendet [5]. Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Grüngutmenge}_{\text{Gemeinde}} [\text{kg}/\text{a}] \\ = \text{Anzahl Einwohner}_{\text{Gemeinde}} [\text{EW}] \times \text{Grüngutmenge pro Einwohner}_{\text{Gemeindetyp}} [\text{kg}/\text{EW} \cdot \text{a}] \end{aligned}$$

Die Grundlagen zur Umrechnung der so berechneten Menge Trockensubstanz in organische Trockensubstanz und in Frischsubstanz sowie zur Berechnung der Energieinhalte sind im Kapitel 2.1 aufgeführt. Abbildung 4 fasst das allgemeine Vorgehen zur Ermittlung der energetischen Potenziale von Grüngut aus der kommunalen Separatsammlung zusammen.

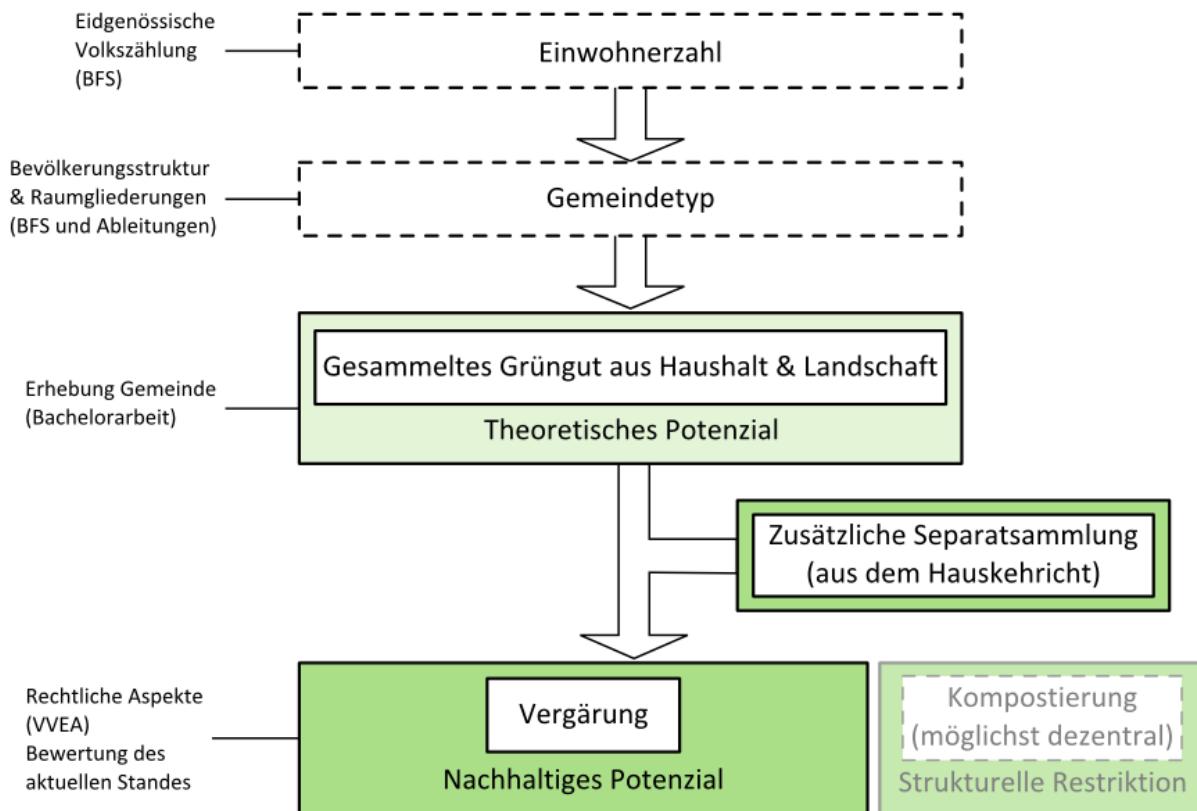


Abbildung 4: Modellansatz zur Ermittlung der energetischen Potenziale von Grüngut aus der Separatsammlung von Haushalten und der öffentlichen Landschaftspflege.

2.3 Nachhaltiges Potenzial

Gemäss VVEA sind Siedlungsabfälle «so weit wie möglich und sinnvoll» getrennt zu sammeln und stofflich zu verwerten (Art. 13, Abs. 4). Diese neue Regelung tritt am 01.01.2019 in Kraft (Art. 49). Insbesondere biogene Abfälle haben dabei einen hohen Gehalt an wertvollen Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff. Aus heutiger Sicht ist somit eine separate Sammlung anzustreben, da der Nährstoffkreislauf durch Verbrennung in einer KVA unterbrochen wird. Aufgrund der aktuellen Lage wurde angenommen, dass bis zu 80% der Bio-Abfälle, die heute im Hauskehricht landen, der Separatsammlung zugeführt werden könnten (vgl. Teilbericht «organischer Anteil im Hauskehricht»). Aus diesem Grund erfolgt eine nutzungsbedingte Verschiebung dieser Abfälle aus dem Hauskehricht zum separat gesammelten Grüngut (Abbildung 4).

Das theoretisch, maximal nutzbare Potenzial verringert sich um diejenige Menge, die nach heutigem Kenntnisstand als nicht nachhaltig energetisch nutzbar bewertet wird. Gründe können unausgereifte Technologien, ökologische Aspekte, politische/gesellschaftliche Akzeptanzprobleme, wirtschaftliche Hemmnisse oder rechtliche Bestimmungen sein. Aktuell werden separat gesammelte biogene Abfälle in der Schweiz entweder vergärt oder kompostiert (vgl. Kapitel 1.2). Durch Kompostierung erfolgt eine rein stoffliche Verwertung. Durch Vergärung fallen neben dem Gärsgut – das als Dünger genutzt werden darf, sofern die Dünger-Verordnung (DÜV) und die Chemikalien-Risiko-Reduktionsverordnung (ChemRRV) eingehalten sind – auch energetisch nutzbares Biogas an. Zusätzlicher Vorteil der Vergärung ist die vielseitige energetische

Verwendbarkeit des anfallenden Biogases sowie die leichte Speicherbarkeit, welche eine bedarfsgerechte Energieerzeugung ermöglicht. Es wird davon ausgegangen, dass getrennt gesammelte biogene Abfälle weitgehend vergärbar wären. Konkret wurde angenommen, dass lediglich ein kleiner Anteil von etwa 10% aus ökonomischen und strukturellen Gründen vorzugsweise dezentral resp. möglichst nah an der Quelle zu kompostieren wäre.

2.4 Bereits genutztes Potenzial

Separat verwertete biogene Abfälle werden heute in der Schweiz etwa je zur Hälfte vergärt (52%) oder kompostiert (48%) [1, 12]. Das bereits genutzte Potenzial besteht somit aus dem Anteil, welcher heute durch Biogas-Produktion in einer Vergärungsanlage bereits energetisch genutzt wird. *Abbildung 5* stellt die heutigen Verwertung- bzw. Entsorgungswege von separat gesammelten biogenen Abfällen in der Schweiz dar.

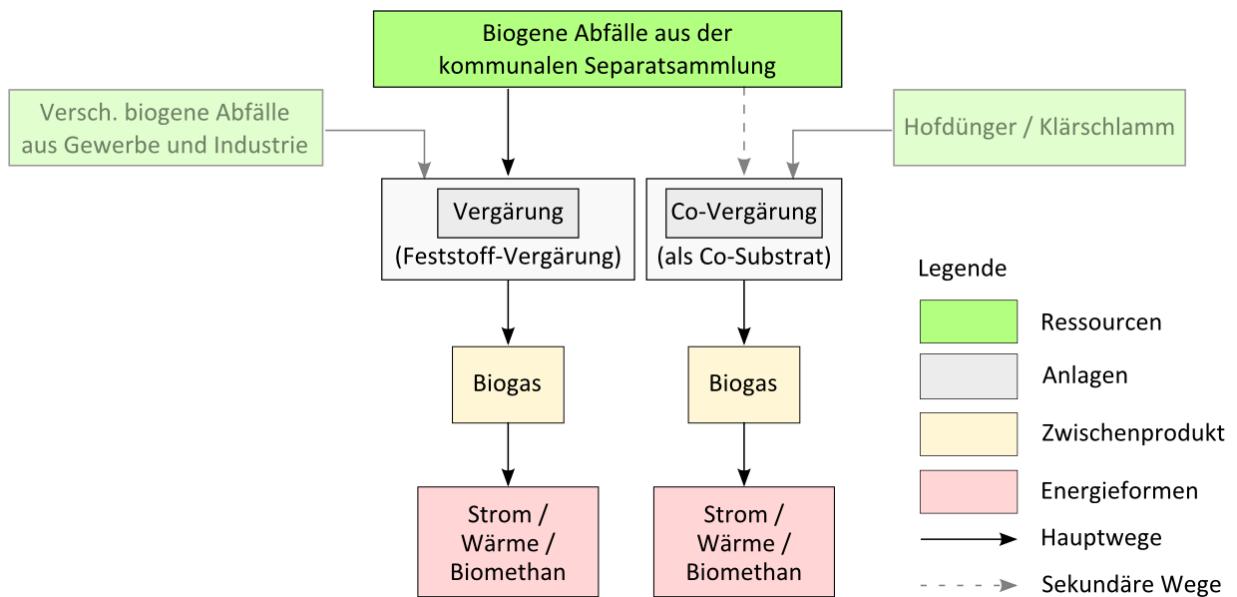


Abbildung 5: Aktuelle Verwertung resp. Entsorgung von separat gesammelten biogenen Abfällen in der Schweiz.

2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial

Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial.

3 Resultate

3.1 Theoretisches Potenzial

Ressourcenmenge

Gemäss Methode wird in einem ersten Schritt die zu erwartende Menge an aktuell gesammeltem Grüngut aus Haushalt und Landschaft in Tonnen Frischsubstanz für jede Schweizer Gemeinde aufgrund des Gemeindetyps berechnet (*Abbildung 6*). Hochgerechnet auf die ganze Schweiz beträgt die Menge Grüngut aus der Separatsammlung der Gemeinden total rund 815'000 Tonnen Frischsubstanz (= ca. 100 kg pro Jahr und Einwohner, Referenzjahr 2013).

Getrennt gesammeltes Grüngut, Tonnen FS

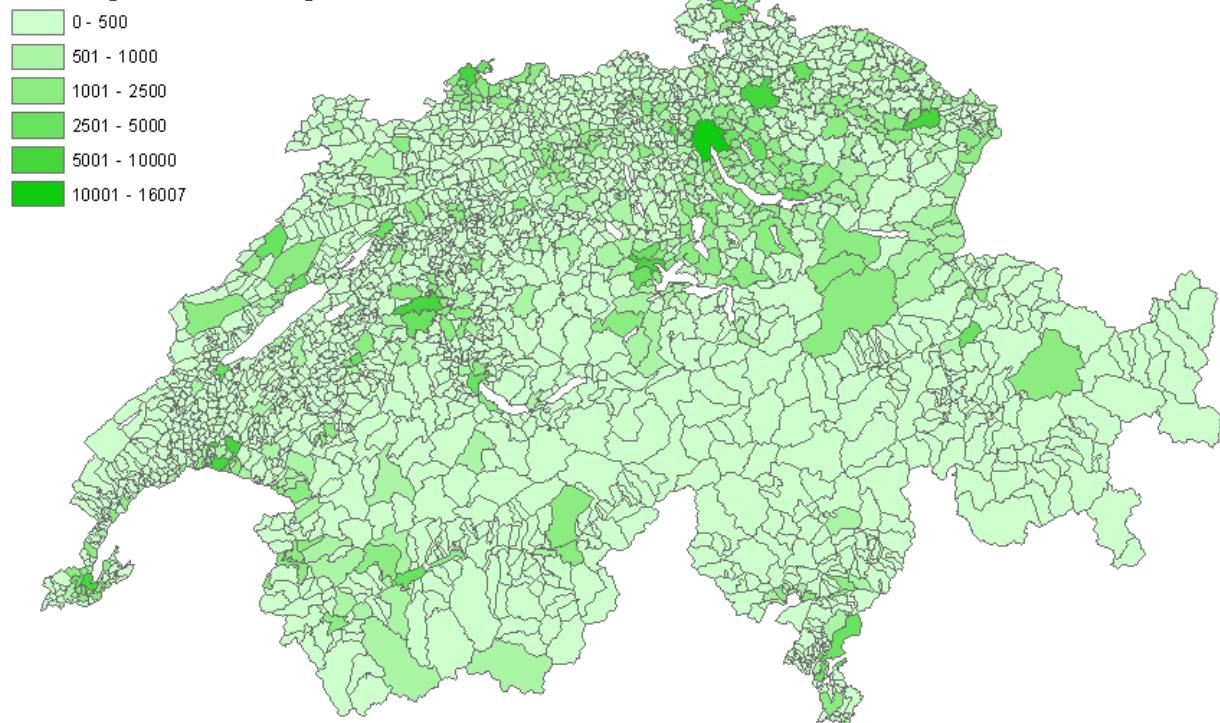


Abbildung 6: Theoretisches Potenzial, berechnete Grüngutmenge aus Haushalt und Landschaft auf Gemeindeebene (Tonnen Frischsubstanz / Jahr).

Die Frischsubstanz kann auch in Trockensubstanz (TS) und in organischer Trockensubstanz (oTS) angegeben werden. Die Resultate sind in der *Tabelle 4* zusammengefasst. *Abbildung 7* zeigt die räumliche Verteilung der berechneten Menge Trockensubstanz des gesammelten Grüngutes auf kantonaler Ebene. Die Zahlen sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

Tabelle 4: Theoretisches Potenzial, Getrennt gesammeltes Grüngut aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz (Referenzjahr 2013).

Frischsubstanz (Tonnen)	Trockensubstanz (Tonnen TS)	Org. Trockensubstanz Tonnen (oTS)	Primärenergie- inhalt (PJ)	Pot. Biomethan- Ertrag (PJ)
814'900	293'400	252'600	4.312	3.354

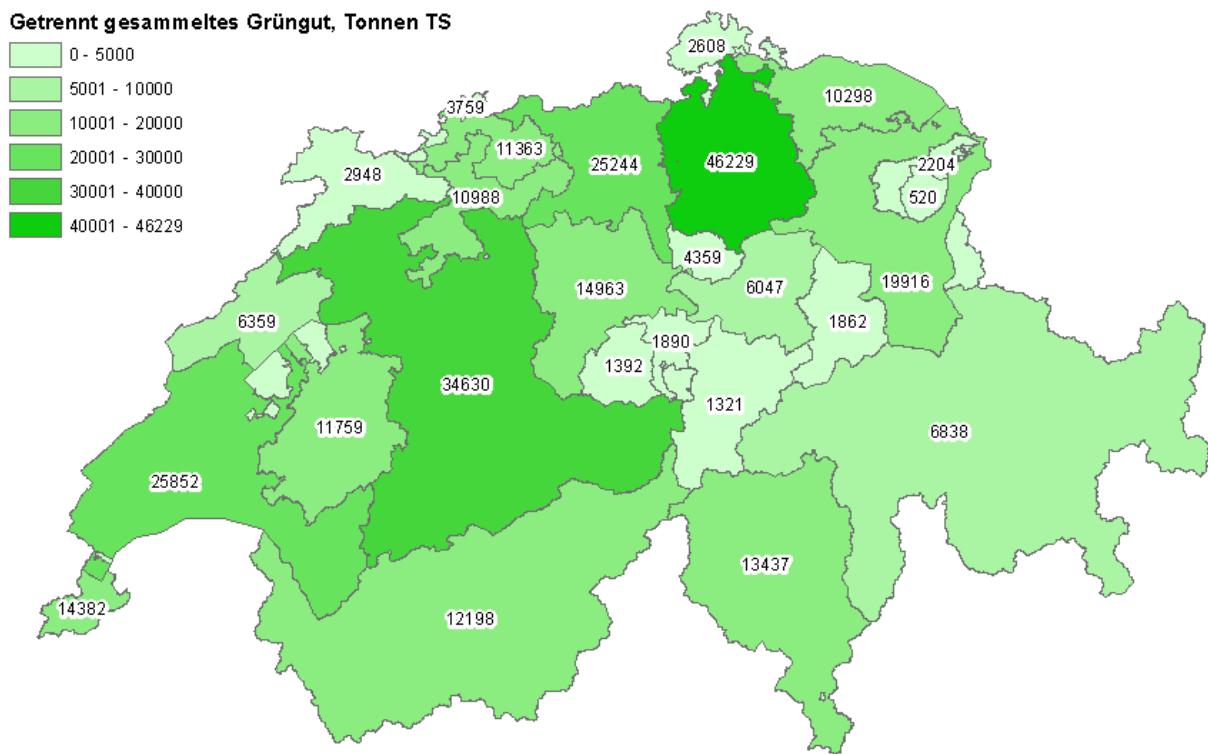


Abbildung 7: Theoretisches Potenzial, berechnete Grüngutmenge aus Haushalt und Landschaft auf Kantonsebene gemäss Berechnungen (Tonnen Trockensubstanz / Jahr).

Energieinhalt

Der Primärenergieinhalt bezieht sich auf die Trockensubstanz des Grüngutes und stellt die maximal verfügbare Energiemenge in der Biomasse dar. Die Berechnung des Primärenergiegehalts erfolgte über die Zuweisung von charakteristischen TS- und Heizwerten (vgl. Abschnitt 2.1). Gemäss Berechnungen beträgt der Primärenergiegehalt des anfallenden Grüngutes aus Haushalt und Landschaft 4.3 PJ. Abbildung 8 gibt dabei einen Überblick über die räumliche Verteilung. Ersichtlich ist, dass der Kanton Zürich mit 0.68 PJ das grösste theoretische Potenzial aufweist, gefolgt vom Kanton Bern (0.51PJ), Waadt (0.38 PJ) und Aargau (0.37 PJ). Dies ist vor allem auf die demografischen Gegebenheiten und die Kantonsgrössen zurückzuführen.

Gemäss heutiger Praxis erfolgt die energetische Nutzung von separat gesammelten biogenen Abfällen mittels anaerober Vergärung. Somit wurde auch der potenzielle Methanertrag des Grüngutes berechnet bzw. der potenzielle Energieinhalt aufgrund des Heizwertes von Methan. Gemäss Berechnungen beträgt der potenzielle Biomethanertrag des anfallenden Grüngutes aus Haushalt und Landschaft 3.35 PJ. Abbildung 9 zeigt die räumliche Verteilung auf kantonaler Ebene.

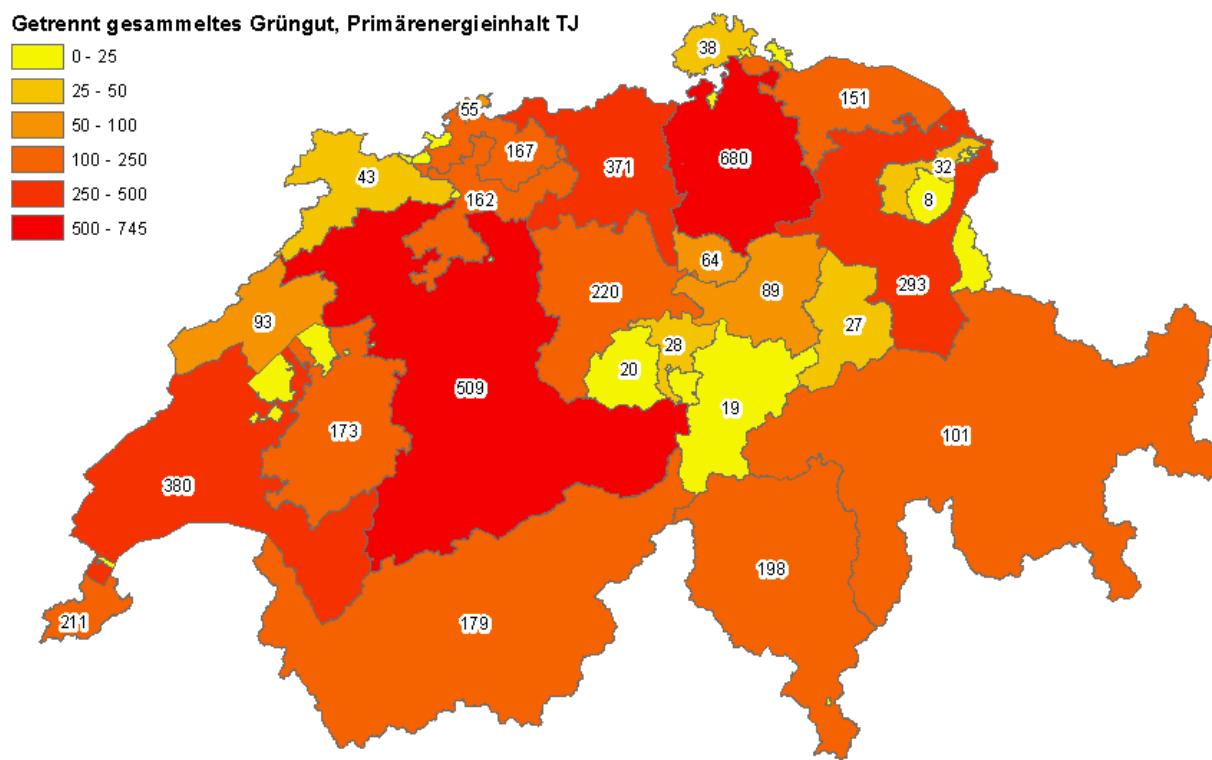


Abbildung 8: Theoretisches Potenzial, Primärenergieinhalt des anfallenden Grüngutes aus Haushalt und Landschaft auf Kantonsebene (TJ/Jahr).

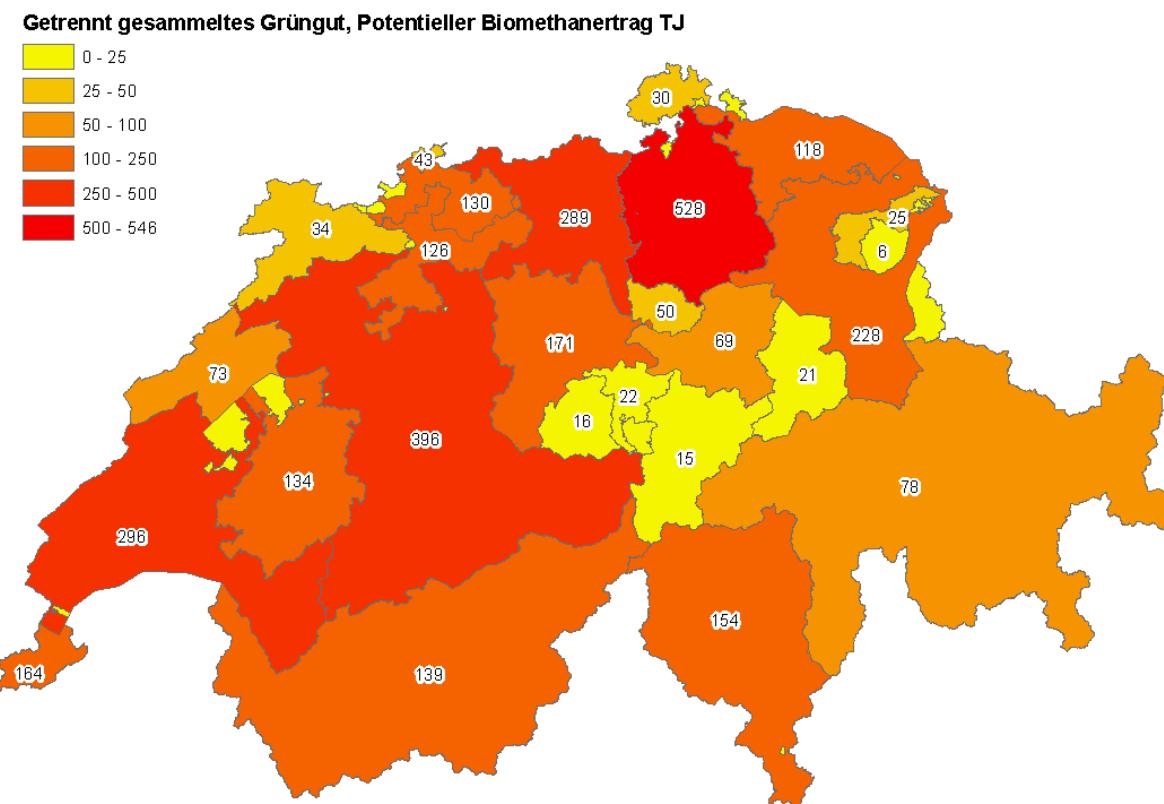


Abbildung 9: Theoretisches Potenzial, Verteilung des potenziellen Biomethanertrags des anfallenden Grüngutes aus Haushalt und Landschaft auf Kantonsebene (TJ/Jahr).

3.2 Nachhaltiges Potenzial

Wie bereits erwähnt, sollen die Kantone gemäss VVEA ab 2019 dafür sorgen, dass verwertbare Anteile von Siedlungsabfällen wie Bio-Abfälle so weit wie möglich getrennt gesammelt und stofflich verwertet werden (Art. 13, Abs. 4 und Art. 49). Aufgrund der aktuellen Lage wurde angenommen, dass bis zu 80% dieser Hauskehrichtfraktion tatsächlich getrennt gesammelt werden könnte. Auf diese Weise erhöht sich das theoretische Potenzial von separat gesammeltem Grüngut um diese Menge, welche dem Hauskehricht entnommen wird (vgl. Teilbericht «*organischer Anteil im Hauskehricht*»). Dieses Zwischenpotenzial stellt somit die *maximale* Menge an separat gesammeltem Grüngut aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz dar (*Abbildung 10*). Gemäss Berechnungen könnten auf diese Weise bis zu 33% mehr Grüngut separat verwertet werden, d.h. total 430'000 Tonnen TS mit einem Primärenergieinhalt von 6.4 PJ. Insgesamt handelt es sich jedoch nicht um eine Erhöhung der verfügbaren Ressourcenmenge, sondern um eine nutzungsbedingte Verschiebung.

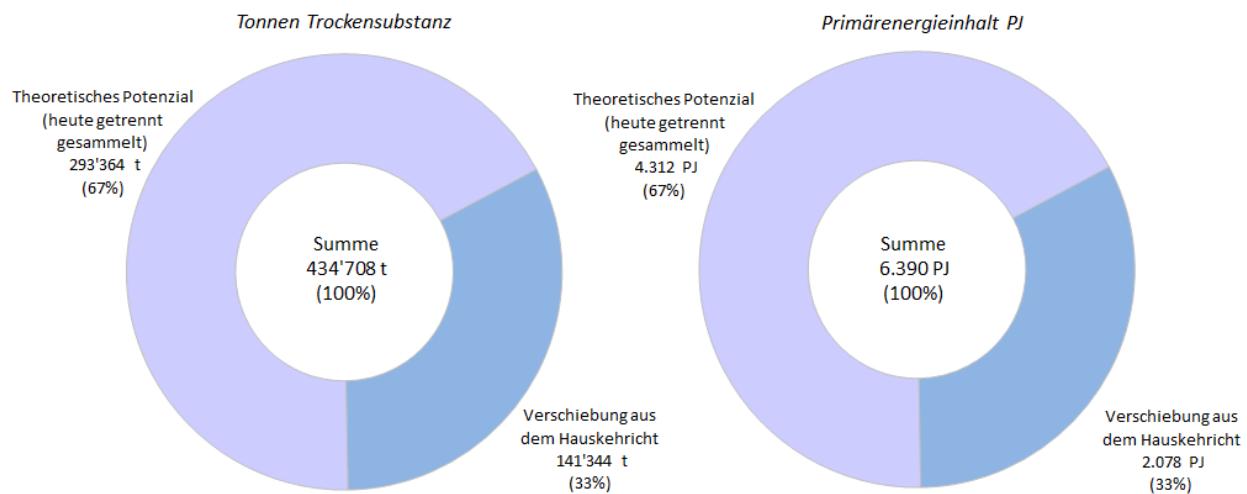


Abbildung 10: Zwischenpotenzial, maximal sammelbares Grüngut aus Haushalt und Landschaft (bereits gesammeltes Grüngut + Verschiebung aus dem Hauskehricht), Tonnen Trockensubstanz und Primärenergieinhalt PJ.

Aktuell wird getrennt gesammeltes Grüngut in der Schweiz entweder vergärt oder kompostiert (vgl. Kapitel 1.2). Aufgrund der aktuellen Entwicklungen wurde angenommen, dass getrennt gesammeltes Grüngut weitgehend vergärbar resp. sowohl stofflich als auch energetisch nutzbar wäre. Lediglich ein kleiner Anteil von etwa 10% wäre vorzugsweise möglichst dezentral zu kompostieren. Das ermittelte nachhaltige Potenzial ist in der Tabelle 5 zusammengefasst. Anzumerken ist, dass das so berechnete nachhaltige Potenzial, durch die nutzungsbedingte Verschiebung aus dem Hauskehricht, in diesem Spezialfall grösser ist als das theoretische. Abbildung 11 zeigt den jährlichen Primärenergieinhalt des ermittelten nachhaltigen Potenzials von Grüngut aus Haushalt und Landschaft auf Kantonsebene.

Tabelle 5: Nachhaltiges Potenzial, Grüngut aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz.

Frischsubstanz (Tonnen)	Trockensubstanz (Tonnen TS)	Org. Trockensubstanz (Tonnen oTS)	Primärenergieinhalt (PJ)	Pot. Biomethan-Ertrag (PJ)
1'086'772	391'238	336'729	5.751	4.471

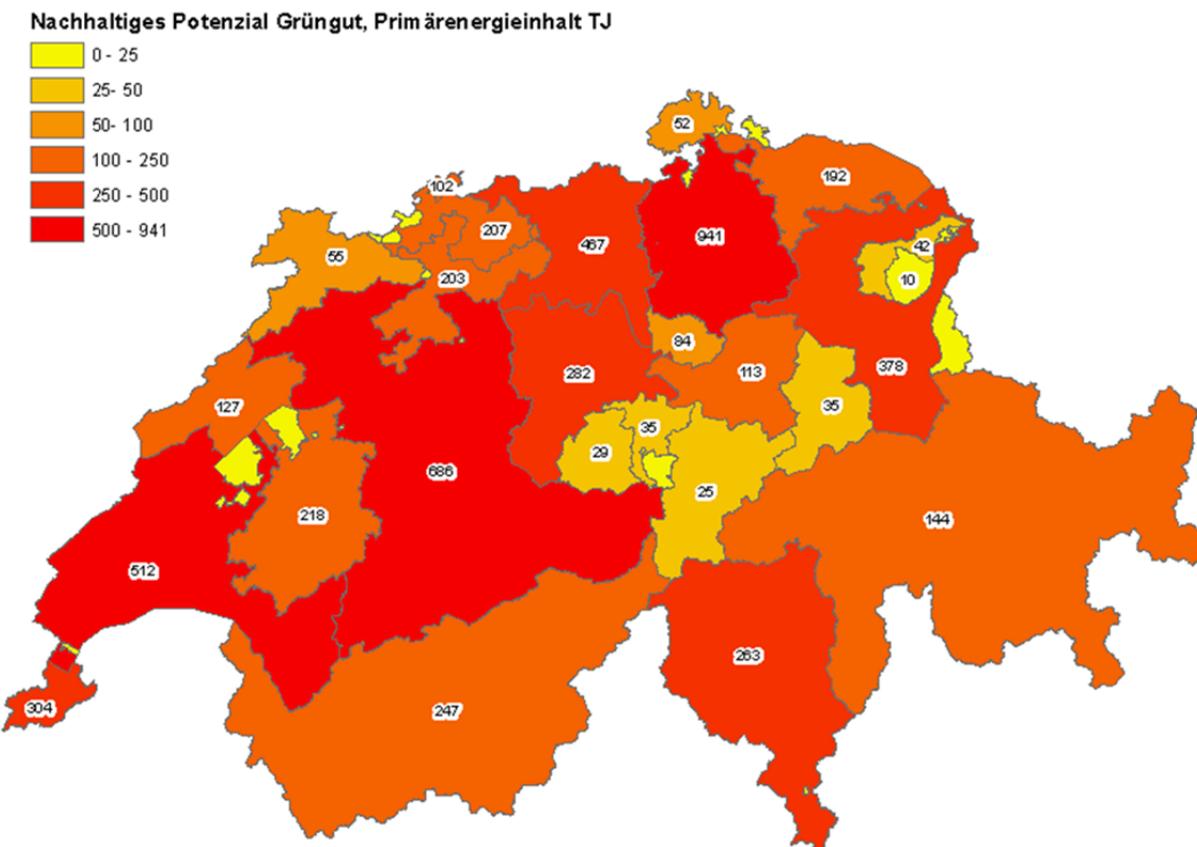


Abbildung 11: Nachhaltiges Potenzial (theoretisches Pot. + Verschiebung aus dem Kehricht – lokal zu kompostieren), Primärenergieinhalt von Grüngut aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz auf kantonaler Ebene (TJ/Jahr).

3.3 Gesamtschau der Potenziale

Zusammenfassend zeigt Abbildung 12 die verschiedenen Potenziale des Grüngutes aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz. Dabei wird zwischen Frischmasse, Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz unterschieden. In Abbildung 13 werden Primärenergieinhalt und potentieller Biomethanertrag der verschiedenen Potenziale nebeneinandergestellt. Die Werte sind dem Anhang 2 zu entnehmen.

Das theoretische Potenzial stellt das bereits getrennt gesammelte Grüngut aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz dar (Referenzjahr 2013). Es wurde angenommen, dass bis zu 80% der Bio-Abfälle, die parallel dazu im Hauskehricht landen, durch Separatsammlung sinnvollerweise dem Grüngut zugeführt werden könnten. Das so ermittelte Zwischenpotenzial stellt die maximal sammelbare Grüngutmenge aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz dar.

Aktuell wird getrennt gesammeltes Grüngut in der Schweiz entweder vergärt oder kompostiert (vgl. Kapitel 1.2). Im Sinne einer nachhaltigen energetischen Nutzung verringert sich das maximal nutzbare Potenzial um diejenige Menge, die unter den aktuellen Gegebenheiten vorzugsweise zu kompostieren wäre. Es wurde davon ausgegangen, dass getrennt gesammeltes Grüngut weitgehend vergärbar und lediglich ein kleiner Anteil von etwa 10% sinnvollerweise möglichst dezentral zu kompostieren wäre (Vergärbarkeit, Logistik). Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial.

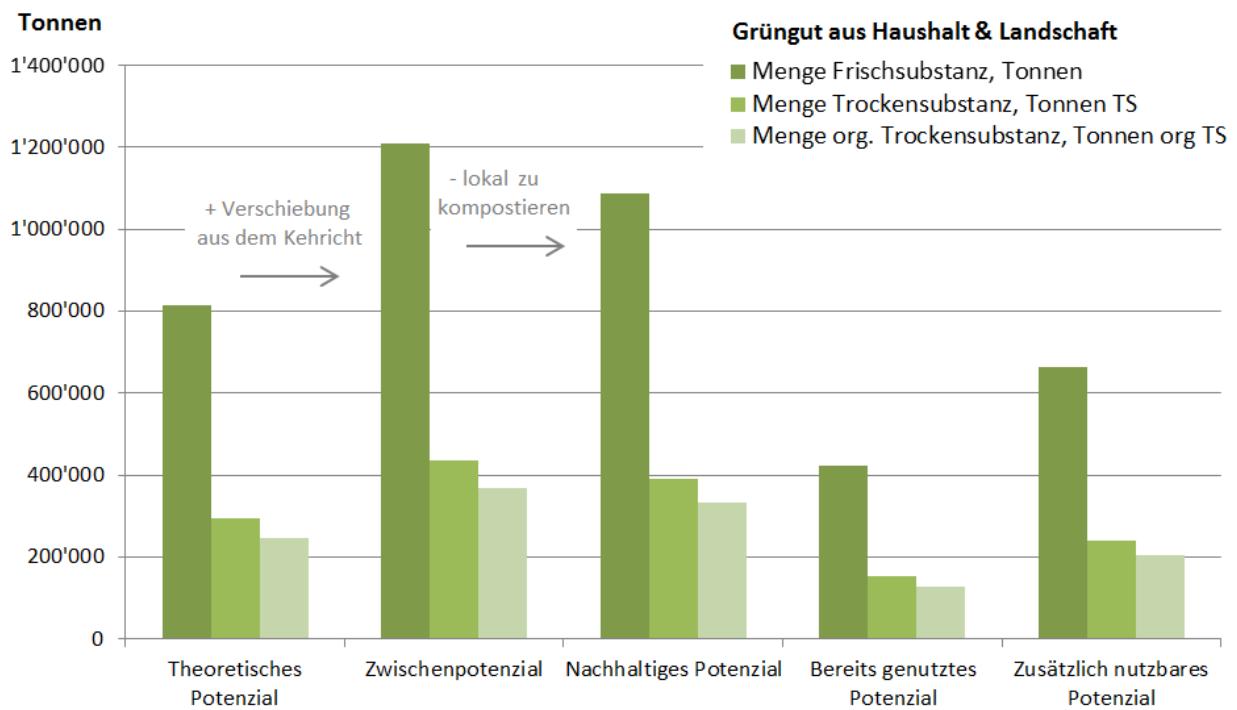


Abbildung 12: Potenzialanalyse der jährlich gesammelten Menge Grün�ut aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz.

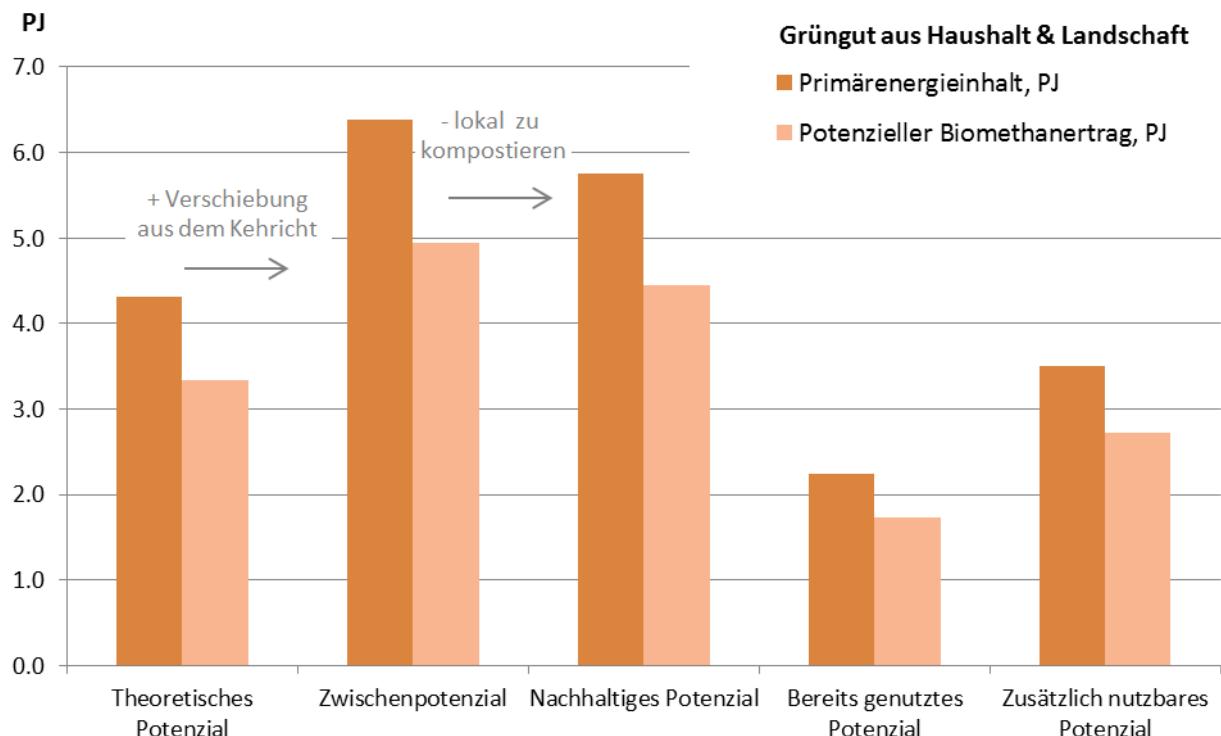


Abbildung 13: Potenzialanalyse des Energieinhaltes des jährlich gesammelten Grünügutes aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz.

Zur Veranschaulichung zeigt *Abbildung 14* die Verteilung des maximal verwertbaren Grüngutes auf die verschiedenen ermittelten Potenziale resp. Restriktion.

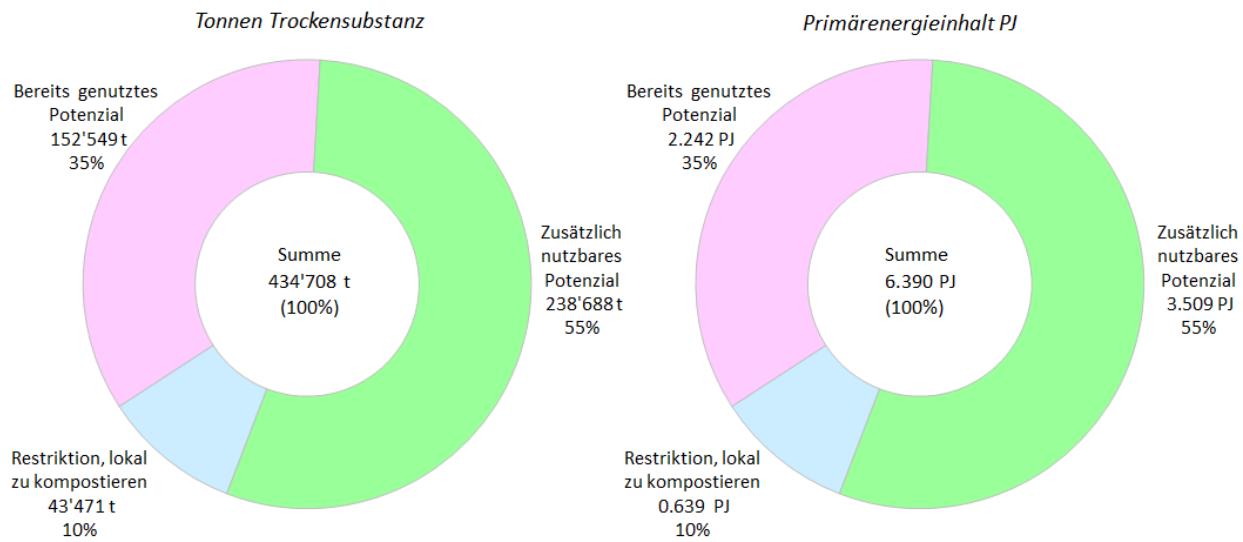


Abbildung 14: Verteilung des maximal sammelbaren Grüngutes aus Haushalt und Landschaft (bereits getrennt gesammeltes Grüngut + Verschiebung aus dem Hauskehricht) auf die verschiedenen ermittelten Potenziale resp. Restriktion (Tonnen Trockensubstanz und Primärenergieinhalt PJ).

4 Diskussion und Folgerungen

Biogene Abfälle enthalten nicht nur wichtige Nährstoffe, sondern können auch als wertvolle Energieträger genutzt werden. Durch Verbrennung in einer KVA werden die Nährstoffe jedoch dem natürlichen Kreislauf entzogen. Um einen nachhaltigeren Umgang mit unseren Ressourcen zu sichern, hat sich die Separatsammlung in den vergangenen 20 Jahren zu einem wichtigen Bestandteil der Schweizer Abfallverwertung entwickelt [6]. Dabei wird das gesammelte Grüngut entweder durch Kompostierung oder Vergärung verwertet [12]. Bedingt durch i) den fortlaufenden Ausbau der Separatsammlung resp. Verschiebung aus dem Hauskehricht [10] und ii) den weiteren Anstieg der gesamten Siedlungsabfallmenge parallel zum Wachstum von Wirtschaft und Bevölkerung [1] ist auch künftig mit einer zunehmenden Grüngutmenge zu rechnen.

Gemäss unseren Berechnungen wurde im Jahr 2013 eine Menge Grüngut aus Haushalt und Landschaft von total 815'000 Tonnen getrennt gesammelt. Diese Zahl stimmt recht gut mit der BAFU-Schätzung von rund 1 Mio. Tonnen (inkl. Gewerbe) überein [6]. Die Entsorgung der biogenen Abfälle kann und soll auch weiter verbessert werden (VVEA) [10]. Durch den weiteren Ausbau der Separatsammlung und eine bessere Nutzung der Angebote wurde eine maximale Grüngutmenge von 1.2 Mio. Tonnen durch Verschiebung aus dem Hauskehricht ermittelt (Referenzjahr 2013). Theoretisch zusätzliche Möglichkeiten aufgrund veränderter Bewirtschaftung der öffentlichen Grünflächen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Durch Vergärung wird nicht nur Dünger, sondern auch wertvolles Biogas gewonnen. Biogas ist sowohl im Strom-, als auch im Wärme- und Kraftstoffbereich äusserst breit einsetzbar. Darüber hinaus ist es speicherbar und kann die Fluktuation der erneuerbaren Energien aus Wind und Sonne ausgleichen. Es wurde davon ausgegangen, dass getrennt gesammelte biogene Abfälle weitgehend vergärbar sind und nur ein kleiner Anteil aus strukturellen Gründen vorzugsweise dezentral zu kompostieren ist. Auf diese Weise wurde ein nachhaltiges Potenzial für die energetische Nutzung von knapp 1.1 Mio. Tonnen ausgewiesen mit einem Primärenergieinhalt von rund 5.8 PJ. Als Vergleich entspricht dies umgerechnet dem Energieinhalt von etwa 133'000 Tonnen Rohöl (Annahme, Heizwert von Rohöl = 43.2 MJ/kg) oder 0.52% des totalen Energie-Bruttoverbrauchs der Schweiz (1108 PJ, 2014) [3].

Heute wird bereits etwa 40% des ermittelten nachhaltigen Potenzials durch Vergärung energetisch genutzt, wobei in den letzten Jahren ein kontinuierlicher Zuwachs verzeichnet wurde [12]. Gemäss unseren Berechnungen beträgt der zusätzlich nutzbare Biogasertrag dieser Biomasse aktuell 2.7 PJ pro Jahr. Aufgrund der technologischen Entwicklungen [12] und der gesetzlichen Rahmenbedingungen (VVEA [10]) ist anzunehmen, dass dieses Potenzial in den nächsten 10 bis 20 Jahren weitgehend genutzt sein wird. Die Schweizer Abfallwirtschaft hat sich in den letzten 25 Jahren stark verändert [9]. Heute steht die Schonung der Ressourcen an erster Stelle, wobei *Abfallvermeidung* und *Recycling* eine zentrale Rolle spielen [10]. Folglich sind auch in Zukunft Veränderungen beim Umgang mit biogenen Abfällen absehbar, mit möglichen Folgen qualitativer und quantitativer Art sowie in Hinsicht auf die Verwertung.

Literatur

- [1] BAFU, 2014: Entwicklung der weltweiten Umweltauswirkungen der Schweiz, 4 S.
- [2] BAFU, 2016: Kompostier- und Vergärungsanlagen, Erhebung in der Schweiz und in Liechtenstein.
- [3] BFE, 2015: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014.
- [4] BFS, 2005: Eidgenössische Volkszählung 2000, Die Raumgliederungen der Schweiz, 232 S.
- [5] BFS, 2013: Tabelle Ständige und Nichtständige Wohnbevölkerung nach institutionellen Gliederungen, Geschlecht, Nationalität und Alter. 1991-2013,
http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/01/02/blank/key/raeumliche_verteilung/kanton_gemeinden.html.
- [6] BFS, 2014: Abfallverwertung (Recycling) Haushalte und Gewerbe (je-d-02.03.05.03-1).
- [7] BFS, 2014: Siedlungsabfälle (je-d-02.03.05.02).
- [8] Cerbe, G., 2008: Grundlagen der Gastechnik, Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung, 653 S.
- [9] Der Schweizerische Bundesrat, 1990: Technische Verordnung über Abfälle (TVA), 10.12.1990 (Stand 2011).
- [10] Der Schweizerische Bundesrat, 2015: Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA), 4.12.2015 (Stand 1.2016).
- [11] Herrmann, V., 2015: Beurteilung des Potenzials von biogenen Abfällen aus Haushalten sowie Grüngut aus der kommunalen Landschaftspflege, Bachelor Thesis. Institute of Environmental Engineering (IfU), EHTZ, Switzerland, 50 S.
- [12] Inspektorat der Kompostier- und Vergärbranche der Schweiz, 2014: Jahresbericht 2014, Ergebnisse von 243 inspizierten Anlagen in 20 Kantonen, 11 S.
- [13] Inspektorat der Kompostier- und Vergärbranche der Schweiz, 2015: Jahresbericht 2015, Ergebnisse von 229 inspizierten Anlagen in 20 Kantonen, 12 S.
- [14] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H., 2009: Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 1030 S.
- [15] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), 2013: Faustzahlen Biogas, 360 S.
- [16] Lemann, F.; Neumann, W., 2012: Abfalltechnik, 411 S.
- [17] Organisation Kommunale Infrastruktur, 2009: Kosten und Leistungen der kommunalen Abfallwirtschaft, 153 S.

Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene
Theoretisches Potenzial des Grüngutes aus Haushalt und Landschaft, Referenzjahr 2013

NAME	Tonnen FS (Grüngut)	Tonnen TS (Grüngut)	Tonnen OTS (Grüngut)	Primärenergie TJ (Grüngut)	Pot. Biomethan TJ (Grüngut)
Aargau	70123	25244	21735	371	289
Appenzell Ausserrhoden	6123	2204	1898	32	25
Appenzell Innerrhoden	1444	520	448	8	6
Basel-Landschaft	31563	11363	9783	167	130
Basel-Stadt	10442	3759	3237	55	43
Bern / Bern	96195	34630	29817	509	396
Fribourg / Freiburg	32663	11759	10124	173	134
Genève	39950	14382	12383	211	164
Glarus	5172	1862	1603	27	21
Graubünden	18994	6838	5887	101	78
Jura	8188	2948	2538	43	34
Luzern	41563	14963	12883	220	171
Neuchâtel	17663	6359	5475	93	73
Nidwalden	5250	1890	1627	28	22
Obwalden	3866	1392	1198	20	16
Schaffhausen	7245	2608	2246	38	30
Schwyz	16797	6047	5206	89	69
Solothurn	30522	10988	9461	162	126
St. Gallen	55322	19916	17148	293	228
Thurgau	28605	10298	8866	151	118
Ticino	37326	13437	11570	198	154
Uri	3670	1321	1138	19	15
Valais / Wallis	338882	12198	10502	179	139
Vaud	71810	25852	22258	380	296
Zug	12108	4359	3753	64	50
Zürich	128414	46229	39803	680	528
CH total	814900	293364	252586	4312	3354

Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz
Potenzialanalyse des Grüngutes aus Haushalt und Landschaft in der Schweiz

Grüngut aus Haushalt und Landschaft	Menge Frischsubstanz (Tonnen)	Menge Trockensubstanz (Tonnen TS)	Menge org. Trockensubstanz (Tonnen oTS)	Primärenergieinhalt (PJ)	Potenzieller Biomethanertrag (PJ)	Bemerkung
Theoretisches Potenzial	814'900	293'400	252'600	4.3	3.3	
Zwischenpotenzial	1'207'500	434'700	374'100	6.4	5.0	Verschiebung aus Kehricht
Nachhaltiges Potenzial	1'086'800	391'200	336'700	5.8	4.5	Rund 10% lokal zu kompostieren
Bereits genutztes Potenzial	423'700	152'500	131'300	2.2	1.7	
Zusätzlich nutzbares Potenzial	663'000	238'700	205'400	3.5	2.7	

Organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe

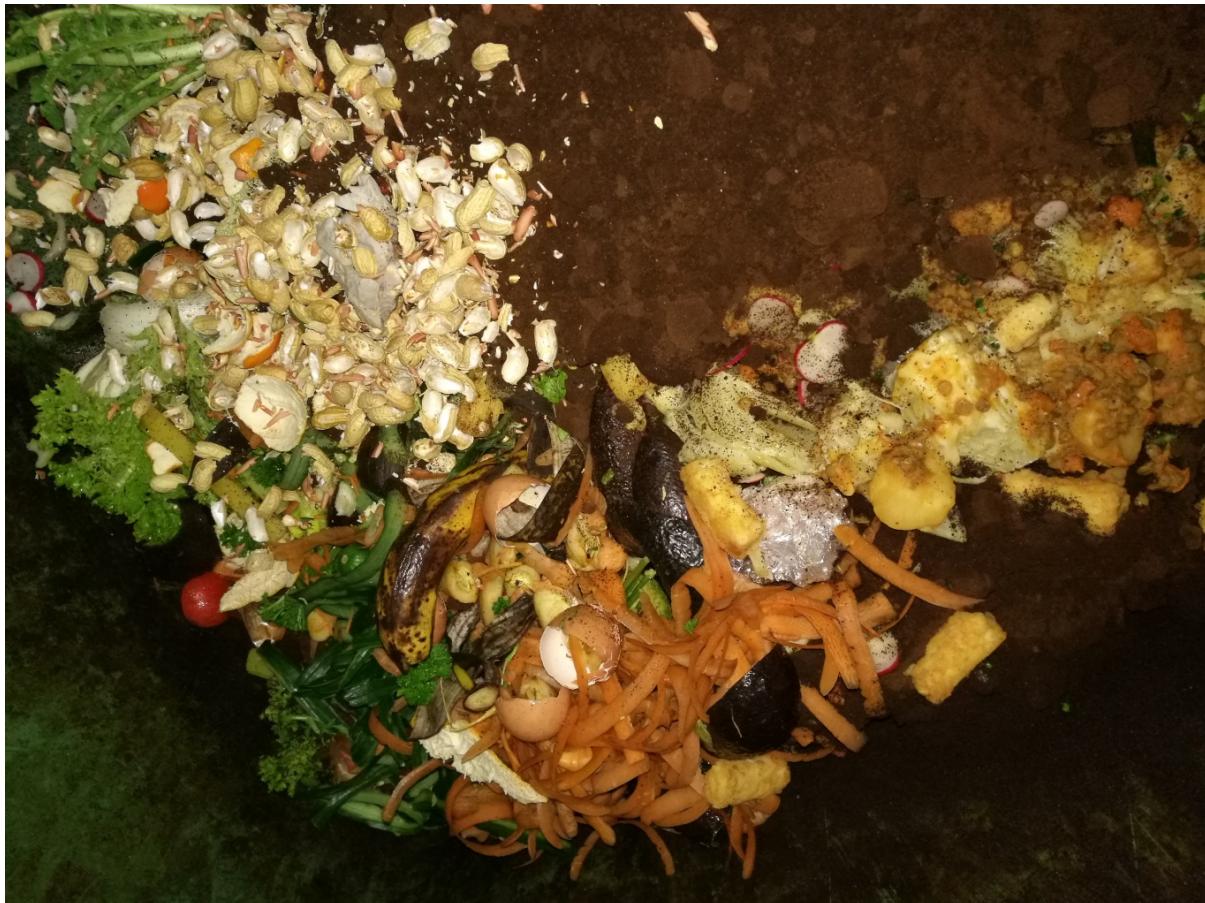


Bild: Matthias Erni, WSL

Gillianne Bowman

Vanessa Burg

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	252
1 Einleitung.....	252
1.1 Zielsetzung und Überblick	253
1.2 Aktuelle Situation Schweiz.....	254
2 Methoden.....	255
2.1 Datengrundlage und Kenngrößen	255
2.2 Theoretisches Potenzial.....	258
2.3 Nachhaltiges Potenzial	262
2.4 Bereits genutztes Potenzial	264
2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial.....	264
3 Resultate	265
3.1 Theoretisches Potenzial.....	265
3.2 Nachhaltiges Potenzial	267
3.3 Gesamtschau der Potenziale	270
4 Diskussion und Folgerungen	273
Literatur	274
Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene	276
Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz	278

Abkürzungen

ANZ	Anzahl	LMI	Lebensmittelindustrie
ARA	Abwasserreinigungsanlage	oTS	Organische Trockensubstanz
BAFU	Bundesamt für Umwelt	NOGA	Nomenclature Générale des
BFE	Bundesamt für Energie		Activités Economiques
BFS	Bundesamt für Statistik	PJ	Petajoule (10^{15})
BioSweet	Biomass for Swiss Energy Future	SCCER	Swiss Competence Center for Energy Research
ChemRRV	Chemikalien-Risiko-Reduktionsverordnung	TS	Trockensubstanz
DÜV	Dünger-Verordnung	USG	Umweltschutzgesetz
FS	Frischsubstanz	VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen
GvO	Gentechnisch veränderte-Organismen	VZA	Vollzeitäquivalent
Hu	Unterer Heizwert	ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage		

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung und Überblick

Die Biomassekategorie «organische, nicht-verholzte Abfälle aus Industrie und Gewerbe» ist extrem heterogen zusammengesetzt. Als *organische Abfälle* werden Abfälle pflanzlicher, tierischer oder mikrobieller Herkunft bezeichnet. Dazu gehören diverse Lebensmittelrückstände aus der industriellen Verarbeitung, der Gastronomie und dem Detailhandel, aber auch weitere organische Abfälle aus der Papier- und Tabakproduktion. Holzabfälle sowie Haushaltsabfälle werden separat untersucht (vgl. Teilberichte «Restholz» und «Organischer Anteil im Hauskehricht»). Abgesehen von den festen organischen Abfällen Papier und Karton ist diese Biomassekategorie vielfach durch hohe Nährstoff- und Wassergehalte charakterisiert, die zum Beispiel mittels anaerober Vergärung energetisch genutzt werden kann. Um eine mit den anderen Biomassressourcen vergleichbare Basis zu schaffen, werden sowohl die anfallende Menge (Frischsubstanz, Trockensubstanz, organische Trockensubstanz) als auch der Energieinhalt (Primärenergieinhalt, potentieller Biomethanertrag) und die räumliche Verteilung abgeschätzt. Untersucht wird das energetische Potenzial, das in der Ressource steckt. Nicht Teil dieser Arbeit ist die Berücksichtigung optimierter Prozesse wie zum Beispiel die Vorbehandlung. Die Potenzialebenen in diesem Teilbericht sind wie folgt definiert und quantifiziert:

Theoretisches Potenzial

Gesamte organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe, die aktuell in der Schweiz in einem Jahr anfallen («Jährliches Aufkommen»). Holzabfälle werden im Teilbericht «Restholz» vorgestellt. → Kapitel 2.2

Nachhaltiges Potenzial

Gesamte organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe (theoretisches Potenzial) nach Abzug der Menge, die heute stofflich wiederverwendet wird (Lebensmittelpende, Tierfutter, interne Prozesse). Überdies wird der Anteil biogener Abfälle abgezogen, die unter den aktuellen Gegebenheiten vorzugsweise durch dezentrale Kompostierung möglichst am Ort ihrer Entstehung zu verwerten sind (rund 10%). → Kapitel 2.3

Bereits genutztes Potenzial

In bestehenden Biogas- oder Verbrennungsanlagen bereits energetisch genutzte organischer Abfälle aus Industrie und Gewerbe. → Kapitel 2.4

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial – dies ergibt die Menge organischer Abfälle, die für eine energetische Verwertung mobilisierbar wäre, heute jedoch nicht energetisch genutzt, sondern hauptsächlich kompostiert wird. → Kapitel 2.5

1.2 Aktuelle Situation Schweiz

Rund 572'000 marktwirtschaftliche Unternehmen wurden 2012 in der Schweiz gezählt (2012, BFS) [13]. Mehr als 3/4 davon sind im Dienstleistungssektor (Tertiärsektor) tätig. Der Industriesektor (Sekundärsektor) zählt über 90'000 Unternehmen und der Rest ist im Primärsektor aktiv. Von gesamthaft rund vier Millionen Beschäftigten in der Schweiz im Jahr 2012 übten 535'000 Personen eine Arbeit im Bereich der Lebensmittelkette aus (vgl. Abbildung 1). Somit hatte rund jede achte beschäftigte Person bei der Berufsaarbeit mit Lebensmitteln zu tun [14].

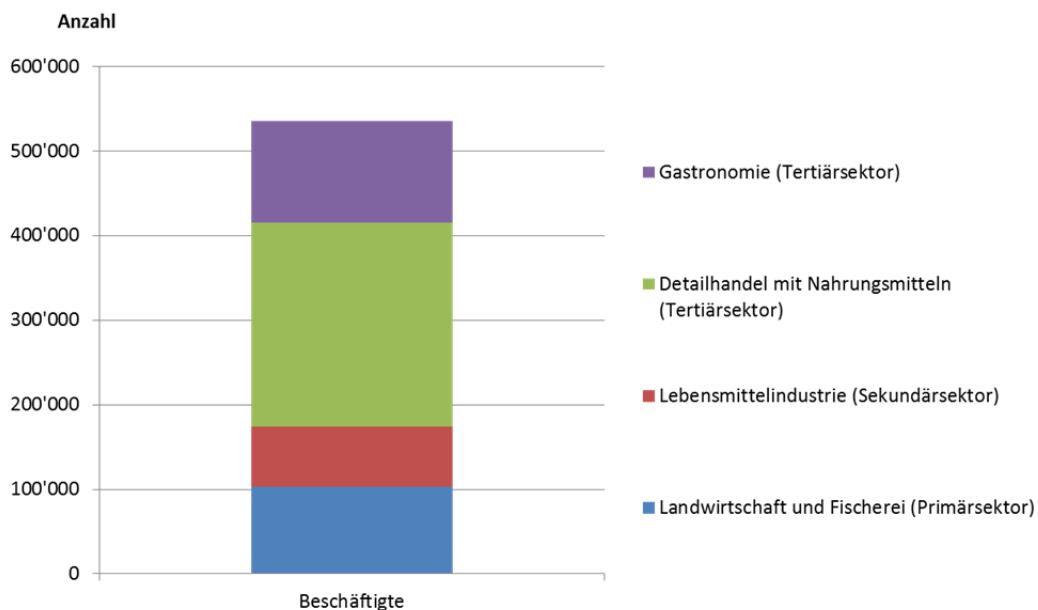


Abbildung 1: Anzahl Beschäftigte in der Lebensmittelkette der Schweiz (2012, BFS) [13].

Die Struktur der verschiedenen Gewerbe- und Industriebranchen ist sehr unterschiedlich. So zeichnen sich die Gastronomie und der Detailhandel durch eine kleinbetriebliche Struktur aus, mit durchschnittlich weniger als 5 Beschäftigten pro Betrieb (in Vollzeitäquivalenten gerechnet). In der Milchverarbeitungsindustrie entfallen etwa 3/4 der gesamten Beschäftigung auf Unternehmen mit mehr als 10 Beschäftigten. Die pharmazeutische Industrie wird mit durchschnittlich über 130 Beschäftigten von Grossunternehmen dominiert.

Die Gewerbe- und Industriebranche der Schweiz besteht somit aus einer Vielzahl von Betrieben, die sich sowohl in der Grösse als auch im Produktpotfolio und in den Verfahren stark voneinander unterscheiden. Entsprechend unterschiedlich sind auch die Abfälle. Typische Industrieabfälle, die in grösseren Mengen anfallen, sind zum Beispiel Gärreste und Obsttrester aus der Alkoholherstellung, Serum und Magermilch aus Molkereibetrieben oder Melasse aus der Zuckerherstellung [4]. Eine Gesamtbilanz der Produkte und Abfälle existiert nicht.

Die Schweiz verfügt im Umgang mit Abfällen über klare gesetzliche Bestimmungen und hohe Entsorgungsstandards. Gemäss Umweltschutzgesetz (USG) Art. 30, Absatz 1, ist die Erzeugung von Abfällen grundsätzlich soweit möglich zu vermeiden [9]. Absatz 2 und 3 legen fest, dass anfallende Abfälle in erster Linie verwertet und andernfalls umweltverträglich entsorgt werden müssen.

Unter dem Begriff «*Siedlungsabfälle*» werden die Abfälle aus Haushalten sowie aus Klein- und Mittelunternehmen verstanden, deren Zusammensetzung betreffend Inhaltsstoffe und Mengenverhältnisse mit Abfällen aus Haushalten vergleichbar sind (VVEA, Art. 3) [21]. Gemäss Bundesamt für Statistik (BFS) fielen 2014 in der Schweiz total 6 Mio. Tonnen Siedlungsabfälle an [15]. Davon werden 3.2 Mio. Tonnen separat gesammelt. Die andere Hälfte wird in Kehrichtverbrennungsanlagen verbrannt, wobei rund 60% aus den

Haushalten und 40% aus Industrie- und Gewerbebetrieben stammt. Das Potenzial von Hauskehricht wird im entsprechenden Teilbericht «Organischer Anteil im Hauskehricht» untersucht, wobei Kleinmengen vergleichbarer Abfälle von Unternehmen, die der gewöhnlichen Hauskehrichtabfuhr der Gemeinde angeschlossen sind, ebenfalls zu dieser Kategorie gehören. Gemäss VVEA sind Siedlungsabfälle «so weit wie möglich und sinnvoll» getrennt zu sammeln und stofflich zu verwerten (Art. 13 Abs. 4) [21]. Diese neue Regelung tritt am 01.01.2019 in Kraft (Art. 49). Insbesondere biogene Abfälle haben dabei einen hohen Gehalt an wertvollen Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff.

Zusätzlich zu den genannten Siedlungsabfällen fallen *produktionsspezifische* Abfälle aus Industrie und Gewerbe an. Diese sind je nach Inhaltsstoffen und Gefährdung unterschiedlich zu behandeln resp. zu entsorgen: Als unproblematische Abfälle gelten etwa Abfälle aus der Herstellung von Nahrungsmitteln, biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle, Textilien, Sägespäne etc.. Problematische Abfälle stellen zum Beispiel Öle, Fette, Säuren, Laugen sowie Lösungsmittel dar [4]. Die Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVA) regelt den korrekten Umgang mit Sonderabfällen und anderen kontrollpflichtigen Abfällen [21]. Speiseabfälle aus der Gastronomie dürfen seit 2011 nicht mehr verfüttert werden (Verordnung über die Entsorgung von tierischen Nebenprodukten, VTNP). Nur reine Nebenprodukte aus der Lebensmittelindustrie wie Molke aus der Käseherstellung oder Brot aus Grossbäckereien dürfen weiterhin den Tieren verfüttert werden. Aktuell werden separat entsorgte biogene Abfälle in der Schweiz entweder vergärt oder kompostiert. Durch die Kompostierung erfolgt eine rein stoffliche Verwertung der Nährstoffe. Bei der Vergärung fällt neben dem Gärget auch energetisch nutzbares Biogas an. Das Gärget kann zudem als Dünger verwendet werden, sofern die Dünger-Verordnung (DÜV) und die Chemikalien-Risiko-Reduktionsverordnung (ChemRRV) eingehalten werden. Zusätzlicher Vorteil der Vergärung ist die vielseitige energetische Anwendbarkeit des anfallenden Biogases, das sowohl als Treibstoff als auch zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden kann. Durch die leichte Speicherbarkeit bietet Biogas zudem die Möglichkeit der bedarfsgerechten Energieerzeugung als Ergänzung zu den fluktuierenden erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne.

2 Methoden

2.1 Datengrundlage und Kenngrößen

Generelle Datengrundlage

Das Bundesamt für Statistik (BFS) führt jährlich eine umfassende Aufnahme der Unternehmensstruktur (STATENT [13]) durch. Diese registergestützte Vollerhebung liefert Informationen über die Struktur der Arbeitsstätten und deren Anzahl Beschäftigte. Dabei wird jedes Unternehmen aufgrund seiner wirtschaftlichen Tätigkeit klassiert und einem spezifischen Branchencode zugeteilt (NOGA-Code, Nomenclature Générale des Activités Economiques) [12]. Das Vollzeitäquivalent des Unternehmens gibt an, wie viele Vollzeitstellen sich rechnerisch bei einer gemischten Personalbelegung ergeben. Diese detaillierte Erhebung diente als Ausgangspunkt zur Ermittlung des theoretischen Potenzials von organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe für die energetische Nutzung in der Schweiz (Kapitel 2.2). Um ein Gesamtbild der Schweiz aufzuzeigen, wurden insgesamt acht Hauptbranchen, für die ein relevanter Abfall an organischen Abfällen erwartet wird, identifiziert und untersucht (*Tabelle 1*).

2014 hat das Inspektorat der Kompostier- und Vergäranlagen der Schweiz über 240 Verwertungsanlagen in 20 Kantonen kontrolliert [1]. Dabei wurden unter anderem auch die Verwertungsmengen der inspierten Betriebe ermittelt. Durch Hochrechnung der erhobenen Zahlen auf die gesamte Schweiz wurde eine Menge an verwerteten biogenen Abfällen (ohne Hofdünger) von total knapp 1.3 Mio. Tonnen geschätzt [5, 11]. Gemäss Erhebung stammte dabei knapp ein Viertel aus Industrie und Gewerbe (zusammen also rund 300'000 Tonnen), der Rest aus den Haushalten und der Landschaftspflege.

Tabelle 1: Kennzahlen der acht untersuchten Hauptbranchen.

Industrie / Gewerbe	NOGA Code [12]	Anzahl Betriebe [13]	Anzahl Vollzeit-Äquivalente [13]	Anzahl antwortende Betriebe
Lebensmittelindustrie	10 und 11	3972	71'718	27
Gastronomie	56	27'470	163'469	66
Detailhandel mit Nahrungsmitteln	4711	5035	52'726	3 Ketten à 3516 Filialen
Tabakverarbeitung	12	14	2261	1
Textilindustrie	Diverse	-	-	Nur gesamtschweizerisch
Druckereien	18	1603	16'196	11
Papierherstellung	17	27	1966	10
Phytopharma-industrie	Teil von 21	20 bis 30	-	-
Total	-	38'607	350'443	-

Betriebsumfragen

Die Menge der jeweils jährlich anfallenden Abfälle wurde mit branchenspezifischen Betriebsumfragen ermittelt. Im Bereich Lebensmittelindustrie konnte auf eine aktuelle Erhebung der ZHAW zurückgegriffen werden, die im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) die Lebensmittelverluste untersucht [27]. Für die anderen Branchen wurden eigene Befragungen durchgeführt, wobei jeweils die Anzahl Vollzeitäquivalente, die Produktionsmenge, die Quantität und die Qualität der anfallenden Abfälle sowie die aktuelle Verwertung / Entsorgung erhoben wurde. Die Rücklaufquote und die Bereitschaft, Daten zu liefern, war je nach Branche sehr unterschiedlich (*Tabelle 1*). So musste bei der Pharma- und Textilindustrie auf gesamtschweizerische Schätzungen zurückgegriffen werden. Dabei wurden für diese Studie nur Arzneimittel pflanzlicher Herkunft berücksichtigt (Phytopharmazie), da das Potenzial der organischen Abfälle für eine energetische Nutzung bei anderen Pharmaprodukten als vernachlässigbar beurteilt wird (vgl. Kapitel 2.2). Die Pharma-Daten wurden von der ZHAW (M. Haubensak) erhoben. Anhand der erhobenen Daten wurde die Menge an anfallenden organischen Abfällen branchenspezifisch ermittelt (Kapitel 2.2).

Kenngrößen

Für alle Biomassenpotenziale werden sowohl Ressourcenmenge als auch Energieinhalt berechnet. Bei der Angabe der Mengen sind je nach Ressource unterschiedliche Einheiten üblich. Um die verschiedenen Biomassen miteinander vergleichen zu können, werden die Mengen sowohl in Tonnen Frischsubstanz als auch in Tonnen Trockensubstanz angegeben. Zur Umrechnung der verschiedenen Abfallfraktionen auf Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS) wurden, wenn vorhanden, die Richtwerte der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft [7] verwendet, die eine Vielzahl von verschiedenen und detaillierten Biomassentypen angibt. Gegebenenfalls wurden die Angaben mit anderen Quellen resp. Annahmen ergänzt (*Tabelle 2*).

In einem zweiten Schritt wurde die in der Biomasse enthaltene Primärenergie der biogenen Abfälle pro Jahr berechnet. Die so berechnete Energiemenge bezieht sich auf den unteren Heizwert (Hu) der Trockensubstanz (TS).

$$Energieinhalt_{TS} [MJ] = Masse_{FS} [kg] \times Anteil\ Trockensubstanz_{FS} [-] \times Unterer\ Heizwert [MJ/kg_{TS}]$$

Zudem wurde der potenzielle Biomethanertrag ermittelt. Die organische Trockensubstanz (oTS) ist der Anteil der organischen Bestandteile eines Stoffs nach vollständigem Entzug von Wasser und aller mineralischer Bestandteile (inert). Es gilt:

Methanertrag_{TS} [Nm³]

$$= \text{Masse}_{TS} [\text{kg}] \times \text{Anteil Organisch}_{TS} [-] \times \text{Biogasertrag}_{oTS} [\text{l/kg oTS}] \times \text{Methangehalt} [-]$$

Mit einem unteren Heizwert für Methan von 35.883 MJ/m³ (Grundlagen der Gastechnik [19]) lässt sich auch der Energieinhalt des Methanertrags berechnen. Zur Charakterisierung der verschiedenen Abfallfraktionen wurden die Werte entsprechend typischer Abfalleigenschaften gemäss *Tabelle 2* verwendet.

Tabelle 2: Richtwerte der verschiedenen organischen Abfallfraktionen aus Industrie und Gewerbe.

Substrat	Trocken-substanz [%]	Org. Trocken-substanz [%]	Methanertrag (l/kg oTS)	Unterer Heizwert bezogen auf die Trockensubstanz (MJ/kg TS)	Quelle
LEBENSMITTELINDUSTRIE					
Gemüseabfälle	15.0	76.0	280	Annahme ≈ Bioabfall	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft [7]
Zwiebeln	9.6	94.0	579	Annahme ≈ Bioabfall	
Kartoffelschälabfälle roh	11.0	93.8	337	Annahme ≈ Bioabfall	
Obsttrester Apfel	22.0	97.6	269	Annahme ≈ Bioabfall	
Kartoffelstärke	83.6	99.5	364	Annahme ≈ Bioabfall	
Möhren / Gelbrüben	11.9	88.3	363	Annahme ≈ Bioabfall	
Rapskuchen kaltpress	91.0	93.2	427	Annahme ≈ Bioabfall	
Sonnenblumen-Kuchen	88.0	91.9	340	Annahme ≈ Bioabfall	
Buttermilch frisch	8.0	92.3	436	Annahme ≈ Bioabfall	
Quark frisch	21.8	94.9	447	Annahme ≈ Bioabfall	
Vollmilch Kuh frisch	13.5	94.7	565	Annahme ≈ Bioabfall	
Labmolke frisch	5.0	92.2	396	Annahme ≈ Bioabfall	
Backabfälle	87.7	97.1	403	Annahme ≈ Bioabfall	
Zuckerrüben-Vollschnitzel	91.6	94.6	347	Annahme ≈ Bioabfall	
Sojaextrakt	87.0	93.1	405	Annahme ≈ Bioabfall	
Panseninhalt	15.0	84.0	264	Annahme ≈ Bioabfall	
Vinasse	5	75	409	Annahme ≈ Bioabfall	
Bierhefe	25.0	91.8	411	Annahme ≈ Bioabfall	
Bierteber frisch	24.0	95.5	316	Annahme ≈ Bioabfall	
Koch-Öl	95	92	680	38.0	
Bioabfall	40	50	369	14.0	Baier [6]
DETAILHANDEL / GASTRONOMIE					
Bioabfall	40	50	369	14.0	Baier [6]
Gastroabfälle	16	87	409	15.1	Baier [6]
TABAKVERARBEITUNG					
Tabak	90	36	101	17.0 ^[18]	Baier [6]
Papier / Karton	91	-	-	17.0	Yuan [33]
Filterpapier	96	100	208	17.5	Yuan [33]
TEXTILINDUSTRIE					
Textil				22.0	Neosys AG [28]
DRUCKEREIEN / PAPIERHERSTELLUNG					
Primär- u. Papierschlamm	50	40	156	17.0	Bienert [17]
Papier / Karton	91	-	-	17.0	Yuan [33]
PHYTO-PHARMAINDUSTRIE					
Pflanzenreste (Annahme ≈ Wiesen, Mittelwert)	21	90.8	312	18.61 [22]	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft [7]

2.2 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial bezieht sich auf die gesamte anfallende Biomasse ohne Berücksichtigung von nutzungsbedingten Einschränkungen (vgl. Einleitung des Gesamtberichts). Es beinhaltet somit den gesamten Anteil an organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe, der aktuell in der Schweiz in einem Jahr anfällt («Jährliches Aufkommen»).

Die Berechnungen wurden branchenspezifisch durchgeführt, wobei folgende acht Branchen berücksichtigt wurden: Lebensmittelindustrie, Detailhandel, Gastronomie, Tabakindustrie, Textilindustrie, Druckereien, Papierherstellung und Pharma industrie (*Tabelle 1*). Als Ausgangspunkt zur Ermittlung des theoretischen Potenzials diente die jeweils erhobene Abfallmenge der verschiedenen Unternehmen. Je nach Branche und Datengrundlage wurde für die Hochrechnung eine jeweils geeignete Methode gewählt, die nachfolgend erläutert wird.

Lebensmittelindustrie

Bei den organischen Abfällen aus der Lebensmittelindustrie handelt es sich hauptsächlich um Prozessrückstände aus der Lebensmittelherstellung, überlagerte Lebensmittel oder Produkte mit Transportschäden. *Tabelle 3* zeigt die wichtigsten Unterkategorien dieser Hauptbranche in der Schweiz und deren Kennzahlen. Zur Untersuchung der organischen Abfälle aus der Lebensmittelindustrie konnte die ZHAW-Erhebung verwendet werden, die im Rahmen der BAFU-Studie zu Lebensmittelverlusten durchgeführt wurde [6]. Aus den Betriebsangaben wurde die Menge Trockensubstanz an organischen Abfällen pro Vollzeitäquivalent je nach Unterkategorie berechnet (zwischen 1.6 und 11.1 Tonnen TS pro VZA). Die Hochrechnung auf die gesamte Schweiz erfolgte folglich aufgrund der Vollzeitäquivalente der in der Lebensmittelindustrie tätigen Betriebe gemäss Statistik der Unternehmensstruktur (BFS). Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Abfallmenge}_{LMI} [\text{kg}/\text{a}] \\ = \text{Anzahl Vollzeitäquivalente}_{LMI} [\text{ANZ}] \times \bar{\text{Abfallmenge}} \text{ pro Vollzeitäquivalent}_{LMI} [\text{kg/ANZ} \cdot \text{a}] \end{aligned}$$

Da bei den Schlachtabfällen keine betriebsspezifischen Daten zur Verfügung standen, wurde auf eine schweizweite Gesamtabschätzung zurückgegriffen [6] und entsprechend der Anzahl Vollzeitäquivalente auf die einzelnen Unternehmen verteilt.

Tabelle 3: Kennzahlen der Unterkategorien aus der Lebensmittelindustrie der Schweiz.

Beschreibung	NOGA Code [12]	Anzahl Betriebe [13]	Anzahl Vollzeit-äquivalente [13]	Typische Abfälle
Schlachten, Fleisch- und Fischverarbeitung	101, 102	588	14466	Knochen, Fleischabrieb
Obst- und Gemüseverarbeitung	103	75	1546	Schalen, Gemüsereste
Herstellung von pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten	104	21	418	Raps- und Sonnenblumenkuchen, Gelatine
Milchverarbeitung	105	839	8017	Molke, Buttermilch, Quark
Mahl- und Schälmühlen, Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen	106	103	1247	Stärke, Schalen
Herstellung von Back- und Teigwaren	107	1302	22115	Produktreste
Herstellung von sonstigen Nahrungsmitteln	108	418	16835	Melasse, Stärke
Herstellung von Futtermitteln	109	140	1685	Produktreste
Getränkeherstellung	110	486	5390	Treber, Obsttrester, Halbfabrikate
Total		3972	71718	

Detailhandel

Zur Ermittlung der Menge Bioabfall aus dem Detailhandel wurden die grössten Unternehmen der Schweiz direkt angefragt. Drei Detailhändler gaben eine Frischsubstanz (FS) von insgesamt 61'351 Tonnen für das Jahr 2014 an. Es wurden total 3'516 Filialen mit einer Verkaufsfläche von 2'921'232 m² erfasst. Aus der Betriebsumfrage wurde somit eine mittlere Menge Bioabfall von 0.028 Tonnen pro m² Verkaufsfläche ermittelt. Zur Hochrechnung auf die gesamte Schweiz wurde die Verkaufsfläche der im Detailhandel mit Nahrungsmitteln tätigen Betriebe gemäss Statistik der Unternehmensstruktur des BFS verwendet [13]. Errechnet wurde eine Gesamtfläche von 3'480'000 m². Es gilt:

$$Abfallmenge_{Detailhandel} [kg/a] = Verkaufsfläche_{Detailhandel} [m^2] \times \bar{\Omega} \text{ Abfallmenge pro Fläche}_{Detailhandel} [kg/m^2 \cdot a]$$

Je nach Detailhändler werden die anfallenden Bioabfälle der Vergärung zugeführt oder zusammen mit dem Hauskehricht entsorgt resp. verbrannt. Bei den anfallenden biogenen Abfällen handelt es sich primär um Lebensmittelabfälle, wobei die genaue Zusammensetzung nicht genau definiert werden konnte. Gemäss Angaben sind etwa 30 bis 70% Obst und Gemüse zu erwarten und ein Drittel Brot. Zudem ist davon auszugehen, dass es leichte saisonale Schwankungen gibt (z.B. mehr Obst- und Gemüseabfälle im Sommer als im Winter). Zu dieser Kategorie gehören auch Abfälle aus den Kühlregalen wie etwa Jogurt, Fleisch und Käse.

Gastronomie

Im Bereich Gastronomie wurde eine Online-Umfrage eingerichtet, die mit dem Newsletter des Verbands für Hotellerie und Restauration in der Schweiz (GastroSuisse) an die entsprechenden Mitgliedsbetriebe verschickt wurde. Aus der Befragung wurde eine durchschnittliche Menge Bioabfall von 187 g (davon 12 g Öl) pro produzierte Mahlzeit ermittelt und damit die Biomasse pro Jahr gesamtschweizerisch hochgerechnet. Hierfür wurde eine Schätzung des GastroSuisse-Verbands verwendet, der gemäss Mitteilung eine Anzahl von total rund 2'500'000 Mahlzeiten pro Tag erwartet. Es gilt:

$$Abfallmenge_{CH-Gastro} [kg/a] = Anzahl\ Mahlzeiten_{CH-Gastro} [ANZ/a] \times \bar{\Omega} \text{ Abfallmenge pro Mahlzeit}_{Gastro} [kg/ANZ]$$

Die Verteilung auf die einzelnen Gastronomiebetriebe der Schweiz wurde aufgrund der Vollzeitäquivalente gemäss Statistik der Unternehmensstruktur vom BFS vorgenommen:

$$Abfallmenge_{Gastro} [kg/a] = Anzahl\ Vollzeitäquivalente_{Gastro} [ANZ] \times \frac{Abfallmenge_{CH-Gastro} [kg/a]}{Anzahl\ Vollzeitäquivalente_{CH-Gastro} [ANZ]}$$

Anzumerken ist, dass die geschätzte Menge Bioabfall pro Mahlzeit je nach Studie und Restauranttyp deutlich schwanken kann, beispielweise: 124 g [14], 165 bis 1290 g [25], 14 bis 181 g (Median 117 g) [24].

Tabakindustrie

Bei der Tabakindustrie wurde die Menge Bioabfall pro Produktionseinheit geschätzt und damit die total in der Schweiz anfallende Biomasse hochgerechnet [31].

$$Abfallmenge_{CH-Tabak} [kg/a] = Anzahl\ Zigaretten_{CH-Tabak} [ANZ] \times \bar{\Omega} \text{ Abfallmenge pro Zigarette}_{Tabak} [kg/ANZ \cdot a]$$

Die Verteilung auf die einzelnen Tabakhersteller der Schweiz wurde aufgrund der Vollzeitäquivalente gemäss Statistik der Unternehmensstruktur vom BFS vorgenommen:

$$Abfallmenge_{Tabak} [kg/a] = Anzahl\ Vollzeitäquivalente_{Tabak} [ANZ] \times \frac{Abfallmenge_{CH-Tabak} [kg/a]}{Anzahl\ Vollzeitäquivalente_{CH-Tabak} [ANZ]}$$

Es ist zu erwähnen, dass dabei nur ein Grossunternehmen Informationen bereitstellen wollte. Bei den anfallenden organischen Abfällen handelt es sich um Karton und Papier, die recycelt werden, sowie Tabak und Acetatfilter, die vergärt werden. Trotz Vergärungsmöglichkeiten [27] wird Papier hauptsächlich recycelt.

Textilindustrie

In der Schweiz kann die Textilproduktion vernachlässigt werden. Hingegen ist das Recycling-Geschäft wichtig. Pro Kopf und Jahr werden rund 6 kg Textilien separat gesammelt, vor allem mit der Kleidersammlung, das heisst schweizweit total etwa 50'000 Tonnen. Die räumliche Aufteilung auf die Schweiz erfolgte aufgrund der kantonalen Bevölkerungszahl gemäss BFS [16].

$$\text{Abfallmenge}_{\text{Textil}} \text{ [kg/a]} = \text{Anzahl Einwohner}_{\text{Kanton}} \text{ [ANZ]} \times \bar{\varnothing} \text{ Abfallmenge pro Einwohner}_{\text{Textil}} \text{ [kg/ANZ} \cdot \text{a}]$$

Die restlichen Textilien werden entweder privat weitergegeben oder zusammen mit dem Haushaltskehricht entsorgt. Die Textilrecycling-Informationen und der Anteil Naturfaserkleidung (organische Abfälle) wurden vom BAFU übernommen [3]. Textilien sind gemäss aktueller Technologie nur sehr schwierig zu vergären [19] und werden somit immer durch Verbrennung entsorgt. Aus diesem Grund wurde kein potenzieller Biomethanertrag für diese Ressource ermittelt.

Druckereien

Die Hauptprodukte dieser Branche sind Zeitungen, Zeitschriften und Kataloge. Organische Druckereiaffälle bestehen vorwiegend aus Papierabfällen wie Multidruck, Endlospapier und Altpapier. Gefährliche Abfälle wie Druckfarbenreste oder Wasch- und Lösungsmittel gehören nicht dazu, diese müssen fachgerecht entsorgt werden. Weil immer weniger Drucksachen gebraucht werden und mancher Konkurrent im Ausland preiswerter ist, ist zu erwarten, dass sich die Abfallmenge dieser Branche künftig reduzieren wird. Anhand einer direkten Befragung wurden die grössten Druckereien der Schweiz zu ihrer Produktionszahl, Abfallmenge sowie eventuellen Wiederverwertung befragt. Aus den Betriebsangaben wurde die Menge Trockensubstanz an organischen Abfällen pro Vollzeitäquivalent berechnet. Die Hochrechnung erfolgte folglich aufgrund der Vollzeitäquivalente der Schweizer Druckereien gemäss Statistik der Unternehmensstruktur (BFS) [13]. Es gilt:

$$\text{Abfallmenge}_{\text{Druck.}} \text{ [kg/a]} = \text{Anzahl Vollzeitäquiv.}_{\text{Druck.}} \text{ [ANZ]} \times \bar{\varnothing} \text{ Abfallmenge pro Vollzeitäquiv.}_{\text{Druck.}} \text{ [kg/ANZ} \cdot \text{a}]$$

Papier und Karton sind mit aktuellen Technologien nur sehr schwer vergärbar, dies ist jedoch grundsätzlich möglich [27]. Die Entsorgung erfolgt durch stoffliche Verwertung und Verbrennung. Ein potenzieller Biomethanertrag wurde für diese Ressource nicht ausgewiesen.

Papierindustrie

Die Endprodukte der Papierindustrie sind im Wesentlichen Zeitungsdruckpapiere, grafische Papiere, Hygiene- und Haushaltspapiere sowie Verpackungsmaterial (Wellkarton). Diese werden entweder aus Zellstoff, recyceltem Altpapier oder Kartonage hergestellt. Bei der Herstellung von Papier werden grosse Mengen Wasser benötigt. Nur durch die Aufschlämmung des Zellstoffs mit Wasser erhält das Papier seine gleichmässige Struktur. Der organische Abfall fällt somit hauptsächlich in Form von Schlamm an (De-inking Schlamm aus dem Papierrecycling, Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung usw.). Anhand einer direkten Befragung wurden insgesamt elf schweizerische Papier- und Kartonproduzenten kontaktiert. Bei den anfallenden Bioabfällen wurden unterschiedliche Schlammtypen (Paperschlamm, Klärschlamm, biologischer Schlamm, Gesamtschlamm) angegeben. Aus den Betriebsangaben wurde die Menge Trockensubstanz an organischen Abfällen pro Vollzeitäquivalent berechnet. Die Hochrechnung erfolgte aufgrund der schweizweiten Vollzeitäquivalente gemäss Statistik der Unternehmensstruktur (BFS) [13].

$$\text{Abfallmenge}_{\text{Papier}} \text{ [kg/a]} = \text{Anzahl Vollzeitäquiv.}_{\text{Papier}} \text{ [ANZ]} \times \bar{\varnothing} \text{ Abfallmenge pro Vollzeitäquiv.}_{\text{Papier}} \text{ [kg/ANZ} \cdot \text{a}]$$

Die anfallenden Schlämme werden von den Unternehmen durch Vergärung energetisch genutzt, bevor sie schliesslich durch Verbrennung in einer KVA entsorgt werden. Bei einigen Unternehmen werden die anfallenden Paperschlämme als Edukt wieder in den Produktionsprozess integriert, weshalb sie nicht als Abfallprodukt anfallen resp. entsorgt werden müssen.

Pharmaindustrie

Die Pharmaindustriewerte sind aus der schweizerischen Gesamtproduktion an Arzneimitteln berechnet worden. Aufgrund der Angaben der ZHAW (M. Haubensak) wurde die Menge an organischen Abfällen für eine energetische Nutzung in der Schweiz wie folgt abgeschätzt:

In der chemisch-pharmazeutischen Industrie fallen unter anderem kohlenstoffhaltige Abwässer und Lösemittel an, die jedoch meist fossile Ursprungs sind. Weiter wird die chemische Herstellung von Pharmazeutika aus Kostengründen zu etwa 95% im Ausland vorgenommen, weshalb von einer genaueren Betrachtung momentan abgesehen wird.

In der pharmazeutischen Biotechnologie fallen biogene Abfälle meist in Form von Fermentationsrückständen an, die jedoch auch prozessbedingte mikrobielle Biomasse, Abwasser und Medienrückstände enthalten. Dabei sind die Containment-Vorschriften zu gentechnisch veränderten Organismen (GVO) zu beachten. Gemäss Einschliessungsverordnung (ESV) müssen jegliche durch GVO kontaminierte Güter sterilisiert und danach verbrannt werden.

In der Phytopharmazie werden die Wirkstoffe der Arzneimittel direkt aus Pflanzen gewonnen. Biogene Abfälle fallen hier als Lösemittel (Alkohol) und vor allem als Pflanzenreste an. Anhand einer direkten Betriebserhebung wurde eine Menge an biogenen Abfällen von schweizweit total knapp 1000 Tonnen abgeschätzt. Die räumliche Aufteilung auf die Schweiz erfolgte aufgrund der kantonalen Bevölkerungszahl gemäss BFS [16].

$$\text{Abfallmenge}_{\text{Pharma}} \text{ [kg/a]} = \text{Anzahl Einwohner}_{\text{Kanton}} \text{ [ANZ]} \times \bar{\text{O}} \text{ Abfallmenge pro Einwohner}_{\text{Pharma}} \text{ [kg/ANZ} \cdot \text{a}]$$

Die wenigen Hersteller, die in der Schweiz produzieren, entsorgen die Pflanzenreste meistens durch Vergärung in einer Biogasanlage. In der Phytopharmazie werden Lösemittel (resp. Alkohol) heutzutage aus Gründen der Validierbarkeit (Good Manufacturing Practice, GMP-Richtlinien) nicht mehr regeneriert. Nach der Destillation werden diese in Grossbetrieben meist ebenfalls der Vergärung zugeführt, während sie in kleinen Betrieben in Kleinstmengen zusammen mit dem Abwasser entsorgt werden. Bei der Vergärung wirkt sich die Zugabe von Alkohol positiv auf den Biomethanertrag aus (+50%) [29].

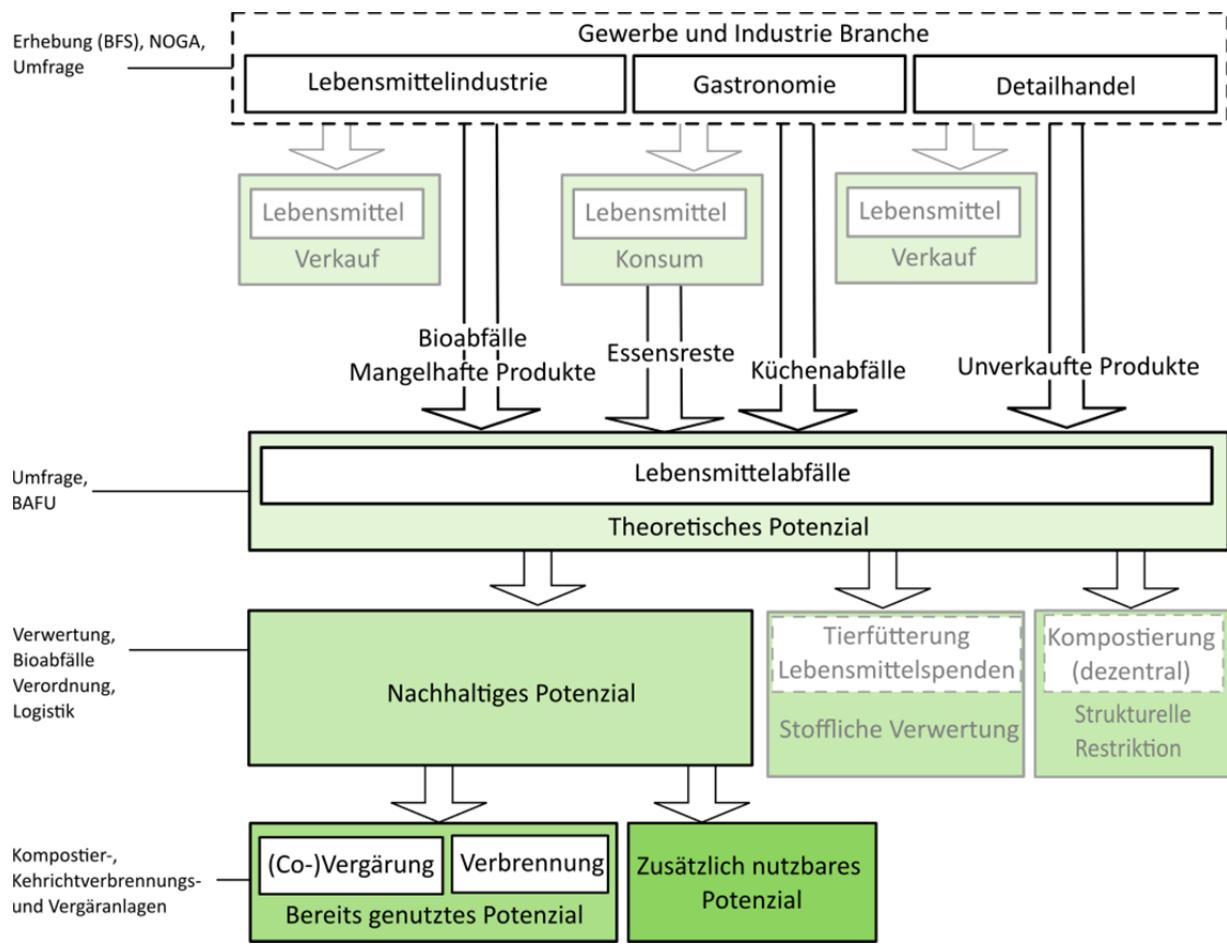


Abbildung 2: Modellansatz zur Ermittlung der energetischen Potenziale (Lebensmittelindustrie und -gewerbe).

2.3 Nachhaltiges Potenzial

Die verfügbare Menge an Biomasse und damit das theoretische Potenzial in der Schweiz wird durch verschiedene Restriktionen verringert. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen erhält man das nachhaltige Potenzial für die energetische Nutzung der Biomasse (vgl. Einleitung des Gesamtberichts). Gründe können ökologische Aspekte (z.B. eine stoffliche Wiederverwertung durch Recycling oder Verfütterung, die priorisiert wird), politische/gesellschaftliche Akzeptanzprobleme, wirtschaftliche Hemmnisse oder rechtliche Bestimmungen sein. Aktuell werden separat entsorgte biogene Abfälle in der Schweiz entweder stofflich wiederverwendet, vergärt oder kompostiert (vgl. Kapitel 1.2). Aufgrund der aktuellen Entwicklungen wird davon ausgegangen, dass getrennt entsorgte biogene Abfälle weitgehend vergärbar sind. Konkret wurde jeweils angenommen, dass lediglich ein kleiner Anteil von etwa 10% aus ökonomischen und strukturellen Gründen vorzugsweise weiterhin möglichst nahe an der Quelle zu kompostieren ist.

Abbildung 3 zeigt die ermittelten Verwertungs- resp. Entsorgungswege der organischen Abfälle aus der Lebensmittelindustrie und dem Lebensmittelgewerbe. Heute werden beispielsweise 34% der anfallenden Bioabfälle aus dem Detailhandel stofflich wiederverwertet (Tierfutter und Recycling). Diese Menge wurde somit vom theoretischen Potenzial abgezogen.

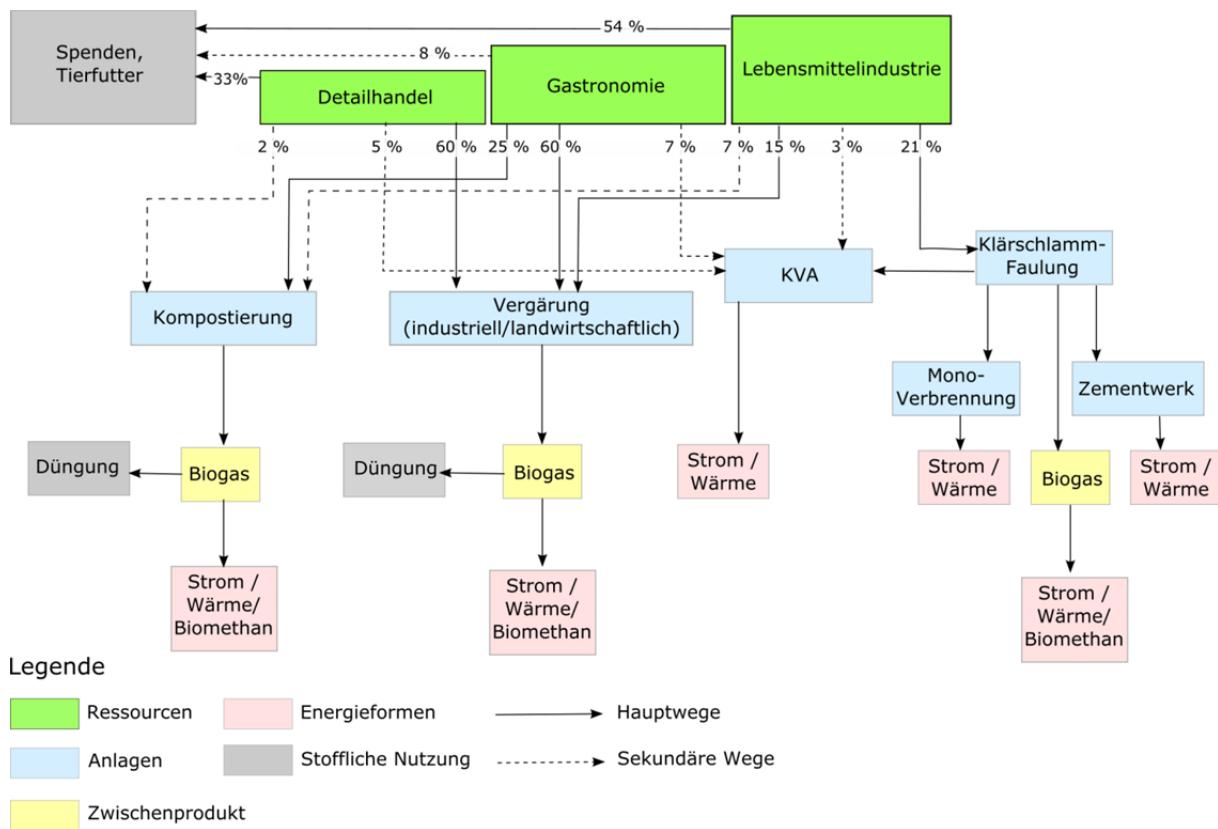


Abbildung 3: Aktuelle energetische Verwertung resp. Entsorgung von organischen Abfällen aus der Lebensmittelindustrie und dem Lebensmittelgewerbe in der Schweiz.

In der Tabakindustrie werden anfallende Papier- und Kartonabfälle vollständig recycelt [32]. Tabak und Filter werden zur Produktion von Biogas benutzt oder verbrannt, so dass das zusätzliche Potenzial gleich null ist. Von den separat gesammelten Textilien können 90% recycelt werden. Die restlichen 10% werden durch Verbrennung in einer KVA entsorgt. In den Druckereien werden anfallende Papier- und Kartonabfälle vollständig recycelt [32]. Entsprechend ist das nachhaltige Potenzial der organischen Abfälle für eine energetische Nutzung gleich null. In der Papierindustrie wird der gesamte anfallende Schlamm in einer Abwasserreinigungsanlage behandelt und anschliessend verbrannt. In der Pharma industrie werden etwa ¾ der anfallenden Pflanzenreste vergärt und ¼ kompostiert. Weniger als 1% wird durch Verbrennung entsorgt (siehe Abbildung 4).

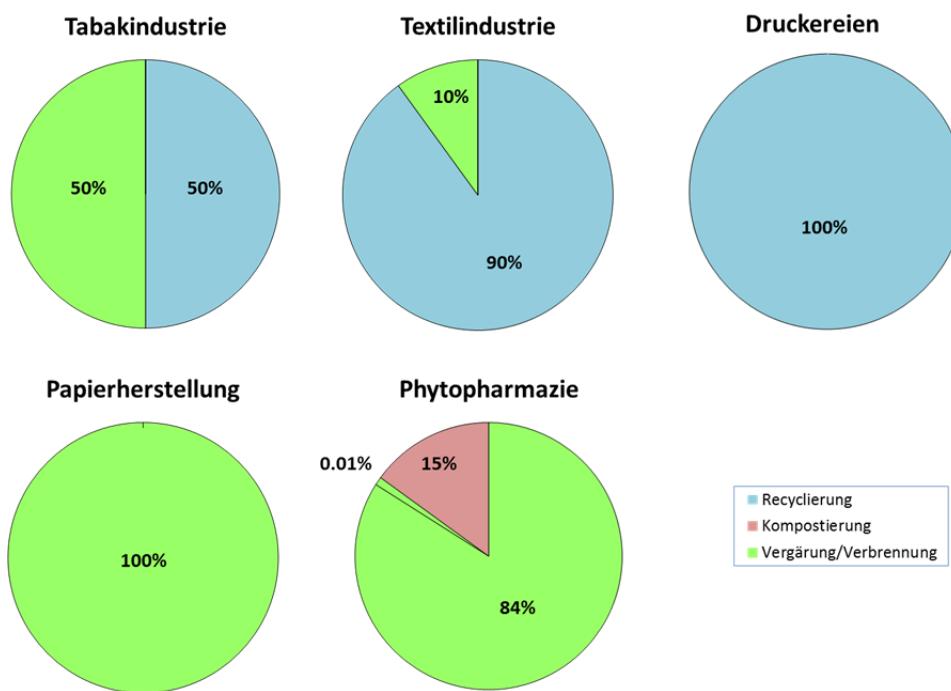


Abbildung 4: Übersicht der aktuellen Verwertung resp. Entsorgung von organischen Abfällen (Tabak- und Textilindustrie, Druckereien, Papierherstellung, Phytopharmazie).

2.4 Bereits genutztes Potenzial

Heute werden die organischen Abfälle aus Gewerbe- und Industrie je nach Herkunft und Zusammensetzung unterschiedlich verwertet resp. entsorgt. So werden sie entweder recycelt, verfüttert, an gemeinnützige Organisationen verschenkt, vergärt, kompostiert oder verbrannt. Heute stellen einzig die Verbrennung und die Vergärung eine energetische Verwertung dieser Abfälle dar. Durch Vergärung von Bioabfällen fällt neben dem energetisch nutzbaren Biogas Gärget an. Abbildung 3 fasst die aktuelle energetische Verwertung von organischen Abfällen aus der Lebensmittelbranche (Lebensmittelindustrie, Detailhandel, Gastronomie) in der Schweiz zusammen. Die Lebensmittelindustrie entsorgt ihre Abfälle rund zur Hälfte durch Verfütterung (54%). Zudem wird ein Grossteil in Abwasserreinigungsanlagen (21%) und in Biogasanlagen (15%) behandelt. Beim Detailhandel wird der grösste Teil der anfallenden organischen Abfälle durch Vergärung (60%) sowie durch Spenden und als Tierfutter (33%) verwertet. In der Gastronomie sind hauptsächlich die Vergärung (60%) und die Kompostierung wichtig (25%).

2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial

Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial – dies bedeutet die Menge Bioabfälle, die für eine energetische Verwertung mobilisierbar wäre, jedoch aktuell nicht energetisch genutzt wird. Es handelt sich hauptsächlich um Biomasse, die heute kompostiert wird.

3 Resultate

3.1 Theoretisches Potenzial

Ressourcenmenge

Die durchschnittlich pro Jahr zu erwartende Menge an organischen Abfällen wurde für jede Industrie- resp. Gewerbebranche in Tonnen Frischsubstanz berechnet (vgl. Kapitel 2.2) und nachfolgend aufgrund von Kenngrössen in Trockensubstanz und in organische Trockensubstanz umgerechnet. Auf diese Weise wurde eine Gesamtmenge an organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe von total rund 1 Mio. Tonnen TS pro Jahr ermittelt.

Abbildung 5 zeigt die Aufteilung auf die verschiedenen untersuchten Branchen. Ersichtlich ist, dass der grösste Anteil mit Abstand aus der Lebensmittelindustrie (LMI) kommt, gefolgt von den Druckereien. *Abbildung 6* gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung des theoretischen Potenzials. Erwartungsgemäss ist ein deutlich höheres Aufkommen in den urbanen Gebieten und um die grösseren Agglomerationen zu erkennen. Je nach Branche ist das Aufkommen mehr oder weniger homogen auf die ganze Schweiz verteilt (Detailhandel, Gastronomie) oder konzentriert sich auf einige Kantone (Phytopharma-, Papier- und Tabakindustrie).

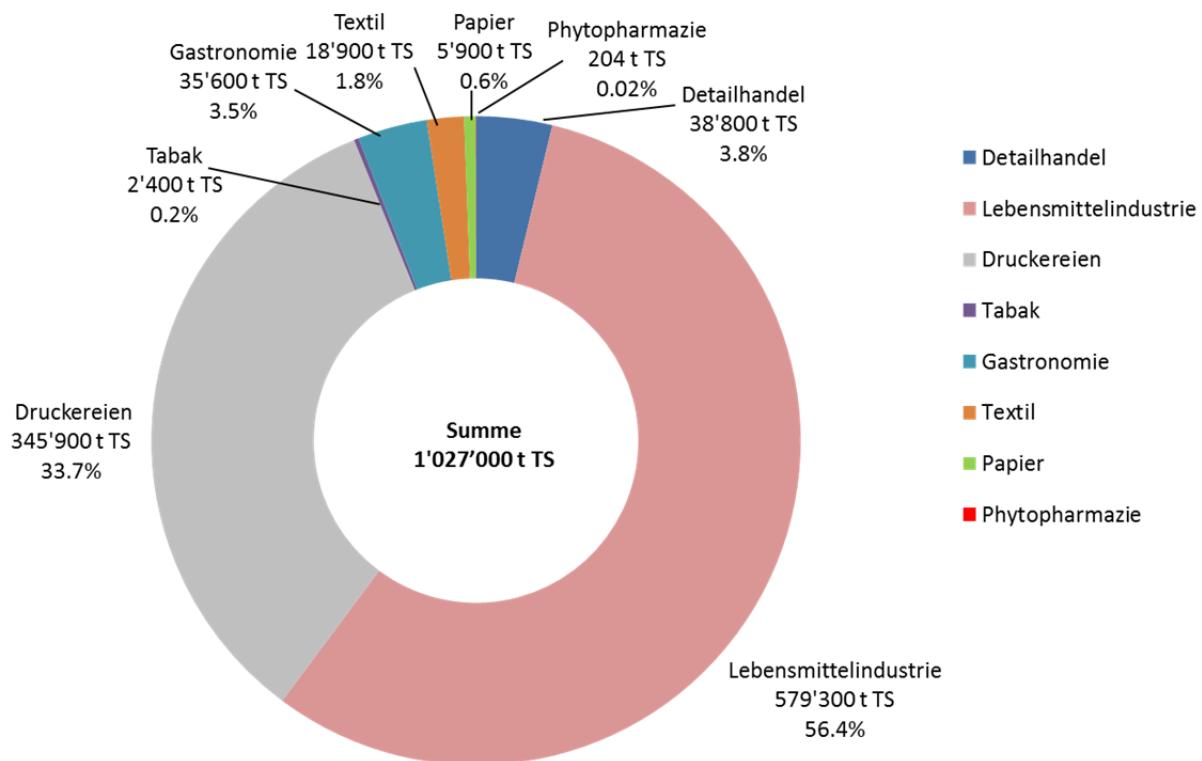


Abbildung 5: Theoretisches Potenzial, organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe, aufgeteilt nach Branchen (Tonnen Trockensubstanz pro Jahr).

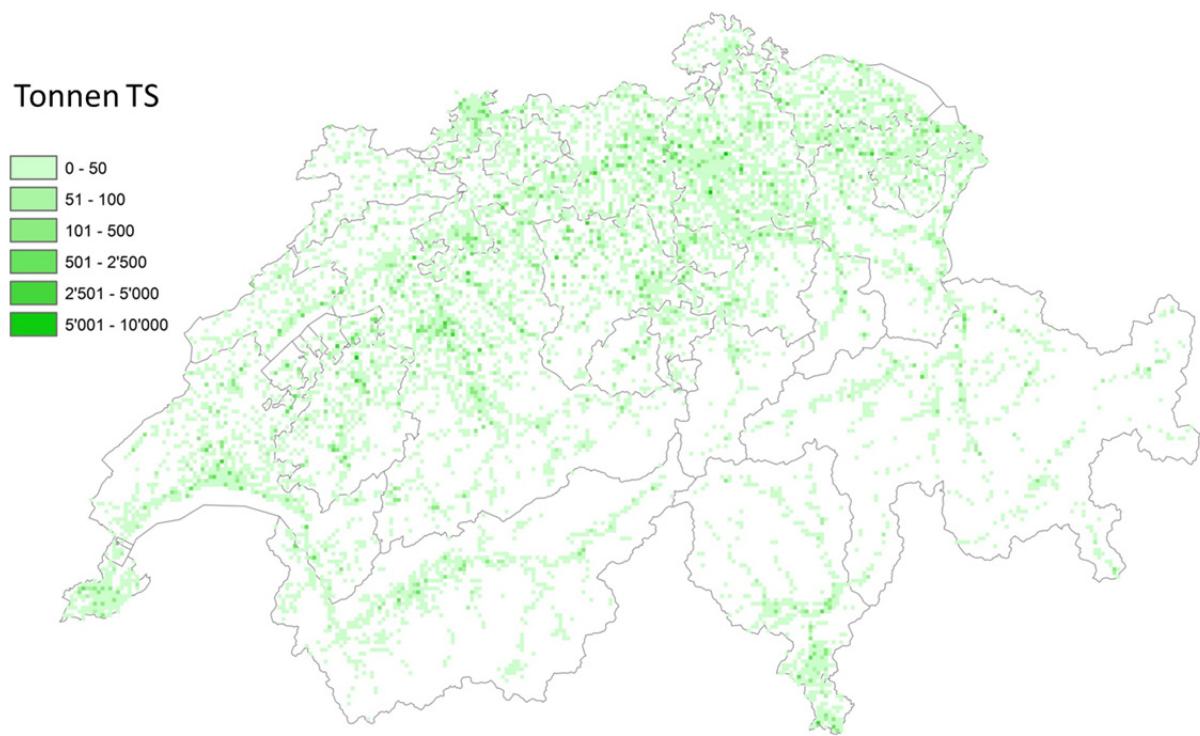


Abbildung 6: Theoretisches Potenzial, räumliche Verteilung der organischen Abfälle aus Industrie und Gewerbe in der Schweiz in 1 km Auflösung (Tonnen Trockensubstanz).

Energieinhalt

Zusätzlich zur Ressourcenmenge wurde auch die gesamte in den organischen Abfällen enthaltene Energie – bzw. der Primärenergieinhalt – berechnet. Die Berechnung erfolgte durch Zuordnung der vorgängig ermittelten Trockensubstanzen auf charakteristische Heizwerte (vgl. Kapitel 2.1). Gemäss Berechnungen beträgt der theoretische Primärenergiegehalt der organischen Abfälle aus Industrie und Gewerbe der Schweiz somit total 13.6 PJ pro Jahr. Dabei stammt fast die Hälfte (6.3 PJ) aus der Lebensmittelindustrie (Abbildung 7).

Gemäss heutiger Praxis erfolgt die energetische Nutzung von biogenen Abfällen mittels Verbrennung oder anaerober Vergärung. Darum wurde auch der potentielle Methanertrag berechnet bzw. der potentielle Energieinhalt aufgrund des Heizwerts von Methan. Bioabfälle wie Papier, Karton und Textilien lassen sich mit aktueller Technologie nur schwer vergären [19]. Für diese Ressourcen wurde kein potenzieller Biomethanertrag ausgewiesen. Gemäss Berechnungen beträgt der potentielle Biomethanertrag der organischen Abfälle aus Industrie und Gewerbe der Schweiz somit total 5.8 PJ pro Jahr. Die Aufteilung zwischen den verschiedenen Branchen kann der Abbildung 7 entnommen werden. Die Zahlen auf kantonaler Ebene sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

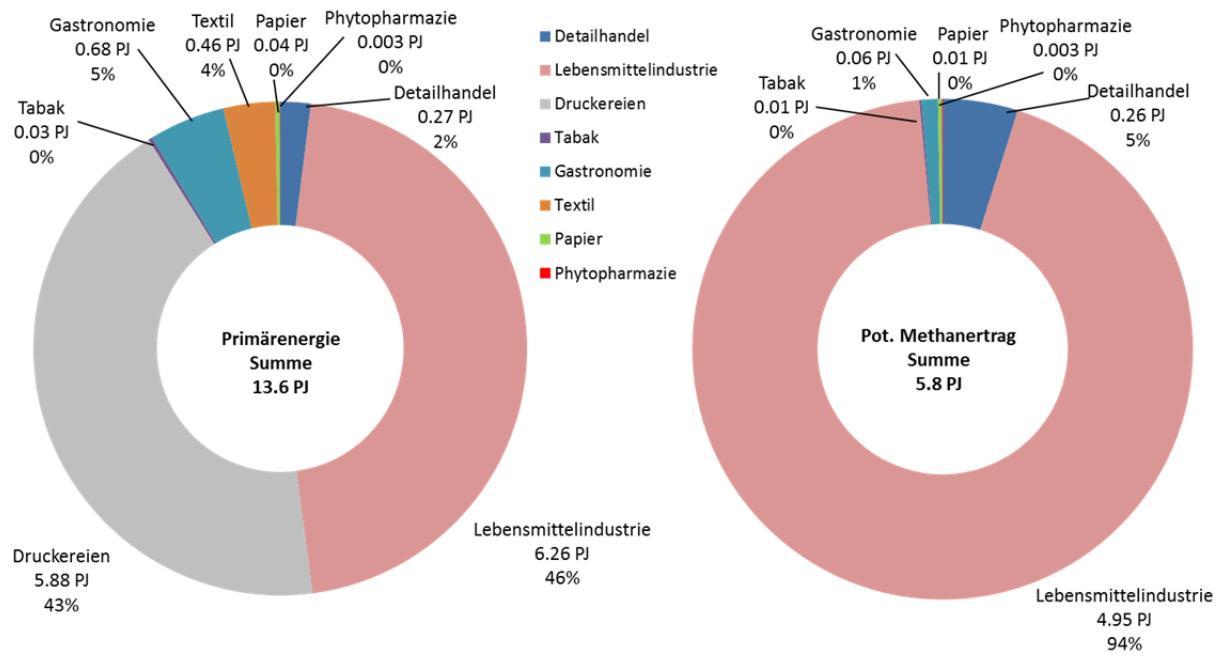


Abbildung 7: Theoretisches Potenzial, organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe in der Schweiz, Primärenergieinhalt und potenzieller Biomethanertrag (Petajoule pro Jahr).

3.2 Nachhaltiges Potenzial

Aufgrund verschiedener Restriktionen verringert sich das theoretische Potenzial um diejenige Menge, die nach heutigem Stand voraussichtlich nicht energetisch nutzbar ist. In einem ersten Schritt wurde die Menge Abfall, die stofflich wiederverwendet wird (Recycling, Tierfütterung oder Abgabe an gemeinnützige Organisationen) beziffert und vom theoretischen Potenzial abgezogen (vgl. Kapitel 2.2). Die Entsorgung resp. Verwertung der restlichen organischen Abfälle erfolgt entweder durch Verbrennung, Vergärung oder Kompostierung. Aufgrund der aktuellen Entwicklungen wurde angenommen, dass die biogenen Abfälle, die heute kompostiert werden, weitgehend vergärbar resp. sowohl stofflich als auch energetisch nutzbar wären. Lediglich ein kleiner Anteil von etwa 10% wäre vorzugsweise möglichst dezentral zu kompostieren.

Unter Berücksichtigung dieser Restriktionen wurde ein nachhaltiges Potenzial von total rund 238'000 Tonnen TS resp. 2.7 PJ Primärenergieinhalt ermittelt. Das nachhaltige Potenzial pro Branche ist in *Abbildung 8* zusammengefasst. Da Druckereiabfälle (Papier, Karton) vollständig recycelt werden, wurde kein nachhaltiges Potenzial für diese Branche ausgewiesen. Entsprechend reduziert sich das nachhaltige Potenzial stark. Die Lebensmittelindustrie macht fast ¾ des ermittelten nachhaltigen Potenzials aus, gefolgt von der Gastronomie (14%) und vom Detailhandel (11%). Daneben spielen die anderen Industriebranchen eine untergeordnete Rolle.

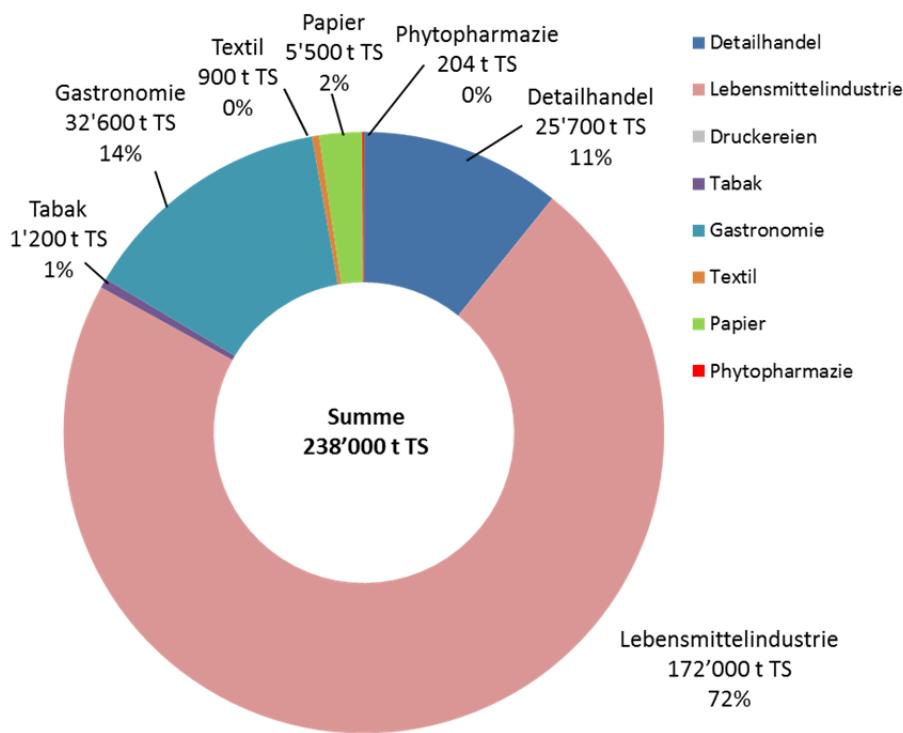


Abbildung 8: Nachhaltiges Potenzial, organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe, aufgeteilt nach Branchen (Tonnen Trockensubstanz pro Jahr).

Abbildung 9 und Abbildung 10 geben einen Überblick über die räumliche Verteilung des nachhaltigen Potenzials von organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe auf kantonaler Ebene. Ersichtlich ist, dass der Kanton Zürich mit rund 35'380 Tonnen TS resp. 0.407 PJ das grösste nachhaltige Potenzial aufweist, gefolgt von den Kantonen Bern (32'619 Tonnen TS resp. 0.374 PJ) und Waadt (20'430 Tonnen TS resp. 0.232 PJ). Dies ist sowohl auf die Kantonsgrösse als auch auf die demografischen Gegebenheiten resp. Anzahl Betriebe zurückzuführen. Generell kann die räumliche Verteilung dieser Ressource als komplementär zur Biomasse aus der Forst- und Landwirtschaft angesehen werden.

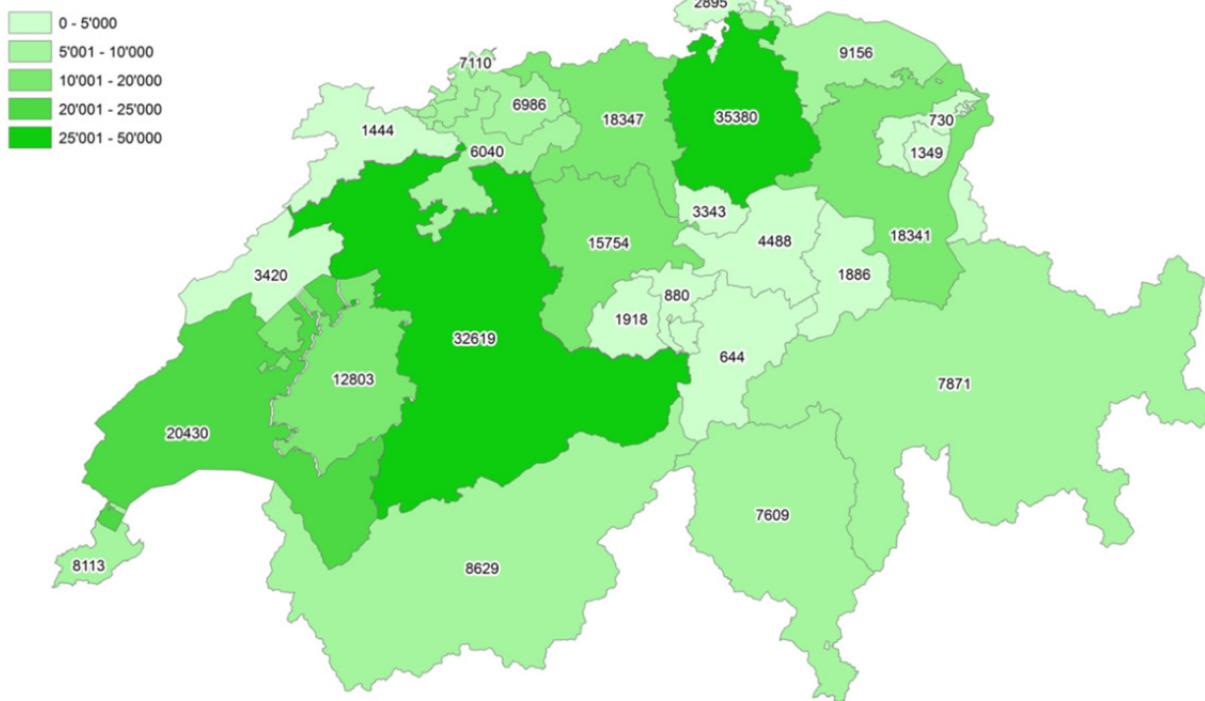
Tonnen TS

Abbildung 9: Nachhaltiges Potenzial, kantonale Verteilung der Menge an organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe in der Schweiz (Tonnen Trockensubstanz pro Jahr).

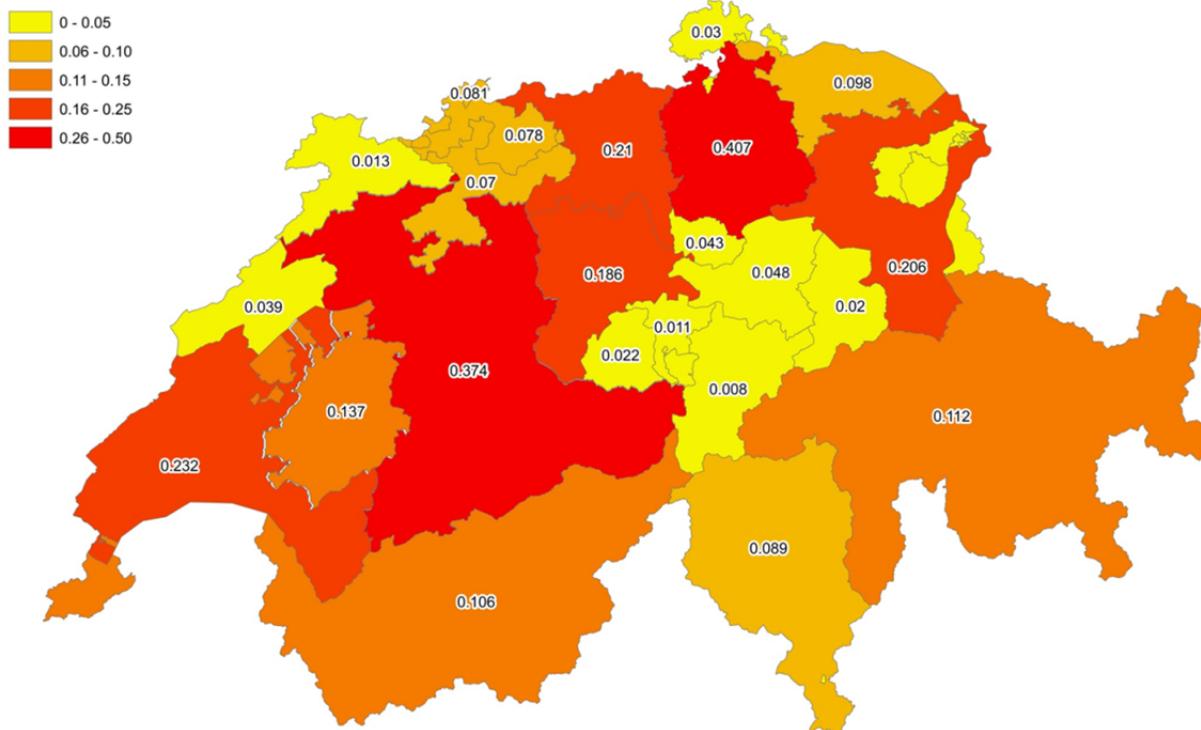
Primärenergieinhalt, PJ

Abbildung 10: Nachhaltiges Potenzial, kantonale Verteilung des Primärenergieinhalts von organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe in der Schweiz (Petajoule PJ pro Jahr).

3.3 Gesamtschau der Potenziale

In den vorgängigen Kapiteln wurden das theoretische (Kap. 3.1) und das nachhaltige Potenzial (Kap. 3.2) der jährlich anfallenden organischen Abfälle aus Industrie und Gewerbe in der Schweiz ermittelt. Analog zum theoretischen Potenzial wurde das bereits genutzte Potenzial durch Hochrechnung der branchenspezifischen Betriebserhebungen auf die ganze Schweiz ermittelt. Gemäss unseren Berechnungen werden somit total 25'400 Tonnen TS bereits durch Verbrennung und 155'600 Tonnen TS durch Vergärung - insgesamt also über 180'000 Tonnen TS resp. knapp 2 PJ. – energetisch genutzt (*Abbildung 11*). Branchenspezifisch werden bereits etwa 60% der Gastronomieabfälle entweder verbrannt oder vergärt und in diesem Sinne energetisch genutzt. Das zusätzliche Potenzial ergibt sich aus den Abfällen, die heute kompostiert werden, wobei angenommen wurde, dass 10% weiterhin möglichst lokal zu kompostieren ist. Im Detailhandel werden fast alle Abfälle energetisch genutzt. Ein zusätzlich nutzbares Potenzial findet man hauptsächlich in der Lebensmittelindustrie und in der Gastronomie. Ähnliches wurde auch 2014 im Bericht zum Postulat von Chevalley ermittelt [14, 20]. Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass Lebensmittelabfälle heutzutage gesellschaftlich nicht mehr akzeptiert sind. In den letzten Jahren wurden verschiedene Studien durchgeführt mit dem Ziel, dieses Abfallaufkommen stark zu reduzieren [8, 9, 30].

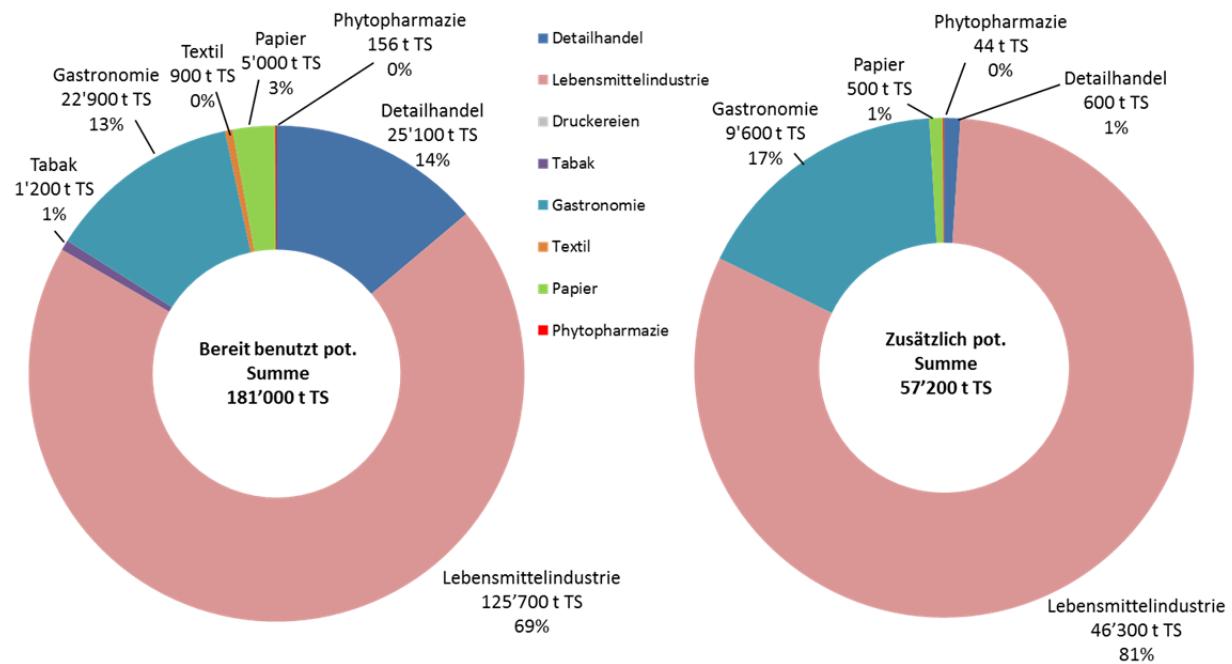


Abbildung 11: Bereits genutztes und zusätzlich nutzbares Potenzial, organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe, aufgeteilt nach Branche (Tonnen Trockensubstanz pro Jahr).

Zusammenfassend zeigt *Abbildung 12* die verschiedenen Potenziale der organischen Abfälle aus Industrie und Gewerbe in der Schweiz. Dabei wird zwischen Frischmasse, Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz unterschieden. Die Werte sind dem Anhang 2 zu entnehmen. Die Darstellung der Ressourcenmengen in verschiedenen Einheiten ermöglicht die Veranschaulichung grundsätzlicher Charakteristiken (wie beispielsweise des Wassergehalts). Somit ist der Unterschied zwischen Frisch- und Trockensubstanz im Vergleich zur verholzten Biomasse relativ hoch, jedoch im Vergleich zu anderen, sehr nassen Biomassen wie etwa Klärschlamm oder Hofdünger, relativ klein. So verfügt die Schweiz über ein theoretisches Potenzial von rund 2.1 Mio. Tonnen Frischsubstanz organischer Abfälle aus Industrie und Gewerbe, was rund 1 Mio. Tonnen Trockensubstanz entspricht. In *Abbildung 13* werden Primärenergieinhalt und potenzieller Biomethanertrag der verschiedenen Potenziale nebeneinandergestellt. Der Primärenergieinhalt des theoretischen Potenzials von organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe beträgt 13.6 PJ. Nach Abzug der genannten Nachhaltigkeitsrestriktionen sowie der bereits energetisch genutzten organischen Abfälle wurde ein zusätzlich

nutzbarer Primärenergieinhalt von 0.7 PJ ermittelt. Dies entspricht einem zusätzlich nutzbaren Biomethanertrag von 0.6 PJ.

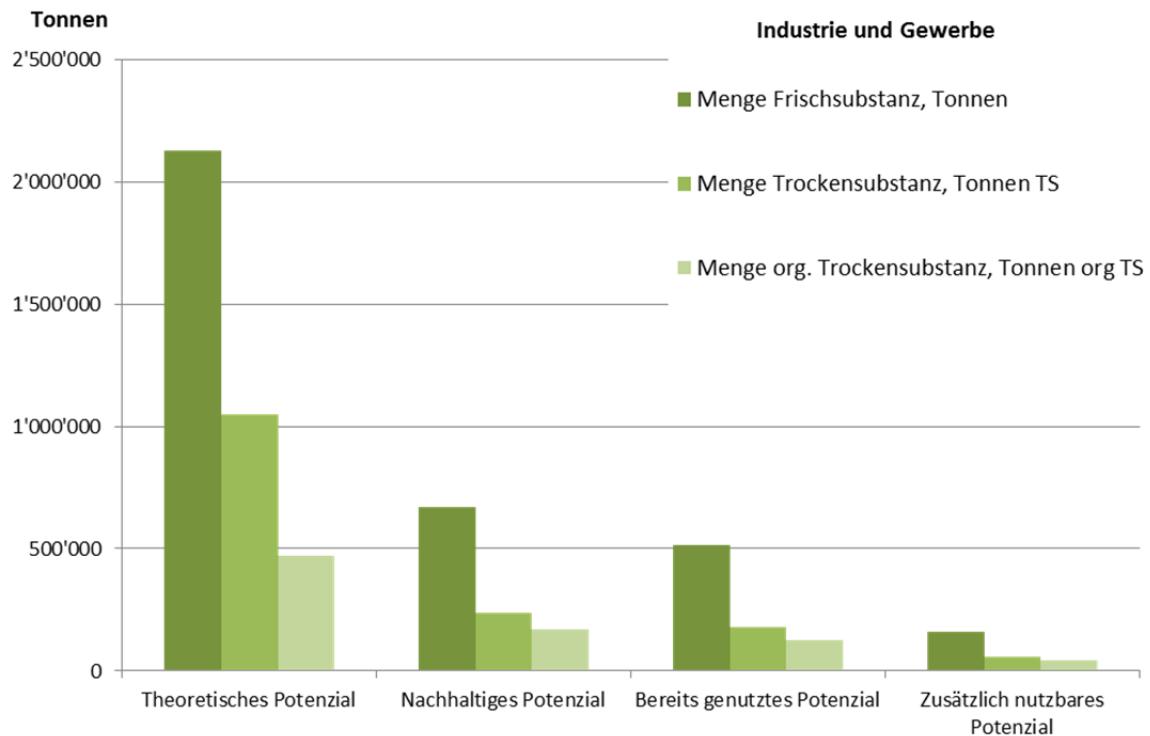


Abbildung 12: Potenzialanalyse der organischen Abfälle (Menge in Tonnen) aus Industrie und Gewerbe der Schweiz.

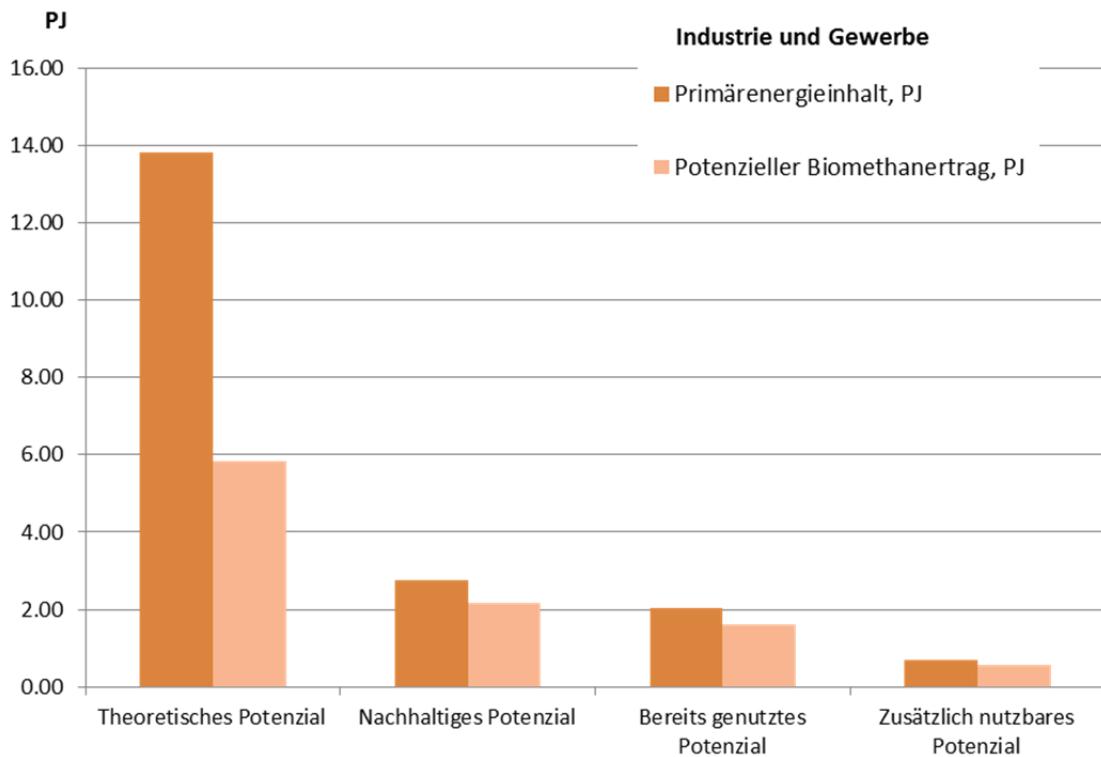


Abbildung 13: Potenzialanalyse der organischen Abfälle (Energieinhalt in PJ) aus Industrie und Gewerbe der Schweiz.

Abbildung 14 zeigt die Verteilung des theoretischen Potenzials der organischen Abfälle aus Industrie und Gewerbe auf die verschiedenen ermittelten Potenziale resp. Restriktionen. Die Angaben betreffen jeweils den Primärenergiegehalt (PJ), wobei die relative Verteilung resp. die Prozentangabe auch für die Ressourcenmenge gültig ist. Auf der rechten Seite der Abbildung werden die Lebensmittelindustrie, die Gastronomie und der Detailhandel branchenspezifisch dargestellt.

Ersichtlich ist, dass das ermittelte zusätzlich nutzbare Potenzial von total 0.7 PJ Primärenergiegehalt etwa 5% des theoretischen Potenzials entspricht. Mit 0.5 PJ stammt der Grossteil aus der Lebensmittelindustrie, gefolgt von der Gastronomie (0.2 PJ). Weitere Branchen sind vernachlässigbar.

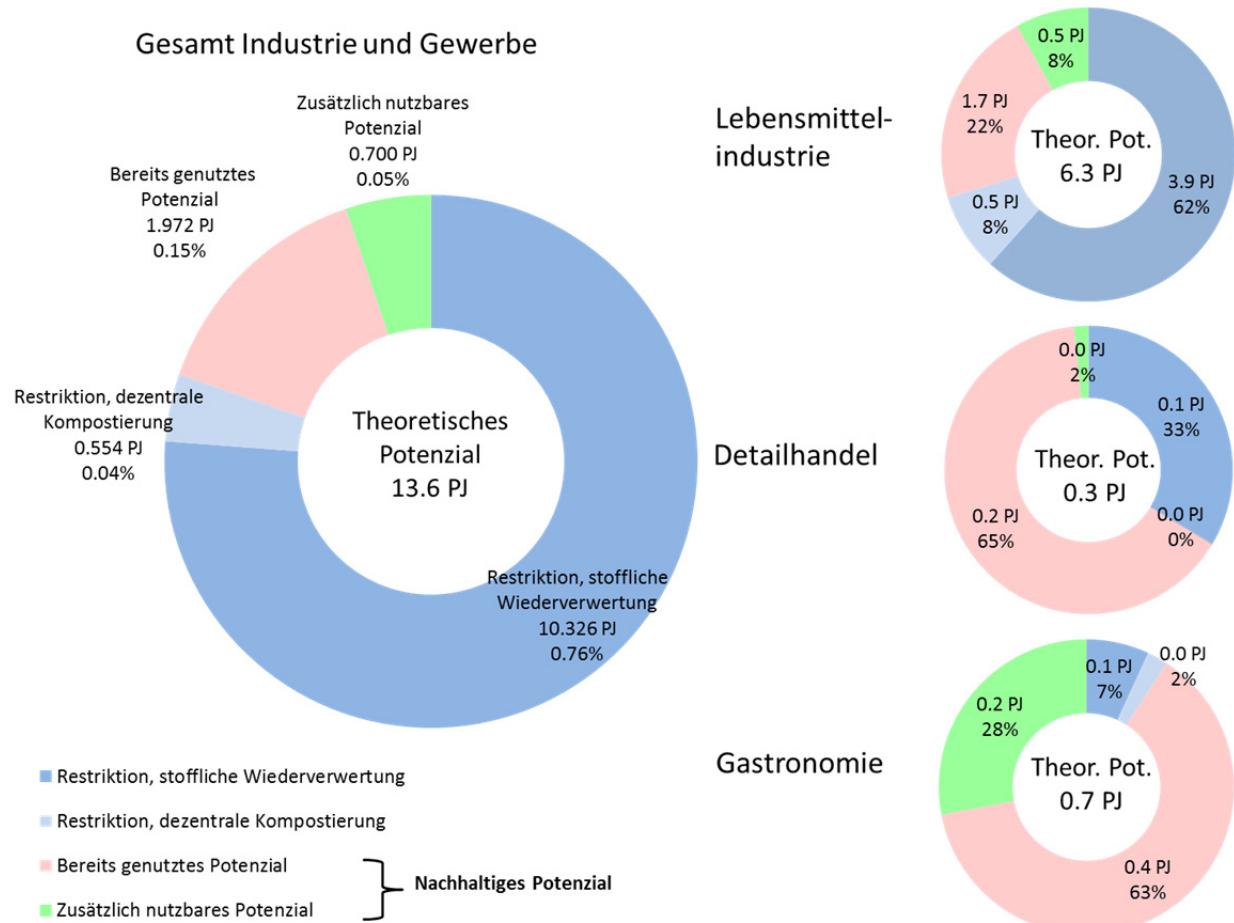


Abbildung 14: Verteilung des theoretischen Potenzials von organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe in der Schweiz auf die verschiedenen ermittelten Restriktionen resp. Potenziale (Primärenergieinhalt, Petajoule) – links Gesamt betrachtung, rechts branchenspezifisch für die Lebensmittelindustrie, die Gastronomie und den Detailhandel. 5.9 PJ des theoretischen Potenzials stammen aus Papierabfällen von Druckereien, die zu 100% recycelt werden.

4 Diskussion und Folgerungen

Industrie und Gewerbe der Schweiz bestehen aus einer Vielzahl von Betrieben, die sich sowohl in der Grösse als auch im Produktpotential und den Verfahren stark voneinander unterscheiden. Entsprechend unterschiedlich sind auch die anfallenden Abfälle. Gemäss unseren Berechnungen fiel in Industrie und Gewerbe 2013 ein theoretisches Potenzial von insgesamt über 2 Mio. Tonnen Frischsubstanz organischer Abfälle an, was rund 1 Mio. Tonnen Trockensubstanz entspricht. Davon wurden 76% stofflich wiederverwendet, die restlichen 24% durch Vergärung (15%), Kompostierung (6%) oder Verbrennung (3%) entsorgt. Aktuell würden demnach rund total 400'000 Tonnen FS durch Kompostierung oder Vergärung verwertet. Diese Zahl ist höher als die Schätzung des Inspektorats der Kompostier-und Vergäranlagen der Schweiz, das eine Menge von weniger als 300'000 Tonnen aus Industrie und Gewerbe angibt [1, 5]. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Betriebe ihre Abfälle teilweise auch intern vergären und privat kompostieren, was das Inspektorat nicht berücksichtigt. Ferner haben frühere Studien vergleichbare, tendenziell geringere Zahlen für die Gastronomie [20, 30] und die Lebensmittelindustrie [6] ermittelt, was mit der wachsenden Gesamtabfallmenge in der Schweiz erklärt werden kann.

Die Schweiz verfügt im Umgang mit Abfällen über klare gesetzliche Bestimmungen und hohe Entsorgungsstandards. Dabei sind Abfälle gemäss USG in erster Linie soweit als möglich zu vermeiden und stofflich wiederzuverwerten. Dies ist besonders der Fall bei Lebensmittelabfällen, die gesellschaftlich nicht mehr akzeptiert sind. Die Verbrennung von Lebensmittelabfällen erreicht einen Wirkungsgrad von über 80%, während durch Vergärung nur gerade 40% in Methan umgewandelt werden kann. Davon können wiederum nur 40% in Strom umgewandelt werden [13]. Biogene Abfälle können nicht nur als wertvolle Energieträger genutzt werden, sie enthalten auch wichtige Nährstoffe. Durch Verbrennung in einer KVA werden die Nährstoffe jedoch dem natürlichen Kreislauf entzogen. Durch Vergärung wird nicht nur Dünger (sofern die Dünger-Verordnung DüV eingehalten ist), sondern auch wertvolles Biogas gewonnen, das sowohl im Strom-, als auch im Wärme- und Kraftstoffbereich einsetzbar ist. Es wurde davon ausgegangen, dass biogene Lebensmittelabfälle weitgehend vergärbar sind und nur ein kleiner Anteil aus strukturellen Gründen vorzugsweise dezentral zu kompostieren ist.

Das nachhaltige Potenzial von organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe beträgt 2.7 PJ Primärenergieinhalt pro Jahr, wobei diese Menge etwa zu 75% aus der Lebensmittelindustrie stammt, gefolgt von der Gastronomie und dem Detailhandel. Daneben spielen die anderen Industriebranchen eine untergeordnete Rolle. Als Vergleich entspricht diese Energiemenge umgerechnet dem Energieinhalt von etwa 63'000 Tonnen Rohöl resp. etwa 74 Mio. Liter (Annahme, Heizwert von Rohöl = 43.2 MJ/kg [10]) oder 0.2% des totalen Energie-Bruttoverbrauchs der Schweiz (1108 PJ) [10]. Heute wird bereits etwa 83% des ermittelten nachhaltigen Potenzials durch Vergärung energetisch genutzt, wobei in den letzten Jahren ein kontinuierlicher Zuwachs verzeichnet wurde [1].

Das zusätzlich nutzbare Potenzial dieser Biomasse beträgt gemäss unseren Berechnungen 0.7 PJ Primärenergieinhalt resp. knapp 0.6 PJ potenzieller Biomethanertrag. Aufgrund der technologischen Entwicklungen [1] und der gesetzlichen Rahmenbedingungen (VVEA) [33] ist anzunehmen, dass dieses Potenzial in den nächsten 10 bis 20 Jahren weitgehend genutzt sein wird. Das Thema Energie aus Industrie und Gewerbe ist auch auf EU-Ebene sehr präsent [23, 26]. Die erwartete Erhöhung der Gesamtabfallmenge, bedingt durch Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum [2], wird aufgrund von Prozessoptimierungen voraussichtlich weitgehend kompensiert. Entsprechend ist auch künftig mit einer vergleichbaren Menge an organischen Abfällen aus Gewerbe und Industrie zu rechnen wie heute. Trotz des vergleichbar kleinen nachhaltigen Potenzials sollte man die Industrie- und Gewerbeabfälle nicht vernachlässigen. Schliesslich fallen Industrieabfälle meistens relativ homogen an und können oft direkt vor Ort zu tragbaren Kosten genutzt werden. So deckt etwa eine der grössten Bäckereien der Schweiz mit 30% ihrer Abfälle den gesamten Heizverbrauch ihrer Gebäude.

Literatur

- [1] BAFU, 2014: Entwicklung der weltweiten Umweltauswirkungen der Schweiz, 4 S.
- [2] BAFU, 2014: Gesamtmenge der Siedlungsabfälle und Recyclingquote 2014,
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/02/06/ind17.indicator.1300209.13002.html>.
- [3] BAFU, 2016: Abfall - Kleider und Schuhe.
- [4] BAFU, 2016: Biogene Abfälle aus Industrie und Gewerbe.
- [5] BAFU, 2016: Kompostier- und Vergärungsanlagen, Erhebung in der Schweiz und in Liechtenstein.
- [6] Baier, U.; Baum, S., 2006: Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006, Massen- und Energieflüsse, 114 S.
- [7] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. 2016: Biogasausbeuten verschiedener Substrate.
- [8] Beretta, C.; Stoessel, F.; Baier, U.; Hellweg, S., 2013: Quantifying food losses and the potential for reduction in Switzerland, Waste Management, (33): 764-773.
- [9] Betz, A.; Buchli, J.; Göbel, C.; Müller, C., 2015: Food waste in the Swiss food service industry - Magnitude and potential for reduction, Waste Management, (35): 218-226.
- [10] BFE, 2015: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014 S.
- [11] BFE, 2015: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2014,
http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/?dossier_id=00772&lang=de.
- [12] BFS, 2008: NOGA 2008 Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige, 252 S.
- [13] BFS, 2012: STATENT - Statistik der Unternehmensstruktur.
- [14] BFS, 2012: Taschenstatistik der Schweiz.
- [15] BFS, 2013: Abfallverwertung (Recycling) Haushalte und Gewerbe,
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/02/22/lexi.html>.
- [16] BFS, 2013: Tabelle Ständige und Nichtständige Wohnbevölkerung nach institutionellen Gliederungen, Geschlecht, Nationalität und Alter. 1991-2013,
http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/01/02/blank/key/raeumliche_verteilung/kanton_gemeinden.html.
- [17] Bienert, C.; Walz, M.; Hentschke, C., 2015: Co-Vergärung von Papierschlämmen in Mechanisch-Biologischen Anlagen, Phase 1 (Co-Vergärung Papierschlämme).
- [18] Blazquez, F., 2013: A Tobacco Biorefinery?.
- [19] Cerbe, G., 2008: Grundlagen der Gastechnik, Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung, 653 S.
- [20] Chevalley, I., 2014: Nahrungsmittelverluste im Detailhandel und in der Gastronomie in der Schweiz.
- [21] Der Schweizerische Bundesrat, 2015: Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA), 4.12.2015 (Stand 1.2016).
- [22] Energy research Centre of the Netherlands. 2016: Phyllis2, database for biomass and waste. Online:
<https://www.ecn.nl/phillys2/Browse/Standard/ECN-Phyllis>.
- [23] Girotto, F.; Alibardi, L.; Cossu, R., 2015: Food waste generation and industrial uses: A review, Waste Management. 45: 32-41.
- [24] Groupement National de la Restauration; ADEME, 2011: Etude estimative de la production de bio-déchets au sein des établissements de la restauration.

- [25] Kienast, F.; Huber, N.; Hergert, R.; Bolliger, J.; Segura Moran, L.; Hersperger, A.M., 2017: Conflicts between decentralized renewable electricity production and landscape services - A spatially-explicit quantitative assessment for Switzerland, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 67: 397-407.
- [26] Mahro, B.; Timm, M., 2007: Potential of Biowaste from the Food Industry as a Biomass resource, *Eng. Life Sci.* 7(5): 457-468.
- [27] Mosberger, L.; Gröbly, D.; Buchli, J.; Müller, C.; Baier, U., 2016: Organische Verluste aus der Lebensmittelindustrie in der Schweiz - Massenflussanalyse nach Branchen – Ursachen / Verwertung.
- [28] NEOSYS AG, 2009: Optimale Nutzung der Energie aus Abfällen, Side Document zur Energiestrategie.
- [29] Refai, S.; Wassmann, K.; van Helmont, S.; Berger, S.; Deppenmeier, U., 2014: Increase of methane formation by ethanol addition during continuous fermentation of biogas sludge., *J Ind Microbiol Biotechnol.* 41(12): 1763-72.
- [30] Steubing, B.; Zah, R.; Waeger, P.; Ludwig, C., 2010: Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14(8): 2256-2265.
- [31] Swiss Cigarette, 2015: Factsheet zu den Mitgliedern von Swiss Cigarette und zum Schweizer Zigarettenmarkt.
- [32] VSD, 2015: Verband der Schweizer Druckindustrie, Fakt und Zahlen.
- [33] Yuan, X.; Cao, Y.; Li, J.; Wen, B.; Zhu, W.; Wang, X.; Cui, Z., 2012: Effect of pretreatment by a microbial consortium on methane production of waste paper and cardboard, *Bioresource Technologie*, (118): 281-288.

Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene
Theoretisches Potenzial Detailhandel und Gastronomie

Kanton	Detailhandel Vollzeit-äquivalent	Tonnen Frisch- substanz	Tonnen Trocken- substanz	Primär- energie (PJ)	Methan (PJ)	Gastronomie/ Vollzeitäquivalent	Tonnen Frisch- substanz	Tonnen Trocken- substanz	Tonnen organische Trocken- substanz	Primär- energie (PJ)	Methan (PJ)
AARGAU	3699	6806	2723	1361	0.019	0.018	6671	6964	1452	1281	0.028
APPENZELL A.R.	226	417	167	83	0.001	0.001	687	717	149	132	0.003
APPENZELL I.R.	79	145	58	29	0	0	509	531	111	98	0.002
BASELLAND	1659	3054	1221	611	0.009	0.008	2425	2531	528	466	0.01
BASEL-STADT	1313	2416	966	483	0.007	0.006	6059	6325	1319	1164	0.025
BERN	6470	11907	4763	2381	0.033	0.032	20291	21183	4417	3897	0.084
FREIBURG	1740	3203	1281	641	0.009	0.008	3987	4162	868	766	0.017
GENF	2899	5335	2134	1067	0.015	0.014	13051	13625	2841	2506	0.054
GLARUS	262	483	193	97	0.001	0.001	595	621	129	114	0.002
GRAUBÜNDEN	1563	2875	1150	575	0.008	0.008	13931	14544	3032	2675	0.058
JURA	439	807	323	161	0.002	0.002	933	974	203	179	0.004
LUZERN	2262	4162	1665	832	0.012	0.011	6933	7238	1509	1331	0.029
NIEUENBURG	1156	2127	851	425	0.006	0.006	2160	2255	470	415	0.009
NIDWALDEN	317	584	233	117	0.002	0.002	875	914	191	168	0.004
OBWALDEN	183	336	134	67	0.001	0.001	1294	1351	282	248	0.005
SCHAFFHAUSEN	433	797	319	159	0.002	0.002	1106	1154	241	212	0.005
SCHWEIZ	977	1799	719	360	0.005	0.005	3005	3137	654	577	0.013
SOLOTHURN	1500	2761	1104	552	0.008	0.007	3294	3438	717	633	0.014
ST. GALLEN	3109	5722	2289	1144	0.016	0.015	7715	8055	1679	1482	0.032
TESSIN	2356	4336	1734	867	0.012	0.011	7148	7463	1556	1373	0.03
THURGAU	1739	3201	1280	640	0.009	0.008	2732	2852	595	525	0.011
URI	212	390	156	78	0.001	0.001	771	805	168	148	0.003
WAADT	4659	8575	3430	1715	0.024	0.023	13819	14427	3008	2654	0.057
WALLIS	2558	4707	1883	941	0.013	0.012	11201	11693	2438	2151	0.047
ZUG	746	1374	549	275	0.004	0.004	2152	2246	468	413	0.009
ZÜRICH	10169	18713	7485	3743	0.052	0.05	30128	31453	6558	5786	0.125
CH TOTAL	52726	97030	38812	19406	0.272	0.257	163469	170659	35582	31393	0.68

Theoretisches Potenzial Lebensmittelindustrie und Total aus Industrie und Gewerbe

Kanton	Lebensmittel-industrie Vollzeitäquivalent	Tonnen Trocken-substanz	Tonnen organische Trocken- substanz	Primär- energie (PJ)	Methan (PJ)	Total Industrie und Gewerbe Vollzeitäquivalent	Tonnen Frisch- substanz	Tonnen Trocken- substanz	Tonnen org. Trocken- substanz	Primär- energie (PJ)	Methan (PJ)
AARGAU	6328	51108	36562	0.552	0.437	19060	198231	104256	39571	1.40	0.480
APPENZELL A.R.	138	1112	795	0.012	0.01	1105	5518	2858	1013	0.04	0.013
APPENZELL I.R.	410	3315	2371	0.036	0.028	1036	9947	4372	2498	0.05	0.030
BASELLAND	2271	18344	13123	0.198	0.157	7301	74025	38828	14435	0.52	0.175
BASEL-STADT	2033	16420	11746	0.177	0.14	9770	59519	27478	13397	0.35	0.167
BERN	10259	82860	59276	0.895	0.709	38948	289868	134555	65878	1.70	0.811
FREIBURG	4435	35819	25624	0.387	0.306	10720	111872	51453	27037	0.63	0.328
GENF	1695	13692	9795	0.148	0.117	18235	69951	33718	13379	0.46	0.176
GLARUS	618	4993	3572	0.054	0.043	1591	16179	7199	3846	0.09	0.046
GRAUBÜNDEN	1783	14397	10299	0.156	0.123	17740	63370	24858	13920	0.31	0.180
JURA	217	1751	1253	0.019	0.015	2070	9390	5189	1929	0.07	0.021
LUZERN	5367	43346	31009	0.468	0.371	16269	148681	68672	34133	0.86	0.410
NEUENBURG	743	6000	4292	0.065	0.051	5390	26536	13763	6123	0.18	0.068
NIDWALDEN	217	1754	1255	0.019	0.015	1577	9615	4972	1620	0.07	0.020
OBWALDEN	628	5076	3631	0.055	0.043	2233	17607	8416	3948	0.11	0.049
SCHAFFHAUSEN	939	7581	5423	0.082	0.065	2568	23523	10491	5797	0.13	0.071
SCHWEIZ	1257	10154	7264	0.11	0.087	5414	35214	15758	8226	0.19	0.102
SOLOTHURN	1921	15516	11100	0.168	0.133	7264	58960	29279	12380	0.38	0.152
ST. GALLEN	6322	51059	36526	0.552	0.437	18428	174502	84910	39165	1.09	0.478
TESSIN	1996	16123	11534	0.174	0.138	11964	63701	29818	13837	0.38	0.174
THURGAU	3119	25195	18024	0.272	0.215	8086	82204	38853	19206	0.48	0.233
URI	149	1206	863	0.013	0.01	1200	6008	3152	1089	0.04	0.014
WAADT	6126	49482	35398	0.535	0.423	25731	173948	80206	39954	1.00	0.494
WALLIS	2035	16440	11761	0.178	0.141	16312	71671	33517	14861	0.44	0.191
ZUG	1023	8259	5909	0.089	0.071	4391	34280	16051	6909	0.21	0.083
ZÜRICH	9688	78252	55980	0.845	0.669	53637	340102	177454	65556	2.43	0.822
CH TOTAL	71718	579255	414387	6.257	4.953	308039	2125232	1029077	469707	13.63	5.788

Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz
Biomassepotenzial zur energetischen Nutzung aus Industrie und Gewerbe in der Schweiz

Biogene Abfälle aus Industrie und Gewerbe	Menge Frischsubstanz (Tonnen)	Menge Trockensubstanz (Tonnen TS)	Menge org. Trockensubstanz (Tonnen oTS)	Primärenergieinhalt (PJ)	Potenzieller Biomethanertrag (PJ)
Theoretisches Potenzial	2'146'200	1'027'000	834'500	13.6	5.8
Nachhaltiges Potenzial	670'800	238'200	168'800	2.8	2.2
Bereits genutztes Potenzial	512'400	181'000	126'500	2.0	1.6
Zusätzlich nutzbares Potenzial	158'500	57'200	42'200	0.7	0.6

Klärschlamm aus zentralen Abwasserreinigungsanlagen



Bild: Vanessa Burg, WSL

Vanessa Burg

2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	280
1 Einleitung.....	281
1.1 Zielsetzung und Überblick.....	281
1.2 Aktuelle Situation Schweiz.....	282
2 Methoden.....	285
2.1 Datengrundlage und Kenngrößen.....	285
2.2 Theoretisches Potenzial	287
2.3 Nachhaltiges Potenzial.....	287
2.4 Bereits genutztes Potenzial.....	288
2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial.....	289
3 Resultate	290
3.1 Theoretisches Potenzial	290
3.2 Gesamtschau der Potenziale.....	292
4 Diskussion und Folgerungen	295
Literatur	296
Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene	298
Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz.....	299

Abkürzungen

ARA	Abwasserreinigungsanlage	NI	Normliter
BAFU	Bundesamt für Umwelt	oTS	Organische Trockensubstanz
BioSweet	Biomass for Swiss Energy Future	PJ	Peta (10^{15}) Joule
BFE	Bundesamt für Energie	SCCER	Swiss Competence Center for Energy Research
BFS	Bundesamt für Statistik	SVA	Schlammverbrennungsanlage
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf	TJ	Tera (10^{12}) Joule
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	TS	Trockensubstanz
DÜV	Dünger-Verordnung	TSS	Total suspendierte Stoffe
Eawag	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasser-reinigung und Gewässerschutz	VSA	Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
EW	Einwohnerwert	VSS	Flüchtige suspendierte Stoffe
FS	Frischsubstanz	VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen
Hu	Unterer Heizwert		
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage		

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung und Überblick

Unter *Klärschlamm* wird allgemein der Schlamm verstanden, der bei der Behandlung von Abwasser in einer ARA anfällt. Als *Frischschlamm* bezeichnet man unbehandelten Klärschlamm. Anschliessend können organische Stoffe, die sich schnell zersetzen, unter kontrollierten Bedingungen abgebaut werden. Die anaerobe Faulung ist ein bewährtes und häufiges Verfahren zur Stabilisierung von Frischschlamm. Dabei wird der Frischschlamm in *Faulschlamm* umgewandelt. Das Verfahren hat den Vorteil, dass mit dem dabei entstehenden Biogas ein wertvoller Energieträger verfügbar wird.

Um eine mit den anderen Biomasseressourcen vergleichbarere Basis zu schaffen, werden sowohl die anfallende Menge (Frischsubstanz, Trockensubstanz, organische Trockensubstanz) als auch der Energieinhalt (Primärenergieinhalt, potenzieller Biomethanertrag) und die räumliche Verteilung des Frischschlamms abgeschätzt. Untersucht wird das Potenzial, das in der Ressource steckt. Nicht Teil dieser Arbeit ist die Möglichkeit einer effizienteren Energieausbeute durch verbesserte Technologie oder optimierte Prozesse. Die Potenzialebenen in diesem Teilbericht sind wie folgt definiert und quantifiziert:

Theoretisches Potenzial

Gesamter Frischschlamm, der aktuell in den zentralen ARA der Schweiz in einem Jahr anfällt («Jährliches Aufkommen»). → Kapitel 2.2

Nachhaltiges Potenzial

Gesamter Frischschlamm aus den zentralen ARA der Schweiz, der für eine energetische Nutzung mobilisierbar wäre/ist. Da in der Schweiz sämtlicher Klärschlamm in geeigneten Anlagen thermisch behandelt respektive verbrannt werden muss (VVEA, Art. 10), gilt heute auf Ressourcenebene:

Theoretisches Potenzial = Nachhaltiges Potenzial → Kapitel 2.3

Bereits genutztes Potenzial

Es wurden zwei «bereits genutzte Potenziale» unterschieden (→ Kapitel 2.4):

- (i) Die energetische Nutzung *durch Verbrennung*, wobei aufgrund der gesetzlich verordneten Verbrennungspflicht wiederum gilt: Theoretisches Potenzial = bereits genutztes Potenzial durch Verbrennung
- (ii) Die energetische Nutzung *durch Vergärung* im Sinne einer energetischen Kaskadennutzung vor der thermischen Behandlung in einer geeigneten Anlage.

Zusätzlich nutzbares Potenzial

Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial. Auf Ressourcenebene stellt einzige die energetische Nutzung durch Vergärung ein zusätzlich nutzbares Potenzial dar. → Kapitel 2.5

1.2 Aktuelle Situation Schweiz

Die Abwasserreinigung in der Schweiz befindet sich auf hohem Niveau. Heute ist mehr als 97% der Bevölkerung an einer zentralen ARA angeschlossen [1]. Etwa bei zwei Prozent der Schweizer Wohnbevölkerung, die in abgelegenen oder schwach besiedelten Gebieten wohnt, ist das Abwasser gemäss Gewässerschutzgesetz mit anderen Systemen zu behandeln [13].

Auch Abwässer aus Industrie und Gewerbe werden entweder direkt über eigene ARA oder indirekt über zentrale ARA in die Gewässer geleitet. Dieser Teilbericht berücksichtigt lediglich den von zentralen ARA stammenden Klärschlamm. Das Potenzial von Schlämmen aus dezentralen Anlagen, die besonders belastete Industrie-Abwässer behandeln, wird im Kapitel «biogene Abfälle aus Industrie und Gewerbe» dargestellt.

2010 wurden im Mittel schweizweit 10.5 Millionen Einwohnerwerte (EW) mit einer Spitzenbelastung von insgesamt etwa 12.5 Millionen EW gereinigt [22]. Der Einwohnerwert gibt an, wieviel Schmutzstoffe und Abwasser ein «typischer Einwohner» zur ARA ableitet. Mithilfe des Einwohnerwerts lässt sich auch der Schmutzstoffanteil aus Industrie und Gewerbe berücksichtigen. Gemäss BAFU wurde das Abwasser 2012 in 849 zentralen ARA gereinigt [2]. Dabei sind über 60% dieser Kläranlagen für weniger als 10'000 EW ausgelegt und reinigen knapp 8% der schweizweit anfallenden Abwassermenge. Hingegen behandeln die 79 Kläranlagen, die für mehr als 50'000 EW ausgelegt sind, über 60% des anfallenden Abwassers [2]. Aus den Zahlenreihen der letzten Jahre [2, 18, 22] kann ein Trend zu weniger, jedoch grösseren Kläranlagen beobachtet werden. Entsprechend sinkt vor allem die Anzahl der kleineren Kläranlagen, während die Zahl der Anlagen mit über 10'000 EW durch ARA-Zusammenlegungen und Bevölkerungswachstum zunimmt. Aus demografischen und technischen Gründen ist zu erwarten, dass sich der Trend auch in Zukunft fortsetzen wird. In Abbildung 1 sind die ARA aufgrund ihrer dimensionierten Einwohnerwerte in fünf Grössenklassen eingeteilt. [2].

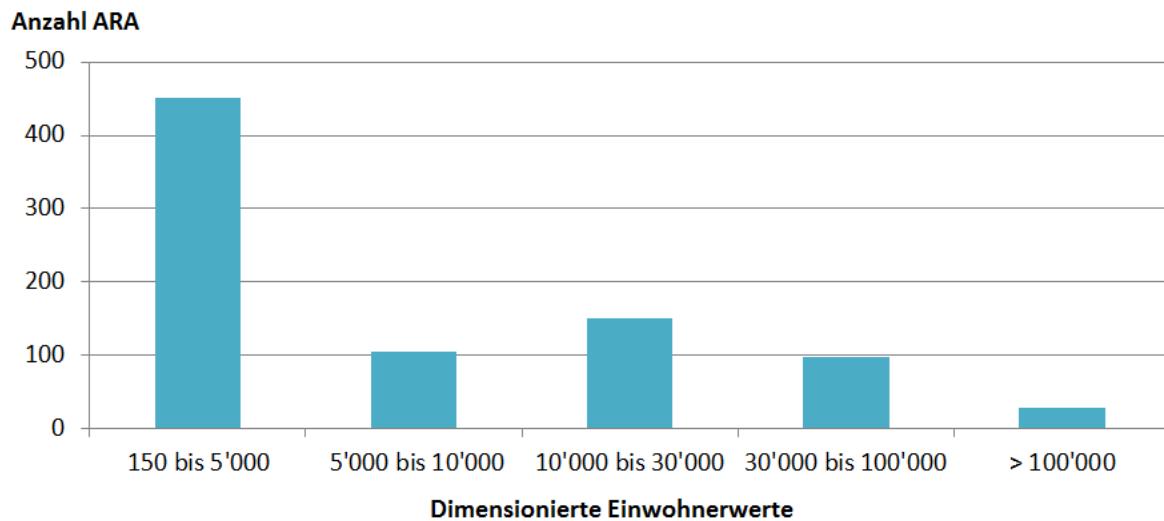


Abbildung 1: Anzahl CH-Abwasserreinigungsanlagen (ARA) in Abhängigkeit der dimensionierten Kapazität, 2012 [2].

Die Schmutzstofffracht des Abwassers ist täglichen, wöchentlichen und jährlichen Schwankungen unterworfen, wobei die Extreme in grösseren Einzugsgebieten gedämpft werden [16]. Die Klärschlamm-Produktion hingegen wird durch die verschiedenen Reinigungsstufen der ARA ausgeglichen. In einer typischen schweizerischen Kläranlage verbleibt der Schlamm etwa 10 bis 15 Tage in der biologischen Reinigung und 20 Tage in der Stabilisierung [16]. Somit ist die Ganglinie der anfallenden Klärschlammmenge relativ konstant.

Durch die Behandlung des Abwassers fällt in den ARA **Frischschlamm** an. Dieser Schlamm muss in geeigneter Form in die Umwelt zurückgelangen. Durch Faulung des Frischschlamms können organische Stoffe, die sich schnell zersetzen und daher Geruchsprobleme verursachen, unter kontrollierten Bedingungen abgebaut

werden. Man spricht dann von **Faulschlamm**. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass mit dem anfallenden Biogas ein wertvoller Energieträger verfügbar wird. Nach weiteren Behandlungsschritten entstehen entwässerter und getrockneter Klärschlamm.

Klärschlamm enthält Pflanzennährstoffe wie Phosphor und Stickstoff, jedoch auch Schwermetalle und potenzielle Krankheitserreger. Zudem können sich im Klärschlamm schwer abbaubare organische Verbindungen anreicher – zum Beispiel von Reinigungsmitteln, Körperpflegeprodukten oder Arzneimitteln. Demzufolge darf Klärschlamm in der Schweiz seit 2006 nicht mehr als Dünger in die Landwirtschaft ausgebracht werden [14] (Technische Verordnung über Abfälle TVA, Artikel 11). Seitdem muss sämtlicher Klärschlamm in geeigneten Anlagen verbrannt werden – entweder in Zementwerken, in spezialisierten Schlammverbrennungsanlagen (SVA, auch Monoverbrennung genannt) oder zusammen mit anderen Abfällen in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA). Für Verbrennungsanlagen ist der Wassergehalt des Schlamms massgebend. In *Abbildung 2* sind Energiebedarf und -Überschuss bei der Trocknung und Verbrennung von Klärschlamm in Abhängigkeit der organischen Substanz (VSS) dargestellt.

Brennwert [MJ/kg]

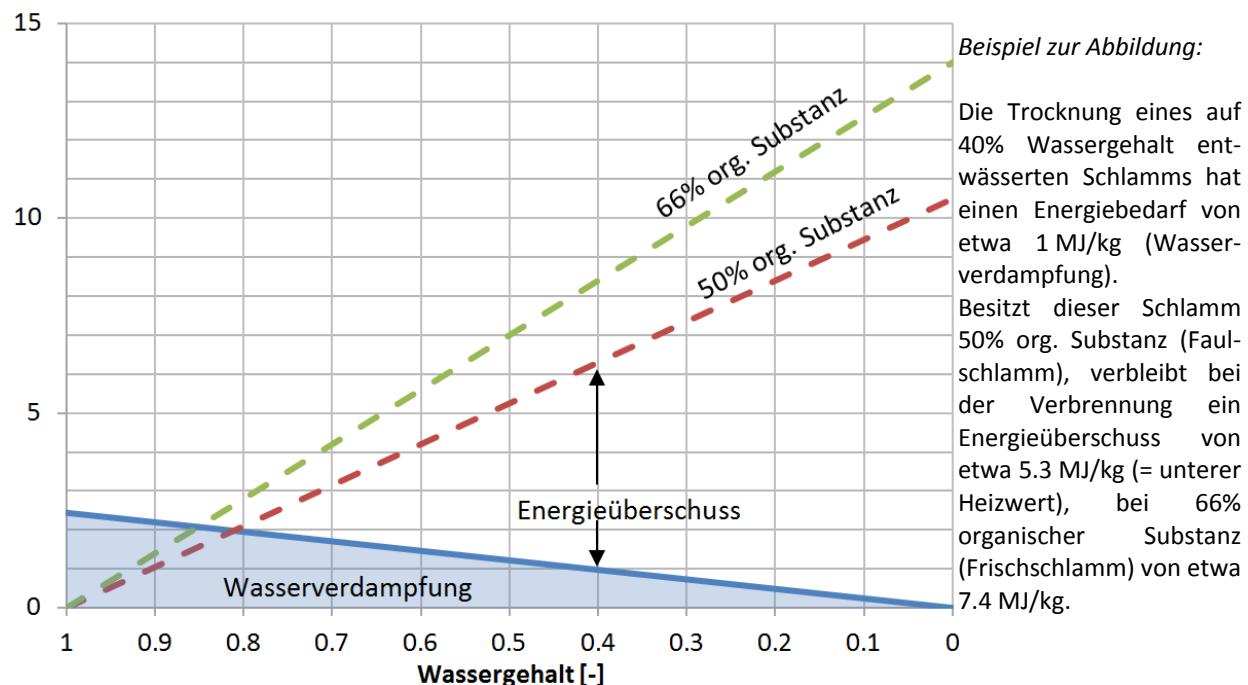


Abbildung 2: Energiebedarf und -Überschuss bei der Trocknung und Verbrennung von Klärschlamm.

Zementwerke können geeignete Abfälle mit hohen Energieinhalten als Brennstoffe verwenden. Damit Klärschlamm in den Zementwerken als alternativer Brennstoff genutzt werden kann, muss er auf einen Trockengehalt von etwa 90% getrocknet werden. 2012 wurden gemäss CemSuisse [10] rund 52'400 Tonnen TS Klärschlamm in Zementwerken entsorgt. Den Geschäftsberichten der Schweizer KVA und SVA konnte entnommen werden, dass 2012 etwa 192'000 Tonnen (resp. 53'000 Tonnen TS) Klärschlamm in 17 KVA verbrannt wurden und 83'000 Tonnen TS in 11 SVA. Dabei wies der Klärschlamm sowohl in den KVA als auch in den SVA einen Trockensubstanzgehalt von etwa 25 bis 30% auf. Die übrigen 6000 Tonnen TS wurden ins Ausland exportiert. In *Abbildung 3* sind die prozentualen Anteile der verschiedenen Entsorgungswege im Jahr 2012 zusammengefasst, sowie die räumliche Verteilung der SVA, KVA und Zementwerke, die in der Schweiz Klärschlamm verbrennen, dargestellt.

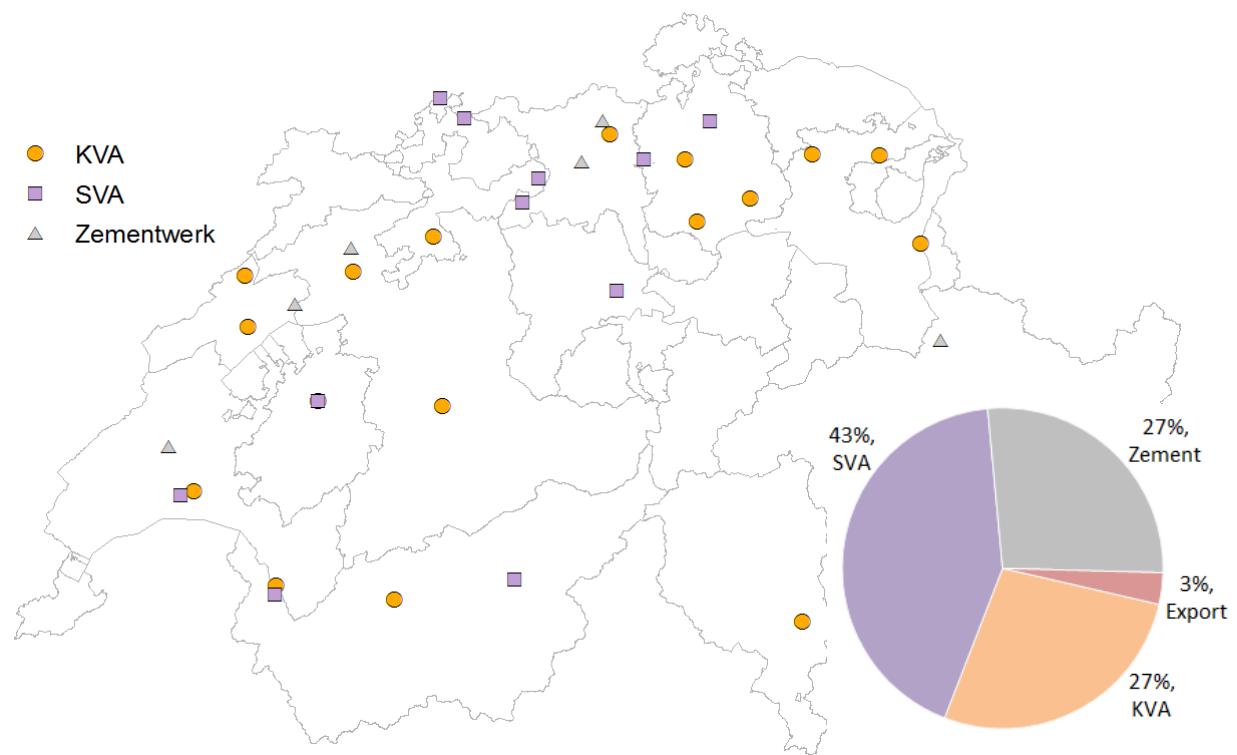


Abbildung 3: Klärschlammensorgung in der Schweiz, prozentuale Verteilung auf die einzelnen Entsorgungswege (bezogen auf die Trockensubstanz) und Standort der Anlagen (2012).

Durch das Klärschlamm-Düngerverbot werden die Nährstoffe dem Kreislauf entzogen [12]. Am 1. Januar 2016 ist die Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) in Kraft getreten, welche die bisherige Technische Verordnung über Abfälle (TVA) aus dem Jahr 1990 ersetzt. Hauptziel der Verordnungsrevision ist die Schonung der natürlichen Ressourcen und die Abfallwirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln. So hat die Schweiz als weltweit erstes Land eine verbindliche Regelung zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem Klärschlamm eingeführt (VVEA, Artikel 15). Zurzeit existieren noch keine grossen Rückgewinnungsanlagen. Bis es so weit ist, kann die Verbrennungsasche des Klärschlamms zwischengelagert werden, so dass die spätere Rückgewinnung des Phosphors möglich ist. Dies bedingt allerdings, dass der Klärschlamm nicht mit anderen Abfällen zusammen verbrannt, sondern separat in einer SVA thermisch behandelt wird. Es gilt eine Übergangsfrist von zehn Jahren (Artikel 51), die Mitverbrennung von Klärschlamm in einer KVA oder einem Zementwerk, ohne dass der Phosphor vorab zurückgewonnen wurde, ist ab 1. Januar 2026 somit nicht mehr zulässig. Die konkreten Auswirkungen der neuen VVEA auf die heutigen Verfahren und Verwertungs- respektive Entsorgungswege lassen sich noch nicht im Detail vorhersagen, sie werden sich in den nächsten Jahren zeigen.

2 Methoden

2.1 Datengrundlage und Kenngrößen

Der **Einwohnerwert** (EW) gibt an, wieviel Schmutzstoffe und Abwasser ein «typischer Einwohner» zur ARA ableitet. Die Schweizerische Gewässerschutzverordnung [13] definiert einen Einwohnerwert mit 60 g BSB₅/d im Rohabwasser. Der **biochemische Sauerstoffbedarf** (BSB₅) ist eine ältere Analyse, bei der die organischen Stoffe mithilfe von Mikroorganismen aerob abgebaut werden. Der dabei entstehende Sauerstoffverbrauch wird als Mass für die Konzentration der biologisch abbaubaren organischen Stoffe interpretiert. Analog zum Rohabwasser lassen sich auch in der Schlammbehandlung Parameter für einen «typischen Einwohner» ermitteln. In *Tabelle 1* sind typische Einwohnerwerte zusammengestellt, die für die Dimensionierung von biologischen ARA in der Schweiz verwendet werden [16]. Diese typischen Werte liefern eine gute und solide Annäherung für die heutige Situation in der Schweiz. Von Fall zu Fall ist aber durchaus eine grössere Schwankungsbreite - sowohl beim Schlammanfall als auch bei den Charakteristiken - von etwa ±25% möglich [9]. Der **chemische Sauerstoffbedarf** (CSB) ist ein Summenparameter, der ausdrückt, wieviel Sauerstoff zur vollständigen Oxidation von organischen Stoffen zu CO₂ und Wasser erforderlich ist. Die Analysemethode zur Bestimmung des CSB beruht auf der Oxidation der organischen Stoffe durch das starke Oxidationsmittel Kaliumdichromat. Der CSB ist eine häufig gebrauchte Grösse, um die Konzentration der organischen Stoffe im Abwasser, unabhängig von deren Zusammensetzung und biologischen Abbaubarkeit, zu bestimmen. Als **total suspendierte Stoffe** (TSS) wird das Trockengewicht der Summe aller Stoffe bezeichnet, die auf einem Membranfilter mit definierter Porengröße zurückgehalten werden. Das Resultat wird als Trockensubstanz (TS) in kg m⁻³ angegeben. Als **flüchtige suspendierte Stoffe** (VSS) oder Glühverlust wird ein Summenparameter bezeichnet, der angenähert die Masse aller organischen Trockensubstanz (oTS) erfasst.

Tabelle 1: Typische Parameter in der Schweizer Abwasserbehandlung bezogen auf einen Einwohnerwert [16].

	BSB5 (g/EW·d)	CSB (g/EW·d)	TSS (g/EW·d)	VSS (g/EW·d)
Rohabwasser	60	120	70	-
Frischschlamm	-	-	90	60
Faulschlamm (stabilisiert)	-	-	60	30

Der Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) und die Fachorganisation Kommunale Infrastruktur (OKI) haben 2010 gemeinsam eine umfassende Datenerhebung durchgeführt [22]. Dabei wurde unter anderem der chemische Sauerstoffbedarf bei allen Schweizer Kläranlagen angefragt (Mittelwert aller CSB-Tagesfrachten eines Jahres im Rohabwasser in kg/d). Eingegangen sind die Daten von 657 ARA (resp. 78% aller Schweizer ARA) und umgerechnet von 9.2 Millionen EW (resp. 88% der Schweizer Abwasserfracht). Auch die Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag) hat im Rahmen des Micropoll-Projekts «Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung» 2005 eine Datenerhebung bei den Schweizer Kläranlagen durchgeführt [18]. Der mittlere Einwohnerwert konnte bei 415 ARA erhoben werden (knapp 50%). Mithilfe des Einwohnerwerts lässt sich auch der Schmutzstoffanteil aus Industrie und Gewerbe berücksichtigen. Zusätzlich wurde unter anderem auch die Anzahl natürliche Einwohner, die der Kläranlage angeschlossen sind, angefragt. Diese Information konnten 756 Kläranlagen angeben (das sind ca. 90% aller Schweizer ARA). Beide Studien wurden berücksichtigt, um das theoretische Potenzial beziehungsweise die Menge Frischschlamm, die jährlich in der Schweiz anfällt, abzuschätzen (vgl. Abschnitt 2.2).

Für alle Biomassen werden die Potenziale sowohl in Ressourcenmenge als auch in Energieinhalt angegeben. Bei der Angabe der Mengen sind je nach Ressource unterschiedliche Einheiten üblich. Um die verschiedenen Biomassen miteinander vergleichen zu können, werden die Mengen jeweils in Tonnen Frischsubstanz und Trockensubstanz angegeben. Zur Umrechnung wurden Richtwerte von typischem Schweizer Klärschlamm

entsprechend *Tabelle 2* verwendet [16]. Die total suspendierten Stoffe (TSS) wurden als Mass für die Trockensubstanz (TS) verwendet und der Glühverlust (VSS) als Annäherung für die organische Trockensubstanz (oTS).

Tabelle 2: Typische Charakteristiken von Klärschlamm in der Schweiz [16].

	Trockensubstanz TS (in % der Frischsubstanz)	Organische TS (in % der Trockensubstanz)
Frischschlamm	3-5%	66%
Faulschlamm	5-8%	50%

Nachfolgend wurde der Primärenergiegehalt des Frischschlamms berechnet. Die so berechnete Energiemenge bezieht sich auf den unteren Heizwert (Hu) der Trockensubstanz (TS), also die wasserfreie Ressource. Die Berechnung des Primärenergiegehalts erfolgte rein rechnerisch über die Zuweisung von charakteristischen TS- und Heizwerten. Der Heizwert von Klärschlamm hängt in erster Linie vom Anteil an organischer Substanz in der Trockensubstanz ab [23]. Für 100% organische Substanz wird dabei ein unterer Heizwert von 21 MJ/kg zugrunde gelegt [20]. Frischschlamm mit 66% organischer Substanz hat somit einen unteren Heizwert von etwa 14 MJ/kg. Es ist zu beachten, dass sich der Heizwert des Schlams durch Faulung um etwa 30% verringert. Durch Faulung verringert sich ebenfalls der Wassergehalt.

$$Energieinhalt_{TS} [MJ] = Masse_{TS} [kg] \times \text{Unterer Heizwert} [MJ/kg_{TS}]$$

Tabelle 3: Unterer Heizwert von Klärschlamm (berechnet aufgrund der organischen Trockensubstanz).

	Unterer Heizwert Hu bezogen auf die Trockensubstanz TS (MJ/kg TS)
Frischschlamm	14
Faulschlamm	10.5

Zusätzlich wurde auch der potentielle Biomethanertrag des Frischschlamms durch anaerobe Vergärung (resp. Faulung) in Normliter (NL) ermittelt. Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Methanertrag}_{TS} [NL] \\ = Masse_{TS} [kg] \times \text{Anteil Organisch}_{TS} [-] \times \text{Biogasertrag}_{OTS} [NL/kg_{OTS}] \times \text{Methangehalt} [-] \end{aligned}$$

Zur Abschätzung der Gasausbeute wurden die Richtwerte des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) verwendet (*Tabelle 4*) [17]. Mit einem unteren Heizwert für Methan von 35.883 MJ/m³ [11] lässt sich auch der Energieinhalt des Methanertrags berechnen.

Tabelle 4: Richtwerte für die Gasausbeute aus Frischschlamm [17].

	Biogasertrag (l/kg oTS)	Methangehalt (%)	Methanertrag (l/kg TS)
Frischschlamm	525	60%	210

2.2 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial bezieht sich auf die gesamte anfallende Biomasse ohne Berücksichtigung von nutzungsbedingten Einschränkungen (vgl. Einleitung des Gesamtberichts). Das theoretische Potenzial beinhaltet somit den gesamten Frischschlamm, der aktuell in den zentralen ARA der Schweiz in einem Jahr anfällt («Jährliches Aufkommen»). Nur knapp 3% der Schweizer Wohnbevölkerung, hauptsächlich in abgelegenen oder schwach besiedelten Gebieten, sind heute nicht an eine zentrale ARA angeschlossen [1]. Dieser Anteil wurde nicht in das theoretische Potenzial integriert.

Als Grundlage zur Berechnung des theoretischen Potenzials dienten die Studien des VSA (2010) und der Eawag (2005), die je eine umfassende Datenerhebung bei den zentralen ARA der Schweiz durchgeführt haben [18, 22]. Durch einen Vergleich mit den BAFU-Basisinformationen [2] wurde verifiziert, dass die Nutzung für die Studie noch vertretbar ist.

Als Startpunkt der Berechnungen dienten, falls spezifiziert, die mittleren CSB-Tagesfrachten gemäss aktuellerer VSA-Erhebung. Aus der mittleren CSB-Tagesfracht lässt sich aufgrund von typischen Parametern (*Tabelle 1*) die Anzahl Einwohnerwerte (EW) der einzelnen ARA bestimmen:

$$\text{Anzahl Einwohnerwerte}_{\text{Kläranlage}} [\text{EW}] = \frac{\text{Mittlere CSB Tagesfracht}_{\text{Kläranlage}} [\text{g/d}]}{120 [\text{g/EW} \cdot \text{d}]}$$

Falls keine Informationen über die mittleren CSB-Tagesfrachten vorlagen, wurde direkt die durch die ARA geschätzte Anzahl EW gemäss Eawag-Erhebung [18] zugrunde gelegt. Falls auch diese Angabe fehlte, wurde ersatzweise die Gesamtzahl der angeschlossenen effektiven Einwohner als Annäherung verwendet. Auf diese Weise konnte eine Datenbasis über die Reinigungsleistung von insgesamt 749 zentralen ARA (89% aller Schweizer ARA) geschaffen werden. Umgerechnet entspricht dies etwa 10.5 Millionen EW (99% der Schweizer Abwasserfracht).

Analog lässt sich aus der Anzahl Einwohnerwerte der ARA die Menge anfallender Frischschlamm aufgrund typischer Parameter berechnen (*Tabelle 1*):

$$\text{Masse}_{\text{Frischschlamm}} [\text{gTS/d}] = \text{Anzahl Einwohnerwerte}_{\text{Kläranlage}} [\text{EW}] \times 90 [\text{g/EW} \cdot \text{d}]$$

Die Kenngrößen zur Umrechnung der so berechneten Menge Trockensubstanz in organische Trockensubstanz und in Frischsubstanz sowie zur Berechnung der Energieinhalte sind im Kapitel 2.1 aufgeführt. *Abbildung 4* fasst das allgemeine Vorgehensmodell zur Ermittlung der energetischen Klärschlammopotenziale zusammen.

2.3 Nachhaltiges Potenzial

Die total verfügbare Menge an Biomasse und damit das theoretische Potenzial in der Schweiz wird durch verschiedene Restriktionen verringert. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen erhält man das nachhaltige Potenzial für die energetische Nutzung der Biomasse. Da aber Klärschlamm in der Schweiz nach dem Stand der Technik stofflich und energetisch zu verwerten und in geeigneten Anlagen thermisch zu behandeln ist (VVEA, Art. 10 und 12), wurde angenommen, dass der gesamte anfallende Klärschlamm energetisch verwertbar ist.

Auf Ressourcenebene gilt: *Theoretisches Potenzial = Nachhaltiges Potenzial*.

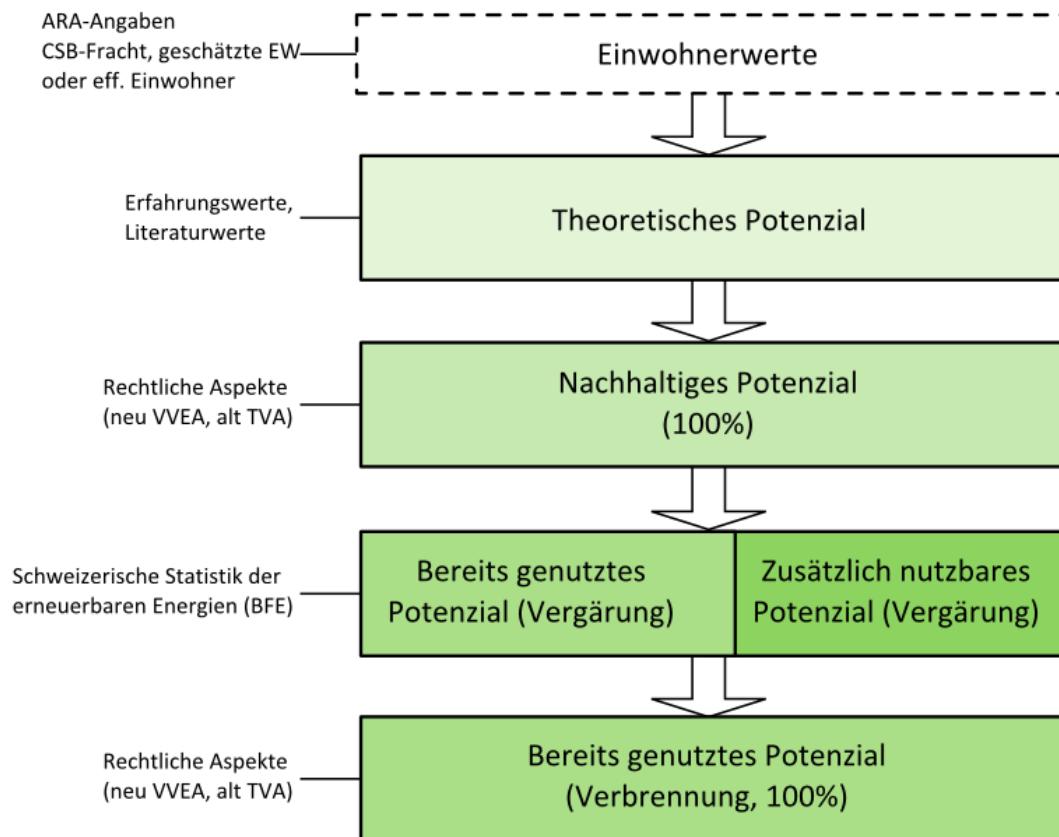


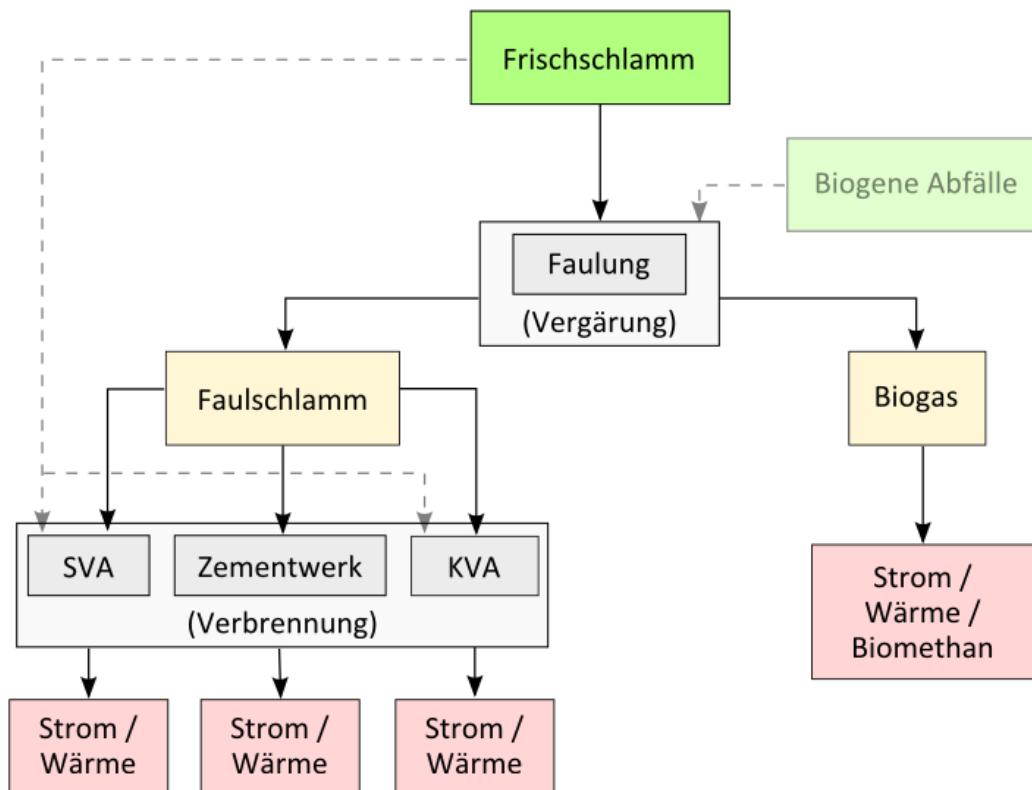
Abbildung 4: Modellansatz zur Ermittlung der energetischen Klärschlammopotenziale.

2.4 Bereits genutztes Potenzial

Vergärung (Faulung)

Abbildung 5 stellt die heutigen Verwertungs- oder Entsorgungswege von Klärschlamm in der Schweiz dar. In einem ersten Schritt wird der Frischschlamm vergärt. Die anaerobe Vergärung hat zur Folge, dass der organische Anteil des Frischschlamms um etwa 50% reduziert wird, wobei Biogas entsteht. Die Vorteile dieser Schlammbehandlung sind vielfältig: Gewichtsreduktion, Geruchsbeseitigung, Verringerung von Krankheitserregern. Zudem kann das anfallende Biogas zur Strom- und Wärmeerzeugung dezentral energetisch genutzt oder nach Aufbereitung auf Erdgasqualität ins Gasnetz eingespeist werden. Durch die leichte Speicherbarkeit und damit die Möglichkeit der bedarfsgerechten Energieerzeugung bietet Biogas eine gute Ergänzung zu den schwankenden erneuerbaren Energieträgern wie Wind oder Sonne.

Im Faulraum der Kläranlage können auch sogenannte Co-Substrate (Fettschlämme, Schlachtabfälle etc.) zusammen mit dem Klärschlamm vergärt werden. Man spricht dann von Co-Vergärung. Dadurch wird die anfallende Biogasmenge erhöht. Die Vergärung ist jedoch nicht obligatorischer Bestandteil der Behandlungskette von Kläranlagen. In der Schweiz gab es 2014 knapp 300 ARA mit Stromproduktion, die insgesamt 2.1 PJ Klärgas produziert haben [7]. Es wird jedoch geschätzt, dass etwa 10% dieser Klärgasmenge aus der Vergärung von Co-Substraten stammt [4]. Das durch Vergärung bereits genutzte Potenzial von Klärschlamm wurde somit um diesen Prozentsatz reduziert. Gemäss erdgas.ch [15] speisten 2013 lediglich 5 Kläranlagen Biogas ins Erdgasnetz ein.



Legende

	Ressourcen		Zwischenprodukt	→	Hauptwege
	Anlagen		Energieformen	→	Sekundäre Wege

Abbildung 5: Schematische Darstellung der aktuellen Verwertung resp. Entsorgung von Klärschlamm in der Schweiz.

Verbrennung

Aufgrund des Schadstoffgehalts darf Klärschlamm in der Schweiz seit 2006 nicht mehr als Dünger in die Landwirtschaft ausgebracht werden [14] (Technische Verordnung über Abfälle TVA, Artikel 11. Seit 01.01.2016 VVEA, Art 10). Zudem ist auch die direkte Deponierung von Klärschlamm verboten. Seitdem muss sämtlicher Klärschlamm in geeigneten Anlagen thermisch behandelt werden. Konkret erfolgt die Verbrennung in der Schweiz heute entweder in spezialisierten Schlammverbrennungsanlagen (SVA), in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) oder in Zementwerken (vgl. Abschnitt 1.2). Dabei wird ebenfalls Strom und/oder Wärme produziert (Abbildung 5), wobei die energetische Verwertung nach dem Stand der Technik zu erfolgen hat (VVEA, Art. 12). Auf Ressourcenebene gilt im Fall der Verbrennung heute in der Schweiz:

Theoretisches Potenzial = Nachhaltiges Potenzial = bereits genutztes Potenzial.

2.5 Zusätzlich nutzbares Potenzial

Das zusätzlich nutzbare Potenzial ergibt sich aus der Differenz zwischen nachhaltigem und bereits genutztem Potenzial. Da schliesslich sämtlicher Klärschlamm thermisch behandelt respektive verbrannt werden muss, stellt die energetische Kaskadennutzung des Frischschlamms durch anaerobe Vergärung vor der Verbrennung auf Ressourcenebene das einzige zusätzlich nutzbare Potenzial dar (vgl. Abbildung 4).

3 Resultate

3.1 Theoretisches Potenzial

Ressourcenmenge

Gemäss Methode wird der anfallende Frischschlamm aufgrund der tatsächlichen Abwasserfrachten der zentralen ARA der Schweiz in Tonnen Trockensubstanz berechnet (*Abbildung 4*). Nachfolgend wurde die so ermittelte Frischschlammmenge aufgrund von Kenngrössen in Frischsubstanz und in organische Trockensubstanz (oTS) umgerechnet. Auf diese Weise wurde eine gesamte Menge Frischschlamm von total 347'300 Tonnen TS pro Jahr ermittelt, was etwa 8.7 Millionen Tonnen Frischsubstanz entspricht. Die Resultate sind in *Tabelle 5* zusammengefasst, *Abbildung 6* gibt einen Überblick über die regionale Verteilung.

Tabelle 5: Total pro Jahr anfallende Menge Frischschlamm aus den zentralen ARA der Schweiz.

Tonnen Trockensubstanz	Tonnen org. Trockensubstanz	Tonnen Frischsubstanz
347'300	231'500	8'681'800

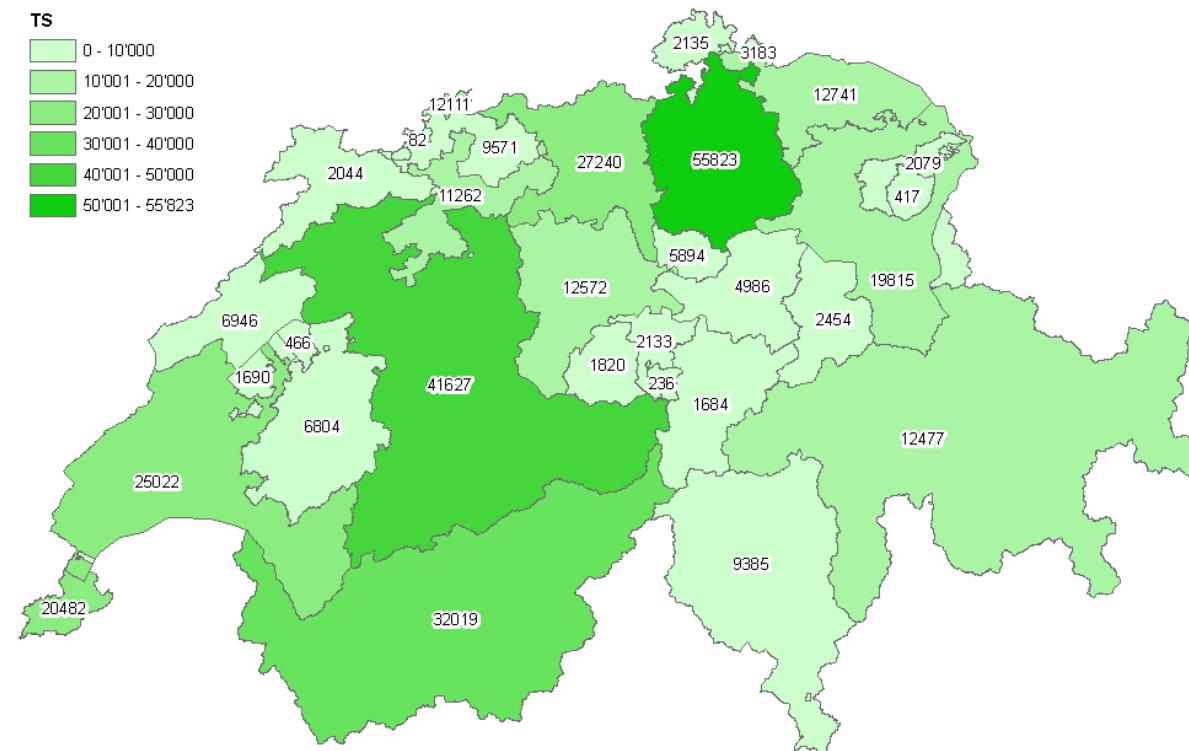


Abbildung 6: Theoretisches Potenzial, Menge Frischschlamm aus den zentralen ARA der Schweiz auf kantonaler Ebene (Tonnen Trockensubstanz pro Jahr).

Energieinhalt

Zusätzlich zur Ressourcenmenge wurde auch die gesamte im Frischschlamm enthaltene Energiemenge – der Primärenergieinhalt – berechnet. Der Primärenergieinhalt bezieht sich auf die Trockensubstanz des Frischschlamms und stellt die maximal verfügbare Energiemenge in der Biomasse dar (vgl. Einleitung des Gesamtberichts). Nutzungsbedingte Energieverluste zum Beispiel für die Entwässerung, die Verarbeitung oder den Transport sind nicht berücksichtigt. Zusätzlich wurde auch der potenzielle Biomethanertrag des anfallenden Frischschlamms durch Vergärung ermittelt, wobei wiederum der Energieinhalt des Methanertrags

aufgrund des unteren Heizwerts berechnet wurde (vgl. Abschnitt 2.1). Die Resultate sind in *Tabelle 6* zusammengefasst. Zudem sind die Menge und der Energieinhalt des anfallenden Frischschlamms im beigefügten Anhang 1 auf kantonale Ebene aufgeschlüsselt.

Tabelle 6: Theoretisches Potenzial, Primärenergieinhalt und potenzieller Biomethanertrag der total pro Jahr anfallenden Frischschlammmenge aus den zentralen ARA der Schweiz (Angaben in Petajoule).

Primärenergieinhalt (PJ)	Pot. Biomethanertrag (PJ)
4.862	2.617

Abbildung 7 zeigt die räumliche Verteilung des berechneten Primärenergieinhalts des jährlich total anfallenden Frischschlamms der Schweizer ARA gemäss unseren Berechnungen. Klar zu erkennen ist ein höheres Aufkommen in der Umgebung von grösseren Städten wie Zürich, Genf und Basel, was mit der Bevölkerungszahl und der Lage von Gewerbe-/Industriebetrieben korreliert. In *Abbildung 8* ist der Primärenergieinhalt auf kantonaler Ebene dargestellt. Der Kanton Zürich weist mit 0.78 PJ das grösste theoretische Potenzial auf, gefolgt von den Kantonen Bern (0.58 PJ) und Wallis (0.45 PJ). Dies ist vor allem auf die demografischen Gegebenheiten und die Kantonsgrösse zurückzuführen.

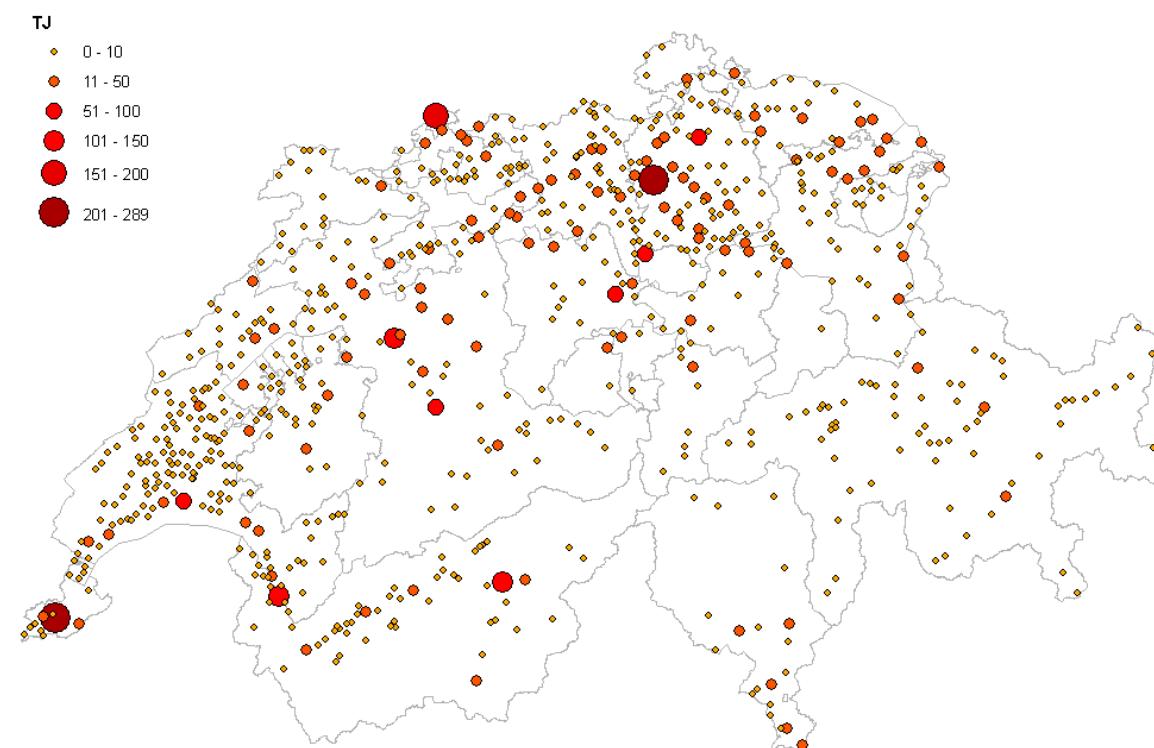


Abbildung 7: Theoretisches Potenzial, Primärenergieinhalt des Frischschlamms aus den zentralen ARA der Schweiz auf Anlageebene (Angaben in Terrajoule [TJ] pro Jahr).

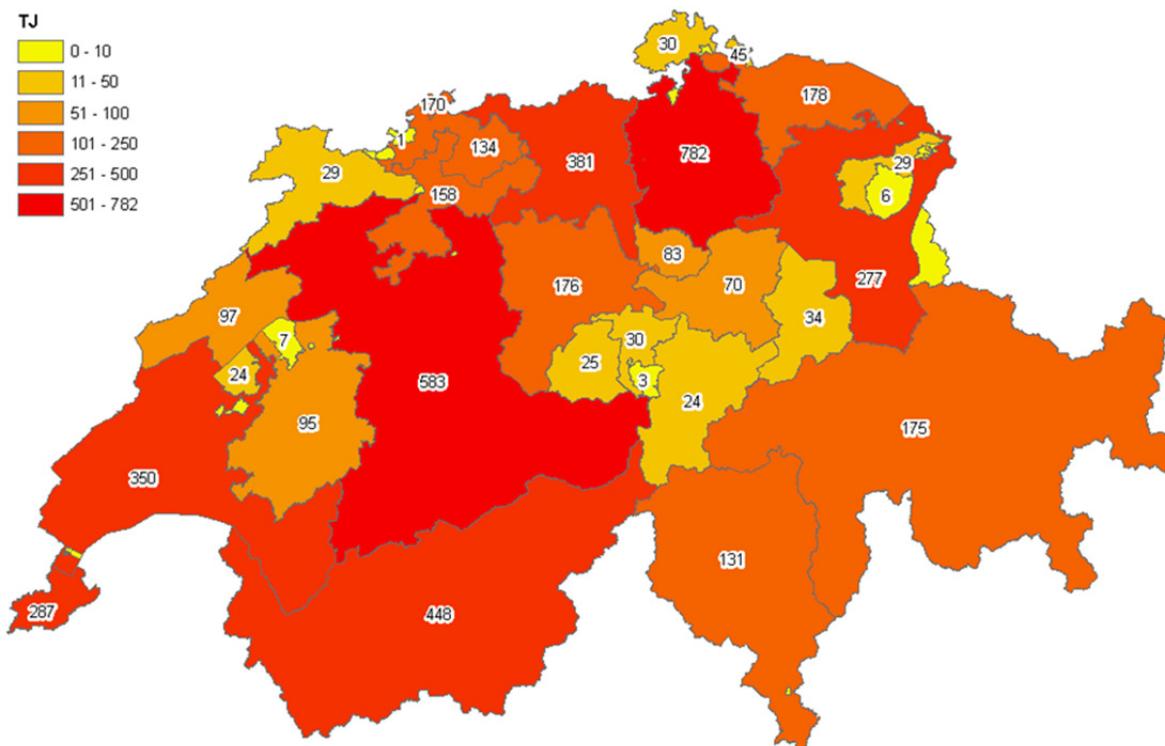


Abbildung 8: Theoretisches Potenzial, Primärenergieinhalt des Frischschlamms aus den zentralen ARA der Schweiz auf Kantonsebene (Terajoule [TJ] pro Jahr).

3.2 Gesamtschau der Potenziale

Die Betrachtung je Potenzialebene ermöglicht Rückschlüsse auf die maximal mögliche Nutzung (theoretisches Potenzial), die aus heutiger Sicht nachhaltige Nutzung (nachhaltiges Potenzial), die heutige Nutzung (bereits genutztes Potenzial) sowie zukünftige Ausbaumöglichkeiten (zusätzlich nutzbares Potenzial). Im vorgängigen Kapitel wurde das theoretische Potenzial (Abschnitt 3.1) der jährlich anfallenden Frischschlammmenge aus den zentralen Schweizer ARA ermittelt. Der gesamte anfallende Klärschlamm kann und muss gemäss Schweizer Gesetz nach dem Stand der Technik energetisch verwertet werden. Auf Ressourcenebene sind theoretisches und nachhaltiges Potenzial von Klärschlamm somit identisch (Abschnitt 2.3). Des Weiteren wird bereits heute sämtlicher Klärschlamm schliesslich thermisch behandelt respektive verbrannt und auf diese Weise energetisch verwertet (Abschnitt 2.4). Somit ist auch das durch Verbrennung bereits genutzte Potenzial gleich gross, das nachhaltige Ressourcenpotenzial also bereits ausgeschöpft. Als einziges zusätzlich nutzbares Potenzial wurde die energetische Verwertung des Frischschlamms durch anaerobe Vergärung in Form einer energetischen Kaskadennutzung vor der Verbrennung ausgewiesen. Abbildung 9 zeigt die Aufteilung des theoretischen Potenzials von Frischschlamm auf die verschiedenen Potenziale. Das durch Vergärung bereits genutzte Potenzial wurde aufgrund der Schweizerischen Statistik der erneuerbaren Energien [5] abgeschätzt (Abschnitt 2.4). Gemäss Berechnungen wurde ein zusätzlich nutzbares Potenzial von 2.5 Millionen Tonnen Frischsubstanz oder etwa 100'900 Tonnen Trockensubstanz Frischschlamm ermittelt (siehe Abbildung 9).

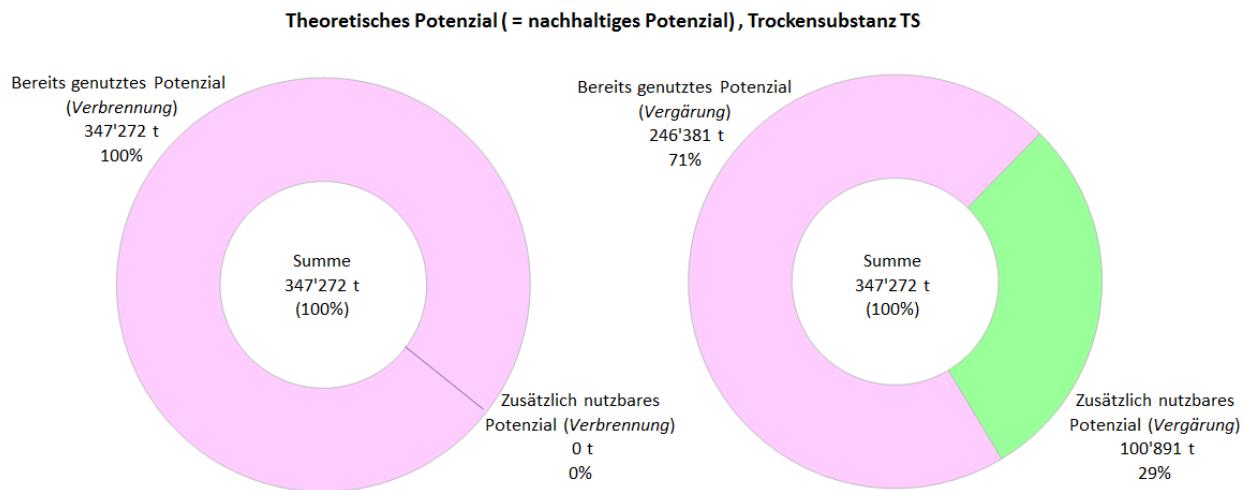


Abbildung 9: Verteilung der ermittelten Potenziale von Frischschlamm in der Schweiz bezogen auf die abschliessende Verbrennung (links) und die vorgeschaltete Vergärung (rechts).

Zusammenfassend zeigt Abbildung 10 die verschiedenen Potenziale der jährlich anfallenden Frischschlammmenge in der Schweiz. Die genauen Zahlen sind dem Anhang 2 zu entnehmen. Dabei wird zwischen Frischmasse, Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz unterschieden. Die Darstellung der Ressourcenmengen in verschiedenen Einheiten ermöglicht die Veranschaulichung grundsätzlicher Charakteristiken (wie beispielsweise des Wassergehalts). Somit ist der Unterschied zwischen Frisch- und Trockensubstanz im Vergleich zu anderen Biomassen, wie z.B. Holz oder Bio-Abfälle, beim Frischschlamm auffällig hoch.

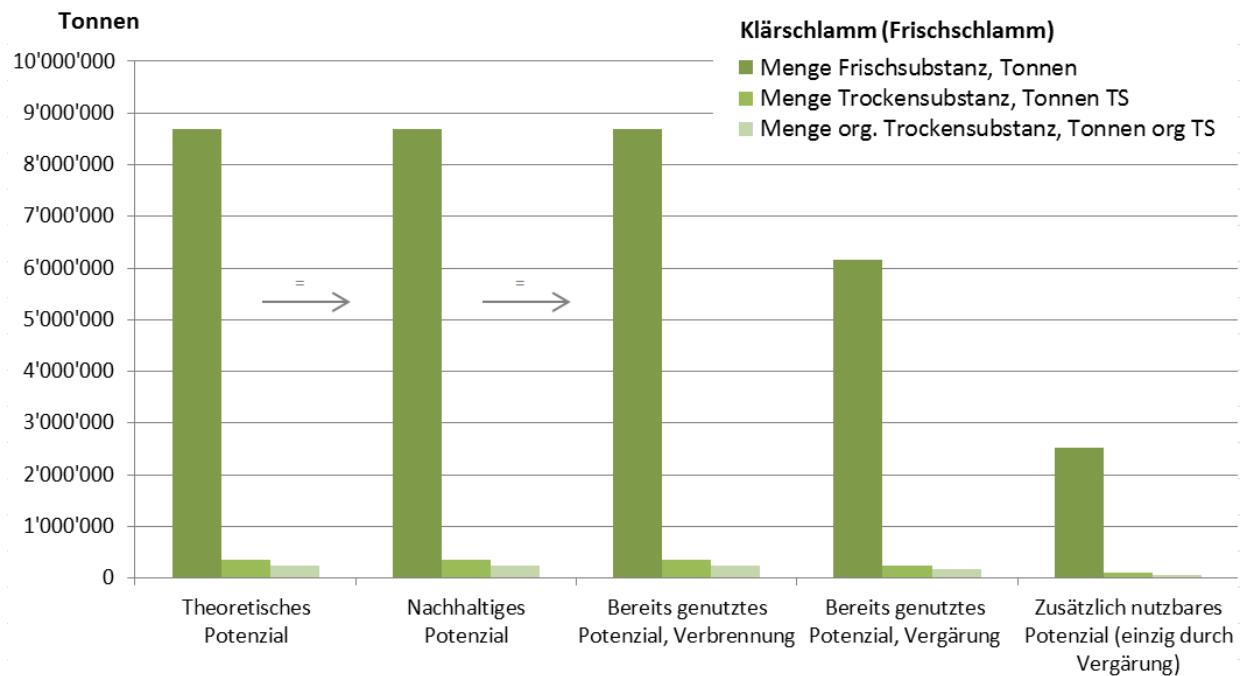


Abbildung 10: Gesamtschau der Frischschlammpotenziale, jährlich anfallende Ressourcenmenge in der Schweiz.

Abbildung 11 zeigt den Energieinhalt der verschiedenen Potenziale des jährlich in der Schweiz anfallenden Frischschlamms. Dabei wird zwischen Primärenergieinhalt und potenziellem Biomethanertrag unterschieden. Der Primärenergieinhalt des theoretischen Potenzials von Frischschlamm beträgt 4.9 PJ.

Aufgrund der gesetzlich verordneten Verbrennungspflicht (TVA, VVEA) wird heute der gesamte anfallende Klärschlamm bereits energetisch genutzt. Durch die Verwertung des potentiellen Biogasertrags durch Vergärung vor der Verbrennung kann im Sinne einer energetischen Kaskadennutzung ein zusätzliches Potenzial mobilisiert werden. Nach Abzug der Menge Frischschlamm, die bereits durch Vergärung energetisch verwertet wird, wurde ein zusätzlich nutzbarer Primärenergieinhalt von 1.4 PJ ermittelt (resp. 0.6 PJ potentieller Biomethanertrag). Umgerechnet entspricht dies dem Energieinhalt von etwa 33'000 Tonnen Rohöl (Annahme, Heizwert von Rohöl = 43.2 MJ/kg) [6].

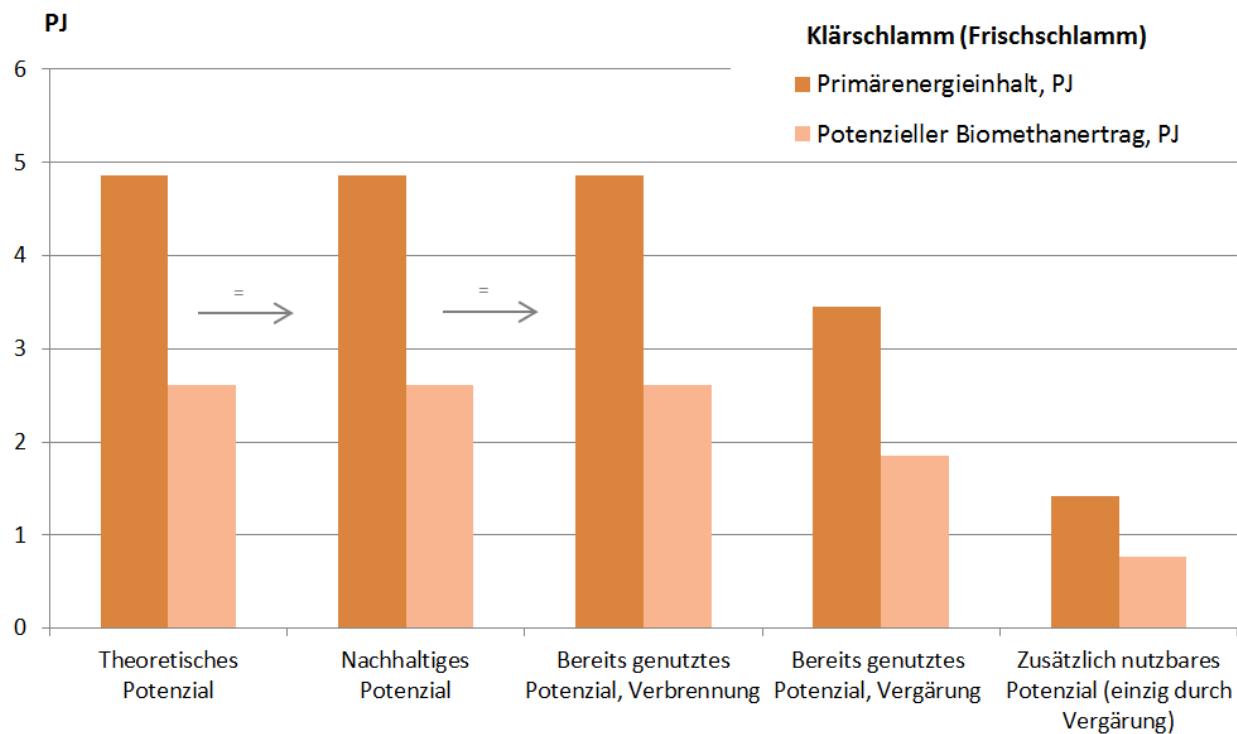


Abbildung 11: Gesamtschau der Frischschlammpotenziale, Energieinhalt der jährlich anfallenden Ressourcenmenge in der Schweiz.

4 Diskussion und Folgerungen

Durch die Behandlung des Schweizer Abwassers in zentralen Abwasserreinigungsanlagen fällt permanent Klärschlamm an. Für Biomasse, die sowieso anfällt und weiterbehandelt werden muss, ist eine möglichst optimale Ressourcenausschöpfung anzustreben. In der Schweizer Abfallverordnung (VVEA) wird eine energetische und stoffliche Nutzung des Klärschlammes nach dem Stand der Technik gesetzlich gefordert [14]. Somit hat sich die Schweiz als weltweit erstes Land eine Pflicht zur Phosphor-Rückgewinnung innert einer Frist von 10 Jahren gesetzt. Gleichzeitig soll die im Klärschlamm enthaltene Energie optimal genutzt werden. Auf den Primärenergieinhalt des Schlamms ist durch die Rückgewinnung von mineralischen Nährstoffen keine Auswirkung zu erwarten.

Gemäss unseren Berechnungen beträgt der Primärenergieinhalt des jährlich in der Schweiz anfallenden Frischschlamms total 4.9 PJ. Als Vergleich entspricht dies umgerechnet dem Energieinhalt von etwa 112'000 Tonnen Rohöl (Annahme, Heizwert von Rohöl = 43.2 MJ/kg [6]) oder 0.45% des totalen Energie-Bruttoverbrauchs der Schweiz (1108 PJ) [6]. Da der Klärschlammanfall eng mit der Anzahl Einwohner korreliert, ist in Zukunft mit einem Wachstum parallel zur Bevölkerung zu rechnen (2014: +1.2%) [8]. Zudem sind auch Weiterentwicklungen bei der Abwasserreinigung möglich, die sich auf die Schlamm- und Biogasproduktion auswirken können. So werden zurzeit zahlreiche Lösungen zur Effizienzsteigerung untersucht (Stichwort energieautarke ARA [19]).

Das gemäss unserer Studie berechnete theoretische Potenzial aus Frischschlamm ist mit den Zahlen vorliegender Literatur vergleichbar. So wurde der Primärenergieinhalt von Rohschlamm aus Siedlungen und Industrie 2006 von U. Baier auf 5.2 PJ geschätzt [3].

Heute wird bereits der gesamte Klärschlamm als erneuerbarer Energieträger verwendet und entweder als Brennstoff in Zementwerken oder zur Strom- und Fernwärmeproduktion in spezialisierten Schlamm- oder Kehrichtverbrennungsanlagen verbrannt. Bezüglich Mobilisierung der vorhandenen Ressource weist somit im Sinne einer energetischen Kaskadennutzung einzig die Vergärung des Frischschlamms vor der Verbrennung ein zusätzlich nutzbares Potenzial auf. An dieser Stelle soll auch erwähnt werden, dass Biogas im Vergleich zu Wärme und Strom speicherbar ist und somit die Vorteile bedarfsgerechter Energieerzeugung mit sich bringt. Aus Biogas lassen sich sowohl Wärme als auch Strom und Treibstoff produzieren sowie fluktuierende Mengen aus erneuerbaren Energien wie Sonne und Wind ausgleichen.

Durch das Vergären des Frischschlamms produzieren heute rund 300 Kläranlagen Biogas, das zu Strom und Wärme umgewandelt oder auf Erdgasqualität aufbereitet wird [7]. 2014 wurden somit knapp 100 Millionen m³ Klärgas (2.1 PJ Bruttoenergie) energetisch genutzt, wobei eine Stromproduktion aus Kläranlagen von 435 TJ aufgezeichnet wurde [7]. Dies entspricht etwa 5% der Netto-Elektrizitätsproduktion aus neuen erneuerbaren Energiequellen in der Schweiz (total 2.62 TWh bzw. umgerechnet 9.43 PJ) [7]. Gemäss unseren Berechnungen könnte etwa 30% mehr Klärschlamm durch Vergärung energetisch genutzt werden. Dies entspricht einer zusätzlichen Menge Klärgas mit einer Bruttoenergie von 0.6 PJ.

Auch wenn eine quantitative Erhöhung der Ressourcennutzung im Fall von Klärschlamm relativ beschränkt und nur durch Vergärung möglich ist, soll an dieser Stelle erinnert werden, dass die Effizienz und die Qualität der Wertschöpfungskette nicht Teil dieser Studie ist. So zeigen neue Erkenntnisse, dass durch Verfahrensoptimierungen (inklusive ARA Zu- und Ablauf) noch beträchtliche Potenziale zur Steigerung der Produktion von Strom, Wärme und Brennstoffen sowie zur Reduktion des Energieverbrauchs vorhanden sind. Insbesondere bei der Wärmenutzung des Abwassers besteht ein bisher weitgehend ungenutztes Potenzial [21].

Literatur

- [1] BAFU, 2005: Daten der Erhebung über den Vollzug des Gewässerschutzgesetzes, Umfrage über den Stand der kommunalen Abwasserentsorgung der Schweiz,
<http://www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/01295/01296/01297/index.html?lang=de>.
- [2] BAFU, 2012: Adressliste der Schweizer Kläranlagen mit Angaben zur Ausbaugrösse. 27.11.2012,
<http://www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/01295/01296/01298/index.html?lang=de>.
- [3] Baier, U.; Baum, S., 2006: Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006, Massen- und Energieflüsse, 114 S.
- [4] BFE, 2005: Schweizerische Statistik erneuerbarer Energieträger, Teilstatistik Biogas.
- [5] BFE, 2014: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2013,
http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/index.html?lang=de&dossier_id=00772.
- [6] BFE, 2015: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014.
- [7] BFE, 2015: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2014,
http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/?dossier_id=00772&lang=de.
- [8] BFS, 2015: Die Bevölkerung der Schweiz 2014, 32 S.,
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/news/publikationen.html?publicationID=6854>.
- [9] Burton, F.; Tchobanoglou, G.; Tsuchihashi, R.; Stensel, H.D.; Metcalf & Eddy Inc., 2013: Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 2048 S.
- [10] CemSuisse, 2013: Geschäftsbericht 2012.
- [11] Cerbe, G., 2008: Grundlagen der Gastechnik, Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung, 653 S.
- [12] Der Schweizerische Bundesrat, 2001: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern (Dünger-Verordnung, DüV), 10. Januar 2001 (Stand 01.01.2016).
- [13] Der Schweizerische Bundesrat, 2014: Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998, Stand 01.01.2014.
- [14] Der Schweizerische Bundesrat, 2015: Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA), 4.12.2015 (Stand 1.2016).
- [15] Erdgas.ch, 2013: Biogasanlagen mit Einspeisung ins Erdgas-Netz.
- [16] Gujer, W., 2007: Siedlungswasserwirtschaft, 416 S.
- [17] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), 2013: Faustzahlen Biogas, 360 S.
- [18] Maurer, M.; Herlyn, A., 2006: Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung.
- [19] Siegrist, H.; Salzgeber, D.; Eugster, J.; Joss, A., 2008: Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal, Water Science and Technology. 57(3): 383-388.
- [20] Spliethoff, H., 2010: Power Generation from Solid Fuels, 674 S.
- [21] Spörri, A.; Bühler, R.; Fölmli, I., 2016: Ressourceneffizienz in der Abwasserreinigung - Potenziale und Rahmenbedingungen zur Steigerung der Ressourcennutzung, Aqua & Gas. 1: 54-59.
- [22] Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA; Organisation Kommunale Infrastruktur OKI, 2010: Kosten und Leistungen der Abwasserentsorgung.

[23] Wendehorst, R.; Vismann, U.; Baumgartner, H., 2012: Bautechnische Zahlentafeln, 1693 S.

Anhang 1: Tabellarische Resultate auf kantonaler Ebene
Theoretisches Potenzial von Frischschlamm aus zentralen Abwasserreinigungsanlagen

NAME	Tonnen TS Frischschlamm	Tonnen OS Faulschlamm	Tonnen TS Faulschlamm	Primärenergie TJ Frischschlamm	Primärenergie TJ Faulschlamm	m3 Methan (Frischschlamm)	TJ Methan
AARGAU	27240	18160	18160	381	191	5720444	205
APPENZELL A.RH.	2079	1386	1386	29	15	4366664	16
APPENZELL I.RH.	417	278	278	6	3	87625	3
BASEL-LANDSCHAFT	9571	6381	6381	134	67	2009908	72
BASEL-STADT	12111	8074	8074	170	85	2543247	91
BERN	41627	27751	27751	583	291	8741646	314
FREIBURG	8494	56663	56663	119	59	1783741	64
GENF	20482	13655	13655	287	143	4301298	154
GLARUS	2454	1636	1636	34	17	515398	18
GRAUBUENDEN	12477	8318	8318	175	87	2620073	94
JURA	2044	1362	1362	29	14	429160	15
LUZERN	12572	8381	8381	176	88	2640063	95
NEUENBURG	6946	4631	4631	97	49	1456894	52
NIDWALDEN	2133	1422	1422	30	15	447943	16
OBWALDEN	2055	1370	1370	29	14	431616	15
SCHAFFHAUSEN	5365	3576	3576	75	38	1126594	40
SCHWYZ	4986	3324	3324	70	35	1047122	38
SOLOTHURN	11369	7580	7580	159	80	2387577	86
ST. GALLEN	19815	13210	13210	277	139	4167217	149
TESSIN	9385	6257	6257	131	66	1970805	71
THURGAU	12741	8494	8494	178	89	2675599	96
URI	1684	1122	1122	24	12	353583	13
WAADT	25488	16992	16992	357	178	5352507	192
WALLIS	32019	21346	21346	448	224	6723999	241
ZUERICH	55823	37215	37215	782	391	11722742	421
ZUG	5894	3929	3929	83	41	1237777	44
CH TOTAL	347272	231514	231514	4862	2431	72927040	2617

Anhang 2: Tabellarische Resultate, Gesamtbetrachtung Schweiz
Potenzialanalyse des Klärschlamms aus zentralen Abwasserreinigungsanlagen in der Schweiz

Klärschlamm (Frischschlamm)	Menge Frischsubstanz (Tonnen)	Menge Trockensubstanz (Tonnen TS)	Menge org. Trockensubstanz (Tonnen oTS)	Primärenergieinhalt (PJ)	Potenzieller Biomethanertrag (PJ)	Bemerkung
Theoretisches Potenzial	8'681'800	347'300	231'500	4.9	2.6	Theoretisches Potenzial
Nachhaltiges Potenzial	8'681'800	347'300	231'500	4.9	2.6	Nachhaltiges Potenzial
Bereits genutztes Potenzial	8'681'800	347'300	231'500	4.9	2.6	Bereits genutztes Potenzial, Verbrennung
Bereits genutztes Potenzial 2	6'159'500	246'400	164'200	3.5	1.9	Bereits genutztes Potenzial, Vergärung
Zusätzlich nutzbares Potenzial	2'522'300	100'900	67'300	1.4	0.8	Zusätzlich nutzbares Potenzial (einzig durch Vergärung)